



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
<<ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ>>

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Ανάλυση Της Επίδρασης Πυρκαγιάς Στη Διαδικασία Εκκένωσης
Υπόγειου Σταθμού Μετρό**

ΖΩΓΡΑΦΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ
ΕΠΙΚ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΜΠΕΝΑΡΔΟΣ ΑΝΔΡΕΑΣ**

**ΑΘΗΝΑ
ΙΟΥΝΙΟΣ, 2018**

Περιεχόμενα

1.	Εισαγωγή	1
2.	Σχεδιασμός Εκκένωσης	3
2.1.	Γενικά	3
2.2.	Μέσα Εξόδου	4
2.2.1.	Κατηγορίες Μέσων Εξόδου	4
2.2.2.	Χωρητικότητα των Μέσων Εξόδου	6
2.2.2.1.	Φορτίο Χρηστών	6
2.2.2.2.	Χωρητικότητα Εκκένωσης	7
2.2.3.	Αριθμός Μέσων Εκκένωσης	8
2.2.4.	Διάταξη Μέσων Εξόδου	8
2.2.5.	Μέτρηση της Απόστασης Μετακίνησης ως τις Εξόδους	9
2.3.	Τύποι Εκκένωσης	10
2.4.	Παράγοντες Εκκένωσης	10
2.4.1.	Βασικοί Παράγοντες Εκκένωσης	11
2.4.2.	Άλλοι Παράγοντες Εκκένωσης	11
2.5.	Παράγοντες Αποτελεσματικότητας Εκκένωσης	11
2.5.1.	Αποφάσεις	11
2.5.2.	Χρόνος Έρευνας	12
2.5.3.	Εύρεση της διαδρομής εξόδου	12
2.5.4.	Συγχώνευση Συγκρούσεων	13
2.5.5.	Αυτοσυγκράτηση	13
2.5.6.	Άνιση Χρήση των Εγκαταστάσεων Εξόδου	14
2.6.	Βασικά Χαρακτηριστικά Μετακινήσεων	14
2.7.	Τύποι Ροής	16
2.8.	Χρόνος Εκκένωσης	17
2.8.1.	Στοιχεία της Κίνησης σε Επείγουσα Κατάσταση	18
2.8.2.	Υπολογισμός του Χρόνου Καθυστέρησης	23
2.9.	Κίνηση σε Καπνό λόγω Πυρκαγιάς	23
3.	Σχεδιασμός Εκκένωσης για Υπόγειους Χώρους	25
3.1.	Εισαγωγή	25
3.2.	Υπόγειος Χώρος	25
3.3.	Υπόγειοι Χώροι για τη Μεταφορά Επιβατών Μέσω Ηλεκτροκίνητων Σιδηροδρομικών Συστημάτων Σταθερής Τροχιάς Σύμφωνα με τις Προδιαγραφές του NFPA 130	28
3.3.1.	Υπόγειοι Σταθμοί	28

3.3.2.	Μέσα Εξόδου -----	29
3.4.	Έξοδος για τους Επιβάτες -----	32
3.4.1.	Διαδικασίες Έκτακτης Ανάγκης -----	33
3.5.	Σιδηροδρομική Σήραγγα -----	34
3.5.1.	Απειλές σε Σιδηροδρομικές Σήραγγες -----	36
3.5.2.	Διαχείριση του Κινδύνου σε Σήραγγες κατά τον Κύκλο Ζωής της Σήραγγας -----	37
3.6.	Η Ανθρώπινη Συμπεριφορά -----	38
3.6.1.	Επιβάτες του Τρένου και του Μετρό -----	39
3.7.	Προηγούμενη Εμπειρία στον Υπολογισμό του Χρόνου Εκκένωσης σε Υπόγειους Σταθμούς 39	
4.	Χαρακτηριστικά Φωτιάς και Επιπτώσεις στον Άνθρωπο -----	43
4.1.	Χαρακτηριστικά Φωτιάς -----	43
4.1.1.	Στάδια της Φωτιάς -----	43
4.1.2.	Δυναμικά χαρακτηριστικά φωτιάς – Fire Dynamics -----	44
4.2.	Στατιστικά Στοιχεία από Φωτιές σε Μετρό -----	45
4.3.	Υπολογισμός HRR από μεγάλης κλίμακας πειράματα και βάση πραγματικών συμβάντων 46	
4.3.1.	Μεγάλης κλίμακας πειράματα – EUREKA project (Ingason et al. 1994) -----	46
4.3.2.	Εκτίμηση – Υπολογισμός του HRR βάση πραγματικών περιστατικών με φωτιά -----	48
4.3.3.	Μέγιστες τιμές HRR που έχουν ληφθεί στο σχεδιασμό διάφορων γραμμών μετρό -	48
4.4.	ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΦΩΤΙΑΣ ΣΤΟΝ ΑΝΘΡΩΠΟ- ΜΕΤΡΗΣΗ & ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΕΙΚΤΩΝ 49	
4.4.1.	ΔΗΛΗΤΗΡΙΑΣΗ ΛΟΓΩ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΩΝ ΑΕΡΙΩΝ (Toxicity) -----	49
4.4.2.	ΡΕΥΜΑΤΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ (ΛΟΓΩ ΣΥΝΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ) -----	52
4.4.3.	ΟΡΑΤΟΤΗΤΑ -----	54
4.4.3.1.	Δείκτης FEC -----	55
4.4.3.2.	Ταχύτητα κίνησης χρηστών βάση της ορατότητάς τους -----	55
5.	Ανάλυση των προγραμμάτων Pyrosim και Pathfinder -----	58
5.1.	Pyrosim -----	58
5.1.1.	Ανάλυση Παραμέτρων Pyrosim -----	58
5.2.	Προσομοίωση εκκένωσης με Χρήση του Προγράμματος PathFinder -----	65
5.2.1.	Περιγραφή Λειτουργίας του Προγράμματος -----	67
5.2.2.	Κίνηση Χρηστών σε Steering Mode -----	68
5.2.3.	Κίνηση με την Επιλογή SFPE -----	70
5.2.4.	Διαδικασία Επίλυσης -----	71
5.2.5.	Θεωρητικός Πληθυσμός -----	71
6.	Μετρό Θεσσαλονίκης -----	74

6.1.	Παρουσίαση του Έργου -----	74
6.2.	Ιστορική αναδρομή-----	75
6.3.	Περιγραφή του Έργου -----	76
6.4.	Η Γεωλογία του Έργου και οι Μέθοδοι Κατασκευής -----	78
6.5.	Στοιχεία του Σταθμού Μετρό Σιντριβάνι -----	80
7.	Ανάλυση εκκένωσης υπό πυρκαγιά -----	84
7.1.	Ανάλυση των χαρακτηριστικών του σταθμού Σιντριβάνι -----	84
7.1.1.	Συμμόρφωση των μέσων διαφυγής προς τις ελάχιστες γεωμετρικές απαιτήσεις----	84
7.1.2.	Υπολογισμός του φορτίου του σταθμού κατά την εκκένωση -----	85
7.1.3.	Ανάλυση χρόνου εκκένωσης βάση του NFPA 130 (Pen & Paper)-----	87
7.2.	Σενάρια πυρκαγιάς -----	89
7.2.1.	1 ^ο Σενάριο-----	89
7.2.2.	2 ^ο Σενάριο-----	91
7.2.3.	3 ^ο Σενάριο-----	93
7.3.	Προσομοίωση του σταθμού και της φωτιάς στο Pyrosim-----	94
7.4.	Προσομοίωση του σταθμού και της εκκένωσης στο Pathfinder-----	97
7.5.	Έλεγχος διαδικασίας και αποτελεσμάτων της Εκκένωσης -----	99
8.	Αποτελέσματα-----	101
8.1.	Αποτελέσματα Pyrosim-----	101
8.1.1.	1 ^ο Σενάριο-----	101
8.1.2.	2 ^ο Σενάριο-----	104
8.1.3.	3 ^ο Σενάριο-----	109
8.2.	Αποτελέσματα Pathfinder -----	114
8.2.1.	Παράδειγμα ανάλυσης εκκενώσεις για το 3 ^ο Σενάριο -----	115
8.2.1.1.	Κίνηση χρηστών με τη ρύθμιση SFPE για το 3 ^ο Σενάριο -----	115
8.2.1.2.	Κίνηση χρηστών με τη ρύθμιση Steering Mode για το 3 ^ο Σενάριο -----	117
8.3.	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για του χρόνους εκκένωσης-----	120
8.4.	Αξιολόγηση επιπτώσεων της φωτιάς στους χρήστες του σταθμού -----	123
9.	Συμπεράσματα-----	126

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Συντελεστής Φορτίου Χρηστών (Cote, Harrington, 2009)	7
Πίνακας 2.2: Συντελεστές Χωρητικότητας (Cote, Harrington 2009)	7
Πίνακας 2.3: Διαθέσιμος χρόνος εκκένωσης υπόγειου χώρου για διαφορετικές επείγουσες καταστάσεις (Κυρίτσης, 2010).....	21
Πίνακας 2.4: Παράγοντες επιρροής των επιμέρους χρόνων στην περίπτωση πυρκαγιάς (Κυρίτσης, 2010)	21
Πίνακας 2.5: Χρόνος t_a για διαφορετικές κατηγορίες συστήματος συναγερμού στην περίπτωση πυρκαγιάς (Κυρίτσης, 2010).....	22
Πίνακας 2.6: Χρόνοι t_o και t_i σε min για διαφορετικές κατηγορίες συστήματος συναγερμού στην περίπτωση πυρκαγιάς (Κυρίτσης, 2010)	22
Πίνακας 3.1 Χρόνος που απαιτείται για την εκκένωση κάτω από διαφορετικές συνθήκες.....	41
Πίνακας 4.1: Αίτιο της Φωτιάς (Tipping 2004).....	46
Πίνακας 4.2: Τιμές HRR για το σχεδιασμό του συστήματος εξαερισμού έκτακτης ανάγκης (Boon Hui Chiam, 2005).....	49
Πίνακας 4.3: Τιμές των σταθερών K και D ανάλογα με τη δραστηριότητα του ανθρώπου (Purser.2002)	50
Πίνακας 4.4: Ενδεικτικά όρια αντοχής σε συγκέντρωση μονοξειδίου του άνθρακα (engineeringtoolbox.com).....	52
Πίνακας 4.5: Τιμές των K1 και K2 ανάλογα τον τύπο του ρουχισμού (P. Raj, 2008)	53
Πίνακας 4.6: Χρόνοι ανοχής σε διάφορες ροές ακτινοβολίας και θερμοκρασίες αέρα (SFPE,2016)	54
Πίνακας 5.1: Ανάλυση παραμέτρων της επιφάνειας τύπου Burner (PyroSim Manual 2017)	60
Πίνακας 5.2: Ταχύτητα κίνησης σε οριζόντια επιφάνεια (SFPE)	72
Πίνακας 5.3:Ταχύτητα κίνησης σε σκάλες (SFPE)	73
Πίνακας 6.1: Εξέλιξη των εργασιών κατασκευής των σταθμών (wikipedia.org/wiki/ Μετρό_Θεσσαλονίκης).....	77
Πίνακας 6.2: Προβλεπόμενες θέσεις στάθμευσης και η κατανομή τους ανά περιοχή (wikipedia.org/wiki/Μετρό Θεσσαλονίκης).....	77
Πίνακας 7.1: Πλάτος μέσων διαφυγής σε κάθε επίπεδο του σταθμού	85
Πίνακας 7.2: Εκτιμώμενο φορτίο την ώρα αιχμής	85
Πίνακας 7.3: Υπολογισμοί για το φορτίο της εκκένωσης του σταθμού.....	86
Πίνακας 7.4: Χωρητικότητα ροής (Capacity flow) των στοιχείων διαφυγής.....	87
Πίνακας 7.5: Χρόνοι διαφυγής μέσω των διαδρομών εξόδου κάθε επιπέδου του σταθμού	88
Πίνακας 7.6: Σύγκριση χρονών εκκένωσης.....	89
Πίνακας 7.7: Στοιχεία για τα σενάρια της φωτιάς	89
Πίνακας 7.8: : Θερμοδυναμικές ιδιότητες κηροζίνης	90
Πίνακας 7.9: Οι τιμές του ρυθμού έκλυσης θερμότητας της κηροζίνης που εισήχθησαν στο Pyrosim	91
Πίνακας 7.10:Θερμοδυναμικές ιδιότητες ακόρεστου πολυεστέρα	92
Πίνακας 7.11: Οι τιμές του ρυθμού έκλυσης θερμότητας του σεναρίου 2 που εισήχθησαν στο Pyrosim.....	93
Πίνακας 7.12: Οι τιμές του ρυθμού έκλυσης θερμότητας του σεναρίου 3 που εισήχθησαν στο Pyrosim.....	94
Πίνακας 7.13: Το φορτίο του σταθμού κατά τη διάρκεια της εκκένωσης.....	97
Πίνακας 7.14: Ταχύτητα κίνησης ανάλογα την ορατότητα	98

Πίνακας 8.1: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Σενάριου 2	109
Πίνακας 8.2: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Σενάριου 3	114
Πίνακας 8.3: Συγκεντρωτικός πίνακας συμβολισμών και η αντίστοιχη ερμηνεία τους	115
Πίνακας 8.4: Χρόνοι εκκένωσης βάση ρύθμισης SFPE	120
Πίνακας 8.5: Χρόνοι εκκένωσης βάση ρύθμισης Steering Mode	120
Πίνακας 8.6: Χρήση των σκάλων της αποβάθρας στο σενάριο 1 με ρύθμιση Steering Mode	122
Πίνακας 8.7: Χρήση των σκάλων της αποβάθρας στο σενάριο 2 με ρύθμιση Steering Mode	122
Πίνακας 8.8: Χρήση των σκάλων της αποβάθρας στο σενάριο 2 με ρύθμιση Steering Mode	122
Πίνακας 8.9: Αναλυτικοί χρόνοι εκκένωσης βάση ρύθμισης Steering Mode	123
Πίνακας 8.10: Στοιχεία για τον δυσμενέστερο χρήστη των σεναρίων από τις αναλύσεις με Steering Mode	125
Πίνακας 9.1: Συγκεντρωτικά αποτέλεσμα των σεναρίων φωτιάς	127
Πίνακας 9.2: Χρόνοι εκκένωσης βάση ρύθμισης Steering Mode	128
Πίνακας 9.3: Αναλυτικοί χρόνοι εκκένωσης βάση ρύθμισης Steering Mode	128
Πίνακας 9.4: Στοιχεία του δυσμενέστερου χρήστη κάθε σεναρίου κατά τη διάρκεια της εκκένωσης.	129

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2.1: Παράδειγμα «κοινής διαδρομής μετακίνησης» (Cote, Harrington, 2009)	9
Εικόνα 2.2: Παράδειγμα αδιεξόδου (Cote, Harrington, 2009)	9
Εικόνα 2.3: Απεικόνιση του χρόνου αντίδρασης σε περίπτωση φωτιάς (SFPE, 2002)	20
Εικόνα 3.1: Κάτοψη αναπτυσσόμενου υπόγειου χώρου (NFPA 520, 1999)	26
Εικόνα 3.2: Σήραγγα διαφυγής σε δίδυμη σήραγγα (Tarada, 2000)	32
Εικόνα 3.3: Πόρτα που οδηγεί στην έξοδο κινδύνου (Tarada, 2000)	32
Εικόνα 3.4: Στάδια διαχείρισης των κινδύνων (ΟΔΗΓΙΑ 96/48/ΕΚ)	35
Εικόνα 3.5: Αποτύπωση σιδηροδρομικών κινδύνων (ΟΔΗΓΙΑ 96/48/ΕΚ)	36
Εικόνα 4.1: Τρίγωνο της φωτιάς (fire triangle) (edplace.com)	43
Εικόνα 4.2: Στάδια κατά τη διάρκεια της φωτιάς (tathrafirebrigade.org)	44
Εικόνα 4.3: ενδεικτικά όρια αντοχής σε συγκέντρωση μονοξειδίου του άνθρακα (AFAC,2010)	51
Εικόνα 4.4: Ενδεικτικά όρια αντοχής σε διάφορες θερμοκρασίες (AFAC,2010)	54
Εικόνα 5.1 : Καρτέλα εισαγωγής επιφανειών	59
Εικόνα 5.2: Εισαγωγή παραμέτρων για Burner	60
Εικόνα 5.3: Καρτέλα εισαγωγής στοιχειομετρίας αντίδρασης	62
Εικόνα 5.4: Καρτέλα ενεργοποίησης επιλογής Fire Suppression	62
Εικόνα 5.5: Καρτέλα επιλογής ιδιοτήτων προϊόντων καύσης	63
Εικόνα 5.6: Καρτέλα επιλογής συσκευής	63
Εικόνα 5.7: Καρτέλα επιλογής Slices	64
Εικόνα 5.8: Καρτέλα επιλογής Plot3D Data	65
Εικόνα 5.9: Περιβάλλον εργασίας Pathfinder	66
Εικόνα 5.10: Τρόπος εισαγωγής αρχείου CAD	66
Εικόνα 5.11: Τρόποι αποτυπώσεις χρηστών	67
Εικόνα 5.12: Προγραμματισμένη διαδρομή του χρήστη με τα τελικά σημεία (Pathfinder Technical Reference,2013)	67
Εικόνα 5.13: Πέντε διευθύνσεις κίνησης (Pathfinder Technical Reference, 2013)	69
Εικόνα 5.14: Οι χρήστες κινούνται όλοι μαζί προς μία στενή έξοδο (αριστερά), οι επιβάτες κινούνται αντίθετα σε ένα γεμάτο διάδρομο (δεξιά) (Pathfinder Technical Reference, 2013)	70
Εικόνα 6.1: Σχηματική απεικόνιση του ΜΕΤΡΟ Θεσσαλονίκης (Βαζαίος, 2013)	74
Εικόνα 6.2:Γεωλογική τομή κατά μήκος του βασικού έργου του ΜΕΤΡΟ Θεσσαλονίκης (Βαζαίος, 2013)	78
Εικόνα 6.3: Σχηματική απεικόνιση της καθαρής διατομής σήραγγας μονής τροχιάς (Βαζαίος, 2013)	79
Εικόνα 6.4:Κάτοψη στάθμης 0 (επίπεδο οδού) σταθμού Σιντριβάνι (Αττικό Μετρό)	81
Εικόνα 6.5: Κάτοψη στάθμης -1 (επίπεδο έκδοσης εισιτηρίων) σταθμού Σιντριβάνι (Αττικό Μετρό)	82
Εικόνα 6.6: Κάτοψη στάθμης -2 (επίπεδο Η/Μ χώρων) σταθμού Σιντριβάνι (Αττικό Μετρό)	82
Εικόνα 6.7: Κάτοψη στάθμης -3 (επίπεδο Η/Μ χώρων) σταθμού Σιντριβάνι (Αττικό Μετρό)	82
Εικόνα 6.8: Σχήμα 8.4: Κάτοψη στάθμης -4 (επίπεδο αποβάθρων) σταθμού Σιντριβάνι (Αττικό Μετρό)	83
Εικόνα 6.9:Διαμήκης τομή σταθμού Σιντριβάνι (Αττικό Μετρό)	83
Εικόνα 6.10: Εγκάρσια τομή σταθμού Σιντριβάνι (Αττικό Μετρό)	83
Εικόνα 7.1: Κατοψη της αποβαθρας του σταθου	85
Εικόνα 7.2: Εστία φωτιάς για το πρώτο σενάριο	90
Εικόνα 7.3: Εστία φωτιάς για το δεύτερο σενάριο	92

Εικόνα 7.4: Προσομοίωση του σταθμού Σιντριβάνι στο Pyrosim -----	94
Εικόνα 7.5: Συσκευές στην πλατφόρμα του σταθμού-----	95
Εικόνα 7.6: Αποτύπωση των Slices στο αρχείο Smokeview -----	96
Εικόνα 7.7: Προσομοίωση του σταθμού Σιντριβάνι στο Pathfinder -----	97
Εικόνα 7.8: Καρτέλα εισαγωγής του Speed Modifier-----	98
Εικόνα 7.9: Παρουσίαση αποτελεσμάτων σε φύλλο excel-----	99
Εικόνα 7.10: Οριακές τιμές των δεικτών FED (AFC 2010) -----	100
Εικόνα 8.1: SLICES για την ορατότητα το χρόνο 420sec (σενάριο 1)-----	103
Εικόνα 8.2: SLICES για τη θερμοκρασία το χρόνο 420sec (σενάριο 1)-----	104
Εικόνα 8.3: SLICES για την ορατότητα το χρόνο 120 sec (σενάριο 2)-----	107
Εικόνα 8.4: SLICES για την ορατότητα το χρόνο 180 sec (σενάριο 2)-----	107
Εικόνα 8.5: SLICES για τη θερμοκρασία το χρόνο 420sec (σενάριο 2)-----	108
Εικόνα 8.6: SLICES για τη πυκνότητα του CO το χρόνο 420sec (σενάριο 2)-----	108
Εικόνα 8.7: SLICES για την ορατότητα το χρόνο 110 sec (σενάριο 3)-----	112
Εικόνα 8.8: SLICES για την ορατότητα το χρόνο 140 sec (σενάριο 3)-----	112
Εικόνα 8.9: : SLICES για τη θερμοκρασία το χρόνο 540sec (σενάριο 3)-----	113
Εικόνα 8.10: SLICES για τη πυκνότητα του CO το χρόνο 540sec (σενάριο 3)-----	113
Εικόνα 8.11: Στιγμιότυπα τη χρονική στιγμή 11 sec από δυο αναλύσεις αριστερά με SFPE και δεξιά με Steering -----	121
Εικόνα 8.12: Στιγμιότυπα τη χρονική στιγμή 22 sec από δυο αναλύσεις αριστερά με SFPE και δεξιά με Steering -----	121

Κατάλογος Γραφημάτων

Γράφημα 2.1: Συσχέτιση ταχύτητας και πυκνότητας για κίνηση σε σκάλες σε ανεξέλεγκτες ολικές/πλήρεις εκκενώσεις (SFPE, 2002) -----	15
Γράφημα 2.2: Συσχέτιση ροής και πυκνότητας για κίνηση σε σκάλες σε ανεξέλεγκτες ολικές/πλήρεις εκκενώσεις (SFPE, 2002) -----	15
Γράφημα 2.3: Ειδική ροή συναρτήσει της πυκνότητας (SFPE, 2002) -----	17
Γράφημα 4.1: Καμπύλη HRR για βαγόني τραίνου από τα πειράματα EUREKA -----	47
Γράφημα 4.2: Καμπύλη HRR για βαγόني μετρό από τα πειράματα EUREKA -----	47
Γράφημα 4.3: Συσχέτιση της ορατότητας (visibility) με το συντελεστή εξάλειψης (extinction coefficient) (FIT 2015)-----	56
Γράφημα 4.4: Ταχύτητα κίνησης βάση πυκνότητας καπνού (FIT 2015)-----	56
Γράφημα 4.5: Ταχύτητα κίνησης βάση πυκνότητας καπνού (SFPE, 2016) -----	56
Γράφημα 4.6: Ταχύτητα κίνησης βάση ορατότητας σε ερεθιστικό καπνό -----	57
Γράφημα 7.1: Ρυθμός έκλυσης θερμότητας της pool fire (Chow et.al 2001) -----	91
Γράφημα 7.2: Ρυθμός έκλυσης θερμότητας από την κηροζίνη -----	91
Γράφημα 7.3: Εκτιμώμενοι ρυθμοί έκλυσης θερμότητας βάση πειραματικών δεδομένων (Ran Gao et.al 2015) -----	93
Γράφημα 7.4: Ρυθμός έκλυσης θερμότητας για το σενάριο 2 -----	93
Γράφημα 7.5: Ρυθμός έκλυσης θερμότητας για το σενάριο 3 -----	94
Γράφημα 8.1: HRR εστίας πρώτου σεναρίου -----	101
Γράφημα 8.2: Ορατότητας στους χώρους του σταθμού κατά την εκκένωση (σενάριο 1) -----	102
Γράφημα 8.3: Θερμοκρασία στους χώρους του σταθμού κατά την εκκένωση (σενάριο 1) -----	102
Γράφημα 8.4: HRR εστίας δευτέρου σεναρίου -----	104
Γράφημα 8.5: Ορατότητα στους χώρους του σταθμού κατά την εκκένωση (σενάριο 2) -----	105
Γράφημα 8.6: Θερμοκρασία στους χώρους του σταθμού κατά την εκκένωση (σενάριο 2) -----	105
Γράφημα 8.7: Συγκέντρωση CO στους χώρους του σταθμού κατά την εκκένωση (σενάριο 2) ----	106
Γράφημα 8.8: HRR εστίας τρίτου σεναρίου -----	109
Γράφημα 8.9: Θερμοκρασία στους χώρους του σταθμού κατά την εκκένωση (σενάριο 3) -----	110
Γράφημα 8.10: Ορατότητα στους χώρους του σταθμού κατά την εκκένωση (σενάριο 3) -----	110
Γράφημα 8.11: Συγκέντρωση CO στους χώρους του σταθμού κατά την εκκένωση (σενάριο 3) ---	111
Γράφημα 8.28: Πλήθος χρηστών που εκκενώνουν τον χώρο συναρτήσει του χρόνου -----	116
Γράφημα 8.29: Πλήθος χρηστών στις σκάλες για την εκκένωση της αποβάθρας συναρτήσει του χρόνου -----	116
Γράφημα 8.30: Πλήθος χρηστών που εκκενώνουν τον χώρο συναρτήσει του χρόνου -----	117
Γράφημα 8.31: Πλήθος χρηστών στις σκάλες για την εκκένωση της αποβάθρας συναρτήσει του χρόνου -----	117
Γράφημα 8.32: Πλήθος χρηστών που εκκενώνουν τον χώρο συναρτήσει του χρόνου -----	118
Γράφημα 8.33: Πλήθος χρηστών στις σκάλες για την εκκένωση της αποβάθρας συναρτήσει του χρόνου -----	118
Γράφημα 8.34: Πλήθος χρηστών που εκκενώνουν τον χώρο συναρτήσει του χρόνου -----	119
Γράφημα 8.35: Πλήθος χρηστών στις σκάλες για την εκκένωση της αποβάθρας συναρτήσει του χρόνου -----	119

Περίληψη

Μία από τις σημαντικές παραμέτρους που υπεισέρχονται στη μελέτη και το σχεδιασμό των υπογείων έργων είναι ο τομέας της ασφάλειας και ειδικότερα η διαδικασία εκκένωσης του υπόγειου χώρου κατά το στάδιο της λειτουργίας στην περίπτωση που προκύψει μία επείγουσα κατάσταση. Στη συγκεκριμένη εργασία γίνεται παρουσίαση των στοιχείων του σχεδίου ασφαλείας και του σχεδίου εκκένωσης των υπογείων. Επίσης, περιγράφονται όλα τα στοιχεία που συνθέτουν τη διαδικασία της εκκένωσης, αναλύονται οι παράμετροι που επηρεάζουν και καθορίζουν την διαδικασία της εκκένωσης. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη περίπτωση φωτιάς και πως αυτή επηρεάζει το σχεδιασμό της εκκένωσης σε κάθε περίπτωση. Στη συνέχεια, γίνεται παρουσίαση της διαδικασίας μοντελοποίησης της φωτιάς και της εκκένωσης και περιγράφονται οι βασικές αρχές που χρησιμοποιούνται από τα σχετικά μοντέλα προσομοίωσης.

Τα προαναφερθέντα θέματα και η διαδικασία της εκκένωσης διερευνήθηκαν στην παρούσα εργασία στο πλαίσιο ενός συγκεκριμένου υπόγειου χώρου, του Σταθμού «Σιντριβάνι» του Μετρό Θεσσαλονίκης. Αρχικά, διερευνήθηκε η επάρκεια και η συμμόρφωση με τις κανονιστικές διατάξεις των κατασκευαστικών στοιχείων του σταθμού. Στη συνέχεια, δημιουργήθηκαν τρία σενάρια φωτιάς με διαφορετικά θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά και διαφορετική θέση της εστίας φωτιάς. Η προσομοίωση της φωτιάς και η εξάπλωση των προϊόντων της στο σταθμό έγιναν με τη χρήση του λογισμικού Pyrosim. Ενώ όλα τα σενάρια εκκένωσης προσομοιώθηκαν με το λογισμικό Pathfinder. Καλό είναι να τονιστεί ότι τα αποτελέσματα του προγράμματος δυναμικής προσομοίωσης της φωτιάς εισάγονται στο πρόγραμμα εκκένωσης ώστε να εξεταστεί η επιρροή των σεναρίων αυτών στα σενάρια και στο χρόνο εκκένωσης. Ενδεικτικά, από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν προκύπτει ότι η φωτιά επηρεάζει αρνητικά την διαδικασία της εκκένωσης διότι αυξάνει τον χρόνο εκκένωσης και δημιουργεί επικίνδυνο περιβάλλον στον χρήστη. Ο χρόνος εκκένωσης του σταθμού στο δυσμενέστερο σενάριο φωτιάς υπολογίστηκε από την προσομοίωση 545 δευτερόλεπτα ενώ στην περίπτωση που δεν υπάρχει φωτιά υπολογίστηκε μόλις 211 δευτερόλεπτα. Το περιβάλλον που διαμορφώνεται στον σταθμό εξαιτίας της φωτιάς δεν επηρεάζει σημαντικά την σωματική ακεραιότητα των χρηστών πάρα μόνο την ορατότητα τους.

Abstract

One of the important parameters involved in the study and design of underground structures is the security sector and particularly, the evacuation process of the underground space in the event of emergency. In the current study, both the elements of the security and the evacuation plans are presented. Furthermore, the elements that make up the process of evacuation are described, the parameters which influence and determine the discharge are analyzed. Great emphasis is placed on the impact that a fire incident has on the planning of evacuation. Then, the modeling process of evacuation is presented and the basic principles used by simulation models on this process are described.

The above issues and the process of evacuation were investigated in the context of a particular underground project, the Station "Sintrivani" in Thessaloniki Metro with the evacuation simulation software Pathfinder. Initially, the adequacy and compliance with the regulations of the construction provisions was investigated. After that, three different fire incident scenarios were created, with different thermodynamic features and different positions of the fire. The simulation of the fire and its spread in the station was made with the use of Pyrosim software, while for all the evacuation scenarios the Pathfinder software was used. What is worth mentioning is that the results of the fire simulator are inserted in the evacuation software so that their influence on the evacuation time can be examined. The analysis of the results shows that the fire influences negatively the evacuation process since the evacuation time increases and the atmosphere becomes dangerous for the population. The evacuation time of the station at the worst fire scenario is calculated by the simulator at 545 seconds while in the absence of fire the evacuation time is at 211 seconds. The setting which is created because of the fire doesn't significantly influence the physical integrity of the occupants but it influences their visibility.

1. Εισαγωγή

Η τεχνολογική εξέλιξη, η αύξηση του πληθυσμού, η αστικοποίηση και η αύξηση των δυνατοτήτων και του εύρους παρέμβασης του ανθρώπου στο περιβάλλον έχουν συμβάλει καθοριστικά στην ανάπτυξη των υπογείων έργων. Ειδικά, σε έντονα αστικοποιημένο περιβάλλον, υψηλής δόμησης τα υπόγεια έργα αποτέλεσαν εργαλείο και μοχλό για την ενίσχυση ή την βελτίωση της ποιότητας ζωής. Βασικό στοιχείο που υπεισέρχεται στη μελέτη και το σχεδιασμό των υπογείων έργων είναι ο τομέας της ασφάλειας. Συγκεκριμένα, λόγω των ειδικών χαρακτηριστικών του υπογείου χώρου και προκειμένου να κατακτηθεί εμπιστοσύνη στο επίπεδο ασφάλειας που παρέχεται στους χρήστες τους ο τομέας της ασφάλειας αποτελεί βασική συνιστώσα που υπόκειται σε συγκεκριμένες κανονιστικές διατάξεις. Κομβικό σημείο για το επίπεδο ασφάλειας του έργου είναι η διαδικασία εκκένωσης του υπογείου χώρου σε περίπτωση επείγουσας κατάστασης. Ενδεικτικά, ως επείγουσες καταστάσεις μπορούν να προκληθούν από: πυρκαγιά, πλημμύρα, σεισμό, κατάρρευση των επικοινωνιών, ραδιενεργό ατύχημα, έκρηξη.

Η εκκένωση περιλαμβάνει τη σχεδιασμένη, ομαλή και συντονισμένη κυκλοφορία των ατόμων από μια ανασφαλή ή ενδεχομένως μη ασφαλή τοποθεσία σε μία ασφαλέστερη τοποθεσία και την ενδεχόμενη επιστροφή τους. Πρόκειται για ένα από τα πιο σημαντικά μέτρα για το μετριασμό των επιπτώσεων σε ανθρώπινες απώλειες και βλάβες υγείας από μια φυσική καταστροφή. Η σημασία της εκκένωσης είναι καθοριστική και αποτελεί βασικό παράγοντα για την επάρκεια του επιπέδου ασφάλειας. Γι' αυτό η σύνταξη ολοκληρωμένου σχεδίου εκκένωσης σε ένα υπόγειο χώρο το οποίο συμμορφώνεται με τις κανονιστικές διατάξεις συνιστά βασική υποχρέωση για το μελετητή ενός υπογείου έργου. Οι απαιτήσεις ασφαλείας και οι προδιαγραφές της εκκένωσης στα υπόγεια έργα είναι αυξημένες λόγω των ιδιαιτεροτήτων που παρουσιάζονται τόσο στις κατασκευαστικές διατάξεις των έργων όσο και στην διαφορετική συμπεριφορά-απόκριση των χρηστών σε σχέση με τα επίγεια τεχνικά έργα.

Στη παρούσα εργασία γίνεται αρχικά μια παρουσίαση των στοιχείων του σχεδίου ασφαλείας και του σχεδίου εκκένωσης των υπογείων χώρων. Έπειτα προσδιορίζονται διάφορα σενάρια φωτιάς σε σταθμό μετρό και η επίπτωση των προϊόντων της καύσης στον άνθρωπο. Στη συνέχεια εκτελούνται κάποιες αναλύσεις για την εξάπλωση της φωτιάς και των προϊόντων της σε ένα συγκεκριμένο υπόγειο χώρο το Σταθμό «Σιντριβάνι» του Μετρό Θεσσαλονίκης με το λογισμικό προσομοίωσης Pyrosim. Έπειτα πραγματοποιούνται προσομοιώσεις για την εκκένωση του σταθμού με τη χρήση του προγράμματος Pathfinder χρησιμοποιώντας πάντα τα αποτελέσματα των αναλύσεων που έδωσε το Pyrosim για κάθε διαφορετικό σενάριο. Τα αποτελέσματα του προγράμματος δυναμικής προσομοίωσης φωτιάς εισάγονται στο πρόγραμμα εκκένωσης ώστε να εξεταστεί η επιρροή των σεναρίων φωτιάς στο χρόνο εκκένωσης. Τέλος γίνεται αξιολόγηση και σχολιασμός της όλης διαδικασίας της εκκένωσης βάση των χρόνων της και κάποιων δεικτών που δειχθούν ποσό επηρεάζεται η υγεία των χρηστών του σταθμού κατά την εκκένωση.

Συγκεκριμένα, στο 2^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται και περιγράφονται τα στοιχεία που συνθέτουν τη διαδικασία της εκκένωσης, αναλύονται οι παράμετροι που επηρεάζουν και καθορίζουν την εκκένωση, ενώ δίνεται έμφαση στο χρόνο της εκκένωσης που αποτελεί βασικό κριτήριο για τον έλεγχο του αποτελεσματικού σχεδιασμού της διαδικασίας. Στη συνέχεια γίνεται παρουσίαση των παραμέτρων που λαμβάνονται υπόψη για το σχεδιασμό της εκκένωσης και περιγράφονται τα μέσα εξόδου, οι τύποι εκκένωσης και οι παράγοντες αποτελεσματικότητας της εκκένωσης. Τέλος δίνονται οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του σχεδίου εκκένωσης και ειδικότερα, στα χαρακτηριστικά των μετακινήσεων στο χώρο (ροή στο χώρο) και στο χρόνο της εκκένωσης.

Στο 3^ο Κεφάλαιο γίνεται ειδική αναφορά στην εκκένωση στους υπόγειους χώρους, παρουσιάζονται παραδείγματα από διαδικασίες εκκένωσης σε υπόγεια έργα και παρατίθενται στοιχεία από τη σχετική νομοθεσία και τις διατάξεις των κανονισμών. Στη συνέχεια γίνεται παρουσίαση της διαδικασίας μοντελοποίησης της εκκένωσης και περιγράφονται οι βασικές αρχές που χρησιμοποιούνται από σχετικά μοντέλα προσομοίωσης της συγκεκριμένης διαδικασίας.

Στο 4^ο Κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά της φωτιάς, στα στάδια εξέλιξης της και στα προϊόντα που παράγονται κατά την διαδικασία της καύσης. Μετά παρατίθενται κάποια στατιστικά στοιχεία από διάφορα περιστατικά με φωτιά σε μετρό από όλο το κόσμο και κάποιο δεδομένα από πειράματα που έχουν γίνει για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών της φωτιάς σε συρμούς μετρό. Τέλος παρουσιάζονται οι επιπτώσεις που έχει η φωτιά και τα προϊόντα της στον άνθρωπό, μαζί με κάποιους δείκτες που ποσοτικοποιούν αυτή την επιρροή.

Στο 5^ο Κεφάλαιο περιγράφονται και αναφέρονται τα στοιχεία του προγράμματος Pyrosim που χρησιμοποιήθηκαν για να προσομοιωθεί η φωτιά και η εξάπλωση των προϊόντων της στο σταθμό. Επίσης περιγράφονται και αναφέρονται στοιχεία για τη μοντελοποίηση της διαδικασίας της εκκένωσης, τα χαρακτηριστικά του προγράμματος Pathfinder που προσομοιώνει την εκκένωση και οι βασικές αρχές που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση της συγκεκριμένης εργασίας.

Στο 6^ο Κεφάλαιο γίνεται αναφορά στο έργο του Μετρό Θεσσαλονίκης και συγκεκριμένα στο Σταθμό «Σιντριβάνι» για τον οποίο πραγματοποιήθηκαν οι αναλύσεις για την προσομοίωση της φωτιάς στο πρόγραμμα Pyrosim και για την προσομοίωση της εκκένωσης με το πρόγραμμα Pathfinder.

Στο 7^ο Κεφάλαιο περιγράφεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την πραγματοποίηση της εργασίας. Στην αρχή γίνεται έλεγχος αν ο εξεταζόμενος σταθμός μετρό πληροί όλες τις προϋποθέσεις που θέτουν οι κανονισμοί. Στη συνέχεια περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την προσομοίωση του σταθμού και της φωτιάς στο Pyrosim. Ακολουθεί η αναφορά στην προσομοίωση του σταθμού και της εκκένωσης από το Pathfinder. Τέλος πως έγινε ο έλεγχος των αποτελεσμάτων της εκκένωσής.

Στο 8^ο Κεφάλαιο, γίνεται η παρουσίαση των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν με τα συγκεκριμένα προγράμματα για τα διαφορετικά σενάρια που εξετάστηκαν. Συγκεκριμένα έγιναν 3 αναλύσεις στο πρόγραμμα Pyrosim, στις οποίες αλλάζαν τα χαρακτηριστικά της φωτιάς (αντίδραση, καμπύλη HRR και προϊόντα καύσης). Ενώ στο πρόγραμμα Pathfinder πραγματοποιήθηκαν 13 αναλύσεις, στις οποίες αλλάζαν οι συνθήκες της εκκένωσης ανάλογα με το σενάριο που εξετάζοταν και το αν η κίνηση των χρηστών στο χώρο ήταν προκαθορισμένη ή όχι. Με τον ορό προκαθορισμένη κίνηση χρηστών εννοείται ότι η διαδρομή διαφυγής που ακολουθεί ένας χρήστης ή μια ομάδα χρηστών του σταθμού είναι χαραγμένη από το μελετητή και δεν υπολογίζεται βάση του προγράμματος εκκένωσης. Επίσης, γίνεται παρουσίαση της διερεύνησης της επάρκειας και συμμόρφωσης με τις κανονιστικές διατάξεις των κατασκευαστικών διατάξεων. Τέλος για τις αναλύσεις παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν με τη μορφή πινάκων και γραφημάτων.

Στο 9^ο Κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση και ο σχολιασμός των συμπερασμάτων που εξήχθησαν από τη συγκεκριμένη εργασία.

2. Σχεδιασμός Εκκένωσης

2.1. Γενικά

Βασικό στοιχείο του σχεδίου ασφαλείας αποτελεί το σχέδιο εκκένωσης, καθώς η έγκαιρη και οργανωμένη απομάκρυνση του πληθυσμού, από την περιοχή εμφάνισης ενός κρίσιμου συμβάντος, είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος μείωσης των επιπτώσεων και συνεπώς του συνολικού κινδύνου (OSHA, 2001). Συγκεκριμένα, σε περίπτωση πυρκαγιάς, μία άμεση εκκένωση σε μια προκαθορισμένη περιοχή μακριά από την εγκατάσταση μπορεί να είναι αναγκαία. Μία ανοργάνωτη διαδικασία εκκένωσης μπορεί να οδηγήσει σε σύγχυση, στην αύξηση του απαιτούμενου χρόνου, σε εγκλωβισμό, τραυματισμούς και υλικές ζημιές (OSHA, 2001). Επομένως, αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο κατά την εκπόνηση του σχεδίου έκτακτης ανάγκης πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα ακόλουθα (OSHA, 2001):

- οι προϋποθέσεις στις οποίες η εκκένωση κρίνεται αναγκαία
- η δημιουργία μίας σαφώς καθορισμένης αλυσίδας εντολών. Προσδιορισμός του προσωπικού που είναι εξουσιοδοτημένο να δώσει εντολή για την έναρξη διαδικασίας εκκένωσης ή τη διακοπή της λειτουργίας του χώρου. Καθορισμός εποπτών εκκένωσης για να βοηθούν τους άλλους, να καθοδηγούν τη διαδικασία εκκένωσης και να παρακολουθούν το προσωπικό
- ο καθορισμός συγκεκριμένων διαδικασιών εκκένωσης συμπεριλαμβανομένων των διαδρομών και των εξόδων. Οι συγκεκριμένες διαδικασίες και ακολουθίες εκκένωσης πρέπει να είναι εύκολα προσβάσιμες σε όλους τους εργαζομένους. Καθορισμός ενός συστήματος παρακολούθησης, μέτρησης και μετακίνησης του προσωπικού
- ο καθορισμός διαδικασιών για την βοήθεια των Α.Μ.Ε.Α. και αυτών που δεν καταλαβαίνουν τη γλώσσα
- η ανάρτηση των διαδικασιών και των σταδίων της εκκένωσης σε εμφανή σημεία
- η εξουσιοδότηση προσωπικού για τη συνέχεια ή τον τερματισμό κρίσιμων λειτουργιών, ενώ η εκκένωση είναι σε εξέλιξη. Το συγκεκριμένο προσωπικό πρέπει να είναι ικανό να αναγνωρίσει πότε πρέπει να εγκαταλείψει τη συγκεκριμένη λειτουργία και να προχωρήσουν σε εγκατάλειψη του χώρου, δηλαδή να ακολουθήσουν τη διαδικασία εκκένωσης
- ο συντονισμός με τον αρμόδιο τοπικό φορέα πολιτικής προστασίας

Σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης μπορεί να κριθεί απαραίτητη η εκκένωση ενός χώρου. Η εύρυθμη και ολοκληρωμένη εκκένωση όλων των εμπλεκόμενων (εργαζόμενων, επισκεπτών, χρηστών υπηρεσιών) ατόμων απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό και πρόληψη για διαδρομές διαφυγής και σύστημα καταμέτρησης όλων των ατόμων μετά τη διαδικασία της εκκένωσης (Gustin, 2007). Με τον κατάλληλο σχεδιασμό που λαμβάνει υπόψη όλους τους παράγοντες, γρήγορες και εύρυθμες διαδικασίες εκκένωσης μπορούν να πραγματοποιηθούν με ελάχιστα προβλήματα.

Το είδος της κατάστασης έκτακτης ανάγκης και η δυνητική απειλή ως προς την ασφάλεια των ατόμων αποτελούν τα βασικά κριτήρια που καθορίζουν το αν θα δοθεί εντολή εκκένωσης. Ένα γραπτό σχέδιο εκκένωσης είναι απαραίτητο για δύο λόγους. Πρώτον, γιατί ένα γραπτό σχέδιο παρέχει σε όλους τους ευρισκόμενους σε ένα χώρο συγκεκριμένες πληροφορίες για εύρυθμη εκκένωση σε περίπτωση που συνιστά έκτακτη ανάγκη και δεύτερον, γιατί το γραπτό σχέδιο εκκένωσης ικανοποιεί τις προϋποθέσεις για ένα ασφαλές και υγιεινό εργασιακό περιβάλλον (Wang, 2011).

2.2. Μέσα Εξόδου

2.2.1. Κατηγορίες Μέσων Εξόδου

Ως μέσα εξόδου νοούνται οι συνεχείς και απρόσκοπτοι δρόμοι μετακίνησης από ένα σημείο ενός συγκεκριμένου χώρου σε ένα δημόσιο δρόμο που αποτελούνται από τρεις ξεχωριστές και διακριτές συνιστώσες και πρέπει να παρέχονται από κάθε θέση εντός της εγκατάστασης (Gustin, 2007). Είναι σκόπιμο να αναφερθεί ότι τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται προέρχονται από τις εκκενώσεις κτιριακών εγκαταστάσεων. Οι συγκεκριμένες συνιστώσες είναι (Gustin, 2007):

- η πρόσβαση στην έξοδο
- η έξοδος
- η έξοδος της εκκένωσης

Πρόσβαση στην έξοδο: Η πρόσβαση στην έξοδο είναι εκείνη η συνιστώσα που οδηγεί σε μία έξοδο (OSHA, 2003). Για παράδειγμα, η πρόσβαση στην έξοδο περιλαμβάνει αίθουσες και χώρους που καταλαμβάνουν άνθρωποι, καθώς επίσης πόρτες, διαδρόμους, σκάλες και ράμπες που πρέπει να διανυθούν για την προσέγγιση μίας εξόδου (Gustin, 2007).

Οι ανελκυστήρες δεν επιτρέπεται να χρησιμεύσουν ως συνιστώσες των μέσων του συστήματος εξόδου. Οι παρευρισκόμενοι στο χώρο πρέπει να εφοδιάζονται με στοιχεία εξόδου ανεξάρτητα από τους ανελκυστήρες. Παρ' όλα αυτά τα άτομα που βρίσκονται στους ανελκυστήρες κατά την εκδήλωση της έκτακτης ανάγκης πρέπει να εξέλθουν και η μετακίνηση από τον ανελκυστήρα στο διάδρομο είναι η πρόσβαση στην έξοδο για τα συγκεκριμένα άτομα.

Έξοδος: Η έξοδος είναι εκείνη η συνιστώσα που είναι ξεχωριστή από όλους τους άλλους χώρους, είτε από την κατασκευή της - η οποία πρέπει να έχει τον ελάχιστο απαιτούμενο βαθμό αντοχής σε πυρκαγιά - , είτε από τον εξοπλισμό της έτσι ώστε να παρέχεται ένας προστατευμένος τρόπος μετακίνησης στο σημείο εξόδου της εκκένωσης (Gustin, 2007). Η έξοδος μπορεί να περιλαμβάνει διατάξεις θυρών, σκάλες, ράμπες, πυράντοχα περιβλήματα, διόδους εξόδου και εξωτερικά μπαλκόνια. Σε κάθε περίπτωση τα στοιχεία εξόδου απαιτείται να συμμορφώνονται στις προδιαγραφές των κανονισμών για την πυροπροστασία, τις διαστάσεις και τη διάταξη. Στην απλούστερη μορφή της μία έξοδος είναι μία πόρτα ή μία μορφή θύρας που ανοίγει κατευθείαν προς τα έξω (Cote, Harrington, 2009). Τέτοιου είδους πόρτες ή ανοίγματα παρέχουν τον απαιτούμενο προστατευμένο τρόπο μετακίνησης μέχρι την έξοδο της εκκένωσης. Μία έξοδος, εκτός από μία πόρτα που ανοίγει προς τα έξω, πρέπει να παρέχει μία προστατευμένη διαδρομή. Στην περίπτωση των κλιμακοστασίων η έξοδος περιλαμβάνει την πόρτα του συγκροτήματος που οδηγεί στο κλιμακοστάσιο, το περίβλημα της σκάλας, τα σκαλοπάτια και τα πλατύσκαλα και την πόρτα του συγκροτήματος από το περίβλημα στο εσωτερικό ή εξωτερικό της εξόδου της εκκένωσης (Cote, Harrington, 2009).

Έξοδος της εκκένωσης: Η τρίτη συνιστώσα από την οποία αποτελείται ένα μέσο εξόδου είναι η έξοδος της εκκένωσης, ή η πορεία της διαδρομής από τη λήξη της εξόδου σε ένα δημόσιο δρόμο (OSHA 2003). Δεδομένου ότι κάποιες έξοδοι δεν καταλήγουν απευθείας σε δημόσιο δρόμο, η πορεία της διαδρομής μπορεί να είναι εντός ή εκτός του ίδιου χώρου. Σε κάθε περίπτωση ο σκοπός είναι να παρέχονται στους παρευρισκόμενους στο χώρο τα μέσα για να ενεργήσουν με ασφάλεια (Gustin, 2007).

Ένα μέσο εξόδου θεωρείται προσβάσιμο εφόσον πληροί ένα από τα ακόλουθα κριτήρια (Cote, Harrington, 2009):

- ένα πρόσωπο που κινείται με αναπηρικό καροτσάκι πρέπει να είναι σε θέση να μετακινηθεί χωρίς βοήθεια μέσω της πρόσβασης στην έξοδο, της εξόδου και της εξόδου της εκκένωσης

σε ένα δημόσιο χώρο. Προκειμένου να είναι προσβάσιμα τα μέσα εξόδου πρέπει στις υψομετρικές διαφορές να υπάρχουν ράμπες και όχι σκαλιά

- ένα πρόσωπο που κινείται με αναπηρικό καροτσάκι πρέπει να είναι σε θέση να μετακινηθεί χωρίς βοήθεια μέσω εκείνου του τμήματος της πρόσβασης στην έξοδο που είναι απαραίτητο ώστε να φτάσει σε ασφαλή περιοχή

Σχεδιαστικά και Κατασκευαστικά Χαρακτηριστικά των Μέσων Εξόδου OSHA, 2003

Μερικές σχεδιαστικές και κατασκευαστικές απαιτήσεις για τις διαδρομές εξόδου είναι οι εξής (OSHA, 2003):

- οι διαδρομές εξόδου πρέπει να είναι μόνιμα τμήματα του χώρου εργασίας
- οι εξοδοί της εκκένωσης πρέπει να οδηγούν απευθείας εκτός ή σε κάποιο δρόμο, διάδρομο, ασφαλή περιοχή, δημόσιο χώρο ή ανοιχτό χώρο. Αυτές οι περιοχές στις οποίες οδηγεί η έξοδος της εκκένωσης πρέπει να είναι αρκετά μεγάλες ώστε να φιλοξενήσουν τους χρήστες του χώρου που ενδέχεται να χρησιμοποιήσουν τη διαδρομή εξόδου
- οι σκάλες εξόδου που συνεχίζουν εκτός του επιπέδου που οριοθετείται η έξοδος της εκκένωσης πρέπει να διακόπτονται στο συγκεκριμένο επίπεδο από πόρτες, χωρίσματα ή άλλα αποτελεσματικά μέσα που καταδεικνύουν με σαφήνεια την κατεύθυνση της διαδρομής που οδηγεί στην έξοδο της εκκένωσης
- οι πόρτες των διαδρομών εξόδου πρέπει να είναι ξεκλείδωτες από την εσωτερική πλευρά και πρέπει να είναι απαλλαγμένες από συσκευές ή συναγερμούς που θα μπορούσαν να περιορίσουν τη χρήση της διαδρομής εξόδου αν η συσκευή ή ο συναγερμός δε λειτουργήσει
- πλευρικά ανοιγόμενες πόρτες εξόδου πρέπει να χρησιμοποιούνται για να συνδέουν τους χώρους των εγκαταστάσεων με τις διαδρομές εξόδου. Αυτές οι πόρτες πρέπει να ανοίγουν προς την κατεύθυνση της διαδρομής εξόδου αν ο χώρος πρόκειται να καταληφθεί από περισσότερα από 50 άτομα ή αν το δωμάτιο είναι μία περιοχή υψηλής επικινδυνότητας
- οι διαδρομές εξόδου πρέπει να υποστηρίζουν το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο των ατόμων που εξυπηρετούνται σε κάθε όροφο και η χωρητικότητα μίας διαδρομής εξόδου δεν πρέπει να μειώνεται στην κατεύθυνση της διαδρομής μετάβασης στην έξοδο της εκκένωσης
- τα ανώτατα όρια των διαδρομών εξόδου πρέπει να είναι τουλάχιστον 2.28m στο ύψος
- μία είσοδος στη διαδρομή εξόδου πρέπει να είναι τουλάχιστον 0.84m πλατιά σε όλα τα σημεία. Όπου υπάρχει μία μόνο είσοδος που οδηγεί στην έξοδο ή στην έξοδο της εκκένωσης το πλάτος της εξόδου και της εξόδου εκκένωσης πρέπει να είναι τουλάχιστον ίσο με το πλάτος της πρόσβασης στην έξοδο. Αντικείμενα που εξέχουν στην έξοδο, δεν πρέπει να μειώνουν το πλάτος της
- οι εξωτερικές διαδρομές εξόδου επιτρέπονται, αλλά πρέπει να πληρούν τις απαιτήσεις για ελάχιστο ύψος και πλάτος που προβλέπονται για τις εσωτερικές διαδρομές εξόδου και ειδικότερα πρέπει:
 - ✓ να έχουν προστατευτικά κιγκλιδώματα για την προστασία των ανοιχτών πλευρών αν εγκυμονεί κίνδυνος πτώσης
 - ✓ να καλύπτονται αν είναι πιθανό να συσσωρευτεί χιόνι ή πάγος εκτός αν ο εργοδότης μπορεί να αποδείξει ότι η συσσώρευση θα αφαιρεθεί πριν να υπάρξει κίνδυνος ολίσθησης
 - ✓ να είναι αρκετά ευθύγραμμη και να έχει ομαλούς, στερεούς και ουσιαστικά επίπεδους διαδρόμους
 - ✓ να μην έχουν αδιέξοδο μεγαλύτερο από 6m

- ✓ Ορισμένες προδιαγραφές για τις εξόδους είναι οι ακόλουθες

Ορισμένες προδιαγραφές για τις εξόδους είναι οι ακόλουθες (OSHA, 2003):

- οι εξοδοί πρέπει να διαχωρίζονται από πυράντοχα υλικά, δηλαδή να έχουν μία ώρα αντοχή σε πυρκαγιά, αν η έξοδος συνδέει τρεις ή λιγότερους ορόφους και να έχουν δύο ώρες αντοχή σε πυρκαγιά αν η έξοδος συνδέει περισσότερους από τρεις ορόφους
- οι εξοδοί επιτρέπεται να έχουν μόνο εκείνα τα ανοίγματα που είναι απαραίτητα για να επιτρέπουν την πρόσβαση προς την έξοδο από κατεχόμενες περιοχές του χώρου εργασίας ή προς την έξοδο της εκκένωσης. Τα ανοίγματα πρέπει να προστατεύονται από αυτόματο μηχανισμό κλεισίματος, εγκεκριμένες πυράντοχες πόρτες που παραμένουν κλειστές ή κλείνουν αυτόματα σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης

2.2.2. Χωρητικότητα των Μέσων Εξόδου

2.2.2.1. Φορτίο Χρηστών

Η συνολική χωρητικότητα των μέσων εξόδου για κάθε όροφο, μπαλκόνι, ή άλλο κατεχόμενο χώρο, πρέπει να είναι επαρκής για το φορτίο των επιβατών αυτών (Cote, Harrington, 2009).

Για άλλα εκτός από τα υπάρχοντα μέσα εξόδου, όπου περισσότερα από ένα μέσα εξόδου απαιτούνται, τα μέσα εξόδου πρέπει να είναι τέτοιου πλάτους και χωρητικότητας έτσι ώστε η απώλεια οποιουδήποτε μέσου εξόδου αφήνει διαθέσιμη όχι λιγότερο από 50 τοις εκατό από την απαιτούμενη χωρητικότητα (Cote, Harrington, 2009).

Τα μέσα εξόδου έχουν σαν σκοπό να εξυπηρετήσουν όλους τους ανθρώπους που χρησιμοποιούν το χώρο. Η ταξινόμηση κατά μέγεθος επιτυγχάνεται μέσω μιας καθορισμένης μεθόδου ταιριάζοντας το φορτίο των χρηστών του ορόφου έναντι της υπολογισμένης χωρητικότητας εξόδου των στοιχείων της εξόδου που εξυπηρετούν τον όροφο. Τα κριτήρια μεγέθους δεν εξασφαλίζουν ότι όλοι οι χρήστες μπορούν να φύγουν αμέσως, αλλά παρέχουν επαρκή γρήγορη κίνηση χωρίς να δημιουργούνται μεγάλες ουρές (Cote, Harrington, 2009).

Η γεωμετρία της κατασκευής, η πληρότητά της και το σχετιζόμενο φορτίο των χρηστών, και η απόσταση μετακίνησης στις εξόδους υπαγορεύουν, σε μεγάλο βαθμό, τη θέση των εξόδων, τον αριθμό των εξόδων, καθώς και την χωρητικότητα των εξόδων και την πρόσβαση σε αυτές. Κατά συνέπεια, οι ίδιοι οι εξοδοί επηρεάζουν το σχέδιο και τη διάταξη του συνόλου των μέσων του συστήματος εξόδου (Cote, Harrington, 2009). Ο αριθμός των ανθρώπων που τα μέσα του συστήματος εξόδου μπορούν να εξυπηρετήσουν δεν καθορίζεται αποκλειστικά και μόνο από την ικανότητα των εξόδων, αλλά και από τον αριθμό των ατόμων που μπορεί να εξυπηρετήσει κάθε τμήμα της πρόσβασης εξόδου και της εξόδου εκκένωσης. Ένα μέσο του συστήματος εξόδου είναι μόνο τόσο καλό όσο το πιο περιοριστικό του στοιχείο. Τα νέα συστήματα εξόδου που χρησιμοποιούν δύο μέσα εξόδου πρέπει να είναι με βάση το μέγεθος, έτσι ώστε κάθε διαδρομή εξόδου να φιλοξενεί τουλάχιστον το ήμισυ του φορτίου επιβατών του ορόφου. Επίσης τα νέα συστήματα εξόδου που απασχολούν περισσότερα από δύο μέσα εξόδου να είναι τέτοιου μεγέθους, έτσι ώστε καμία διαδρομή εξόδου να μην επιφορτίζεται με την εξυπηρέτηση πάνω από το ήμισυ του φορτίου επιβατών του ορόφου. Η απαίτηση αυτή αποσκοπεί στην πρόληψη μιας κατάστασης όπου η απώλεια οποιαδήποτε διαδρομής εξόδου, μειώνει την υπόλοιπη χωρητικότητα εξόδου σε λιγότερο από το ήμισυ αυτής που χρειάζεται για να φιλοξενήσει το φορτίο των χρηστών του ορόφου (Cote, Harrington, 2009).

Το φορτίο των χρηστών δεν πρέπει να είναι μικρότερο από τον αριθμό των ατόμων που καθορίζεται διαιρώντας το εμβαδόν του ορόφου που αντιστοιχεί στην εν λόγω χρήση με τον συντελεστή φορτίου των χρηστών για τη συγκεκριμένη χρήση (Cote, Harrington, 2009). Στον Πίνακα 2.1 δίνεται ο συντελεστής φορτίου ανάλογα με τη χρήση του χώρου. Το κανονικό φορτίο των χρηστών δεν

είναι απαραίτητα κατάλληλο κριτήριο, διότι ο μεγαλύτερος κίνδυνος μπορεί να συμβεί όταν ένα ασυνήθιστα μεγάλο πλήθος είναι παρών, που είναι μια δύσκολη κατάσταση για τις αρμόδιες αρχές.

Πίνακας 2.1: Συντελεστής Φορτίου Χρηστών (Cote, Harrington, 2009)

Use	(ft ² per person) ^a	(m ² per person) ^a
Assembly Use		
Concentrated use, without fixed seating	7 net	0.65 net
Less concentrated use, without fixed seating	15 net	1.4 net
Bench-type seating	1 person/18 linear in.	1 person/455 linear mm
Fixed seating	Number of fixed seats	Number of fixed seats
Waiting spaces	See 12.1.7.2 and 13.1.7.2.	See 12.1.7.2 and 13.1.7.2.
Kitchens	100	9.3
Library stack areas	100	9.3
Library reading rooms	50 net	4.6 net
Swimming pools	50 (water surface)	4.6 (water surface)
Swimming pool decks	30	2.8
Exercise rooms with equipment	50	4.6
Exercise rooms without equipment	15	1.4
Stages	15 net	1.4 net
Lighting and access catwalks, galleries, gridirons	100 net	9.3 net
Casinos and similar gaming areas	11	1
Skating rinks	50	4.6
Educational Use		
Classrooms	20 net	1.9 net
Shops, laboratories, vocational rooms	50 net	4.6 net
Day-Care Use		
	35 net	3.3 net
Health Care Use		
Inpatient treatment departments	240	22.3
Sleeping departments	120	11.1
Ambulatory health care	100	9.3
Detention and Correctional Use		
	120	11.1
Residential Use		
Hotels and dormitories	200	18.6
Apartment buildings	200	18.6
Board and care, large	200	18.6
Industrial Use		
General and high hazard industrial	100	9.3
Special-purpose industrial	NA	NA
Business Use (other than below)		
Air traffic control tower observation levels	40	3.7
Storage Use		
In storage occupancies	NA	NA
In mercantile occupancies	300	27.9
In other than storage and mercantile occupancies	500	46.5
Mercantile Use		
Sales area on street floor ^{b,c}	30	2.8
Sales area on two or more street floors ^d	40	3.7
Sales area on floor below street floor ^e	30	2.8
Sales area on floors above street floor ^e	60	5.6
Floors or portions of floors used only for offices	See business use.	See business use.
Floors or portions of floors used only for storage, receiving, and shipping, and not open to general public	300	27.9
Mall buildings ^d	Per factors applicable to use of space ^e	

2.2.2.2. Χωρητικότητα Εκκένωσης

Η χωρητικότητα της εκκένωσης βασίζεται στους συντελεστές χωρητικότητας οι οποίοι παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.2. Οι συγκεκριμένοι συντελεστές έχουν σχέση με το είδος του χώρου και το μέσο που χρησιμοποιείται για την εκκένωση.

Πίνακας 2.2: Συντελεστές Χωρητικότητας (Cote, Harrington 2009)

Area	Stairways (width per person)		Level Components and Ramps (width per person)	
	in.	mm	in.	mm
Board and care	0.4	10	0.2	5
Health care, sprinklered	0.3	7.6	0.2	5
Health care, nonsprinklered	0.6	15	0.5	13
High hazard contents	0.7	18	0.4	10
All others	0.3	7.6	0.2	5

Για κλιμακοστάσια πλάτους μεγαλύτερο από 1120mm (44in) που υπόκεινται σε συντελεστή χωρητικότητας 7.6mm (0.3in) πλάτος ανά άτομο, η χωρητικότητα θα πρέπει να επιτρέπεται να αυξηθεί χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση (Cote, Harrington, 2009):

$$C = 146.7 + \left(\frac{W_n - 44}{0.218} \right)$$

όπου:

C = χωρητικότητα, σε άτομα

W_n = ονομαστικό πλάτος της κλίμακας σε in

Η απαιτούμενη χωρητικότητα ενός διαδρόμου πρέπει να είναι το φορτίο των ατόμων που χρησιμοποιεί το διάδρομο για την πρόσβαση στην έξοδο διαιρώντας το με τον απαιτούμενο αριθμό των εξόδων τις οποίες ο διάδρομος συνδέει, αλλά η χωρητικότητα του διαδρόμου δεν πρέπει να είναι μικρότερη από την απαιτούμενη χωρητικότητα της εξόδου στην οποία ο διάδρομος οδηγεί. Ο διάδρομος δεν επιτρέπεται να δημιουργεί μία στένωση η οποία δυσχεραίνει και εμποδίζει τη ροή των ατόμων προς το άνοιγμα της πόρτας εξόδου.

2.2.3. Αριθμός Μέσων Εκκένωσης

Κανονικά ένας χώρος εργασίας πρέπει να έχει τουλάχιστο δύο διαδρομές εξόδου ώστε να επιτρέπεται η άμεση εκκένωση των εργαζομένων και των υπόλοιπων παρευρισκόμενων στο χώρο σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης (OSHA, 2003). Ωστόσο, περισσότεροι από δύο εξοδοί απαιτούνται, αν ο αριθμός των εργαζομένων, το μέγεθος του χώρου ή η διεύθυνση του χώρου εργασίας δεν επιτρέπουν στους εργαζόμενους να προχωρήσουν σε εκκένωση με ασφάλεια. Οι διαδρομές της εξόδου πρέπει να βρίσκονται σε απόσταση τέτοια ώστε η πρόσβαση στην καθεμία να είναι κατά το δυνατό ευκολότερη σε περίπτωση που η άλλη έξοδος έχει αποκλειστεί από πυρκαγιά ή καπνό. Ωστόσο, αν ο αριθμός των εργαζομένων, το μέγεθος του χώρου ή η χρήση ή η διεύθυνση του χώρου εργασίας επιτρέπουν στους εργαζόμενους να προχωρήσουν σε εκκένωση με ασφάλεια σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης τότε επιτρέπεται η ύπαρξη μίας διαδρομής εξόδου. Συγκεκριμένα, ανάλογα με το φορτίο των χρηστών ο αριθμός των μέσων εξόδου καθορίζεται ως εξής (Cote, Harrington, 2009):

- Για φορτίο χρηστών πάνω από 500 αλλά όχι περισσότερο από 1000, όχι λιγότερες από 3 εξόδους
- Για φορτίο χρηστών άνω των 1000, όχι λιγότερες από 4 εξόδους

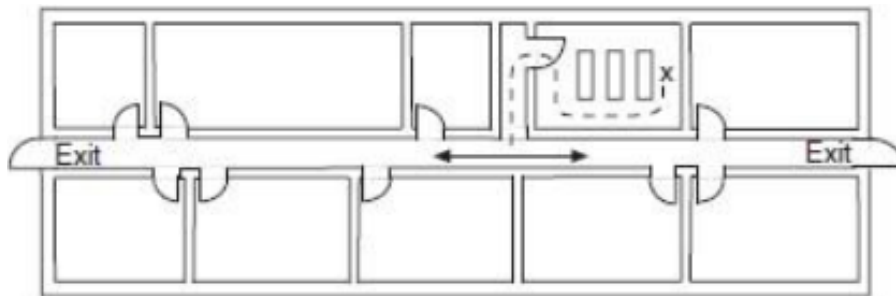
Το φορτίο των χρηστών κάθε ορόφου που καθορίζεται μεμονωμένα θα πρέπει να απαιτείται να χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του αριθμού των μέσων εξόδου σε κάθε όροφο, διασφαλίζοντας ότι ο απαιτούμενος αριθμός των μέσων εξόδου δε μειώνεται στην κατεύθυνση της διαδρομής εκκένωσης.

2.2.4. Διάταξη Μέσων Εξόδου

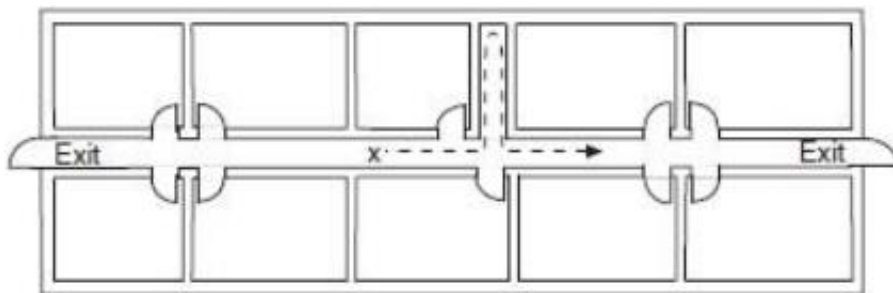
Οι εξοδοί και οι προσβάσεις στην έξοδο πρέπει να είναι διατεταγμένες στο χώρο με τέτοιο τρόπο, ώστε οι εξοδοί να είναι άμεσα προσβάσιμες ανά πάσα στιγμή (Cote, Harrington, 2009). Όπου οι εξοδοί δεν είναι άμεσα προσβάσιμες από μια περιοχή με ανοιχτό δάπεδο, συνεχείς δίοδοι, κεντρικοί διάδρομοι ή διάδρομοι που οδηγούν απευθείας σε κάθε έξοδο, πρέπει να προβλέπονται και πρέπει να είναι διατεταγμένοι έτσι, ώστε να παρέχουν πρόσβαση για κάθε χρήστη σε όχι λιγότερες από δύο εξόδους μέσω ξεχωριστών διαδρομών. Οι διάδρομοι πρόσβασης στην έξοδο θα πρέπει να παρέχουν πρόσβαση σε όχι λιγότερες από δύο εγκεκριμένες εξόδους. Βασικό στοιχείο στους χώρους είναι ο καθορισμός των μεγάλων αποστάσεων να συμμορφώνεται με συγκεκριμένες προδιαγραφές (Cote, Harrington, 2009).

Γενικά οι κανονιστικές διατάξεις χρησιμοποιούν και θεωρούν τον κανόνα της απόστασης της μιάμιση διαγώνιου προκειμένου να ποσοτικοποιήσουν τη μεγαλύτερη απόσταση και να προσδιορίσουν με σαφήνεια ότι οι προσβάσεις στις εξόδους, οι έξοδοι και οι εξοδοί της εκκένωσης πρέπει να είναι επαρκώς απομακρυσμένες, ώστε να διασφαλίζεται με εύλογη βεβαιότητα ότι η ίδια πυρκαγιά δεν θα προκαλέσει εμπόδια στην προσπέλαση πολλαπλών διαδρομών εκκένωσης (Cote, Harrington, 2009).

Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι η πρόσβαση στην έξοδο πρέπει να είναι διατεταγμένη με τέτοιο τρόπο, ώστε να μην υπάρχουν αδιέξοδα στους διαδρόμους. Αδιέξοδο υπάρχει όταν σε ένα διάδρομο όπου ο διάδρομος εξακολουθεί να συνεχίζει μετά από μία έξοδο και δημιουργεί ένα θύλακα μέσα στον οποίο μπορεί να κινηθεί κάποιος χρήστης. Οι όροι αδιέξοδο και «κοινή διαδρομή μετακίνησης» συνήθως χρησιμοποιούνται εναλλακτικά (Cote, Harrington, 2009). Μολονότι, οι έννοιες των δύο είναι στην πράξη ίδιες, ωστόσο συνιστούν δύο διαφορετικές έννοιες. Η «κοινή διαδρομή μετακίνησης» υπάρχει όταν ένας χώρος είναι διατεταγμένος έτσι ώστε οι χρήστες μέσα στο χώρο έχουν τη δυνατότητα να κινηθούν μόνο προς μία κατεύθυνση, ώστε να φτάσουν σε κάποια από τις εξόδους ή να φτάσουν στο σημείο όπου οι χρήστες έχουν τη δυνατότητα επιλογής δύο οδών μετακίνησης προς απομακρυσμένες εξόδους. Στην Εικόνα 2.1 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα «κοινής διαδρομής μετακίνησης» ενώ στην Εικόνα 2.2 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα αδιεξόδου.



Εικόνα 2.1: Παράδειγμα «κοινής διαδρομής μετακίνησης» (Cote, Harrington, 2009)



Εικόνα 2.2: Παράδειγμα αδιεξόδου (Cote, Harrington, 2009)

2.2.5. Μέτρηση της Απόστασης Μετακίνησης ως τις Εξόδους

Οι κανονισμοί (Cote, Harrington, 2009) εξειδικεύουν τη μέγιστη απόσταση που οι χρήστες επιτρέπεται να διανύσουν από τη θέση τους σε ένα χώρο έως την κοντινότερη έξοδο. Δεν υπάρχει κάποιος συγκεκριμένος τύπος με βάση τον οποίο μπορεί να καθοριστεί αυτή η απόσταση. Οι μέγιστες αποστάσεις μετακίνησης βασίζονται σε παράγοντες που περιλαμβάνουν τα εξής (Cote, Harrington, 2009):

- τον αριθμό, την ηλικία και τη φυσική κατάσταση των χρηστών του χώρου και τον ρυθμό με βάση τον οποίο προσδοκάτε ότι μπορούν να κινηθούν

- τον τύπο και τον αριθμό των εμποδίων γύρω από τα οποία πρέπει να κινηθούν οι χρήστες
- τον αριθμό των χρηστών σε κάθε δωμάτιο ή χώρο και την απόσταση από το πιο απομακρυσμένο σημείο σε αυτό το δωμάτιο από ο άνοιγμα της πόρτας
- το μέγεθος και τη φύση των καυσίμων που αναμένονται να υπάρχουν σε κάθε χρήση
- την ταχύτητα με την οποία μπορεί να εξαπλωθεί η πυρκαγιά (η οποία είναι συνάρτηση του τύπου της κατασκευής, των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν, του βαθμού της διαμερισματοποίησης και της ύπαρξης ή της έλλειψης αυτόματου συστήματος ανίχνευσης πυρκαγιάς και συστήματος πυρόσβεσης)

Η απόσταση μετακίνησης έως μια έξοδο θα πρέπει να μετράτε στο δάπεδο ή σε άλλη επιφάνεια βαδίσματος ως εξής (Cote, Harrington, 2009):

- κατά μήκος της κεντρικής γραμμής της φυσικής οδού μετακίνησης, ξεκινώντας από το πιο απομακρυσμένο σημείο ανάλογα με τη χρήση
- με καμπύλη γραμμή γύρω από γωνίες ή εμπόδια με ένα κενό από αυτά 305mm
- καταλήγοντας σε ένα από τα επόμενα σημεία
 - ✓ στο κέντρο της πόρτας
 - ✓ σε άλλο σημείο που αρχίζει η έξοδος
 - ✓ σε φράγμα καπνού αν υπάρχει στη συγκεκριμένη χρήση

Η φυσική πρόσβαση στην έξοδο επηρεάζεται από τα περιεχόμενα και τη χρήση του χώρου. Έπιπλα, εξοπλισμός ή αποθηκευτικός χώρος μπορούν να λειτουργήσουν αυξάνοντας το μήκος της μετακίνησης. Συνιστάται ως καλή πρακτική κατά το σχεδιασμό των χώρων να αναγνωρίζεται η επίδραση των περιεχομένων και των χρήσεων και να τοποθετούνται έξοδοι σε συντομότερα διαστήματα από αυτά που απαιτούνται και επομένως να μειώνεται ο κίνδυνος υπερβολικά μεγάλων μετακινήσεων (Cote, Harrington, 2009).

2.3. Τύποι Εκκένωσης

Υπάρχουν δύο τύποι εκκένωσης: μερική εκκένωση και πλήρης ή συνολική εκκένωση. Μολονότι, η φύση της καταστροφής ή της έκτακτης ανάγκης, καθώς και η δυνητική απειλή για την ασφάλεια των ευρισκόμενων στο χώρο καθορίζει τον τύπο της εκκένωσης που διεξάγεται, πρέπει να εξετάζεται και να συνεκτιμάται η αμεσότητα της απειλής.

Μερική εκκένωση: Σε μία μερική εκκένωση, οι παρευρισκόμενοι που επηρεάζονται ή η ασφάλεια των οποίων μπορεί να τεθεί σε κίνδυνο λόγω του συμβάντος, μετακινούνται από την απειλούμενη ζώνη σε μία ασφαλή ή εξασφαλισμένη/προστατευμένη περιοχή. Η εξασφαλισμένη/προστατευμένη περιοχή μπορεί να βρίσκεται, είτε εντός, είτε εκτός της εγκατάστασης. Για παράδειγμα όταν ανιχνευθεί φωτιά σε μία πολυώροφη εγκατάσταση ή σε ένα υψηλό κτίριο, οι παρευρισκόμενοι που βρίσκονται στα επίπεδα πάνω και κάτω από την πηγή της πυρκαγιάς πρέπει να προβούν σε άμεση εκκένωση (Gustin, 2007).

Πλήρης εκκένωση: Σε μία πλήρη εκκένωση, όλοι οι παρευρισκόμενοι απαιτείται να εκκενώσουν τις εγκαταστάσεις με την ενδεχόμενη εξαίρεση από τους προαναφερθέντες, αυτών που συγκροτούν την ομάδα αντιμετώπισης της έκτακτης ανάγκης ή καταστροφής. Σε κάποιες περιπτώσεις, και πάλι ανάλογα με τη φύση και αμεσότητα της καταστροφής ή της έκτακτης ανάγκης τα μέλη της ομάδας μπορούν να παραμείνουν για να διασφαλίσουν ότι όλοι οι παρευρισκόμενοι έχουν εγκαταλείψει το χώρο και/ή να διασφαλίσουν τις κρίσιμες περιοχές και λειτουργίες του χώρου (Gustin, 2007).

2.4. Παράγοντες Εκκένωσης

2.4.1. Βασικοί Παράγοντες Εκκένωσης

Υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τον προσδιορισμό του τύπου εκκένωσης που θα εφαρμοστεί. Αυτοί οι παράγοντες είναι οι ακόλουθοι (Gustin, 2007):

- η φύση του συμβάντος έκτακτης ανάγκης ή καταστροφής
- η δυνητική απειλή για την ασφάλεια των παρευρισκόμενων, όπως εκτιμάται από τη σοβαρότητα του περιστατικού

Καθένας από αυτούς τους παράγοντες με τη σειρά του καθορίζει την αμεσότητα της ανάγκης εκκένωσης.

2.4.2. Άλλοι Παράγοντες Εκκένωσης

Υπάρχει μία σειρά άλλων κρίσιμων παραγόντων που σχετίζονται με την εκκένωση οι οποίοι πρέπει να εξεταστούν και να συνεκτιμηθούν στην ανάπτυξη στρατηγικών εκκένωσης. Οι συγκεκριμένοι παράγοντες περιλαμβάνουν τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών που έχουν σχέση με (Gustin, 2007):

- εσωτερικά επίπεδα ευθυνών και αρμοδιοτήτων για την εντολή έναρξης και την επίβλεψη της διαδικασίας της εκκένωσης. Ανάλογα με τη φύση και τη σοβαρότητα του συμβάντος, η εντολή εκκένωσης μπορεί να δοθεί, είτε από το εξουσιοδοτημένο άτομο της εγκατάστασης, ή από την τοπική πυροσβεστική υπηρεσία ή άλλη αρμόδια αρχή, ή κι από τις δύο
- χρόνος της εντολής. Ανάλογα με τη δυνητική απειλή για την ασφάλεια των παρευρισκόμενων, η απόφαση για εντολή εκκένωσης μπορεί να χρειαστεί να δοθεί αμέσως
- διάφορα είδη βοήθειας πρέπει να είναι στην διάθεση των Α.Μ.Ε.Α.. Η βοήθεια μπορεί να προέρχεται από ειδικά εκπαιδευμένο προσωπικό που εργάζεται στην εγκατάσταση και/ή το προσωπικό της πυροσβεστικής υπηρεσίας ή το προσωπικό των σωστικών συνεργείων

Ένας άλλος κρίσιμος παράγοντας που πρέπει να εξεταστεί και να συνεκτιμηθεί είναι η απειλή για βόμβες και εκρηκτικές ύλες που σχετίζονται με περιστατικά βίας.

2.5. Παράγοντες Αποτελεσματικότητας Εκκένωσης

2.5.1. Αποφάσεις

Οι άνθρωποι χρειάζονται χρόνο για να λάβουν αποφάσεις. Σε γενικές γραμμές οι άνθρωποι είναι διστακτικοί να αναλάβουν τη διεξαγωγή προφανών ενεργειών εκτός αν σαφώς αποδεχτούν την ανάγκη για μια τέτοια ενέργεια (SFPE, 2002). Σε ομαδικές περιπτώσεις η αλληλεπίδραση της ομάδας είναι εξαιρετικά σημαντική για τη λήψη αποφάσεων. Συγκεκριμένα, έχει επισημανθεί η τάση πολλών ανθρώπων να αναβάλουν τη λήψη επείγουσας απόφασης, μέχρι να γίνει σαφές ότι απαιτείται δράση. Επίσης, από έρευνες έχει καταγραφεί και ποσοτικοποιηθεί ένας παράγοντας που ονομάζεται «συνειρμικός» παράγοντας. Ειδικότερα, έχει σημειωθεί ότι άτομα σε ομάδες καθυστερούν να αντιδράσουν σε ένα προειδοποιητικό συναγερμό έως ότου είναι σαφές ότι η ομάδα αποδέχεται την ανάγκη να ληφθούν μέτρα έκτακτης δράσης (SFPE, 2002). Η έγκαιρη εκπαίδευση, η οργάνωση και η πληροφόρηση σε πραγματικό χρόνο για ένα περιστατικό έκτακτης

ανάγκης μπορεί να συμβάλει στη μείωση της χρονικής καθυστέρησης για την ανάληψη επείγουσας δράσης.

Ο Levin (1985) αναλύοντας δεδομένα από πολλές πηγές που σχετίζονται με ενέργειες επείγουσας ανάγκης σε κατοικίες, έχει προτείνει την ταξινόμηση της ταχύτητας αντίδρασης σε τέσσερις κατηγορίες. Αυτές οι κατηγορίες που ορίζονται ως διακριτές κλάσεις, βασίζονται στην αρχική ερμηνεία των ενδείξεων από τα μεμονωμένα εμπλεκόμενα άτομα. Οι κλάσεις που έχουν προταθεί είναι οι εξής (SFPE, 2002):

- Α: το άτομο πιστεύει ότι μπορεί να υπάρχει μία πυρκαγιά (αλλά δεν είναι βέβαιο)
- Β: το άτομο πιστεύει ότι είναι πιθανό να υπάρχει μία πυρκαγιά
- Γ: το άτομο είναι σίγουρο ότι υπάρχει μία πυρκαγιά και έχει δει επαρκή καπνό για να πιστεύει ότι η πυρκαγιά είναι επικίνδυνη
- Δ: το άτομο έχει δει φλόγες

Με μία σημαντική εξαίρεση η καθολική απόκριση, σε μία αμφίβολη περίπτωση της κατηγορίας Α, είναι η αναζήτηση πληροφοριών. Η εξαίρεση από το γενικό κανόνα συνέβη με αυτούς που είναι υπεύθυνοι για άτομα που δε μπορούν να φροντίσουν τον εαυτό τους (π.χ. μικρά παιδιά, Α.Μ.Ε.Α.). Αυτά τα άτομα ανέλαβαν δράση για να προχωρήσουν σε εκκένωση ή να παρέχουν προστασία. Αντίθετα, σε μία αμφίβολη κατάσταση της κατηγορίας Δ, δράση έκτακτης ανάγκης λαμβάνεται πάντα. Σε αμφίβολες καταστάσεις των κατηγοριών Β και Γ ορισμένα άτομα συνέχιζαν να αναζητούν πληροφορίες, ενώ άλλα ανέλαβαν άλλες μορφές δράσης έκτακτης ανάγκης. Οι ενέργειες αυτές περιλαμβάνουν, αντιμετώπιση της πυρκαγιάς, κλήση της πυροσβεστικής υπηρεσίας και εκκένωση του χώρου. Για τις περιπτώσεις που τα άτομα κατατάχθηκαν στις κατηγορίες Β και Γ, το ποσοστό των ατόμων που αναζήτησαν πληροφορίες αντί να προβούν σε ενέργειες έκτακτης ανάγκης ήταν περίπου 50 % από την κατηγορία Β και 35 % από την κατηγορία Γ.

2.5.2. Χρόνος Έρευνας

Τα μεμονωμένα άτομα συχνά αναζητούν πληροφορίες για να αποσαφηνίσουν τις αμφιβολίες που δημιουργούνται σε περιπτώσεις πυρκαγιών (SFPE, 2002). Αυτή η αντίδραση είναι η περίπτωση που αντιστοιχεί σε μεμονωμένα άτομα ή μικρές ομάδες ατόμων. Από καταγραφή ατόμων που έχουν εμπλακεί σε περιπτώσεις πυρκαγιάς σε ξενοδοχείο προέκυψαν στοιχεία που δείχνουν σημαντικό αριθμό εμφανών αντιπαραγωγικών κινήσεων. Μία κίνηση αυτού του είδους υποτίθεται ότι εμφανίζεται από άτομα που αναζητούν πληροφορίες για τις οποίες αισθάνονται ότι είναι απαραίτητες ώστε να λάβουν την κατάλληλη απόφαση. Από την σκοπιά της μηχανικής, αυτή η αντίδραση τονίζει τις δυνατότητες αύξησης της απόδοσης της εκκένωσης παρέχοντας σαφή πληροφόρηση στους χρήστες του κτιρίου σχετικά με την εμφάνιση και τη θέση της πυρκαγιάς καθώς και για την κατάσταση των οδών διαφυγής.

2.5.3. Εύρεση της διαδρομής εξόδου

Η εύρεση της διαδρομής εξόδου είναι πολύ σημαντική σε καταστάσεις που αφορούν ένα σχετικά μικρό αριθμό ατόμων που προβαίνουν σε εκκένωση μίας τοποθεσίας τα οποία δεν είναι εξοικειωμένα με το σύστημα εξόδου έκτακτης ανάγκης (SFPE, 2002). Αυτή η κατάσταση συνήθως συμβαίνει σε ξενοδοχεία, κτίρια γραφείων πολλαπλών χρήσεων, και παρόμοιες κατασκευές όπου τα άτομα σπάνια χρησιμοποιούν τις σκάλες.

Η τυπική λύση στο πρόβλημα της εύρεσης της διαδρομής εξόδου είναι η παροχή πινακίδων σήμανσης εξόδου και πινακίδων κατεύθυνσης εξόδου. Η ικανότητα ενός ατόμου να βρει τη διαδρομή εξόδου σχετίζεται με το πόσο καλά το άτομο αντιλαμβάνεται τη θέση του και το περιβάλλον (SFPE, 2002). Ο όρος που χρησιμοποιείται συχνά είναι γνωστική χαρτογράφηση. Οι περισσότεροι άνθρωποι διατηρούν τις γνωστικές εικόνες της χαρτογράφησης, σε απλές,

τυποποιημένες μορφές όπως ευθείες γραμμές και ορθογώνια. Υπό αυτή την έννοια οι πινακίδες σήμανσης εξόδου είναι μόνο ένα μέρος της συνολικής ικανότητας του ατόμου να αντιλαμβάνεται έναν κατάλληλο γνωστικό χάρτη.

Άλλοι παράγοντες που έχουν αξιολογηθεί ως υψηλής σημασίας για την εξεύρεση της διαδρομής εξόδου περιλαμβάνουν (SFPE, 2002):

- την πολυπλοκότητα του χώρου που σχετίζεται με κοινές διατάξεις ή παρόμοιους τύπους κτιρίων
- την ύπαρξη διακριτών σημαδιών ή άλλων ενδείξεων των σημείων ιδιαίτερης προσοχής

Η εύρεση της διαδρομής εξόδου επηρεάζει την αποτελεσματικότητα της εκκένωσης σε εγκαταστάσεις όπου η πυκνότητα του πληθυσμού είναι χαμηλή και τα άτομα δεν είναι εξοικειωμένα με τις διαδρομές εξόδου. Σε τέτοιες εγκαταστάσεις η απόδοση είναι μεγαλύτερη όταν (SFPE, 2002):

- οι διαδρομές είναι απλές
- τα σημεία εξόδου είναι εμφανή ως προς την τοποθεσία τους και παρέχουν εξασφάλιση στο μετακινούμενο ότι πράγματι πρόκειται να οδηγήσει στην ασφάλεια του

Η αποτελεσματικότητα της εύρεσης εξόδου μειώνεται όσο αυξάνεται η πολυπλοκότητα της διαρρύθμισης του χώρου. Μερικοί παράγοντες (SFPE, 2002) που αυξάνουν την πολυπλοκότητα είναι ασυνήθιστες διατάξεις των διαδρόμων, αμβλείες γωνίες, ομόκεντροι διάδρομοι και θύρες πρόσβασης στην έξοδο που εμφανίζονται να είναι ίδιες με τις υπόλοιπες πόρτες. Αντιστρόφως, όλες οι πτυχές που τείνουν να απλοποιήσουν και να προσδιορίσουν τη διαδρομή εξόδου μειώνουν το χρόνο που απαιτείται για την εύρεση της διαδρομής εξόδου.

2.5.4. Συγχώνευση Συγκρούσεων

Οι υπολογισμοί του χρόνου εκκένωσης μέσω αναλύσεων υποθέτουν ότι η ροή των ανθρώπων είναι παρόμοια με αυτή της υδραυλικής ροής (SFPE, 2002). Ως εκ τούτου, η συγχώνευση των δύο ροών (άτομα που εισέρχονται από ένα χώρο στο κλιμακοστάσιο στο οποίο υπάρχει ήδη ροή ατόμων από υψηλότερους ορόφους) θεωρείται ότι αυτορυθμίζεται σύμφωνα με τις δυνατότητες του κλιμακοστασίου και την ποσότητα της ροής από κάθε πηγή.

Σε περιπτώσεις ασκήσεων εκκένωσης λόγω έκτακτης ανάγκης έχει παρατηρηθεί σημαντική διακοπή της συνέχειας της ροής, όταν μία ροή σταματάει, μία άλλη ξεκινάει σε ένα σημείο συγκέντρωσης. Η μεγαλύτερη απόδοση στη συγκέντρωση της ροής συμβαίνει όταν μία ροή χρησιμοποιεί μία διαδρομή εξόδου στη μέγιστη χωρητικότητά της, μπλοκάρει κάθε άλλη είσοδο μέχρι να ολοκληρωθεί η ροή πέρα από το σημείο συγχώνευσης των ροών (SFPE, 2002).

Σε πραγματικές εκκενώσεις, ωστόσο, υπάρχει συνήθως η κατανομή της πρόσβασης στα σημεία των συγκεντρώσεων. Αυτή η κατάσταση προκαλεί διακοπές στη ροή εξόδου οι οποίες μπορεί να έχουν μία σημαντική επίπτωση στη χωρητικότητα της διατομής εξόδου. Συγκεκριμένα, έχουν παρατηρηθεί επιδράσεις τόσο υψηλές όσο 30-50% μείωση στη ροή σε κλιμακοστάσιο μόνο από τη συγκεκριμένη αιτία.

2.5.5. Αυτοσυγκράτηση

Σε καταστάσεις υψηλής πυκνότητας (πολυπληθή γραφεία ή αμφιθέατρα) τα άτομα παραμένουν σε κατάσταση αναμονής και απέχουν από τη διαδικασία της εκκένωσης μέχρι να μειωθεί το πλήθος (μείωση της πυκνότητας) (SFPE, 2002). Όταν αυτά τα άτομα φτάνουν σε κρίσιμα σημεία εξόδου όπως η κύρια πολυπληθής διαδρομή, που είναι συνήθως το κλιμακοστάσιο, τροφοδοτείται συνεχώς από μία μικρή ουρά αναμονής, η δράση των ατόμων δεν θα έχει κάποιο αντίκτυπο. Ωστόσο, όταν μία καθυστέρηση προκύπτει από ένα μεμονωμένο άτομο, η τροφοδοσία στα κρίσιμα σημεία μειώνεται και προκαλείται μείωση στην αποτελεσματικότητα της εκκένωσης.

2.5.6. Άνιση Χρήση των Εγκαταστάσεων Εξόδου

Αν κάποιες εγκαταστάσεις εξόδου χρησιμοποιούνται περισσότερο από άλλες, η αποτελεσματικότητα του συστήματος εξόδου θα μειωθεί. Μερικές διαδρομές εξόδου θα χρησιμοποιούνται ενώ άλλες θα υπερφορτώνονται.

Η επίδραση της άνισης χρήσης των εγκαταστάσεων εξόδου μπορεί να εκτιμηθεί ως συνάρτηση (SFPE, 2002):

- της κατανομής των εξόδων σε σχέση με την κατανομή του πληθυσμού
- του βαθμού που οι έξοδοι θα χρησιμοποιηθούν είτε για είσοδο στο κτίριο ή για κοινή χρήση εντός της κατασκευής
- του συνόλου των γνωστικών παραγόντων χαρτογράφησης

2.6. Βασικά Χαρακτηριστικά Μετακινήσεων

Η μετακίνηση των ατόμων μπορεί να καθοριστεί ποσοτικά με τη χρήση τριών θεμελιωδών παραμέτρων, οι οποίες εκφράζονται με τη μορφή ποσοστών. Οι συγκεκριμένες παράμετροι είναι η πυκνότητα, η ταχύτητα και η ροή (SFPE, 2002). Ως πυκνότητα ορίζεται ο αριθμός των ατόμων σε μία μονάδα επιφάνειας διάβασης πεζών (π.χ. 2 άτομα/m²). Συχνά, αυτή η παράμετρος αναφέρεται με τη χρήση του αντιστρόφου της πυκνότητας, δηλαδή, η επιφάνεια ανά άτομο ή μονάδα πεζών (π.χ. 0.5m²/άτομο). Ως ταχύτητα ορίζεται η απόσταση που καλύπτεται από ένα άτομο που κινείται στη μονάδα του χρόνου (π.χ. 1m/s). Ο όρος ροή χρησιμοποιείται συχνά σε μια απλή, μη τεχνική προσέγγιση, όταν υπονοείται ο γενικός όρος της κίνησης ή όταν η ταχύτητα είναι αυτή που καθορίζεται στην πραγματικότητα. Η ροή, συγκεκριμένα, είναι ο αριθμός των ατόμων που διέρχονται από ένα σημείο αναφοράς σε μία μονάδα του χρόνου (π.χ. 2 άτομα/s). Αυτές οι τρεις παράμετροι σχετίζονται, μαζί με το πλάτος της διατομής, στη παρακάτω θεμελιώδη εξίσωση (SFPE, 2002):

$$\text{ροή} = \text{ταχύτητα} \times \text{πυκνότητα} \times \text{πλάτος} \text{ (Εξ. 2)}$$

Είναι, επίσης σημαντικό το ότι η ταχύτητα εξαρτάται από την πυκνότητα. Τα άτομα μπορούν να κινηθούν ταχύτερα με κανονικό βήδισμα αν υπάρχει μεγαλύτερος χώρος ανάμεσα τους. Αντίθετα, όσο πιο κοντά είναι μεταξύ τους, τόσο πιο περιορισμένη είναι η κίνηση τους μέχρι το σημείο που όταν βρεθούν πολύ κοντά κινούνται ακανόνιστα, αργά και ανακατεύονται.

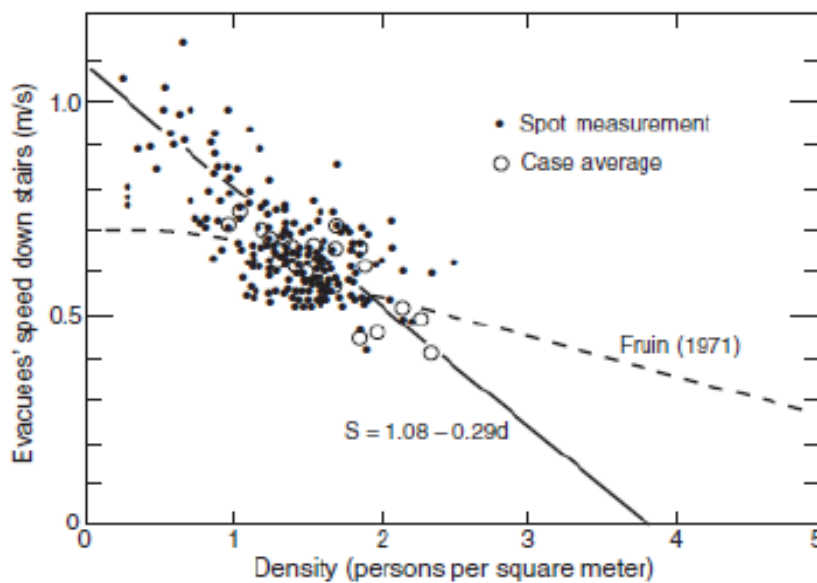
Εκφράζοντας τα προαναφερθέντα με ποσοτικό τρόπο, όταν η πυκνότητα των πεζών είναι μικρότερη από 0.5 άτομα/m², τα άτομα είναι σε θέση να κινηθούν κατά μήκος του διαδρόμου με ταχύτητα 1.25m/s, μία μέση ταχύτητα ώστε να κινηθούν ανεμπόδιστα (SFPE, 2002). Με μεγαλύτερη πυκνότητα, η ταχύτητα μειώνεται και συγκεκριμένα μειώνεται σημαντικά για πολύ υψηλές πυκνότητες φτάνοντας την κατάσταση στασιμότητας όταν η πυκνότητα φτάσει τα 4-5 άτομα/m² (SFPE, 2002). Οι ταχύτητες της κίνησης μεταβάλλονται περισσότερο σε χαμηλές συχνότητες. Όταν η πυκνότητα είναι χαμηλή, δεν είναι απαραίτητα ακριβής ο υπολογισμός κίνησης με υψηλές ταχύτητες. Στην πραγματικότητα, οι κύριοι παράγοντες που θα διαμορφώσουν την ταχύτητα ενδέχεται να είναι τα χαρακτηριστικά των παρευρισκόμενων όπως η ηλικία, οι περιορισμοί και η ομαδοποίηση (π.χ. μία οικογένεια πρόκειται να κινηθεί με την ταχύτητα του πιο αργού μέλους της που μπορεί να είναι ένα παιδί ή ένας ηλικιωμένος) (SFPE, 2002).

Στις σκάλες, οι ταχύτητες της κίνησης είναι ελαφρώς χαμηλότερες. Ενδεικτικά, μία σχέση δεδομένων ταχύτητας-πυκνότητας σε ανεξέλεγκτες ολικές/πλήρεις εκκενώσεις παρουσιάζεται στο γράφημα 2.1 από σχετική έρευνα που πραγματοποιήθηκε από το Pauls (1980). Μία ανάλογη καμπύλη συσχέτισης δεδομένων ταχύτητας-πυκνότητας παρουσιάζεται στο γράφημα 2.2 από

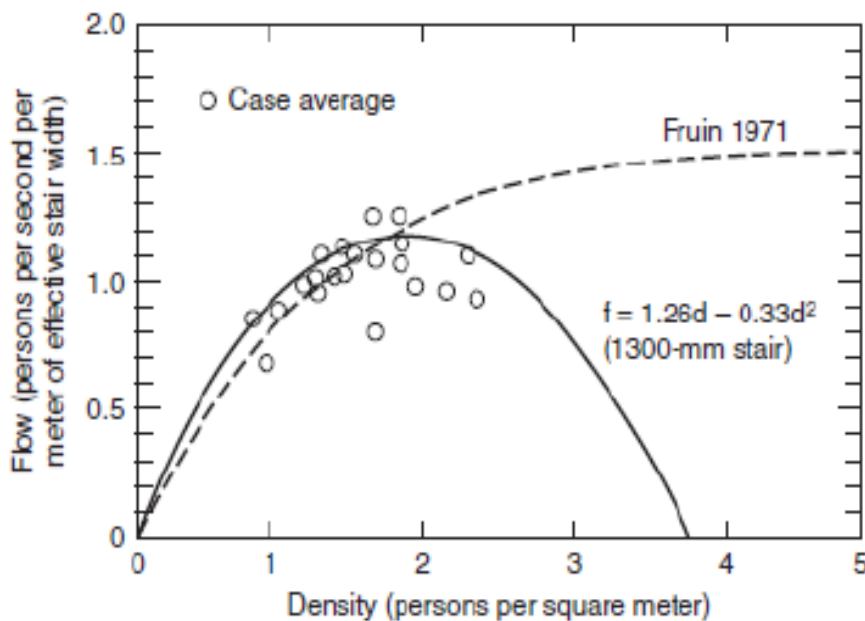
σχετική έρευνα που πραγματοποιήθηκε από το Fruin (1987). Σημειώνεται, ωστόσο ότι τα δεδομένα της έρευνας του Fruin δεν προέρχονται από παρακολούθηση εκκενώσεων κτιρίων σε αντίθεση με τα δεδομένα της έρευνας του Pauls που προέρχονται από ολικές/πλήρεις εκκενώσεις υψηλών κτιρίων (στα οποία συνήθως στεγάζονται γραφεία).

Από τα διαγράμματα προκύπτει ότι υπάρχει μία σχετικά περίπλοκη συσχέτιση μεταξύ ροής και πυκνότητας. Όπως προκύπτει από το γράφημα 2.2 η ροή είναι μικρή, τόσο για χαμηλές, όσο και για υψηλές πυκνότητες, αλλά λαμβάνει μία μέγιστη ή βέλτιστη τιμή, για μία ενδιάμεση πυκνότητα, η οποία κυμαίνεται περίπου στα 2 άτομα/m² και εξαρτάται από το αν τα άτομα κινούνται σε σκάλα ή σε επίπεδο διάδρομο. Η παρακάτω εξίσωση 2 περιγράφει την εμπειρική σχέση ροής-πυκνότητας, η οποία αντιστοιχεί σε για κίνηση σκάλες σε ολικές/πλήρεις εκκενώσεις υψηλών κτιρίων, στα οποία συνήθως στεγάζονται γραφεία (SFPE, 2002):

$$\text{ροή} = 1,26 \times \text{πυκνότητα} - 0,33 \times \text{πυκνότητα}^2 \text{ (Εξ. 2)}$$



Γράφημα 2.1: Συσχέτιση ταχύτητας και πυκνότητας για κίνηση σε σκάλες σε ανεξέλεγκτες ολικές/πλήρεις εκκενώσεις (SFPE, 2002)



Γράφημα 2.2: Συσχέτιση ροής και πυκνότητας για κίνηση σε σκάλες σε ανεξέλεγκτες ολικές/πλήρεις εκκενώσεις (SFPE, 2002)

Αυτά τα βασικά χαρακτηριστικά και οι σχέσεις συχνά περιγράφονται σε δημοσιεύσεις για την κίνηση πεζών. Δεν θα πρέπει να δοθεί πολύ σημασία στις διαφορές των καμπυλών που παρουσιάζονται για μεγάλες πυκνότητες που προκύπτουν στο γράφημα 2.2. Εξάλλου, όπως φαίνεται και στο γράφημα 2.1 αυτές οι συνθήκες παρατηρούνται σπάνια ή δεν παρατηρούνται ποτέ.

Με απλά λόγια, οι βέλτιστες συνθήκες ροής που παρατηρούνται σε μία ανεξέλεγκτη ολική/πλήρη εκκένωση, κατά την εξέλιξη άσκηση εκκένωσης, για μια τυπική σκάλα εξόδου (1120mm) σε ένα γεμάτο κτίριο γραφείων είναι οι ακόλουθες (SFPE, 2002):

- κάθε άτομο θα καταλάβει χώρο ελαφρώς λιγότερο από δύο σκαλοπάτια
- θα υπάρχει κάθοδος του κάθε ορόφου κάθε 15 δευτερόλεπτα
- ένα άτομο/s θα διέρχεται από ένα σταθερό σημείο

Προχωρώντας περαιτέρω, για ένα τέτοιο ιδανικά φορτωμένο κλιμακοστάσιο θα υπάρχει ένας μετακινούμενος για κάθε σκάλα που θα κινείται με εναλλαγές δεξιά και αριστερά. Εκφρασμένες ποσοτικά, οι βέλτιστες συνθήκες ροής για εκκένωση σε κατώτερο όροφο είναι οι εξής (SFPE, 2002):

- πυκνότητα 2 άτομα/m²
- ταχύτητα 0.5 m/s κατά μήκος της κλίσης της σκάλας
- ροή 1.18 άτομα/(m*s) στο ενεργό πλάτος της σκάλας

Το ενεργό πλάτος της σκάλας είναι 300mm μικρότερο από το ονομαστικό πλάτος.

2.7. Τύποι Ροής

Ειδική Ροή

Η ειδική ροή, F_s , είναι η ροή της εκκένωσης ατόμων που διέρχονται από ένα σημείο της διαδρομής εξόδου ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα ενεργού πλάτους, W_e , της εξεταζόμενης διαδρομής. Η ειδική ροή εκφράζεται σε άτομα/s/m ενεργού πλάτους. Η εξίσωση για την ειδική ροή είναι η εξής (SFPE, 2002):

$$F_s = S \times D$$

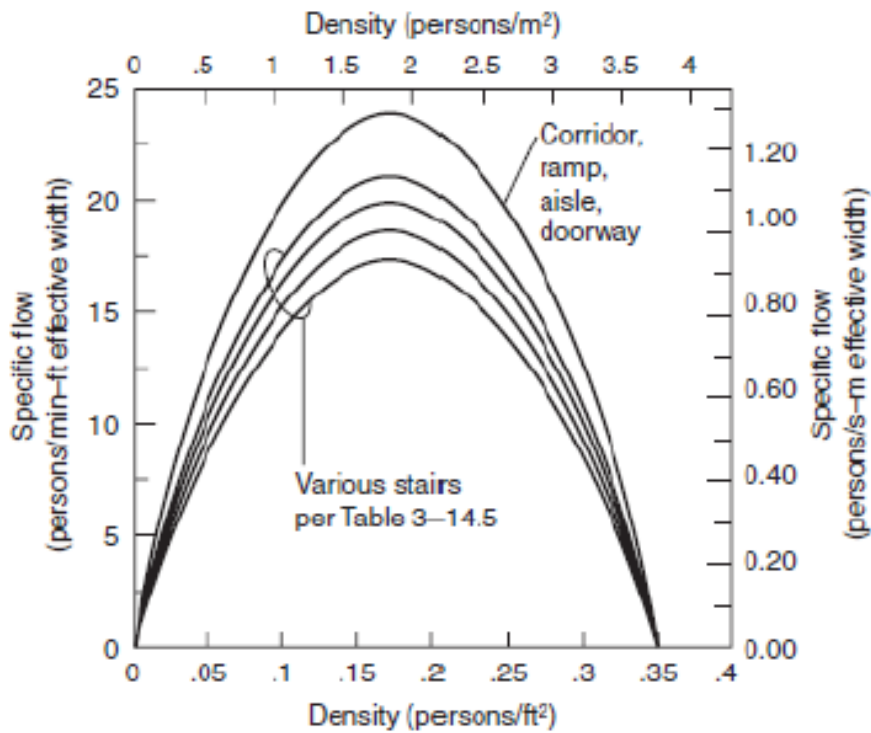
όπου:

F_s : η ειδική ροή (άτομα/s/m²)

S : η ταχύτητα κίνησης (m/s)

D : η πυκνότητα (άτομα/m²)

Η σχέση μεταξύ της ειδικής ροής και της πυκνότητας παρουσιάζεται στο γράφημα 2.3. Σε κάθε περίπτωση η μέγιστη ειδική ροή εμφανίζεται για πυκνότητα 1.9 άτομα/m² του χώρου της διαδρομής εξόδου.



Γράφημα 2.3: Ειδική ροή συναρτήσει της πυκνότητας (SFPE, 2002)

Υπολογισθείσα Ροή

Η υπολογιζόμενη ροή, F_c , είναι ο προβλεπόμενος ρυθμός ροής των ατόμων που διέρχονται από ένα συγκεκριμένο σημείο μίας διαδρομής διαφυγής. Η εξίσωση για την πραγματική ροή είναι (SFPE, 2002):

$$F_c = F_s \times W_e$$

όπου:

F_c : η υπολογιζόμενη ροή

F_s : η ειδική ροή

W_e : το ενεργό πλάτος

2.8. Χρόνος Εκκένωσης

Η πρόβλεψη της μετακίνησης των παρευρισκόμενων κατά τη διάρκεια της διαφυγής είναι μία σημαντική πτυχή των βασισμένων στην αποδοτικότητα μεθόδων ανάλυσης της πυρασφάλειας των κτιρίων. Σε γενικές γραμμές η ασφάλεια της ζωής λόγω πυρκαγιάς επιτυγχάνεται εφόσον ο απαιτούμενος χρόνος (Required Safe Egress Time - RSET) για ασφαλή έξοδο είναι μικρότερος από τον διαθέσιμο χρόνο (Available Safe Egress Time - ASET) για ασφαλή έξοδο, όπου ως ASET ορίζεται ο χρόνος στον οποίο οι συνθήκες που αναπτύσσονται σε ένα χώρο λόγω πυρκαγιάς καθίστανται ανυπόφορες. Ο RSET μπορεί να υποδιαιρεθεί σε ένα αριθμό διακριτών χρονικών διαστημάτων, το άθροισμα των οποίων συγκροτούν το συνολικό RSET και παρουσιάζονται στην παρακάτω εξίσωση (SFPE, 2002):

$$RSET = t_d + t_a + t_o + t_i + t_e$$

όπου:

t_d : είναι ο χρόνος από την ανάφλεξη της πυρκαγιάς έως την ανίχνευση

t_a : είναι ο χρόνος από τον εντοπισμό έως την ειδοποίηση των ατόμων για πυρκαγιά

t_o : είναι ο χρόνος από τη γνωστοποίηση έως την απόφαση των ατόμων να λάβουν μέτρα

t_i : είναι ο χρόνος από την απόφαση για δράση έως την έναρξη της διαδικασίας της εκκένωσης

t_e : είναι ο χρόνος από την έναρξη της εκκένωσης έως την ολοκλήρωση της διαδικασίας της εκκένωσης

Τα στοιχεία του RSET t_d και t_a περιλαμβάνουν εξοπλισμό όπως συσκευές πυρανίχνευσης και συναγερμού και την ανθρώπινη αντίδραση, όπως την ανακάλυψη της πυρκαγιάς ή άλλη ένδειξη της πυρκαγιάς και την ενεργοποίηση του συναγερμού. Τα στοιχεία του RSET t_o και t_i αφορούν τις ατομικές και συλλογικές αντιδράσεις των ατόμων μέχρι την έναρξη της εκκένωσης.

2.8.1. Στοιχεία της Κίνησης σε Επείγουσα Κατάσταση

Τα τελευταία χρόνια έχουν προκύψει αρκετές μέθοδοι, που βασίζονται σε έρευνες, για την πρόβλεψη της ροής ομάδων ανθρώπων σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης. Οι μέθοδοι που αναπτύχθηκαν είναι στις περισσότερες περιπτώσεις, συμβατές και αλληλοϋποστηρίζονται. Όλες βασίζονται στη σχέση μεταξύ της ταχύτητας κίνησης και της πυκνότητας του πληθυσμού του ρεύματος εκκένωσης των ατόμων. Σε γενικές γραμμές αυτές οι μέθοδοι διέπονται από τις εξής υποθέσεις (SFPE, 2002):

- όλα τα άτομα θα αρχίσουν τη διαδικασία της εκκένωσης την ίδια χρονική στιγμή
- η ροή των ατόμων δεν συμπεριλαμβάνει διακοπές που προκαλούνται από αποφάσεις μεμονωμένων ατόμων που εμπλέκονται
- όλα ή τα περισσότερα εμπλεκόμενα άτομα δεν παρουσιάζουν αναπηρία που θα παρεμπόδιζε σημαντικά την ικανότητα τους να συμβαδίζουν με την κίνηση των υπόλοιπων ατόμων

Η συγκεκριμένη προσέγγιση αναφέρεται συχνά ως ένα υδραυλικό μοντέλο διαφυγής σε περίπτωση επείγουσας κατάστασης. Το αποτέλεσμα των υπολογισμών του υδραυλικού μοντέλου ορίζεται ως μοντελοποίηση του χρόνου εκκένωσης. Ο πραγματικός χρόνος διαφυγής είναι ο χρόνος που απαιτείται για τα άτομα ώστε να εγκαταλείψουν το χώρο (SFPE, 2002). Γενικά, ο πραγματικός χρόνος διαφυγής υπερβαίνει το χρόνο που προκύπτει από την ανάλυση. Δεδομένου ότι ο χρόνος εκκένωσης που προκύπτει από την ανάλυση είναι μία προσέγγιση που βασίζεται σε δεδομένα από ασκήσεις εκκένωσης και εμπειρία σε περιπτώσεις αντιμετώπισης πυρκαγιάς, είναι επομένως πιθανό ο χρόνος εκκένωσης που εκτιμάται με βάση την ανάλυση να υπερβαίνει τον πραγματικό χρόνο εκκένωσης. Η διαφορά μεταξύ του υπολογισμένου με βάση την ανάλυση χρόνου εκκένωσης και του πραγματικού χρόνου εκκένωσης μπορεί να εκφραστεί με όρους φαινομενικής αποδοτικότητας της εκκένωσης χρησιμοποιώντας τη σχέση (SFPE, 2002):

$$t_e = t_{me} \times e$$

όπου:

t_{me} : χρόνος εκκένωσης όπως υπολογίζεται με βάση την ανάλυση

e : φαινομενική αποδοτικότητα εκκένωσης

Η φαινομενική αποδοτικότητα εκκένωσης, e , είναι μία συνάρτηση των στοιχείων που υπεισέρχονται στο μοντέλο της υδραυλικής ροής εκκένωσης. Τυπικά παραδείγματα των στοιχείων αποδοτικότητας είναι (SFPE, 2002):

- οι καθυστερήσεις που προκαλούνται από δραστηριότητες διαχείρισης της διαφυγής από φύλακες ή άλλους που κατευθύνουν την εκκένωση
- οι χρονικές καθυστερήσεις που συμπεριλαμβάνονται στη διακοπή και την επανεκκίνηση των ροών στα σημεία συγκέντρωσης
- οι καθυστερήσεις μεμονωμένων ατόμων τα οποία καθυστερούν το ξεκίνημά τους ή επιβραδύνουν το ρυθμό της κίνησής τους

- ανεπαρκής κατανομή στη χρήση των εγκαταστάσεων εξόδου, όπου κάποιες διαδρομές έκτακτης ανάγκης υπερφορτώνονται, ενώ άλλες υποχρησιμοποιούνται

Όλοι αυτοί οι παράγοντες μπορεί να μειώσουν την αποτελεσματικότητα της εκκένωσης. Ωστόσο, τα στοιχεία αυτά σπάνια θα εμφανιστούν όλα σε μία εκκένωση.

Το πρώτο βήμα για την εκτίμηση της κίνησης έκτακτης ανάγκης συνήθως είναι ο υπολογισμός του χρόνου διαφυγής όπως προκύπτει από ανάλυση που βασίζεται στο υδραυλικό μοντέλο ροής. Η χρήση των υπολογισμών των μοντέλων παρέχει μία βάση αναφοράς στην εκτίμηση του αντίκτυπου των ολικών συστημάτων, των μεμονωμένων στοιχείων ή μεταβολών των συστημάτων. Αν, ωστόσο, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από ανάλυση, πρόκειται να συγκριθούν με ένα ρεαλιστικά εκτιμώμενο χρόνο εκκένωσης ή με το αναμενόμενο χρόνο ανάπτυξης της πυρκαγιάς, είναι σημαντικό ο χρήστης να καταλάβει ότι ο χρόνος εκκένωσης όπως εκτιμάται από την ανάλυση σπάνια επιτυγχάνεται στην πραγματικότητα. Η ακριβής εκτίμηση του αναμενόμενου χρόνου εκκένωσης απαιτεί τον υπολογισμό του χρόνου εκκένωσης μέσω ανάλυσης και την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας της εκκένωσης (SFPE, 2002). Ο πραγματικός χρόνος από την έναρξη της πυρκαγιάς έως την εκκένωση περιλαμβάνει τον αναμενόμενο χρόνο κίνησης, t_e , και τα άλλα στοιχεία που συνθέτουν τον απαιτούμενο χρόνο RSET.

Πολύ σημαντικό στοιχείο της διαδικασίας εκκένωσης είναι ο συνολικός χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση της διαδικασίας της εκκένωσης (SFPE, 2002). Ο συνολικός χρόνος που απαιτείται για τα άτομα για να μετακινηθούν πέρα από ή διαμέσου ενός τμήματος της κυκλοφορίας, ο οποίος είναι ο χρόνος ροής πρέπει να διακρίνεται από το χρόνο κίνησης, ο οποίος είναι ο χρόνος που χρειάζεται για να κινηθεί από ένα σημείο προέλευσης σε ένα σημείο προορισμού, όπως είναι ένα απομακρυσμένο ασφαλές μέρος. Ο χρόνος ροής είναι απλά μια συνάρτηση της ικανότητας ροής του πλήθους που αντιστοιχεί στο ωφέλιμο πλάτος ενός συγκεκριμένου στοιχείου της κυκλοφορίας και του πληθυσμού ή του αριθμού των ατόμων που πρόκειται να κινηθεί μέσα από αυτό.

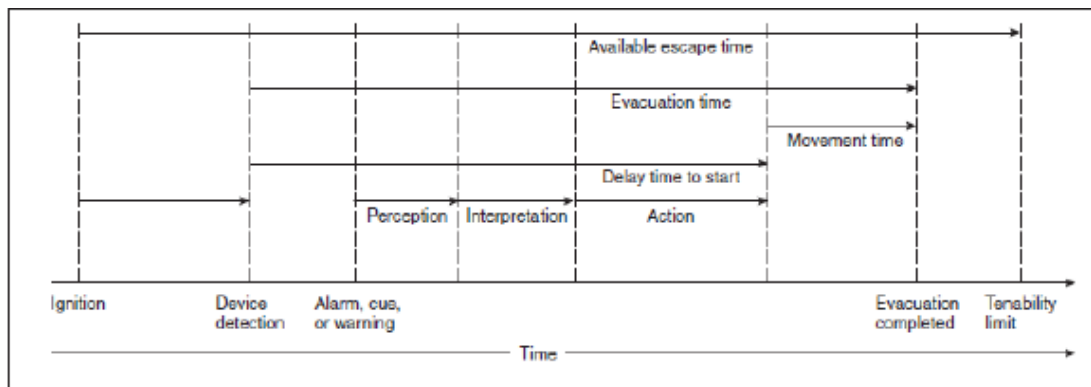
Ο πληθυσμός, η ικανότητα και ο χρόνος ροής σχετίζονται ως εξής (SFPE, 2002):

$$\text{πληθυσμός} = \text{ικανότητα ροής} \times \text{χρόνος ροής} \quad (\text{Εξ. 3})$$

Ο χρόνος εκκένωσης είναι σχετικά περίπλοκος και είναι σχετικά πιο δύσκολο να ελεγχθεί και να εκτιμηθεί ή να προβλεφθεί σε σχέση με το χρόνο ροής. Ο χρόνος εκκένωσης περιλαμβάνει δύο κύριους παράγοντες:

- το χρόνο καθυστέρησης για να αρχίσει η διαδικασία μετακίνησης
- τον χρόνο που χρειάζεται για τη μετάβαση σε ένα ασφαλές μέρος

Ο χρόνος για μία ασφαλή εκκένωση των παρευρισκόμενων σε περίπτωση πυρκαγιάς περιορίζεται στο χρόνο μέσα στον οποίο δεν προκύπτουν συμβάντα τα οποία δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν. Ένας τρόπος ώστε να απεικονιστεί ο χρόνος διαφυγής παρουσιάζεται στην εικόνα 2.3, στο οποίο παρουσιάζονται τα διαφορετικά στοιχεία του διαθέσιμου χρόνου.



Εικόνα 2.3: :Απεικόνιση του χρόνου αντίδρασης σε περίπτωση φωτιάς (SFPE, 2002)

Ο χρόνος της ανάφλεξης είναι ο χρόνος έναρξης του γεγονότος της εκδήλωσης της πυρκαγιάς. Στη συνέχεια θεωρείται χρόνος που απαιτείται μέχρι να πραγματοποιηθεί η ανίχνευση. Η ανίχνευση μπορεί να διαρκέσει από μερικά δευτερόλεπτα έως μερικές ώρες, ανάλογα με τον τύπο της πυρκαγιάς και τις συσκευές ανίχνευσης που έχουν τοποθετηθεί στο χώρο.

Υπάρχει ακόμα ένας χρόνος που θεωρείται μεταξύ της ανίχνευσης και της ενεργοποίησης του συναγερμού. Σε ορισμένες περιπτώσεις αυτά τα δύο γεγονότα είναι σχεδόν ταυτόχρονα, αλλά θα μπορούσε να υπάρχει μία καθυστέρηση.

Ο χρόνος έναρξης να ξεκινά να υπολογίζεται όταν το σήμα του συναγερμού πυρκαγιάς γίνει αντιληπτό. Ο συναγερμός της πυρκαγιάς μπορεί να μην ενεργοποιηθεί ή να μη λειτουργεί κι επομένως οι παρευρισκόμενοι θα αντιληφθούν ενδείξεις πυρκαγιάς ή θα λάβουν προειδοποιήσεις από άλλους.

Ο χρόνος καθυστέρησης για την έναρξη αποτελείται από τρεις επιμέρους συνιστώσες: την αντίληψη, την ερμηνεία και τη δράση. Η αντίληψη είναι ο χρόνος που τα άτομα θα χρειαστούν, ώστε να αντιληφθούν το σήμα του συναγερμού πυρκαγιάς ή την ένδειξη της πυρκαγιάς ή την προειδοποίηση από άλλους. Η ερμηνεία αυτών των πληροφοριών θα χρειαστεί κάποιο χρόνο και διαφορετικές ενέργειες θα πρέπει να γίνουν για την έρευνα ή την αναζήτηση περισσότερων πληροφοριών προτού ληφθεί η απόφαση για εκκένωση. Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία της αντίληψης-ερμηνείας-δράσης τότε τα άτομα θα αρχίσουν να κινούνται.

Ο χρόνος κίνησης θα πρέπει να υπολογίζεται από το χρόνο της ροής μέσω διαφόρων στοιχείων του συστήματος εξόδου και του χρόνου μετακίνησης κατά μήκος των διαδρομών εξόδου. Ο χρόνος εκκένωσης υπολογίζεται από τη στιγμή της ενεργοποίησης του συστήματος συναγερμού μέχρι τη στιγμή που το τελευταίο άτομο θα φτάσει σε ασφαλή περιοχή.

Ο διαθέσιμος χρόνος (ASET) για ασφαλή έξοδο και ολοκλήρωση της εκκένωσης παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.3 για διαφορετικές περιπτώσεις επειγουσών καταστάσεων και συμβάντων. Οι τιμές του διαθέσιμου χρόνου που παρουσιάζονται αναφέρονται σε υπόγεια έργα.

Πίνακας 2.3: Διαθέσιμος χρόνος εκκένωσης υπόγειου χώρου για διαφορετικές επείγουσες καταστάσεις (Κυρίτσης, 2010)

Επείγουσα Κατάσταση	ASET (min)	
Πυρκαγιά	Ύπαρξη ανιχνευτών, χωρίς ειδικά μέσα πρόληψης	15
	Με χρήση συστήματος αερισμού εκτροπής και περιορισμού της εξάπλωσης της πυρκαγιάς	30
	Με εσωτερικούς διαχωρισμούς πυροπροστασίας και πυροφραγμούς	45
Διαρροή τοξικών χημικών ουσιών	Ύπαρξη ανιχνευτών	15
	Με χρήση συστήματος αερισμού εκτροπής και περιορισμού της εξάπλωσης της διαρροής	30
Πλημμύρα, υδάτινες εισροές	45	
Διακοπή παροχής ηλεκτρικής ενέργειας	60	
Σεισμική δόνηση	30	
Γενική απειλή: π.χ. απειλή για έκρηξη βόμβας	15-30	

Οι επιμέρους χρόνοι από τους οποίους αποτελείται ο απαιτούμενος χρόνος για την πραγματοποίηση της εκκένωσης επηρεάζονται και καθορίζονται από διάφορους παράγοντες (Κυρίτσης, 2010). Ενδεικτικά, παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.4 για την περίπτωση πυρκαγιάς οι παράγοντες επιρροής του t_d που είναι ο χρόνος από την ανάφλεξη της πυρκαγιάς έως την ανίχνευση, του t_a που είναι ο χρόνος από τον εντοπισμό έως την ειδοποίηση των ατόμων για πυρκαγιά, του t_o που είναι ο χρόνος από τη γνωστοποίηση έως την απόφαση των ατόμων να λάβουν μέτρα, του t_i που είναι ο χρόνος από την απόφαση για δράση έως την έναρξη της διαδικασίας της εκκένωσης και του t_e που είναι ο χρόνος από την έναρξη της εκκένωσης έως την ολοκλήρωση της διαδικασίας της εκκένωσης.

Πίνακας 2.4: Παράγοντες επιρροής των επιμέρους χρόνων στην περίπτωση πυρκαγιάς (Κυρίτσης, 2010)

Επιμέρους κατηγορία χρόνου	Παράγοντες Επιρροής
t_d, t_a	ανιχνευτές - αισθητήρες, θερμοκρασία ενεργοποίησης ανιχνευτών, εμβέλεια ανιχνευτών, πυκνότητα πληθυσμού, είδος δραστηριοτήτων του χώρου, χαρακτηριστικά πυρκαγιάς
t_o, t_i	εκπαίδευση πληθυσμού, βαθμός εξοικείωσης με διαδικασία εκκένωσης σύστημα συναγερμού
t_e	χώρος πυρκαγιάς, αριθμός εξόδων, μήκη διαδρόμων, πλάτη εξόδων, πληθυσμός, συμπεριφορά και απόκριση πληθυσμού, ταχύτητα πληθυσμού, διατάξεις διάσωσης, βάθος υπόγειου χώρου

Ο χρόνος ανίχνευσης της πυρκαγιάς t_d , όταν υπάρχει αυτόματος μηχανισμός ανίχνευσης λαμβάνεται 1 min, ενώ στην περίπτωση που δεν υπάρχει τέτοιο σύστημα τότε λαμβάνεται 2 min. Ο χρόνος ειδοποίησης του πληθυσμού t_a εξαρτάται από το σχεδιασμό αντίδρασης του συστήματος και τον τρόπο που προβλέπεται η εκπομπή του σήματος της εκκένωσης (Κυρίτσης, 2010). Ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας του συστήματος διακρίνονται τρεις επιμέρους κατηγορίες. Στην κατηγορία 1 το σύστημα ανιχνευτών αισθητήρων εντοπίζει καπνό, θερμότητα ή άλλες χημικές ενώσεις, τα στοιχεία μεταφέρονται σε κεντρικό υπολογιστικό κέντρο και με μέσω ειδικού λογισμικού σημαίνει συναγερμός. Στην κατηγορία 2 ο εντοπισμός γίνεται με τον ίδιο τρόπο, αλλά η σήμανση του συναγερμού γίνεται κατόπιν αξιολόγησης της επείγουσας κατάστασης με βάση τη στρατηγική αντιμετώπισης και διαχείρισης τέτοιων συμβάντων όπως αυτή έχει καθοριστεί. Στην κατηγορία 3 η σήμανση συναγερμού γίνεται με χειροκίνητο σύστημα από τοπικό χειριστήριο πλησίον του συμβάντος από άτομο του χώρου που αντιλαμβάνεται το συμβάν. Οι τιμές του χρόνου ειδοποίησης του πληθυσμού t_a παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.5.

Πίνακας 2.5: Χρόνος t_a για διαφορετικές κατηγορίες συστήματος συναγερμού στην περίπτωση πυρκαγιάς (Κυρίτσης, 2010)

Κατηγορία συστήματος συναγερμού	t_a (min)
Κατηγορία 1	0
Κατηγορία 2	2-5
Κατηγορία 3	5-6

Ο χρόνος από τη γνωστοποίηση έως την απόφαση των ατόμων να λάβουν μέτρα t_o και ο χρόνος από την απόφαση για δράση έως την έναρξη της διαδικασίας της εκκένωσης t_i διακρίνονται με βάση το σύστημα συναγερμού σε τρεις κατηγορίες (Κυρίτσης, 2010). Στην κατηγορία 1, οι οδηγίες παρέχονται σε πραγματικό χρόνο με φωνητικά μηνύματα από το κέντρο ελέγχου και διαχείρισης επειγουσών καταστάσεων ή παρέχονται από μαγνητοφωνημένα μηνύματα σε συνδυασμό με προσωπικό που κατευθύνει τα άτομα. Στην κατηγορία 2, οι οδηγίες παρέχονται μόνο με μαγνητοφωνημένα μηνύματα. Στην κατηγορία 3, οι οδηγίες παρέχονται από σύστημα συναγερμού και σειρήνες με προσωπικό το οποίο όμως δεν είναι ειδικά εκπαιδευμένο. Οι τιμές των συγκεκριμένων χρόνων παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.6.

Πίνακας 2.6: Χρόνοι t_o και t_i σε min για διαφορετικές κατηγορίες συστήματος συναγερμού στην περίπτωση πυρκαγιάς (Κυρίτσης, 2010)

Τύπος χώρου	Κατηγορία 1 (min)	Κατηγορία 2 (min)	Κατηγορία 3 (min)
Γραφεία σε υπόγειο χώρο	1	3	4-5
Αποθήκες σε υπόγειο χώρο	2	3	5-6
Χώρος Κοινού Επισκεπτών (Αραιά)	1	3	5
Χώρος Κοινού Επισκεπτών (Πυκνά)	1	3	4-5

2.8.2. Υπολογισμός του Χρόνου Καθυστέρησης

Για τον υπολογισμό του συνολικού χρόνου εκκένωσης πρέπει να υπολογιστεί ένας χρόνος καθυστέρησης μέχρι την έναρξη της κίνησης κατά την εκκένωση (SFPE, 2002). Όλοι οι ερευνητές στον τομέα της ανθρώπινης συμπεριφοράς σε πυρκαγιά είναι επιφυλακτικοί στο να προτείνουν αριθμούς λόγω των περιορισμένων ευρημάτων στο συγκεκριμένο τομέα. Παρ' όλα αυτά, λόγω της γρήγορης ανάπτυξης της προσέγγισης που είναι βασισμένη στην απόδοση, για την εξέταση νέων πρωτοποριακών συστημάτων σχεδιασμού πυρασφάλειας, ορισμένα δεδομένα για την εκτίμηση του χρόνου καθυστέρησης μέχρι να ξεκινήσει η εκκένωση από τα άτομα είναι ουσιώδη.

2.9. Κίνηση σε Καπνό λόγω Πυρκαγιάς

Για πολύ καιρό θεωρούνταν ότι κατά τη διάρκεια μίας διαδικασίας εκκένωσης, όταν οι παρευρισκόμενοι έρχονται αντιμέτωποι με καπνό, θα σταματούσαν, θα γύριζαν πίσω και θα προσπαθούσαν να βρουν άλλη έξοδο. Είναι πλέον αναγνωρισμένο ότι οι περισσότεροι άνθρωποι να κινηθούν στον καπνό. Εκτιμάται ότι πάνω από το 60% των ατόμων που προβαίνουν σε εκκένωση σε μικρά κτίρια κατοικιών διέρχονται μέσα από τον καπνό κατά την εκκένωση (SFPE, 2002). Στην πραγματικότητα η κίνηση διαμέσου καπνού είναι ένα επαναλαμβανόμενο γεγονός σε περιστατικά πυρκαγιών. Το γεγονός ότι η κίνηση μέσα από καπνό είναι τόσο διαδεδομένη κατά τη διάρκεια εκκένωσης λόγω πυρκαγιάς μπορεί να εξηγηθεί από την ταυτόχρονη κίνηση ενός μεγάλου αριθμού των χρηστών. Οι χρήστες του ορόφου που εκτυλίσσεται η πυρκαγιά και απομακρύνονται από τον συγκεκριμένο όροφο θα οδηγήσουν στην διάχυση του καπνού στο κλιμακοστάσιο κατά το άνοιγμα των θυρών για τη διαφυγή τους (SFPE, 2002). Ακόμα, και αν το κλιμακοστάσιο είναι σε καθεστώς μεγαλύτερης πίεσης, η επαναλαμβανόμενη κίνηση των χρηστών από τον όροφο εκδήλωσης της πυρκαγιάς στο κλιμακοστάσιο στο οποίο ανοίγουν οι θύρες διαφυγής κι από τους χρήστες όλων των υψηλότερων ορόφων θα οδηγήσει στην μόλυνση του κλιμακοστασίου. Υπό αυτό το πρίσμα, το κλιμακοστάσιο σε ένα πολυώροφο κτίριο μπορεί να είναι το αμέσως πιο επικίνδυνο μέρος κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς για τους χρήστες, μετά το χώρο εκδήλωσης της πυρκαγιάς και τον όροφο εξέλιξης της πυρκαγιάς (SFPE, 2002).

Μολονότι, φαίνεται ότι είναι γνωστό στο κοινό ότι ο καπνός προκαλεί το θάνατο των ανθρώπων, οι χρήστες είναι προετοιμασμένοι να κινηθούν διαμέσου καπνού για να φτάσουν σε ασφάλεια. Η γνώση στο κοινό ότι ο καπνός προκαλεί το θάνατο, δε σημαίνει ότι το κοινό είναι καλός κριτής της πιθανής θανατηφόρας επιρροής του καπνού (SFPE, 2002). Τα θύματα αναφέρουν ότι κατάφεραν να επιβιώσουν διαμέσου καπνού γιατί κινούνταν πολύ γρήγορα ή ανέπνεαν μέσω ενός πανιού ή κρατώντας την αναπνοή τους για να προστατευτούν. Στην πραγματικότητα τα συγκεκριμένα άτομα ήταν ιδιαίτερα τυχερά γιατί ο καπνός προκαλεί θάνατο και μάλιστα ταχύ (ακόμα και δύο προσπάθειες αναπνοής μπορούν να προκαλέσουν απώλεια αισθήσεων).

Το βασικό κίνητρο για να κινηθεί κάποιος μέσα από τον καπνό ήταν ή γνώση μίας περιοχής εξόδου και η ικανότητα εκτίμησης της απόστασης μέχρι την έξοδο (SFPE, 2002). Ένα άλλο κίνητρο, το οποίο μπορεί να προκύψει σε πολυώροφα κτίρια είναι η έντονη επιθυμία των χρηστών να φτάσουν στο επίπεδο του εδάφους. Επίσης, όταν οι ένοικοι αρχίζουν την εκκένωση είναι πιθανό να μην είναι ορατός, αλλά τελικά κατά την κάθοδο τους η κατάσταση άλλαξε. Υπό αυτές τις συνθήκες, κάποιιοι χρήστες μπορεί να επιμείνουν να κινηθούν προς τα κάτω, άλλοι θα γυρίσουν πίσω, ενώ κάποιιοι άλλοι θα ψάξουν για καταφύγιο.

Η παρουσία καπνού έχει σημαντική επίδραση στην ταχύτητα κίνησης των ατόμων. Από την έρευνα του Jin (1997) προέκυψε ότι στο αρχικό στάδιο της πυρκαγιάς η ταχύτητα κίνησης των ατόμων ήταν πάνω από 1m/s, η οποία κατά την εξέλιξη της πυρκαγιάς μειώθηκε σημαντικά σε 0.5 m/s. Αυτό

οφείλεται στη μείωση της ορατότητας, λόγω του καπνού που από λευκός, εξελίσσεται σε μαύρο και περισσότερο πυκνό.

Από την έρευνα του Jensen (1993) που πραγματοποιήθηκε σχετικά με την επίδοση διαφορετικών συστημάτων καθοδήγησης διαμέσου καπνού, έδειξε ότι η ταχύτητα κίνησης κυμαίνεται σε 0.2-0.4m/s ανεξάρτητα από οποιοδήποτε σύστημα πληροφοριών που χρησιμοποιείται. Όσοι, έχουν επιβιώσει από καταστροφικές πυρκαγιές κινήθηκαν κατά μέσο όρο μόλις 10m σε βαρύ καπνό. Για ταχύτητα 0.2m/s, αυτό ισοδυναμεί με έκθεση σε καπνό για 50s.

Μελέτες έχουν καταδείξει ότι η κίνηση των ατόμων διαμέσου καπνού πριν καταστούν ανίκανοι να επιβιώσουν εντός του καπνού εξαρτάται από έναν αριθμό παραγόντων (SFPE, 2002), όπως είναι το βάρος, η φυσική κατάσταση, η δραστηριότητα των ατόμων και το μείγμα και η συγκέντρωση των αερίων που αναπτύσσονται από τη φωτιά. Γενικά, οι χρήστες έχουν στη διάθεση τους λίγα λεπτά για να κινηθούν πριν καταστεί αδύνατη η κίνησή τους διαμέσου καπνού. Αν και η εκπαίδευση, η κατάρτιση και οι διαδικασίες εκκένωσης συνιστούν να αποφεύγεται η κίνηση στον καπνό, τα άτομα εξακολουθούν να κινούνται εντός του καπνού.

Ένα άλλο πρόβλημα της κίνησης διαμέσου καπνού είναι η ταχεία κάλυψη των συστημάτων φωτισμού της οροφής που δημιουργεί την εντύπωση της πλήρους συσκότισης (SFPE, 2002). Από συνεντεύξεις πυρόπληκτων που κινήθηκαν εντός του καπνού προκύπτουν σταθερά συμπεράσματα: τα άτομα επιμένουν ότι το ρεύμα κατά τη διάρκεια της εκκένωσης ήταν εκτός λειτουργίας ακόμη κι αν μετά την πυρκαγιά δεν εντοπίστηκε κάποιο σφάλμα στο σύστημα ηλεκτρισμού. Κατά συνέπεια, η πυκνότητα του καπνού ήταν εκείνη που επισκίαζε τα συστήματα φωτισμού.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος της κίνησης σε συνθήκες συσκότισης, η εγκατάσταση ενός συστήματος καθοδήγησης από φωσφορίζον υλικό γίνεται ολοένα και πιο δημοφιλές. Τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου υλικού που χρησιμοποιείται στο σύστημα καθοδήγησης για την αποτελεσματική καθοδήγηση των ατόμων στο σκοτάδι είναι ιδιαίτερα ενδιαφέροντα. Αυτό το υλικό θα μπορούσε να παρέχει υποστήριξη στα άτομα που πραγματοποιούν εκκένωση στην περίπτωση που ο τυπικός φωτισμός και ο φωτισμός έκτακτης ανάγκης έχουν αποτύχει. Στην έρευνα του Jensen (1993), φωσφορίζον υλικό τοποθετήθηκε ως μία συνεχής γραμμή στο επίπεδο του δαπέδου και σε απόσταση ενός μέτρου από το δάπεδο και λειτούργησε καλύτερα και πιο αποτελεσματικά από διατάξεις φωτισμού για να καθοδηγήσουν τα άτομα σε συνθήκες καπνού. Σε μία έρευνα πεδίου που πραγματοποιήθηκε από τον Roulx (2001), διαπιστώθηκε ότι οι ταχύτητες κίνησης σε ένα κλιμακοστάσιο, με φωσφορίζον σύστημα καθοδήγησης, σε συνθήκες συσκότισης, ήταν συγκρίσιμες με ταχύτητες για πλήρως φωτισμένο κλιμακοστάσιο.

3. Σχεδιασμός Εκκένωσης για Υπόγειους Χώρους

3.1. Εισαγωγή

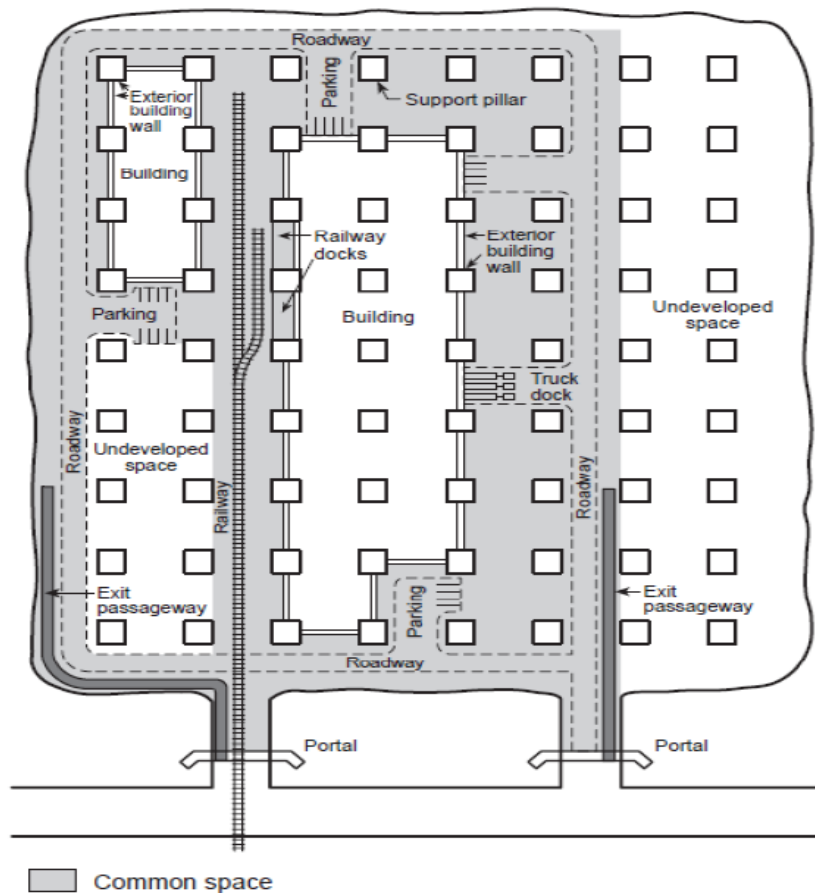
Ο υπόγειος χώρος αποτελεί μια ιδιαίτερη κατηγορία χώρων που βρίσκεται κάτω από το έδαφος εκεί όπου η αίσθηση του προσανατολισμού είναι μειωμένη ενώ δεν υπάρχει φυσικός φωτισμός και αερισμός. Οι συνθήκες εκκένωσης για τους ανθρώπους που βρίσκονται σε έναν χώρο αυτής της κατηγορίας είναι πολύ διαφορετικές σε σχέση με τις συνθήκες που μπορεί να αναμένονται σε δημόσια κτίρια, για αυτό ο σχεδιασμός εκκένωσης σε έναν υπόγειο χώρο χρήζει διαφορετικής προσέγγισης. Ένας υπόγειος χώρος χαρακτηρίζεται από ιδιαιτερότητες οι οποίες επηρεάζουν την διαδικασία της εκκένωσης. Ενδεικτικά αναφέρονται οι σημαντικότερες από αυτές (Κυρίτσης, 2010):

- η κίνηση στα κλιμακοστάσια είναι ανοδική
- ο καπνός κινείται προς τις εξόδους διαφυγής
- παρατηρείται ταχεία αύξηση της θερμότητας της καύσιμης ύλης
- τα άτομα αισθάνονται αποπροσανατολισμένα
- τα άτομα τείνουν να βγουν από εκεί που μπήκαν
- τα άτομα διακατέχονται από ένα αίσθημα κούρασης κατά την κίνησή τους σε σκάλες και ράμπες
- καθυστέρηση στην έναρξη της εκκένωσης

Όσα χρησιμοποιούνται γενικά για τον σχεδιασμό της εκκένωσης μιας υπέργειας κατασκευής ισχύουν και για τους υπόγειους χώρους, αλλά λόγω του ιδιαίτερου χαρακτήρα των υπογείων χώρων πρέπει να ληφθούν υπόψη οι προδιαγραφές και οι απαιτήσεις που περιέχονται σε αντίστοιχους κανονισμούς (NFPA 520, NFPA 130) και οδηγίες (Οδηγία 2001/16/ΕΚ, Οδηγία 2004/54/ΕΚ, Οδηγία 96/48/ΕΚ).

3.2. Υπόγειος Χώρος

Σύμφωνα με τον ορισμό που δίνει ο Αμερικάνικος Κανονισμός NFPA 520 (1999) ο υπόγειος χώρος είναι ένα κοίλωμα αρκετά μεγάλο που έχει προκύψει από την εξαγωγή του υλικού κάτω από το έδαφος, με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε η επιφάνεια της ιδιοκτησίας δεν επηρεάζεται παρά μόνο στην περιοχή των εισόδων και των ανοιγμάτων των αεραγωγών. Οι χώροι αυτοί μπορεί να είναι μεταβλητού μεγέθους και χρησιμοποιούνται πολλές φορές για εμπορική χρήση αφού έχουν τροποποιηθεί κατάλληλα. Για τη διαμόρφωση ενός τέτοιου χώρου χρησιμοποιούνται κατάλληλοι πυλώνες στήριξης οι οποίοι περικλείονται περιμετρικά από τοίχωμα. Στους χώρους αυτούς επιτρέπεται η εγκατάσταση επιχειρήσεων, βιομηχανιών, κατοικιών καθώς και άλλων μορφών δραστηριοτήτων όπως επίσης και η αποθήκευση υλικών υψηλής επικινδυνότητας. Η περιοχή ενός τέτοιου αναπτυγμένου υπόγειου χώρου η οποία περιλαμβάνει αλλά δεν περιορίζεται σε αυτοκινητόδρομους, αποβάθρες φόρτωσης, σιδηροδρόμους και εισόδους ονομάζεται κοινός χώρος (common space), όπως φαίνεται στην εικόνα 3.1.



Εικόνα 3.1: Κάτοψη αναπτυγμένου υπόγειου χώρου (NFPA 520, 1999)

Ο ιδιοκτήτης ή ο εκπρόσωπος του ιδιοκτήτη ενός τέτοιου χώρου πρέπει να φροντίζει για την καθιέρωση, την εφαρμογή και την διατήρηση ενός σχεδίου αντιμετώπισης μίας επείγουσας κατάστασης το οποίο θα είναι ελεγμένο και αποδεκτό από την αρμόδια αρχή. Σε έναν τέτοιο χώρο πρέπει να έχουν οριστεί τα κατάλληλα μέσα εξόδου, τα οποία στην περίπτωση του κοινού χώρου πρέπει να συμμορφώνονται με τις ακόλουθες απαιτήσεις (NFPA 520, 1999):

- οι έξοδοι πρέπει να διατάσσονται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να υπάρχουν τουλάχιστον δύο ξεχωριστά μέσα εξόδου προς το εξωτερικό του υπόγειου χώρου
- οι απαραίτητοι έξοδοι από τον υπόγειο χώρο θα πρέπει να διαχωρίζονται από μία απόσταση τουλάχιστον 300ft (91m)
- όταν οι χρήστες είναι περισσότεροι από 5000, τότε είναι απαραίτητη μία τρίτη έξοδος η οποία θα οδηγεί στο εξωτερικό του υπόγειου χώρου

Ο Αμερικάνικος Κανονισμός (NFPA 520) αποτελεί έναν σύγχρονο, και πλήρη κανονισμό για υπόγειους χώρους και περιέχει τις προδιαγραφές που θα πρέπει να καλύπτει ένας τέτοιος χώρος προκειμένου να είναι ασφαλής και λειτουργικός για τους χρήστες. Στοιχεία για τις προδιαγραφές που εισάγει ο παραπάνω κανονισμός παρουσιάζονται παρακάτω. Οι προδιαγραφές αυτές σχετίζονται με τον τρόπο υπολογισμού του φορτίου των χρηστών, με τις συνθήκες φωτισμού, με την σήμανση των μέσων εξόδου και με διάφορα άλλα στοιχεία που περιγράφονται στη συνέχεια.

Ο αριθμός των χρηστών που θα χρησιμοποιηθεί για τους υπολογισμούς του πλάτους της εξόδου από τον κοινό χώρο θα πρέπει να βασίζεται, είτε στο 150% του μέγιστου φορτίου των χρηστών ενός κτιρίου είτε στα 186m² καθαρής επιφάνειας ανά άτομο, αναλόγως ποιο από τα δύο μεγέθη είναι το μεγαλύτερο. Το πλάτος εξόδου εντός του κοινού χώρου για επίπεδη μετακίνηση υπολογίζεται με βάση τα 0.5cm ανά άτομο ενώ για κίνηση σε σκάλες με βάση τα 0.3cm ανά άτομο, αναλόγως με

το φορτίο των χρηστών που έχει καθοριστεί. Κάθε πόρτα σε ένα απαιτούμενο μέσο εξόδου εντός του κοινού χώρου πρέπει να ανοίγει από το εσωτερικό χωρίς τη χρήση κλειδιού, ειδικών γνώσεων ή κάποιας επιπλέον προσπάθειας.

Τα μέσα εξόδου εντός του κοινού χώρου θα πρέπει να έχουν μία ελάχιστη ένταση φωτισμού ο οποίος εντοπίζεται στη θέση κάθε υδροληψίας στο επίπεδο του δαπέδου. Επιπρόσθετα σημεία φωτισμού θα πρέπει να παρέχονται στην περίπτωση που δεν είναι εφικτή η οπτική επαφή μεταξύ των πυροσβεστικών κρουνών. Τα μέσα εξόδου εντός του κοινού χώρου θα πρέπει να έχουν φωτισμό έκτακτης ανάγκης, ο οποίος τροφοδοτείται από μια εφεδρική πηγή ενέργειας ελάχιστης διάρκειας μιάμιση ώρας.

Όλα τα μέσα εξόδου εντός του υπόγειου χώρου, τόσο για την γενική κατεύθυνση της κυκλοφορίας όσο και για περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης θα προσδιορίζονται με κατάλληλη αντανακλαστική σήμανση. Η σήμανση αυτή δείχνει στην πλησιέστερη έξοδο από τον υπόγειο χώρο. Η αναγνώριση της οδού και η διαδρομή εξόδου εντός του υπόγειου χώρου πρέπει να αποτυπώνονται σε χάρτες οι οποίοι είναι διαθέσιμοι σε όλα τα άτομα που χρησιμοποιούν την εγκατάσταση. Τέτοιοι χάρτες πρέπει να επικαιροποιούνται σε ετήσια βάση ώστε να αντανακλούν τις σημαντικές αλλαγές.

Οι χρήστες του υπόγειου χώρου μπορούν να καταφύγουν για ασφάλεια σε μία συγκεκριμένη περιοχή του χώρου όταν η εκκένωση από τον υπόγειο χώρο δεν είναι εφικτή. Μία ή περισσότερες περιοχές που χρησιμεύουν ως καταφύγιο ή οι δίοδοι εξόδου θα πρέπει να παρέχονται όταν η απόσταση που πρέπει να διανύσουν οι χρήστες υπερβαίνει τα 610m. Οι συγκεκριμένες περιοχές θα πρέπει να μπορούν να χρησιμοποιούνται και για άλλους σκοπούς σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας της εγκατάστασης, υπό την προϋπόθεση ότι θα είναι πάντα διαθέσιμες σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης. Οι περιοχές οι οποίες λειτουργούν σαν καταφύγια πρέπει να πληρούν τις παρακάτω προϋποθέσεις (NFPA 520, 1999):

- κάθε περιοχή πρέπει να παρέχει μία επιφάνεια 0.9m^2 για κάθε άτομο που πρόκειται να εξυπηρετήσει
- πρέπει να διαθέτει κατάλληλο σύστημα εξαερισμού με γεώτρηση που θα προμηθεύει την περιοχή με φρέσκο αέρα από την επιφάνεια κατά την διάρκεια εκδήλωσης μίας πυρκαγιάς. Η ποσότητα του αέρα θα πρέπει να είναι τουλάχιστον $20 \cdot 9.44 \text{ l/s}$ ανά άτομο ή η ελάχιστη ποσότητα που απαιτείται για να αποφευχθεί η διείδυση καπνού, ανάλογα ποιο από τα δύο μεγέθη είναι μεγαλύτερο
- η πίεση σε σχέση με τον παρακείμενο χώρο θα πρέπει να είναι 12.5 Pa
- η είσοδος και η έξοδος από αυτές τις περιοχές θα γίνεται μέσω ενός προθάλαμου ο οποίος θα είναι εξοπλισμένος με θύρες που κλείνουν αυτόματα
- πρέπει να διαθέτουν τρόφιμα, πόσιμο νερό, φωτισμό έκτακτης ανάγκης, εγκαταστάσεις υγιεινής, κουβέρτες και συσκευασίες πρώτων βοηθειών. Η επικοινωνία με το κέντρο αντιμετώπισης του περιστατικού πρέπει να γίνεται χωρίς περιορισμούς
- οι περιοχές αυτές πρέπει να διαχωρίζονται από το υπόλοιπο του υπόγειου χώρου με τοιχώματα ανθεκτικά σε πυρκαγιά για τουλάχιστον δύο ώρες

Η επιφανειακή γεώτρηση μπορεί να λειτουργήσει σαν ένα σύστημα εξαερισμού υπό την προϋπόθεση ότι η ροή του αέρα μπορεί να αναστραφεί κατά τη διάρκεια μίας επείγουσας κατάστασης με κατάλληλα χειριστήρια που βρίσκονται στην περιοχή που χαρακτηρίζεται ως καταφύγιο.

Μία δίοδος εξόδου ή μία περικλειστη έξοδος πρέπει να διαχωρίζεται από το υπόλοιπο του χώρου με τοιχώματα ανθεκτικά σε πυρκαγιά για τουλάχιστον μία ώρα και να εφοδιάζεται με εξωτερικό αέρα επαρκή για να παρέχει θετική πίεση 12.5 Pa σε σχέση με τον παρακείμενο υπόγειο χώρο. Δεν επιτρέπονται άλλα ανοίγματα εκτός από τις απαιτούμενες εξόδους των κανονικά κατειλημμένων χώρων των κτιρίων και των κοινών χώρων. Δεν επιτρέπονται άλλες διεισδύσεις εκτός από αγωγούς, σωληνώσεις άρδευσης, και τους ηλεκτρικούς αγωγούς που εξυπηρετούν την δίοδο εξόδου. Το πλάτος της δίοδου εξόδου πρέπει να είναι επαρκές για να φιλοξενήσει τη συνολική απαιτούμενη χωρητικότητα όλων των εξόδων εκκένωσης μέσα από αυτό, αλλά σε καμία περίπτωση δεν πρέπει να είναι μικρότερο από 112cm.

3.3. Υπόγειοι Χώροι για τη Μεταφορά Επιβατών Μέσω Ηλεκτροκίνητων Σιδηροδρομικών Συστημάτων Σταθερής Τροχιάς Σύμφωνα με τις Προδιαγραφές του NFPA 130

3.3.1. Υπόγειοι Σταθμοί

Ο πρωταρχικός σκοπός ενός σταθμού είναι για την εξυπηρέτηση των διερχόμενων επιβατών οι οποίοι διαμένουν εντός του χώρου για ένα χρονικό διάστημα που δεν υπερβαίνει τον απαραίτητο χρόνο αναμονής για την άφιξη και στη συνέχεια επιβίβαση εντός του μέσου μεταφοράς ή αποβίβαση κατά την άφιξη ενός συρμού και μετακίνησης προς την έξοδο του σταθμού. Ο σταθμός χρησιμοποιείται επίσης και από τους υπαλλήλους των οποίων τα καθήκοντα απαιτούν την παρουσία τους στον συγκεκριμένο χώρο.

Η ασφάλεια τόσο των επιβατών όσο και των εργαζομένων αποτελεί κυρίαρχο μέλημα των υπευθύνων κατά τον σχεδιασμό του σταθμού. Για την αντιμετώπιση μιας πυρκαγιάς το στάδιο σχεδιασμού του σταθμού περιλαμβάνει τις παρακάτω ενέργειες (NFPA 130, 2000):

- εκδοτήρια και γραφεία πληροφοριών πρέπει να είναι κατασκευασμένα από εγκεκριμένα μη εύφλεκτα υλικά
- οι πόρτες και τα άλλα ανοίγματα θα πρέπει να είναι ανθεκτικές σε πυρκαγιά για τουλάχιστον μιάμιση ώρα εκτός και αν πρόκειται για πόρτα σε χώρο που υπάρχει υποσταθμός ηλεκτρικής ενέργειας οπότε στην περίπτωση αυτή η αντοχή σε πυρκαγιά θα πρέπει να είναι τουλάχιστον τρεις ώρες
- μία πυράντοχη πόρτα που συνήθως είναι ανοικτή, σε περίπτωση ανίχνευσης πυρκαγιάς θα πρέπει να διαθέτει αυτόματο σύστημα κλεισίματος
- όλοι οι δημόσιοι χώροι που χρησιμοποιούνται για την μετακίνηση των επιβατών πρέπει να έχουν αντοχή σε πυρκαγιά τουλάχιστον για τρεις ώρες
- πρέπει να υπάρχει εγκατεστημένο κατάλληλο σύστημα εξαερισμού έκτακτης ανάγκης
- οι βοηθητικοί χώροι ανάλογα με τη χρήση τους έχουν διαφορετική αντοχή σε πυρκαγιά:
 - ✓ αίθουσες ελέγχου και αποθηκευτικοί χώροι πρέπει να έχουν αντοχή σε πυρκαγιά τουλάχιστον για δύο ώρες
 - ✓ υποσταθμοί ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να έχουν αντοχή σε πυρκαγιά τουλάχιστον για τρεις ώρες
 - ✓ όλοι οι κοινόχρηστοι χώροι πρέπει να έχουν αντοχή σε πυρκαγιά τουλάχιστον για δύο ώρες σε σχέση με τους μη κοινόχρηστους

Όλοι οι σταθμοί πρέπει να είναι εφοδιασμένοι με ένα σύστημα φωτισμού έκτακτης ανάγκης. Στις σκάλες και στις κυλιόμενες ο φωτισμός αυτός πρέπει να σχεδιαστεί έτσι ώστε να τονίζεται το πάνω και το κάτω σκαλί κατά την επιβίβαση και αποβίβαση από την σκάλα.

3.3.2. Μέσα Εξόδου

Για ένα σταθμό, ο σχεδιασμός των μέσων εξόδου θα πρέπει να βασίζεται σε μια κατάσταση έκτακτης ανάγκης που απαιτεί την εκκένωση ενός ή περισσότερων συρμών και του χώρου του σταθμού οδηγώντας τους χρήστες σε έναν άλλο χώρο εντός του σταθμού που παρέχει επαρκή προστασία ή σε μία έξοδο κινδύνου που οδηγεί σε ένα δημόσιο χώρο εκτός του σταθμού.

Οι διαστάσεις του σταθμού προσδιορίζονται συναρτήσει του μήκους των τρένων που θα χρησιμοποιηθούν για τον συγκεκριμένο σταθμό. Επομένως οι αποβάθρες απομακρυσμένων σταθμών μικρής πυκνότητας είναι ίσες με εκείνες που βρίσκονται σε κεντρικούς επιχειρηματικούς σταθμούς μεγάλης πυκνότητας. Κατά συνέπεια τα φορτία πληρότητας σε σταθμούς ταχείας διέλευσης, στην περίπτωση εκκένωσης του σταθμού είναι συνάρτηση της φέρουσας ικανότητας της αμαξοστοιχίας και όχι του αριθμού των χρηστών που βρίσκονται στην αποβάθρα. Το φορτίο των χρηστών είναι αυτό πάνω στο οποίο στηρίζεται ο σχεδιασμός νέων ή η επέκταση υπαρχουσών συστημάτων διαμετακόμισης. Η βάση πάνω στην οποία καθορίζεται το φορτίο των χρηστών θα πρέπει να εξεταστεί προσεκτικά για τον καθορισμό της εξόδου έκτακτης ανάγκης.

Σε νέα συστήματα μία έρευνα της πραγματικής χρήσης θα πρέπει να γίνει εντός 2 ετών από την ολοκλήρωση του έργου για να επαληθευτούν οι προβλέψεις σχεδιασμού. Σε υπάρχοντα συστήματα ανάλογα με το φορτίο των χρηστών πρέπει να προσδιοριστεί η ανάγκη για επέκταση ή κάποιες άλλες λειτουργικές ρυθμίσεις. Η βάση για τον υπολογισμό των φορτίων των χρηστών πρέπει να είναι τα στοιχεία που προκύπτουν από την ώρα αιχμής.

Για το φορτίο των χρηστών ισχύουν τα παρακάτω (NFPA 130, 2000):

- το φορτίο των χρηστών σε ένα σταθμό μετεπιβίβασης καθορίζεται με βάση την κατάσταση έκτακτης ανάγκης που απαιτεί την εκκένωση του σταθμού και την μετακίνηση των επιβατών σε ένα ασφαλές σημείο. Το φορτίο των επιβατών θα πρέπει να βασίζεται στο υπολογιζόμενο φορτίο όλων των συρμών που φτάνουν ταυτόχρονα στο σταθμό σε κανονικές συνθήκες κίνησης κατά τη διάρκεια της αιχμής των 15 λεπτών και τους επιβάτες που περιμένουν για να επιβιβαστούν
- στην περίπτωση ανώμαλης αποβίβασης κατά τη διάρκεια μιας έκτακτης ανάγκης το φορτίο των χρηστών δεν θα είναι περισσότερο από αυτό που μπορεί να αποβιβαστεί από το τρένο σε οποιαδήποτε διαδρομή σε μια πλατφόρμα κατά την εκδήλωση ενός έκτακτου περιστατικού
- η απαιτούμενη χωρητικότητα εξόδου σε σταθμούς θα πρέπει να βασίζεται στην εκκένωση του φορτίου των επιβατών που υπολογίζεται ως εξής:
 - ✓ το φορτίο της περιόδου αιχμής για κάθε πλατφόρμα θα βασίζεται στην ταυτόχρονη εκκένωση των επιβατών που περιμένουν στην πλατφόρμα και του φορτίου της αμαξοστοιχίας για την συγκεκριμένη πλατφόρμα κατά την περίοδο αιχμής
 - ✓ το φορτίο των επιβατών κάθε πλατφόρμας θα είναι το μεγαλύτερο από τα φορτία της περιόδου αιχμής
 - ✓ οι επιβάτες που περιμένουν στην πλατφόρμα ή αλλιώς το εισαγόμενο φορτίο, θα είναι το άθροισμα των εισερχόμενων επιβατών για κάθε γραμμή που εξυπηρετεί η εν λόγω πλατφόρμα. Το εισερχόμενο φορτίο για κάθε γραμμή πρέπει να βασίζεται στο εισαγόμενο φορτίο ανά διέλευση του τρένου πολλαπλασιαζόμενο με το

συντελεστή διακύμανσης του συστήματος και στην περίπτωση της αιχμής για κάθε κατεύθυνση, για κάθε διαδρομή με έναν επιπλέον παράγοντα ίσο με 2

- ✓ το φορτίο της αμαξοστοιχίας για κάθε πλατφόρμα θα είναι το άθροισμα των συρμών για κάθε γραμμή που εξυπηρετεί η εν λόγω πλατφόρμα. Το φορτίο της αμαξοστοιχίας για κάθε γραμμή πρέπει να βασίζεται στο φορτίο της αμαξοστοιχίας ανά διέλευση του τρένου πολλαπλασιαζόμενο με το συντελεστή διακύμανσης του συστήματος και στην περίπτωση της αιχμής για κάθε κατεύθυνση, για κάθε διαδρομή με έναν επιπλέον παράγοντα ίσο με 2
- ✓ το μέγιστο φορτίο της αμαξοστοιχίας σε κάθε γραμμή πρέπει να είναι η μέγιστη χωρητικότητα της επιβατικής αμαξοστοιχίας
- ιδιαίτερη έμφαση πρέπει να δοθεί στην περίπτωση που ο σταθμός εξυπηρετεί περιοχές όπου συμβαίνουν διάφορα γεγονότα και τα οποία προσθέτουν επιπλέον επιβάτες οι οποίοι δεν περιλαμβάνονται στο κανονικό φορτίο του σταθμού. Τέτοιες περιοχές είναι συνεδριακά κέντρα, αθλητικά κέντρα και δημοτικά κέντρα. Για την επίτευξη του κατάλληλου επιπέδου ασφαλείας χρειάζεται έλεγχος της πρόσβασης στις πλατφόρμες
- σε σταθμούς που διαθέτουν πολλαπλές πλατφόρμες, κάθε πλατφόρμα θα πρέπει να εξετάζεται χωριστά και να λαμβάνεται υπόψη η άφιξη των τρένων από όλες τις κατευθύνσεις κυκλοφορίας και οι επιβάτες που περιμένουν.
- Στην κεντρική αίθουσα ή σε πολυεπίπεδους σταθμούς, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα φορτία για όλες τις λωρίδες εξόδου που διέρχονται από εκείνη την περιοχή ταυτόχρονα.
- Αν η πυρκαγιά εντοπίζεται σε πλατφόρμα που βρίσκεται σε ανώτερο επίπεδο, μπορεί να γίνει μια υπόθεση ως προς το ποσοστό των επιβατών που θα εκκενώσουν το κατώτερο επίπεδο μέσω των κανονικών εξόδων σε σχέση με εκείνους που αναμένεται να κινηθούν με τις σκάλες κινδύνου. Αυτές οι υποθέσεις θα είναι μοναδικές για κάθε σύστημα ως συνάρτηση διαφόρων παραμέτρων, συμπεριλαμβανομένης της φυσικής διαμόρφωσης των σταθμών, μέσων εξόδου, τη θέση των εξόδων κινδύνου, προφορικές και έντυπες συμβουλές, το επίπεδο του προσωπικού που εργάζονται στο σταθμό

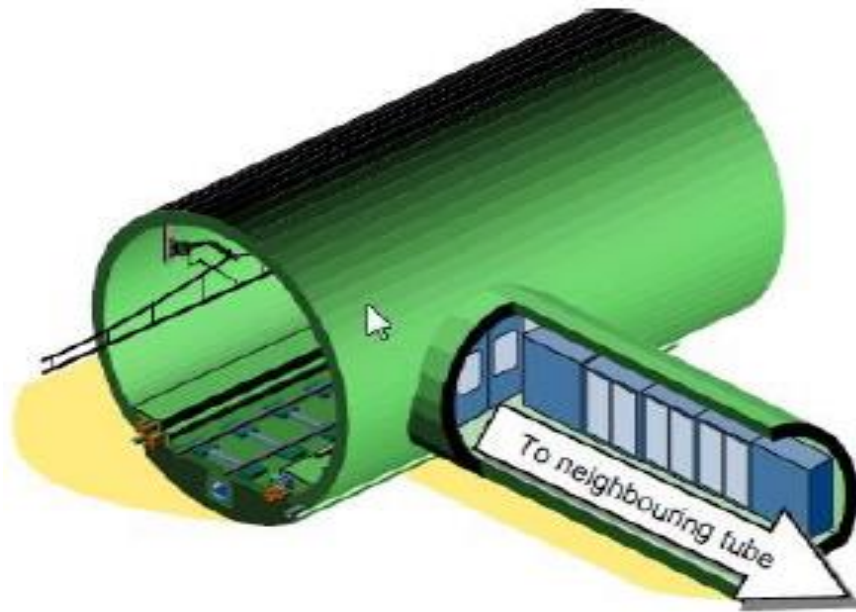
Όταν μία περιοχή εντός του σταθμού προορίζεται για χρήση από άλλους πέραν των επιβατών και των υπαλλήλων τότε το φορτίο των χρηστών της συγκεκριμένης περιοχής υπολογίζεται σύμφωνα με αυτά που ισχύουν στην περίπτωση των κτιρίων. Το επιπλέον φορτίο δεν χρειάζεται να προστεθεί στο φορτίο των επιβατών του σταθμού αν η περιοχή διαθέτει επαρκή αριθμό ανεξάρτητων μέσων εξόδου ικανοποιητικής χωρητικότητας

Έξοδοι Κινδύνου

- οι έξοδοι κινδύνου από τις σήραγγες πρέπει να οδηγούν σε ασφαλές χώρο
- κλίμακες εξόδου έκτακτης ανάγκης πρέπει να παρέχονται σε όλες τις σήραγγες και με τέτοια διάταξη έτσι ώστε η απόσταση μέχρι μία έξοδο κινδύνου δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 381m, εκτός εάν έχει εγκριθεί αλλιώς από την αρμόδια αρχή. Η σκάλα πρέπει να σχεδιάζεται σύμφωνα με τον κανονισμό, να είναι κλειστή και να οδηγεί απευθείας στο ύπαιθρο ή σε μία ασφαλή περιοχή
- όταν οι γραμμές χωρίζονται από τοιχώματα που είναι ανθεκτικά σε πυρκαγιά τουλάχιστον για δύο ώρες ή όταν οι γραμμές βρίσκονται σε δίδυμες σήραγγες, τότε μία τέτοια ρύθμιση θεωρείται ότι παρέχει επαρκή προστασία για τους επιβάτες μέσω των σήραγγων διαφυγής μεταξύ των γραμμών όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.2 και επομένως επιτρέπεται να χρησιμοποιηθούν αντί των κλιμακοστασίων εξόδου προς την επιφάνεια. Σε αυτήν την

περίπτωση, ή στην περίπτωση που ένα σύστημα εξαερισμού δεν παρέχει επαρκή ποσότητα καθαρού αέρα στους επιβάτες που κινούνται στο μονοπάτι της εξόδου, εφαρμόζονται οι εξής διατάξεις:

- ✓ οι σήραγγες διαφυγής-συνδετήριες σήραγγες δεν πρέπει να απέχουν περισσότερο από 244m μεταξύ τους
 - ✓ η μέγιστη απόσταση μεταξύ των εξόδων δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 762m
 - ✓ ανοίγματα σε διαδρόμους πρέπει να προστατεύονται με συγκροτήματα πυράντοχης πόρτας που έχουν αντοχή σε πυρκαγιά για μιάμιση ώρα με μία αυτόματη πυράντοχη πόρτα
 - ✓ το περιβάλλον στο τμήμα της γραμμής που δεν εμπλέκεται στην κατάσταση έκτακτης ανάγκης και που χρησιμοποιείται για την εκκένωση πρέπει να μην είναι μολυσμένο
 - ✓ για τον έλεγχο του καπνού στην περιοχή των επιβατών πρέπει να σχεδιάζεται σύστημα εξαερισμού
 - ✓ πρέπει να εφαρμόζεται η κατάλληλη μέθοδος για την εκκένωση των επιβατών στην περιοχή που δεν έχει μολυνθεί, για την προστασία τους από το αντίθετο ρεύμα κυκλοφορίας και για την εκκένωση των επιβατών σε κάποιο κοντινό σταθμό ή σε κάποια άλλη έξοδο κινδύνου
- οι πόρτες που έχουν πρόσβαση στην έξοδο πρέπει να ανοίγουν προς την κατεύθυνση της διαδρομής εξόδου όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.3. Για να ανοίξει η πόρτα πλήρως δεν πρέπει να απαιτείται μεγάλη δύναμη στην πλευρά που είναι ο σύρτης και δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 222N. Επιπλέον οι πόρτες και ο μηχανισμός πρέπει να αντέχουν στις θετικές και αρνητικές πιέσεις που ασκούνται κατά τη διέλευση των τρένων.
 - Οι καταπακτές εξόδου που οδηγούν στην έξοδο εκκένωσης πρέπει να είναι εξοπλισμένες με μηχανισμό ή σύρτη για να μπορούν να ανοίξουν εύκολα προς την πλευρά της εξόδου. Η δύναμη που απαιτείται για να ανοίξει την πόρτα, όταν εφαρμόζεται στην πλευρά που είναι ο σύρτης δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 133N. Η καταπακτή πρέπει να είναι εφοδιασμένη με μια συσκευή που θα ασφαλίσει αυτόματα την πόρτα στην ανοικτή θέση για να αποκλείει το κατά λάθος κλείσιμο. Οι καταπακτές πρέπει να μπορούν να ανοίγουν απέξω από εξουσιοδοτημένο προσωπικό
 - οι εγκαταστάσεις εξόδου έκτακτης ανάγκης πρέπει να αναγνωρίζονται κατάλληλα και να συντηρούνται έτσι ώστε να καταστεί δυνατή η προοριζόμενη χρήση τους
 - σύστημα φωτισμού έκτακτης ανάγκης πρέπει να εγκαθίσταται και να συντηρείται σύμφωνα με τον κανονισμό (NFPE 130). Το σύστημα πρέπει να τροφοδοτείται από μια ανεξάρτητη πηγή ενέργειας. Οι συγκεκριμένες προδιαγραφές πρέπει να εφαρμόζονται σε όλες τις κλειστές σιδηροδρομικές διαδρομές που είναι μεγαλύτερες από 15.25m



Εικόνα 3.2: Σήραγγα διαφυγής σε δίδυμη σήραγγα (Tarada, 2000)



Εικόνα 3.3: Πόρτα που οδηγεί στην έξοδο κινδύνου (Tarada, 2000)

3.4. Έξοδος για τους Επιβάτες

Το σύστημα πρέπει να περιλαμβάνει τα μέσα για τους επιβάτες να εκκενώνουν ένα τρένο σε οποιοδήποτε σημείο κατά μήκος της γραμμής και να καταλήξουν σε ασφαλή περιοχή. Τα σημεία εξόδου του συστήματος πρέπει να φωτίζονται. Πρέπει να παρέχεται μία ικανοποιητική δίοδος εξόδου σε περίπτωση επείγουσας ανάγκης. Οι επιφάνειες βαδίσματος πρέπει να είναι ομοιόμορφες και να έχουν αντιολισθητική σχεδίαση. Σε περιοχές όπου υπάρχει σήραγγα διαφυγής οι διαβάσεις των επιβατών πρέπει να είναι από την πλευρά που βρίσκεται η σήραγγα διαφυγής για να επιτυγχάνεται η απρόσκοπτη πρόσβαση της. Υπερυψωμένες διαβάσεις, σκάλες και ράμπες πρέπει να διαθέτουν κιγκλίδωμα που όμως δεν θα εμποδίζει την έξοδο από το τρένο. Οι διαβάσεις πρέπει να έχουν ομοιόμορφη επιφάνεια και να βρίσκονται στην αποβάθρα για να εξασφαλίζουν τη συνεχή ροή των επιβατών. Συνεχής όδευση πρέπει να διατηρείται σε ειδικά τμήματα όπως είναι οι διασταυρώσεις.

3.4.1. Διαδικασίες Έκτακτης Ανάγκης

Οι υπεύθυνοι για την ασφαλή και αποτελεσματική λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος μετακίνησης πρέπει να προβλέπουν καταστάσεις έκτακτης ανάγκης που μπορεί να προκύψουν και να σχεδιάσουν τρόπους αντιμετώπισης τους. Διάφοροι φορείς καλούνται να συμμετάσχουν στην προετοιμασία του σχεδίου έκτακτης ανάγκης.

Για τη διαχείριση των καταστάσεων έκτακτης ανάγκης πρέπει να υπάρχουν προκαθορισμένες διαδικασίες λειτουργίας. Οι διαδικασίες αυτές πρέπει να καταγράφονται, να είναι άμεσα προσβάσιμες και να διαχειρίζονται αποκλειστικά από κάποιον που βρίσκεται στην κεντρική αίθουσα ελέγχου. Ειδική μέριμνα πρέπει να λαμβάνεται έτσι ώστε οι επιβάτες να ενημερώνονται κατά τη διάρκεια μιας επείγουσας κατάστασης και έτσι να αποφεύγονται εκδηλώσεις πανικού και άγχους. Είναι επίσης απαραίτητο το προσωπικό το οποίο ασχολείται με τις λειτουργικές διαδικασίες, να είναι εκπαιδευμένο για την αντιμετώπιση των καταστάσεων έκτακτης ανάγκης εν αναμονή της άφιξης του αρμόδιου προσωπικού και ότι η εκπαίδευση πρέπει να ανανεώνεται μέσω περιοδικών ασκήσεων.

Υπάρχουν διάφορες καταστάσεις έκτακτης ανάγκης οι οποίες απαιτούν την ανάπτυξη και εφαρμογή σχεδίων αντιμετώπισης τους (NFPA 130, 2000):

- πυρκαγιά ή καπνός στο εσωτερικό των εγκαταστάσεων, δηλαδή στους σταθμούς, στις σιδηροδρομικές γραμμές και στις βοηθητικές εγκαταστάσεις
- σύγκρουση ή εκτροχιασμός
- απώλεια ενέργειας με αποτέλεσμα την ακινητοποίηση των συρμών, απώλεια του φωτισμού και της διαθέσιμης βοηθητικής ενέργειας
- εκκένωση των επιβατών της αμαξοστοιχίας αν το επιβάλλουν οι συνθήκες
- αντιμετώπιση καταστάσεων πανικού
- πλημμύρες στις σήραγγες που οφείλονται σε εσωτερικές και εξωτερικές πηγές
- διακοπή της λειτουργίας λόγω εκδήλωσης επικίνδυνων γεγονότων κοντά στις εγκαταστάσεις
- αστοχία ή κατάρρευση γειτονικών εγκαταστάσεων που επηρεάζουν την ασφαλή λειτουργία του δικτύου
- σεισμός
- διαρροή επικίνδυνων χημικών
- τρομοκρατικές ενέργειες
- ακραία καιρικά φαινόμενα
- παροχή πρώτων βοηθειών στους χρήστες

Μια διαδικασία έκτακτης ανάγκης, πρέπει να αναπτυχθεί για την αντιμετώπιση των διαφόρων τύπων καταστάσεων έκτακτης ανάγκης που μπορούν να απειλήσουν το σύστημα και πρέπει να περιλαμβάνει, χωρίς όμως να περιορίζονται σε αυτά, τα εξής (NFPA 130, 2000):

- η αναγνώριση του τύπου της έκτακτης ανάγκης, ο αρμόδιος καθώς και η ημερομηνία που το σχέδιο εγκρίθηκε
- ο σκοπός και το πεδίο εφαρμογής
- συμμετέχοντες φορείς και η περιοχή ευθύνης συμπεριλαμβανομένων και των κυβερνητικών υπαλλήλων
- οι διαδικασίες ασφαλείας που πρέπει να εφαρμοστούν ανάλογα με τον τύπο της έκτακτης ανάγκης

- ο σκοπός και οι λειτουργίες του κεντρικού σταθμού
- διοικητικά και βοηθητικά κέντρα, ο σκοπός τους και οι λειτουργικές διαδικασίες τους όπως έχουν οριστεί
- επικοινωνίες, διαθέσιμες επικοινωνίες, διαδικασίες για την διατήρηση της ασφαλούς λειτουργίας και ο κατάλληλος εξοπλισμός για την επαφή με τους αρμόδιους φορείς
- καταστάσεις έκτακτης ανάγκης εκδήλωσης πυρκαγιάς και καπνού, πρέπει να περιέχουν πληροφορίες και διαδικασίες που καθορίζουν τα εξής:
 - ✓ εντοπισμός της θέσης εκδήλωσης της πυρκαγιάς στο σταθμό ή σε κάποια υποστηρικτική μονάδα
 - ✓ η θέση του τρένου στη σήραγγα και η θέση της φωτιάς μέσα στο τρένο
 - ✓ τα συστήματα και οι ζώνες ανίχνευσης πυρκαγιάς
 - ✓ τα συστήματα πυροπροστασίας και οι πυροσβεστήρες και η θέση τους
 - ✓ τα στοιχεία του συστήματος εξαερισμού έκτακτης ανάγκης, η θέση του εξοπλισμού και τα όργανα ελέγχου
 - ✓ οι θέσεις των εξόδων/εισόδων στον τόπο του γεγονότος συμπεριλαμβανομένων και της διαδρομής των οχημάτων
 - ✓ την θέση ειδικού εξοπλισμού
 - ✓ τις υπηρεσίες που πρέπει να ειδοποιηθούν και τα τηλέφωνα επικοινωνίας
 - ✓ η υπηρεσία που έχει τον έλεγχο πριν και μετά την άφιξη του αρμόδιου προσωπικού διαχείρισης της επικίνδυνης κατάστασης
 - ✓ ο προγραμματισμένος τρόπος λειτουργίας του ανεμιστήρα του συστήματος εξαερισμού
 - ✓ η προσχεδιασμένη κατεύθυνση της εκκένωσης εναρμονιζόμενη με τον τρόπο λειτουργίας του ανεμιστήρα
 - ✓ εκδήλωση πυρκαγιάς και επικίνδυνων περιστατικών σε παρακείμενες εγκαταστάσεις
- χάρτες ή σχέδια περίπλοκων τμημάτων
- διαδικασίες που εφαρμόζονται από τους φορείς που θα ανταποκριθούν για την αντιμετώπιση των περιστατικών έκτακτης ανάγκης, ανάλογα με τον τύπο του κάθε περιστατικού
- οποιαδήποτε άλλη πληροφορία θεωρούν οι συμμετέχοντες φορείς ότι είναι απαραίτητη για να εξασφαλιστεί επιτυχής απόκριση

3.5. Σιδηροδρομική Σήραγγα

Το σιδηροδρομικό δίκτυο αποτελείται από το σιδηροδρομικό δίκτυο υψηλής ταχύτητας και από το συμβατικό σιδηροδρομικό δίκτυο. Παίζει σημαντικό ρόλο στη σιδηροδρομική κυκλοφορία εμπορευμάτων και επιβατών σε μεγάλες αποστάσεις, στην εκμετάλλευση των συνδυασμένων μεταφορών μεγάλων αποστάσεων και επιτρέπει τη διασύνδεση με τα δίκτυα άλλων μεταφορικών μέσων και την πρόσβαση στα περιφερειακά ή τοπικά σιδηροδρομικά δίκτυα.

Το σιδηροδρομικό δίκτυο υψηλής ταχύτητας όπως περιγράφεται στο Σχέδιο Τεχνικής Προδιαγραφής για τη Διαλειτουργικότητα (ΟΔΗΓΙΑ 2001/16/ΕΚ) αποτελείται από:

- γραμμές κατασκευασμένες ειδικά για υψηλή ταχύτητα και εξοπλισμένες για ταχύτητες κατά κανόνα ίσες ή μεγαλύτερες των 250 km/h μέσω σύγχρονων ή νέων τεχνολογιών,
- γραμμές διευθετημένες ειδικά για υψηλή ταχύτητα και εξοπλισμένες για ταχύτητες της τάξεως των 200 km/h,

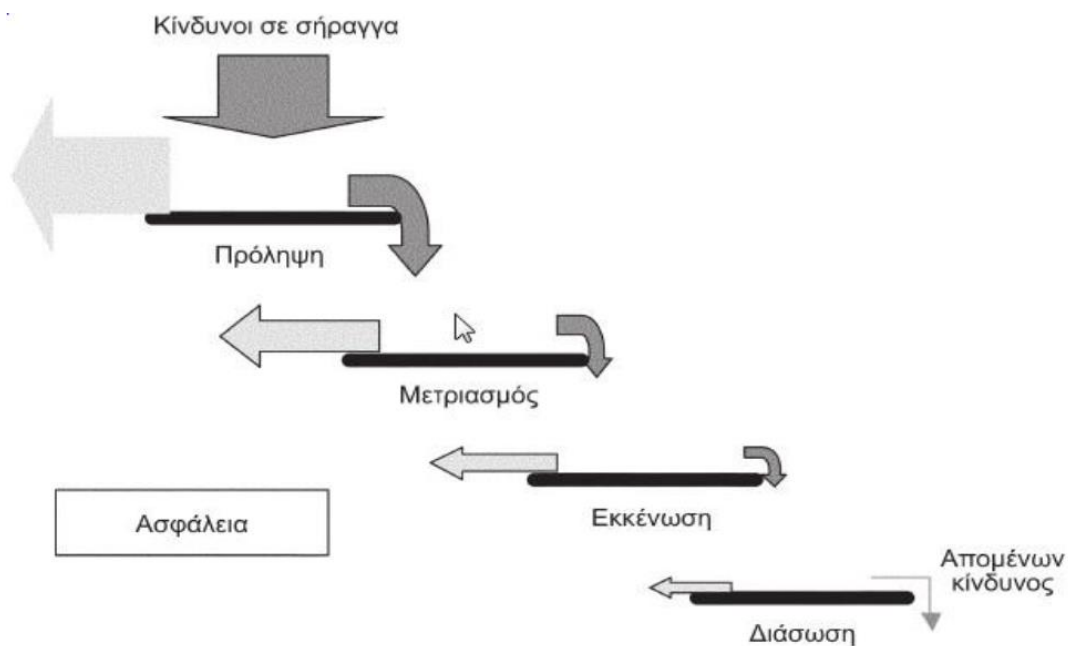
- γραμμές διευθετημένες ειδικά για υψηλή ταχύτητα, που παρουσιάζουν ιδιαιτερότητες λόγω τοπογραφικών προβλημάτων, μορφολογίας του εδάφους ή αστικού περιβάλλοντος, και των οποίων η ταχύτητα πρέπει να προσαρμόζεται κατά περίπτωση

Το συμβατικό σιδηροδρομικό δίκτυο αποτελείται από γραμμές για συμβατικές σιδηροδρομικές μεταφορές, συμπεριλαμβανομένων των σιδηροδρομικών συνδέσεων συνδυασμένης μεταφοράς που καθιστούν δυνατή τη μεταφορά εμπορευμάτων σε μεγάλες αποστάσεις.

Η στρατηγική για την προώθηση της ασφάλειας στις σήραγγες σύμφωνα με την τεχνική προδιαγραφή διαλειτουργικότητας που αφορά την «ασφάλεια στις σιδηροδρομικές σήραγγες» του διευρωπαϊκού συμβατικού σιδηροδρομικού συστήματος και του διευρωπαϊκού σιδηροδρομικού συστήματος υψηλών ταχυτήτων περιλαμβάνει τα παρακάτω τέσσερα διαδοχικά στάδια:

- Πρόληψη
- Μετριασμό
- Εκκένωση
- Διάσωση

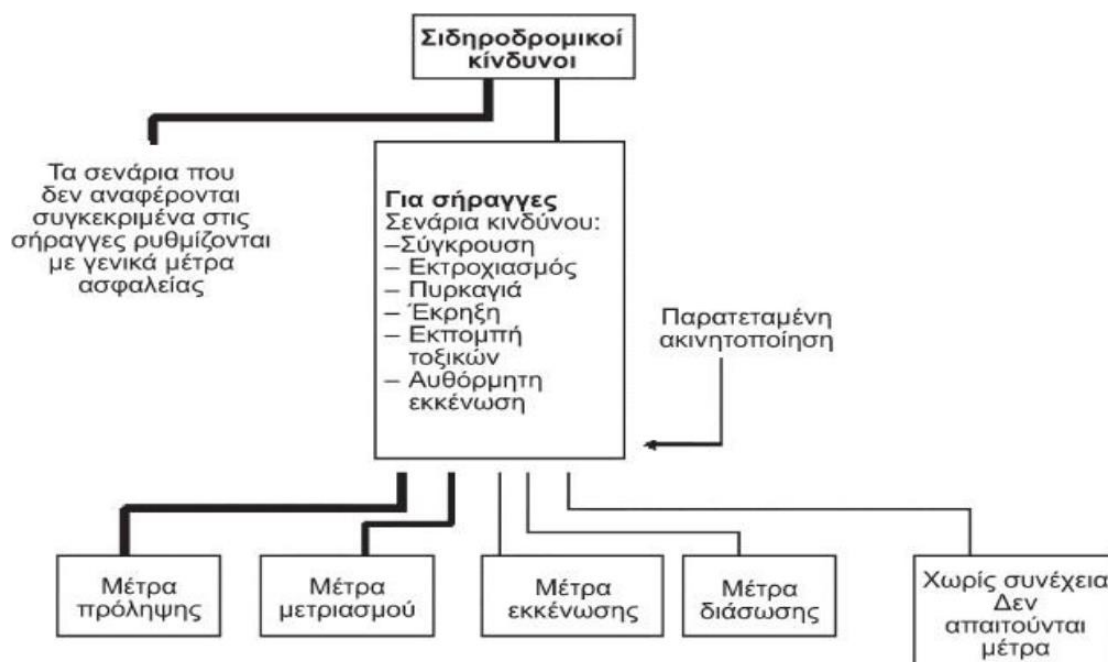
Η έννοια της ασφάλειας αποτελείται από διαφορετικά επίπεδα όσον αφορά την πρόληψη των προβλημάτων. Στην ασφάλεια περισσότερο συμβάλλει το στάδιο της πρόληψης, μετά το στάδιο του μετριασμού στη συνέχεια της εκκένωσης και τέλος της διάσωσης, όπως αποτυπώνεται και στην Εικόνα 3.5. Συνήθως, όταν μια καταστροφή συμβαίνει πολλά πράγματα πήγαν στραβά ταυτόχρονα. Γι' αυτό ακόμα και σε μικρότερα προβλήματα θα πρέπει να γίνει μια εις βάθος διερεύνηση για να εντοπιστούν οι λόγοι με σκοπό την περαιτέρω βελτίωση της έννοιας της ασφάλειας. Βασικό χαρακτηριστικό των σιδηροδρόμων είναι η εγγενής ικανότητά τους να προλαμβάνουν τα ατυχήματα χάρη στην κίνηση των αμαξοστοιχιών πάνω σε τροχιές, καθώς και χάρη στον έλεγχο και τη ρύθμισή τους με τη χρήση του συστήματος σηματοδότησης.



Εικόνα 3.4: Στάδια διαχείρισης των κινδύνων (ΟΔΗΓΙΑ 96/48/ΕΚ)

Σε μία σιδηροδρομική σήραγγα μπορούμε να πούμε ότι υπάρχουν τρεις κύριες κατηγορίες συμβάντων, όπως περιγράφονται στην Εικόνα 3.6. Τα συμβάντα αυτά σύμφωνα με το Σχέδιο της Τεχνικής Προδιαγραφής για τη Διαλειτουργικότητα (2008) αναλύονται στη συνέχεια ως εξής:

- **θερμά συμβάντα:** Πυρκαγιά, έκρηξη με πυρκαγιά, εκπομπή τοξικών καπνών ή αερίων. Ο βασικός κίνδυνος είναι η πυρκαγιά. Η πυρκαγιά εκδηλώνεται σε επιβατηγό αμαξοστοιχία ή μηχανή και εξαπλώνεται πλήρως σε 15 λεπτά μετά την εκδήλωσή της. Εντοπίζεται και σημαίνει συναγερμός εντός αυτών των 15 πρώτων λεπτών. Μόλις καταστεί δυνατόν, ο συρμός εγκαταλείπει τη σήραγγα. Εάν η αμαξοστοιχία ακινητοποιηθεί, οι επιβάτες απομακρύνονται, υπό τις οδηγίες του προσωπικού ή με δικής τους πρωτοβουλία, σε ασφαλή περιοχή
- **ψυχρά συμβάντα:** Σύγκρουση, εκτροχιασμός. Τα συγκεκριμένα για τις σήραγγες μέτρα εστιάζονται στις εγκαταστάσεις πρόσβασης/εξόδου για τις ανάγκες της εκκένωσης και της επέμβασης των σωστικών συνεργείων. Η διαφορά από τα θερμά συμβάντα έγκειται στο ότι δεν υπάρχει ο χρονικός περιορισμός που οφείλεται στην παρουσία επικίνδυνου περιβάλλοντος λόγω της πυρκαγιάς
- **παρατεταμένη ακινητοποίηση:** Η παρατεταμένη ακινητοποίηση (η απρόβλεπτη στάση σε μια σήραγγα, χωρίς να έχει εκδηλωθεί πυρκαγιά στην αμαξοστοιχία, για περισσότερο από 10 λεπτά) σαν διαδικασία δεν αποτελεί απειλή για τους επιβάτες και το προσωπικό. Ωστόσο, είναι δυνατόν να προκαλέσει πανικό και αυθόρμητη και ανεξέλεγκτη εγκατάλειψη της αμαξοστοιχίας, πράγμα που εκθέτει τους ανθρώπους σε κινδύνους παρόντες μέσα στη σήραγγα. Προβλέπονται μέτρα για τη διατήρηση μιας τέτοιας κατάστασης υπό έλεγχο



Εικόνα 3.5: Αποτύπωση σιδηροδρομικών κινδύνων (ΟΔΗΓΙΑ 96/48/ΕΚ)

3.5.1. Απειλές σε Σιδηροδρομικές Σήραγγες

Πιο σοβαρή περίπτωση ατυχήματος στη σήραγγα είναι η πυρκαγιά, η εκλυόμενη θερμότητα και ο καπνός. Η πυρκαγιά θα μπορούσε να εκδηλωθεί εξαιτίας ενός βραχυκυκλώματος ή μιας τρομοκρατικής επίθεσης. Αν η φωτιά δεν μπορεί να σβήσει μέσα στο τρένο, τότε το τρένο πρέπει να σταματήσει και οι επιβάτες να απομακρυνθούν (Salmensaari, 2010). Κατά προτίμηση αυτό πρέπει να γίνεται σε ειδικούς σταθμούς έκτακτης ανάγκης, όπου οι συνθήκες για την εκκένωση είναι περισσότερο ευνοϊκές. Πρώτο πρόβλημα για τον άνθρωπο αποτελεί ο τοξικός καπνός που απελευθερώθηκε από την πυρκαγιά.

Σε σήραγγες μονής κατεύθυνσης ο κίνδυνος συγκρούσεων δεν είναι μεγάλος, ενώ ακόμα και σε περίπτωση εκτροχιασμού δεν επηρεάζεται η σταθερότητα της σήραγγας. Επιπλέον η είσοδος ξένων αντικειμένων στο χώρο της σήραγγας, είναι κάτι μάλλον απίθανο να συμβεί με αποτέλεσμα ο κίνδυνος εκτροχιασμού να απομακρύνεται από το προσκήνιο. Και σε αυτή την περίπτωση η εκκένωση είναι αναγκαία. Η απώλεια ισχύος ή κάποιο άλλο σοβαρό πρόβλημα μπορεί να ακινητοποιήσει το τρένο, οπότε οι επιβάτες πρέπει να το εκκενώσουν.

Διαρροές νερού

Η διαρροή νερού στις ζώνες διάρρηξης είναι ένα σημαντικό πρόβλημα και επηρεάζει την σταθερότητα της βραχομάζας. Κατά την διάρκεια κατασκευής μίας υποθαλάσσιας σήραγγας η αιφνίδια εισαγωγή νερού λόγω ατυχήματος αποτελεί τον πιο αξιολογούμενο κίνδυνο. Όταν η σήραγγα έχει κατασκευαστεί είναι σε σταθερή κατάσταση και η κατάρρευση είναι απίθανο να συμβεί.

Πυρκαγιά

Σε μία σιδηροδρομική σήραγγα πρέπει να έχουμε υπόψη μας ότι το τρένο συμπεριφέρεται σαν μία κινούμενη εύφλεκτη μάζα. Ενσωματωμένα συστήματα καταστολής της φωτιάς παρουσιάζουν το πλεονέκτημα της άμεσης αντίδρασης και έτσι το τρένο δεν χρειάζεται να σταματήσει προκειμένου να κατασβηστεί η φωτιά. Χαρακτηριστικό της πυρκαγιάς σε σήραγγα είναι ότι εκδηλώνεται απότομα, αναπτύσσεται βίαια και γρήγορα φτάνει τη θερμοκρασία των 1000°C (Salmensaari, 2010). Αυτό μπορεί να προκαλέσει σοβαρή παραμόρφωση στη βραχομάζα, αυξάνοντας έτσι τον κίνδυνο της κατάρρευσης. Προτεραιότητα είναι να προλάβουμε την εκδήλωση της πυρκαγιάς. Αν εξακολουθεί να κλιμακώνεται τότε η ταχεία απόκριση και η γρήγορη κατάσβεση είναι η καλύτερη επιλογή. Τα συστήματα ψεκασμού συνήθως δεν σχεδιάζονται με σκοπό να καταστείλουν μια πυρκαγιά εντελώς, αλλά να περιορίσουν την έντασή της και να την εμποδίσουν από το να επεκταθεί περαιτέρω. Στην πράξη η πραγματική κατάσβεση πραγματοποιείται από την πυροσβεστική. Μετά από μια πυρκαγιά πρώτη ενέργεια είναι ο εξαερισμός της σήραγγας με φρέσκο αέρα, στη συνέχεια ο έλεγχος των βλαβών και τέλος πραγματοποιούνται οι απαραίτητες επισκευές. Ο εξαερισμός και ο έλεγχος του καπνού κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς αποτελούν ένα πολύ ιδιαίτερο κομμάτι όσον αφορά τις πυρκαγιές σε σήραγγες.

3.5.2. Διαχείριση του Κινδύνου σε Σήραγγες κατά τον Κύκλο Ζωής της Σήραγγας

Οι κίνδυνοι είναι παρόντες σε κάθε μέρος του κύκλου ζωής μιας σήραγγας. Η βασική πτυχή στη διαχείριση του κινδύνου είναι ο προσδιορισμός των κινδύνων, η αξιολόγηση των απειλών. Διαδικασίες πρέπει να αναπτυχθούν για την αποφυγή των κινδύνων και τον χειρισμό της κατάστασης που θα προκύψει. Η πιθανολογική μέθοδος διαχείρισης των κινδύνων είναι αποτελεσματική στον εντοπισμό των σημαντικότερων σεναρίων κινδύνου. Κατά τη φάση κατασκευής οι κίνδυνοι μπορούν να διακριθούν σε (Salmensaari, 2010):

- προβλήματα λόγω ανακρίβειας και μικρών αποκλίσεων που όμως λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό του έργου

- απρόβλεπτα γεγονότα, τα οποία δεν περιλαμβάνονται στο σχεδιασμό (λόγω της χαμηλής πιθανότητας τους), αλλά μπορούν να προσδιορισθούν και για τα οποία μπορούν να προβλεφθούν λύσεις εκ των προτέρων
- απρόβλεπτα γεγονότα που δεν μπορούν να προβλεφθούν στο σύνολο τους και μπορούν να αντιμετωπιστούν κυρίως με την εξασφάλιση οικονομικών πόρων

Βαρύτητα πρέπει να δοθεί στις περιβαλλοντικές συνθήκες και στη σημασία της προ-έρευνας. Πρέπει να αντιμετωπιστεί η κατανομή των κινδύνων μεταξύ των συμμετεχόντων του έργου. Στη φάση υποβολής προσφορών η διανομή μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στο συνολικό προϋπολογισμό του έργου, όπως το κόστος των κινδύνων, το οποίο ενσωματώνεται στη συνολική τιμή.

Η διαχείριση του κινδύνου στη φάση λειτουργίας του έργου επιτυγχάνεται μειώνοντας τον κίνδυνο σε διάφορα στάδια, ελαττώνοντας την πιθανότητα ενός κινδύνου και ελαχιστοποιώντας τις πιθανές ζημιές. Ένα σημαντικό μέρος της διαχείρισης του κινδύνου αποτελούν τα λειτουργικά μοντέλα για σενάρια έκτακτης ανάγκης και πρακτικές που διασφαλίζουν σωστές ενέργειες στην πραγματική κατάσταση. Η λειτουργία και ο εξοπλισμός μιας σήραγγας πρέπει να είναι υπό συνεχή επιτήρηση και συντήρηση, με στόχο την εξασφάλιση άψογης λειτουργίας (Salmensaari, 2010). Ο καταμερισμός των αρμοδιοτήτων που σχετίζονται με κάθε λειτουργία πρέπει να ορίζεται με σαφήνεια, και οι αρχές θα πρέπει να ορίσουν κάποιον υπεύθυνο για το έργο. Ένα υπόγειο έργο θα πρέπει να αξιολογείται προσεκτικά για την πλήρη εκτίμηση του κόστους και του οφέλους καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του.

3.6. Η Ανθρώπινη Συμπεριφορά

Ένα σύστημα σηράγγων δεν είναι απλώς ένα τεχνικό σύστημα. Η ανθρώπινη συμπεριφορά επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τόσο την εμφάνιση ανεπιθύμητων γεγονότων, την ανάπτυξη αυτών των γεγονότων και την επιτυχία της παρέμβασης. Η ανθρώπινη συμπεριφορά έχει αποδειχθεί ότι αποτελεί σοβαρό θέμα αβεβαιότητας. Παρά τον προσεκτικό σχεδιασμό και προετοιμασία, οι άνθρωποι σε πραγματικές συνθήκες είναι πιθανό να συμπεριφέρονται απρόσμενα (FIT, 2006). Δεν ακολουθούν τις δοθείσες οδηγίες, δεν χρησιμοποιούν τη συνδετήρια σήραγγα ή δεν ακολουθούν την επιθυμητή κατεύθυνση. Ως εκ τούτου ανθρώπινη συμπεριφορά πρέπει να μελετηθεί ακόμα περισσότερο έτσι ώστε να βελτιωθεί η συμπεριφορά των ατόμων σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης.

Η έννοια της ασφάλειας αποτελείται από διαφορετικά επίπεδα στην πρόληψη των προβλημάτων. Αυτά περιλαμβάνουν προληπτικές μεθόδους για την ελαχιστοποίηση των πιθανοτήτων των διαφόρων προβλημάτων και τον περιορισμό των ζημιών εάν τα προβλήματα εξακολουθούν να συναντώνται. Συνήθως, όταν μια καταστροφή συμβαίνει πολλά πράγματα πήγαν στραβά ταυτόχρονα. Για το λόγο αυτό ακόμα και στην περίπτωση μικρότερων προβλημάτων αυτά θα πρέπει να διερευνηθούν σε βάθος για να εντοπιστούν οι λόγοι που οδήγησαν σε αυτή την κατάσταση με σκοπό την περαιτέρω βελτίωση της έννοιας της ασφάλειας. Για την εξασφάλιση μιας συνεχούς παρακολούθηση και ανάπτυξης συστημάτων ασφαλείας μια καλή πρακτική φαίνεται να είναι η ύπαρξη ενός διαφορετικού και αυτόνομου συντονιστή για θέματα ασφάλειας για τη διατήρηση της έννοιας της ασφάλειας των σηράγγων και των σχετικών διαδικασιών. Είναι σημαντικό να διακρίνουμε τρεις ομάδες ανθρώπων (FIT, 2006):

- Χρήστες:
 - ✓ οι χρήστες του οδικού δικτύου
 - ✓ χρήστες του σιδηροδρομικού δικτύου
 - ✓ χρήστες του μετρό
- Οι φορείς λειτουργίας:

- ✓ το προσωπικό της αίθουσας ελέγχου
- ✓ το προσωπικό της αμαξοστοιχίας (για τις σιδηροδρομικές σήραγγες και μετρό)
- Το προσωπικό έκτακτης ανάγκης

Η ανθρώπινη συμπεριφορά μπορούν να διακριθεί με βάση την κατάσταση σε (FIT, 2006):

- συνήθης συμπεριφορά πριν από το συμβάν και πρόληψη των ατυχημάτων
- συμπεριφορά που προκαλεί ανεπιθύμητα συμβάντα, ατυχήματα και πυρκαγιές
- ανθρώπινη αντίδραση στη φωτιά
- διάσωση και εκκένωση
- καταπολέμηση της πυρκαγιάς

3.6.1. Επιβάτες του Τρένου και του Μετρό

Συμπεριφορά που Προκαλεί Ανεπιθύμητα Συμβάντα, Ατυχήματα και Πυρκαγιές

Δεν απαιτούνται πολύπλοκες ενέργειες. Η συμπεριφορά των επιβατών του τρένου και του μετρό, που μπορεί να προκαλέσει ατυχήματα και πυρκαγιές, περιορίζεται σε απροσεξία, τόλμη ή δολιοφθορά (FIT, 2006). Ειδικότερα, το κάπνισμα και οι εμπρησμοί συμβάλλουν στον κίνδυνο.

Ανθρώπινη Αντίδραση στην Πυρκαγιά

Σε σχέση με τις οδικές σήραγγες η κατάσταση είναι πιο ελεγχόμενη. Το προσωπικό της αμαξοστοιχίας κανονικά έχει εκπαιδευτεί στη σωστή συμπεριφορά σε περίπτωση πυρκαγιάς και θα καθοδηγήσει τους επιβάτες σε σχέση με τη φωτιά στη σήραγγα.

Οι επιβάτες λαμβάνουν οδηγίες από το προσωπικό και η εμπειρία έχει δείξει ότι οι επιβάτες θα ακολουθήσουν αυτές τις οδηγίες. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό ότι οι οδηγίες που δίνονται είναι σωστές διαφορετικά μπορούν να οδηγήσουν σε κρίσιμες καταστάσεις για ένα μεγάλο αριθμό επιβατών (FIT, 2006) Γενικές πληροφορίες για την ασφάλεια μπορεί να δίνονται με τη μορφή εντύπων στα τρένα.

Οι επιβάτες μπορούν να αντιδράσουν με την ενεργοποίηση του φρένου έκτακτης ανάγκης, αλλά η ενεργοποίηση δεν είναι συχνά επιθυμητή στη σήραγγα και μπορεί να ακυρωθεί από τον οδηγό της μηχανής.

Εκκένωση

Στην περίπτωση που ένα τρένο πρέπει να εκκενωθεί εντός της σήραγγας, αυτό μπορεί να επηρεάσει ένα μεγάλο αριθμό επιβατών. Ο σχεδιασμός και η ικανότητα των τρόπων διαφυγής είναι σημαντικός.

Κανονικά οι επιβάτες δεν θα πρέπει να είναι σε θέση να εγκαταλείψουν το τρένο στη σήραγγα πριν να δοθούν οδηγίες για την εκκένωση. Όταν οι οδηγίες δοθούν, κανονικά δεν θα υπάρχει κανένας δισταγμός να εγκαταλείψουν το τρένο. Μια συμπεριφορά τύπου ομάδας θα χαρακτηρίζει τους επιβάτες και ο χρόνος για να αφήσει η ομάδα το τρένο και να φτάσει στην έξοδο εξαρτάται από την πόρτα, πεζοδρόμια, φωτισμό, κλπ., καθώς και από την ικανότητα κίνησης των επιβατών (FIT, 2006).

3.7. Προηγούμενη Εμπειρία στον Υπολογισμό του Χρόνου Εκκένωσης σε Υπόγειους Σταθμούς

Στην περίπτωση των υπόγειων σταθμών το κλειστό περιβάλλον και οι πολύπλοκες και ποικίλες εγκαταστάσεις, έχουν σαν αποτέλεσμα η συμπεριφορά των χρηστών να είναι περίπλοκη, έτσι ώστε σε περίπτωση πυρκαγιάς, τοξικών αερίων ή άλλων ατυχημάτων, η εκκένωση των χρηστών να αντιμετωπίζει μεγάλες προκλήσεις. Εάν η εκκένωση δεν είναι έγκαιρη οι συνέπειες θα είναι καταστροφικές. Ως εκ τούτου, οι σχετικές προδιαγραφές σχεδιασμού ή τα εγχειρίδια των σταθμών διευκρινίζουν ότι το μέγεθος και η διάταξη των εγκαταστάσεων στους σταθμούς δεν θα πρέπει να υπολογίζονται μόνο με τη χρήση φορτίου των χρηστών υπό κανονικές συνθήκες, αλλά θα πρέπει επίσης να ελέγχονται εάν μπορούν να ανταποκριθούν στην απαίτηση για εκκένωση σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης. Επιπλέον η πυρκαγιά σε σταθμό υπόγειου σιδηρόδρομου μπορεί να οδηγήσει σε ένα μεγάλο αριθμό θυμάτων λόγω της φύσης του χώρου και της χρήσης των εγκαταστάσεων. Όταν συμβεί ένα γεγονός έκτακτης ανάγκης, ένας μεγάλος αριθμός ανθρώπων που θα βρίσκονται στην αποβάθρα θα χρειαστεί να εκκενώσουν συγχρόνως το χώρο, με αποτέλεσμα πολλά άτομα να συγκεντρώνονται στις κάθετες διαδρομές εκκένωσης, όπως είναι η σκάλα και οι κυλιόμενες σκάλες, ενώ ο χρόνος εκκένωσης των χρηστών κατά την μετάβαση σε ένα ασφαλές σημείο δεν πρέπει να υπερβαίνει τον απαιτούμενο χρόνο ασφαλείας. Χρόνος εκκένωσης θεωρείται ο χρόνος που έχει παρέλθει από την έναρξη της εκκένωσης μέχρι το τελευταίο άτομο να εγκαταλείψει το χώρο. Οι αριθμητικές προσομοιώσεις είναι ένα σημαντικό εργαλείο για τον καθορισμό του διαθέσιμου και απαιτούμενου χρόνου για ασφαλή έξοδο. Υπάρχουν αρκετές έρευνες υπολογισμού των χρόνων εξόδων για διαφορετικούς τύπους σταθμών και διαφορετικές κατανομές χρηστών καθώς και για διαφορετικές συνθήκες έκτακτης ανάγκης οι οποίες πραγματοποιήθηκαν με διάφορα λογισμικά πακέτα.

ΜΕΤΡΟ Ηπειρωτικής Κίνας

Σύμφωνα με τις σχετικές διατάξεις που περιέχονται στον αντίστοιχο κανονισμό που εφαρμόζεται στην Κίνα (Code for the Design of Metro of Mainland China 2003), όλοι οι επιβάτες και το προσωπικό στην πλατφόρμα θα πρέπει να εξέλθουν από την πλατφόρμα μέσα σε 6min (συμπεριλαμβανομένου και 1min ως χρόνο αντίδρασης) (Wang, Chen, Li, 2011). Το φορτίο των χρηστών αποτελείται από τους επιβάτες που βρίσκονται στην αποβάθρα, τους εργαζόμενους και τους επιβάτες του τρένου που φτάνει στην αποβάθρα. Οι κυλιόμενες σκάλες χρησιμοποιούνται ως διαδρομή διαφυγής, χρησιμοποιούνται όπως οι σταθερές σκάλες, ενώ μία κυλιόμενη σκάλα θεωρείται από την αρχή ότι είναι εκτός λειτουργίας και άρα δεν συμμετέχει στην διαδικασία της εκκένωσης.

MRT (Mass Rapid Transit) Ταϊβάν

Η μέθοδος υπολογισμού του χρόνου εκκένωσης στο σταθμό MRT της Ταϊβάν ακολουθεί τις προδιαγραφές που θέτει το Αμερικάνικο Πρότυπο NFPA 130 και με βάση το συγκεκριμένο πρότυπο μπορεί να ικανοποιήσει οποιοδήποτε σενάριο έκτακτης ανάγκης (Shen-Wen et al, 2004). Το χειρότερο σενάριο είναι ότι ένα τρένο που παρουσίασε καθυστέρηση ως προς την άφιξη του και στο οποίο εκδηλώθηκε πυρκαγιά εισέρχεται στον σταθμό την ώρα αιχμής. Το χειρότερο σενάριο σε συνδυασμό με τις εκτιμήσεις της εκκένωσης είναι τα κριτήρια σχεδιασμού αντιμετώπισης των έκτακτων καταστάσεων στο σταθμό. Οι επιβάτες της αποβάθρας θα πρέπει να φτάσουν στην έξοδο κινδύνου μέσα σε 4min και σε ασφαλή χώρο σε 6min (SFPE 2002). Αν ο σταθμός περιλαμβάνει πολλά επίπεδα τότε για κάθε επίπεδο πρέπει να προστίθενται 2min στο χρόνο των 6min.

Τόκιο

Τον Απρίλιο του 2003, η Πυροσβεστική Υπηρεσία του Τόκιο (TFD) σύστησε μια επιτροπή εμπειρογνομώνων για πυρκαγιές σε μετρό. Λαμβάνοντας υπόψη την έλλειψη πειραματικών γνώσεων σχετικά με τις πυρκαγιές σε μετρό, αποφασίστηκε να διεξαγει δοκιμές πυρκαγιάς σε σταθμούς του μετρό (SHUJI MORIYAMA, et al, 2005). Οι δοκιμές έγιναν προσομοιώνοντας εστίες

πυρκαγιάς στην αποβάθρα σε τρεις σταθμούς μετρό. Κάθε αποβάθρα συνδέεται με το χώρο έκδοσης των εισιτηρίων με κλιμακοστάσια και κυλιόμενες σκάλες. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν το βράδυ προκειμένου να αποφευχθεί η διατάραξη της κυκλοφορίας. Τα αποτελέσματα από τις δοκιμές αναφέρονται στην κεντρική αποβάθρα η οποία είναι η πλέον χαρακτηριστική αποβάθρα του σταθμού μετρό. Το φορτίο της αποβάθρας που χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση είναι 1.800 άτομα. Σύμφωνα με την προσομοίωση, ο χρόνος μέχρι την έναρξη της εκκένωσης ισούται με 77s (1min :17s), και ο χρόνος για να εκκενωθεί η αποβάθρα προέκυψε 880s (περίπου 15min) μετά την εκδήλωση της πυρκαγιάς.

Σταθμός Μετρό στη Σαγκάη

Δύο λογισμικά, το Building Exodus V4.06 και το Smartfire V4.1 χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή τη μελέτη των Y.F Ye, Q.F Hu, H.W. Huang για να προσομοιώσουν την εκκένωση υπό διαφορετικούς κινδύνους σε ένα σταθμό του μετρό στη Σαγκάη. Σύμφωνα με το σενάριο σε ένα σταθμό μετρό στη Σαγκάη εκδηλώνεται πυρκαγιά την ώρα αιχμής. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές που θέτουν οι αντίστοιχοι Κανονισμοί (Code for Subway Design, 2003 και Urban Mass Transit Design Code) οι σκάλες, οι κυλιόμενες σκάλες και οι έξοδοι πρέπει να εξασφαλίζουν την εκκένωση των επιβατών του τρένου ή εκείνων που περιμένουν στην αποβάθρα καθώς και των εργαζομένων σε 6min στην περίπτωση που εκδηλωθεί πυρκαγιά κατά την ώρα αιχμής. Ο σταθμός καλύπτει μια έκταση 10965m², ενώ το καθαρό μήκος είναι 197.36m και το καθαρό πλάτος είναι 17.10m. Το αποτελεσματικό πλάτος της αποβάθρας είναι 186m. Στην προσομοίωση λήφθηκε υπόψη η χειρότερη περίπτωση σύμφωνα με την οποία 200 άτομα περίμεναν στην αποβάθρα και 1321 ήταν στο τρένο που έφτανε στην αποβάθρα, δηλαδή συνολικά έπρεπε να απομακρυνθούν 1521 άτομα. Στην συγκεκριμένη έρευνα προσομοιώνονται και αναλύονται δύο διαφορετικές καταστάσεις, όπου η μία έχει να κάνει με εκκένωση κάτω από γενικές συνθήκες όπως είναι η απειλή για βόμβα και η άλλη έχει να κάνει με εκκένωση κάτω από εκδήλωση πυρκαγιάς. Σύμφωνα με την ανάλυση, ο χρόνος που απαιτείται για την εκκένωση κάτω από διαφορετικές συνθήκες παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1 χρόνος που απαιτείται για την εκκένωση κάτω από διαφορετικές συνθήκες

Εκκένωση	Γενικές Συνθήκες			Συνθήκες Πυρκαγιάς
Συνθήκες Εκκένωσης	Όλες οι σκάλες ήταν διαθέσιμες. Δεν υπήρξε κάποια παρέμβαση κατά την διαδρομή	Μία κυλιόμενη σκάλα ήταν εκτός λειτουργίας. Δεν υπήρξε κάποια παρέμβαση κατά την διαδρομή	Μία κυλιόμενη σκάλα ήταν εκτός λειτουργίας. Υπήρξε κάποια παρέμβαση κατά την διαδρομή	Μία κυλιόμενη σκάλα ήταν εκτός λειτουργίας. Υπήρξε κάποια παρέμβαση κατά την διαδρομή
Χρόνος Εκκένωσης	3min:55s	4min:30s	5min	5min:15s

Σταθμός ΜΕΤΡΟ στη Φρανκφούρτη

Το 2001 συστάθηκε μία ομάδα με σκοπό την ανάπτυξη μεθόδων και κριτηρίων για την δημιουργία και ανάλυση περιπτώσεων πυρασφάλειας σε νέους και υφιστάμενους σταθμούς ΜΕΤΡΟ στη Φρανκφούρτη (Konnecke – Schneider, 2005). Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό εξετάστηκαν διάφορα σενάρια σε σχέση με το μέγεθος και την τοποθεσία εκδήλωσης της πυρκαγιάς και διενεργήθηκαν προσομοιώσεις με το λογισμικό ASERI σε νέους και υφιστάμενους σταθμούς. Το χειρότερο σενάριο θεωρείται η εκδήλωση πυρκαγιάς στο χώρο του τρένου. Οι τύποι των σταθμών

που ερευνήθηκαν περιλαμβάνουν, χαμηλούς σταθμούς με ύψος μικρότερο από 4m που διαθέτουν σκάλες στην αντίθετη πλευρά της αποβάθρας ή μόνο στο μεσαίο τμήμα της αποβάθρας, υψηλούς σταθμούς μεγάλου όγκου με σκάλες στην αντίθετη πλευρά της αποβάθρας και σταθμούς διέλευσης (σε ορισμένες περιπτώσεις, συμπεριλαμβανομένων των παρακείμενων εμπορικών περιοχών). Εμπειρικές και αριθμητικές μελέτες έδειξαν ότι κατά τη διάρκεια της ώρας αιχμής σε σταθμούς ΜΕΤΡΟ στη Φρανκφούρτη ο συνολικός χρόνος εξόδου κυμαίνεται από 5 έως 7min. Αριθμητικές προσομοιώσεις στην περίπτωση των χειρότερων σεναρίων έδειξαν ότι ο χρόνος εκκένωσης των χρηστών έφτασε μέχρι τα 7min. Για να επιτευχθεί μια συνολική έξοδος σε χρόνο κάτω από 10min (ένα όριο που απαιτείται από τις αρμόδιες αρχές) ο χρόνος πριν από τη μετακίνηση πρέπει να είναι λιγότερος από 3min, κάτι που απαιτεί κατάλληλο σύστημα συναγερμού και διαχείρισης πυρασφάλειας

4. Χαρακτηριστικά Φωτιάς και Επιπτώσεις στον Άνθρωπο

4.1. Χαρακτηριστικά Φωτιάς

Η φωτιά είναι το ορατό αποτέλεσμα της διαδικασίας καύσης. Συγκεκριμένα είναι η διαδικασία που περιλαμβάνει ταχεία οξείδωση σε υψηλές θερμοκρασίες οι οποίες συνοδεύονται από την παραγωγή των αερίων προϊόντων της καύσης και την εκπομπή ορατής και μη ακτινοβολίας.

Η διαδικασία της καύσης συνδέεται συνήθως με την οξείδωση ενός καυσίμου με παρουσία οξυγόνου και με την εκπομπή θερμότητας και φωτός. Οξείδωση, με την αυστηρή χημική έννοια, σημαίνει η απώλεια των ηλεκτρονίων. Για να συμβεί μια αντίδραση οξείδωσης πρέπει να υπάρχουν ένας αναγωγικός παράγοντας (το καύσιμο) και ένα οξειδωτικό μέσο (συνήθως οξυγόνο). Καθώς προστίθεται θερμότητα, τα μόρια καυσίμου και τα μόρια οξυγόνου κερδίζουν ενέργεια και ενεργοποιούνται. Αυτή η μοριακή ενέργεια μεταφέρεται και σε άλλα μόρια καυσίμου και οξυγόνου, δημιουργώντας μια αλυσιδωτή αντίδραση. Η αντίδραση λαμβάνει χώρα εκεί που το καύσιμο χάνει ηλεκτρόνια και το οξυγόνο κερδίζει ηλεκτρόνια. Αυτή η εξώθερμη μεταφορά ηλεκτρονίων εκπέμπει θερμότητα και φως. Η αντίδραση θα συνεχιστεί όσο υπάρχει αρκετή θερμότητα, καύσιμο και οξυγόνο δημιουργώντας την πηγή ανάφλεξης της φωτιάς. Αυτό είναι γνωστό ως το τρίγωνο της φωτιάς (fire triangle) όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 4.1.



Εικόνα 4.1: : τρίγωνο της φωτιάς (fire triangle) (edplace.com)

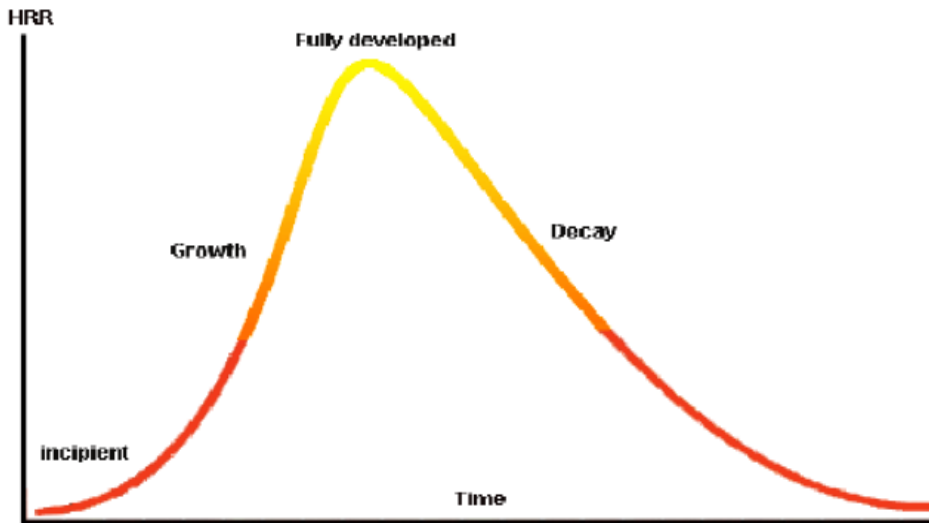
Η καύση με φλόγα μπορεί να συμβεί στις ακόλουθες δύο μορφές (Babrauskas, 2008):

1. Premixed flames, όπου το καύσιμο και το οξυγόνο αναμειγνύονται πριν από την ανάφλεξη. Για παράδειγμα όπως σε μια σόμπα αερίου ή σε ένα πυρσό προπανίου.
2. Diffusion flames, όπου το καύσιμο και το οξυγόνο είναι αρχικά χωριστά αλλά καίγονται στο περιοχή όπου αναμειγνύονται. Για παράδειγμα όπως μια καύση μιας λίμνης εύφλεκτου υγρού ή καύση ενός ξύλου.

4.1.1. Στάδια της Φωτιάς

Υπάρχουν τέσσερα στάδια που ξεχωρίζουν κατά τη διάρκεια της φωτιάς: το αρχικό στάδιο, το στάδιο της ανάπτυξης της, το στάδιο που έχει αναπτυχθεί πλήρως η φωτιά και το στάδιο που φθίνει και τέλος σβήνει η φωτιά (Babrauskas, 2008). Το αρχικό στάδιο (incipient stage) είναι η περιοχή που μια αργή πυρόλυση και προθέρμανση έχει αρχίσει. Το στάδιο της ανάπτυξης (growth stage) είναι η περιοχή που έχει αναπτυχθεί πλήρως η πυρόλυση η οποία αρχίζει με ανάφλεξη και περιλαμβάνει το αρχικό στάδιο καύσης. Το στάδιο που έχει αναπτυχθεί πλήρως (fully developed) η φωτιά όλα τα εύφλεκτα υλικά έχουν αναφλεγεί και θεωρείται πιο θερμή και πιο επικίνδυνη φάση της φωτιάς. Το στάδιο που φθίνει η φωτιά είναι συνήθως το μεγαλύτερο στάδιο σε διάρκεια από τα τέσσερα και χαρακτηρίζεται από σημαντική μείωση του οξυγόνου ή του καυσίμου, οδηγώντας

τελικά μέχρι το τέλος της φωτιάς. Τα προαναφερθέντα στάδια της φωτιάς απεικονίζεται στην εικόνα 4.2.



Εικόνα 4.2: στάδια κατά τη διάρκεια της φωτιάς (tathrafirebrigade.org)

4.1.2. Δυναμικά χαρακτηριστικά φωτιάς – Fire Dynamics

Ο τρόπος έναυσης, διάδοσης και ανάπτυξης της φωτιάς είναι μέρος μιας μελέτης των δυναμικών χαρακτηριστικών της. Αυτή η μελέτη εξετάζει τους τρόπους με τους οποίους μεταφέρεται η θερμότητα (Heat Transfer), το ρυθμό έκλυσης θερμότητας (Heat Release Rate) και τη θερμοκρασία (Temperature) που παράγεται. Αυτοί οι παράγοντες θα αναπτυχθούν στα παρακάτω κεφάλαια.

Μεταφορά θερμότητας – Heat Transfer

Η μεταφορά θερμότητας είναι ένας τομέας θερμικής μηχανικής που επικεντρώνεται στη μεταφορά, την ανταλλαγή και την ανακατανομή της θερμικής ενέργειας. Οι τρεις τρόποι που μπορεί η θερμότητα να μεταφερθεί είναι με αγωγιμότητα (conduction), μεταφορά (convection) και ακτινοβολία (radiation) (Ezekoye, 2016).

✓ Αγωγιμότητα (conduction)

Η μεταφορά θερμότητας με αγωγιμότητα πραγματοποιείται μόνο σε ένα μέσο. Αυτή είναι μια διάκριση μεταξύ αγωγιμότητας και ακτινοβολίας γιατί στη δεύτερη δεν απαιτείται μέσο. Το μέσο ή η κατάσταση της ύλης στην οποία λαμβάνει χώρα η αγωγή μπορεί να είναι αέριο, υγρό ή στερεό. Στην αγωγιμότητα η ενέργεια διαχέεται αργά μέσα από ένα μέσο από ένα σημείο υψηλότερης θερμοκρασίας σε ένα σημείο χαμηλότερης θερμοκρασίας (Atreya, 2016).

✓ Ακτινοβολία (radiation)

Η θερμική ακτινοβολία είναι ο κυρίαρχος τρόπος μεταφοράς θερμότητας που παράγεται από τις φλόγες. Γι' αυτό το λόγο η ποσοτική ανάλυση αυτού του δυναμικού χαρακτηριστικού της φωτιάς απαιτεί εργασιακή γνώση της θερμικής ακτινοβολίας. Όλα τα αντικείμενα με πεπερασμένη θερμοκρασία εκπέμπουν θερμική ακτινοβολία μέσω φυσικό μηχανισμό που σχετίζεται με τις ταλαντώσεις και τις μεταπτώσεις των ηλεκτρονίων (Atreya, 2016).

✓ Ρυθμός έκλυσης θερμότητας (Heat Release Rate)

Δεδομένου ότι η θερμότητα είναι το ενεργειακό αποτέλεσμα της φωτιάς, έχει μεγάλη σημασία η μέτρηση της θερμότητας. Αυτό που είναι ακόμη πιο ενδιαφέρον είναι τι ποσοστό της θερμότητας

απελευθερώνεται και όχι η συνολική ποσότητα. Τη θερμότητα την μετράμε σε μονάδες Joules και επομένως ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας (HRR) μπορεί να μετρηθεί σε Joules ανά δευτερόλεπτο, το οποίο είναι τα Watts (Tien et al., 2016).

Το HRR δεν είναι μόνο μία από τις πολλές μεταβλητές που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή μιας πυρκαγιάς. Στην πραγματικότητα είναι η πιο σημαντική μεταβλητή στην περιγραφή των κινδύνων πυρκαγιάς (Babrauskas, 2016). Οι λόγοι για αυτό είναι πολλοί, αλλά οι σημαντικότεροι μπορούν να συνοψιστούν στο ότι: α) το HRR είναι η κινητήρια δύναμη για τη φωτιά, β) οι περισσότερες άλλες μεταβλητές συσχετίζονται με το HRR και γ) υψηλό HRR υποδηλώνει μεγάλη απειλή για τη ζωή.

Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία έχει μεγάλη σημασία όταν γίνεται αναφορά στη φωτιά. Κατά τη μέτρηση της θερμοκρασίας μιας φωτιάς, η εστίαση γίνεται στην θερμοκρασία που παράγεται από τις φλόγες. Όταν οι θερμοκρασίες των παραγόμενων αερίων γίνονται αρκετά υψηλές, το φαινόμενο flashover μπορεί να συμβεί. Όπως αναφέρει ο Babrauskas (2008), υπάρχει ένα αρκετά μεγάλο μέρος της επιστημονικής κοινότητας που πιστεύει ότι το φαινόμενο flashover επιτυγχάνεται όταν ο μέσος όρος της θερμοκρασίας των υψηλότερων στρώσεων των αερίων σε ένα χώρο υπερβαίνει τους 600°C.

Προϊόντα Καύσης – Fire Products

Τα προϊόντα της καύσης, ιδιαίτερα τα τοξικά αέρια, ο καπνός (soot) και η θερμοκρασία μπορεί να επηρεάσουν την ανθρώπινη ζωή. Το πιο γνωστό και πιο κοινό ασφυξιογόνο αέριο που παράγεται κατά τη διάρκεια της καύσης είναι το μονοξείδιο του άνθρακα, το οποίο έχει αναγνωριστεί ως η κύρια αιτία θανάτου κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς (Babrauskas, 2008). Το μονοξείδιο του άνθρακα παράγεται κατά τη διάρκεια της φωτιάς λόγω ατελούς καύσης, ένα φαινόμενο που είναι συνηθέστερα σε χώρους με μειωμένο εξαερισμό λόγω έλλειψης οξυγόνου. Τα μόρια του μονοξειδίου του άνθρακα έχουν την ικανότητα να συνδέονται καλύτερα με την αιμοσφαιρίνη που υπάρχει στο αίμα από τα μόρια του οξυγόνου, και ως αποτέλεσμα υπάρχει μείωση της παροχής οξυγόνου στο ανθρώπινο οργανισμό και ειδικά στον εγκέφαλο. Αυτό μπορεί να προκαλέσει απώλεια των αισθήσεων ή ακόμα και θάνατο.

Δεύτερο στα πιο συχνά τοξικά αέρια είναι το διοξείδιο του άνθρακα το οποίο είναι θανατηφόρο σε υψηλές δόσεις. Αν και δεν είναι ασφυξιογόνο αέριο από μόνο του, αν κάποιος βρεθεί σε χώρο με χαμηλή συγκέντρωση οξυγόνου (λιγότερο από 15%) και πολύ υψηλές συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα (άνω του 5%) μπορεί να έχει παρόμοιες επιδράσεις με αυτές που προκαλεί το μονοξείδιο του άνθρακα (Purser, 1984).

Παρά τις θανατηφόρες συνέπειες του μονοξειδίου του άνθρακα και του διοξειδίου του άνθρακα, το Soot είναι ο κύριος λόγος που δυσχεραίνει την προσπάθεια εκκένωσης των χρηστών. Οι κύριες παράμετροί που επηρεάζονται από το Soot είναι η μείωση της φωτεινότητας του χώρου, η ορατότητα του χρήστη και η ικανότητα του προσανατολισμού. Η παρουσία πυκνού καπνού δεν μειώνει σημαντικά την ταχύτητα διαφυγής, αλλά προκαλεί και ψυχολογική πίεση στο χρήστη.

Προκειμένου να εξεταστούν οι επιπτώσεις των προϊόντων της φωτιάς στους χρήστες πρέπει να μπορούν να υπολογισθούν ή να μετρηθούν οι συγκεντρώσεις τους. Αυτό μπορεί να γίνει ευκολά με τον υπολογισμό της Κλασματικής Ενεργής Δόσης των τοξικών αερίων (Fractional Effective Dose = FED) και της συγκέντρωσης του καπνού. Ο τρόπος υπολογισμού και αξιοποίησης των παραπάνω στοιχείων αναλύονται στο κεφάλαιο 4.4.1.

4.2. Στατιστικά Στοιχεία από Φωτιές σε Μετρό

Στο Παράρτημα παραθέτετε ένας μεγάλος αριθμός συμβάντων από φωτιές συρμών μετρο από όλο τον κόσμο. Η βιβλιογραφική ανασκόπηση έδειξε τρεις βασικές αιτίες που προκαλείται η φωτιά :

- 1) Ατύχημα λόγω εκτροχιασμού ή σύγκρουσης που έχει ως συνέπεια κάποιο βραχυκύκλωμα ηλεκτρικό κύκλωμα
- 2) Ηλεκτρικές βλάβες είτε στο εσωτερικό είτε στο εξωτερικό του συρμού
- 3) Εμπρησμός (συνήθως στο εσωτερικό του συρμού)

Να προκληθεί φωτιά από βραχυκύκλωμα στο ηλεκτρικό κύκλωμα λόγω εκτροχιασμού ή σύγκρουσης του συρμού είναι σπάνιο (μόνο ένα περιστατικό - Montreal, Canada, 12 Dec 1971) και συνέβη σε πολύ παλιούς συρμούς. Να προκληθεί φωτιά λόγω ηλεκτρικών βλαβών και εμπρησμού ήταν οι κύριες αιτίες των περιστατικών που παρουσιάζονται στα στατιστικά στοιχεία του Tipping (2004). Τα στατιστικά στοιχεία παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 4.1 ανάλογα την αιτία που προκάλεσε τη φωτιά.

Πίνακας 4.1: Αίτιο της Φωτιάς (Tipping 2004)

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

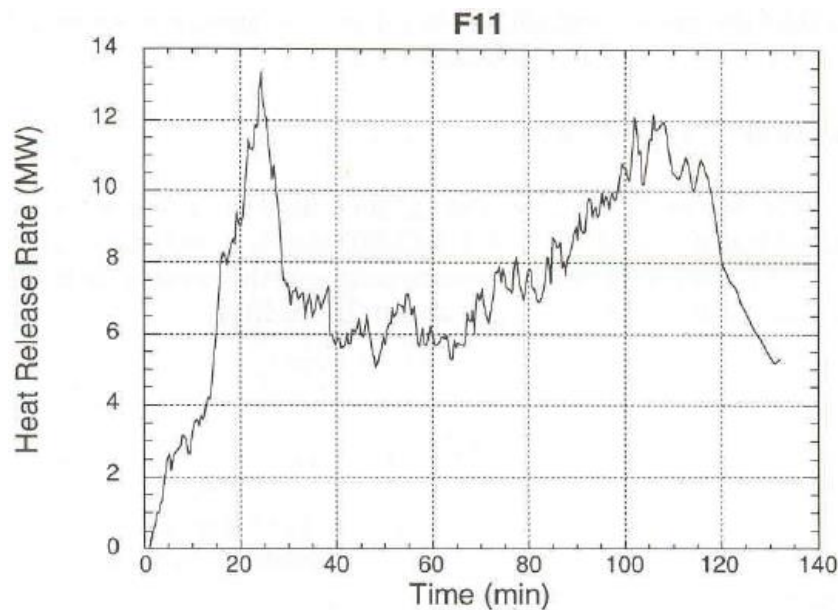
4.3. Υπολογισμός HRR από μεγάλης κλίμακας πειράματα και βάση πραγματικών συμβάντων

4.3.1. Μεγάλης κλίμακας πειράματα – EUREKA project (Ingason et al. 1994)

Η SP-Fire Technology πραγματοποίησε μια σειρά πειραμάτων μεγάλης κλίμακας σε διάφορους τύπους οχημάτων (βαγόνι τραίνου , λεωφορείο, βαγόνι μετρό και προσομοίωση φορτίου φορτηγού) (Ingason et al., 1994). Η μελέτη ήταν ένα κοινό πρόγραμμα μεταξύ εννέα Ευρωπαϊκών χωρών με όνομα EUREKA EU 499 “Fires in Tunnels” (EUREKA 1995). Η σήραγγα που χρησιμοποιήθηκε για τις δοκιμές είχε μήκος 2,3 km και βρίσκεται σε ένα εγκαταλειμμένο ορυχείο χαλκού στη βόρεια Νορβηγία.

Βαγόνι τραίνου – Intercity train (EUREKA project (Ingason et al. 1994))

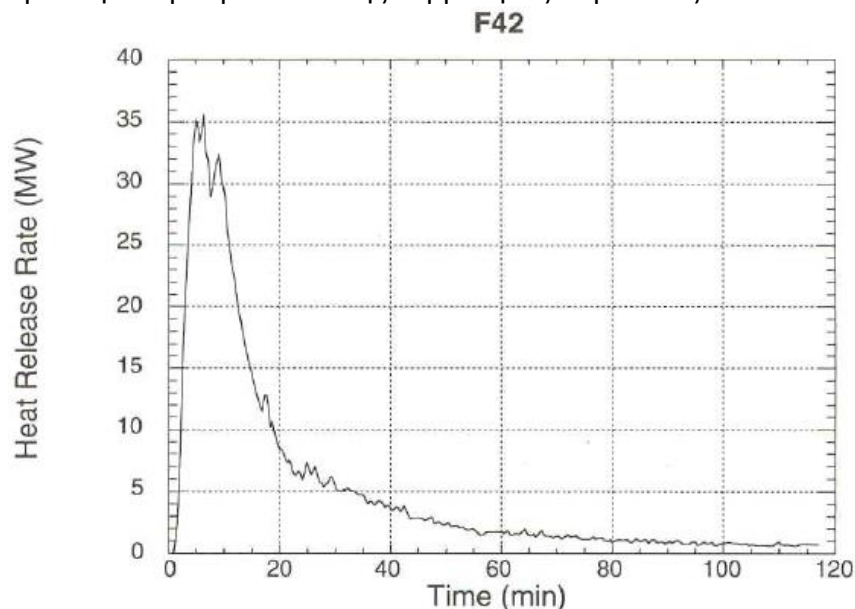
Το βαγόνι είχε μήκος 20,6m, πλάτος 2,7m, και ύψος 3m. Ο αριθμός των καθίσματα στο βαγόνι ήταν 80 και το συνολικό φορτίο φωτιάς των καθισμάτων ήταν σχεδόν 9000 MJ (το υλικό των καθισμάτων δεν αναφέρετε στην έκθεση). Το φορτίο της φωτιάς για όλο το βαγόνι υπολογίστηκε ότι είναι περίπου 77000 MJ. Η πηγή ανάφλεξης ήταν 7,3 λίτρα ισοπροπανόλης (isopropanol), που αντιστοιχεί σε φορτίο φωτιάς 200 MJ όσο και αυτό ενός καθίσματος (Richter και Vauquelin 1994). Το HRR έφτασε τα 13,5 MW μετά από 25 λεπτά, κάνοντας όμως και μια δεύτερη κορυφή της τάξης των 12 MW μετά από 100 λεπτά. Η καμπύλη του ρυθμού έκλυσης θερμότητας παρουσιάζεται στο διάγραμμα 4.1.



Γράφημα 4.1: καμπύλη HRR για βαγόνι τραίνου από τα πειράματα EUREKA

Βαγόνι μετρό – Metro train car (EUREKA project (Ingason et al. 1994))

Το βαγόνι είχε μήκος 18m, πλάτος 2,8m και ύψος 3m. Ο αριθμός των καθισμάτων στο βαγόνι ήταν 40, τα οποία ήταν κατασκευασμένα από αφρό πολυουρεθάνης (polyurethane foam) και επίσης ήταν καλυμμένα με ύφασμα. Το συνολικό φορτίο φωτιάς όλων των καθισμάτων του βαγονιού υπολογίστηκε ότι είναι περίπου 6000 MJ ενώ το συνολικό φορτίο πυρκαγιάς φωτιάς όλου του βαγονιού υπολογίστηκε ότι ήταν περίπου 41300 MJ. Η πηγή ανάφλεξης ήταν 8 λίτρα ισοπροπανόλης (isopropanol). Στο πείραμα, η μέγιστη τιμή του HRR έφτασε τα 35 MW σε περίπου πέντε λεπτά. Η καμπύλη του ρυθμού έκλυσης θερμότητας παρουσιάζεται στο διάγραμμα 4.2.



Γράφημα 4.2: καμπύλη HRR για βαγόνι μετρό από τα πειράματα EUREKA

Ιαπωνικές δοκιμές πλήρους κλίμακας – Japanese full-scale tests (Hasemi et al. 2004)

Όπως αναφέρουν οι Hasemi et al. (2004) οι τιμές HRR που υπολογιστήκαν βάση των δοκιμών πλήρους κλίμακας των βαγονιών ήταν μεταξύ 10 έως 20 MW. Οι δοκιμές έγιναν σύμφωνα με τους ιαπωνικούς κανονισμούς.

4.3.2. Εκτίμηση – Υπολογισμός του HRR βάση πραγματικών περιστατικών με φωτιά

Σχεδόν πάντα τα περιστατικά φωτιάς σε σήραγγα διερευνώνται διεξοδικά. Οι λεπτομέρειες για το πώς αναπτύχθηκε η φωτιά, για το πως έγινε η κατάσβεση της και πως πραγματοποιήθηκε η διάσωση δεν θα συζητηθούν σε αυτό το κεφάλαιο. Ωστόσο, θα γίνει αναφορά στις αιτίες που προκάλεσαν την κάθε φωτιά και στις τιμές του HRR που εκτιμήθηκαν – υπολογίσθηκαν βάση των διαθέσιμων πληροφοριών όπως παρουσιάζονται σε διάφορες εργασίες.

Daegu metro train fire, Korea (18 Feb 2003)

Η φωτιά προκλήθηκε από εμπρησμό σε ένα βαγόνι ενώ ο συρμός ήταν εν κίνηση. Το εύφλεκτο υγρό σύμφωνα με πληροφορίες ήταν δύο μπουκάλια γεμάτα βενζίνη. Η μέγιστη τιμή HRR που εκτιμήθηκε ήταν τουλάχιστον 20 MW μετά από περίπου 35 λεπτά (Chow 2004).

Baku metro train fire, Azerbaijan (28 Oct 1995)

Ένας συρμός αποτελούμενος από πέντε βαγόνια σταμάτησε 200m μετά το σταθμό Uldus εξαιτίας βλάβης (σπινθήρα) στον ηλεκτρικό εξοπλισμό του οπίσθιου φορείου του τέταρτου βαγονιού. Η φωτιά του καλωδίου κάτω από το βαγόνι άρχισε να εξαπλώνεται προς τα πάνω εξαιτίας μιας τρύπας που υπήρχε στο πάτωμα και τα καθίσματα έπιασαν φωτιά. Η φωτιά εξαπλώθηκε γρήγορα στο πέμπτο βαγόνι. Η μέγιστη τιμή του HRR για το τέταρτο και το πέμπτο βαγόνι εκτιμάται ότι είναι περίπου 100 MW μετά από περίπου 30–45 λεπτά όπως αναφέρει το (FIT 2003).

Montreal metro train fires, Canada (12 Dec 1971 and 23 Jan 1974)

Στις 12 Δεκεμβρίου 1971, μια αμαξοστοιχία συγκρούστηκε στο τέλος της σήραγγας στον σταθμό Henri Bourassa, ακολούθησε βραχυκύκλωμα και μετά φωτιά η οποία εξαπλώθηκε σε μια σταθμευμένη αμαξοστοιχία που ήταν σε κοντινή απόσταση. Μια μέση τιμή του HRR αναφέρθηκε περίπου στα 20,5 MW στο Associated Engineers (1980).

Στις 23 Ιανουαρίου 1974, προκλήθηκε φωτιά σε μια αμαξοστοιχία κοντά στο σταθμό Rosemond οδηγώντας στην καταστροφή εννέα βαγόνια και 300 μέτρα καλωδίωσης. Η φωτιά προκλήθηκε από βραχυκύκλωμα εξαιτίας ελαττωματικών ελαστικών. Μια μέση τιμή του HRR αναφέρθηκε περίπου στα 26,4 MW στο Associated Engineers (1980).

4.3.3. Μέγιστες τιμές HRR που έχουν ληφθεί στο σχεδιασμό διάφορων γραμμών μετρό

Διάφορες μέγιστες τιμές HRR έχουν χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό του συστήματος εξαερισμού έκτακτης ανάγκης σε μια σήραγγα μετρό. Οι μέγιστες τιμές HRR κυμαίνονται από 5 MW έως 31,1 MW, ανάλογα σχετικά με τη μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του HRR. Οι μέγιστες τιμές HRR που υιοθετήθηκαν σε κάποιες γραμμές μετρό ανά το κόσμο παρατίθενται στον Πίνακα.

Πίνακας 4.2: τιμές HRR για το σχεδιασμό του συστήματος εξαερισμού έκτακτης ανάγκης (Boon Hui Chiam, 2005)

Country	Metro Line	Peak HRR (MW)	Reference
Singapore	North South Line (NSL)	24 MW	(Chua 2003)
Singapore	East West Line (EWL)	24 MW	(Chua 2003)
Singapore	North East Line (NEL)	15 MW	(Chua 2003)
Singapore	Circle Line (CCL)	10 MW	(Chua 2003)
Australia	New South Link	10 MW	(Chua 2003)
Hong Kong	Lantau Airport Line (LAL)	5 MW	(Chua 2003)
Hong Kong	Airport Express Line (AEL)	10 MW	(Chua 2003)
Thailand,	Chaloem Ratchamongkhon MRT line, Bangkok	7 MW	(Drake and Meeks 2000; Yau et al. 2002)
Greece	Athens metro	10 MW	(Castro et al. 1997)
UK	St Paul's City Thameslink, London	16 MW	(Arup 2004)
USA	Mount Lebanon Tunnel light rail transit, Pittsburgh, PA	13.2 MW	(Kennedy and Patel 1988)
USA	Amtrak New York City Tunnels	31.1 MW	(Amtrak 2004)
USA	Ventilation system upgrade study for Washington DC (WMATA) system	18 MW	(Hettinger and Barnett 1991)
USA	Ventilation system upgrade study for Washington DC (WMATA) system	23.1 MW	(Kennedy et al. 1998)

4.4. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΦΩΤΙΑΣ ΣΤΟΝ ΑΝΘΡΩΠΟ- ΜΕΤΡΗΣΗ & ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΕΙΚΤΩΝ

Όλες οι φωτιές παράγουν μεγάλες ποσότητες καπνού και υψηλή θερμότητα. Οι παράγοντες αυτοί δυσκολεύουν την κίνηση και την ορατότητα, μπλοκάρουν τις εξόδους διαφυγής και καθιστούν τους ανθρώπους εντελώς ανίκανους να αντιδράσουν σε μια κατάσταση έκτακτης ανάγκης. Το στοιχείο που ενδιαφέρει περισσότερο σε τέτοιου είδους καταστάσεις είναι ο διαθέσιμος χρόνος προς εκκένωση. Το κρίσιμο κριτήριο για την προστασία της ανθρώπινης ζωής έναντι φωτιάς είναι ο διαθέσιμος χρόνος διαφυγής να είναι μικρότερος από τον απαιτούμενο χρόνο εκκένωσης (G. Hartzell, H. Emmons, 1988). Ως διαθέσιμος χρόνος διαφυγής ορίζεται το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από τη στιγμή της ανάφλεξης μέχρι τη στιγμή κατά την οποία οι επικρατούσες στο χώρο συνθήκες είναι τέτοιες, ώστε οι επιβάτες δεν μπορούν να αναλάβουν δράση και να πετύχουν τη διαφυγή τους (SFPE 2002). Τέτοιες συνθήκες δημιουργούνται λόγω:

1. Εισπνοής ασφυξιογόνων αερίων, τα οποία προκαλούν απώλεια των αισθήσεων και οδηγούν σε δηλητηρίαση (toxicity).
2. Έκθεσης σε θερμότητα λόγω συναγωγής ή ακτινοβολίας (exposure to heat).
3. Παρεμπόδιση της ορατότητας λόγω πυκνού καπνού (visibility impairment).

Στη συνέχεια θα δούμε πώς μπορούμε να ποσοτικοποιήσουμε κάθε έναν από τους παραπάνω παράγοντες ώστε να μπορούμε να σχολιασουμε αποτελεσματικά τις επιστρώσεις της φωτιάς. Στη συνέχεια θα ασχοληθούμε με τα συμπτώματα από εισπνοή μονοξειδίου του άνθρακα ανάλογα με το χρόνο έκθεσης σ' αυτό και συμπτώματα λόγω έλλειψης οξυγόνου.

4.4.1. ΔΗΛΗΤΗΡΙΑΣΗ ΛΟΓΩ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΩΝ ΑΕΡΙΩΝ (Toxicity)

Τα τοξικά προϊόντα μιας πυρκαγιάς είναι ο κύριος παράγοντας τραυματισμών και θανάτων, αλλά υπάρχουσες μέθοδοι μέτρησης ή υπολογισμού των τοξικών ποσοτήτων έχουν σοβαρούς περιορισμούς (Stec et al. 2009). Πειράματα φωτιάς μεγάλης κλίμακας έχουν χρησιμοποιηθεί για

την εκτίμηση του κινδύνου λόγω τοξικών αερίων. Όμως τα πειράματα αυτά είναι πολύ ακριβά και επιπλέον τα πειράματα μικρής κλίμακας συχνά προσομοιάζουν ελλιπώς τις συνθήκες πλήρους κλίμακας.

Έτσι έχουν δημιουργηθεί ορισμένοι δείκτες που μας βοηθούν να ποσοτικοποιήσουμε το κίνδυνο λόγω των αερίων αυτών. Ένας από αυτούς τους δείκτες ονομάζεται FED (Fractional Effective Dose-Κλασματική δραστική δόση) και περιγράφει τη μη ανεκτή από τον ανθρώπινο οργανισμό δόση (Incapacitating dose) λόγω της αύξησης των συγκεντρώσεων του διοξειδίου και μονοξειδίου του άνθρακα και της ταυτόχρονης μείωσης της συγκέντρωσης του οξυγόνου. Ο δείκτης αυτός δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$FED_{IN} = FED_{CO} \times V_{CO_2} + FED_{O_2}$$

όπου:

FED_{IN}: Fractional Effective Dose of an incapacitating dose (Κλασματική δραστική δόση, μη ανεκτή από τον άνθρωπο)

FED_{CO}: Fractional Effective Dose of Carbon Monoxide (Κλασματική δραστική δόση μονοξειδίου του άνθρακα). Δίνεται από τη σχέση:

$$FED_{CO} = \sum_{t_1}^{t_2} \frac{K \times (CO)^{1,036}}{D} \times \Delta t$$

όπου:

Δt [min]: το χρονικό διάστημα που εξετάζουμε

[CO] [ppm]: η μέση συγκέντρωση του μονοξειδίου στο διάστημα Δt.

K,D : Σταθερές που σχετίζονται με τη δραστηριότητα του ανθρώπου. Οι τιμές τους φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 4.3: Τιμές των σταθερών K και D ανάλογα με τη δραστηριότητα του ανθρώπου (Purser.2002)

Δραστηριότητα	K	D
Ξεκούραση	2.81945x10 ⁻⁴	40
Ελαφριά εργασία	8.29250x10 ⁻⁴	30
Βαριά εργασία	1.65850x10 ⁻⁴	20

Αξίζει να σημειωθεί ότι το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), αν και δεν είναι τοξικό, λαμβάνεται υπ' όψη διότι σε συγκεντρώσεις μεγαλύτερες του 5% δυσκολεύει την αναπνοή. Επιπλέον, ο υπεραερισμός ενός χώρου, δηλαδή η (συνεχής) εισαγωγή καθαρού αέρα μπορεί να αυξήσει το ρυθμό με τον οποίο παράγονται άλλα τοξικά αέρια, όπως είναι το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) κι επομένως να μειωθεί ο χρόνος ανοχής κι άρα ο χρόνος μέχρι το θάνατο.

Για να ληφθεί υπ' όψη αυτή η αύξηση της συγκέντρωσης των τοξικών αερίων λόγω του υπεραερισμού εισάγεται ο παράγοντας V_{CO₂}, ο οποίος δίνεται από τη σχέση (SFPE, 2016):

$$V_{CO_2} = \frac{\exp(0.1903x\%CO_2 + 2.0004)}{7.1}$$

όπου:

%CO₂ είναι το ποσοστό του διοξειδίου του άνθρακα στο διαμέρισμα που εξετάζουμε.

Ομοίως, η κλασματική δραστική δόση για την έλλειψη οξυγόνου δίνεται από τη σχέση:

$$FED_{O_2} = \sum_{t_1}^{t_2} \frac{1}{\exp[8.13 - 0.54(20.9\% - \%O_2)]} \times \Delta t$$

όπου:

(20.9%-%O₂) είναι η ποσοστιαία μείωση του οξυγόνου στο χρονικό διάστημα Δt. Σημειώνεται ότι ποσοστό οξυγόνου 20.9% αντιστοιχεί στο κανονικό ατμοσφαιρικό επίπεδο οξυγόνου.

Όταν ο άνθρωπος βρίσκεται σε χώρο που οι τιμές του δείκτη FED είναι μεγαλύτερες του 1, είναι πολύ πιθανόν οι συνθήκες του χώρου να είναι θανάσιμες για τον άνθρωπο. Τα ανεκτά όρια για έναν υγιή ενήλικα μπορούν να τεθούν στο 0,5 και για τον ευαίσθητο πληθυσμό στο 0,3 (AFAC,2010). Ο σχεδιασμός όμως πρέπει να γίνεται για την προστασία του γενικού πληθυσμού, συμπεριλαμβανομένων των ευάλωτων ατόμων, από μη αναστρέψιμα ή αλλά σοβαρά μακροχρόνια προβλήματα υγείας. Αρά η επιλογή της κατωτάτης οριακής τιμής του FED πρέπει να είναι 0,3 με βάση τον κανονισμό AFAC (Australasian Fire Authorities, 2010), έτσι ώστε ο σχεδιασμός έναντι φωτιάς να συμπεριλαμβάνει όλο το πληθυσμό.

Στην εικόνα 4.3 παρουσιάζονται κάποια ενδεικτικά όρια αντοχής σε διαφορά ασφυξιογόνα αέρια ανάλογα το χρόνο έκθεσης βάση του κανονισμού AFAC. Στο πίνακα 4.4 παρουσιάζονται κάποια ενδεικτικά όρια συγκέντρωσης μονοξειδίου του άνθρακα και οι αντιστοιχεί χρόνοι που μπορεί να αντέξει ο άνθρωπος κάτω από αυτές τις συνθήκες.

Table 2: Tenability Limits for Exposures to Asphyxiants				
	5 MIN EXPOSURE		30 MIN EXPOSURE	
	INCAPACITATION	DEATH	INCAPACITATION	DEATH
Carbon Monoxide CO	6,000 ppm	12,000 ppm	1,400 ppm	2,500 ppm
Hydrogen Cyanide CHN	150 ppm	250 ppm	90 ppm	170 ppm
Low Oxygen O ₂ (Hypoxia)	<13%	<5%	<12%	<7%
Carbon Dioxide CO ₂	>7%	>10%	>6%	>9%

Εικόνα 4.3: ενδεικτικά όρια αντοχής σε συγκέντρωσης μονοξειδίου του άνθρακα (AFAC,2010)

Πίνακας 4.4: ενδεικτικά όρια αντοχής σε συγκέντρωση μονοξειδίου του άνθρακα (engineeringtoolbox.com)

CO [ppm]	Χρόνος έκθεσης	Συμπτώματα
35	8 ώρες	Μέγιστη επιτρεπτή έκθεση σε εργασιακό χώρο σε διάστημα 8ώρου (σύμφωνα με Occupational Safety and Health Administration-OSHA)
200	2-3 ώρες	Ήπιος πονοκέφαλος, κόπωση, ναυτία και ζαλάδα
400	1-2 ώρες	Σοβαρός πονοκέφαλος, απειλή της ζωής έπειτα από 3 ώρες
800	45 λεπτά	Ζαλάδα, ναυτία, συσπάσεις. Αναισθησία σε διάστημα 2 ωρών και θάνατος εντός 2-3 ωρών
1600	20 λεπτά	Πονοκέφαλος, ναυτία, ζαλάδα. Θάνατος εντός 1 ώρας
3200	5-10 λεπτά	Πονοκέφαλος, ναυτία, ζαλάδα. Θάνατος εντός 1 ώρας
6400	1-2 λεπτά	Πονοκέφαλος, ναυτία, ζαλάδα. Θάνατος εντός 25-30 λεπτών
12800	1-3 λεπτά	Θάνατος

4.4.2. ΡΕΥΜΑΤΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ (ΛΟΓΩ ΣΥΝΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ)

Η θερμότητα λόγω συναγωγής έχει να κάνει με τη θερμοκρασιακή διαφορά του ανθρωπίνου σώματος με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος χώρου. Έχουν γίνει μελέτες σχετικά με το τι ρόλο παίζει η θέση με την έννοια της στάσης ενός ανθρώπου (όρθιος, κάθεται στο πάτωμα) στη μεταφορά θερμότητας λόγω συναγωγής (Kurazumi et al. 2008). Η θερμότητα λόγω ακτινοβολίας είναι η θερμότητα που νιώθει κάποιος όταν βρίσκεται κοντά σε μια φωτιά και προφανώς όσο πλησιάζουμε στη φωτιά γίνεται εντονότερη. Επιπλέον, κατά την εκπομπή της θερμότητας αυτή στην ατμόσφαιρα, η έντασή της μειώνεται λόγω της απορρόφησης στην ατμόσφαιρα υδρατμών και διοξειδίου του άνθρακα.

Έχουν διεξαχθεί αρκετά πειράματα σχετικά με την αντοχή του ανθρώπου σε αυτό το είδος θερμότητας, ανάλογα με το είδος των ρούχων που φοράει (Raj, 2008). Έχει βρεθεί ότι ένας μέσος ενήλικας μπορεί να αντέξει, χωρίς μεγάλο πόνο ή σοβαρό τραυματισμό, ρεύμα θερμότητας λόγω ακτινοβολίας ίσο προς 5 kW/m^2 για διάστημα 30 δευτερολέπτων. Ένδυση με λεπτά ρούχα μπορεί να μειώσει το ρεύμα θερμότητας στο δέρμα κατά το μισό ή κατά το $1/3$. Για παράδειγμα, αν το ρεύμα θερμότητας που εφαρμόζεται σ' έναν άνθρωπο έξω από τα ρούχα του είναι 5 kW/m^2 , το δέρμα του θα νιώσει τα $1.67\text{-}2.5 \text{ kW/m}^2$ (Raj, 2008).

Υπάρχουν τρεις βασικοί τρόποι με τους οποίους μπορεί η έκθεση σε θερμότητα να οδηγήσει σε θάνατο. Οι τρόποι αυτοί είναι οι εξής (Hartzell and Emmons, 1988) :

- Υπερθερμία
- Επιφανειακά εγκαύματα
- Καταστροφή των αναπνευστικών οδών

Γενικά, έκθεση μικρής διάρκειας σε μεγάλη θερμοκρασία ή μεγάλο ρεύμα θερμότητας ακτινοβολίας είναι λιγότερο ανεκτή από έκθεση μεγαλύτερης διάρκειας σε μικρότερη θερμοκρασία ή ρεύμα θερμότητας. Μπορεί να εφαρμοστεί μια μεθοδολογία παρόμοια με αυτή που παρουσιάσαμε για τα τοξικά αέρια. Συνεπώς, η συνολική δραστική δόση θερμότητας (Fractional Effective Dose of Heat) κατά την έκθεση ενός ανθρώπου σε αυτήν υπολογίζεται από τη σχέση:

$$FED_{HEAT} = \sum_{t1}^{t2} \left(\frac{1}{t_{Irad}} + \frac{1}{t_{Iconv}} \right) \times \Delta t$$

όπου:

t_{Irad} [min] είναι ο χρόνος που χρειάζεται για να καεί το δέρμα λόγω θερμότητας ακτινοβολίας.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, μια ανεκτή τιμή είναι τα 2.5 kW/m². Για τιμές μεγαλύτερες ($q_{rad} \geq 2.5 \text{ kW/m}^2$), ο χρόνος t_{Irad} μειώνεται πολύ γρήγορα, σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$t_{Irad} = 1.33 \times q_{rad}^{-\frac{4}{3}}$$

όπου:

q_{rad} [kW/m²] είναι το ρεύμα θερμότητας λόγω ακτινοβολίας.

Το t_{Iconv} [min] είναι ο χρόνος που οδηγεί σε ανυπόφορη από τον άνθρωπο κατάσταση κάτω από συνθήκες έκθεσης σε θερμότητα συναγωγής σε περιβάλλον με αέρα που περιέχει λιγότερο από 10% κατ' όγκον υδρατμό και δίνεται από τη σχέση:

$$t_{Iconv} = K_1 \times T^{K_2}$$

όπου:

T [°C] είναι η θερμοκρασία, K_1 και K_2 είναι αδιάστατες σταθερές οι τιμές των οποίων εξαρτώνται από το τύπο του ρουχισμού όπως δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4.5: Τιμές των K_1 και K_2 ανάλογα τον τύπο του ρουχισμού (P. Raj, 2008)		
	K_1	K_2
Για ρούχα που καλύπτουν όλο το σώμα	4.1x10 ⁸	-3.61
Για πιο ελαφριά ή καθόλου ρούχα	5.0x10 ⁸	-3.40

Άρα η επιλογή της κατωτάτης οριακής τιμής του FED πρέπει να είναι 0,3 με βάση τον κανονισμό AFAC (Australasian Fire Authorities Council). Στην εικόνα 4.4 παρουσιάζονται κάποια ενδεικτικά όρια αντοχής σε διάφορες θερμοκρασίες ανάλογα το χρόνο έκθεσης βάση του κανονισμού AFAC.

Table 1: Heat Exposure and Tenability Limits		
EVENT	CAUSE	EXPOSURE LEVEL
Heat stroke (hyperthermia)	Prolonged exposure (more than 15 minutes) to heated environments	60 C - 120 C
Skin pain or burns	Exposure to convected heat (dry air <10% water)	> 120 C
	Exposure to convected heat (water-saturated air)	> 60 C
	Exposure to radiant heat	> 2.5 kW/m ²
	Exposure to conducted heat (contact with hot metal surface)	> 60 C
Respiratory tract burns	(same as for skin burns)	(same as for skin burns)

Εικόνα 4.4: Ενδεικτικά όρια ανοχής σε διάφορες θερμοκρασίες (AFAC,2010)

Επίσης βάση κάποιων δεδομένων θερμικής ανοχής για το μη προστατευμένο δέρμα των ανθρώπων προτείνουν ένα όριο περίπου 120°C για θερμική ενέργεια από συναγωγή, πάνω από αυτό το όριο υπάρχει μεγάλος πόνος και δημιουργούνται γρήγορα εγκαύματα μέσα σε λίγα λεπτά. Σε συνάρτηση με τη διάρκεια της έκθεσης και τη θερμότητα που δέχεται κάποιος κάτω από αυτή τη θερμοκρασία μπορεί να οδηγήσει σε ανικανότητα λόγω υπερθερμίας. Παραδείγματα χρόνων ανοχής σε διάφορες ροές ακτινοβολίας και θερμοκρασίες αέρα εμφανίζονται στο Πίνακα 4,6.

Πίνακας 4.6: χρόνοι ανοχής σε διάφορες ροές ακτινοβολίας και θερμοκρασίες αέρα (SFPE,2016)

Mode of Heat Transfer	Intensity	Tolerance Time
Radiation	<2.5 kW·m ⁻²	>5 min
	2.5 kW·m ⁻²	30 s
	10 kW·m ⁻²	4 s
Convection	<60°C 100% saturated	>30 min
	100°C <10% H ₂ O ^a	12 min
	120°C <10% H ₂ O	7 min
	140°C <10% H ₂ O	4 min
	160°C <10% H ₂ O	2 min
	180°C <10% H ₂ O	1 min

4.4.3. ΟΡΑΤΟΤΗΤΑ

Ο πυκνός καπνός επηρεάζει αρνητικά την ταχύτητα κίνησης των χρηστών καθώς και την ικανότητα αναζήτησης και επιλογής των κατάλληλων διάδρομων και εξόδων διαφυγής. Ο βαθμός επιρροής του καπνού εξαρτάται από τη συγκέντρωση του (οπτική πυκνότητα = optical density), την ερεθιστικότητα του στα ματιά και στην αναπνευστική οδό. Η επίδραση του καπνού στην ορατότητα μπορεί να αξιολογηθεί με δυο μεθόδους: α) με χρήση του δείκτη FEC (Fractional Effective Concentration) βάση του χώρου και β) με προσαρμογή της ταχύτητας κίνησης των χρηστών βάση της ορατότητάς τους καθ' όλη την διάρκεια της εκκένωσης (Yamada, Akizuki, 2016).

4.4.3.1. Δείκτης FEC

Η παρεμπόδιση της ορατότητας βασισμένη στη χρήση του δείκτη FEC (Fractional Effective Concentration) υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$FEC_{SMOKE} = \frac{OD}{0.2}, \text{ για μικρούς χώρους και αποστάσεις με μέγιστη ορατότητα 5m}$$

$$FEC_{SMOKE} = \frac{OD}{0.08}, \text{ για μεγάλους χώρους και αποστάσεις με μέγιστη ορατότητα 10m}$$

όπου:

OD [1/m] είναι η οπτική πυκνότητα του καπνού.

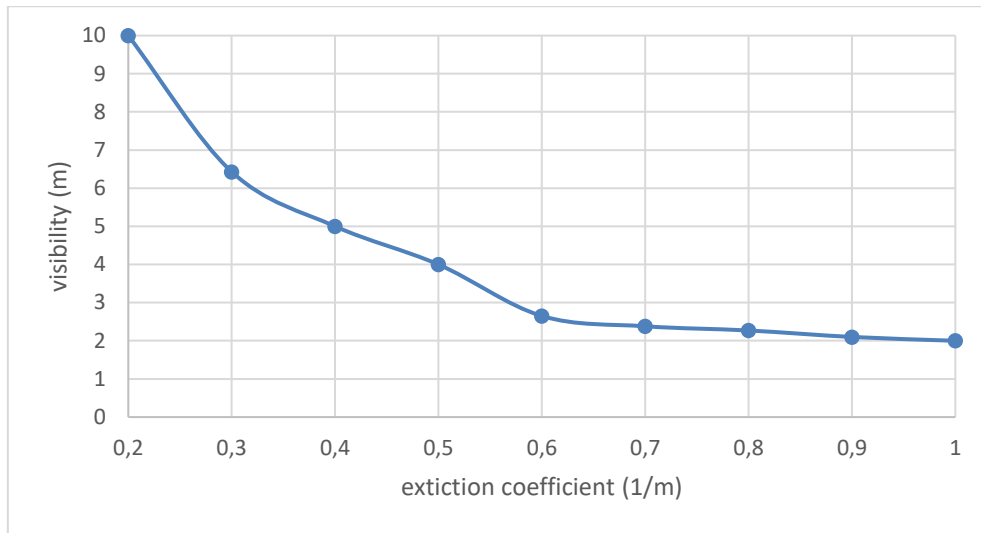
Στην παραπάνω σχέση, η συγκέντρωση του καπνού εκφράζεται σαν κλάσμα της συγκέντρωσης που θεωρείται ότι επηρεάζει σημαντικά τη δυνατότητα διαφυγής. Όταν $FEC_{SMOKE, total} = 1$, σημαίνει ότι το επίπεδο της ορατότητας εμποδίζει οποιαδήποτε προσπάθεια διαφυγής (Yamada, Akizuki, 2016).

4.4.3.2. Ταχύτητα κίνησης χρηστών βάση της ορατότητάς τους

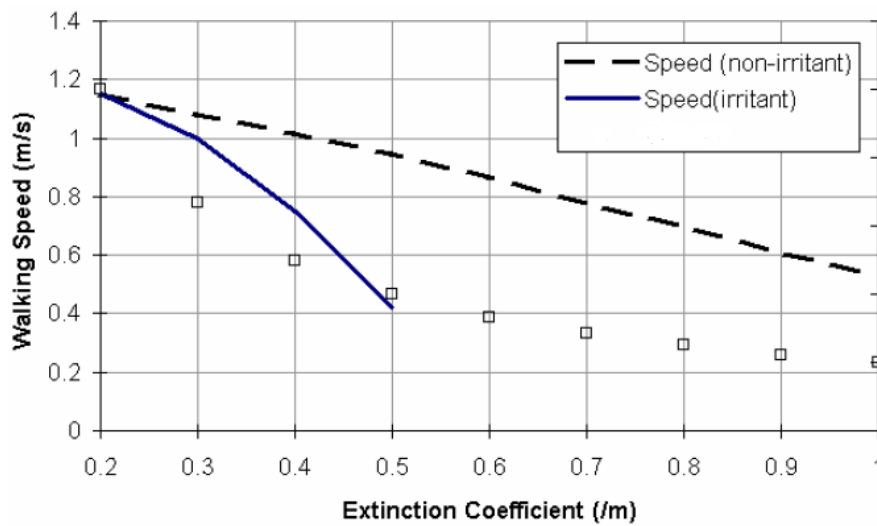
Για να πραγματοποιηθεί η συσχέτιση της ταχύτητας κίνησης των χρηστών βάση της ορατότητάς τους έπρεπε να βρεθεί πρώτα μια σχέση αναμεσα στην ορατότητα (visibility) και τον συντελεστή εξάλειψης (extinction coefficient). Αυτό ήταν αναγκαίο γιατί βάση της βιβλιογραφικής έρευνας που έγινε βρέθηκαν μόνο διαγράμματα τα οποία συσχετίζουν την ταχύτητα κίνησης των χρηστών βάση του συντελεστή εξάλειψης (extinction coefficient).

Το διάγραμμα 4.3 συσχετίζει την ορατότητα (visibility) και τον συντελεστή εξάλειψης (extinction coefficient) (FIT). Από τη βιβλιογραφική έρευνα προκύπτει ότι μόνο δυο διαγράμματα προσομοιάζουν καλύτερα τη μείωση της ταχύτητας κίνησης των χρηστών βάση της αύξησης της πυκνότητας του καπνού στο χώρο, το πρώτο είναι το διάγραμμα 4.4 (Technical Report – Part 1 Design Fire Scenarios) και το δεύτερο είναι το διάγραμμα 4.5 (SFPE Handbook of Fire Protection Engineering Fifth Edition).

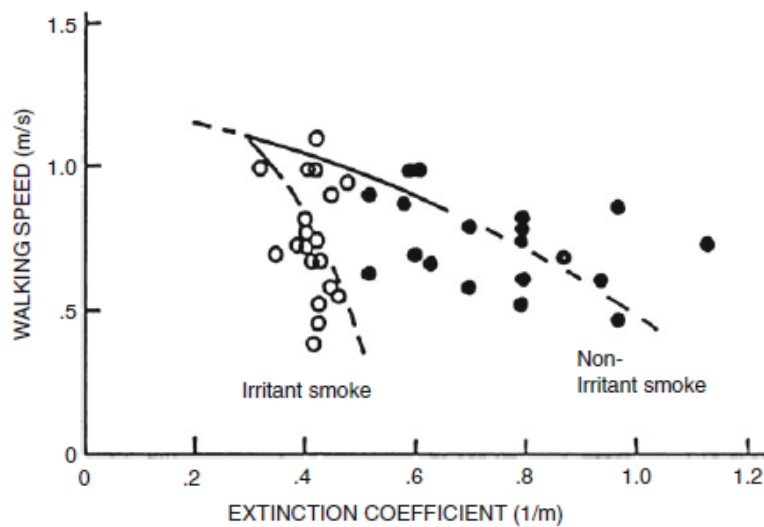
Όπως παρουσιάζεται και στα διαγράμματα έχει σημαντικό ρόλο η σύνθεση του καπνού δηλαδή αν είναι ερεθιστικός (irritant) ή όχι (non irritant) προς τον άνθρωπο. Στην ανάλυση της παρούσας εργασίας ο καπνός θεωρείται ερεθιστικός προς τους χρήστες του σταθμού λόγω των προϊόντων της καύσης και αρά θα χρησιμοποιηθούν μόνο τα δεδομένα για ερεθιστικό καπνό για τη συσχέτιση. Βάση των στοιχείων των διαγραμμάτων 4.3, 4.4 και 4.5 και με τη χρήση φύλλου excel δημιουργήθηκε το διάγραμμα 4.6 στο οποίο παρουσιάζεται η μείωση της ταχύτητας κίνησης των χρηστών βάση της ορατότητάς τους μέσα σε χώρο με ερεθιστικό καπνό.



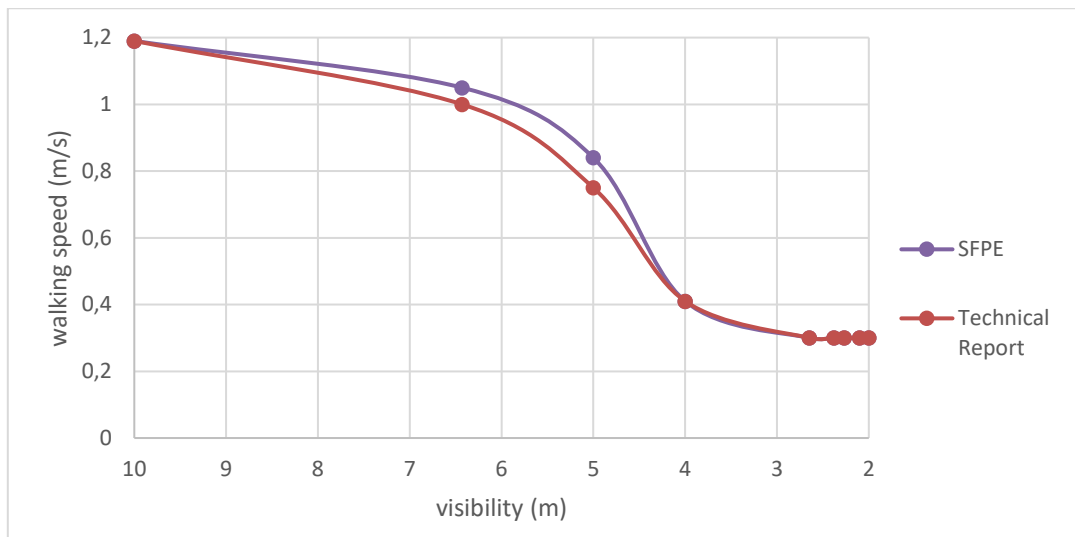
Γράφημα 4.3: Συσχέτιση της ορατότητας (visibility) με το συντελεστή εξάλειψης (extinction coefficient) (FIT 2015)



Γράφημα 4.4: Ταχύτητα κίνησης βάση πυκνότητας καπνού (FIT 2015)



Γράφημα 4.5: Ταχύτητα κίνησης βάση πυκνότητας καπνού (SFPE, 2016)



Γράφημα 4.6: Ταχύτητα κίνησης βάση ορατότητας σε ερεθιστικό καπνό

5. Ανάλυση των προγραμμάτων Pyrosim και Pathfinder

Σε αυτό το Κεφάλαιο περιγράφονται και αναφέρονται τα στοιχεία των προγραμμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη εργασία. Αρχικά γίνεται αναφορά για το Pyrosim το οποίο χρησιμοποιήθηκε για να προσομοιωθεί η φωτιά και η εξάπλωση των προϊόντων της στο σταθμό. Στη συνέχεια περιγράφονται και αναφέρονται τα χαρακτηριστικά του προγράμματος Pathfinder που προσομοιώνει την εκκένωση, επίσης γίνεται αναφορά σε στοιχεία για τη Μοντελοποίηση της διαδικασίας της εκκένωσης.

5.1. Pyrosim

Το πρόγραμμα PyroSim είναι ένα γραφικό περιβάλλον για τον χρήστη (Graphical User Interface), το οποίο τρέχει το πρόγραμμα FDS (Fire Dynamics Simulator), δίνοντας έτσι την δυνατότητα να προβλεφθούν οι συγκεντρώσεις του καπνού, του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και άλλων ουσιών κατά την διάρκεια μιας πυρκαγιάς, όπως επίσης και τα προφίλ των θερμοκρασιών για έναν χώρο. Το πρόγραμμα PyroSim έχει αναπτυχθεί από την εταιρεία Thunderhead Engineering ενώ το FDS έχει αναπτυχθεί από το National Institute of Standards and Technology (PyroSim Manual, 2017).

Το αναφερόμενο πρόγραμμα (FDS) πρόκειται για ένα μοντέλο προσομοίωσης με υπολογιστή, της δυναμικής θερμικά ωθούμενων ροών ρευστών (CFD, Computational Fluid Dynamics). Πιο συγκεκριμένα το FDS επιλύει μια μορφή των εξισώσεων του Navier-Stokes, κατάλληλες για χαμηλής ταχύτητας και θερμικά ωθούμενες ροές, δίνοντας έμφαση στην κίνηση του καπνού και της θερμότητας από την φωτιά. Το πρόγραμμα Smokeview είναι ένα ξεχωριστό πρόγραμμα οπτικοποίησης, που χρησιμοποιείται για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης του FDS. Τέλος είναι αναγκαίο να αναφερθεί ότι τα προγράμματα προσομοίωσης φωτιάς είναι βασισμένα στην εφαρμογή που έχει αναπτυχθεί από τον εθνικό οργανισμό πιστοποίησης και τεχνολογίας των Η.Π.Α. (NIST, National Institute of Standards and Technology) και επιδιώκουν στην δημιουργία ενός καλύτερου οπτικού περιβάλλοντος για τον χρήστη, με σκοπό την ευκολότερη ανάπτυξη των εφαρμογών για το πρόγραμμα FDS (PyroSim manual, 2017).

Το μοντέλο της καύσης στις περισσότερες εφαρμογές των προγραμμάτων FDS χρησιμοποιεί μια χημική αντίδραση ενός βήματος με έλεγχο της μίξης και χρησιμοποιώντας τρία συγκεντρωμένα είδη (ένα είδος αντιπροσωπεύοντας μια ομάδα ειδών). Τα τρία είδη αυτά είναι ο αέρας, το καύσιμο και τα προϊόντα. Από προεπιλογή τα δύο τελευταία είδη υπολογίζονται ρητώς από τον υπολογιστή. Επιλογές εντός του προγράμματος μας δίνουν την δυνατότητα δημιουργίας πολλαπλών αντιδράσεων, που να μην είναι απαραίτητα ελεγχόμενες από την μίξη του καυσίμου.

Η μεταφορά της θερμικής ακτινοβολίας εμπεριέχεται στο μοντέλο μέσω της επίλυσης της εξίσωσης μεταφοράς της θερμικής ακτινοβολίας για φαιά αέρια (gray gas) και σε μερικές περιορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο λευκής ζώνης (white-band model). Η εξίσωση επιλύεται χρησιμοποιώντας μια τεχνική παρόμοια με την μέθοδο πεπερασμένων όγκων για μεταφορά με συναγωγή και έτσι λαμβάνει το όνομα μέθοδος πεπερασμένου όγκου (Finite Volume Method (FMV)) (McGrattan, 2013).

5.1.1. Ανάλυση Παραμέτρων Pyrosim

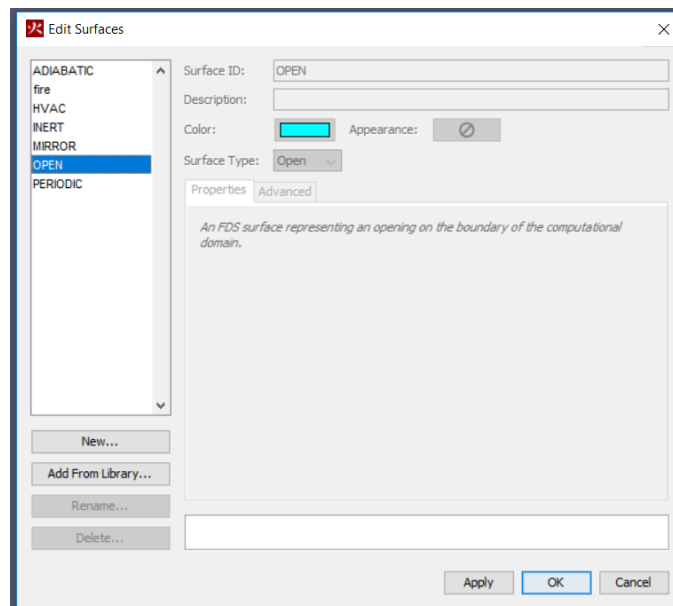
Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει ανάλυση όλων των παραμέτρων του προγράμματος που χρησιμοποιήθηκαν.

Πλέγμα – Meshes

Όλοι οι υπολογισμοί του προγράμματος FDS εκτελούνται εντός υπολογιστικών πλεγμάτων (computational meshes). Κάθε αντικείμενο στην προσομοίωση πρέπει να προσαρμόζεται στο πλέγμα και όταν η θέση ενός αντικειμένου δεν προσαρμόζεται ακριβώς στο πλέγμα, το αντικείμενο επανατοποθετείται αυτόματα κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Κάθε αντικείμενο που εκτείνεται πέρα από το όριο του εξωτερικού πλέγματος αποκόπτεται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Όσο πιο πυκνό είναι το Mesh τόσο πιο πολύπλοκη και χρονοβόρα γίνεται η προσομοίωση.

Επιφάνειες – Surface

Οι επιφάνειες (Surface) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον καθορισμό των ιδιοτήτων των στερεών αντικειμένων (solid objects) και των αεραγωγών (vents) στο μοντέλο FDS. Στο πρόγραμμα υπάρχουν αρκετά είδη επιφανειών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν όπως ADIABATIC, INERT, MIRROR, OPEN, HVAC, PERIODIC και BURNER. Στη παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν οι επιφάνειες τύπου Open και Burner που θα αναλυθούν στη συνέχεια. Για να δημιουργηθεί και να τροποποιηθεί μια επιφάνεια, χρησιμοποιείται το παράθυρο Εισαγωγή Επιφανειών (Edit Surfaces) βλέπε εικόνα 5.1, το παράθυρο Εισαγωγή Επιφανειών βρίσκεται στο μενού Model.



Εικόνα 5.1 : Καρτέλα εισαγωγής επιφανειών

Open

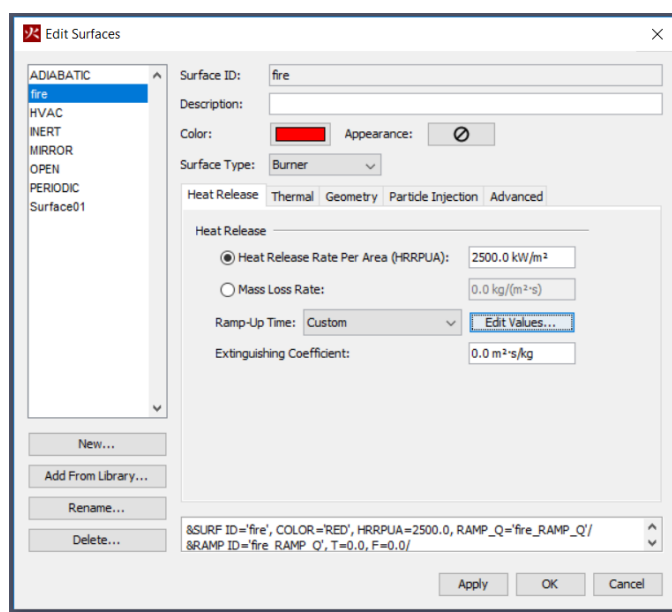
Αυτή η επιφάνεια χρησιμοποιείται μόνο στα Vents και πάντα στο εξωτερικό όριο του πλέγματος (Mesh). Το OPEN υποδηλώνει παθητικό άνοιγμα προς τα έξω και χρησιμοποιείται συχνά για να προσομοιώσει ανοιχτές πόρτες ή παράθυρα.

Burner

Αυτός ο τύπος επιφάνειας αντιπροσωπεύει την εστία της φωτιάς εισάγοντας είτε το ρυθμό έκλυσης της θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας είτε το ρυθμό απώλειας μάζας του καυσίμου. Οι παράμετροι που εισάγονται για το καθορισμό του Burner αναλύονται στο πίνακα 5.1 και εισάγονται στη καρτέλα της εικόνας 5.2.

Πίνακας 5.1: Ανάλυση παραμέτρων της επιφάνειας τύπου Burner (PyroSim Manual 2017)

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 5.2: Εισαγωγή παραμέτρων για Burner

Vents

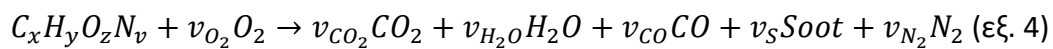
Τα Vents έχουν γενική χρήση στο πρόγραμμα FDS για να περιγράψουν ένα 2D ορθογώνιο κομμάτι πάνω σε μια επιφάνεια. Στη παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν δυο τύποι Vents ένας επιφάνειας (Surface) Burner για να προσομοιωθεί η εστία της φωτιάς και ένας επιφάνειας (Surface) Open για να προσομοιωθούν τα ανοίγματα της κατασκευής.

Αντιδράσεις – Reactions

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθεί πως εισάγεται στο Pyrosim μια αντίδραση (reaction) και θα εξηγηθούν οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται στη συγκεκριμένη εργασία. Στο Pyrosim μπορούν να εισαχθούν δυο τύποι καύσης, η καύση αέριας φάσης (gas phase combustion) και η πυρόλυση στέρεας φάσης (solid phase pyrolysis). Στη παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η καύση αέριας φάσης που αναφέρεται στην αντίδραση των ατμών του καυσίμου με το οξυγόνο. Σε μια προσομοίωση φωτιάς με FDS, μπορεί να εισαχθεί μόνο ένα καύσιμο (σε αέρια κατάσταση) και θα λειτουργήσει ως υποκατάστατο για άλλες πιθανές πηγές καυσίμων αν υπάρχουν. Η αντίδραση ορίζεται χρησιμοποιώντας το <Edit Reactions> από το μενού στο Pyrosim.

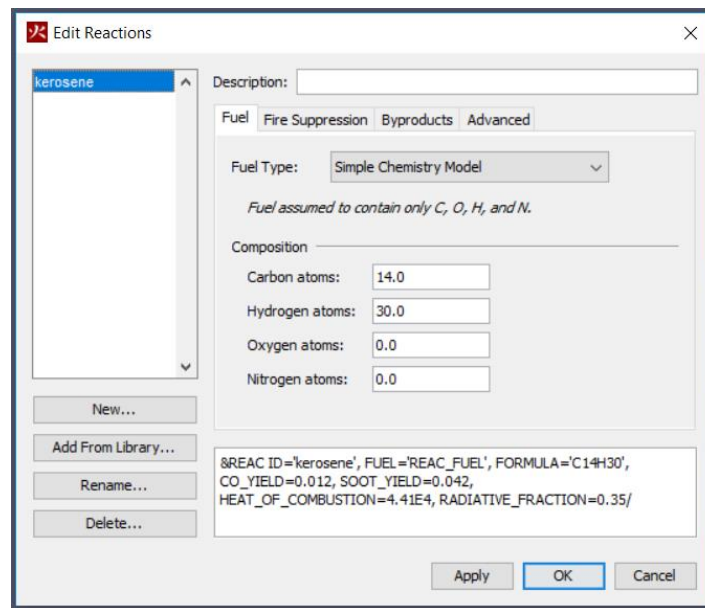
Σε μια προσομοίωση φωτιάς με FDS, υπάρχουν δυο τρόποι ορισμού της φωτιάς: α) να καθορίσει κανείς σε μια επιφάνεια ένα ρυθμό έκλυσης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (HRRPUA = Heat Release Rate Per Unit Area) και β) να ορίσει κάποιος την θερμότητα της αντίδρασης (Heat of Reaction). Ο HRRPUA είναι ο απλούστερος τρόπος για το προσδιορισμό της φωτιάς και το μόνο που χρειάζεται για να δημιουργηθεί είναι μια επιφάνεια (surface) τύπου Burner (βλέπε κεφάλαιο Surface).

Εισάγοντας το χημικό τύπο της αντίδρασης που θέλουμε το πρόγραμμα χρησιμοποιεί την εξίσωση 4 (simple chemistry model) για να υπολογίσει τα προϊόντα της καύσης. Συμπεριλαμβάνοντας μια αντίδραση στη προσομοίωση τα σωματίδια του αέρα, τα προϊόντα της καύσης και το καύσιμο που χρησιμοποιούνται στην αντίδραση γίνονται ανιχνεύσιμα (tracked species). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι συγκεντρώσεις συστατικών όπως το οξυγόνο, το διοξείδιο του άνθρακα, το μονοξείδιο του άνθρακα και ο καπνός (Soot) να μπορούν να εξαχθούν ως δεδομένα (output data).

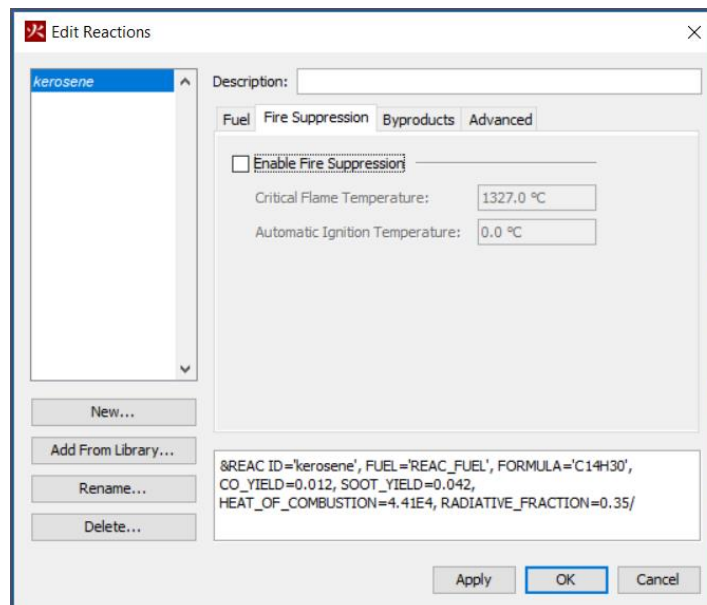


Για να εισαχθεί μια αντίδραση στο πρόγραμμα ακολουθούνται τα εξής βήματα:

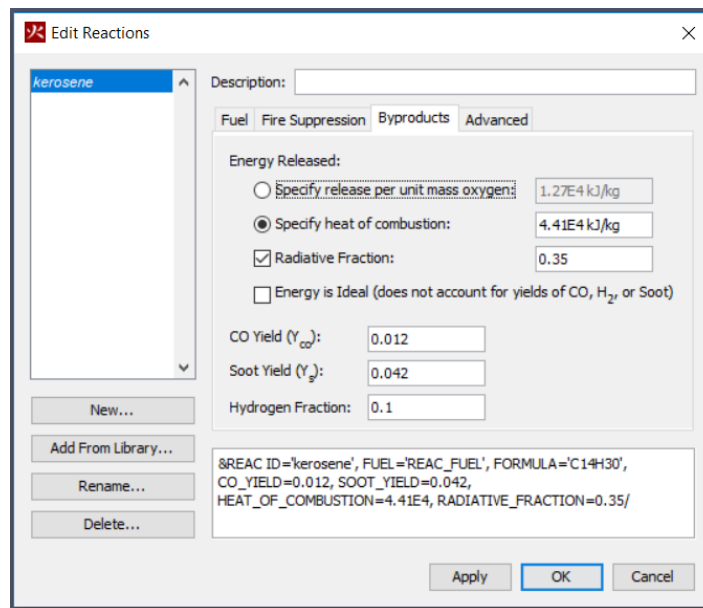
1. Από το μενού Model, κάνουμε κλικ στην επιλογή Edit Reactions.
2. Στη καρτέλα Fuel, εικόνα 5.3, εισάγουμε τον αριθμό των ατόμων των στοιχείων της αντίδρασης.
3. Στη καρτέλα Fire Suppression, εικόνα 5.4, μπορούμε να ενεργοποιήσουμε την επιλογή για Fire Suppression και να εισάγουμε τιμές για τη κρίσιμη θερμοκρασία φλόγας (Critical Flame Temperature) και τη θερμοκρασία αυτανάφλεξης (Automatic Ignition Temperature). Στις προσομοιώσεις που έγιναν στην παρούσα εργασία η επιλογή «Fire Suppression» ήταν απενεργοποιημένη.
4. Στη καρτέλα Byproducts, εικόνα 5.5, μπορούμε να επιλέξουμε τη μέθοδο έκλυσης της ενέργειας είτε με έκλυση βασισμένη στο ρυθμό έκλυσης ανά μονάδα οξυγόνου (Specify release per unit mass oxygen) (EPUMO2) είτε στη καθορισμένη θερμότητα καύσης (specify heat of combustion). Στις προσομοιώσεις που έγιναν στην παρούσα εργασία η έκλυση ενέργειας βασίζεται στην καθορισμένη θερμότητα καύσης (specify heat of combustion). Επίσης καθορίζονται οι αποδόσεις του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και του Soot που παράγονται.



Εικόνα 5.3: Καρτέλα εισαγωγής στοιχειομετρίας αντίδρασης



Εικόνα 5.4: Καρτέλα ενεργοποίησης επιλογής Fire Suppression



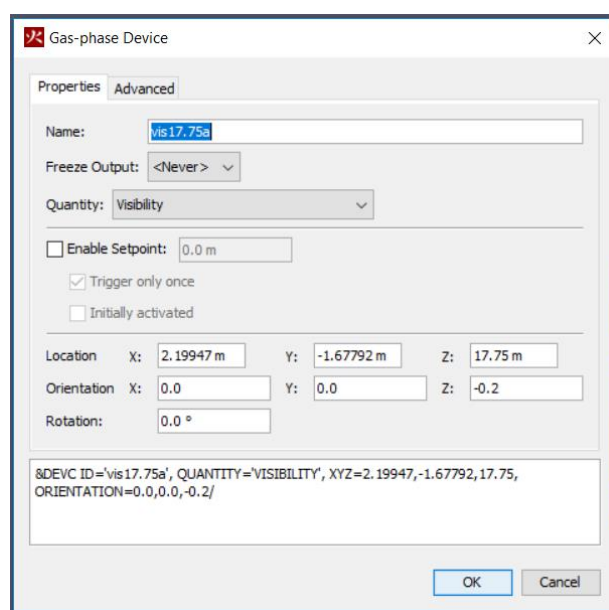
Εικόνα 5.5: Καρτέλα επιλογής ιδιοτήτων προϊόντων καύσης

Συσκευές – Devices

Οι συσκευές χρησιμοποιούνται σε οποίο σημείο του μοντέλου θέλουμε για καταγραφή ποσοτήτων διάφορων παραμέτρων της ανάλυσης και για πιο συνθέτες συσκευές όπως ανιχνευτές καπνού και ψεκαστήρες (sprinklers). Επίσης η συσκευές μπορούν να μας δώσουν σε γραφήματα τη χρονική εξέλιξη κάποιων παραμέτρων. Από τις πολλές επιλογές συσκευών που μας παραχθεί το Pyrosim στη παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η Gas Phase Device για τη μέτρηση της ορατότητας (Visibility), η Gas Phase Device για τη μέτρηση του μονοξειδίου του άνθρακα (mol/mol) και η Radiative Heat Flux Gas Device για τη μέτρηση της ακτινοβολίας kW/m² (Radiation) σε κρίσιμα σημεία του μοντέλου.

Για να εισαχθεί μια συσκευή στο πρόγραμμα ακολουθούνται τα εξής βήματα:

1. Από το μενού Devices, κάνουμε κλικ στην επιλογή «Gas-phase Device»
2. Επιλέγεται το όνομα της συσκευής, εικόνα 5.6.
3. Επιλέγεται η ποσότητα που θέλουμε να μετρήσουμε.
4. Και τέλος εισάγονται οι συντεταγμένες της τοποθεσίας.



Εικόνα 5.6: Καρτέλα επιλογής συσκευής

Έλεγχος αποτελεσμάτων – Output Controls

Το Pyrosim παρέχει στο χρήστη και σε αυτό το κομμάτι πολλές επιλογές κάνοντας τη διαχείριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης πιο εύκολη. Στη παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν κάποια Slices και η επιλογή για Plot3D Data των παραμέτρων που είναι κρίσιμες για την διαδικασία της προσομοίωσης της εκκένωσης.

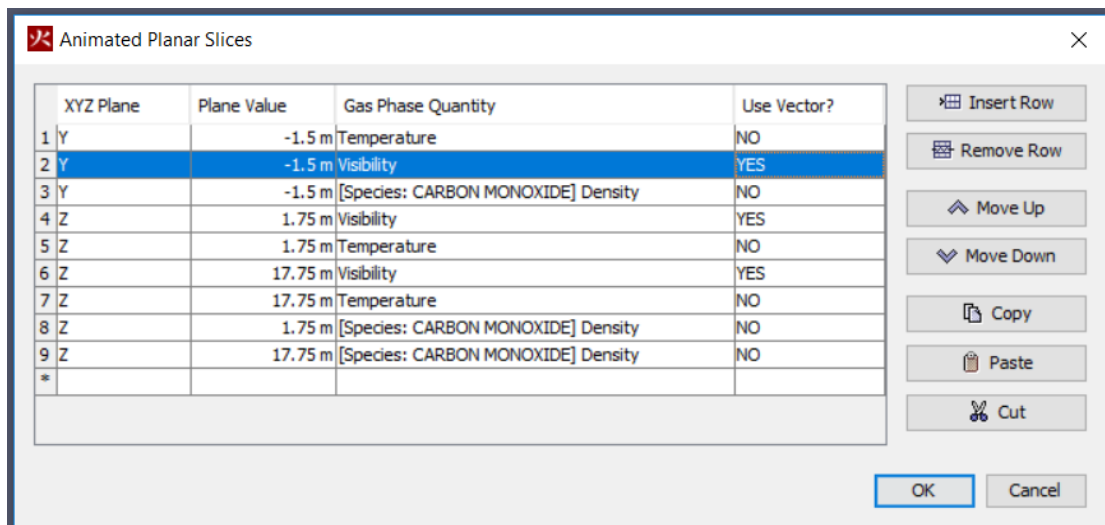
Slices

Τα Slices μετράνε gas-phase δεδομένα (πίεση, ταχύτητα, θερμοκρασία, συγκέντρωση σωματιδίων κ.α.) πάνω σε έναν επίπεδο ευθυγραμμισμένο άξονα που είναι παράλληλος σε έναν από τους άξονες x ή y ή z. Επίσης αυτά τα δεδομένα μπορούν να αποτυπωθούν και να αναπαραχθούν από ένα αρχείο Smokeview.

Στη παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν Slices για τη μέτρηση της ορατότητας (Visibility), θερμοκρασίας και της πυκνότητας των σωματιδίων του μονοξειδίου του άνθρακα σε κρίσιμα σημεία του μοντέλου.

Για να εισαχθεί ένα Slice στο πρόγραμμα ακολουθούνται τα εξής βήματα:

1. Από το μενού Output, κάνουμε κλικ στην επιλογή Slices, εικόνα 5.7.
2. Στην επιλογή XYZ Plane επιλεγώ τον άξονα που θα είναι παράλληλο το slice που θέλουμε.
3. Στο Plane Value επιλέγεται η θέση.
4. Και τέλος στο Gas-phase Quantity επιλεγώ τη παράμετρο που θα μετρηθεί.



Εικόνα 5.7: Καρτέλα επιλογής Slices

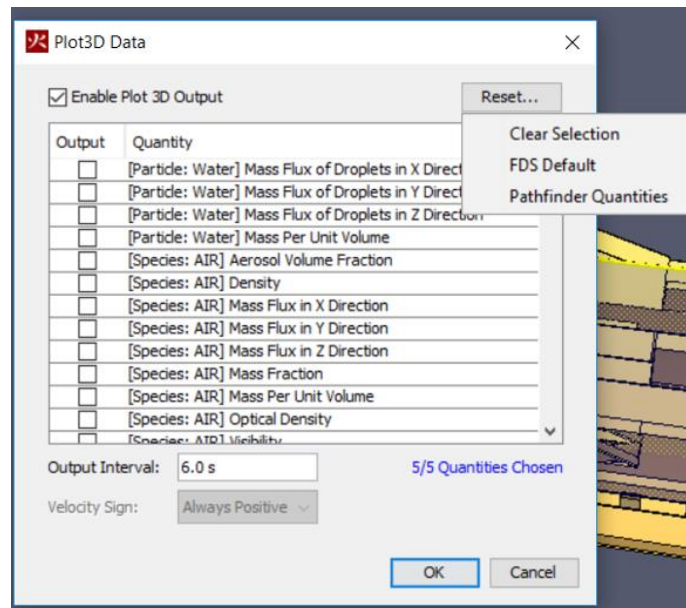
Plot3D Data

Τα αποτελέσματα από το Plot3D αποτελείται από δυο μέρη ένα αρχείο XYZ που περιέχει πληροφορίες σχετικά με τη δομή του Mesh και ένα αρχείο Q με αποτελέσματα σε κάθε καθορισμένη τιμή. Κάθε αρχείο Q περιέχει δεδομένα μέχρι πέντε ποσότητες και για τη παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η επιλογή Pathfinder Quantities (4 ποσότητες) και η θερμοκρασία. Τα δεδομένα PLOT3D μπορούν να χρησιμοποιηθούν από το λογισμικό προσομοίωσης εκκένωσης Pathfinder για να ενσωματωθούν με τα αποτελέσματα του FDS.

Για να εξαχθούν Plot3D Data από το πρόγραμμα ακολουθούνται τα εξής βήματα:

1. Από το μενού Output, κάνουμε κλικ στην επιλογή Plot3D Data, εικόνα 5.8.
2. Ενεργοποιούμε το Plot3D Data Output

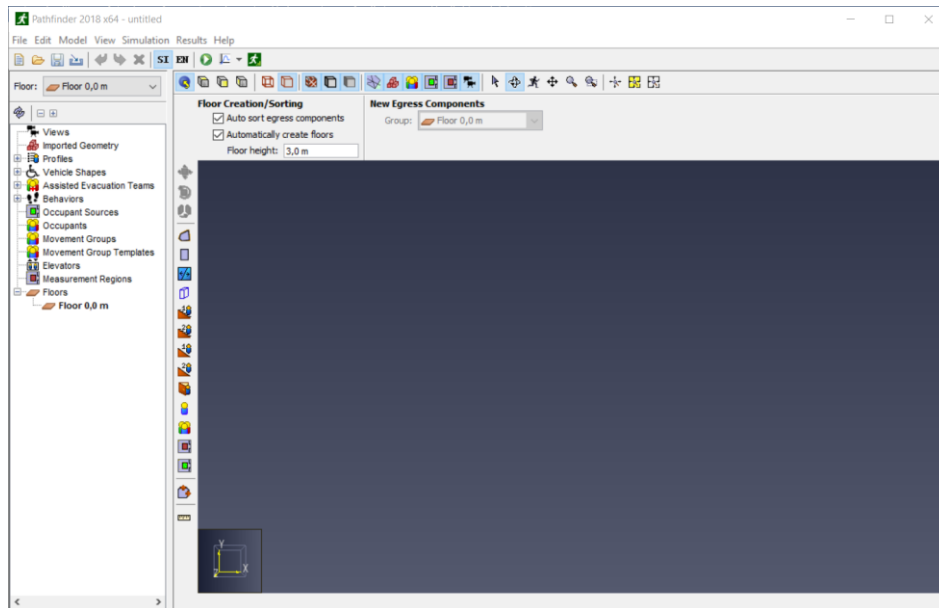
3. Επιλέγουμε της ποσότητες που χρειαζόμαστε.
4. Και τέλος επιλέγουμε το βήμα που θα εξάγονται οι μετρήσεις (output interval)



Εικόνα 5.8: Καρτέλα επιλογής Plot3D Data

5.2. Προσομοίωση εκκένωσης με Χρήση του Προγράμματος PathFinder

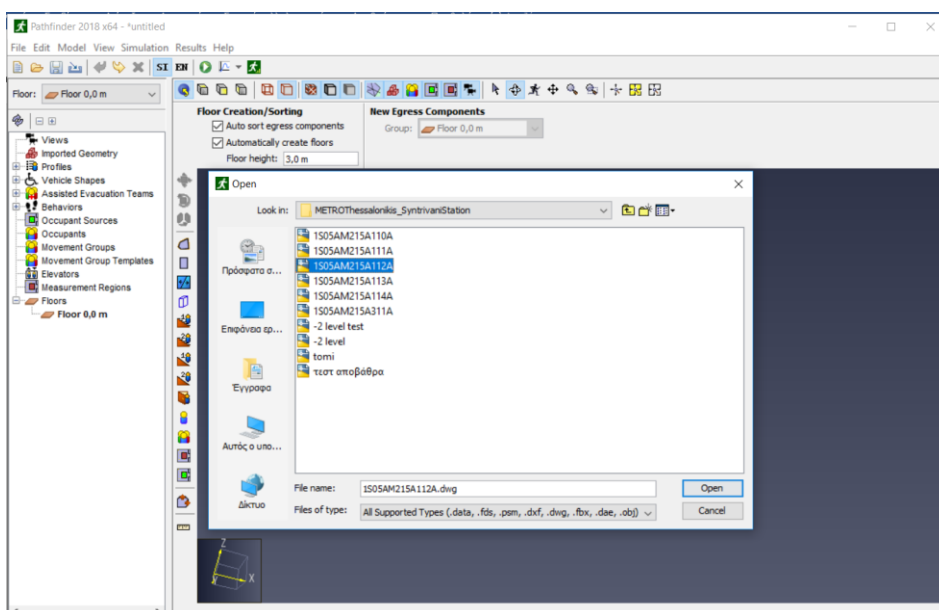
Η επιλογή του μοντέλου που θα χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση της εκκένωσης εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του μοντέλου, την ευελιξία και τα διαθέσιμα σχεδιαστικά εργαλεία. Υπάρχουν πολλά ηλεκτρονικά υπολογιστικά προγράμματα, τα οποία προσομοιώνουν τις ειδικές συνθήκες στο χώρο μελέτης και παραθέτουν τα τελικά αποτελέσματα σε μορφή αρχείου αλλά και σε τρισδιάστατη εικόνα. Για τον υπολογισμό του χρόνου εκκένωσης στο σταθμό μετρό χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Pathfinder, το οποίο είναι ένα αρκετά εύκολο στη χρήση πρόγραμμα. Στην Εικόνα 5.9 αποτυπώνεται το περιβάλλον εργασίας του συγκεκριμένου λογισμικού.



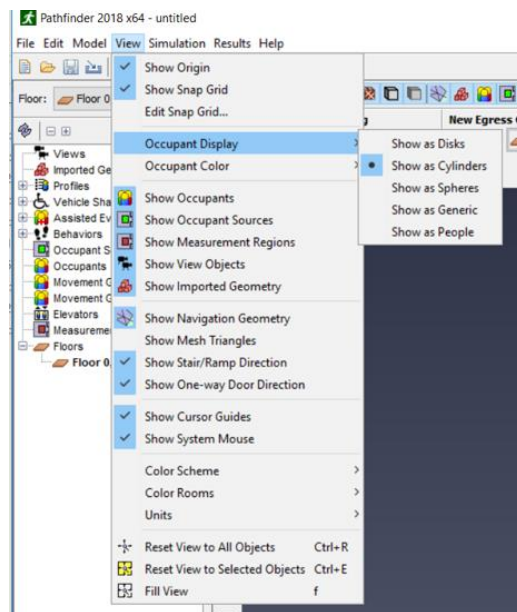
Εικόνα 5.9: περιβάλλον εργασίας Pathfinder

Στο πρόγραμμα όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.10 μπορεί να εισαχθεί το σχέδιο της κάτοψης που μας ενδιαφέρει και στη συνέχεια μέσω κατάλληλων εντολών προσδιορίζονται οι περιοχές στις οποίες επιτρέπεται να κινηθούν τα άτομα, ορίζονται οι έξοδοι και ο μέγιστος αριθμός των ατόμων που μπορούν να κινηθούν σε αυτές τις περιοχές. Οι χρήστες μπορούν να αποτυπωθούν με διάφορες μορφές όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.11. Επιπλέον υπολογίζονται οι διαδρομές που ακολουθούν τα άτομα και οι χρόνοι που χρειάζονται μέχρι να φτάσουν σε μια ασφαλή περιοχή.

Με το συγκεκριμένο πρόγραμμα δίνεται η δυνατότητα πολλών παραμετρικών αναλύσεων διαφοροποιώντας κάθε φορά διάφορους συντελεστές, όπως ο αριθμός των χρηστών, ο αριθμός των εξόδων, η ταχύτητα κίνησης και άλλες συνθήκες συμπεριφοράς. Επίσης στις λειτουργίες του λογισμικού προσομοίωσης είναι η δυνατότητα της παρουσίασης της ζωντανής κίνησης των χρηστών με ανθρώπινη μορφή.



Εικόνα 5.10: Τρόπος εισαγωγής αρχείου CAD

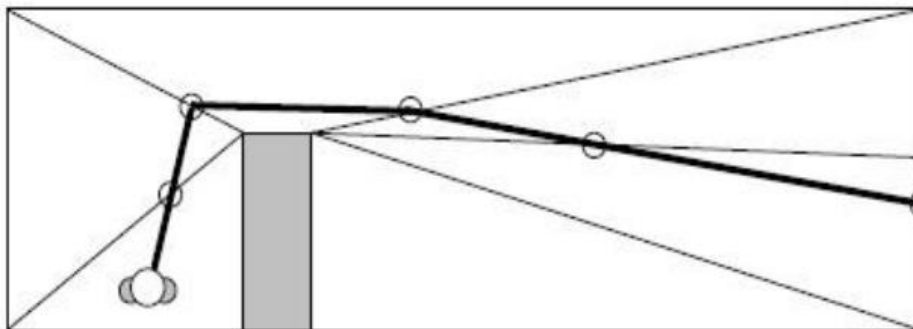


Εικόνα 5.11: Τρόποι αποτυπώσεις χρηστών

5.2.1. Περιγραφή Λειτουργίας του Προγράμματος

Στην αρχή της προσομοίωσης κάθε άτομο δημιουργεί μια διαδρομή, δηλαδή ένα «μονοπάτι». Το μονοπάτι αυτό θα ακολουθηθεί στη συνέχεια ώστε να κατευθυνθεί προς την έξοδο. Για να δημιουργηθεί το μονοπάτι, το λογισμικό χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο αναζήτησης A (Hart et al., 1968), και έναν τριγωνισμένο κάνναβο πλοήγησης. Το μονοπάτι που προκύπτει παρουσιάζεται σαν μια σειρά σημείων στα άκρα του τριγωνικού καννάβου. Τα σημεία αυτά θα δημιουργήσουν ένα μονοπάτι όχι ευθύγραμμο, αλλά με τις απαραίτητες αλλαγές κατεύθυνσης, μέχρι ο χρήστης να φτάσει στον τελικό προορισμό του (Johnson, 2006).

Για να προσδιοριστεί το μονοπάτι αυτό, το Pathfinder χρησιμοποιεί την παραλλαγή μιας τεχνικής γνωστής ως «κίνηση νημάτων» (Johnson, 2006). Αυτό θα επανευθυγραμμίσει τα σημεία έτσι ώστε να παραμένει και σε απόσταση ασφαλείας (ίση με το πάχος του ατόμου) μακριά από τα εμπόδια αυτά. Παράδειγμα των παραπάνω σημείων, γνωστών και ως «τελικά σημεία», φαίνεται στην εικόνα 5.12.



Εικόνα 5.12: Προγραμματισμένη διαδρομή του χρήστη με τα τελικά σημεία (Pathfinder Technical Reference,2013)

Το σχήμα δείχνει το προβαλλόμενο μονοπάτι ενός ατόμου σε ένα απλό ορθογωνικό χώρο. Το άτομο στέκεται στο κάτω αριστερό άκρο, και θέλει να εξέλθει μέσω του κάτω δεξιού άκρου. Ο κάνναβος πλοήγησης παρουσιάζεται στο σχήμα με λεπτές γραμμές που σχηματίζουν τρίγωνα στο χώρο. Ένα εμπόδιο δεν επιτρέπει στο άτομο να περπατήσει ευθεία προς την έξοδο. Το μονοπάτι που υπολογίστηκε φαίνεται από τη σκούρα γραμμή και τα τελικά σημεία που παρουσιάζονται ως μικροί κύκλοι. Καθένας από αυτούς δημιουργείται για κάθε γωνία που τέμνει το μονοπάτι.

Μόλις δημιουργηθεί το μονοπάτι ο χρήστης εκτελεί τα παρακάτω βήματα (Pathfinder Technical Reference 2013):

- Σημειώνονται δύο σημεία κατεύθυνσης (waypoints): Το «παρόν», το οποίο είναι το μακρύτερο σημείο που το άτομο μπορεί να δει ή να προσεγγίσει χωρίς να έχει επαφή με οποιαδήποτε εμπόδιο, και το «επόμενο», που ορίζεται βλέποντας από το παρόν, χωρίς την παρεμβολή οποιασδήποτε όχλησης.
- Το άτομο επιχειρεί να επαναπροσδιορίσει από το παρόν σημείο το επόμενο. Αυτό γίνεται να επιτευχθεί αν το άτομο μπορεί να προχωρήσει σε ευθεία γραμμή από την παρούσα θέση του στο επόμενο σημείο χωρίς να έρθει σε επαφή με οποιοδήποτε εμπόδιο, ή αν αφιχθούν με μικρή απόκλιση από το παρόν. Για τη ρύθμιση SFPE η ανοχή για την παραπάνω απόκλιση αυτή είναι σχεδόν μηδενική, διότι δεν υπάρχει κανένας περιορισμός στην υπερπήδηση εμποδίων, άρα τα άτομα αναμένεται να φτάσουν ακριβώς στο σημείο κατεύθυνσής τους. Για τη ρύθμιση «Steering», η ανοχή είναι ίση με 1m, αφού τα άτομα αναμένεται να αλλάξουν κάπως τις διαδρομές τους όταν απομακρύνονται από άλλα άτομα ή εμπόδια.
- Το άτομο ελέγχει αν υπάρχει ανάγκη να αλλάξει το μονοπάτι του. Η ανάγκη αυτή προκύπτει όταν δεν μπορεί να δει μια ευθεία γραμμή μέχρι το παρόν σημείο κατεύθυνσής του, ή αν παρακάμψει για παραπάνω από 1m το καθορισμένο μονοπάτι του.
- Δημιουργείται μια «καμπύλη αναζήτησης», για να καθορίσει την επιθυμητή του κίνηση. Στη ρύθμιση SFPE, η καμπύλη αυτή είναι πρακτικώς ένα ευθύγραμμο τμήμα που ξεκινάει από την παρούσα θέση του και καταλήγει στο παρόν σημείο κατεύθυνσής του. Στη ρύθμιση Steering, είναι μια καμπύλη μορφής quadratic B-Spline, χρησιμοποιώντας την παρούσα θέση, το παρόν σημείο κατεύθυνσης, και ένα σημείο ελέγχου που προβάλλεται πίσω στη διεύθυνση που ενώνει παρόν και επόμενο σημείο κατεύθυνσης. Το άτομο επιχειρεί να κινηθεί πάνω στην εφαιπτομένη της παρούσας καμπύλης αναζήτησής του. Αυτή η κίνηση εξαρτάται εν πολλοίς από τη ρύθμιση (SFPE ή Steering).

5.2.2. Κίνηση Χρηστών σε Steering Mode

Το πρόγραμμα Pathfinder χρησιμοποιεί ένα συνδυασμό του σχεδιασμού διαδρομής, των μηχανισμών του steering mode και της διαχείρισης της σύγκρουσης για τον έλεγχο της κίνησης των χρηστών. Κάθε χρήστης του Pathfinder διατηρεί μία διαδρομή που συνδέει την τρέχουσα θέση του σε ένα σημείο (ή δωμάτιο) με τον τελικό του προορισμό. Αυτός ο μηχανισμός (Pathfinder Technical Reference 2013) ελέγχει τη διαδρομή που επιλέγει ο χρήστης κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Άλλοι παράγοντες, όπως είναι οι συγκρούσεις με τους άλλους χρήστες, μπορεί να προκαλέσουν την παρέκκλιση του επιβάτη από την προβλεπόμενη διαδρομή του, αλλά η κίνηση του τελικά θα είναι παρόμοια με την αρχική επιλογή του. Εάν η απόσταση μεταξύ του επιβάτη και του πλησιέστερου σημείου εξόδου υπερβαίνει ένα κατώτατο όριο, τότε η διαδρομή επανασχεδιάζεται ώστε να περιλαμβάνει τη νέα κατάσταση.

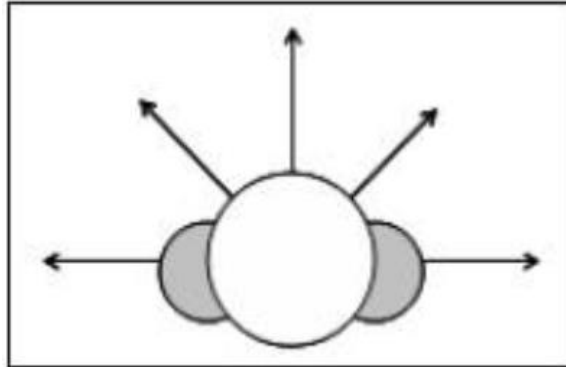
Μέγιστη ταχύτητα και επιτάχυνση

Καθώς οι χρήστες κινούνται κατά μήκος της διαδρομής τους μέσα από ένα πλέγμα, υπολογίζεται η μέγιστη ταχύτητα τους. Αυτή η τιμή βασίζεται στις τρέχουσες συνθήκες του αναγλύφου και στη μέγιστη καθορισμένη ταχύτητα (V_{max}). Η μέγιστη διαθέσιμη ταχύτητα χρησιμοποιείται στη συνέχεια στους υπολογισμούς του steering mode. Η μέγιστη ταχύτητα υπολογίζεται με τον ίδιο τρόπο όπως και τον υπολογισμό της ταχύτητας σε λειτουργία SFPE, με διαφορά ότι η πυκνότητα των επιβατών έχει οριστεί σε 0.

Η μέγιστη επιτάχυνση (και επιβράδυνση) είναι μια σταθερή λειτουργία της μέγιστης ταχύτητας (Pathfinder Technical Reference 2013):

$$a_{\max} = \frac{v_{\max}}{t_{\text{accel}}}$$

Η εξίσωση αυτή ορίζει ότι οι χρήστες μπορούν να κινηθούν από τη μέγιστη ταχύτητα τους έως και να παραμένουν ακίνητοι. Ομοίως, μπορούν να σταματήσουν από τη μέγιστη ταχύτητα τους σε 0.5s. Το steering mode καθοδηγεί τους χρήστες κατά μήκος μίας προγραμματισμένης πορείας και τους επιτρέπει να ανταποκριθούν σε ένα μεταβαλλόμενο περιβάλλον. Σε κάθε βήμα, ο επιβάτης στρέφεται στο πιο κοντινό σημείο προς την έξοδο. Το Pathfinder χρησιμοποιεί ένα σύνολο από πέντε πιθανές διευθύνσεις κίνησης του χρήστη για τον υπολογισμό αυτών των σημείων. Αυτές οι πέντε πιθανές διευθύνσεις παρουσιάζονται στην εικόνα 5.13.



Εικόνα 5.13:: Πέντε διευθύνσεις κίνησης (Pathfinder Technical Reference, 2013)

Το πρόγραμμα Pathfinder χρησιμοποιεί σήμερα τρεις συμπεριφορές του συστήματος διεύθυνσης (Pathfinder Technical Reference 2013):

- Αναζήτηση
- αποφυγή τοίχων
- αποφυγή άλλων χρηστών

Κάθε συμπεριφορά παίρνει μία τιμή οποία κυμαίνεται μεταξύ 0 και 1 για κάθε προβλεπόμενο σημείο. Το τελικό αποτέλεσμα για ένα σημείο είναι το σταθμισμένο άθροισμα αυτών των τριών τιμών.

Αναζήτηση

Η συμπεριφορά αναζήτησης περιστρέφει τον χρήστη ώστε να κινηθεί κατά μήκος τρέχουσας διαδρομής.

Αποφυγή τοίχων

Η συμπεριφορά της αποφυγής τοίχων ανιχνεύει τοίχους και καθοδηγεί τον χρήστη να αποφύγει τη σύγκρουση με αυτούς. Η συμπεριφορά αυτή προβλέπει μια κινούμενη σφαίρα μπροστά από τον χρήστη προς την κατεύθυνση του προβλεπόμενου σημείου. Το αποτέλεσμα αυτής της συμπεριφοράς βασίζεται στην απόσταση όπου ο χρήστης μπορεί να κινηθεί προς την κατεύθυνση του προβλεπόμενου σημείου παραμένοντας σε κάποια απόσταση άνεσης μακριά από τοίχους.

Αποφυγή άλλων χρηστών

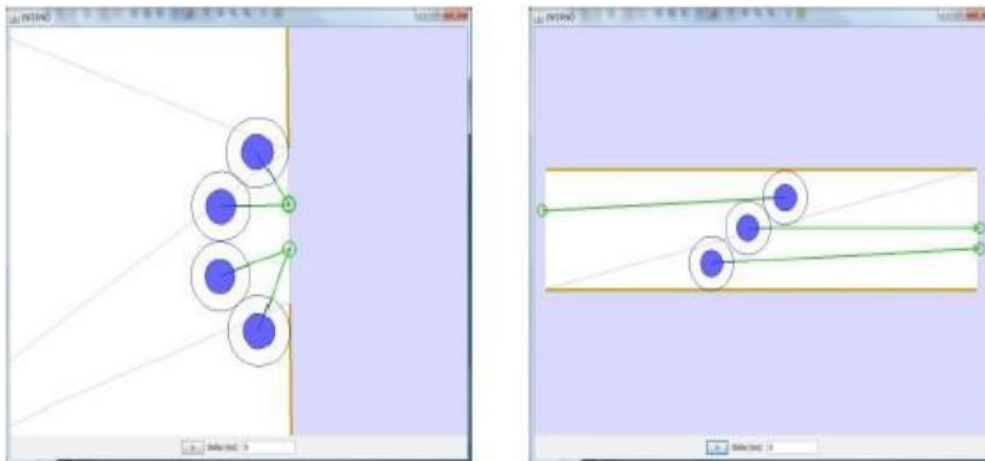
Η συμπεριφορά αποφυγής άλλων χρηστών βασίζεται στη διατήρηση μιας «ζώνης άνεσης» μεταξύ των χρηστών. Αυτή η συμπεριφορά δημιουργεί αρχικά μια λίστα χρηστών των οποίων ελέγχεται η ταχύτητα. Στη συνέχεια, η συμπεριφορά προβάλλει μια κινούμενη σφαίρα μπροστά από τον χρήστη προς την κατεύθυνση του προβλεπόμενου χρήστη. Εάν καμία από τις σφαίρες δε συγκρούεται με την άλλη τότε το αποτέλεσμα είναι μηδέν, διαφορετικά το αποτέλεσμα βασίζεται στον βαθμό που ο κάτοχος δύναται να κυκλοφορήσει πριν από τη σύγκρουση. Όσο πιο κοντά βρίσκεται στο σημείο της σύγκρουσης, τόσο υψηλότερο είναι η τελική τιμή του steering.

Αποφυγή Συγκρούσεων / Αντίδραση

Συχνά το πρόγραμμα δεν επιτυγχάνει την αποφυγή τοίχων ή άλλων χρηστών. Αυτό συμβαίνει συχνά σε πολυσύχναστους χώρους, όταν οι ένοικοι δεν μπορούν να αποφύγουν να πιεστούν έντονα σε τοίχους ή άλλες αιτίες. Σε αυτές τις περιπτώσεις, πρόσθετες οδηγίες χειρισμού σύγκρουσης είναι αναγκαίες ώστε να αποφευχθεί η εξομοίωση από την είσοδο μιας μη έγκυρης κατάστασης. Υπάρχουν δύο σενάρια χειρισμού σύγκρουσης: ένα στο οποίο δύο ή περισσότεροι χρήστες συγκρούονται και ένα άλλο όπου οι χρήστες συγκρούονται με ένα όριο κίνησης τους (π.χ. ένας τοίχος). Αν ο χειρισμός σύγκρουσης είναι ενεργοποιημένος, τότε ο χρήστης θα σταματήσει ένα βήμα πριν από τη σύγκρουση του με τον τοίχο. Αν ο χειρισμός σύγκρουσης είναι απενεργοποιημένος, τότε ο χρήστης θα σταματήσει μόνο με την πρώτη σύγκρουση του με έναν τοίχο.

Επίλυση πιθανών συγκρούσεων

Υπάρχουν κάποια σενάρια όπου, αν δεν ληφθούν προφυλάξεις, είναι πολύ πιθανό να προκληθεί μία σύγκρουση. Αυτές οι καταστάσεις μπορεί να προκύψουν κατά αν οι επιβάτες βρεθούν σε αδιέξοδο (κανείς δεν θα κινηθεί). Ένα παράδειγμα είναι όταν οι επιβάτες κινούνται προς μια κοινή κατεύθυνση, αλλά λόγω των περιορισμών στη γεωμετρία πλοήγησης (όπως μια στενή πόρτα ή ένας στενός διάδρομος), όλοι επιλέγουν να στέκονται ακίνητοι, ώστε να μην συγκρούονται με άλλους επιβάτες. Ένα άλλο σενάριο είναι η κίνηση επιβατών αντίθετης κατεύθυνσης σε ένα γεμάτο διάδρομο. Αυτά τα παραδείγματα παρουσιάζονται στην εικόνα 5.14.



a. Occupants are headed toward a similar, conflicting waypoint.

b. Occupants are headed toward opposing waypoints in a crowded hall.

Εικόνα 5.14: Οι χρήστες κινούνται όλοι μαζί προς μία στενή έξοδο (αριστερά), οι επιβάτες κινούνται αντίθετα σε ένα γεμάτο διάδρομο (δεξιά) (Pathfinder Technical Reference, 2013)

5.2.3. Κίνηση με την Επιλογή SFPE

Το Pathfinder δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού της κίνησης χρησιμοποιώντας τη ρύθμιση SFPE. Αυτή η επιλογή εφαρμόζει τη λογική ροή εξόδου βάσει τεχνικών προσομοίωσης. Ο υπολογισμός SFPE είναι ένα μοντέλο ροής, όπου καθορίζονται οι ταχύτητες βηματισμού και οι ροές μέσω ανοιγμάτων και διαδρόμων. Στο Pathfinder, η γεωμετρία πλοήγησης μπορεί να ομαδοποιηθεί σε τρεις τύπους αντικειμένων: πόρτες, δωμάτια και σκάλες. Τα δωμάτια αποτελούν ανοιχτούς χώρους, στους οποίους τα άτομα μπορούν να περπατήσουν. Οι σκάλες μπορούν να θεωρηθούν σαν ειδικού τύπου δωμάτια, στα οποία η κλίση των κλιμάκων περιορίζει την ταχύτητα των ατόμων. Οι πόρτες λειτουργούν με τέτοιο τρόπο ώστε να περιορίζουν την ροή ενώ ενώνουν δωμάτια και σκάλες. Δεν υπάρχει συγκεκριμένος τύπος διαδρόμου όπως στο SFPE Guide. Αντί για αυτό, οι διάδρομοι μοντελοποιούνται σαν δωμάτια με πόρτες στα δύο τους άκρα. Έτσι οι διάδρομοι

θεωρούνται σαν δωμάτια, των οποίων η ροή ελέγχεται από τις πόρτες. Με τη ρύθμιση SFPE πολλοί χρήστες μπορούν να καταλαμβάνουν τον ίδιο χώρο.

Αποφυγή Συγκρούσεων / Αντίδραση

Στην επιλογή SFPE, τα άτομα δεν συγκρούονται με άλλα άτομα αλλά μπορούν να συγκρουστούν με τοίχους. Η διαχείριση της σύγκρουσης μπορεί να γίνει σε δύο βήματα. Το πρώτο βήμα λαμβάνει χώρα πριν επιχειρηθεί η κίνηση, και το δεύτερο κατά τη διάρκεια της κίνησης. Για το βήμα πριν την κίνηση, η ταχύτητα κίνησης ρυθμίζεται έτσι ώστε να αναγκάσει το άτομο να ελιχθεί ανάμεσα στα εμπόδια. Αν το εμπόδιο είναι ένας τοίχος, η νέα ταχύτητα θα κάνει το άτομο να ελιχθεί ανάμεσα στα εμπόδια. Αφού η ταχύτητα ρυθμιστεί ώστε να επιτευχθεί ο ζητούμενος ελιγμός, το άτομο θα επιχειρήσει να κινηθεί με τη νέα αυτή ταχύτητα. Κατά το στάδιο της κίνησης, οι συγκρούσεις με τον τοίχο παραμένουν πιθανές, οπότε το άτομο θα σταματήσει στην πρώτη σύγκρουση.

5.2.4. Διαδικασία Επίλυσης

Το Pathfinder τρέχει μια επανάληψη προσομοιώσεων που υπολογίζει την κίνηση σε διακριτά χρονικά βήματα. Σε κάθε χρονικό βήμα, ακολουθούνται τα εξής βήματα (Pathfinder Technical Reference 2013):

- Επαναπροσδιορισμός του προορισμού για κάθε άτομο. Το βήμα αυτό χρειάζεται τον περισσότερο χρόνο στο πρώτο χρονικό βήμα, καθώς κάθε άτομο πρέπει να βρει ένα μονοπάτι για τον προορισμό του.
- Υπολογισμός της ταχύτητας ελιγμού κάθε ατόμου. Αυτή υπολογίζεται διαφορετικά ανάλογα με το ποιό ρύθμιση (Steering ή SFPE) είναι ενεργοποιημένη.
- Αύξηση του βήματος χρόνου κατά μία μονάδα.
- Κίνηση κάθε ατόμου, η οποία περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια:
 - ✓ Υπολογισμός της ταχύτητας για τον παρόντα χρόνο. Αν είναι επιλεγμένη η ρύθμιση Steering, θα υπολογιστεί μια επιθυμητή δύναμη ελιγμών από την επιθυμητή ταχύτητα, και μετά θα υπολογιστεί με ολοκλήρωση η πραγματική ταχύτητα. Αν είναι επιλεγμένη η ρύθμιση SFPE, θα ρυθμιστεί αυτόματα στην επιθυμητή ταχύτητα.
 - ✓ Αν είναι ενεργοποιημένη η αποφυγή συγκρούσεων, θα ανιχνευτούν οι πιθανές συγκρούσεις, και θα τροποποιηθεί η επιθυμητή ταχύτητα ώστε αυτές να αποφευχθούν.
 - ✓ Ολοκλήρωση της τελικής ταχύτητας ώστε να υπολογιστεί η μέγιστη απόσταση, και κίνηση μέσω του καννάβου μέχρι την απόσταση αυτή ή μέχρι το πρώτο εμπόδιο που θα συναντηθεί.
 - ✓ Ενημέρωση των αρχείων εξόδου

5.2.5. Θεωρητικός Πληθυσμός

Σύμφωνα με την νομοθεσία, Ελληνική (Κανονισμός Πυροπροστασίας Κτιρίων Π.Δ. 71/88) και Ξένη (NFPA 101 - Life Safety Code Handbook) ο θεωρητικός πληθυσμός εξαρτάται από την χρήση του χώρου. Λέγοντας θεωρητικό πληθυσμό εννοούμε το μέγιστο πιθανό αριθμό χρηστών που θα κινηθεί για να διαφύγει από ένα χώρο σε περίπτωση που χρειαστεί να εγκαταλείψει τον χώρο. Ο αριθμός αυτός μπορεί μερικές φορές να είναι προκαθορισμένος (π.χ. κινηματογράφοι, θέατρα, στάδια, κλπ.). Στις πιο πολλές περιπτώσεις όμως είναι αόριστος. Γι' αυτό οι Κανονισμοί δίνουν συντελεστές πυκνότητας για τις διάφορες κατηγορίες κτιρίων, ώστε να υπολογίζεται ο πιθανός (αναμενόμενος) αριθμός ατόμων για ένα χώρο, ανάλογα με το εμβαδόν της συνολικής του επιφάνειας. Στη συγκεκριμένη όμως εργασία ο πληθυσμός της αποβάθρας θα υπολογιστεί με βάση τα 15 λεπτά χρονικά διαστήματα κατά τη διάρκεια της ώρας αιχμής του σταθμού. Τα στοιχεία για

το πληθυσμό της ώρας αιχμής είναι από της πρόβλεψης που έχουν γίνει από την κατασκευάστρια εταιρία.

Ταχύτητα Κίνησης

Σύμφωνα με την βιβλιογραφική έρευνα (SFPE 2002) σε περιπτώσεις όπου η πυκνότητα των χρηστών είναι μικρότερη από 0.5 άτομα/m² μία μέση ταχύτητα για να κινηθούν ανεμπόδιστα τα άτομα είναι 1.25 m/s, ενώ σε περιπτώσεις μεγαλύτερης πυκνότητας η ταχύτητα μειώνεται καθώς τα άτομα δεν μπορούν να κινηθούν με άνεση.

Ενδεικτικά μπορούμε να αναφέρουμε ότι για πυκνότητα χρηστών της τάξης των 3 - 4 άτομα/m² η ταχύτητα κυμαίνεται σε αρκετά χαμηλά επίπεδα κάτι που χαρακτηρίζει την κατάσταση στάσιμη. Όταν ο χρήστης πρέπει να κινηθεί διαμέσου καπνού έχει παρατηρηθεί ότι η ταχύτητα με την οποία κινείται κυμαίνεται από 0.2 έως 0.4 m/s. Στα παραπάνω πρέπει να προστεθεί και η περίπτωση ο χρήστης να μην μπορεί να κινηθεί γρήγορα λόγω κάποιου κινητικού προβλήματος.

Η ταχύτητα κίνησης των χρηστών στην περίπτωση αυτή μπορεί να εκτιμηθεί σύμφωνα με τους πίνακες 5.2 και 5.3. Στη παρούσα εργασία επιλέχθηκε η ανεμπόδιστη ταχύτητα κίνησης των χρηστών να είναι 1,19 m/sec και στη περίπτωση που οι χρήστες κινούνται σε χώρο με καπνό να μειώνεται σύμφωνα με το διάγραμμα 4.6.

Πίνακας 5.2: Ταχύτητα κίνησης σε οριζόντια επιφάνεια (SFPE)

Subject Group (number)	Mean (m/s)	Standard Deviation (m/s)	Range (m/s)	Interquartile Range (m/s)
All disabled (n = 107)	1.00	0.42	0.10–1.77	0.71–1.28
With locomotion disability (n = 101)	0.80	0.37	0.10–1.68	0.57–1.02
no aid (n = 52)	0.95	0.32	0.24–1.68	0.70–1.02
crutches (n = 6)	0.94	0.30	0.63–1.35	0.67–1.24
walking stick (n = 33)	0.81	0.38	0.26–1.60	0.49–1.08
walking frame or rollator (n = 10)	0.57	0.29	0.10–1.02	0.34–0.83
Without locomotion disability (n = 6)	1.25	0.32	0.82–1.77	1.05–1.34
Electric wheelchair (n = 2)	0.89	—	0.85–0.93	—
Manual wheelchair (n = 12)	0.69	0.35	0.13–1.35	0.38–0.94
Assisted manual wheelchair (n = 16)	1.30	0.34	0.84–1.98	1.02–1.59
Assisted ambulant (n = 18)	0.78	0.34	0.21–1.40	0.58–0.92

Πίνακας 5.3: Ταχύτητα κίνησης σε σκάλες (SFPE)

Subject Group (number)	Mean (m/s)	Standard Deviation (m/s)	Range (m/s)	Interquartile Range (m/s)
Ascent				
With locomotion disability				
(n = 30)	0.38	0.14	0.13–0.62	0.26–0.52
no aid				
(n = 19)	0.43	0.13	0.14–0.62	0.35–0.55
crutches				
(n = 1)	0.22	—	0.13–0.31	0.26–0.45
walking stick				
(n = 9)	0.35	0.11	0.18–0.49	—
rollator				
(n = 1)	0.14	—	—	—
Without disability				
(n = 8)	0.70	0.24	0.55–0.82	0.55–0.78
Descent				
With locomotion disability				
(n = 30)	0.33	0.16	0.11–0.70	0.22–0.45
No aid				
(n = 19)	0.36	0.14	0.13–0.70	0.20–0.47
Crutches				
(n = 1)	0.22	—	—	—
Walking stick				
(n = 9)	0.32	0.12	0.11–0.49	0.24–0.46
Rollator				
(n = 1)	0.16	—	—	—
Without disability				
(n = 8)	0.70	0.26	0.45–1.10	0.53–0.90

6. Μετρό Θεσσαλονίκης

6.1. Παρουσίαση του Έργου

Το βασικό έργο του ΜΕΤΡΟ της Θεσσαλονίκης (<http://www.ametro.gr>) περιλαμβάνει την κύρια γραμμή αυτού με μήκος 9.6km και αποτελείται από δύο σήραγγες μονής τροχιάς, οι οποίες διέρχονται κυρίως κάτω από βασικούς οδικούς άξονες και κεντρικά σημεία της πόλης, και από 13 σταθμούς. Το έργο περιλαμβάνει επίσης ένα αμαξοστάσιο έκτασης 50.000m² το οποίο εντοπίζεται στην περιοχή της Πυλαίας για την αποθήκευση του αναγκαίου ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, για τη συντήρηση και επισκευή των συρμών και του τροχαίου υλικού. Επιπλέον, στο αμαξοστάσιο είναι εγκατεστημένο το Κέντρο Ελέγχου Λειτουργίας, καθώς και το Κέντρο Διοίκησης του ΜΕΤΡΟ Θεσσαλονίκης.

Η Γραμμή ξεκινά από τη βορειοδυτική πλευρά της πόλης με το Σταθμό «Νέος Σιδηροδρομικός Σταθμός», ο οποίος βρίσκεται μπροστά από το Σταθμό του ΟΣΕ, και συνεχίζει προς τη νοτιοανατολική πλευρά της πόλης έως το τερματικό Σταθμό «Νέα Ελβετία». Η γραμμή ακολουθεί κυρίως τις οδούς Μοναστηρίου, Εγνατίας, Ν. Εγνατίας, Δελφών και Σόλωνος. Στην εικόνα παρουσιάζεται το γενικό σχέδιο της διάταξης της γραμμής καθώς και οι μελλοντικές επεκτάσεις του έργου.



Εικόνα 6.1: Σχηματική απεικόνιση του ΜΕΤΡΟ Θεσσαλονίκης (Βαζαίος, 2013)

6.2. Ιστορική αναδρομή

Η πρωτοβουλία για την κατασκευή (http://el.wikipedia.org/wiki/Μετρό_Θεσσαλονίκης) του μετρό Θεσσαλονίκης ανήκει στον Κωνσταντίνο Πυλαρινό, που ως νομάρχης είχε καταφέρει να περιληφθεί στον προϋπολογισμό του 1976 «κωδικός» που ανέφερε: Μετρό Θεσσαλονίκης. Ωστόσο, η κατασκευή του μετρό Θεσσαλονίκης ξεκίνησε την τριετία 1986-1989, όπου το σχέδιο περιλάμβανε την χάραξη του υπόγειου σιδηροδρόμου κάτω από το οδόστρωμα της οδού Εγνατίας, αρχικά στο τμήμα μεταξύ της οδού Καυταντζόγλου και της Πλατείας Δημοκρατίας. Η κατασκευή έγινε δια της μεθόδου της εκσκαφής του εδάφους και της κατασκευής σήραγγας με τοποθέτηση μεταλλικών δοκών και οπλισμένου σκυροδέματος. Προχώρησε με αργούς ρυθμούς για περίπου δύο χρόνια, λόγω της δυσκολίας χρηματοδότησής της. Η κατασκευή αυτή κρίθηκε άσκοπη από το νέο σχεδιασμό του υπόγειου έργου, ενώ ο ίδιος ο φορέας υλοποίησης του έργου, Δήμος Θεσσαλονίκης, χαρακτηρίζει τη συγκεκριμένη περίοδο απλώς «σχεδιασμό του μετρό». Παράλληλα, λόγω της ύπαρξης της σήραγγας αυξήθηκε η στάθμη των υδάτων στα θεμέλια της Πολυτεχνικής Σχολής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, στα οποία εντοπίστηκε σκουριά. Από τότε ως σήμερα λειτουργούν καθημερινά αντλίες που απομακρύνουν τα νερά.

Το έργο άρχισε να δημοπρατείται εκ νέου το 1992, ενώ ακολούθησε μια σειρά άγονων χωρίς αποτέλεσμα μειοδοσιών. Μετά την αποτυχημένη απόπειρα κατασκευής του ΜΕΤΡΟ Θεσσαλονίκης με τη μέθοδο της παραχώρησης (1998-2003), τον Σεπτέμβριο του 2003 αποφασίστηκε η κατασκευή του ως δημόσιο έργο με από κοινού χρηματοδότηση του Ελληνικού Δημοσίου και της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Με βάση τη διακήρυξη του νέου διαγωνισμού, τον Ιούνιο του 2004 υπέβαλαν εκδήλωση ενδιαφέροντος πέντε κοινοπραξίες απαρτιζόμενες από σημαντικές ελληνικές και ξένες εταιρείες που δραστηριοποιούνται στο συγκεκριμένο τομέα. Το πρώτο στάδιο του διαγωνισμού ολοκληρώθηκε το Νοέμβριο του 2004, όπου τέσσερις από τις πέντε κοινοπραξίες συνέχισαν στο δεύτερο και τον Ιανουάριο του 2005 παρέλαβαν τα τεύχη δημοπράτησης και τη νέα προμελέτη του έργου. Τον Μάιο του 2005 οι προεπιλεγείσες κοινοπραξίες υπέβαλαν την τεχνική και οικονομική τους προσφορά και τον Αύγουστο του ίδιου χρόνου ολοκληρώθηκε η αξιολόγηση των τεχνικών και οικονομικών προσφορών των τριών κοινοπραξιών που έμειναν μέχρι το τελευταίο στάδιο του διαγωνισμού. Η σύμβαση με την ανάδοχο κοινοπραξία ΑΕΓΕΚ IMPREGILO-ANSALDO T.S.F.-SELI-ANSALDOBREDA υπογράφηκε στις 7 Απριλίου 2006 και στα τέλη του Ιουνίου ξεκίνησαν οι προκατασκευαστικές εργασίες για την κατασκευή του έργου. Για τη χρηματοδότηση του έργου έχουν εξασφαλιστεί 550,000,000€ από την Ευρωπαϊκή Τράπεζα Επενδύσεων, ως εγκεκριμένο δάνειο με ευνοϊκούς όρους και 250,000,000€ από το Γ' Κοινοτικό Πλαίσιο Στήριξης. Ο συνολικός προϋπολογισμός του έργου ανέρχεται στα 1,052,000,000€. Επίσης εξασφαλίστηκε χρηματοδότηση ύψους 400,000,000€ από το Δ' Κοινοτικό Πλαίσιο Στήριξης για την επέκταση του βασικού έργου προς Καλαμαριά, μήκους 5km με πέντε σταθμούς.

Τον Ιούνιο του 2013 υπεγράφη η σύμβαση κατασκευής της επέκτασης του Μετρό Θεσσαλονίκης προς την Καλαμαριά με την αναδόχο εταιρεία ΑΚΤΩΡ Α.Τ.Ε., έργο που έχει ενταχθεί στο Ε.Σ.Π.Α.-Επιχειρησιακό Πρόγραμμα «Περιβάλλον και Αειφόρος Ανάπτυξη» και δανειοδοτείται από την ΕΤΕ

με συνολικό προϋπολογισμό 518 εκ. €. (400 εκ. € αφορούν στην υπογραφείσα σύμβαση), 4.78km, 5 σταθμοί.

6.3. Περιγραφή του Έργου

Η κατασκευή του ΜΕΤΡΟ Θεσσαλονίκης ενσωματώνει τα πλέον σύγχρονα τεχνολογικά δεδομένα και τις πιο απαιτητικές προδιαγραφές ποιότητας και λειτουργικότητας, στοιχεία τα οποία το καθιστούν ως ένα από τα πιο σύγχρονα υπόγεια έργα στην Ευρώπη. Η βασική γραμμή (<http://www.ametro.gr/page/>) θα αποτελείται, όπως προαναφέρθηκε, από δύο σήραγγες μονής τροχιάς μήκους 9.6km με 13 σταθμούς κατά μήκος του άξονα της, οι οποίοι είναι οι εξής:

- ✓ Νέος Σιδηροδρομικός Σταθμός
- ✓ Πλατεία Δημοκρατίας
- ✓ Βενιζέλου
- ✓ Αγία Σοφία
- ✓ Σιντριβάνι
- ✓ Πανεπιστήμιο
- ✓ Παπάφη
- ✓ Ευκλείδη
- ✓ Φλέμινγκ
- ✓ Αναλήψεως
- ✓ Πατρικίου
- ✓ Βούλγαρη
- ✓ Νέα Ελβετία

Η επέκταση θα αποτελεί διακλάδωση της βασικής γραμμής από το σταθμό 25ης Μαρτίου προς τα νοτιοανατολικά της πόλης, ακολουθώντας την οδό Πόντου. Θα ξεκινάει από τον Νέο Σιδηροδρομικό Σταθμό και μέχρι την 25ης Μαρτίου, θα διανύει κοινό τμήμα με την βασική γραμμή 1, ενώ από εκεί και πέρα θα ακολουθεί πορεία έως την Μίκρα. Θα αποτελείται από 5 σταθμούς (συν 11 κοινούς με την βασική γραμμή, σύνολο 16 σταθμούς), ενώ στον τελευταίο σταθμό της επέκτασης, θα κατασκευαστεί επίσταθμος και οι κατάλληλες υποδομές για την μελλοντική υπέργεια επέκταση προς το Αεροδρόμιο. Ο αρχικός προϋπολογισμός του έργου είναι 518 εκατ. ευρώ. Η περίοδος κατασκευής του έργου, έπειτα από την ανακήρυξη του αναδόχου, υπολογίζεται σε 5 χρόνια. Επίσης, αναφέρεται ότι η συχνότητα εξυπηρέτησης των επιβατών κατά την περίοδο αιχμής υπολογίζεται σε 90 δευτερόλεπτα, με ημερήσια εξυπηρέτηση 65.000 επιβατών. Η επέκταση της γραμμής αποτελείται από δύο σήραγγες μονής τροχιάς μήκους 3.8km με 5 σταθμούς κατά μήκος του άξονα της, οι οποίοι είναι οι εξής:

- ✓ Νομαρχία
- ✓ Καλαμαριά
- ✓ Αρετσού
- ✓ Νέα Κρήνη
- ✓ Μίκρα

Στον Πίνακα αποτυπώνεται η εξέλιξη των εργασιών κατασκευής των σταθμών των γραμμών (ποια στάδια έχουν ολοκληρωθεί και ποια βρίσκονται ακόμα σε εξέλιξη).

Πίνακας 6.1:εξέλιξη των εργασιών κατασκευής των σταθμών (wikipedia.org/wiki/Μετρό_Θεσσαλονίκης)

Εργασίες Σταθμοί	Απόσταση από προηγούμεν.[74][75]	Εργοτάξιο	Περίβλημα	Αρχαιολ.[76]	Έργα Πολιτικού Μηχ.	Διαμόρφωση
Βασική γραμμή :						
Νέος Σιδηροδρομικός Σταθμός	-	✓	✓	✓	✓	○
Δημοκρατίας	700 μ.	✓	✓	✓	✓	○
Βενιζέλου	600 μ.	✓	✓	○	○	-
Αγία Σοφία	550 μ.	✓	✓	○	○	-
Συντριβάνι - Εκθεση	750 μ.	✓	✓	✓	✓	○
Πανεπιστήμιο	780 μ.	✓	✓	✓	✓	○
Παπάφη	625 μ.	✓	✓	✓	✓	○
Ευκλείδη	540 μ.	✓	✓	✓	✓	○
Φλέμινγκ	560 μ.	✓	✓	✓	✓	○
Αναλήψεως	675 μ.	✓	✓	✓	✓	○
25ης Μαρτίου	740 μ.	✓	✓	✓	✓	○
Βούλγαρη	525 μ.	✓	✓	✓	✓	○
Νέα Ελβετία	945 μ.	✓	✓	✓	✓	○
Επέκταση Καλαμαριάς :						
Νομαρχία	1.000 μ.	✓	✓	✓	✓	○
Καλαμαριά	950 μ.	✓	✓	✓	✓	○
Αρετσού	750 μ.	✓	✓	○	✓	○
Νέα Κρήνη	800 μ.	✓	✓	✓	✓	○
Μίκρα	600 μ.	✓	✓	✓	✓	○

• Παρατηρήσεις:

✓ Ολοκληρώθηκε

○ Σε εξέλιξη

- Δεν έχει ξεκινήσει ακόμη

Μετά την ολοκλήρωση του έργου θα τεθούν σε λειτουργία 18 υπέρ-αυτόματοι συρμοί, πλήρως κλιματιζόμενοι, οι οποίοι θα κινούνται δίχως τη παρουσία οδηγού αλλά με συνοδό. Επίσης θα είναι εγκατεστημένα συστήματα αυτόματων θυρών επί των αποβάθρων κάθε σταθμού, στοιχείο που αποτελεί τεχνολογική καινοτομία στα σύγχρονα πλέον έργα ΜΕΤΡΟ, καθώς οι θύρες ανοίγουν αυτόματα με την έλευση του συρμού επιτρέποντας την καλύτερη εξυπηρέτηση και ασφάλεια του επιβατικού κοινού με την αυτοματοποίηση του συστήματος. Πέρα από το βασικό έργο, από την ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ έχει επίσης προβλεφθεί η ανάπτυξη υπόγειων χώρων στάθμευσης για την εξυπηρέτηση των επιβατών συνολικής χωρητικότητας 3,700 θέσεων, οι οποίες κατανέμονται όπως παρουσιάζεται στον πίνακα 6.2.

Πίνακας 6.2:Προβλεπόμενες θέσεις στάθμευσης και η κατανομή τους ανά περιοχή (wikipedia.org/wiki/Μετρό Θεσσαλονίκης)

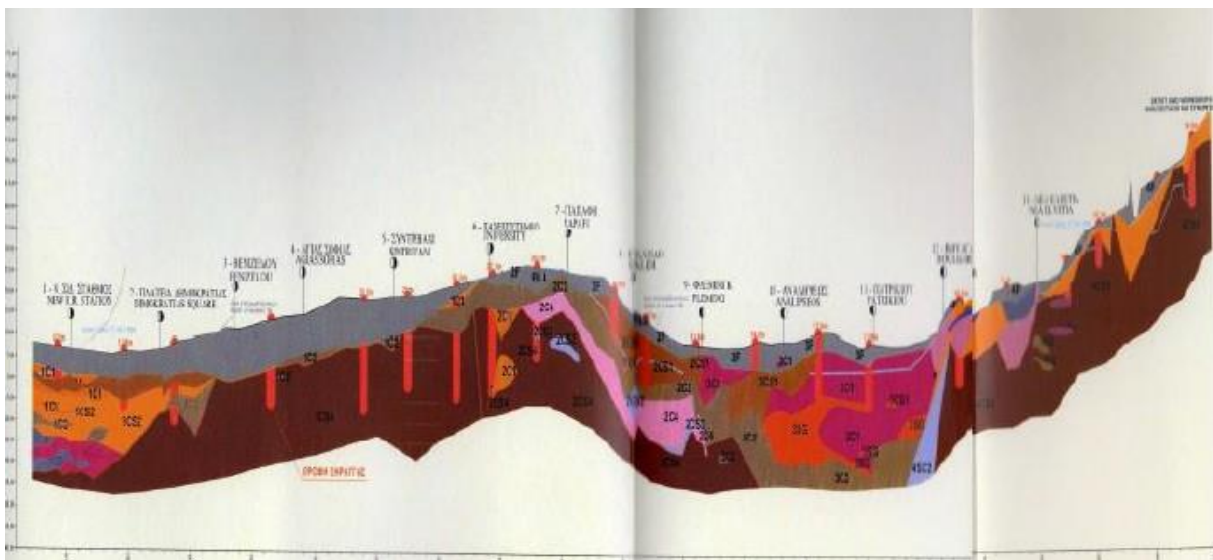
ΣΤΑΘΜΟΣ	ΘΕΣΕΙΣ	ΕΠΙΠΕΔΑ
Ν. Σιδηροδρομικός Σταθμός 1	450	-4 υπόγειο
Νέος Σιδ. Σταθμός 2	600	-4 υπόγειο
Νέα Ελβετία	650	-1, ισόγειο, +2
Πανεπιστήμιο 1	1000	-4 υπόγειο
Πανεπιστήμιο 2	1000	-4 υπόγειο
Σύνολο	3700	

6.4. Η Γεωλογία του Έργου και οι Μέθοδοι Κατασκευής

Η γεωλογία του πολεοδομικού συγκροτήματος της Θεσσαλονίκης χαρακτηρίζεται από την παρουσία νεογενών και τεταρτογενών αποθέσεων. Το αλπικό υπόβαθρο της ευρύτερης περιοχής συνθέτεται κυρίως από γνεύσιους (Μεσοζωικός σχηματισμός της σειράς του Βερτίσκου), οι οποίοι εμφανίζονται Βόρεια-Βορειοανατολικά της πόλης και επικαλύπτονται από ανωμειοκαινικά-πλειοκαινικά ιζήματα (Βαζαίος 2013).

Παρόλα αυτά, οι βραχώδεις σχηματισμοί βυθίζονται αρκετά κάτω από το επίπεδο των σηράγγων πιθανότατα λόγω της εμφάνισης κανονικών ρηγμάτων κάθετα στο βορειότερο τμήμα της πόλης. Συνεπώς, ο κύριος σχηματισμός της περιοχής του έργου είναι μία σειρά πολύ στιφρών έως σκληρών ερυθρών αργίλων ανωμειοκαινικής-πλειοκαινικής ηλικίας. Σχηματισμοί του Τεταρτογενούς που έχουν αποθεθεί πάνω σε αυτές τις αργίλους συνίστανται από αργιλώδεις έως ιλυώδεις άμμους ή/και χάλικες. Ωστόσο, λόγω της μακράς ιστορίας της πόλης, ένα στρώμα αρχαιολογικών ευρημάτων σημαντικού πάχους έχει κατατεθεί πάνω από αυτούς τους σχηματισμούς, το οποίο συναντάται κυρίως στο κέντρο της πόλης. Στη γεωλογική τομή που παρουσιάζεται στην εικόνα παρατηρείται ότι κατά μήκος του άξονα της σήραγγας της βασικής γραμμής απαντώνται αποκλειστικά οι εν λόγω εδαφικοί σχηματισμοί με τα γεωυλικά να συνθέτονται από εδαφικά υλικά αργίλου (C), αμμώδους αργίλου (CS), αμμώδους (S) και αμμοχαλικώδους (SG) φύσης.

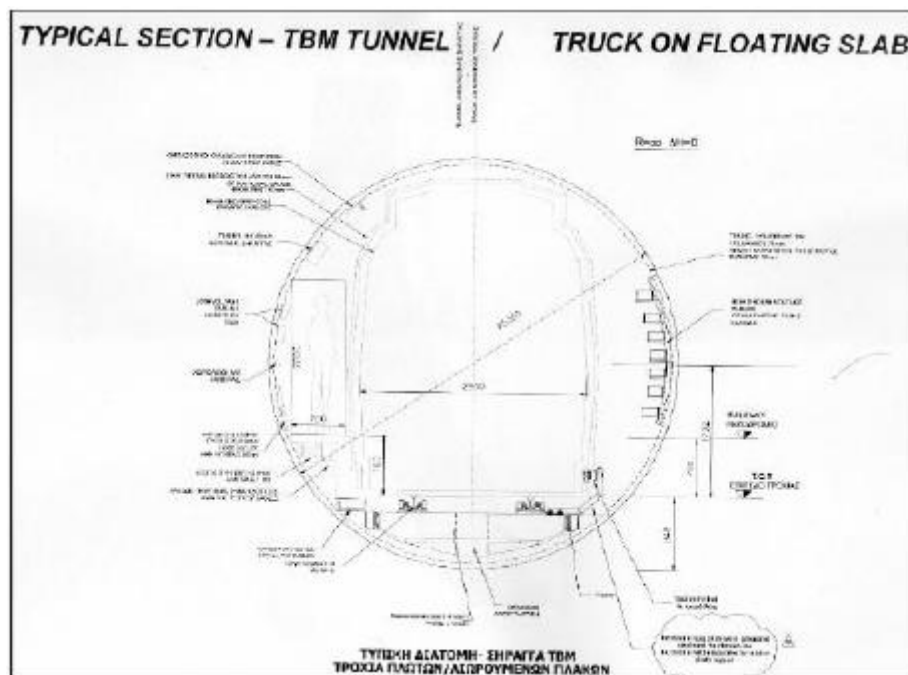
Τα υπόγεια νερά στην ευρύτερη περιοχή προέρχονται κυρίως από την υδρολογική λεκάνη, η οποία καθορίζεται από τον υδροκρίτη των κορυφών των τριγύρω λόφων που αποτελούν τα βόρεια-βορειοανατολικά όρια για τη λεκάνη αποστράγγισης. Η γενική υδρογεωλογική συμπεριφορά των Νεογενών και Τεταρτογενών Αποθέσεων, τα οποία βρίσκονται στην ευρύτερη περιοχή του έργου, καθορίζεται από τη φύση, τη θέση και το πάχος των διαφόρων λιθολογικών τύπων από τους οποίους αποτελούνται.



Εικόνα 6.2:Γεωλογική τομή κατά μήκος του βασικού έργου του ΜΕΤΡΟ Θεσσαλονίκης (Βαζαίος, 2013)

Λόγω του αξιόλογου μήκους διάνοιξης για την όρυξη των σηράγγων επιλέχθηκε η εφαρμογή μηχανοποιημένης μεθόδου εκσκαφής. Από την αξιολόγηση των γεωτεχνικών και τεχνικογεωλογικών συνθηκών κατά μήκος της χάραξης καταλληλότερη κρίθηκε η επιλογή μηχανήματος τύπου εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης EPB, καθώς η διάνοιξη αναμενόταν να πραγματοποιηθεί μέσα σε εδαφικούς σχηματισμούς, κυρίως αργιλικής φύσεως. Για τη διάνοιξη των σηράγγων μονής τροχιάς αποκτήθηκαν δύο μηχανήματα ολομέτωπης κοπής εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης EPB, τα οποία κατασκευάστηκαν από την εταιρεία Herrenknecht ενώ η εταιρεία SELI είναι υπεύθυνη για την παροχή του συστήματος υποστήριξης των δύο TBM (<http://www.ametro.gr/page/>).

Κάθε κυκλική διατομή ολοκληρώνεται μετά την εκσκαφή διαμέτρου 6.12m με την τοποθέτηση της τελικής επένδυσης από προκατασκευασμένα τμήματα σκυροδέματος πάχους 30cm. Η εσωτερική διάμετρος της διατομής διαμορφώνεται στα 5.30m τελικώς όπως παρουσιάζεται στην εικόνα.



Εικόνα 6.3: Σχηματική απεικόνιση της καθαρής διατομής σήραγγας μονής τροχιάς (Βαζαίος, 2013)

Προκειμένου να αποφευχθούν δυνητικοί κίνδυνοι λόγω της αλληλεπίδρασης των δύο εκσκαφών αυτές δεν προχωρούν παράλληλα, αλλά διατηρείται μία απόσταση ασφαλείας μεταξύ των δύο μηχανημάτων, κατά συνέπεια το ένα μέτωπο εκσκαφής πάντα προπορεύεται του άλλου. Επίσης στα τμήματα όπου οι δύο άξονες πλησιάζουν ο ένας τον άλλο, κυρίως πριν από τους σταθμούς, εφαρμόζονται μέθοδοι βελτίωσης του εδάφους εκ της εδαφικής επιφάνειας (jet grouting) ώστε να αποφευχθούν κίνδυνοι αστάθειας της εκσκαφής. Σημειώνεται επίσης ότι όπου απαιτούνταν ιδιαίτεροι χειρισμοί ώστε να μην υπάρξουν προβλήματα η κατασκευή των σηράγγων πραγματοποιήθηκε εφαρμόζοντας τη μέθοδο εκσκαφής και επανεπίκωσης (cut and cover method) και συμβατικές μεθόδους εκσκαφής (Βαζαίος 2013). Τέτοια απαίτηση υπήρξε στο τμήμα από το Σταθμό Νέα Ελβετία έως το αμαξοστάσιο στην περιοχή της Πυλαίας και από το Νέο Σιδηροδρομικό Σταθμό έως το φρέαρ εκκίνησης του TBM, όπου η μέθοδος που εφαρμόστηκε ήταν αυτή της

εκσκαφής και επανεπίχωσης, και στο τμήμα κάτω από την οδό της Νέας Εγνατίας, όπου για την κατασκευή υπόγειας διασταύρωσης εφαρμόστηκε συμβατική μέθοδος διάνοιξης.

Για την κατασκευή των σταθμών προκειμένου να περιοριστεί η διαταραχή του περιβάλλοντος εδάφους επιλέχθηκε η μέθοδος επίχωσης και εκσκαφής (cover and cut ή top-down) με την κατασκευή διαφραγματικών τοίχων, έναντι της δημιουργίας ανοικτών εκσκαφών (<http://www.ametro.gr/page/>). Η σειρά των εργασιών που πραγματοποιούνται για τη δημιουργία των σταθμών περιλαμβάνει σε πρώτη φάση την κατασκευή των διαφραγματικών τοίχων από την εδαφική επιφάνεια και περιμετρικά της εκσκαφής που θα ακολουθήσει. Εν συνεχεία, πραγματοποιείται εκσκαφή έως τη στάθμη σκυροδέτησης της πλάκας οροφής στα περιμετρικά διαφράγματα, επανεπίχωση και πλήρης κυκλοφοριακή αποκατάσταση. Ακολουθεί έπειτα τμηματικά η υπόγεια εκσκαφή του σταθμού και η σκυροδέτηση των υπόλοιπων ενδιάμεσων πλακών και της πλάκας θεμελίωσης. Η αποκατάσταση της σύνδεσης με τους διαφραγματικούς τοίχους επιτυγχάνεται μέσω ειδικών διατάξεων οπλισμού. Με την παραπάνω κατασκευαστική μεθοδολογία η αντιστήριξη του σκάμματος εκσκαφής του σταθμού επιτυγχάνεται διαμέσου της πλάκας οροφής και των ενδιάμεσων πλακών, ενώ όπου απαιτείται λόγω των γεωτεχνικών συνθηκών είναι δυνατό να γίνει χρήση μεταλλικών αντηρίδων. Κατά συνέπεια, το μόνιμο φορέα του σταθμού αποτελούν οι διαφραγματικοί τοίχοι, χωρίς εσωτερικό τοιχίο, η πλάκα οροφής, οι ενδιάμεσες πλάκες και η πλάκα θεμελίωσης.

Τέλος, για την παρακολούθηση του έργου κατά τη διάρκεια κατασκευής, λόγω του έντονα αστικού περιβάλλοντος που την επιβάλλει, έχει εγκατασταθεί δίκτυο οργάνων με συνεχή και αυτόματη καταγραφή και ανάλυση των μετρούμενων μεγεθών. Τα όργανα τα οποία έχουν εγκατασταθεί περιλαμβάνουν αυτοματοποιημένους τοπογραφικούς σταθμούς, οι οποίοι μετρούν μετακινήσεις των παρακείμενων κτιρίων, κυψέλες τάσεων για μετρήσεις τάσεων τόσο επί των τελικών επενδύσεων των σηράγγων όσο και στην διεπιφάνεια εδάφους και διαφραγματικών τοίχων, κυψέλες φορτίου σε αγκύρια, κλισιόμετρα και μηκυσιόμετρα για την μέτρηση κατακόρυφων και οριζόντιων μετακινήσεων περίξ των εκσκαφών κ.τ.λ. Τα δεδομένα όλων των οργάνων συγκεντρώνονται αυτόματα σε ένα κεντρικό υπολογιστή για την άμεση πρόσβαση και αξιολόγηση αυτών. Σε περιπτώσεις υπέρβασης των επιτρεπτών ορίων σε κάποιο μετρούμενο μέγεθος υπάρχει άμεση ειδοποίηση για την άμεση κινητοποίηση του τεχνικού προσωπικού και την πρόληψη ενδεχόμενων αστοχιών.

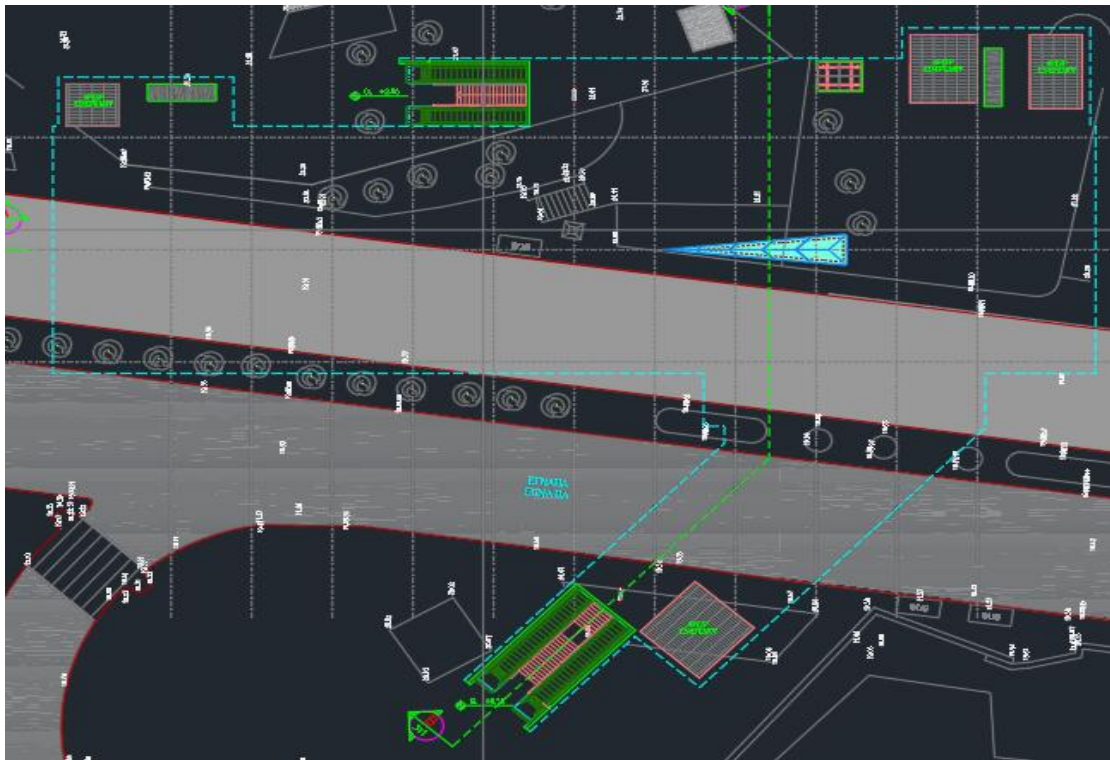
6.5. Στοιχεία του Σταθμού Μετρό Σιντριβάνι

Ο σταθμός αποτελείται από 6 επίπεδα. Το επίπεδο 0 είναι το επίπεδο που βρίσκεται στην επιφάνεια του δρόμου και το επίπεδο -1 είναι ο χώρος έκδοσης των εισιτηρίων. Τα δύο επίπεδα συνδέονται με 2 κυλιόμενες σκάλες και με μία σταθερή προς κάθε κατεύθυνση.

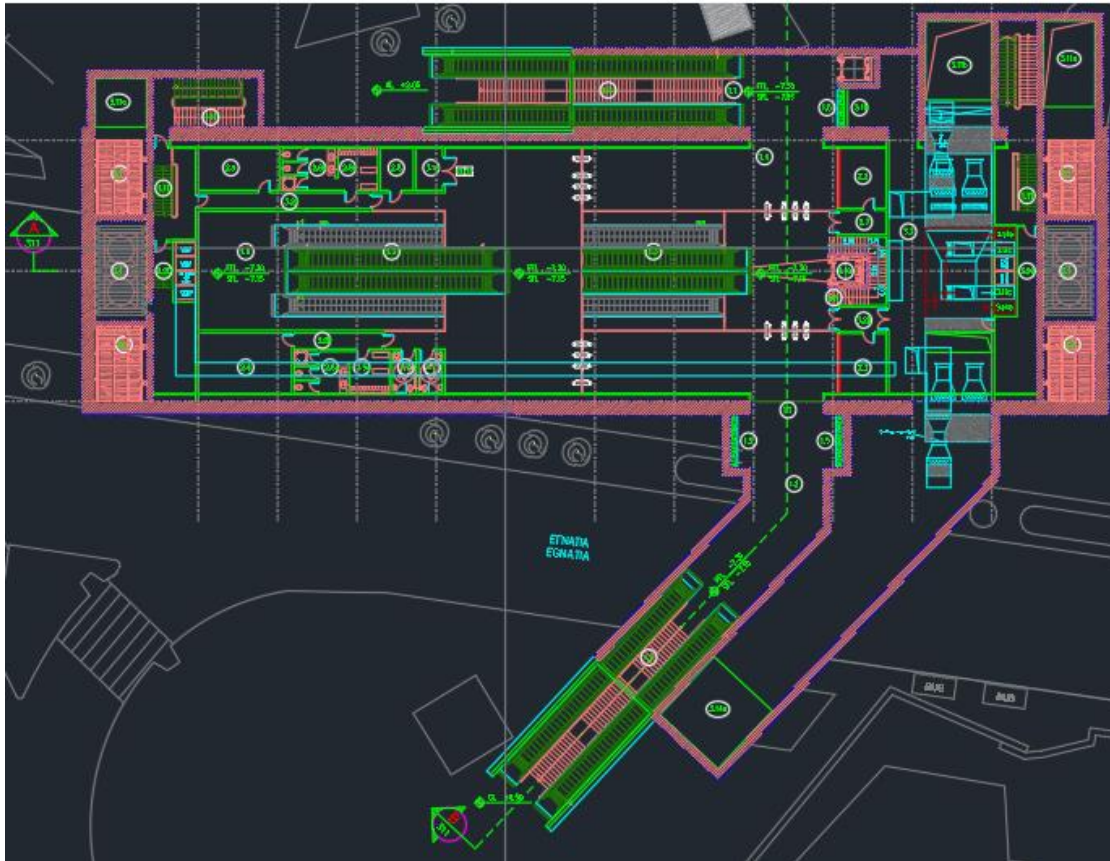
Υπάρχουν 2 έξοδοι που οδηγούν στην επιφάνεια και η διάταξή τους είναι συμμετρική. Στο επίπεδο -2 και -3 είναι ο χώρος αποθήκευσης Η/Μ υλικού και είναι τα επίπεδα που συνδέουν τον χώρο των εισιτηρίων με τις αποβάθρες. Τα συγκεκριμένα επίπεδα είναι προσβάσιμα από όλους και οι χρήστες κυκλοφορούν χρησιμοποιώντας κυλιόμενες και σταθερές σκάλες. Υπάρχουν 4 κυλιόμενες σκάλες και 1 σταθερή στο χώρο πίσω από τον ανελκυστήρα σε κάθε ένα από αυτά τα δυο επίπεδα. Στο επίπεδο -4 είναι το επίπεδο των αποβάθρων όπου υπάρχουν και κάποια καθίσματα για την

αναμονή. Υπάρχει μία κεντρική αποβάθρα μήκους 60m για την καλύτερη εξυπηρέτηση των επιβατών και την ελαχιστοποίηση των κυλιόμενων κλιμάκων και ανελκυστήρων.

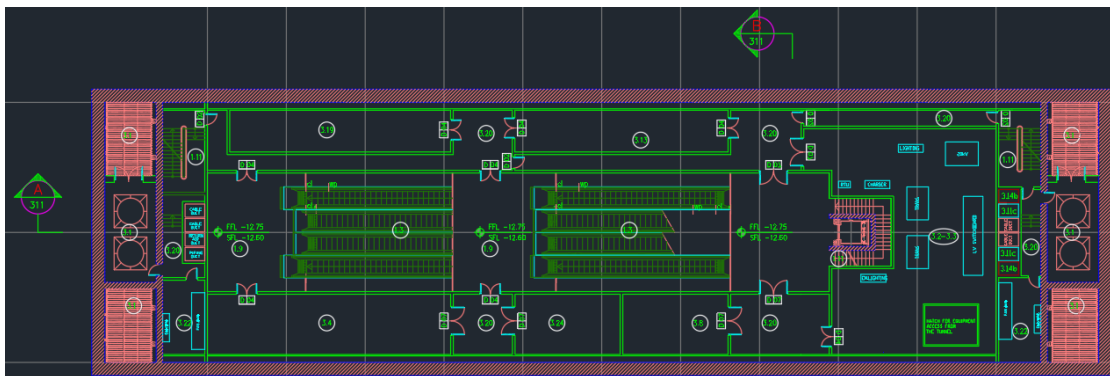
Το πλάτος χρήσης αποβάθρας είναι 10m και έχει δύο διαδρομές κυλιόμενων κλιμάκων ανά διεύθυνση εισόδου – εξόδου και 1 σταθερή σκάλα στο χώρο πίσω από τον ανελκυστήρα. Επίσης υπάρχουν και δυο έξοδοι έκτακτης ανάγκης στα δυο άκρα της αποβάθρας που οδηγούν μέσω σταθερών σκάλων κατευθείαν στο επίπεδο -1 που είναι αυτό της έκδοσης των εισιτηρίων. Στο επίπεδο -5 που είναι το επίπεδο των τροχιών δεν κινούνται επιβάτες οπότε το συγκεκριμένο επίπεδο δεν μας απασχολεί. Στη συνέχεια απεικονίζονται τα σχέδια του σταθμού τόσο οι κατόψεις των 6 επιπέδων, όσο και 2 ενδεικτικές τομές.



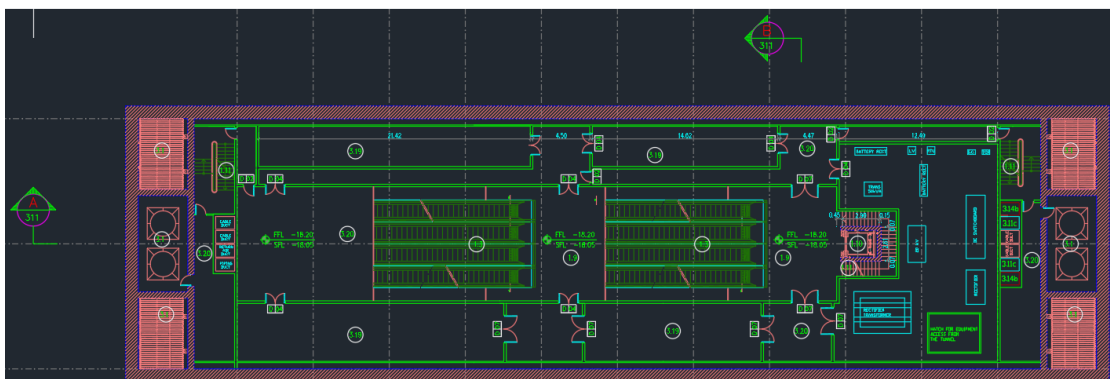
Εικόνα 6.4:Κάτοψη στάθμης 0 (επίπεδο οδού) σταθμού Σιντριβάνι (Αττικό Μετρό)



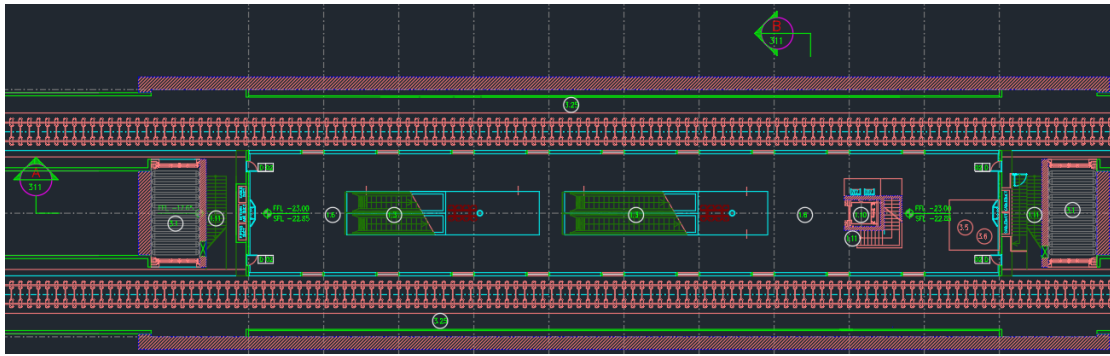
Εικόνα 6.5: Κάτοψη στάθμης -1 (επίπεδο έκδοσης εισιτηρίων) σταθμού Σιντριβάνι (Αττικό Μετρό)



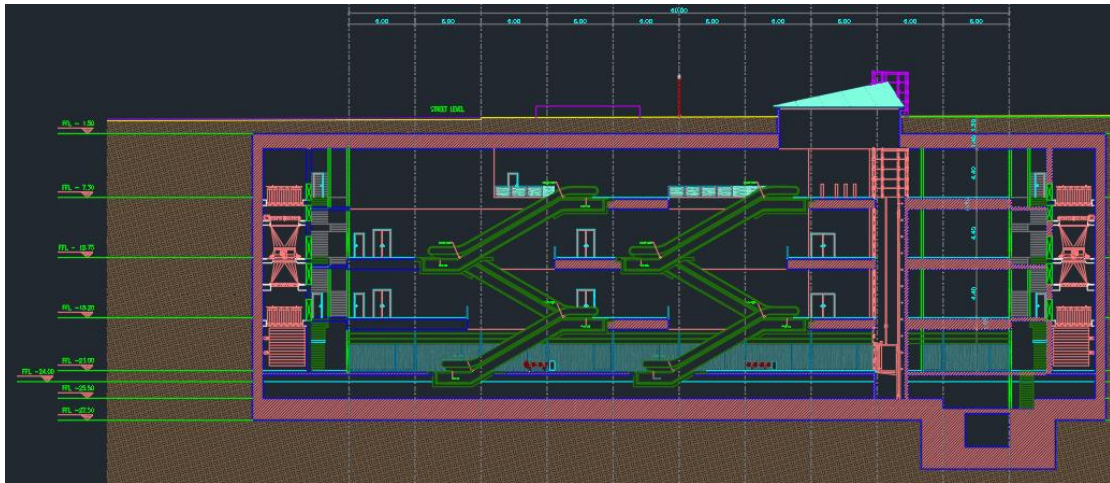
Εικόνα 6.6: Κάτοψη στάθμης -2 (επίπεδο Η/Μ χώρων) σταθμού Σιντριβάνι (Αττικό Μετρό)



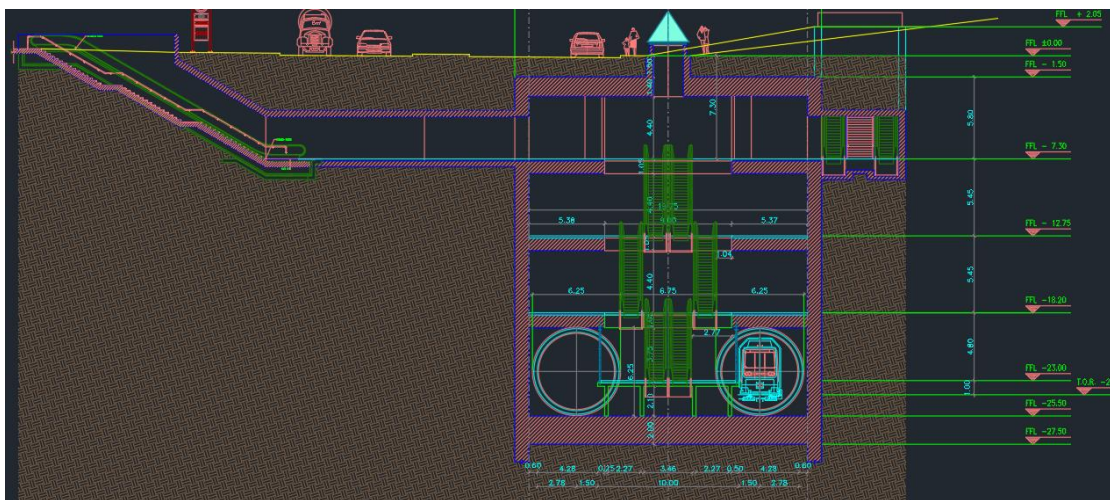
Εικόνα 6.7: Κάτοψη στάθμης -3 (επίπεδο Η/Μ χώρων) σταθμού Σιντριβάνι (Αττικό Μετρό)



Εικόνα 6.8: Σχήμα 8.4: Κάτοψη στάθμης -4 (επίπεδο αποβάθρων) σταθμού Σιντριβάνι (Αττικό Μετρό)



Εικόνα 6.9: Διαμήκης τομή σταθμού Σιντριβάνι (Αττικό Μετρό)



Εικόνα 6.10: Εγκάρσια τομή σταθμού Σιντριβάνι (Αττικό Μετρό)

7. Ανάλυση εκκένωσης υπό πυρκαγιά

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της εκκένωσης ενός σταθμού μετρό σε περίπτωση πυρκαγιάς. Για την εργασία επιλέχθηκε ο σταθμός Σιντριβάνι του μετρό Θεσσαλονίκης. Επιλέχθηκε ο συγκεκριμένος σταθμός έναντι των υπολοίπων σταθμών του μετρό λόγω της πολύπλοκης δομής του και του ότι είναι από τους πιο βαθύς σταθμούς του συγκεκριμένου μετρό, το επίπεδο της αποβάθρας βρίσκεται 23,5m κάτω από το επίπεδο του δρομου. Επίσης έχει τέσσερα επίπεδα στα οποία οι χρήστες του σταθμού μπορούν να κινηθούν και οι χρήστες έχουν πέντε διαθέσιμες εξόδους διαφυγής από την αποβάθρα προς τα άλλα επίπεδα του σταθμού. Αυτά τα χαρακτηριστικά του σταθμού κάνουν την μελέτη εκκένωσης αρκετά περιπλοκή και δύσκολη αλλά σίγουρα με σημαντικά και ενδιαφέροντα αποτελέσματα.

Το πλάνο της ερευνάς ήταν να χρησιμοποιηθεί αρχικά ένα πρόγραμμα για να προσομοιωθεί ο σταθμός, η φωτιά και η εξάπλωση της στο χώρο του σταθμού. Στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί ένα δεύτερο πρόγραμμα στο οποίο θα γίνει η προσομοίωση της εκκένωσης των χρηστών του σταθμού, βασιζόμενο πάντα στα αποτελέσματα της προσομοίωσης της φωτιάς. Βάση αυτού του σχεδιασμού επιλέχθηκε το πρόγραμμα Pyrosim για την προσομοίωση της φωτιάς και το πρόγραμμα Pathfinder για την προσομοίωση της εκκένωσης των χρηστών. Ένα σημαντικός παράγοντας επιλογής των συγκεκριμένων προγραμμάτων είναι ότι μπορούν να εισαχθούν κάποια αποτελέσματα από την ανάλυση του Pyrosim κατευθείαν στο Pathfinder και να βγουν κρίσιμα συμπεράσματα για την αποτελεσματικότητα της εκκένωσης. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε στην εργασία μπορεί να χωριστεί σε τέσσερα στάδια, τα οποία αναφέρονται στη συνέχεια.

- 1) Βιβλιογραφική ερευνά για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων της φωτιάς βάση πραγματικών πυρκαγιών σε σταθμούς μετρό και βάση πειραματικών δεδομένων. Στη συνέχεια δημιουργία κατάλληλων σεναρίων φωτιάς για την παρούσα περίπτωση.
- 2) Δημιουργία 3D μοντέλου του σταθμού στο Pyrosim και προσομοιώσει της φωτιάς, της εξάπλωσης του καπνού και των προϊόντων της καύσης της.
- 3) Δημιουργία 3D μοντέλου του σταθμού στο Pathfinder και προσομοιώσει της εκκένωσης βάση των αποτελεσμάτων για την πυρκαγιά που έχουν προκύψει από την ανάλυση στο Pyrosim.
- 4) Τέλος έλεγχος αν η εκκένωση ήταν επιτυχής βάση των χρόνων που ορίζουν οι κανονισμοί για τη μέγιστη διάρκεια μια εκκένωσης και των δεικτών που ελέγχουν τη σωματική ακεραιότητα των χρηστών.

7.1. Ανάλυση των χαρακτηριστικών του σταθμού Σιντριβάνι

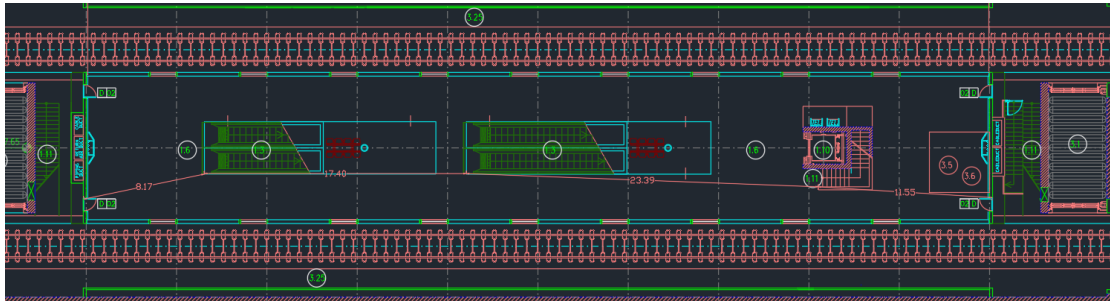
7.1.1. Συμμόρφωση των μέσων διαφυγής προς τις ελάχιστες γεωμετρικές απαιτήσεις

Στον πίνακα 7.1 παρουσιάζονται τα πλάτη όλων των μέσων διαφυγής που γίνεται να χρησιμοποιηθούν από τους χρήστες κατά τη διάρκεια της εκκένωσης στο σταθμό Σιντριβάνι του μετρό. Βάση των κανονισμών τα μέσα διαφυγής πληρούν τις ελάχιστες προϋποθέσεις.

Πίνακας 7.1: Πλάτος μέσων διαφυγής σε κάθε επίπεδο του σταθμού

Μέσο διαφυγής	Ελάχιστο Άνοιγμα (m)		
	Επίπεδο Έκδοσης Εισιτηρίων	Επίπεδο Α και Β	Πλατφόρμα
Σκάλες	1.20	1.60	1.60
Κυλιόμενες	1.10	1.10	1.10
Σκάλες Έκτακτης ανάγκης	-	-	1.00
Πόρτες	0.90	-	-
Πύλες Εισιτηρίων	0.90/0.50	-	-

Στην εικόνα 7.1 παρατηρείται ότι η μέγιστη απόσταση μεταξύ των εξόδων διαφυγής της πλατφόρμας είναι 23.4m επομένως η μέγιστη απόσταση που γίνεται να διανύσει ένας επιβάτης για να φύγει από την πλατφόρμα είναι 11.7m.



Εικόνα 7.1: Κατοψη της αποβάθρας του σταθμού

7.1.2. Υπολογισμός του φορτίου του σταθμού κατά την εκκένωση

Στο σταθμό Σιντριβάνι η μέγιστη χωρητικότητα των συρμών είναι 600 επιβάτες. Επιπλέον βάσει του NFPA 130 οι συρμοί εξυπηρετούν ανά 3 λεπτά και τις δυο κατεύθυνσης και ο εκτιμώμενος συνολικός αριθμός επιβατών που θα εξυπηρετηθεί κατά την ώρα αιχμής παρουσιάζεται στον πίνακα 7.2.

Πίνακας 7.2: Εκτιμώμενο φορτίο την ώρα αιχμής

Φορτίο	Διαδρομή με το	
	μεγαλύτερο φορτίο	μικρότερο φορτίο
Φορτίο Αποβάθρας	451	318
Φορτίο Συρμού	457	1115

Ο συνολικός αριθμός επιβατών προσαρμόζεται για να βασίζεται σε 15 λεπτά χρονικά διαστήματα κατά τη διάρκεια της ώρας αιχμής του σταθμού. Το φορτίο κατά τη διάρκεια του 15 λεπτού μέγιστου (Peak) υπολογίζεται βάση της εξίσωσης και ο συντελεστής F_{surge} παίρνει την τιμή 1,5.

$$Load_{Link} = Load_{One-Hour-Peak} \times \left(\frac{15 \text{ minutes}}{60 \text{ minutes}} \right) \times F_{surge}$$

Όσο για την περίοδο αστοχίας (failure period) ορίζεται όπως φαίνεται παρακάτω:

- Για headways ≤ 6 min: Failure Period = 12 min

b. Για headways > 6 min: Failure Period = headway Διαδρομή(min) × 2

Για πλατφόρμες όπου οι συρμοί φθάνουν και από τις δυο διευθύνσεις και για την διαδρομή με το μικρότερο φόρτο (off-peak direction) το φορτίο του συρμου (Link/Train Load) υπολογίζεται βάση της εξίσωσης:

$$Load_{Train} = \left(\frac{Load_{15\text{-Minute-Peak}}}{\frac{15\text{ minutes}}{Train\ Headway}} \right)$$

Για πλατφόρμες όπου οι συρμοί φθάνουν και από τις δυο διευθύνσεις το φορτίο των ατόμων που θέλουν να επιβιβαστούν (entraining load) είναι το άθροισμά των επιβατών της διαδρομής με το μεγαλύτερο φορτίο (peak direction) που καταφθάνουν όσο διάστημα διαρκεί η περίοδος αστοχίας (failure period) και οι επιβάτες της διαδρομής με το μικρότερο φορτίο (off-peak direction) που φθάνουν κατά τη διάρκεια μιας διαδρομής στο 15 min της ώρας αιχμής (headway in the peak 15 minutes):

$$Load_{Entraining\ Peak} = \frac{Load_{15\text{-Minute-Peak}}}{15\text{ minutes}} \times MAX[2 \times Headway: 12min]$$

$$Load_{Entraining\ Off-Peak} = \frac{Load_{15\text{-Minute-Peak}}}{15\text{ minutes}} \times Headway$$

Στον πίνακα 7.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των παραπάνω εξισώσεων για τον υπολογισμό του φορτίο των επιβατών για τον σχεδιασμό της εκκένωσης. Βάση των υπολογισμών το φορτίο σχεδιασμού για την προσομοίωση της εκκένωσης είναι 277 επιβάτες.

Πίνακας 7.3: υπολογισμοί για το φορτίο της εκκένωσης του σταθμού

Peak Direction Entraining Load During 15-Minute Peak	169
Off-Peak Direction Entraining Load During 15-Minute Peak	119
Peak Direction Entraining Load	135
Off-Peak Direction Entraining Load	24
Total Entraining Load	159
Peak Direction Link Load During 15-Minute Peak	171
Off-Peak Direction Link Load During 15-Minute Peak	418
Peak Direction Train Load During 15-Minute Peak	34
Off-Peak Direction Train Load During 15-Minute Peak	84
Total Train Load	118
Total Station (platform) Occupant Load (O_p)	277

7.1.3. Ανάλυση χρόνου εκκένωσης βάση του NFPA 130 (Pen & Paper)

Πριν πραγματοποιηθεί η προσομοίωση της εκκένωσης πρέπει να εκλεχθεί αν ο σχεδιασμός του σταθμού τηρεί τις προϋποθέσεις που θέτει ο NFPA 130. Ο NFPA 130 έχει ορίσει ως μέγιστο χρόνο εκκένωσης για την πλατφόρμα του σταθμού τα 4 λεπτά και τα 6 λεπτά για πλήρη εκκένωση του σταθμού. Βάσει του NFPA 130 πρέπει να καθοριστεί η χωρητικότητα ροής (flow capacity) για να γίνει η ανάλυση του χρόνου εκκένωσης. Ο NFPA 130 ορίζει τις τιμές για την χωρητικότητα ροής (flow capacity) όλων των στοιχείων εξόδου. Επίσης κατά του υπολογισμούς της εκκένωσης πρέπει να ληφθεί ότι μια κυλιόμενη σκάλα σε κάθε επίπεδο δεν θα είναι διαθέσιμη για χρήση βάση των περιορισμών που θέτουν οι κανονισμοί. Ο πίνακας 7.4 παρουσιάζει την χωρητικότητα ροής (flow capacity) διαφυγής ανά μέσο και επίπεδο στον εξεταζόμενο σταθμό.

Πίνακας 7.4: Χωρητικότητα ροής (Capacity flow) των στοιχείων διαφυγής			
Στοιχείο Εξόδου	Width (mm)	ρ /mm-min or m/min	ρ /min
Από την πλατφόρμα στο επίπεδο 1			
Σκάλες 1	1200	0,0555	66.60
Κυλιόμενες* 4	3000	0,0555	166.50
Έξοδοι κίνδυνου 2	2000	0,0555	111.00
Ανελκυστήρες 1		Not Used	-
Χωρητικότητα ροής των μέσων εξόδου της πλατφόρμας (F_p)			343.1
Διάμεσου των πυλών εισιτήριων			
Πύλες Εισιτήριων 8		50 per gate	400,00
Πόρτες 4		50 per door	200,00
Χωρητικότητα ροής των πυλών εισιτήριων (F_{fb})			600,00
Πύλες Εισιτήριων προς ασφαλές σημείο			
Σκάλες 2	3600	0,0555	199.8
Κυλιόμενες 4*	3000	0,0555	166,50
Ανελκυστήρες 2		Not Used	-
Χωρητικότητα ροής του χώρου (F_c)			366.30

Χρόνος εκκένωσης πλατφόρμας (μέχρι 4 λεπτά)

Σύμφωνα με την εξίσωση: T_p (**Χρόνος εκκένωσης πλατφόρμας**) = O_p / F_p
 όπου

O_p =φορτίο επιβατών πλατφόρμας

F_p = χωρητικότητα ροής (flow capacity) διαφυγής της πλατφόρμας

$T_p = O_p / F_p = 277/343.1 = 0.81 \text{ min}$ (δεκτό, λιγότερο από 4 min)

Χρόνος εκκένωσης ως ασφαλές σημείο (μέχρι 6 λεπτά)

Ο Χρόνος εκκένωσης ως ασφαλές σημείο (T_s) υπολογίζεται από την εξίσωση $T_s = W_p + T$ όπου W_p είναι ο χρόνος αναμονής στη πλατφόρμα και T ο χρόνος που χρειάζεται να διασχίσει κάποιος μέχρι την πιο απομακρυσμένη έξοδο διαφυγής. Στο πίνακα 7.5 παρουσιάζονται οι χρόνοι που κάνουν οι χρήστες μέσω των διαδρομών εξόδου κάθε επιπέδου του σταθμού.

Πίνακας 7.5: Χρόνοι διαφυγής μέσω των διαδρομών εξόδου κάθε επιπέδου του σταθμού

Χώροι Κίνησης	Απόσταση (m)	Ταχύτητα Κίνησης (m/min) NFPA 130	Χρονος (min)
Πλατφόρμα (T ₁)	11.7	37,7	0,31
Πλατφόρμα προς Επίπεδο B(T ₂)	5,5	14,6	0,38
Επίπεδο B (T ₃)	0	37,7	0
Επίπεδο B προς Επίπεδο A (T ₄)	5,5	14,6	0.38
Επίπεδο A (T ₅)	0	37,7	0
επίπεδο A προς επίπεδο εισιτήριων (T ₆)	5,5	14,6	0,38
Επίπεδο εισιτήριων (T ₇)	40	24	1.67
Επίπεδο εισιτήριων προς Ασφαλές σημείο(T ₈)	5,5	14,6	0,38
Συνολικός Χρόνος (T)			3.50

$$W_p = T_p - T_1 = 0.81 - 0.31 = 0.50 \text{ min}$$

όπου:

W_p = χρόνος αναμονής στη πλατφόρμα

T_p = συνολικός χρόνος εκκένωσης πλατφόρμας

T_1 = χρόνος διάσχισης πλατφόρμας

$$T_s = W_p + T = 0.50 + 3.50 = 4.00 \text{ min (δεκτό, λιγότερο από 6 min)}$$

όπου:

T_s = συνολικός χρόνος διαφυγής μέχρι σημείο ασφάλειας

W_p = χρόνος αναμονής στη πλατφόρμα

T = χρόνος μέχρι την πιο απομακρυσμένη έξοδο διαφυγής

Αρά ο σχεδιασμός του σταθμού πληροί τις προϋποθέσεις που θέτει ο NFPA 130 για τους χρόνους εκκενώσεις αποβάθρας (48 sec < 240 sec) και όλου του σταθμού προς ασφαλές σημείο (240 sec < 360 sec).

Για να μπορέσει να γίνει μια πρώτη σύγκριση και συσχέτιση μεταξύ των αποτελεσμάτων του μαθηματικού μοντέλου του κανονισμού και αυτών του προγράμματος Pathfinder που θα χρησιμοποιηθεί στη παρούσα εργασία, πραγματοποιήθηκε μια προσομοίωση εκκένωσης του σταθμού χωρίς να ληφθεί υπόψη κάποιο σενάριο φωτιάς. Πρέπει να σημειωθεί ότι σε αυτή τη προσομοίωση η κίνηση των χρηστών ήταν με τη ρύθμιση Steering Mode.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο πίνακα 7.6 μαζί με αυτά του κανονισμού. Η προσομοίωση της εκκένωσης στο Pathfinder βάση των χρονών που θέτει ο κανονισμός ήταν πετυχημένη. Επίσης οι χρόνοι για την εκκένωση του σταθμού ως ασφαλές σημείο ήταν παρόμοιοι και για τις δυο αναλύσεις. Διαφορά υπήρχε στα αποτελέσματα για την εκκένωση της αποβάθρας με το Pathfinder να δίνει διπλάσιο χρόνο εκκένωσης. Αυτό συμβαίνει γιατί ο NFPA 130 ελέγχει μόνο τη μέγιστη διαδρομή που χρειάζεται να διανύσει ένας χρήστης του σταθμού χωρίς να λαμβάνει υπόψη το συνολικό φορτίο του σταθμού. Από την άλλη μεριά το Pathfinder ελέγχει της διαδρομές όλων των χρηστών του σταθμού ταυτόχρονα λαμβάνοντας υπόψη της ουρές που δημιουργούνται στα μέσα

διαφυγής. Αρά στη περίπτωση του NFPA 130 εξετάζεται ο πιο απομακρυσμένος χρήστης της αποβάθρας αλλά μονός του και στο Pathfinder εξετάζονται 277 άτομα μαζί στην αποβάθρα.

Πίνακας 7.6: Σύγκριση χρόνων εκκένωσης

	Όρια NFPA 130	Υπολογισμοί βάση του NFPA 130	Προσομοίωση μέσω Pathfinder
Εκκένωση αποβάθρας	4 min / 240 sec	0.81 min / 48 sec	2.11 min / 127 sec
Εκκένωση σταθμού ως ασφαλές σημείο	6 min / 360 sec	4 min / 240 sec	3.93 min / 236 sec

7.2. Σενάρια πυρκαγιάς

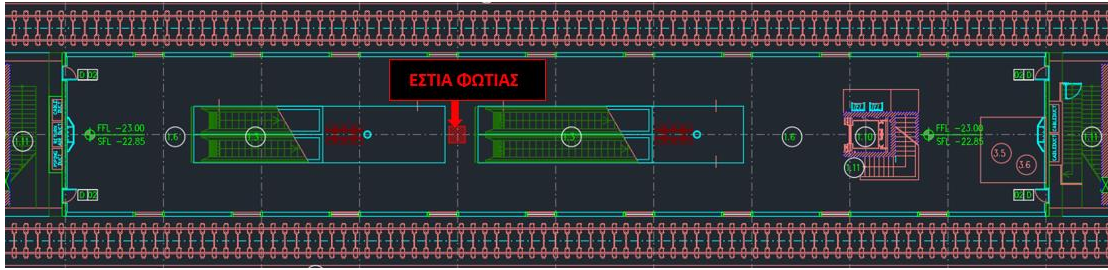
Βάση των στατιστικών στοιχείων και της βιβλιογραφικής ερευνάς που έγινε καταλήξαμε στη δημιουργία τριών σεναρίων πυρκαγιάς. Στα οποία η θέση της εστίας της φωτιάς, το μέγεθος της φωτιάς και η καύσιμη ύλη θα διαφέρει ανάλογα το σενάριο όπως παρουσιάζονται στο πίνακα 7.7.

Πίνακας 7.7: Στοιχεία για τα σενάρια της φωτιάς

Σενάριο	Θέση Εστίας	Καύσιμη Ύλη	Μέγιστο HRR (MW)	Χρόνος Προσομοίωσης (sec)
1 ^ο	Μπροστά από τις κεντρικές κυλιόμενες	Κηροζίνη	2.5	420
2 ^ο	Στο μέσον του συρμού με το μεγαλύτερο επιβατικό φορτίο	Ακόρεστος Πολυεστέρας	5	420
3 ^ο	Στο μέσον του συρμού με το μεγαλύτερο επιβατικό φορτίο	Ακόρεστος Πολυεστέρας	10	540

7.2.1. 1^ο Σενάριο

Στο πρώτο σενάριο επιλέχθηκε η εστία της φωτιάς να είναι στο μέσον της αποβάθρας και μπροστά από τις κυλιόμενες σκάλες όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 7.2. Με την επιλογή του συγκριμένου σημείου για εστία της φωτιάς αυτόματος δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι δυο κυλιόμενες σκάλες από τους χρήστες κατά την διαδικασία της εκκένωσης κάνοντας τη προσέγγιση που ακολουθείται συντηρητική. Η φωτιά θα είναι αποτέλεσμα εμπρησμού σε μια μεγάλη αποσκευή γεμάτη με κηροζίνη (kerosene). Η επιλογή και οι τιμές των ιδιοτήτων της φωτιάς αναλύονται παρακάτω.



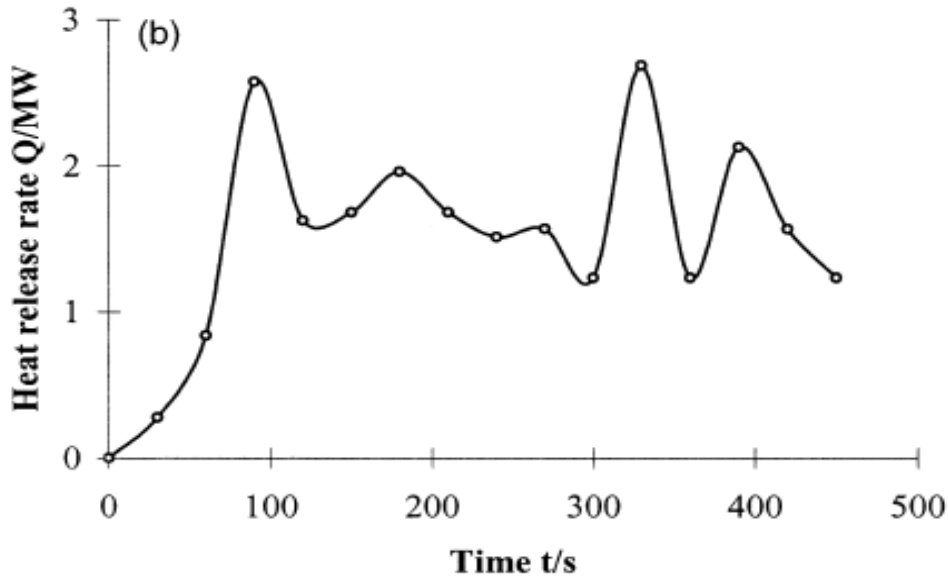
Εικόνα 7.2: εστία φωτιάς για το πρώτο σενάριο

Ως καύσιμη ύλη για το σενάριο επιλέχθηκε η κηροζίνη της οποίας ο χημικός τύπος και οι θερμοδυναμικές ιδιότητες οι οποίες εισάχθηκαν στο Pyrosim ελήφθησαν από τους αντίστοιχους πίνακες 3-4.10 και 3-4.14 του κανονισμού SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Στο πίνακα 7.8 παρουσιάζονται όλα τα στοιχεία που εισήχθησαν στο Pyrosim για να πραγματοποιηθεί η ανάλυση.

Πίνακας 7.8: : Θερμοδυναμικές ιδιότητες κηροζίνης

Chemical Formula of kerosene	carbon	hydrogen
	14	30
Energy per unit mass O ₂ (kJ/kg of O ₂)		12700
Effective heat of combustion (kJ/kg)		44100
Fraction of CO from fuel (kg/kg)		0,012
Fraction of Soot from fuel (kg/kg)		0,042
Radiative fraction		0,35

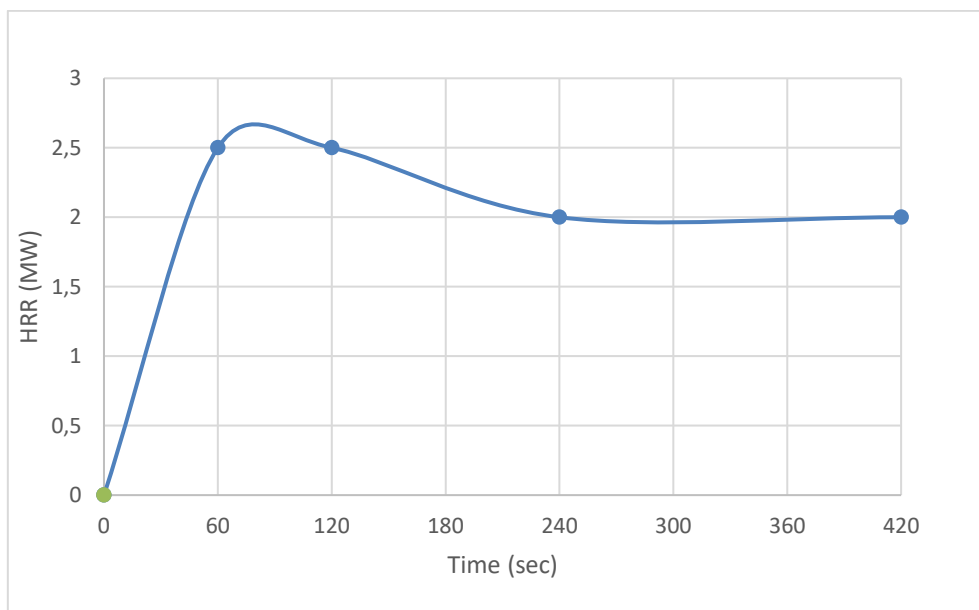
Το τελευταίο στάδιο για τη δημιουργία φωτιάς στο Pyrosim είναι να εισαχθεί ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (HRRPUA= Heat Release Rate Per Unit Area), το οποίο είναι αρκετά δύσκολο στο προσδιορισμό του γιατί επηρεάζεται από αρκετούς παράγοντες. Για το συγκεκριμένο σενάριο βασιστήκαμε στα αποτελέσματα της εργασίας των Chow et.al (2001), στην οποία μετρήσανε τον ρυθμό έκλυσης θερμότητας μιας pool fire (2m*2m) με 60Kg ντίζελ (diesel) τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο γράφημα 7.1. Για το παρόν σενάριο τροποποιήθηκαν λίγο οι τιμές για πιο εύκολη εισαγωγή των δεδομένων στο πρόγραμμα και παρουσιάζονται στον πίνακα 7.9 και στο γράφημα 7.2.



Γράφημα 7.1: Ρυθμός έκλυσης θερμότητας της pool fire (Chow et.al 2001)

Πίνακας 7.9: Οι τιμές του ρυθμού έκλυσης θερμότητας της κηροζίνης που εισήχθησαν στο Pyrosim

Time (sec)	HRR (MW)
0	0
120	2.5
240	2
420	2

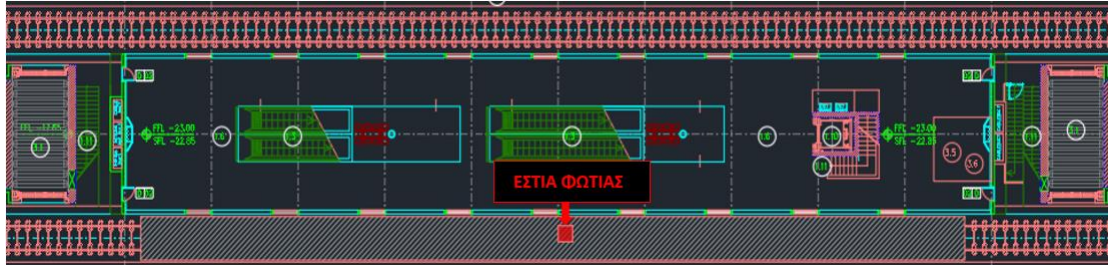


Γράφημα 7.2: Ρυθμός έκλυσης θερμότητας από την κηροζίνη

7.2.2. 2^ο Σενάριο

Στο δεύτερο σενάριο επιλέχθηκε η εστία της φωτιάς να είναι στο μέσον του συρμού (με το μεγαλύτερο επιβατικό φορτίο) όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 7.3. Η επιλογή του συγκριμένου σημείου για εστία της φωτιάς πιστεύεται ότι είναι η δυσμενέστερη για τους χρήστες κατά την διαδικασία της εκκένωσης κάνοντας τη προσέγγιση που ακολουθείται συντηρητική. Η φωτιά θα είναι αποτέλεσμα εμπρησμού ενός καθίσματος και στη συνέχεια θα εξαπλωθεί και σε άλλο τμήμα του βαγονιού. Ο συρμός δεν αποτελείται από μόνο ένα εύφλεκτο υλικό αλλά στη παρούσα

προσομοίωση έγινε η παραδοχή ότι το μοναδικό εύφλεκτο υλικό του συρμού είναι ο ακόρεστος πολυεστέρας (polyester unsaturated) βασιζόμενοι και στην εργασία του Boon Hui Chiam (2005) στην οποία έγινε η ίδια παραδοχή. Χρησιμοποιήθηκε ένα υλικό γιατί μόνο ένα δέχεται το πρόγραμμα και γιατί οι θέσεις στα τραίνα συνήθως αποτελούνται από αυτό το υλικό. Η επιλογή και οι τιμές των ιδιοτήτων της φωτιάς αναλύονται παρακάτω στο πίνακα 7.10.



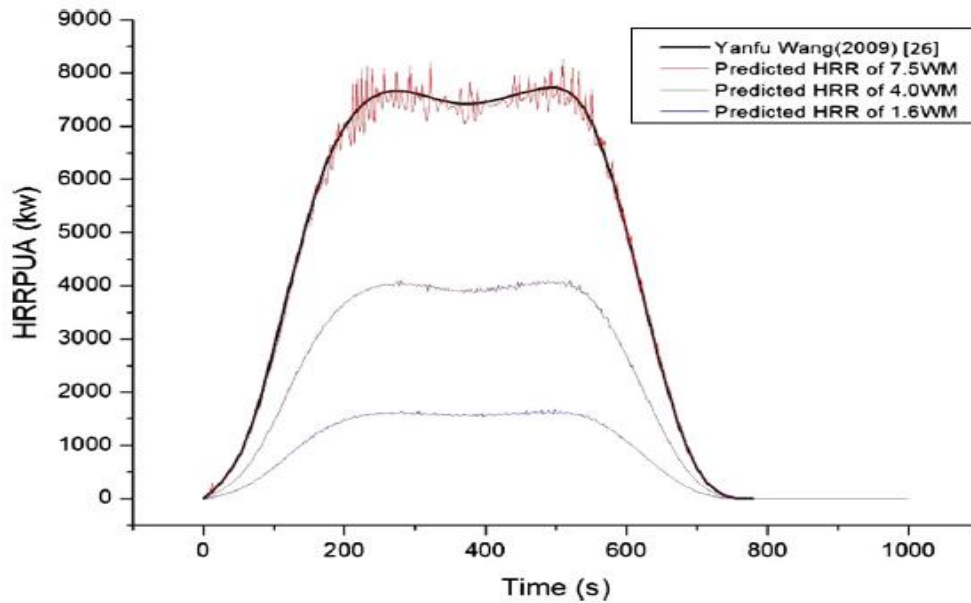
Εικόνα 7.3: εστία φωτιάς για το δεύτερο σενάριο

Ως καύσιμη ύλη για το σενάριο επιλέχθηκε ο ακόρεστος πολυεστέρας του οποίου ο χημικός τύπος και οι θερμοδυναμικές ιδιότητες οι οποίες εισήχθησαν στο Pyrosim ελήφθησαν από τους αντίστοιχους πίνακες 7.3 και 7.4 της εργασίας του Chiam (2005) και από τον πίνακα C.3 του κανονισμού SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Στο πίνακα 7.11 παρουσιάζονται όλα τα στοιχεία που εισήχθησαν στο Pyrosim για να πραγματοποιηθεί η ανάλυση.

Πίνακας 7.10:θερμοδυναμικές ιδιότητες ακόρεστου πολυεστέρα

Chemical Formula of Polyester unsaturated	carbon	hydrogen	oxygen
	14	30	1.63
Energy per unit mass O ₂ (kJ/kg of O ₂)		11900	
Effective heat of combustion (kJ/kg)		12870	
Fraction of CO from fuel (kg/kg)		0,0705	
Fraction of Soot from fuel (kg/kg)		0,062	
Radiative fraction		0,35	

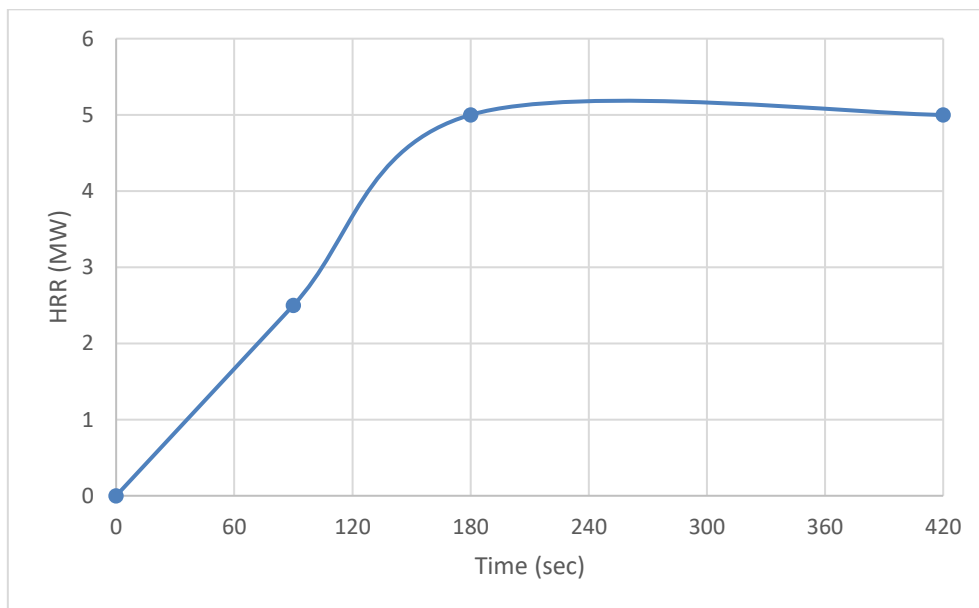
Το τελευταίο στάδιο για τη δημιουργία της φωτιάς στο Pyrosim είναι να εισαχθεί ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (HRRPUA= Heat Release Rate Per Unit Area), το οποίο είναι αρκετά δύσκολο στο προσδιορισμό του γιατί επηρεάζεται από αρκετούς παράγοντες. Το συγκεκριμένο σενάριο βασίστηκε στα αποτελέσματα των εργασιών των Ran Gao et.al (2015) και του Boon Hui Chiam (2005). Στην εργασία τους οι Ran Gao et.al (2012) προσπάθησαν να προβλέψουν την διάδοση του καπνού σε έναν σταθμό μετρό σχεδιάζοντας τρία σενάρια με μονή διαφορά το ρυθμό έκλυσης της θερμότητας, οι τιμές που χρησιμοποίησαν έχουν προβλεφθεί μέσα από πειραματικά δεδομένα και παρουσιάζονται στο γράφημα 7.3. Στην εργασία του ο Boon Hui Chiam (2005) μετά από αρκετές προσομοιώσεις φωτιάς σε συρμούς μετρό κατέληξε στη πρόταση ο σχεδιασμός του συστήματος αερισμού έκτακτης ανάγκης να γίνεται βάση της μέγιστης τιμής του ρυθμού έκλυσης της θερμότητας, καταλήγοντας στη τιμή των 5MW όταν η φωτιά εξελίσσεται στην πλατφόρμα και 10MW όταν εξελίσσεται μέσα στη σήραγγα. Για το παρόν σενάριο χρησιμοποιήθηκε η τιμή των 5MW για μέγιστο HRR που προτάθηκε από τον Boon Hui Chiam (2005) και ο σχεδιασμός της καμπύλης HRR ακολουθεί το μοτίβο που εφάρμοσαν οι Ran Gao et.al (2015) όπως παρουσιάζεται στο γράφημα 7.4. Οι τιμές που εισήχθησαν στο πρόγραμμα παρουσιάζονται στον πίνακα 7.10 και στο γράφημα 7.4.



Γράφημα 7.3: Εκτιμώμενοι ρυθμοί έκλυσης θερμότητας βάση πειραματικών δεδομένων (Ran Gao et.al 2015)

Πίνακας 7.11: οι τιμές του ρυθμού έκλυσης θερμότητας του σεναρίου 2 που εισήχθησαν στο Pyrosim

Time (sec)	HRR (MW)
0	0
90	2,5
180	5
420	5



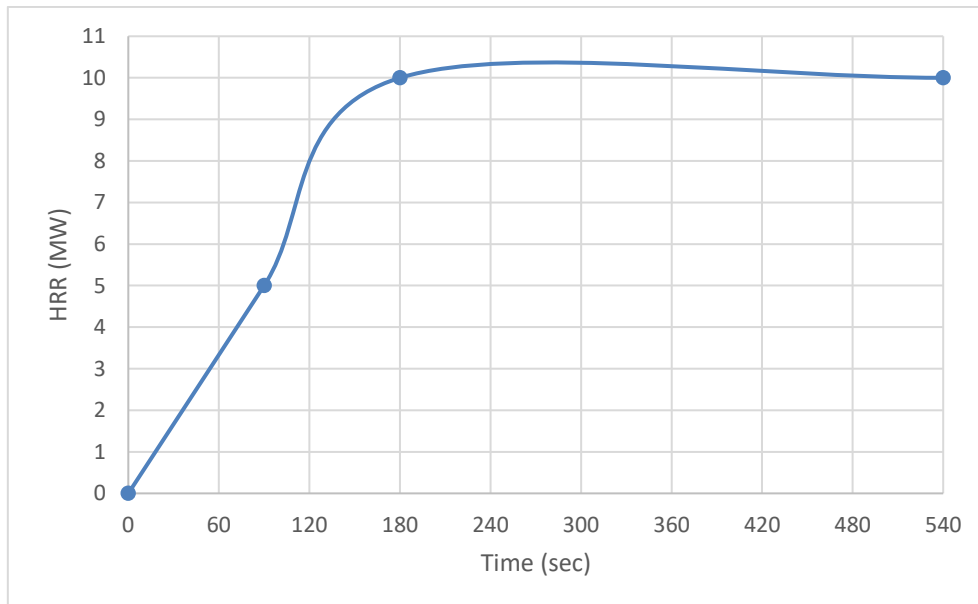
Γράφημα 7.4: ρυθμός έκλυσης θερμότητας για το σενάριο 2

7.2.3. 3^ο Σενάριο

Το τρίτο σενάριο επιλέχθηκε να έχει το ίδιο υλικό με το δεύτερο με μονές διαφορές τη καμπύλη του HRR και τη μέγιστη τιμή της. Για το παρόν σενάριο χρησιμοποιήθηκε η τιμή των 10MW για μέγιστο HRR που προτάθηκε από τον Boon Hui Chiam (2005) και ο σχεδιασμός της καμπύλης HRR ακολουθεί επίσης το μοτίβο που εφάρμοσαν οι Ran Gao et.al (2015). Οι τιμές που εισήχθησαν στο πρόγραμμα παρουσιάζονται στον πίνακα 7.12 και στο γράφημα 7.5.

Πίνακας 7.12: οι τιμές του ρυθμού έκλυσης θερμότητας του σεναρίου 3 που εισήχθησαν στο Pyrosim

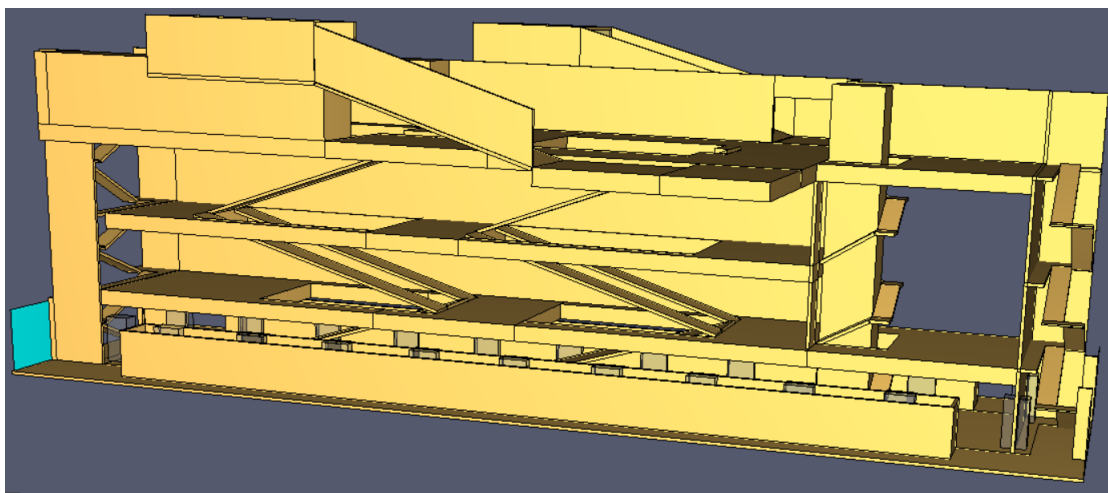
Time (sec)	HRR (MW)
0	0
90	5
180	10
540	10



Γράφημα 7.5: ρυθμός έκλυσης θερμότητας για το σενάριο 3

7.3. Προσομοίωση του σταθμού και της φωτιάς στο Pyrosim

Με βάση τα αρχιτεκτονικά σχέδια από τις τομές του σταθμού και τις κάτοψης όλων των επιπέδων του δημιουργήθηκε το 3D μοντέλο του σταθμού Σιντριβάνι όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 7.4. Επίσης πρέπει να αναφερθεί ότι τα ανοίγματα των εισόδων- εξόδων του σταθμού στην επιφάνεια και τα ανοίγματα των σηράγγων του μετρό στην αποβάθρα προσομοιάστηκαν σαν Open Vents. Αυτό έγινε για να είναι πιο κοντά στην πραγματικότητα η προσομοίωση της διάδοσης του καπνού στο σταθμό.

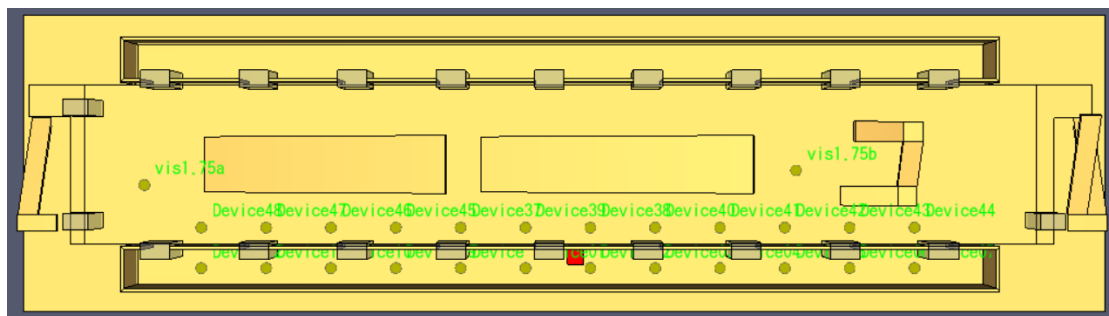


Εικόνα 7.4: Προσομοίωση του σταθμού Σιντριβάνι στο Pyrosim

Η προσομοίωση της εστίας της φωτιάς έγινε με τη χρήση επιφάνειας (surface) τύπου Burner, εισάγοντας το ρυθμό έκλυσης της θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (HRRPUA). Στη συνέχεια εισάγεται ο χημικός τύπος και η θερμοδυναμικές ιδιότητες της καύσιμης ύλης που επιλέγεται ανάλογα το σενάριο. Η εισαγωγή των παραπάνω στοιχείων στο πρόγραμμα γίνεται μέσω της καρτέλας Αντιδράσεις (Reactions). Αφού έγινε η Μοντελοποίηση του σταθμού και της φωτιάς, χρησιμοποιήθηκαν συσκευές (Devices) σε κρίσιμα σημεία του μοντέλου για να γίνει καταγραφή διάφορων ποσοτήτων της ανάλυσης όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 7.5. Κρίσιμα σημεία θεωρήθηκαν όλες οι σκάλες, οι πόρτες του συρμού που είναι η εστία της φωτιάς και τρία σημεία σε κάθε επίπεδο ώστε να καλύπτουν όλο το χώρο κίνησης των χρηστών.

Ο πρώτος τύπος συσκευών που χρησιμοποιήθηκε είναι η «Gas Phase Device» για τη μέτρηση της ορατότητας (Visibility) στους χώρους του σταθμού. Αυτό έγινε για να έχουμε τα απαραίτητα στοιχεία ώστε να μπορέσουμε να μειώνουμε την ταχύτητα κίνησης των χρηστών ανάλογα με τα επίπεδα ορατότητας του κάθε χώρου για κάθε χρονική στιγμή, η παραπάνω μεθοδολογία θα αναπτυχθεί λεπτομερώς στη συνέχεια.

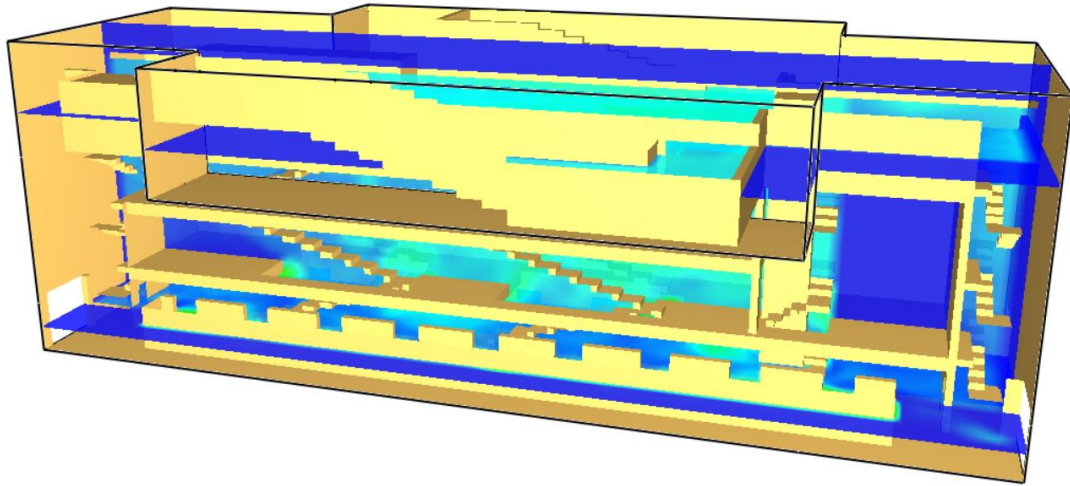
Ο δεύτερος τύπος συσκευών που χρησιμοποιήθηκε είναι η Radiative Heat Flux Gas Device για τη μέτρηση της ακτινοβολίας kW/m^2 (Radiation). Αυτό έγινε για να έχουμε τα στοιχεία της αύξησης της θερμικής ακτινοβολίας σε σχέση με το χρόνο, γνωρίζοντας το ρεύμα θερμότητας λόγω ακτινοβολίας q_{rad} [kW/m^2] μπορεί να υπολογιστεί ο χρόνος που χρειάζεται για να καεί το δέρμα λόγω θερμότητας ακτινοβολίας t_{rad} [min]. Τα παραπάνω στοιχεία χρειάζονται για τον υπολογισμό του δείκτη για τη συνολική δραστική δόση θερμότητας (Fractional Effective Dose of Heat) που δέχεται ο χρήστης.



Εικόνα 7.5: συσκευές στην πλατφόρμα του σταθμού

Ένα σημαντικό εργαλείο που σου παρέχει το Pyrosim είναι τα Slices. Τα Slices μετράνε gas-phase δεδομένα (πίεση, θερμοκρασία, συγκέντρωση σωματιδίων κ.α.) πάνω σε έναν επίπεδο ευθυγραμμισμένο άξονα που είναι παράλληλος σε έναν από τους άξονες x ή y ή z. Τα δεδομένα μπορούν να αποτυπωθούν και να αναπαραχθούν από ένα αρχείο «Smokeview», δίνοντας στο μελετητή μια ολοκληρωμένη εικόνα του τρόπο διάδοσής των προϊόντων της καύσης.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν Slices για τη μέτρηση της ορατότητας (Visibility), θερμοκρασίας και της πυκνότητας των σωματιδίων του μονοξειδίου του άνθρακα σε κρίσιμα σημεία του μοντέλου όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 7.6.



Εικόνα 7.6: Αποτύπωση των Slices στο αρχείο Smokeview

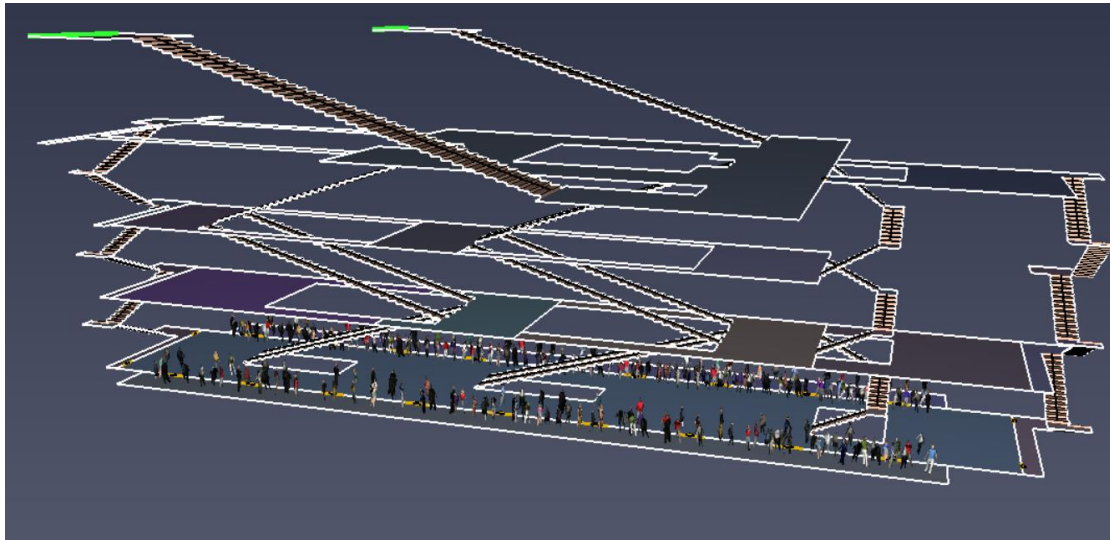
Επιπλέον έγινε χρήση κάποιων αποτελεσμάτων των Plot3D Data, κάθε αρχείο τους μπορεί να περιέχει δεδομένα μέχρι για πέντε ποσότητες. Τα δεδομένα PLOT3D μπορούν να χρησιμοποιηθούν από το λογισμικό προσομοίωσης εκκένωσης Pathfinder για να ενσωματωθούν με τα αποτελέσματα του FDS, με αυτό το τρόπο εξάγονται δεδομένα για τους επιλεγμένους χρήστες ανάλογα τις επιλεγμένες ποσότητες.

Για τη παρούσα εργασία από την επιλογή των Plot3D Data χρησιμοποιήθηκε η επιλογή Pathfinder Quantities (4 ποσότητες) και η θερμοκρασία. Η επιλογή της θερμοκρασίας έγινε για να μπορεί να υπολογιστεί η τιμή $t_{i_{conv}}$ [min] για τους επιλεγμένους χρήστες του σταθμού, η οποία είναι ο χρόνος που οδηγεί σε ανυπόφορη από τον άνθρωπο κατάσταση κάτω από συνθήκες έκθεσης σε θερμότητα συναγωγής σε κλειστό χώρο. Τα παραπάνω στοιχεία χρειάζονται για τον υπολογισμό του δείκτη για τη συνολική δραστική δόση θερμότητας (Fractional Effective Dose of Heat) που δέχεται ο χρήστης. Η επιλογή Pathfinder Quantities σου παρέχει στοιχεία για την ορατότητα και για τις συγκεντρώσεις των αέριων του οξυγόνου, διοξειδίου και μονοξειδίου του άνθρακα. Τα στοιχεία των συγκεντρώσεων των συγκεκριμένων αερίων χρησιμοποιούνται από τον Pathfinder για να υπολογιστεί ο δείκτης FED (Fractional Effective Dose- Κλασματική δραστική δόση) για τους επιλεγμένους χρήστες.

Τέλος ο χρόνος που διήρκησε η προσομοίωση των σεναρίων 1 και 2 ήταν 420 sec/7 min και αυτή του σεναρίου 3 ήταν 540 sec/9 min.

7.4. Προσομοίωση του σταθμού και της εκκένωσης στο Pathfinder

Με βάση τα αρχιτεκτονικά σχέδια από τις τομές του σταθμού και τις κάτοψης όλων των επιπέδων του δημιουργήθηκε το 3D μοντέλο του σταθμού Σιντριβάνι όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 7.7.



Εικόνα 7.7: Προσομοίωση του σταθμού Σιντριβάνι στο Pathfinder

Ο συνολικός αριθμός επιβατών του σταθμού την στιγμή της εκκένωσης προσαρμόζεται για να βασίζεται σε 15 λεπτά χρονικά διαστήματα κατά τη διάρκεια της ώρας αιχμής του σταθμού βάση του κανονισμού NFPA 130. Ο συνολικός αριθμός επιβατών του σταθμού την στιγμή της εκκένωσης προκύπτει βάση των υπολογισμών που έγιναν στο κεφάλαιο 7.1.2 είναι 277 χρήστες και παρουσιάζεται αναλυτικά η κατανομή τους στο πίνακα 7.13.

Πίνακας 7.13: το φορτίο του σταθμού κατά τη διάρκεια της εκκένωσης

	Διαδρομή με το μεγαλύτερο φορτίο	Διαδρομή με το λιγότερο φορτίο
Φορτίο αποβάθρας	135	24
Φορτίο συρμού	34	84

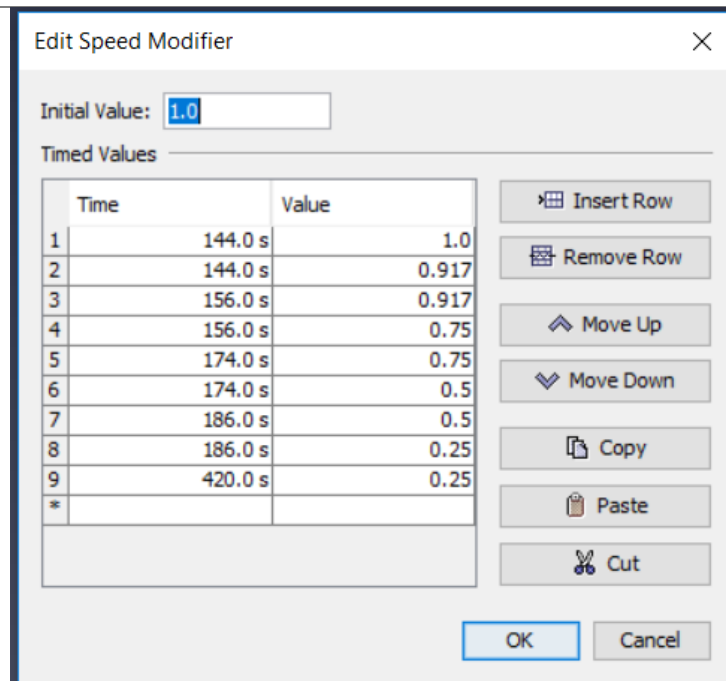
Όλοι οι χρήστες του σταθμού ορίστηκε να έχουν το ίδιο πρότυπο συμπεριφοράς και στα τρία σενάρια, αυτό που υπάρχει σαν προεπιλογή που καλεί τους χρήστες να κατευθυνθούν προς όποια έξοδο θέλουν «go to any exit».

Η ανεμπόδιση ταχύτητα κίνησης των χρηστών ορίστηκε και στα τρία σενάρια να είναι 1,19 m/s όμως ο πυκνός καπνός επηρεάζει αρνητικά την ταχύτητα κίνησης των χρηστών και ειδικά όταν τα επίπεδα της ορατότητας μειώνονται κάτω από τα 10m. Η επίδραση του καπνού στην ταχύτητα κίνησης αξιολογείται βάση της ορατότητας (visibility), όπως λαμβάνεται από τα στοιχεία της ανάλυσης που γίνεται στο Pyrosim. Στη συνέχεια μπορεί να γίνει προσαρμογή της ταχύτητας κίνησης των χρηστών βάση της ορατότητάς τους καθ' όλη την διάρκεια της εκκένωσης με χρήση του διαγράμματος 4.6. Επειδή όμως το Pathfinder δε μπορεί να κάνει άμεσα αυτή τη συσχέτιση, δηλαδή να μειώνει αυτόματα την ταχύτητα κίνησης των χρηστών ανάλογα την ορατότητα τους στο χώρο που βρίσκονται, έπρεπε να γίνει από το χρήστη. Η λύση δόθηκε χωρίζοντας το σταθμό σε διάφορους χώρους ανάλογα την εξάπλωση και τη συγκέντρωση του καπνού σε κάθε σενάριο, ο χωρισμός μπόρεσε να γίνει λόγω των στοιχείων που υπήρχαν από τις Gas Phase Devices και από τα Slices που μετράνε τα επίπεδα της ορατότητας. Αρά με βάσει τα αποτελέσματα των σεναρίων της

φωτιάς για τις περιβαλλοντικές συνθήκες εισάγεται η ταχύτητα των χρηστών στο πρόγραμμα εκκένωσης και υπολογίζεται ο νέος απαραίτητος χρόνος εκκένωσης. Στη συνέχεια με βάση τα όρια για ασφαλή εκκένωση γίνεται σχολιασμός για την αποτελεσματικότητα της εκκένωσης. Οι τιμές της ταχύτητας κίνησης των χρηστών στο καφέ χώρο ανάλογα την ορατότητα παρουσιάζονται στο πίνακα 7.14, τα όρια χωριστήκαν έτσι με βάση τα στοιχεία του γραφήματος 4.6. Ο τρόπος εισαγωγής της μείωσης της ταχύτητας κίνησης βάση της ορατότητας, το χώρο και το χρόνο έγινε με τη χρήση της εντολής τροποποίηση ταχύτητας (Speed Modifier) σε όλες τις χωρισμένες περιοχές του σταθμού, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 7.8.

Πίνακας 7.14: Ταχύτητα κίνησης ανάλογα την ορατότητα

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 7.8: Καρτέλα εισαγωγής του Speed Modifier

Στη παρούσα εργασία επιλέχθηκε η προσομοίωση της κίνησης των χρηστών να γίνει και με τις δυο ρυθμίσεις. Έτσι ώστε να αξιολογηθεί ποια από τις δυο είναι πιο κατάλληλη βάση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης. Τέλος επιλέχθηκαν κάποιοι χρήστες βάση της αρχικής τους θέσης στο σταθμό και του χρόνου εκκένωσης τους, για τους οποίους πάρθηκαν δεδομένα για το δείκτη FED of Toxicity (Fractional Effective Dose- Κλασματική δραστική δόση) και για την θερμοκρασία στην οποία εκτέθηκαν καθ' όλη τη διάρκεια της εκκένωσης. Τα αποτελέσματα για κάθε χρήστη ξεχωριστά δίδονται σε ένα αρχείο Excel όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 7.9.

1	t	id	name	active	x	y	z	v	distance	location	_goal_stai	CARBON DIOXIDE VOLUME FRACTION	CARBON MONOXIDE VOLUME FRACTION	OXYGEN VOLUME FRACTION	SOOT VISIBILITY	TEMPERATURE	*FED_TOTAL*
2	s				m	m	m	m/s	m			mol/mol	mol/mol	mol/mol	m	C	
3	0	192	final1	0	25	1,7	0	0	0	Room08_1	0	0	0	0	0	0	0
4	1	192	final1	1	24	1	0	0,4	1,14053	Room08_1	1	0,000387	0	0,207823	30	19,999828	0
5	2	192	final1	1	24	-0	0	1,2	2,28221	Room08_1	1	0,000387	0	0,207823	30	20,000021	0
6	3	192	final1	1	24	-1	0	1,2	3,48221	Room08_1	1	0,000387	0	0,207823	30	19,999926	0
7	4	192	final1	1	24	-3	0	1,2	4,68221	Room08_1	1	0,000387	0	0,207823	30	19,999949	0
8	5	192	final1	1	24	-3	0	0	5,27695	Room08_1	1	0,000387	0	0,207823	30	20,000036	0
9	6	192	final1	1	24	-3	0	0	5,27695	Room08_1	1	0,000387	0	0,207823	30	20,000036	0
10	7	192	final1	1	24	-3	0	0	5,27695	Room08_1	1	0,000387	0	0,207823	30	20,000096	0
11	8	192	final1	1	24	-3	0	0	5,27695	Room08_1	1	0,000387	0	0,207823	30	20,000085	0
12	9	192	final1	1	24	-3	0	0	5,27695	Room08_1	1	0,000387	0	0,207823	30	20,000073	0
13	10	192	final1	1	24	-3	0	0	5,27695	Room08_1	1	0,000387	0	0,207823	30	20,000061	0
14	11	192	final1	1	24	-3	0	0	5,27695	Room08_1	1	0,000387	0	0,207823	30	20,000049	0
15	12	192	final1	1	24	-3	0	0	5,27695	Room08_1	1	0,000387	0	0,207823	30	20,000037	0
16	13	192	final1	1	24	-3	0	0	5,27695	Room08_1	1	0,000387	0	0,207823	30	20,00016	0
17	14	192	final1	1	24	-3	0	0	5,27695	Room08_1	1	0,000387	0	0,207823	30	20,00015	0
18	15	192	final1	1	24	-3	0	0	5,27695	Room08_1	1	0,000387	0	0,207823	30	20,000139	0
19	16	192	final1	1	24	-3	0	0	5,27695	Room08_1	1	0,000387	0	0,207823	30	20,000129	0
20	17	192	final1	1	24	-3	0	0	5,27695	Room08_1	1	0,000387	0	0,207823	30	20,000118	0
21	18	192	final1	1	24	-3	0	0	5,27695	Room08_1	1	0,000387	0	0,207823	30	20,000108	0
22	19	192	final1	1	24	-3	0	0	5,27695	Room08_1	1	0,000387	0	0,207823	30	20,001292	0
23	20	192	final1	1	24	-3	0	0	5,27695	Room08_1	1	0,000387	0	0,207823	30	20,00107	0
24	21	192	final1	1	24	-3	0	0	5,27695	Room08_1	1	0,000387	0	0,207823	30	20,000848	0
25	22	192	final1	1	24	-3	0	0	5,27695	Room08_1	1	0,000387	0	0,207823	30	20,000626	0
26	23	192	final1	1	24	-3	0	0	5,27695	Room08_1	1	0,000387	0	0,207823	30	20,000404	0
27	24	192	final1	1	24	-3	0	0	5,27695	Room08_1	1	0,000387	0	0,207823	30	20,000182	0
28	25	192	final1	1	24	-3	0	0	5,27695	Room08_1	1	0,000387	0	0,207823	30	20,004619	0
29	26	192	final1	1	24	-3	0	0	5,27695	Room08_1	1	0,000387	0	0,207823	30	20,004	0

Εικόνα 7.9: Παρουσίαση αποτελεσμάτων σε φύλλο excel

7.5. Έλεγχος διαδικασίας και αποτελεσμάτων της Εκκένωσης

Ο έλεγχος θα γίνει εξετάζοντας τους χρόνους εκκένωσης και βάση των ορίων των δεικτών FED of Toxicity και FED of Heat που θα προκύψουν για τους χρήστες του σταθμού. Άρα ο έλεγχος περιλαμβάνει:

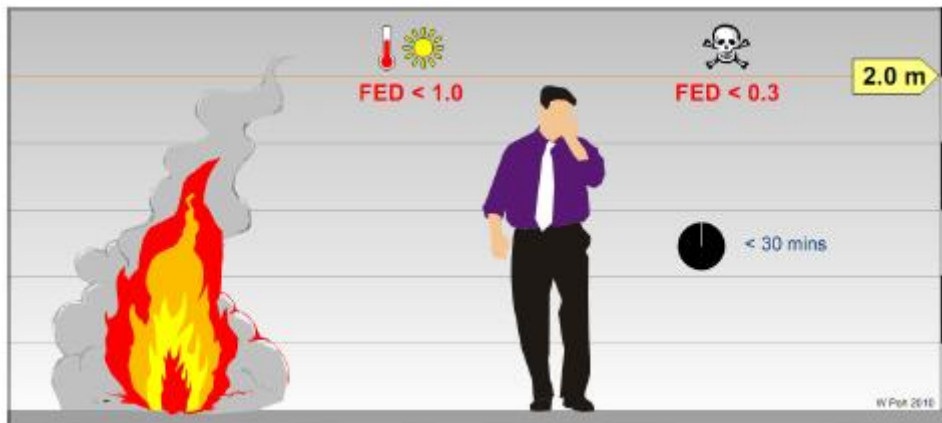
- Έλεγχος χρόνων εκκένωσης για την πλατφόρμα και όλου του σταθμού ως ασφαλές σημείο
- Έλεγχος των τιμών του δείκτη FED of Toxicity (Fractional Effective Dose) για τους χρήστες του σταθμού καθ' όλη τη διάρκεια της εκκένωσης.
- Έλεγχος των τιμών του δείκτη FED of Heat (Fractional Effective Dose) για τους χρήστες του σταθμού καθ' όλη τη διάρκεια της εκκένωσης.

Ο NFPA 130 έχει ορίσει ως μέγιστο χρόνο εκκένωσης για την πλατφόρμα του σταθμού τα 4 λεπτά και τα 6 λεπτά για πλήρη εκκένωση του σταθμού ως ασφαλές σημείο. Τα συγκεκριμένα όρια αναφέρονται σε συνθήκες εκκένωσης χωρίς κάποιο συμβάν (φωτιά, έκρηξη κ.α.), αρά δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση των χρόνων εκκένωσης που προκύπτουν από τις αναλύσεις. Αλλά θα πραγματοποιηθεί μια ποιοτική σύγκρισή των χρόνων.

Ότι αφορά το δείκτη FED of Toxicity (Fractional Effective Dose- Κλασματική δραστική δόση) περιγράφει τη μη ανεκτή από τον ανθρώπινο οργανισμό δόση (Incapacitating dose) λόγω της αύξησης των συγκεντρώσεων του διοξειδίου και μονοξειδίου του άνθρακα και της ταυτόχρονης μείωσης της συγκέντρωσης του οξυγόνου. Ο κανονισμός αναφέρει ότι τιμές του δείκτη ≥ 1 επιφέρουν θάνατο και ότι τα ανεκτά όρια είναι για τιμές $\leq 0,3$ γιατί πάνω από αυτές παρουσιάζονται διαφορά πρόβλημα (αναπνευστικά, αισθήσεων κ.α.). Άρα ως μέγιστο επιτρεπτό όριο για το δείκτη FED of Toxicity τίθεται η τιμή 0,3.

Τέλος ότι αφορά το δείκτη FED of Heat περιγράφει τη συνολική δραστική δόση θερμότητας που δέχεται ένας άνθρωπος λόγω θερμότητας συναγωγής και ακτινοβολίας. Η θερμότητα λόγω συναγωγής έχει να κάνει με τη θερμοκρασιακή διαφορά του ανθρώπινου σώματος με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος χώρου. Η θερμότητα λόγω ακτινοβολίας είναι η θερμότητα που υιώθει κάποιος όταν βρίσκεται κοντά σε μια φωτιά και προφανώς όσο πλησιάζουμε στη φωτιά

γίνεται εντονότερη. Ο κανονισμός αναφέρει ότι για τιμές του δείκτη ≥ 1 οι συνθήκες στο χώρο αρχίζουν να γίνονται ανυπόφορες για τον ανθρώπινο οργανισμό. Άρα ως μέγιστο επιτρεπτό όριο για το δείκτη FED of Heat τίθεται η τιμή 1.



Εικόνα 7.10: οριακές τιμές των δεικτών FED (AFC 2010)

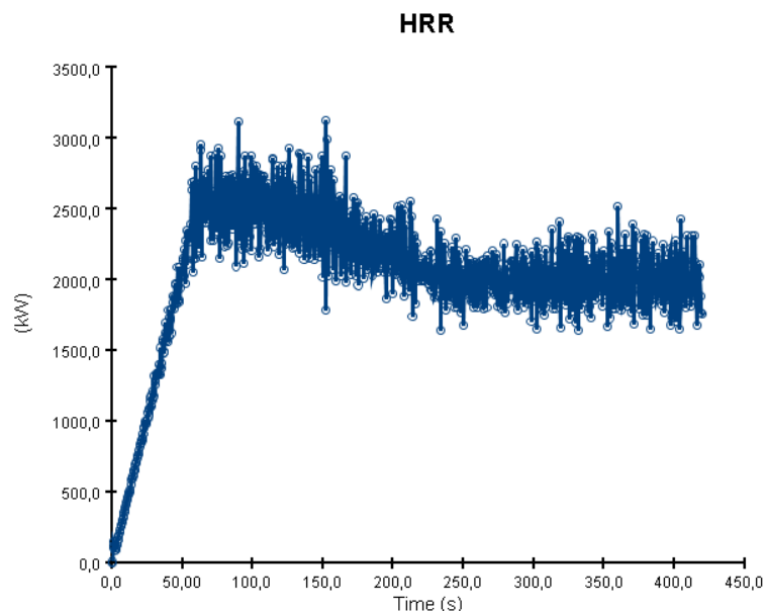
8. Αποτελέσματα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις που έγιναν στα προγράμματα του Pyrosim και του Pathfinder. Αρχικά θα παρουσιαστούν διάφορα διαγράμματα σχετικά με την εξέλιξη της φωτιάς και την εξάπλωση των προϊόντων της καύσης στο σταθμό για κάθε σενάριο ξεχωριστά, τα οποία είναι βάση των προσομοιώσεων που έγιναν στο Pyrosim. Στη συνέχεια θα γίνει η ανάλυση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης της εκκένωσης που έγινε στο Pathfinder για όλα τα σενάρια. Η ανάλυση θα βασιστεί στη σύγκριση των χρόνων εκκένωσης ανάλογα το σενάρια και τον τρόπο κίνησης των χρηστών. Τέλος θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα για τους δείκτες FED για τους κρίσιμους χρήστες του σταθμού όλων των σεναρίων.

8.1. Αποτελέσματα Pyrosim

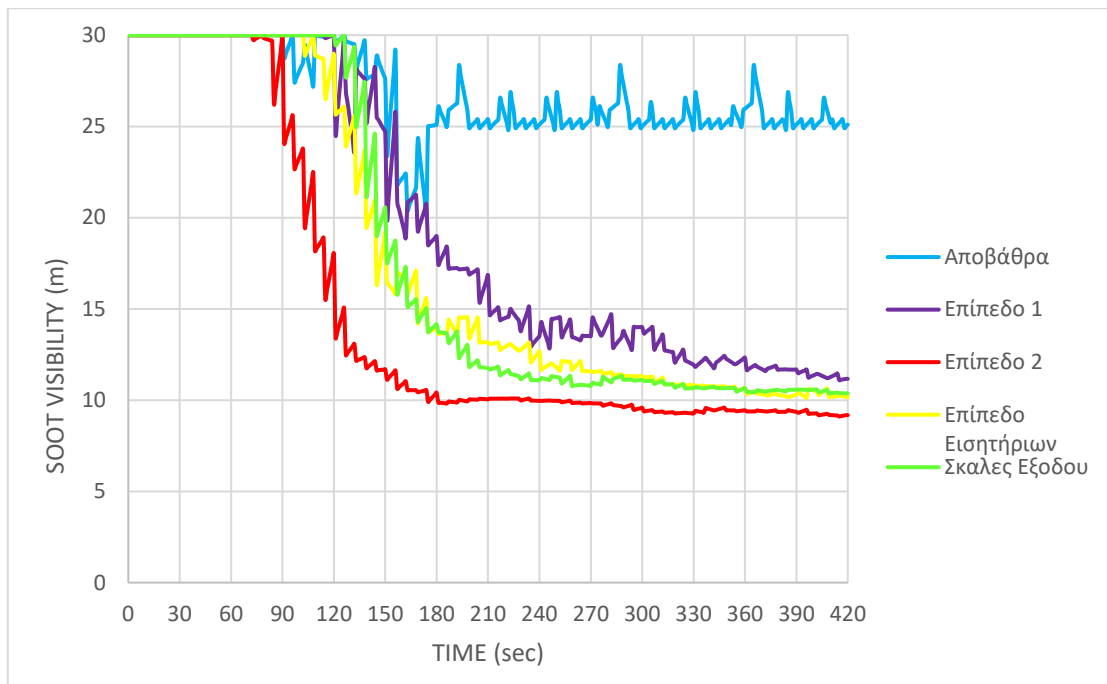
8.1.1. 1° Σενάριο

Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας HRR (Heat Release Rate) της εστίας προσομοιώθηκε από το Pyrosim όπως παρουσιάζεται στο διάγραμμα 8.1.

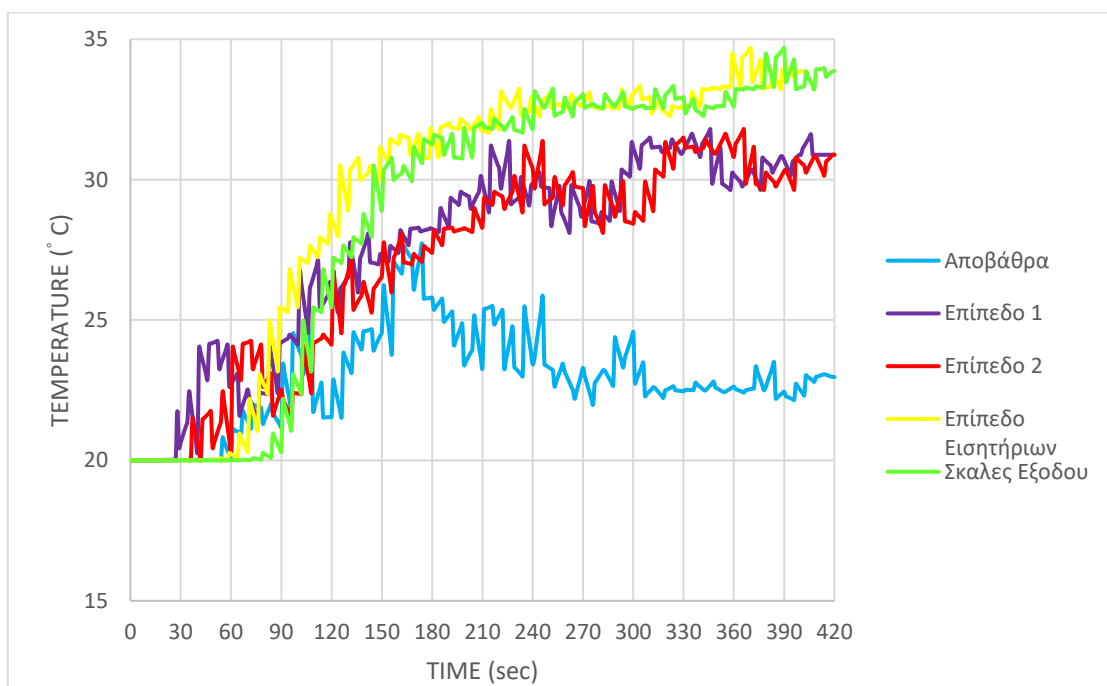


Γράφημα 8.1: HRR εστίας πρώτου σεναρίου

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενα κεφάλαια έγινε χρήση SLICES και DEVICES για να μπορέσει να κατανοηθεί και να αποτυπωθεί πιο ευκολά η εξάπλωσή του καπνού στο χώρο του σταθμού. Από τα DEVICES που τοποθετήθηκαν σε διάφορα κρίσιμα σημεία του σταθμού όπως η αποβάθρα, το επίπεδο 1 και 2, το επίπεδο εισιτηρίων και στις σκάλες εξόδου προκύπτουν τα ακόλουθα διαγράμματα. Στο διάγραμμά 8.2 παρουσιάζεται η μείωση της ορατότητας στους εν λόγω χώρους με τη πάροδο του χρόνου και στο διάγραμμά 8.3 παρουσιάζεται η αύξηση της θερμοκρασίας στους εν λόγω χώρους με τη πάροδο του χρόνου. Διάγραμμα για τις συγκεντρώσεις του μονοξειδίου του άνθρακα δεν παρουσιάζεται λόγω των αμελητέων τιμών που προέκυψαν βάση της ανάλυσης.

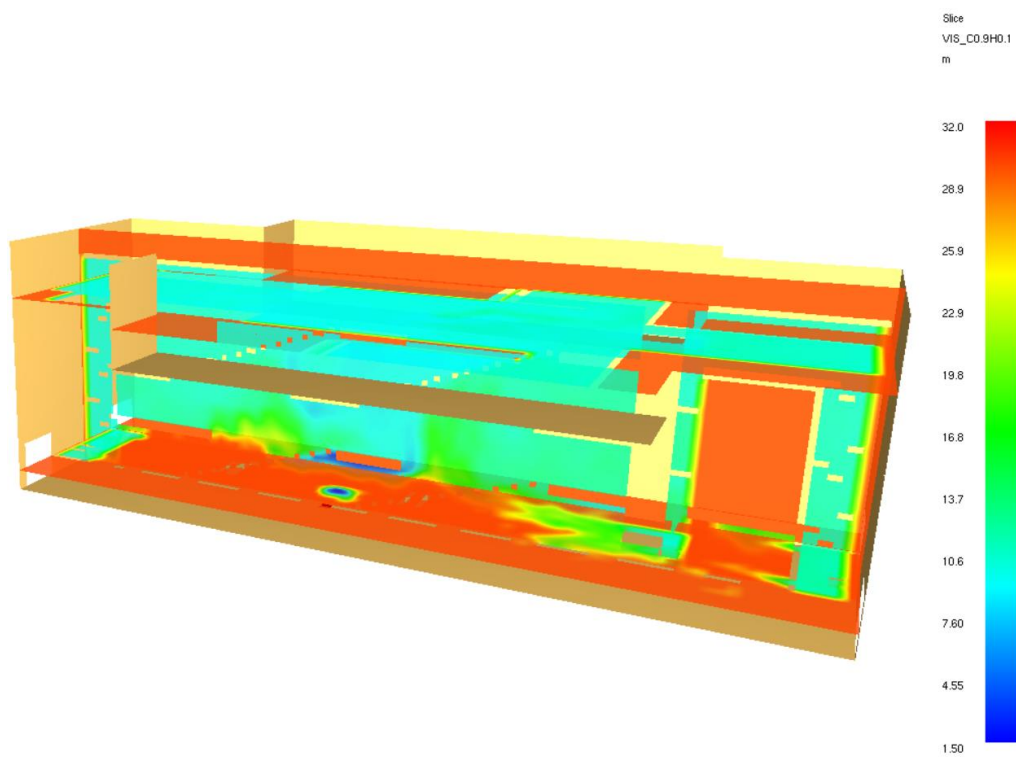


Γράφημα 8.2: ορατότητας στους χώρους του σταθμού κατά την εκκένωση (σενάριο 1)



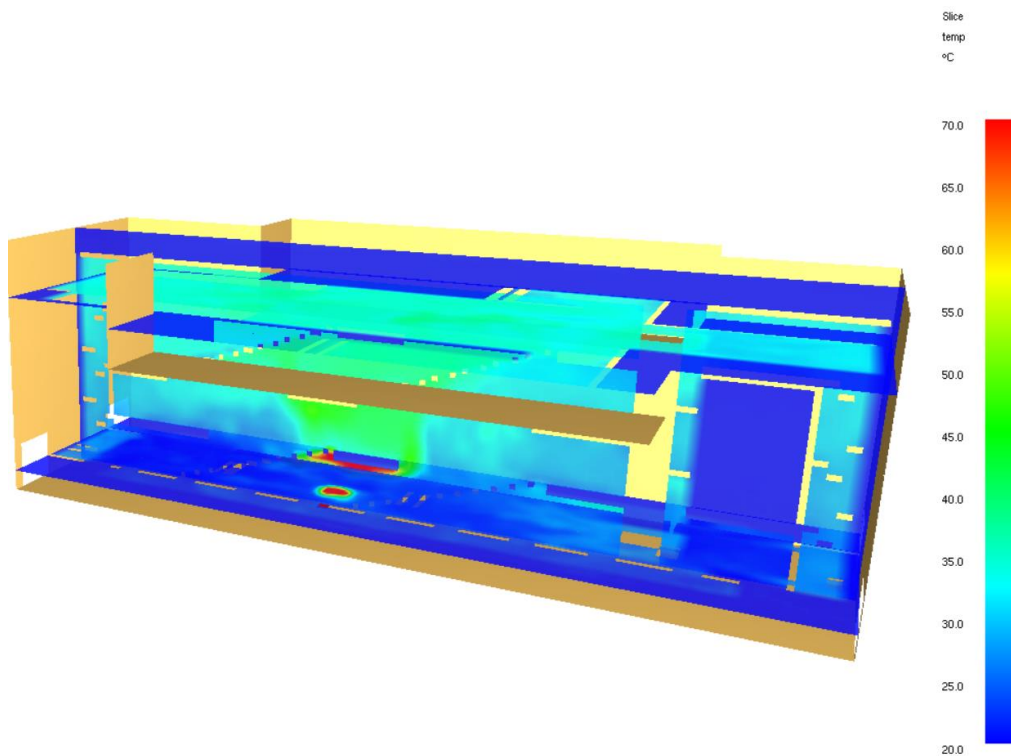
Γράφημα 8.3: θερμοκρασία στους χώρους του σταθμού κατά την εκκένωση (σενάριο 1)

Τα SLICES που χρησιμοποιήθηκαν είναι για τη μέτρηση της ορατότητας και της θερμοκρασίας. Χρησιμοποιήθηκαν τρία για κάθε μέγεθος και τοποθετήθηκαν στην αποβάθρα, στο επίπεδο έκδοσης των εισιτηρίων και ένα που διέρχεται από όλες της εσωτερικές σκάλες του σταθμού. Στην εικόνα 8.1 παρουσιάζονται τα SLICES για την ορατότητα. Από τα δεδομένα της προσομοίωσης προκύπτει ότι το επίπεδο της αποβάθρα δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από την εξάπλωση του καπνού, ενώ τα υπόλοιπα επίπεδα γεμίζουν σταδιακά καπνό. Μετά τα 180 sec έχει γεμίσει σχεδόν όλος ο σταθμός καπνό, πρέπει να σημειωθεί ότι η πυκνότητα του καπνού είναι μικρή, μειώνοντας την ορατότητα περίπου στα 10m. Τα συγκεκριμένα επίπεδα ορατότητας δεν επηρεάζουν τη κίνηση των χρηστών με βάση το γράφημα 4.6.



Εικόνα 8.1: SLICES για την ορατότητα το χρόνο 420sec (σενάριο 1)

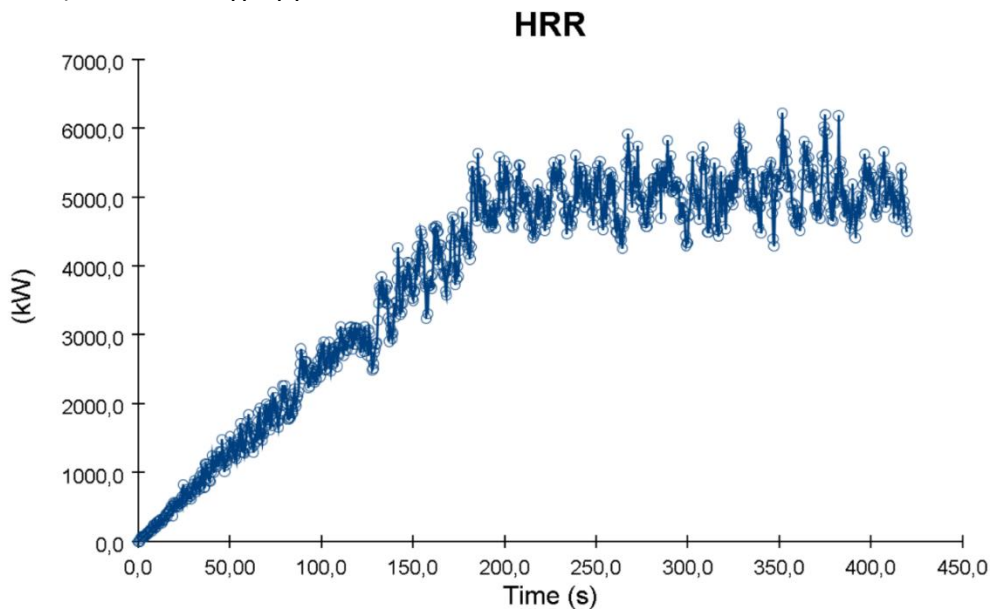
Στην εικόνα 8.2 παρουσιάζονται τα SLICES για την θερμοκρασία. Από τα δεδομένα της προσομοίωσης προκύπτει ότι το επίπεδο θερμοκρασίας της αποβάθρα δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από την εξάπλωση του καπνού καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται μόνο κατά πέντε βαθμούς. Στα υπόλοιπα επίπεδα η θερμοκρασία αυξάνεται σταδιακά. Μετά τα 420 sec η μέση θερμοκρασία στο σταθμό είναι γύρω στους 45°C. Πρέπει να σημειωθεί ότι η μεγαλύτερη θερμοκρασία εντοπίζεται στις σκάλες που είναι πάνω από την εστία με τιμή γύρω στους 60°C. Τα συγκεκριμένα επίπεδα θερμοκρασίας για το χρονικό διάστημα που διαρκή η εκκένωση δεν επηρεάζουν σημαντικά την υγεία των χρηστών.



Εικόνα 8.2: SLICES για τη θερμοκρασία το χρόνο 420sec (σενάριο 1)

8.1.2. 2° Σενάριο

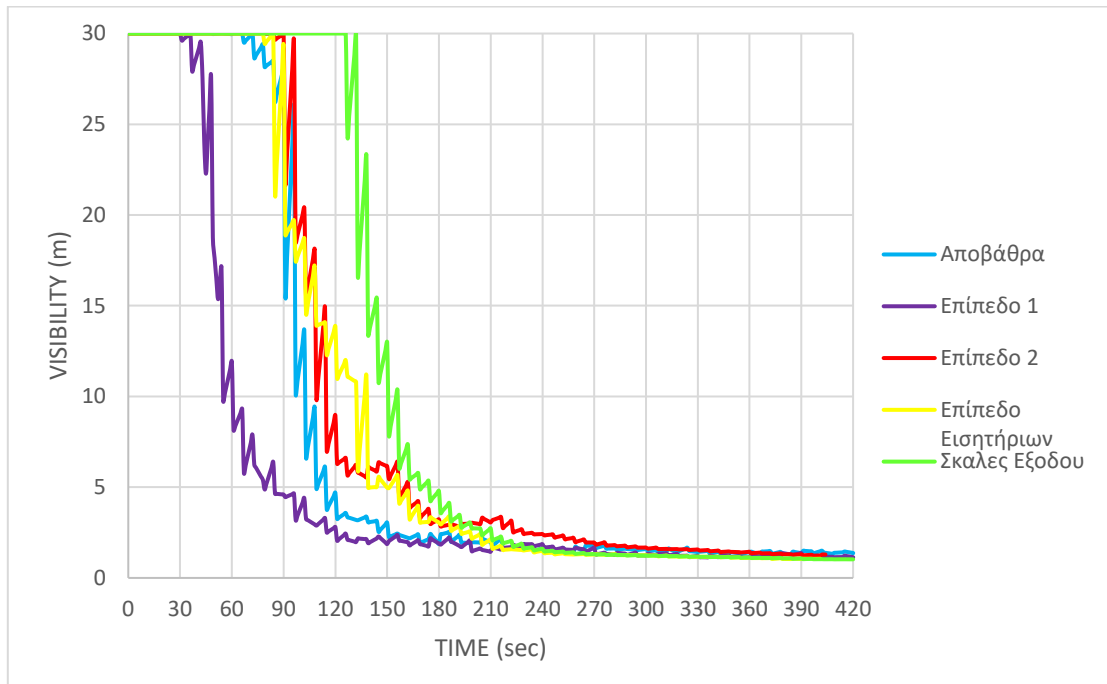
Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας HRR (Heat Release Rate) της εστίας προσομοιώθηκε από το Pyrosim όπως παρουσιάζεται στο διάγραμμα 8.4.



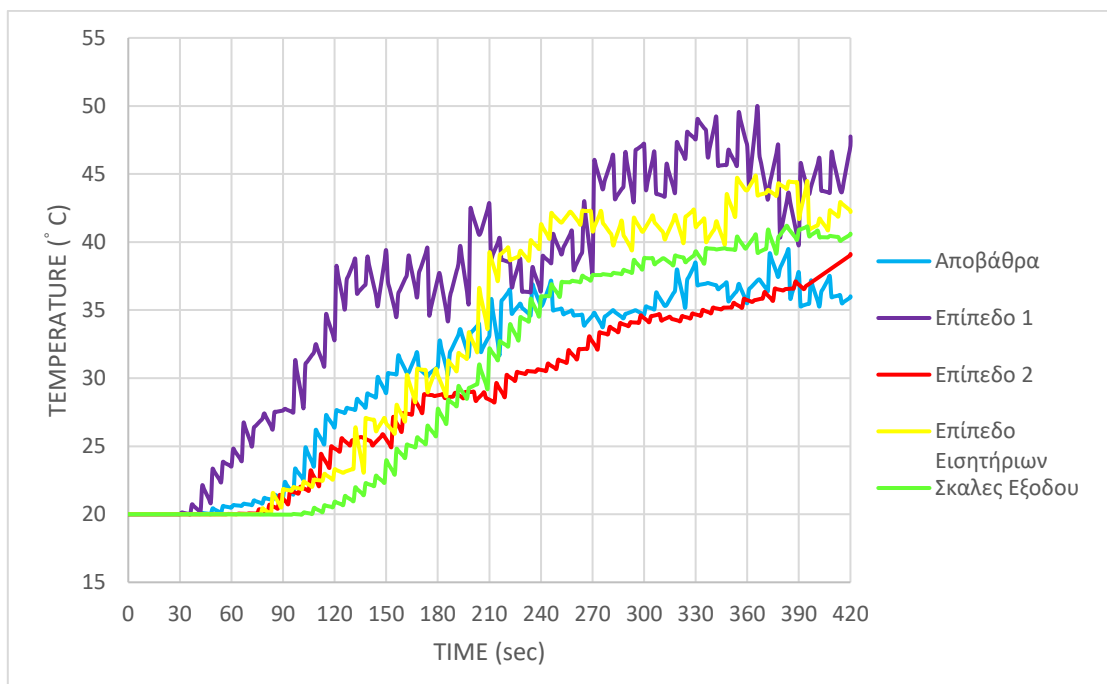
Γράφημα 8.4: HRR εστίας δευτέρου σεναρίου

Από τα DEVICES που τοποθετήθηκαν σε διαφορά κρίσιμα σημεία του σταθμού όπως η αποβάθρα, το επίπεδο 1 και 2, το επίπεδο εισιτηρίων και στις σκάλες εξόδου προκύπτουν τα ακόλουθα διαγράμματα. Στο διάγραμμά 8.5 παρουσιάζεται η μείωση της ορατότητας στους εν λόγω χώρους με τη πάροδο του χρόνου και στο διάγραμμά 8.6 παρουσιάζεται η αύξηση της θερμοκρασίας στους εν λόγω χώρους με τη πάροδο του χρόνου. Οι συγκεντρώσεις του μονοξειδίου του άνθρακα

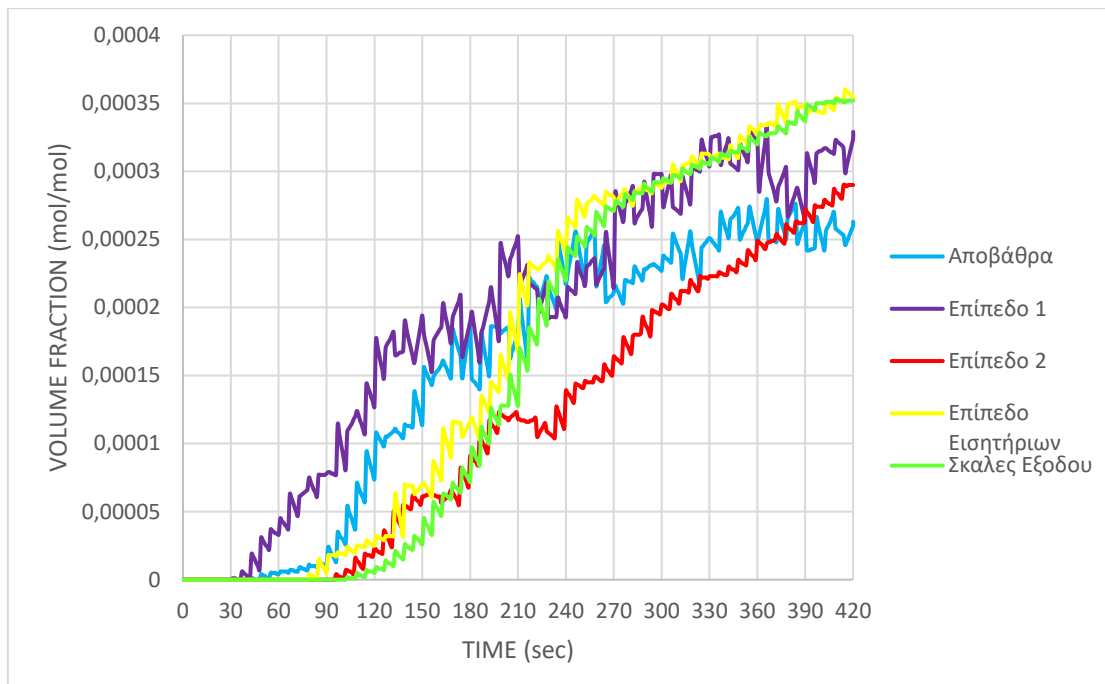
παρουσιάζονται στο διάγραμμα 8.7 γι' αυτό το σενάριο αλλά οι τιμές που προέκυψαν βάση της ανάλυσης δεν είναι επικίνδυνες για τον άνθρωπο.



Γράφημα 8.5: ορατότητα στους χώρους του σταθμού κατά την εκκένωση (σενάριο 2)



Γράφημα 8.6: θερμοκρασία στους χώρους του σταθμού κατά την εκκένωση (σενάριο 2)



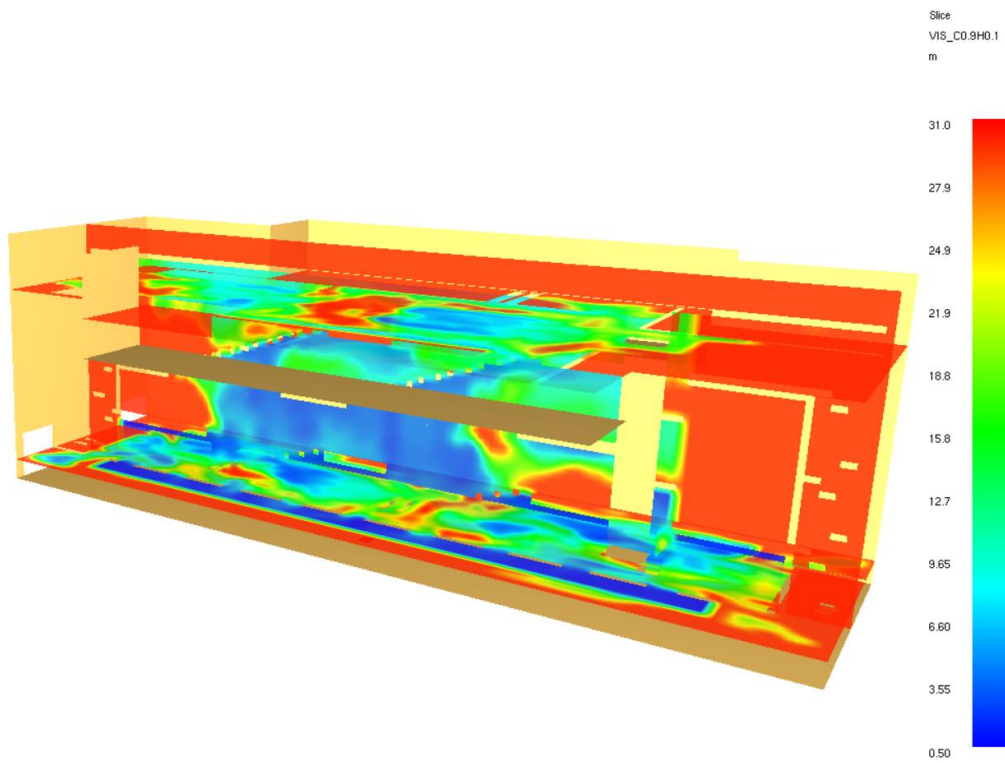
Γράφημα 8.7: Συγκέντρωση CO στους χώρους του σταθμού κατά την εκκένωση (σενάριο 2)

Τα SLICES που χρησιμοποιήθηκαν είναι για τη μέτρηση της ορατότητας, της θερμοκρασίας και του μονοξειδίου του άνθρακα. Χρησιμοποιήθηκαν τρία για κάθε μέγεθος και τοποθετήθηκαν στην αποβάθρα, στο επίπεδο έκδοσης των εισιτήριων και ένα που διέρχεται από όλες της εσωτερικές σκάλες του σταθμού.

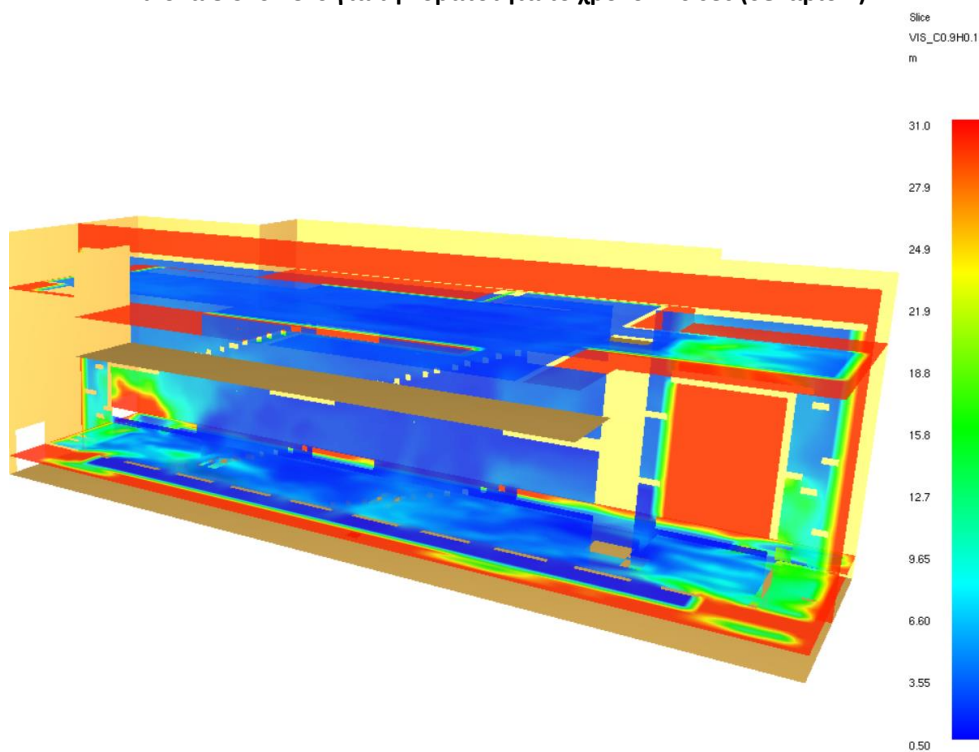
Στις εικόνες 8.3 και 8.4 παρουσιάζονται τα SLICES για την ορατότητα για τις χρονικές στιγμές των 120 και 180 sec. Από τα δεδομένα της προσομοίωσης προκύπτει ότι όλα τα επίπεδα γεμίζουν σταδιακά καπνό μέχρι να γεμίσουν πλήρως από πυκνό καπνό.

Μέχρι τα πρώτα 120 sec σχεδόν όλος ο σταθμός έχει γεμίσει καπνό και η ορατότητα σχεδόν σε όλο το σταθμό έχει πέσει κάτω από το όριο των 10m όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 8.3 και συνεπώς μειώνεται σταδιακά η ταχύτητα κίνησης των χρηστών.

Μετά τα 180 sec σχεδόν όλος ο σταθμός έχει γεμίσει πυκνό καπνό και η ορατότητα σχεδόν σε όλο το σταθμό έχει πέσει κάτω από το όριο των 4m όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 8.4. Αυτό συνεπάγεται ότι από τη χρονική στιγμή των 180 sec και έπειτα όσοι χρήστες είναι μέσα στο σταθμό θα κινούνται με την ελάχιστη ταχύτητα κίνησης εξαιτίας της μηδενικής ορατότητας που επικρατεί.



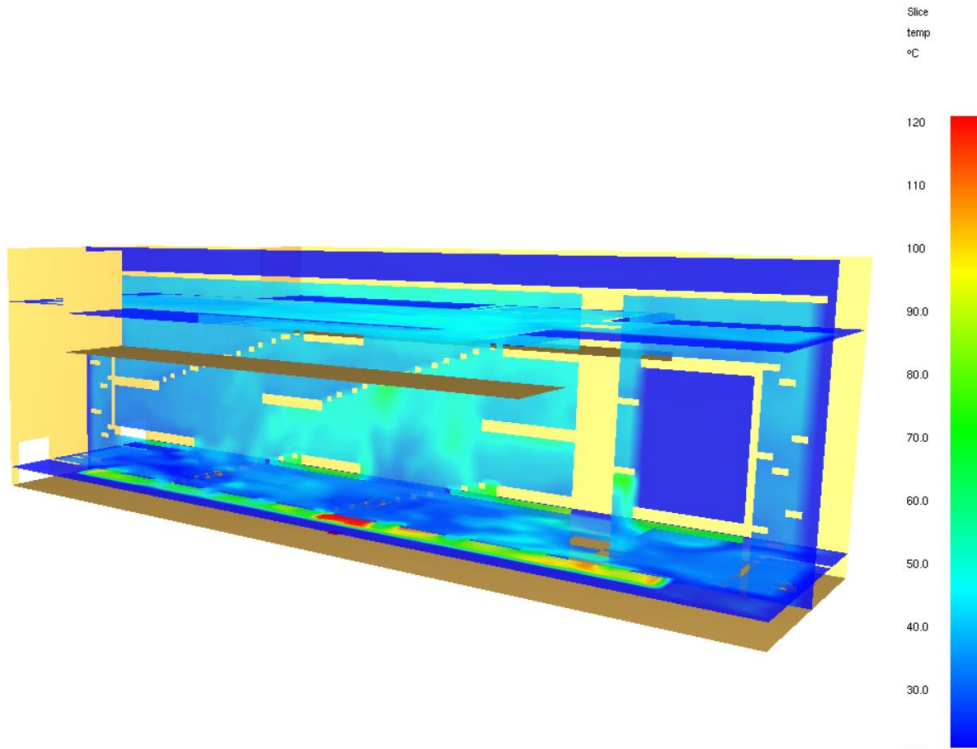
Εικόνα 8.3: SLICES για την ορατότητα το χρόνο 120 sec (σενάριο 2)



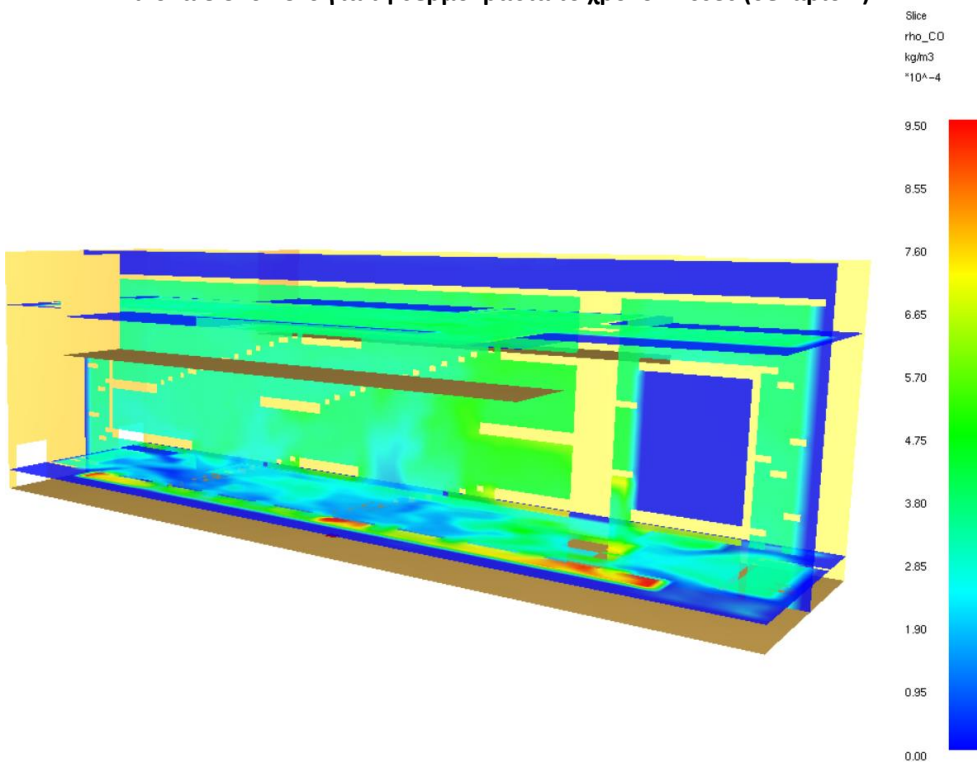
Εικόνα 8.4: SLICES για την ορατότητα το χρόνο 180 sec (σενάριο 2)

Στην εικόνα 8.5 παρουσιάζονται τα SLICES για την θερμοκρασία. Από τα δεδομένα της προσομοίωσης προκύπτει η θερμοκρασία αυξάνεται σταδιακά σε όλα τα επίπεδα. Μετά τα 250 sec η μέση θερμοκρασία στο σταθμό είναι γύρω στους 55°C, πρέπει να σημειωθεί ότι η μεγαλύτερη θερμοκρασία εντοπίζεται στην οροφή της αποβάθρας με τιμή γύρω στους 80°C. Τα συγκεκριμένα επίπεδα θερμοκρασίας για το χρονικό διάστημα που διαρκεί η εκκένωση δεν επηρεάζουν σημαντικά την υγεία των χρηστών.

Στην εικόνα 8.6 παρουσιάζονται τα SLICES για την πυκνότητα του CO στο σταθμό τη χρονική στιγμή 420 sec. Από τα δεδομένα της προσομοίωσης προκύπτει ότι η πυκνότητα του CO αυξάνεται σταδιακά σε όλα τα επίπεδα. Η μέση τιμή της πυκνότητας του CO στο σταθμό τη χρονική στιγμή 420 sec είναι 0,00045 g/L που ισούται με 1800 ppm (mol) και η μέγιστη 0,00062 g/L που ισούται με 2500 ppm (mol). Τα συγκεκριμένα επίπεδα μονοξειδίου του άνθρακα για το χρονικό διάστημα που διαρκεί η εκκένωση δεν επηρεάζουν σημαντικά την υγεία των χρηστών. Στο πίνακα 8.1 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για το σενάριο.



Εικόνα 8.5: SLICES για τη θερμοκρασία το χρόνο 420sec (σενάριο 2)



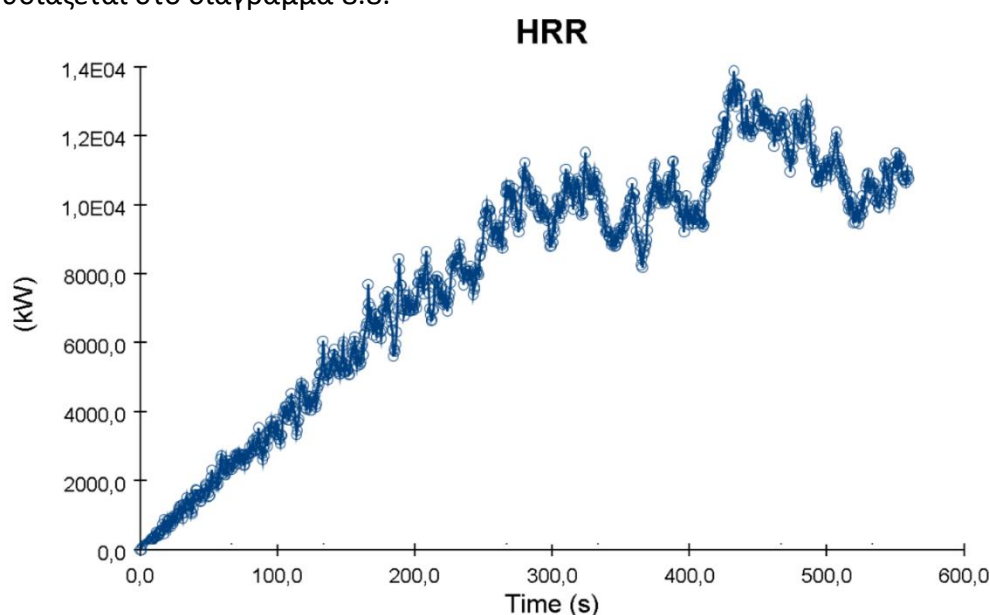
Εικόνα 8.6: SLICES για τη πυκνότητα του CO το χρόνο 420sec (σενάριο 2)

Πίνακας 8.1: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Σεναρίου 2

	Θερμοκρασία (°C)		Ορατότητα (m)		Συγκέντρωση CO (ppm)	
	Μέση	Μέγιστη	<10	<4	Μέση	Μέγιστη
Τιμή	55	80			1800	2500
Χρόνος (sec)	420	420	120	180	420	420

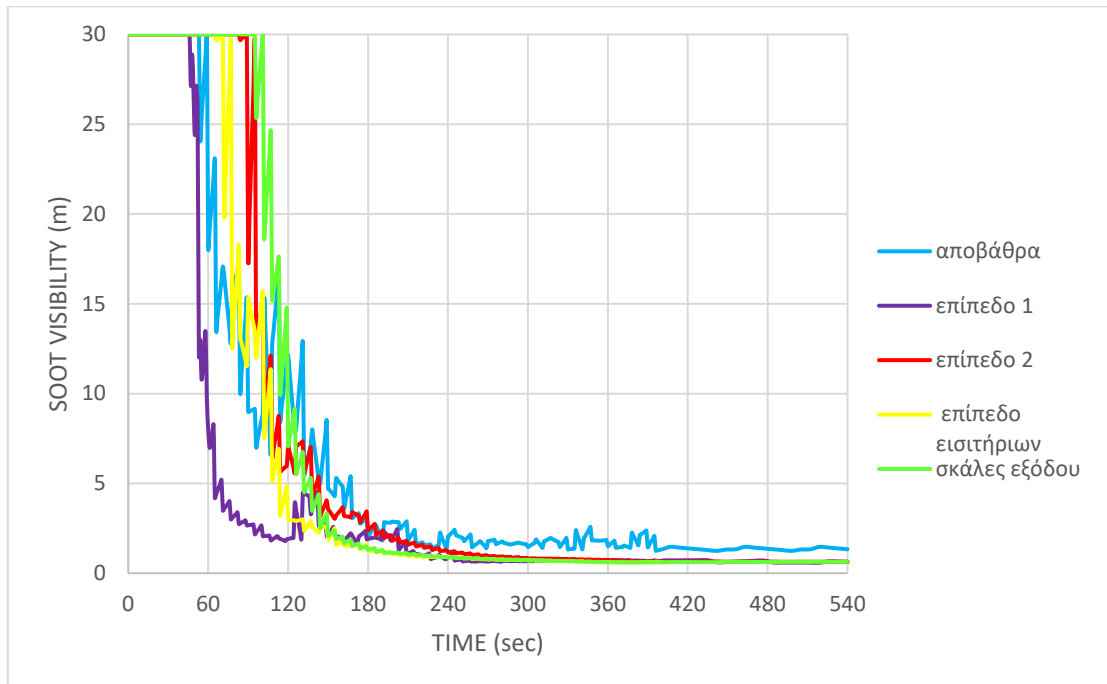
8.1.3. 3° Σενάριο

Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας HRR (Heat Release Rate) της εστίας προσομοιώθηκε από το Pyrosim όπως παρουσιάζεται στο διάγραμμα 8.8.

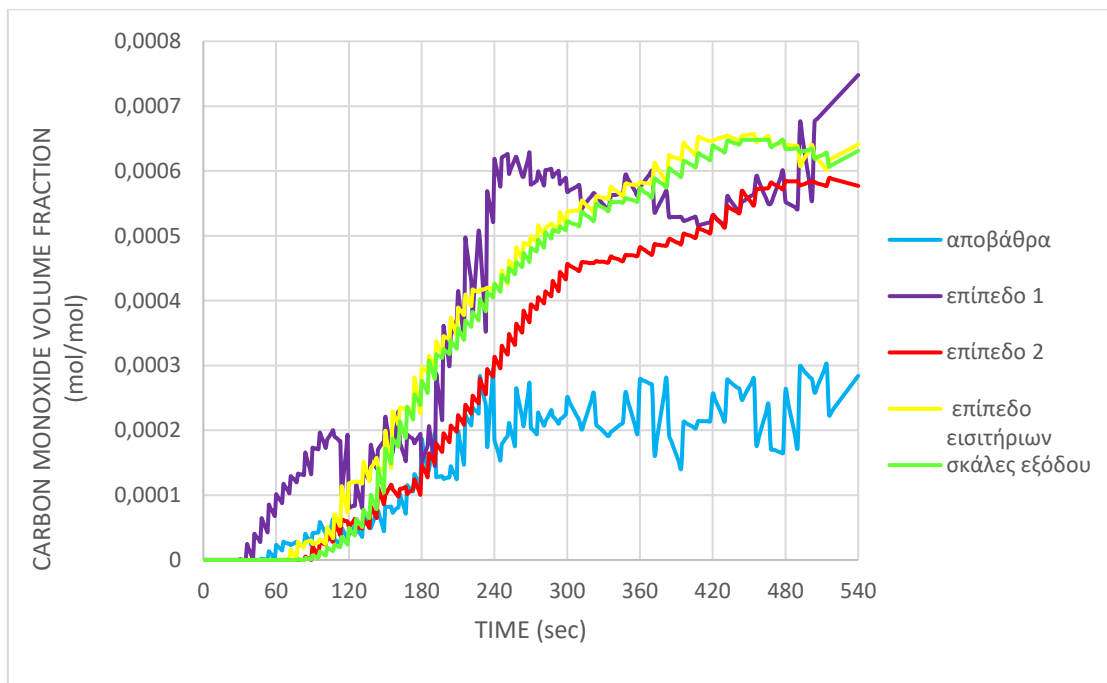


Γράφημα 8.8: HRR εστίας τρίτου σεναρίου

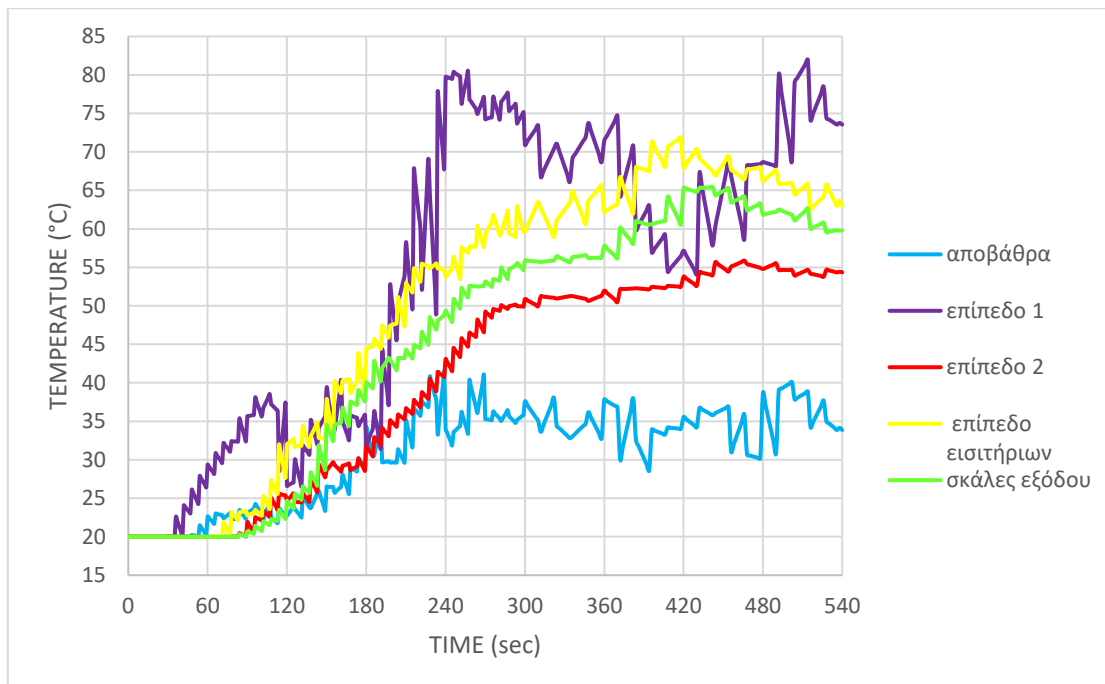
Από τα DEVICES που τοποθετήθηκαν σε διαφορά κρίσιμα σημεία του σταθμού όπως η αποβάθρα, το επίπεδο 1 και 2, το επίπεδο εισιτήριων και στις σκάλες εξόδου προκύπτουν τα ακόλουθα διαγράμματα. Στο διάγραμμά 8.9 παρουσιάζεται η μείωση της ορατότητας στους εν λόγω χώρους με τη πάροδο του χρόνου και στο διάγραμμά 8.10 παρουσιάζεται η αύξηση της θερμοκρασίας στους εν λόγω χώρους με τη πάροδο του χρόνου. Οι συγκεντρώσεις του μονοξειδίου του άνθρακα παρουσιάζονται στο διάγραμμα 8.11 γι' αυτό το σενάριο αλλά οι τιμές που προέκυψαν βάση της ανάλυσης δεν είναι επικίνδυνες για τον άνθρωπο.



Γράφημα 8.9: Θερμοκρασία στους χώρους του σταθμού κατά την εκκένωση (σενάριο 3)



Γράφημα 8.10: ορατότητα στους χώρους του σταθμού κατά την εκκένωση (σενάριο 3)



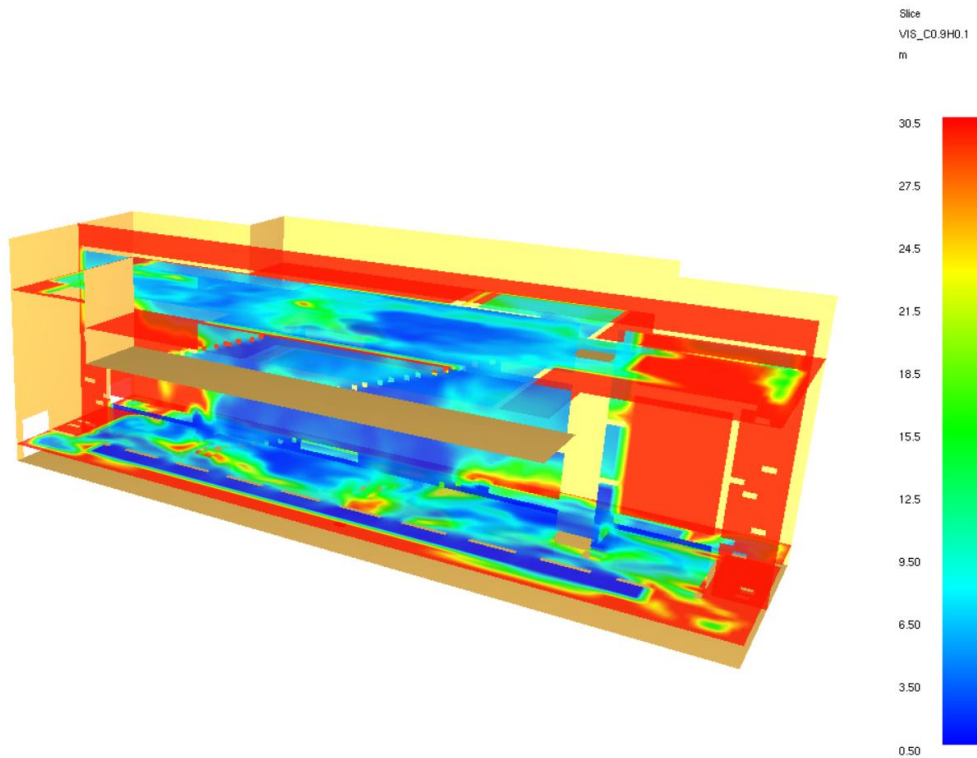
Γράφημα 8.11: συγκέντρωση CO στους χώρους του σταθμού κατά την εκκένωση (σενάριο 3)

Τα SLICES που χρησιμοποιήθηκαν είναι για τη μέτρηση της ορατότητας, της θερμοκρασίας και του μονοξειδίου του άνθρακα. Χρησιμοποιήθηκαν τρία για κάθε μέγεθος και τοποθετήθηκαν στην αποβάθρα, στο επίπεδο έκδοσης των εισιτηρίων και ένα που διέρχεται από όλες της εσωτερικές σκάλες του σταθμού.

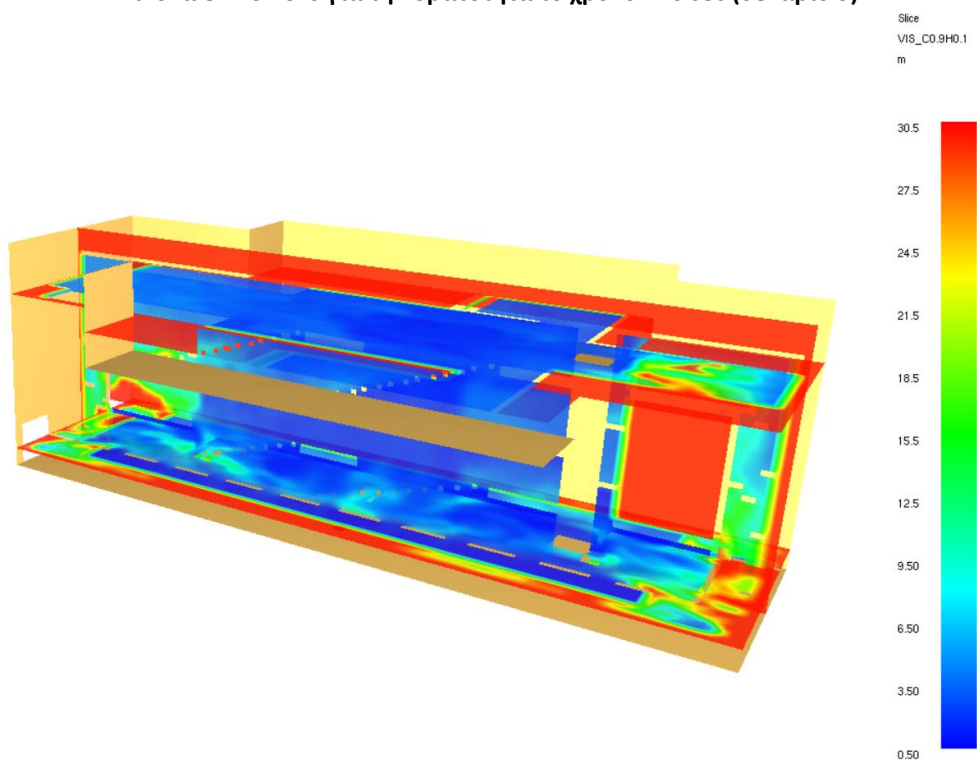
Στις εικόνες 8.7 και 8.8 παρουσιάζονται τα SLICES για την ορατότητα για τις χρονικές στιγμές των 110 και 140 sec. Από τα δεδομένα της προσομοίωσης προκύπτει ότι όλα τα επίπεδα γεμίζουν σταδιακά καπνό μέχρι να γεμίσουν πλήρως από πυκνό καπνό.

Μέχρι τα πρώτα 110 sec σχεδόν όλος ο σταθμός έχει γεμίσει καπνό και η ορατότητα σχεδόν σε όλο το σταθμό έχει πέσει κάτω από το όριο των 10m όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 8.7. Θυμίζουμε όταν η ορατότητα πέσει κάτω από τα 10m αρχίζει συνεπώς μειώνεται σταδιακά η ταχύτητα κίνησης των χρηστών.

Μετά τα 140 sec σχεδόν όλος ο σταθμός έχει γεμίσει πυκνό καπνό και η ορατότητα σχεδόν σε όλο το σταθμό έχει πέσει κάτω από το όριο των 4m όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 8.8. Αυτό συνεπάγεται ότι από τη χρονική στιγμή των 140 sec και έπειτα όσοι χρήστες είναι μέσα στο σταθμό θα κινούνται με την ελάχιστη ταχύτητα κίνησης εξαιτίας της μηδενικής ορατότητας που επικρατεί.

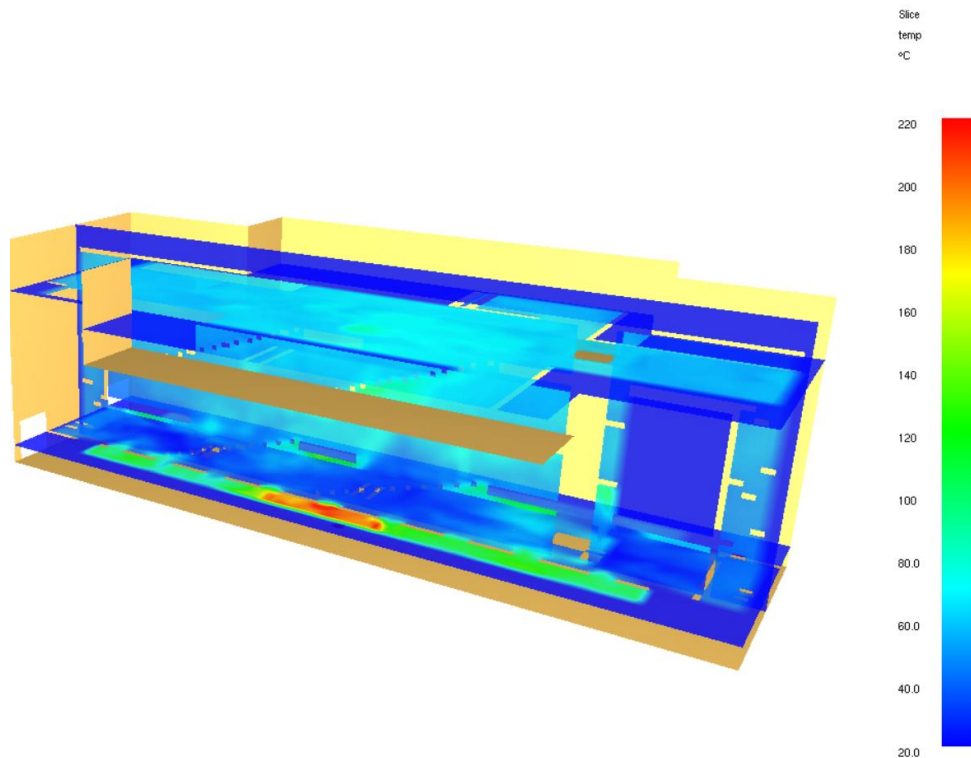


Εικόνα 8.7: SLICES για την ορατότητα το χρόνο 110 sec (σενάριο 3)



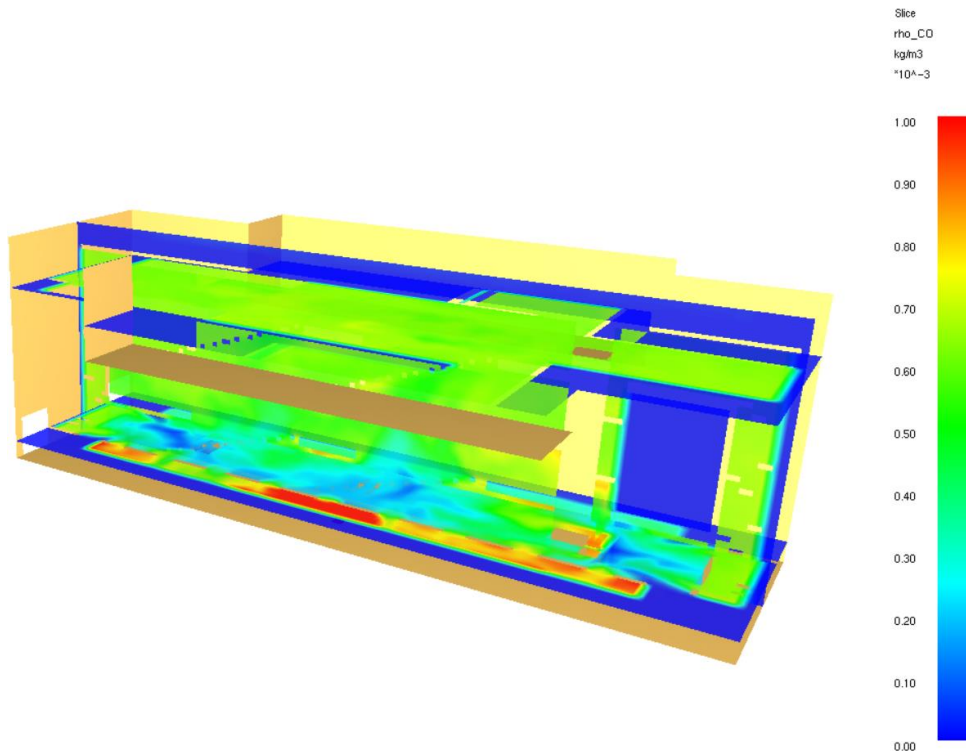
Εικόνα 8.8: SLICES για την ορατότητα το χρόνο 140 sec (σενάριο 3)

Στην εικόνα 8.9 παρουσιάζονται τα SLICES για την θερμοκρασία. Από τα δεδομένα της προσομοίωσης προκύπτει η θερμοκρασία αυξάνεται σταδιακά σε όλα τα επίπεδα. Η μέση θερμοκρασία στο σταθμό είναι γύρω στους 70°C, πρέπει να σημειωθεί ότι η μεγαλύτερη θερμοκρασία εντοπίζεται στην οροφή της αποβάθρας με τιμή γύρω στους 100°C. Τα συγκεκριμένα επίπεδα θερμοκρασίας για το χρονικό διάστημα που διαρκή η εκκένωση δεν επηρεάζουν σημαντικά την υγεία των χρηστών.



Εικόνα 8.9: : SLICES για τη θερμοκρασία το χρόνο 540sec (σενάριο 3)

Στην εικόνα 8.10 παρουσιάζονται τα SLICES για την πυκνότητα του CO στο σταθμό τη χρονική στιγμή 420 sec. Από τα δεδομένα της προσομοίωσης προκύπτει ότι η πυκνότητα του CO αυξάνεται σταδιακά σε όλα τα επίπεδα. Η μέση τιμή της πυκνότητας του CO στο σταθμό τη χρονική στιγμή 540 sec είναι 0,0006 g/L που ισούται με 2500 ppm (mol) και η μέγιστη 0,00075 g/L που ισούται με 3100 ppm (mol). Τα συγκεκριμένα επίπεδα μονοξειδίου του άνθρακα για το χρονικό διάστημα που διαρκή η εκκένωση δεν επηρεάζουν σημαντικά την υγεία των χρηστών. Στο πίνακα 8.2 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για το σενάριο.



Εικόνα 8.10: SLICES για τη πυκνότητα του CO το χρόνο 540sec (σενάριο 3)

Πίνακας 8.2: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Σενάριου 3

	Θερμοκρασία (°C)		Ορατότητα (m)		Συγκέντρωση CO (ppm)	
	Μέση	Μέγιστη	<10	<4	Μέση	Μέγιστη
Τιμή	70	100				
Χρόνος (sec)	540	540	110	140	540	540

8.2. Αποτελέσματα Pathfinder

Στις αναλύσεις που έγιναν στο Pathfinder χρησιμοποιήθηκαν και οι δυο επιλογές για τη κίνηση των χρηστών που παρέχει το πρόγραμμα. Οι επιλογές που παρέχονται για τη κίνηση των χρηστών είναι είτε με Steering Mode είτε με τη ρύθμιση SFPA. Κατά την προσομοίωση της εκκένωσης παρατηρήθηκε ότι η κίνηση των χρηστών δεν ήταν η αναμενόμενη και λογική ανεξαρτήτως σεναρίου φωτιάς και ρύθμισης κίνησης. Γι' αυτό το λόγο αποφασίστηκε να γίνει και νέα σειρά αναλύσεων στην οποία θα υπάρχουν διαδρομές κίνησης για ορισμένες ομάδες χρηστών οι οποίες θα είναι προκαθορισμένες. Το παραπάνω έγινε για να διαπιστωθεί αν μπορεί να μειωθεί ο χρόνος εκκένωσης του σταθμού αν οι χρήστες κινηθούν πιο ορθολογικά. Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της εκκένωσης του Pathfinder για όλα τα σενάρια ανάλογα τη ρύθμιση για το τρόπο κίνησης των χρηστών και για τις δυο σειρές αναλύσεων. Στο Παράρτημα Β παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της εκκένωσης για τα σενάρια 1 και 2.

Επίσης για την προσομοίωση των διάφορων εγκαταστάσεων του χώρου χρησιμοποιήθηκαν κάποιοι συμβολισμοί. Προκειμένου να γίνει κατανοητή η ανάλυση και τα αποτελέσματά της είναι απαραίτητη η ερμηνεία των χρησιμοποιούμενων συμβολισμών. Όσον αφορά τις σκάλες στο πρόγραμμα μπορεί να παρουσιάζονται σαν ανεξάρτητες, στην πράξη όμως λειτουργούν αθροιστικά, δηλαδή κυλιόμενες σκάλες δεξιά και αριστερά, σκάλες δίπλα στο ασανσέρ και σκάλες έκτακτης ανάγκης δεξιά και αριστερά. Αρά όσον αφορά την χρήση των κυλιόμενων σκαλών με συμβολισμό Stair 20 και Stair 21 που βρίσκονται στα ανατολικά της αποβάθρας εξετάζονται αθροιστικά γιατί οδηγούνε στην ίδια διαδρομή διαφυγής από το σταθμό. Ο Πίνακας 8.1 περιέχει τους συμβολισμούς και τους χώρους στους οποίους αντιστοιχούν.

Πίνακας 8.3: Συγκεντρωτικός πίνακας συμβολισμών και η αντίστοιχη ερμηνεία τους

Χώρος	Συμβολισμός
Η σκάλα διπλά από τον ανελκυστήρα που οδηγεί από την αποβάθρα στο ενδιάμεσο επίπεδο	Stair 13
Η σκάλα έκτακτης ανάγκης στα ανατολικά που οδηγεί από την αποβάθρα στο ενδιάμεσο επίπεδο	Stair 02
+Η σκάλα έκτακτης ανάγκης στα δυτικά που οδηγεί από την αποβάθρα στο ενδιάμεσο επίπεδο	Stair 19
Η κυλιόμενη σκάλα 1 στα ανατολικά που οδηγεί από την αποβάθρα στο ενδιάμεσο επίπεδο	Stair 20
Η κυλιόμενη σκάλα 2 στα ανατολικά που οδηγεί από την αποβάθρα στο ενδιάμεσο επίπεδο	Stair 21
Η κυλιόμενη σκάλα στα κεντρικά που οδηγεί από την αποβάθρα στο ενδιάμεσο επίπεδο	Stair 27

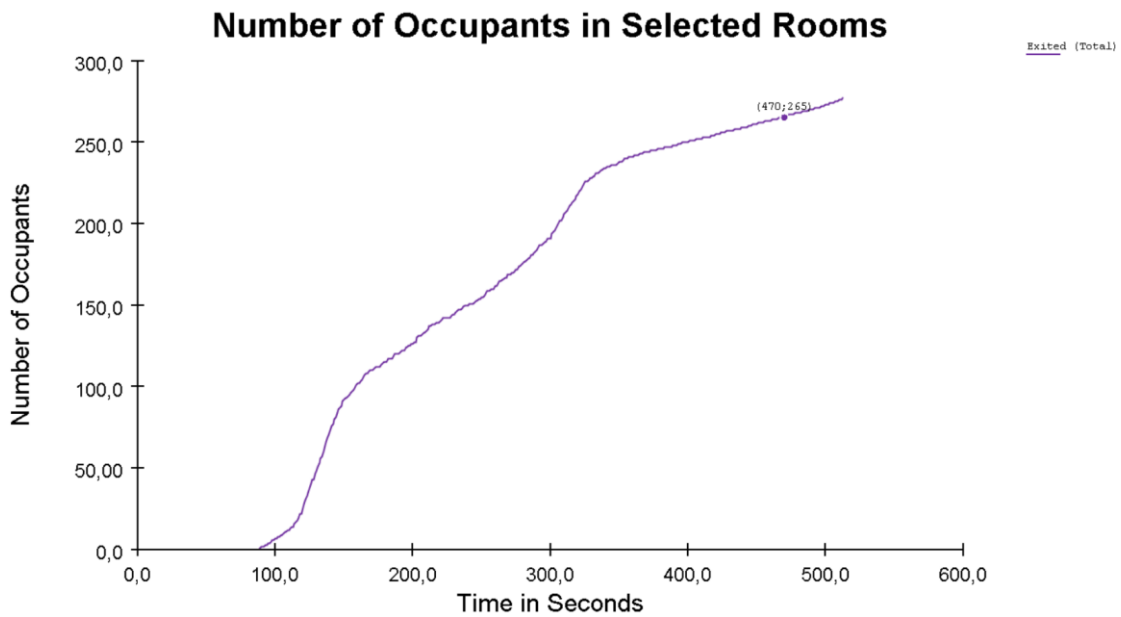
8.2.1. Παράδειγμα ανάλυσης εκκενώσεις για το 3° Σενάριο

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω η εστία της φωτιάς στο τρίτο σενάριο επιλέχθηκε να είναι στο μέσον του συρμού με το μεγαλύτερο επιβατικό φορτίο. Βάση του κανονισμού η μια κεντρική κυλιόμενη σκάλα δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τους χρήστες κατά την διαδικασία της εκκένωσης. Επίσης βάση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης του Pyrosim προκύπτει ότι η πυκνότητα του καπνού επηρεάζει σημαντικά την ορατότητα των χρηστών ειδικά μετρά τα πρώτα 140 sec. Ως εκ τούτου η ταχύτητα κίνησης των χρηστών μειώνεται κατά τη διάρκεια της εκκένωσης βάση της ορατότητας που επικρατεί στον εκάστοτε χώρο κίνησης.

8.2.1.1. Κίνηση χρηστών με τη ρύθμιση SFPE για το 3° Σενάριο

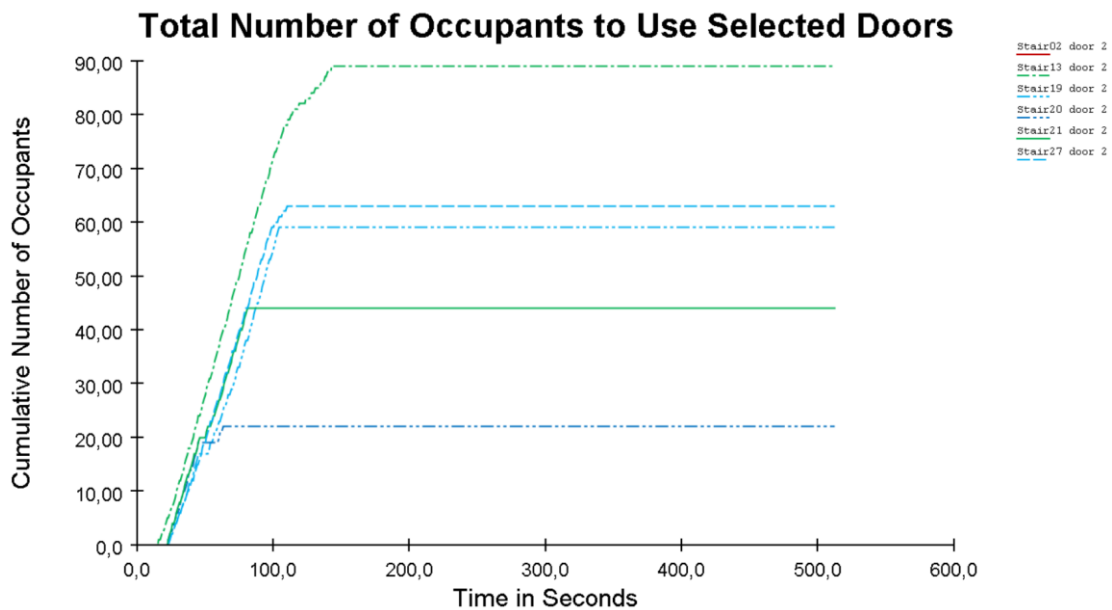
Ελεύθερη Κίνηση χρηστών στο χώρο με τη ρύθμιση SFPE για το 3° Σενάριο

Στη πρώτη σειρά αναλύσεων που έγινε όλοι οι χρήστες κινούνταν ελεύθερα στο χώρο του σταθμού. Στο Γράφημα 8.28 παρουσιάζεται ο συνολικός χρόνος που χρειάζεται προκειμένου όλοι οι χρήστες να εκκενώσουν τον χώρο. Επίσης δίνονται πληροφορίες σχετικά με τον αριθμό των χρηστών που έχουν εκκενώσει τον χώρο για οποιαδήποτε χρονική στιγμή, για παράδειγμα 140 άτομα χρειάζονται 220 sec για να εκκενώσουν το σταθμό. Επίσης ο πρώτος χρήστης εκκελώνει το σταθμό στο χρόνο 90 sec και ο τελευταίος στο χρόνο 512 sec.



Γράφημα 8.12: Πλήθος χρηστών που εκκενώνουν τον χώρο συναρτήσεως του χρόνου

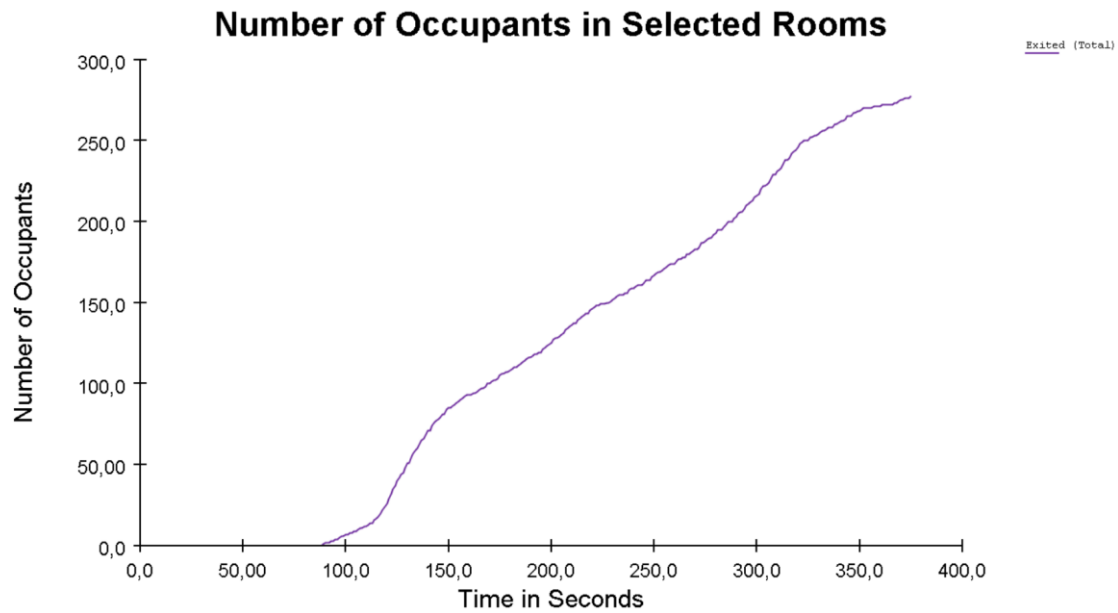
Στο Γράφημα 8.29 παρουσιάζεται ο συνολικός αριθμός των χρηστών που έχουν εκκένωση την αποβάθρα ανάλογα τη σκάλα που έχουν χρησιμοποιήσει για οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Σύμφωνα με την προσομοίωση προκύπτει ότι η σκάλα Stair 13 χρησιμοποιείται από περισσότερα άτομα. Από την ανάλυση και όπως παρουσιάζεται και στα διαγράμματα προέκυψε ότι ο χρόνος εκκένωσης της αποβάθρας είναι 144 sec και όλου του σταθμού 512 sec.



Γράφημα 8.13: Πλήθος χρηστών στις σκάλες για την εκκένωση της αποβάθρας συναρτήσεως του χρόνου

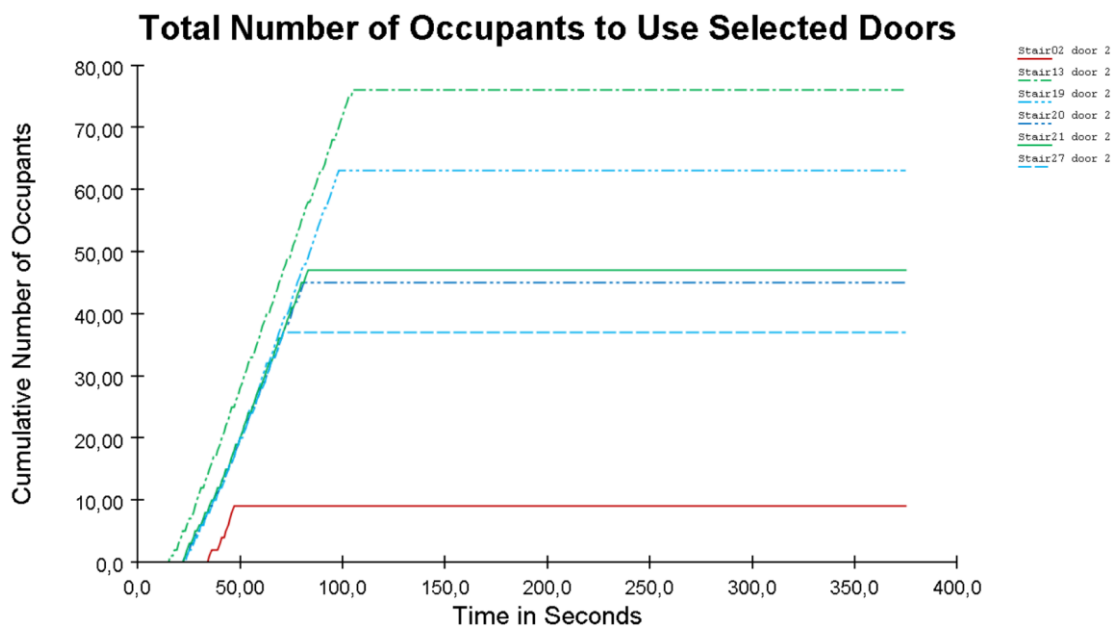
Προκαθορισμένη Κίνηση χρηστών στο χώρο με τη ρύθμιση SFPE για το 3^ο Σενάριο

Στη δεύτερη σειρά αναλύσεων που έγινε υπάρχουν διαδρομές κίνησης για ορισμένες ομάδες χρηστών οι οποίες είναι προκαθορισμένες. Στο Γράφημα 8.30 παρουσιάζεται ο συνολικός χρόνος που χρειάζεται προκειμένου όλοι οι χρήστες να εκκενώσουν τον χώρο. Επίσης δίνονται πληροφορίες σχετικά με τον αριθμό των χρηστών που έχουν εκκενώσει τον χώρο για οποιαδήποτε χρονική στιγμή, για παράδειγμα 140 άτομα χρειάζονται 213 sec για να εκκενώσουν το σταθμό. Επίσης ο πρώτος χρήστης εκκενώνει το σταθμό στο χρόνο 90 sec και ο τελευταίος στο χρόνο 375 sec.



Γράφημα 8.14: Πλήθος χρηστών που εκκενώνουν τον χώρο συναρτήσεως του χρόνου

Στο Γράφημα 8.31 παρουσιάζεται ο συνολικός αριθμός των χρηστών που έχουν εκκένωση την αποβάθρα ανάλογα τη σκάλα που έχουν χρησιμοποιήσει για οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Σύμφωνα με την προσομοίωση προκύπτει ότι οι σκάλες Stair 20+21 χρησιμοποιούνται από περισσότερα άτομα. Από την ανάλυση και όπως παρουσιάζεται και στα διαγράμματα προέκυψε ότι ο χρόνος εκκένωσης της αποβάθρας είναι 105 sec και όλου του σταθμού 375 sec.



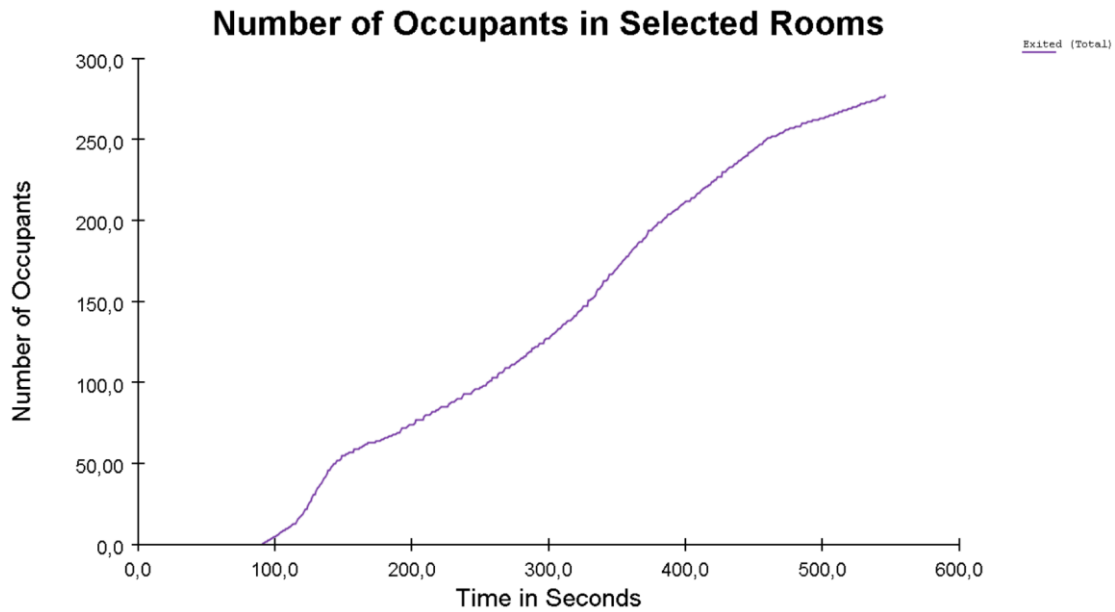
Γράφημα 8.15: Πλήθος χρηστών στις σκάλες για την εκκένωση της αποβάθρας συναρτήσεως του χρόνου

8.2.1.2. Κίνηση χρηστών με τη ρύθμιση Steering Mode για το 3° Σενάριο

Ελεύθερη Κίνηση χρηστών στο χώρο με τη ρύθμιση Steering Mode για το 3° Σενάριο

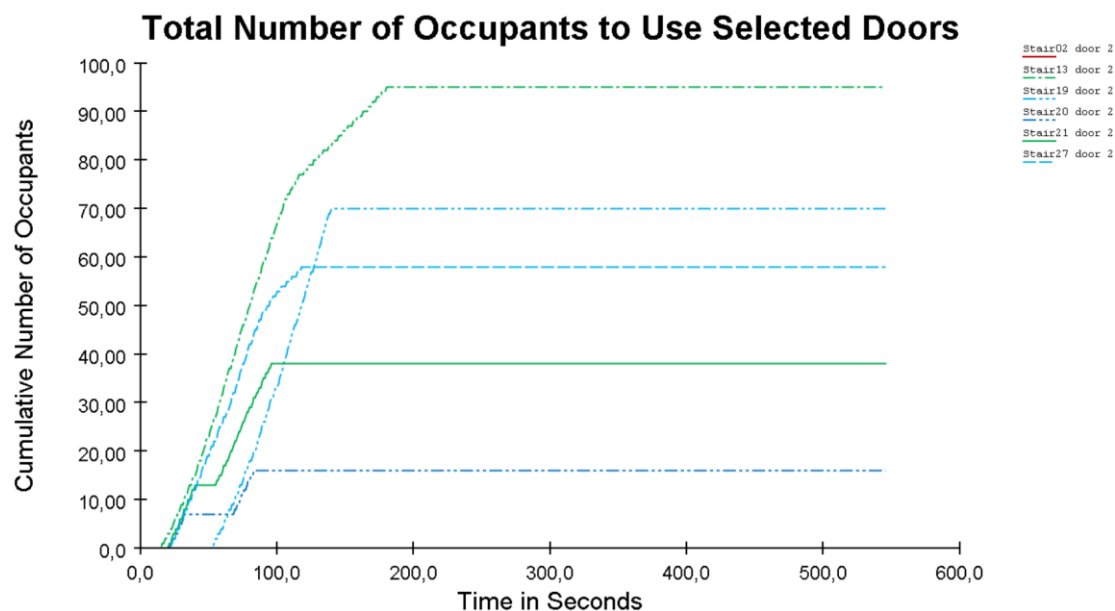
Στη πρώτη σειρά αναλύσεων που έγινε όλοι οι χρήστες κινούνταν ελεύθερα στο χώρο του σταθμού. Στο Γράφημα 8.32 παρουσιάζεται ο συνολικός χρόνος που χρειάζεται προκειμένου όλοι οι χρήστες να εκκενώσουν τον χώρο. Επίσης δίνονται πληροφορίες σχετικά με τον αριθμό των χρηστών που έχουν εκκενώσει τον χώρο για οποιαδήποτε χρονική στιγμή, για παράδειγμα 140 άτομα

χρειάζονται 318 sec για να εκκενώσουν το σταθμό. Επίσης ο πρώτος χρήστης εκκενώνει το σταθμό στο χρόνο 90 sec και ο τελευταίος στο χρόνο 545 sec.



Γράφημα 8.16: Πλήθος χρηστών που εκκενώνουν τον χώρο συναρτήσεως του χρόνου

Στο Γράφημα 8.33 παρουσιάζεται ο συνολικός αριθμός των χρηστών που έχουν εκκένωση την αποβάθρα ανάλογα τη σκάλα που έχουν χρησιμοποιήσει για οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Σύμφωνα με την προσομοίωση προκύπτει ότι η σκάλα Stair 13 χρησιμοποιείται από περισσότερα άτομα. Από την ανάλυση και όπως παρουσιάζεται και στα διαγράμματα προέκυψε ότι ο χρόνος εκκένωσης της αποβάθρας είναι 118 sec και όλου του σταθμού 545 sec

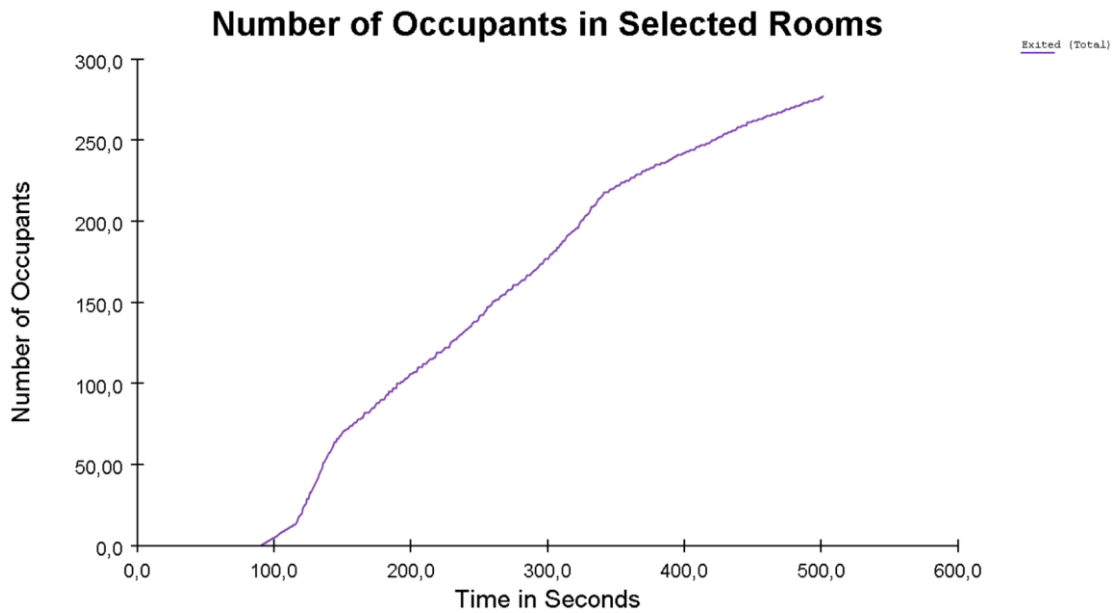


Γράφημα 8.17: Πλήθος χρηστών στις σκάλες για την εκκένωση της αποβάθρας συναρτήσεως του χρόνου

Προκαθορισμένη Κίνηση χρηστών στο χώρο με τη ρύθμιση Steering Mode για το 3^ο Σενάριο

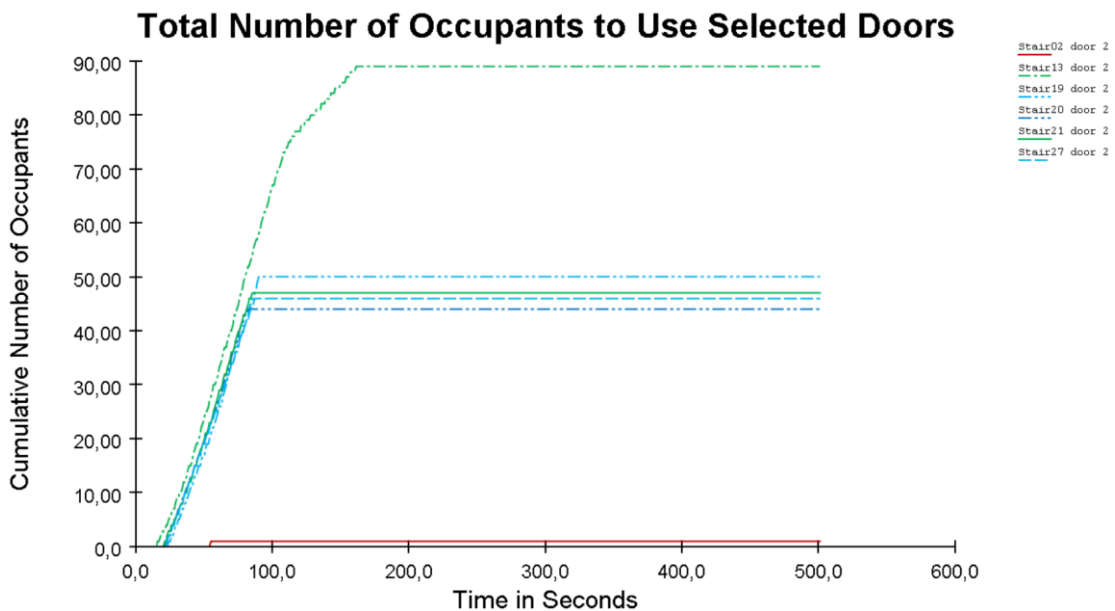
Στη δεύτερη σειρά αναλύσεων που έγινε υπάρχουν διαδρομές κίνησης για ορισμένες ομάδες χρηστών οι οποίες είναι προκαθορισμένες. Στο Γράφημα 8.34 παρουσιάζεται ο συνολικός χρόνος που χρειάζεται προκειμένου όλοι οι χρήστες να εκκενώσουν τον χώρο. Επίσης δίνονται

πληροφορίες σχετικά με τον αριθμό των χρηστών που έχουν εκκενώσει τον χώρο για οποιαδήποτε χρονική στιγμή, για παράδειγμα 140 άτομα χρειάζονται 250 sec για να εκκενώσουν το σταθμό. Επίσης ο πρώτος χρήστης εκκενώνει το σταθμό στο χρόνο 90 sec και ο τελευταίος στο χρόνο 375 sec.



Γράφημα 8.18: Πλήθος χρηστών που εκκενώνουν τον χώρο συναρτήσει του χρόνου

Στο Γράφημα 8.35 παρουσιάζεται ο συνολικός αριθμός των χρηστών που έχουν εκκένωση την αποβάθρα ανάλογα τη σκάλα που έχουν χρησιμοποιήσει για οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Σύμφωνα με την προσομοίωση προκύπτει ότι οι σκάλες Stair 13 και Stair 20+21 χρησιμοποιούνται από περισσότερα άτομα. Από την ανάλυση και όπως παρουσιάζεται και στα διαγράμματα προέκυψε ότι ο χρόνος εκκένωσης της αποβάθρας είναι 160 sec και όλου του σταθμού 501 sec.



Γράφημα 8.19: Πλήθος χρηστών στις σκάλες για την εκκένωση της αποβάθρας συναρτήσει του χρόνου

8.3. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για του χρόνους εκκένωσης

Ενώ τα σενάρια φωτιάς είναι τρία οι αναλύσεις που έγιναν στο Pathfinder είναι δώδεκα. Αυτό προέκυψε όπως αναφέρθηκε και παραπάνω γιατί α) το Pathfinder δίνει δυο επιλογές για τη κίνηση των χρηστών στο χώρο και β) στη πρώτη σειρά αναλύσεων που έγινε η κίνηση των χρηστών στο χώρο θεωρήθηκε ότι δεν ήταν η αναμενόμενη. Στους πίνακες 8.2 και 8.3 παρουσιάζονται οι χρόνοι εκκένωσης για την αποβάθρα και το σταθμό για όλες τις αναλύσεις. Συγκεκριμένα στο πίνακα 8.2 δίδονται οι χρόνοι όταν οι χρήστες κινούνται με τη ρύθμιση SFPR και στο πίνακα 8.3 όταν κινούνται με τη ρύθμιση Steering Mode. Από τους πίνακες προκύπτει ότι όταν υπάρχουν προκαθορισμένες διαδρομές που πρέπει να ακολουθήσουν οι χρήστες η εκκένωση πραγματοποιείται πιο γρήγορα, ανεξάρτητα των ρυθμίσεων στην κίνηση τους (SFPE ή Steering). Επίσης προκύπτει ότι ο χρόνος εκκένωσης της αποβάθρας παίζει σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη της εκκένωσης.

Πίνακας 8.4: Χρόνοι εκκένωσης βάση ρύθμισης SFPE

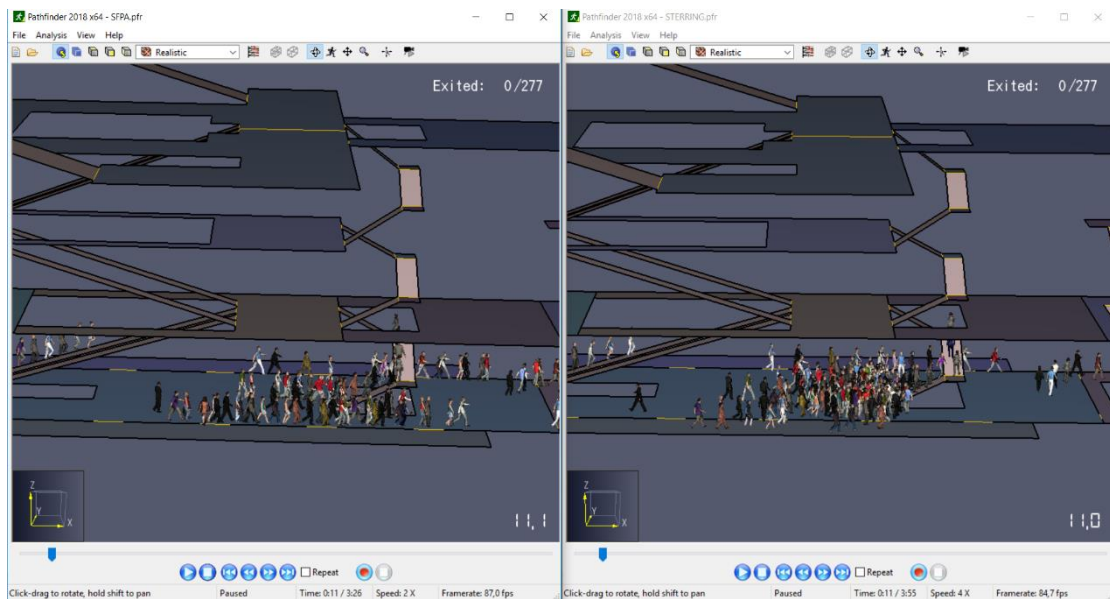
	Σενάριο 1		Σενάριο 2		Σενάριο 3	
Κίνηση Χρηστών	ελεύθερη	προκαθορισμένη	ελεύθερη	προκαθορισμένη	ελεύθερη	προκαθορισμένη
Χρόνος Εκκένωσης Αποβάθρας (sec)	128	101	120	104	142	103
Χρόνος Εκκένωσης Σταθμού (sec)	216	198	367	290	512	375

Πίνακας 8.5: Χρόνοι εκκένωσης βάση ρύθμισης Steering Mode

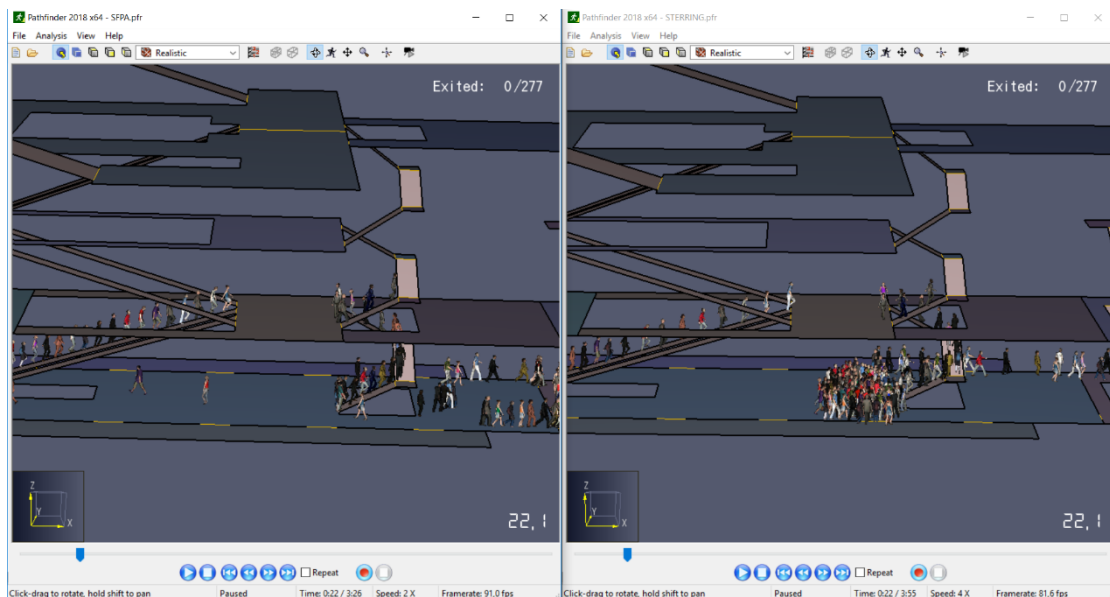
	Σενάριο 1		Σενάριο 2		Σενάριο 3	
Κίνηση Χρηστών	ελεύθερη	προκαθορισμένη	ελεύθερη	προκαθορισμένη	ελεύθερη	προκαθορισμένη
Χρόνος Εκκένωσης Αποβάθρας (sec)	140	123	145	124	180	160
Χρόνος Εκκένωσης Σταθμού (sec)	239	221	420	399	545	501

Παρόλο που οι αναλύσεις με Steering Mode δίνουν μεγαλύτερους χρόνους εκκένωσης θεωρείται ότι προσομοιάζουν καλύτερα τη πραγματική κατάσταση που εξελίσσεται. Αυτό συμβαίνει γιατί στη ρύθμιση SFPE ο χρήστης έχει εκ των προτέρων γνώση της γεωμετρίας του σταθμού αρά γνωρίζει τις βέλτιστες διαδρομές εξόδου και δεύτερον γιατί οι χρήστες αλληλεπικαλύπτονται όταν υπάρχει ουρά σε ένα μέσον διαφυγής. Η αλληλοεπικάλυψη παρατηρείται στα αριστερά μέρη των εικόνων 8.11 και 8.12 όπου είναι η ανάλυση με SFPE, όπως διακρίνεται στην εικόνα 8.11 τη χρονική στιγμή 11 sec υπάρχουν αρκετή χρήστες που κινούνται προς τη σκάλα ενώ στην εικόνα 8.12 τη χρονική στιγμή 22 sec δεν διακρίνεται σχεδόν κανένας. Αντιθέτως στην ανάλυση με Steering Mode που παρουσιάζεται στα δεξιά μέρη των εικόνων 8.111 και 8.12, διακρίνεται στην εικόνα 8.11 τη χρονική

στιγμή 11 sec να υπάρχουν αρκετή χρήστες που κινούνται προς τη σκάλα και στην εικόνα 8.12 τη χρονική στιγμή 22 sec να έχει σχηματιστεί μια αρκετά μεγάλη ουρά.



Εικόνα 8.11: Στιγμιότυπα τη χρονική στιγμή 11 sec από δυο αναλύσεις αριστερά με SFPE και δεξιά με Steering



Εικόνα 8.12: Στιγμιότυπα τη χρονική στιγμή 22 sec από δυο αναλύσεις αριστερά με SFPE και δεξιά με Steering

Ο κύριος λόγος που έγινε και δεύτερη σειρά αναλύσεων είναι ότι οι χρήστες κατά τη διάρκεια της εκκένωσης της αποβάθρας δεν χρησιμοποιούσαν ισόποσα όλες τις διαθέσιμες σκάλες διαφυγής. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να δημιουργούνται μεγάλες ουρές σε μερικές σκάλες ενώ άλλες να χρησιμοποιούνται ελάχιστα. Στη δεύτερη σειρά αναλύσεων που χρησιμοποιήθηκαν προκαθορισμένες διαδρομές για κάποιους χρήστες απλώς έγινε προσπάθεια οι χρήστες να χρησιμοποιήσουν ισόποσα όλες της διαθέσιμες σκάλες κατά την εκκένωση της αποβάθρας. Στους πίνακες 8.4, 8.5 και 8.6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της χρήσης των σκαλών για όλες της αναλύσεις που έγιναν με Steering mode. Από τους πίνακες είναι εμφανή η αλλαγή στη χρήση των σκαλών που προέκυψε σε όλα τα σενάρια στη δεύτερη σειρά αναλύσεων.

Πίνακας 8.6: Χρήση των σκάλων της αποβάθρας στο σενάριο 1 με ρύθμιση Steering Mode

Συνολικός Αριθμός Χρηστών		
Συμβολισμός Σκάλας	Ελεύθερη κίνηση	Προκαθορισμένη κίνηση
Stair 02	0	24
Stair 13	102	90
Stair 19	74	47
Stair 20	48	56
Stair 21	53	60
Stair 27	-	-

Πίνακας 8.7: Χρήση των σκάλων της αποβάθρας στο σενάριο 2 με ρύθμιση Steering Mode

Συνολικός Αριθμός Χρηστών		
Συμβολισμός Σκάλας	Ελεύθερη κίνηση	Προκαθορισμένη κίνηση
Stair 02	0	1
Stair 13	90	89
Stair 19	75	50
Stair 20	21	44
Stair 21	35	47
Stair 27	56	46

Πίνακας 8.8: Χρήση των σκάλων της αποβάθρας στο σενάριο 2 με ρύθμιση Steering Mode

Συνολικός Αριθμός Χρηστών		
Συμβολισμός Σκάλας	Ελεύθερη κίνηση	Προκαθορισμένη κίνηση
Stair 02	0	1
Stair 13	95	89
Stair 19	70	50
Stair 20	16	44
Stair 21	38	47
Stair 27	58	46

Στον πίνακα 8.9 παρουσιάζονται οι χρόνοι εκκένωσης της αποβάθρας, του σταθμού και οι διαφορές στους χρόνους μεταξύ ελεύθερων και προκαθορισμένων διάδρομων κίνησης για όλες τις αναλύσεις που έγιναν με τη ρύθμιση Steering Mode.

- Για το σενάριο 1 παρατηρείται μια μείωση του χρόνου εκκένωσης βάζοντας προκαθορισμένες διαδρομές για την αποβάθρα κατά 17 sec που αντιστοιχεί σε ποσοστό 12,14% και για όλο το σταθμό κατά 18 sec που αντιστοιχεί σε ποσοστό 7,53%.
- Για το σενάριο 2 παρατηρείται βάζοντας προκαθορισμένες διαδρομές μια μείωση του χρόνου εκκένωσης για την αποβάθρα κατά 21 sec που αντιστοιχεί σε ποσοστό 14,48% και για όλο το σταθμό κατά 21 sec που αντιστοιχεί σε ποσοστό 5%.
- Για το σενάριο 3 παρατηρείται βάζοντας προκαθορισμένες διαδρομές μια μείωση του χρόνου εκκένωσης για την αποβάθρα κατά 20 sec που αντιστοιχεί σε ποσοστό 11,11% και για όλο το σταθμό κατά 44 sec που αντιστοιχεί σε ποσοστό 8,07%.

Από τα παραπάνω παρατηρείται ότι ο χρόνος που κερδίζεται βάζοντας προκαθορισμένες διαδρομές κατά την εκκένωση της αποβάθρας στα σενάρια 1 και 2 μεταφέρεται μόνο σαν απόλυτο νούμερο στην εκκένωση του σταθμού χωρίς να διατηρεί το ποσοστό της. Αντιθέτως στο σενάριο 3 παρατηρείται ότι ο χρόνος που κερδίζεται κατά την εκκένωση της αποβάθρας βάζοντας προκαθορισμένες διαδρομές διπλασιάζει το κερδισμένο χρόνο της εκκένωσης του σταθμού, διατηρώντας και τα ποσοστά της μείωσης σε κοντινά επίπεδα. Αυτή η μεγάλη διαφορά παρατηρείται μόνο στο σενάριο 3 λόγω των κακών συνθηκών ορατότητας που επικρατούν στο σταθμό σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα από την αρχή της εκκένωσης, υποδηλώνοντας πόσο σημαντικό ρολό παίζει ο χρόνος εκκένωσης της πλατφόρμας στην εξέλιξη του συνολικού σχεδίου εκκένωσης.

Πίνακας 8.9: Αναλυτικοί χρόνοι εκκένωσης βάση ρύθμισης Steering Mode

Κίνηση Χρηστών	Σενάριο 1		Σενάριο 2		Σενάριο 3	
	ελεύθερη	προκαθορισμένη	ελεύθερη	προκαθορισμένη	ελεύθερη	προκαθορισμένη
Χρόνος Εκκένωσης Αποβάθρας (sec)	140	123	145	124	180	160
Διαφορά Χρόνων Εκκένωσης Αποβάθρας (sec)		17		21		20
Διαφορά Χρόνων Εκκένωσης Αποβάθρας (%)		12,14		14,48		11,11
Χρόνος Εκκένωσης Σταθμού (sec)	239	221	420	399	545	501
Διαφορά Χρόνων Εκκένωσης Σταθμού (sec)		18		21		44
Διαφορά Χρόνων Εκκένωσης Σταθμού (%)		7,53		5		8,07

8.4. Αξιολόγηση επιπτώσεων της φωτιάς στους χρήστες του σταθμού

Ο χρόνος εκκένωσης του σταθμού χωρίς να υπάρχει περιστατικό φωτιάς είναι 220 sec ενώ στο σενάριο 3 που είναι το δυσμενέστερο αυξάνεται περίπου κατά 300 sec. Στις δυο αναλύσεις που έγιναν για το σενάριο 1 τα επίπεδα τις ορατότητας δεν επηρεάζουν την ταχύτητα κίνησης των χρηστών, επιπλέον ο δείκτης FED of toxicity κινείται σε πολύ χαμηλά επίπεδα το οποίο υποδηλώνει ότι οι συγκεντρώσεις του μονοξειδίου του άνθρακα στους χώρους του σταθμού είναι πολύ μικρές. Συνεχίζοντας το σχολιασμό για τις αναλύσεις του σεναρίου 1 προκύπτει ότι τα επίπεδα της θερμοκρασίας του σταθμού είναι γύρω στους 30 ° C το οποίο δεν δημιουργεί κάποιο πρόβλημα στους χρήστες κατά την εκκένωση, ακόμα η μέγιστη θερμότητα λόγω ακτινοβολίας που δέχονται

οι χρήστες είναι κάτω από 1 kW/m^2 όταν παίρνανε κοντά από την εστία της φωτιάς κάτι το οποίο συμβαίνει σε ελάχιστους χρήστες και για μικρό χρονικό διάστημα.

Αντίθετα με το σενάριο 1 στο σενάριο 2 ο καπνός επηρεάζει την ταχύτητα κίνησης των χρηστών και ειδικά μετά τα 180 sec η ορατότητα μειώνεται σε επίπεδα κάτω των 4 m πέφτοντας μέχρι το 1 m που πρακτικά οι χρήστες βλέπουν ελάχιστα. Ο δείκτης FED of toxicity για τον τελευταίο χρήστη που εκκενώνει το σταθμό είναι 9 φορές κάτω από το επιτρεπτό όριο του 0,3, το συγκεκριμένο στοιχείο δηλώνει ότι οι συγκεντρώσεις του μονοξειδίου του άνθρακα στους χώρους του σταθμού είναι χαμηλές. Τα επίπεδα της θερμοκρασίας του σταθμού είναι γύρω στους $44 \text{ }^\circ\text{C}$ το οποίο δεν δημιουργεί κάποιο πρόβλημα στους χρήστες κατά την εκκένωση. Επίσης η μέγιστη θερμότητα λόγω ακτινοβολίας που μπορούν να δεχθούν οι χρήστες είναι κάτω από 1 kW/m^2 , αυτό συμβαίνει στους επιβάτες του συρμού που εκδηλώνεται η φωτιά και ειδικότερα σε αυτούς που είναι κοντά στην εστία της φωτιάς. Αρά το συμπέρασμα που βγαίνει για την εκκένωση στο σενάριο 2 είναι ότι το μοναδικό πρόβλημα το δημιουργεί ο καπνός λόγω την μεγάλης του πυκνότητας μετά τα 180 sec επειδή μειώνει πάρα πολύ την ταχύτητα κίνησης των χρηστών.

Στο σενάριο 3 ο καπνός επηρεάζει την ταχύτητα κίνησης των χρηστών σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα και ειδικά μετά τα 140 sec η ορατότητα μειώνεται σε επίπεδα κάτω των 4 m πέφτοντας μέχρι τα 0,55 m που πρακτικά οι χρήστες δεν βλέπουν. Ο δείκτης FED of toxicity για τους τελευταίους χρήστες που εκκενώνουν το σταθμό παίρνει τιμές 0,155 για την πρώτη σειρά αναλύσεων και 1,36 για την ανάλυση με τις προκαθορισμένες διαδρομές. Οι διαφορές στις τιμές των δυο αναλύσεων προκύπτει λόγω των διαφορετικών χρόνων εκκενώσεις, που συνεπάγει ότι κάποιοι χρήστες εκτέθηκαν παραπάνω χρόνο στο μονοξείδιο του άνθρακα. Οι συγκεκριμένες τιμές για το δείκτη FED of toxicity είναι δυο φορές κάτω από το όριο που δίνει ο κανονισμός, αλλά ενδέχεται κάποιοι χρήστες να παρουσιάσουν κάποια ζαλάδα χωρίς όμως περαιτέρω προβλήματα υγείας. Τα δυσμενέστερα επίπεδα θερμοκρασίας στο σταθμό που μπορεί να αντιμετωπίσει ένας χρήστης κατά την εκκένωση είναι γύρω στους $70 \text{ }^\circ\text{C}$, το οποίο δεν είναι ευχάριστο αλλά δεν δημιουργεί κάποιο σοβαρό πρόβλημα υγείας λόγω του μικρού χρονικού διαστήματος που διαρκεί η εκκένωση. Επίσης η μέγιστη θερμότητα λόγω ακτινοβολίας που μπορούν να δεχθούν οι χρήστες είναι κάτω από 1 kW/m^2 , αυτό συμβαίνει στους επιβάτες του συρμού που εκδηλώνεται η φωτιά και ειδικότερα σε αυτούς που είναι κοντά στην εστία της φωτιάς. Αρά το συμπέρασμα που βγαίνει για την εκκένωση στο σενάριο 3 είναι ότι το κύριο πρόβλημα το δημιουργεί ο καπνός λόγω την μεγάλης του πυκνότητας μετά τα 140 sec επειδή μειώνει πάρα πολύ την ταχύτητα κίνησης των χρηστών και μπορεί κάποιοι χρήστες κυρίως αν εντάσσονται στις ευάλωτες ομάδες να έχουν μια αδιαθεσία εξαιτίας της υψηλής θερμοκρασίας και του μονοξειδίου του άνθρακα. Επίσης στο πίνακά 8.10 παρατίθενται όλα τα δυσμενή στοιχεία που μπορεί να συναντήσει ένας χρήστης κατά τη διάρκεια εκκένωσής οποιοδήποτε σεναρίου.

Πίνακας 8.10: Στοιχεία για τον δυσμενέστερο χρήστη των σεναρίων από τις αναλύσεις με Steering Mode

Κίνηση Χρηστών	Σενάριο 1		Σενάριο 2		Σενάριο 3	
	ελεύθερη	προκαθορισμένη	ελεύθερη	προκαθορισμένη	ελεύθερη	προκαθορισμένη
Θερμοκρασία από συναγωγή (°C)	34	32	44	41	70	68
Θερμότητα από ακτινοβολία (kW/m ²)	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Ορατότητα (m)	11.5	12.4	1	1.2	0.55	0.6
FED of toxicity	0,00033	0,00022	0.041	0.032	0,1553	0,1357

9. Συμπεράσματα

Μία από τις σημαντικές παραμέτρους που υπεισέρχονται στη μελέτη και το σχεδιασμό των υπογείων έργων είναι ο τομέας της ασφάλειας και ειδικότερα η διαδικασία εκκένωσης στην περίπτωση που προκύψει μία επείγουσα κατάσταση. Συνεπώς είναι απαραίτητο να υπάρχει ένα πλήρες σχέδιο ασφάλειας και εκκένωσης των υπογείων χωρών.

Ιδιαίτερη έμφαση πρέπει να δίνεται στη περίπτωση εκδήλωσης φωτιάς καθώς αυτή επηρεάζει το σχεδιασμό της εκκένωσης, γιατί στις περισσότερες των περιπτώσεων ο καπνός και οι χρήστες που προσπαθούν να διαφύγουν ακολουθούν το ίδιο μονοπάτι.

Στις περισσότερες πυρκαγιές η έλλειψη ορατότητας λόγω αυξανόμενης συγκέντρωσης του καπνού είναι η πρώτη κατάσταση που εμποδίζει τους ανθρώπους να κινηθούν και επομένως να διαφύγουν με ασφάλεια. Η ύπαρξη καπνού επιβαρύνει ψυχολογικά και σωματικά τα άτομα που εκκενώνουν τον χώρο.

Η επίδραση της πυρκαγιάς στη συμπεριφορά των χρηστών και στην ταχύτητα κίνησης μπορεί να προσομοιωθεί και να ποσοτικοποιηθεί μέσω του λογισμικού Pygosim. Το συγκεκριμένο λογισμικό προσφέρει λεπτομέρειες για την εξέλιξη του φαινομένου της πυρκαγιάς και οδηγεί σε συμπεράσματα για το χρόνο που είναι διαθέσιμος για την εκκένωση πριν φτάσουν σε απαγορευτικά όρια οι τιμές καπνού, του θερμικού φορτίου και των προϊόντων της καύσης.

Ο σχεδιασμός και ο έλεγχος της επάρκειας των διαδικασιών εκκένωσης διενεργείται με τη χρήση του λογισμικού Pathfinder που προσομοιώνει τη συγκεκριμένη διαδικασία. Ειδικότερα, το συγκεκριμένο μοντέλο προσομοίωσης έχει τη δυνατότητα να απεικονίζει με ρεαλισμό την εκκένωση και την κίνηση των ατόμων. Η ανάλυση αυτή, καθώς και η εισαγωγή παραμέτρων που αφορούν στον τρόπο συμπεριφοράς του πλήθους κατά την διάρκεια της εκκένωσης πολύ απλά δεν μπορούν να γίνουν με τις συμβατικές αναλύσεις εκκένωσης.

Το μοντέλο προσομοίωσης εκτός από τον υπολογισμό του χρόνου εκκένωσης παρέχει πληροφορίες σχετικά με τη ροή των χρηστών και εντοπίζει τα σημεία στα οποία παρουσιάζονται προβλήματα. Οπτικοποιώντας την ανάλυση ο μελετητής μπορεί να παρέμβει και να δώσει λύσεις πριν την ολοκλήρωση του έργου. Επιπλέον, τα στοιχεία που προκύπτουν από την ανάλυση του λογισμικού Pygosim, σε περίπτωση ανάλυσης κινδύνου πυρκαγιάς, μπορούν να εισαχθούν στο πρόγραμμα προσομοίωσης προκειμένου να διενεργηθεί ορθότερη ανάλυση και πιο αξιόπιστος προσδιορισμός του χρόνου εκκένωσης, προτού υπάρξει σημαντική επιβάρυνση της ποιότητας της ατμόσφαιρας για τους χρήστες του υπόγειου χώρου. Αυτό ήταν και ένα από τα βασικά στοιχεία που επικεντρώθηκε η συγκεκριμένη εργασία.

Στη παρούσα εργασία δημιουργήθηκαν και προσομοιωθήκαν τρία σενάρια φωτιάς ώστε να εξεταστεί η επίδραση της ισχύος της φωτιάς στην εξάπλωση του καπνού και των προϊόντων της καύσης στο σταθμό. Στο πίνακα 9.1 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά όλα τα αποτελέσματα των σεναρίων.

Πίνακας 9.1: Συγκεντρωτικά αποτέλεσμα των σεναρίων φωτιάς

		Θερμοκρασία		Ορατότητα		Συγκέντρωση CO (ppm)	
		Μέση	Μέγιστη			Μέση	Μέγιστη
Σενάριο 1 (2,5MW)	Τιμή	45 °C	60 °C	<10 m	<4 m	320 ppm	480 ppm
	Χρόνος (sec)	420 sec	420 sec	-	-	420 sec	420 sec
Σενάριο 2 (5MW)	Τιμή	55 °C	80 °C	<10 m	<4 m	1800 ppm	2500 ppm
	Χρόνος (sec)	420 sec	420 sec	120 sec	180 sec	420 sec	420
Σενάριο 3 (10MW)	Τιμή	70 °C	100 °C	<10 m	<4 m	2500 ppm	3100 ppm
	Χρόνος (sec)	540 sec	540 sec	110 sec	140 sec	540 sec	540 sec

Από τα στοιχεία του πίνακα προκύπτει ότι:

- Τα επίπεδα της θερμοκρασίας που επικρατούν στο σταθμό σε όλα τα σενάρια είναι ανεκτά από τον άνθρωπο για το χρονικό διάστημα που εξετάστηκε.
- Τα επίπεδα της ορατότητας μειώνονται κατά πολύ όσο αυξάνεται η ισχύς της φωτιάς.
- Στο σενάριο 1 η ορατότητα δεν επηρεάζει σχεδόν καθόλου την κίνηση των χρηστών
- Στο σενάριο 2 μετά τα 120 sec οι χρήστες αρχίζουν να έχουν μειωμένη ορατότητά και μετά τα 180 sec βλέπουν ελάχιστα
- Στο σενάριο 3 μετά τα 110 sec οι χρήστες αρχίζουν να έχουν μειωμένη ορατότητά και μετά τα 140 sec βλέπουν ελάχιστα
- Τα επίπεδα του μονοξειδίου του άνθρακα που επικρατούν στο σταθμό δεν είναι θανατηφόρα για τον άνθρωπο για το χρονικό διάστημα που εξετάστηκε. Οι συγκεντρώσεις του CO αυξάνονται όσο αυξάνεται η ισχύς της φωτιάς
- Τα επίπεδα των συγκεντρώσεων του CO στα σενάρια 2 και 3 ενδέχεται να προκαλέσουν σε κάποιους χρήστες μια αδιαθεσία (ζαλάδα, πονοκέφαλο και ναυτία)

Στο πρόγραμμα Pathfinder πραγματοποιήθηκαν 13 αναλύσεις (με ρύθμιση κίνησης χρηστών: 6 SFPE και 7 Steering mode), στις οποίες αλλάζαν οι συνθήκες της εκκένωσης ανάλογα με το σενάριο που εξετάζονταν και με βάση τα στοιχεία επίδρασης της πυρκαγιάς.

Από τις αναλύσεις προέκυψε ότι οι κίνηση των χρηστών με “Steering Mode” προσομοιάζει καλύτερα τη πραγματική κατάσταση που εξελίσσεται κατά την εκκένωση. Αυτό συμβαίνει γιατί στη ρύθμιση “SFPE” ο χρήστης έχει εκ των προτέρων γνώση της γεωμετρίας του σταθμού αρά γνωρίζει τις βέλτιστες διαδρομές εξόδου και δεύτερον γιατί οι χρήστες αλληλεπικαλύπτονται όταν υπάρχει ουρά σε ένα μέσον διαφυγής. Τα αποτελέσματα από τις αναλύσεις με ρύθμιση Steering Mode στο Pathfinder παρουσιάζονται στο πίνακα 9.2.

Πίνακας 9.2: Χρόνοι εκκένωσης βάση ρύθμισης Steering Mode

Χωρίς Φωτιά	Σενάριο 1		Σενάριο 2		Σενάριο 3	
	ελεύθερη	Προκα/σμένη	ελεύθερη	Προκα/σμένη	ελεύθερη	Προκα/σμένη
Κίνηση Χρηστών	ελεύθερη	ελεύθερη Προκα/σμένη	ελεύθερη	Προκα/σμένη	ελεύθερη	Προκα/σμένη
Χρόνος Εκκένωσης Αποβάθρας (sec)	127	140 123	145	124	180	160
Χρόνος Εκκένωσης Σταθμού (sec)	236	239 221	420	399	545	501

Από τα στοιχεία του πίνακα προκύπτει ότι η επίδραση της φωτιάς και ιδιαίτερα ο καπνός παίζει σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη της εκκένωσης. Πιο συγκεκριμένα ο χρόνος της εκκένωσης αυξάνεται κατά πολύ στα σενάρια 2 και 3 κατά περίπου 3 και 5 min, αντίστοιχα, λόγω της μείωσης της ταχύτητας κίνησης των χρηστών. Αυτό σημαίνει ότι πρακτικά διπλασιάζεται ο επιτυγχανόμενος χρόνος εκκένωσης.

Επιπλέον φαίνεται με την υιοθέτηση λύσεων προκαθορισμένης διαδρομής (με τη χρήση θυρών / εμποδίων στο χώρο της αποβάθρας) κερδίζεται σημαντικός χρόνος όπως φαίνεται στον Πίνακα 9.2 και αναλύεται χαρακτηριστικά στον Πίνακα 9.3.

Πίνακας 9.3: Αναλυτικοί χρόνοι εκκένωσης βάση ρύθμισης Steering Mode

Κίνηση Χρηστών	Σενάριο 1		Σενάριο 2		Σενάριο 3	
	ελεύθερη	προκαθορισμένη	ελεύθερη	προκαθορισμένη	ελεύθερη	προκαθορισμένη
Χρόνος Εκκένωσης Αποβάθρας (sec)	140	123	145	124	180	160
Διαφορά Χρόνων Εκκένωσης Αποβάθρας (sec)		17		21		20
Διαφορά Χρόνων Εκκένωσης Αποβάθρας (%)		12,14		14,48		11,11
Χρόνος Εκκένωσης Σταθμού (sec)	239	221	420	399	545	501
Διαφορά Χρόνων Εκκένωσης Σταθμού (sec)		18		21		44
Διαφορά Χρόνων Εκκένωσης Σταθμού (%)		7,53		5		8,07

Προκύπτει ότι η μείωση του χρόνου είναι από 18 sec έως 44 sec στον ολικό χρόνο εκκένωσης, ή λιγότερο κατά 7-8%. Στην περίπτωση της εκκένωσης αποβάθρας όμως το ποσοστό μείωσης του απαιτούμενου χρόνου εκκένωσης φτάνει στο 12-14%.

Στο πίνακά 9.4 παρουσιάζονται τα στοιχεία του χρήστη που δέχεται τη μεγαλύτερη επιρροή από τη φωτιά κατά τη διάρκεια της εκκένωσής.

Πίνακας 9.4: Στοιχεία του δυσμενέστερου χρήστη κάθε σεναρίου κατά τη διάρκεια της εκκένωσής.

Κίνηση Χρηστών	Σενάριο 1		Σενάριο 2		Σενάριο 3	
	ελεύθερη	προκαθορισμένη	ελεύθερη	προκαθορισμένη	ελεύθερη	προκαθορισμένη
Θερμοκρασία από συναγωγή (°C)	34	32	44	41	70	68
Θερμότητα από ακτινοβολία (kW/m²)	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Ορατότητα (m)	11.5	12.4	1	1.2	0.55	0.6
FED of toxicity	0,00033	0,00022	0.041	0.032	0,1553	0,1357

Από τα στοιχεία του πίνακα προκύπτει ότι το μοναδικό πρόβλημα είναι η μείωση της ταχύτητας εξαιτίας της περιορισμένης ορατότητας. Στο σενάριο 3 υπάρχει περίπτωση κάποιοι χρήστες να νιώσουν μια αδιαθεσία εξαιτίας της συγκεντρώσεις του μονοξειδίου του άνθρακα. Γενικά οι δείκτες κυμαίνονται στα επιτρεπτά όρια και δεν παρουσιάζεται κάποιο πρόβλημα κατά την εκκένωση του σταθμού.

Βιβλιογραφία

1. [SFPE, 2003] Engineering Guide - Human Behavior in Fire. June, 2003. Society of Fire Protection Engineers. 7315 Wisconsin Avenue, Suite 620E Bethesda Maryland USA 1-301-718-2910.
2. [SFPE, 2016] SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 5th Edition. Society of Fire Protection Engineers. 7315 Wisconsin Avenue, Suite 620E Bethesda Maryland USA 1-301-718-2910..
3. 2010-Fire-Australia-Tenability-in-Building-Fires
4. An Engineering Methodology for Performance-Based Fire Safety Design of Underground Rail Systems (ITA COSUF No01 / MAY 2014)
5. Anders Lönnemark et. al (2012) Full-scale fire tests with a commuter train in a tunnel Anders Lönnemark et. al 2012
6. Boon Hui Chiam (2005) Numerical Simulation of a Metro Train Fire
7. Chow et.al. (2000) Natural smoke filling in atrium with liquid pool fires up to 1.6 MW
8. Coté Ron , Gregory E. Harrington 2009. Life Safety Code Handbook 11th Edition. NFPA 101
9. Despina Papakonstantinou et. al. (2017) Analysis Of The Crowd Evacuation Modeling Approaches For The Case Of Urban Underground Spaces
10. Fire Australia tenability in building fires 2010
11. Fire Safety Guidelines for Road Tunnels – 10/09/01
12. Gao et.al. (2011) Prediction of the spread of smoke in a huge transit terminal subway station under six different fire scenarios Gao et.al. 2011
13. Glasa, J, 2012, Use of PyroSim for Simulation of Cinema Fire
14. Gustin Joseph F. 2007. Disaster & Recovery Planning: A Guide for Facility Managers 4th Edition.
15. Jae Seong Roh (2007) CFD simulation and assessment of life safety in a subway train fire
16. 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.
17. Lonnermark (2005) On the characteristics of fire in tunnels
18. Maohua Zhong (2007) Study of the human evacuation simulation of metro fire safety analysis in China
19. National Fire Protection Association - NFPA (2014). NFPA 130: Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems, National Fire Protection Association
20. NFPA 130 2000 Edition .Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems.
21. OSHA, Occupational Safety and Health Administration U.S. Department of Labor 2001. How to Plan for Workplace Emergencies and Evacuations.
22. Pathfinder Technical Reference 2017 (Program's Handbook)
23. Purser, D. A. (2002). Toxicity Assessment of Combustion Products. 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, pp.83-171.
24. PyroSim User Manual, Thunderhead Engineering. (2017)
25. SFPE 2002. Handbook of Fire Protection Engineering 3rd Edition, Chapter 13, 14.

26. Shi Congling (2010) Modeling and safety strategy of passenger evacuation in a metro station in China
27. Tarada Fathi May 2000 Critical Velocities for Smoke Control in Tunnel Cross-Passages
28. Thematic Network FIT – Fire in Tunnels. General report 2006.
29. Tong et.al.(2015) A risk-based approach for crowd evacuation performance evaluation under metro fire
30. Wang Binbin (2011) Comparative Research on FLUENT and FDS's Numerical Simulation of Smoke Spread in Subway Platform Fire
31. Wang Z., Chen F., Li X. 2011. Comparative Analysis And Pedestrian Simulation Evaluation On Emergency Evacuation Test Methods For Urban Rail Transit Stations
32. Yamada, T. & Akizuki, Y. (2016). Visibility and Human Behavior in Fire Smoke. In: The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, by Morgan J. Jurley (Eds), Chapter 61, pp.2181-2206.
33. Yunlog Liou et. al. (2014) Smoke Management in Subway Stations Due to Train Arson Fire Scenario
34. Αρβελάκη, Β. (2014). Ανάλυση των διαδικασιών εκκένωσης σε υπογείους σταθμούς του ΜΕΤΡΟ Θεσσαλονίκης: Η περίπτωση του σταθμού «Πλατεία Δημοκρατίας» . Αθήνα.
35. Κυρίτσης Φίλιππος 2010 Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ Καθορισμός Διαδικασιών Εκκένωσης σε Υπόγειο Χώρο με Εξέταση Ιδιαίτερων Χαρακτηριστικών. Παράδειγμα Εφαρμογής στον Υπόγειο Χώρο του Τεχνολογικού Πάρκου Λαυρίου.
36. ΟΔΗΓΙΑ 2001/16/ΕΚ, ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗ ΔΙΑΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΥ ΔΙΕΥΡΩΠΑΙΚΟΥ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.
37. ΟΔΗΓΙΑ 96/48/ΕΚ, ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗ ΔΙΑΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΔΙΕΥΡΩΠΑΙΚΟΥ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΓΑΛΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ.
38. Σχέδιο Τεχνικής Προδιαγραφής για τη Διαλειτουργικότητα (2008), Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης

Παράρτημα Α

Σημαντικές πυρκαγιές τρένων μετρό μέσα στη σήραγγα από το 1970 έως το 2003 (Boon Hui Chian.2005)

City, Country	Date	Description	Reference
Daegu, South Korea	18 Feb 2003	An arsonist started fire when he was on a train by spreading flammable liquid into one of the carriages of a six-car train when it reached Jungangno Station. Two six-car trains were destroyed, and 198 people killed.	(Anon 2004c)
Berlin, Germany	7 July 2001	The fire was started by an arc lamp in the rear carriage of the roughly 100 m long train, in a tunnel between the stations at "Kurt-Schumacher-Platz" and "Afrikanische Strasse". Despite the small size of fire, the amount of smoke in the carriage and the tunnel area was considerable.	(Anon 2004d)
Berlin, Germany	8 July 2000	Electrical short-circuit caused arcing on the body of the last car of an eight-car train. The car superstructure ignited upon entering the Deutsche Oper station. Passengers were evacuated from both underground trains in the station. Last car of the incident train was completely burned out.	(FIT Workpackage2 2003)
Amsterdam, Netherlands	12 July 1999	The brakes on the bogie started the fire of a high-speed tram when it was in Weesperplein underground station. The driver and a member of station staff tried to extinguish the fire but failed and the entire station got filled with smoke. Evacuation was initiated. The firemen eventually put off the fire. Two persons were slightly injured (smoke poisoning).	(Colombo 2001)
Baku, Aserbadjain	28 Oct 1995	A fully loaded five-car train stopped about 200 m after Uldus station due to sparkover/ electric arc in electrical equipment in the rear bogie of the fourth car. 289 people were killed and 265 injured.	(FIT Workpackage2 2003)
New York City, US	21 Dec 1994	An arsonist exploded a homemade bomb that sent a fireball whooshing through a subway car injuring himself and 47 others. The crude bomb went off while the subway train was parked in a station.	(Anon 2004e)
New York City, US	28 Dec 1990	Electrical fire in the subway tunnel near Clark Street, Brooklyn kills two and injures 188.	(Anon 2004e)
Moscow, Russia	1987	A burning train stopped in a tunnel to evacuate passengers. Inaccessibility made fire fighting difficult, and the fire reached major proportions before firemen arrived. Tunnel draughts caused problems from smoke and gases.	(Andersen 2004a)
Hamburg, Germany	20 Sep 1984	A fire started in a seat on a three-car train late at night. The train was stopped and evacuated at Landungsbrucken station, where the fire spread to cables. Two cars were destroyed, and one passenger was affected by smoke.	(Andersen 2004a)
München, Germany	5 Sep 1983	An electrical fault caused a train fire; after discharging passengers at HW the driver continued to a stabling siding where firemen extinguished the blaze. Two vehicles were destroyed, and seven passengers affected by smoke.	(Andersen 2004a)
London, UK	11 Aug 1982	A short circuit on a Piccadilly line train in a tunnel between Wood Green and Bounds Green caused a fire which destroyed one vehicle. Over 50 passengers were evacuated along the tunnel; 15 of them were affected by smoke.	(Andersen 2004a)
New York City, US	2 Jun 1982	A PATH train stabled near Exchange Place station caught fire, and the fire service took six hours to bring it under control. Four cars were destroyed, and several people were affected by smoke.	(Andersen 2004a)
New York City, US	16 Mar 1982	A fault in under-floor control gear started a train fire in the running tunnel near Christopher Street. Rapid spread of smoke led to the evacuation of some 400 passengers; 86 of them were injured, and one vehicle was destroyed.	(Andersen 2004a)

Bonn, Germany	11 Sep 1981	A technical fault caused a fire on a light rail car in the running tunnel near Ramersdorf station. The fire was extinguished within 25 minutes, with no passengers injured; the car was destroyed.	(Andersen 2004a)
Moscow, Russia	1 Jun 1981	An electrical fault caused a fire on a train at Oktyabrskaya station, and two cars were engulfed before the fire brigade arrived. Heat and smoke made the firefighting difficult. Over 2000 passengers were evacuated from various trains by firemen in breathing apparatus. Seven people were reported to have died.	(Andersen 2004a)
New York City, US	1980 – 1981	Between June 1980 and July 1981, eight fires on the New York Subway necessitated evacuation of passengers. A total of 50 people were hospitalised. Several of the fires were started by electrical faults in under floor control equipment.	(Andersen 2004a)
London, UK	21 Jun 1980	A discarded cigarette is believed to have started a fire in a cross-passage between the Northern Line running tunnels at Goodge Street. Poisonous smoke given off by burning cables caused one fatality.	(Andersen 2004a)
Hamburg, Germany	8 Apr 1980	A fire was deliberately started in a seat near the front of a train, and spread rapidly down the train. Two cars were destroyed, and four passengers were affected by smoke.	(Andersen 2004a)
New York City, US	8 Sep 1979	A discarded cigarette ignited oil to start a fire at Grand Central Terminal on the Lennox Avenue line, creating dense smoke. Two cars of 12 stabled nearby were burnt out. Poor communication between train crews and controllers and between firemen and managers delayed evacuation of 100 people, resulting in four being injured.	(Andersen 2004a)
Philadelphia, US	6 Sep 1979	A transformer fire and explosion in a train carrying 1100 people at Septa's Erie Street station. The train's doors failed to open, causing panic. 148 passengers were injured in the crush as people left through the windows.	(Andersen 2004a)
Paris, France	25 Mar 1979	A short circuit caused by a foreign body on the line at Reuilly-Diderot station on Line 1 started a fire on a passenger train, destroying one car. Thick smoke hampered rescue operations, affecting 26 people.	(Andersen 2004a)
San Francisco, US	17 Jan 1979	A current collector fault on a BART train passing through the trans-Bay tunnel caused a short circuit and fire on the following train. Lack of communication between driver and control centre, poor co-ordination and errors of judgement hampered rescue of the passengers. One person died, and 56 were affected by smoke. Five cars were involved in varying degree.	(Andersen 2004a; Associated Engineers 1980)
Köln, Germany	24 Oct 1978	A discarded cigarette set fire to a light rail car in the pre-metro tunnel at Hansaring station, and eight passengers were evacuated. Because of the smoke only firemen with breathing equipment could enter.	(Andersen 2004a)
Toronto, Canada	15 Oct 1976	An arsonist started a fire in a train at Christie Street station, resulting in the destruction of four vehicles.	(Andersen 2004a)
Lisboan, Portugal	25 May 1976	A traction failure led to a fire on a train; passengers were evacuated at a station, but four cars were destroyed.	(Andersen 2004a)
San Francisco, US	March 1975 - Nov 1976	There have been 27 fire or smoke incidents on subway cars of the BART system. All but three of these incidents occurred below the car floor and did not penetrate into the passenger compartment. The remaining three cases involved interior car fires that produced minor damage (Two burning trash fires and one aborted arson attempt to ignite a seat cushion with a pile of matches).	(Braun 1978)
Boston, US	2 Jul 1975	Broken overhead wires in the light-rail tunnel near Kenmore Square station ignited the front of a car during the morning peak. Over 400 people were evacuated, and 34 were affected by smoke.	(Andersen 2004a)
Montreal, Canada	23 Jan 1974	Faulty rubber tyres on a train caused a short circuit south of Rosemarid station, starting a fire and leading to the destruction of nine vehicles and 300 m of cabling. Over 1000 passengers had to be evacuated.	(Andersen 2004a)
Paris, France	27 Mar 1973	An empty car in a Line 7 train was set on fire near Porte d'Italie by an arsonist igniting a seat. Despite rapid action by the fire services, the car was destroyed and two passengers at the station were killed by smoke.	(Andersen 2004a)
Stockholm, Sweden	1972 - 1978	Over this period seven fires broke out on board trains, resulting in destruction of the cars in each case. All the fires were thought to be arson.	(Andersen 2004a)
East Berlin, Germany	4 Oct 1972	A train car stabled at Alexanderplatz caught fire, damaging the station buildings and destroying four vehicles.	(Andersen 2004a)
Montreal, Canada	12 Dec 1971	A train collided with the end of the tunnel at Henri Bourassa metro station, followed by a short circuit and fire which spread to train-sets stationed nearby. 36 cars were destroyed, and the driver killed.	(Andersen 2004a)

Table B1: Major metro train fires in tunnel from 1970 to 2003

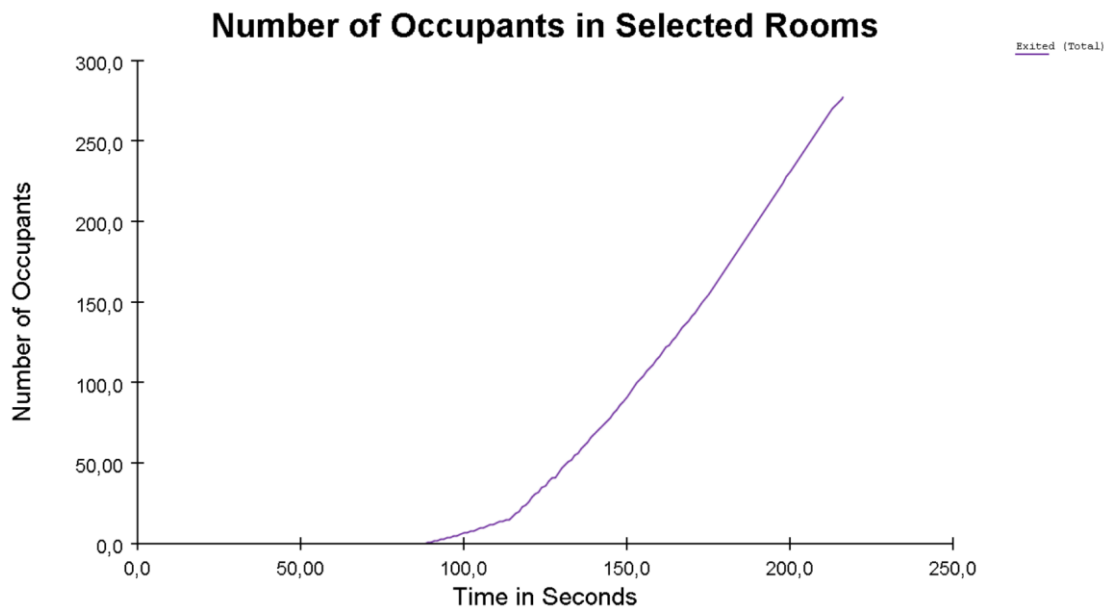
Παράρτημα Β

1^ο Σενάριο

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω η εστία της φωτιάς στο πρώτο σενάριο επιλέχθηκε να είναι στο μέσον της αποβάθρας και μπροστά από τις κεντρικές κυλιόμενες σκάλες. Με την επιλογή του συγκριμένου σημείου για εστία της φωτιάς αυτόματος δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι δυο κυλιόμενες σκάλες από τους χρήστες κατά την διαδικασία της εκκένωσης. Επίσης βάση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης του Pyrosim προκύπτει ότι η πυκνότητα του καπνού δεν επηρεάζει σημαντικά την ορατότητα των χρηστών ως εκ τούτου δεν μειώνει καθόλου τη ταχύτητα κίνησης τους κατά τη διάρκεια της εκκένωσης.

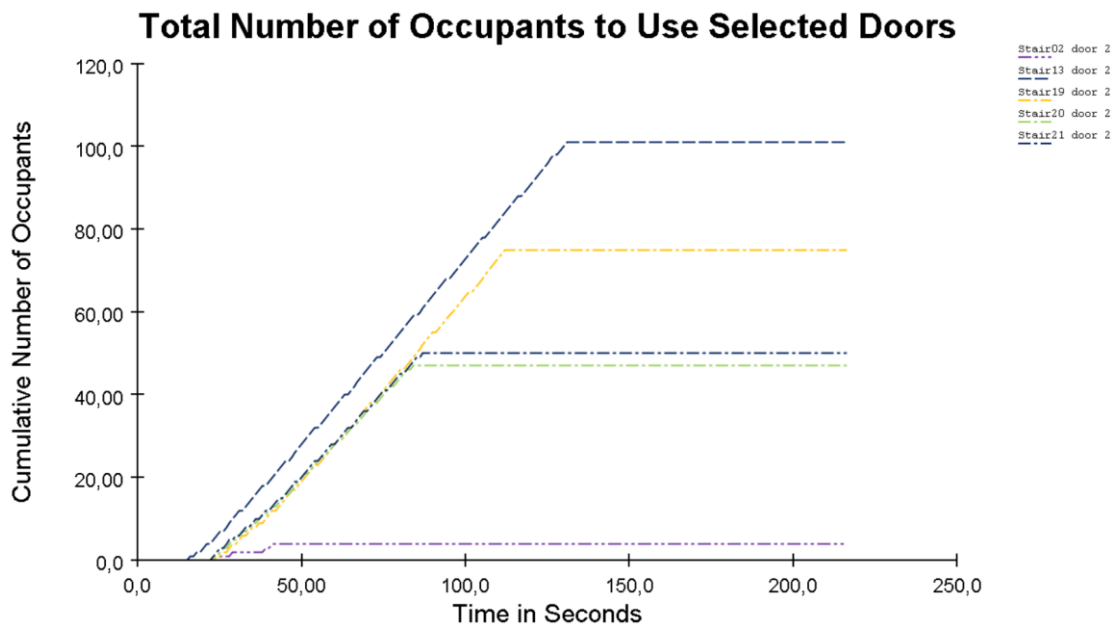
Κίνηση χρηστών με τη ρύθμιση SFPE για το 1^ο ΣενάριοΕλεύθερη Κίνηση χρηστών στο χώρο με τη ρύθμιση SFPE για το 1^ο Σενάριο

Στη πρώτη σειρά αναλύσεων που έγινε όλοι οι χρήστες κινούνταν ελεύθερα στο χώρο του σταθμού. Στο Γράφημα 1 παρουσιάζεται ο συνολικός χρόνος που χρειάζεται προκειμένου όλοι οι χρήστες να εκκενώσουν τον χώρο. Επίσης δίνονται πληροφορίες σχετικά με τον αριθμό των χρηστών που έχουν εκκενώσει τον χώρο για οποιαδήποτε χρονική στιγμή, για παράδειγμα 140 άτομα χρειάζονται 170 sec για να εκκενώσουν το σταθμό. Επίσης ο πρώτος χρήστης εκκελώνει το σταθμό στο χρόνο 90 sec και ο τελευταίος στο χρόνο 216 sec. Έτσι για οποιαδήποτε χρονική στιγμή υπάρχει πληροφόρηση σχετικά με τον αριθμό των ατόμων που έχουν περάσει με επιτυχία μέσα από μια πόρτα εξόδου.



Γράφημα 1: Πλήθος χρηστών που εκκενώνουν τον χώρο συναρτήσει του χρόνου

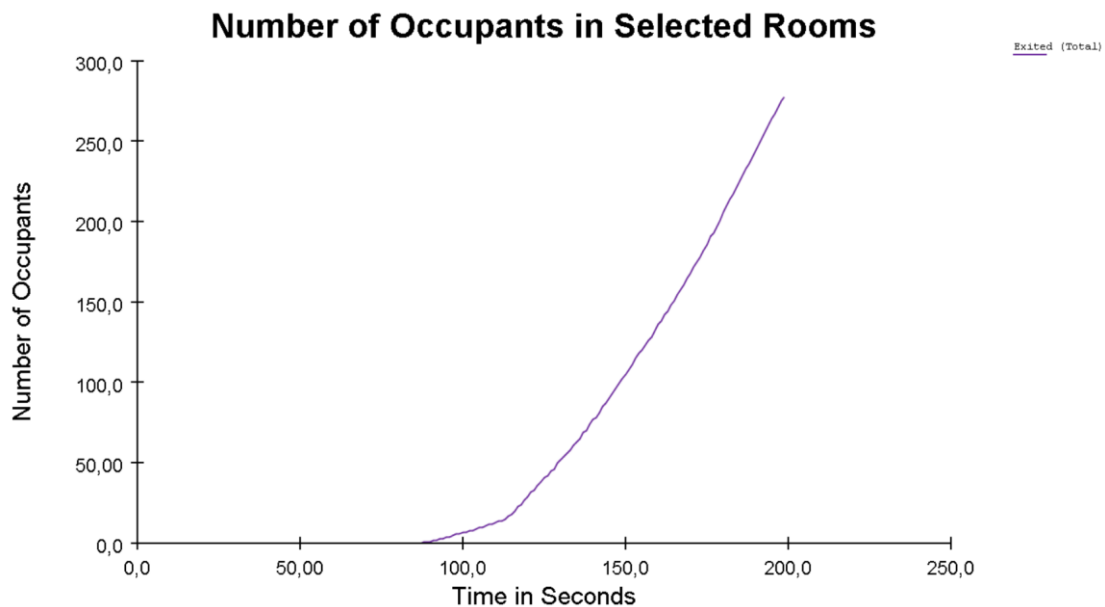
Στο Γράφημα 2 παρουσιάζεται ο συνολικός αριθμός των χρηστών που έχουν εκκένωση την αποβάθρα ανάλογα τη σκάλα που έχουν χρησιμοποιήσει για οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω οι σκάλες με συμβολισμό Stair 20 και Stair 21 λαμβάνονται σαν μια για την αξιολογήσει του φορτιού που εξυπηρετούν. Σύμφωνα με την προσομοίωση προκύπτει ότι οι σκάλες Stair 13 και Stair 20+21 χρησιμοποιούνται από περισσότερα άτομα. Από την ανάλυση και όπως παρουσιάζεται και στα διαγράμματα προέκυψε ότι ο χρόνος εκκένωσης της αποβάθρας είναι 131 sec και όλου του σταθμού 216 sec.



Γράφημα 2: : Πλήθος χρηστών στις σκάλες για την εκκένωση της αποβάθρας συναρτήσει του χρόνου

Προκαθορισμένη Κίνηση χρηστών στο χώρο με τη ρύθμιση SFPE για το 1^ο Σενάριο

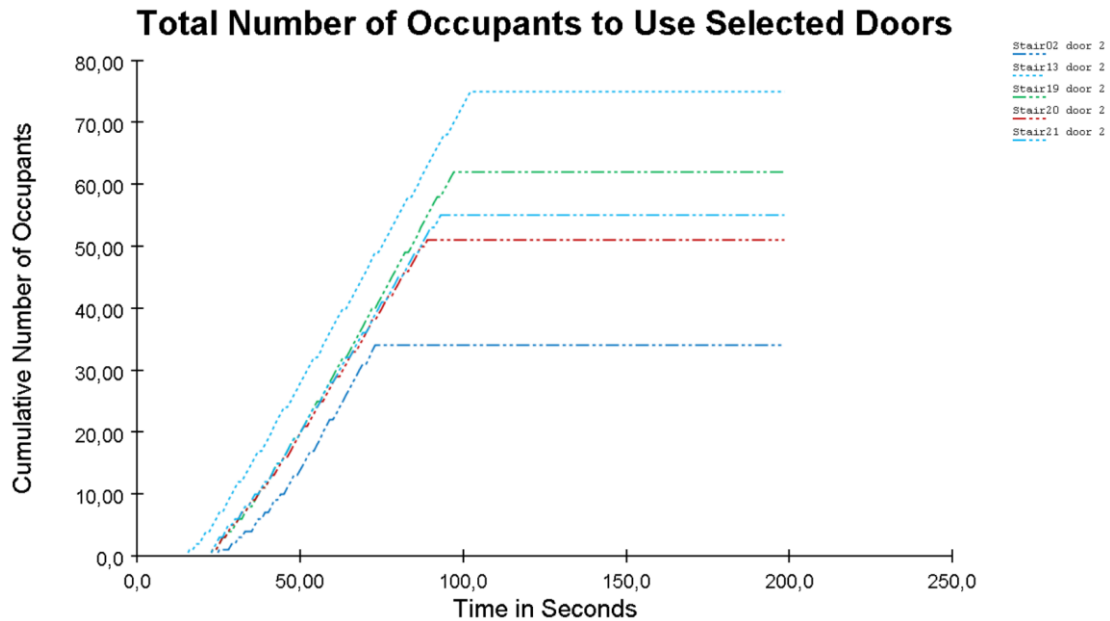
Στη δεύτερη σειρά αναλύσεων που έγινε υπάρχουν διαδρομές κίνησης για ορισμένες ομάδες χρηστών οι οποίες είναι προκαθορισμένες. Στο Γράφημα 3 παρουσιάζεται ο συνολικός χρόνος που χρειάζεται προκειμένου όλοι οι χρήστες να εκκενώσουν τον χώρο. Επίσης δίνονται πληροφορίες σχετικά με τον αριθμό των χρηστών που έχουν εκκενώσει τον χώρο για οποιαδήποτε χρονική στιγμή, για παράδειγμα 140 άτομα χρειάζονται 162 sec για να εκκενώσουν το σταθμό. Επίσης ο πρώτος χρήστης εκκελώνει το σταθμό στο χρόνο 90 sec και ο τελευταίος στο χρόνο 199 sec.



Γράφημα 3: Πλήθος χρηστών που εκκενώνουν τον χώρο συναρτήσει του χρόνου

Στο Γράφημα 4 παρουσιάζεται ο συνολικός αριθμός των χρηστών που έχουν εκκενώσει την αποβάθρα ανάλογα τη σκάλα που έχουν χρησιμοποιήσει για οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω οι σκάλες με συμβολισμό Stair 20 και Stair 21 λαμβάνονται σαν μια για την αξιολογήσει του φορτίου που εξυπηρετούν. Σύμφωνα με την προσομοίωση προκύπτει ότι οι σκάλες Stair 20+21 χρησιμοποιούνται από περισσότερα άτομα. Από την ανάλυση και όπως

παρουσιάζεται και στα διαγράμματα προέκυψε ότι ο χρόνος εκκένωσης της αποβάθρας είναι 101 sec και όλου του σταθμού 198 sec.

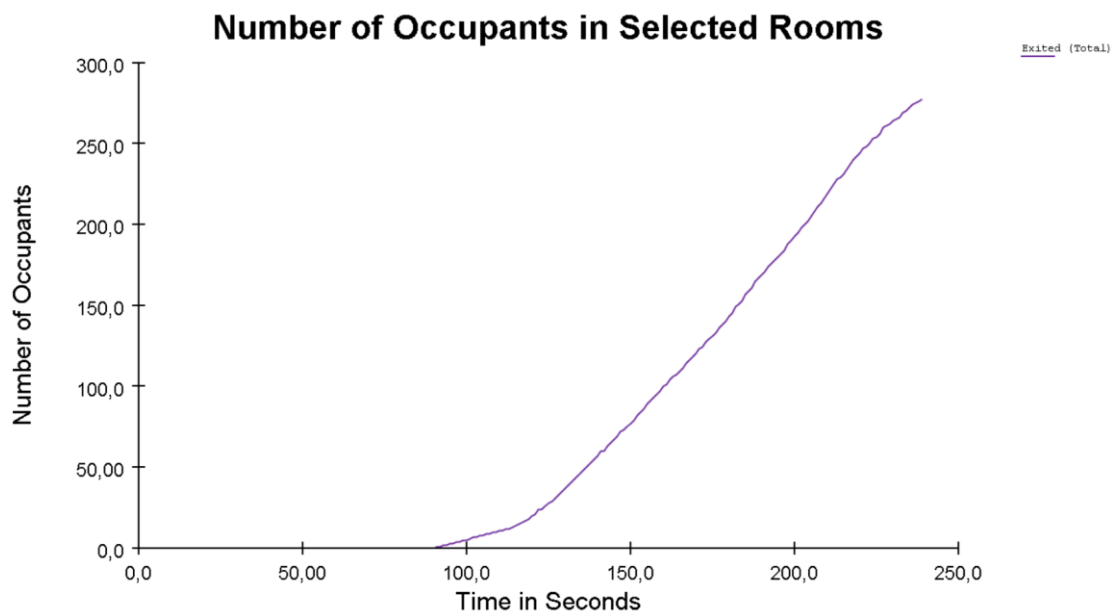


Γράφημα 4: Πλήθος χρηστών στις σκάλες για την εκκένωση της αποβάθρας συναρτήσει του χρόνου

Κίνηση χρηστών με τη ρύθμιση Steering Mode για το 1^ο Σενάριο

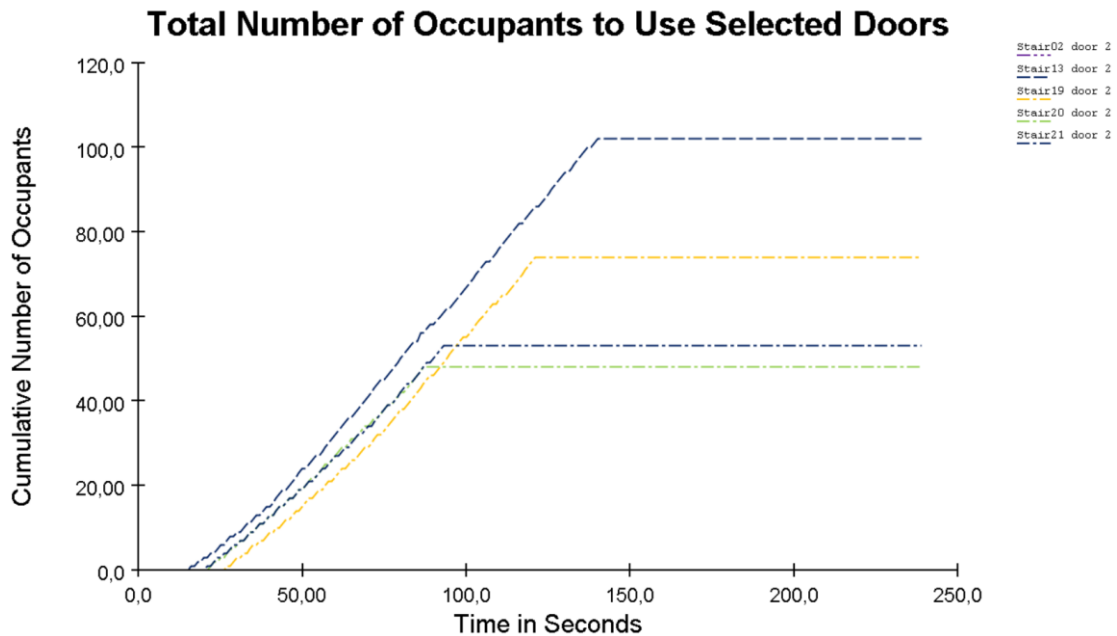
Ελεύθερη Κίνηση χρηστών στο χώρο με τη ρύθμιση Steering Mode για το 1^ο Σενάριο

Στη πρώτη σειρά αναλύσεων που έγινε όλοι οι χρήστες κινούνταν ελεύθερα στο χώρο του σταθμού. Στο Γράφημα 5 παρουσιάζεται ο συνολικός χρόνος που χρειάζεται προκειμένου όλοι οι χρήστες να εκκενώσουν τον χώρο. Επίσης δίνονται πληροφορίες σχετικά με τον αριθμό των χρηστών που έχουν εκκενώσει τον χώρο για οποιαδήποτε χρονική στιγμή, για παράδειγμα 140 άτομα χρειάζονται 180 sec για να εκκενώσουν το σταθμό. Επίσης ο πρώτος χρήστης εκκελώνει το σταθμό στο χρόνο 90 sec και ο τελευταίος στο χρόνο 239 sec.



Γράφημα 5: Πλήθος χρηστών που εκκελώνουν τον χώρο συναρτήσει του χρόνου

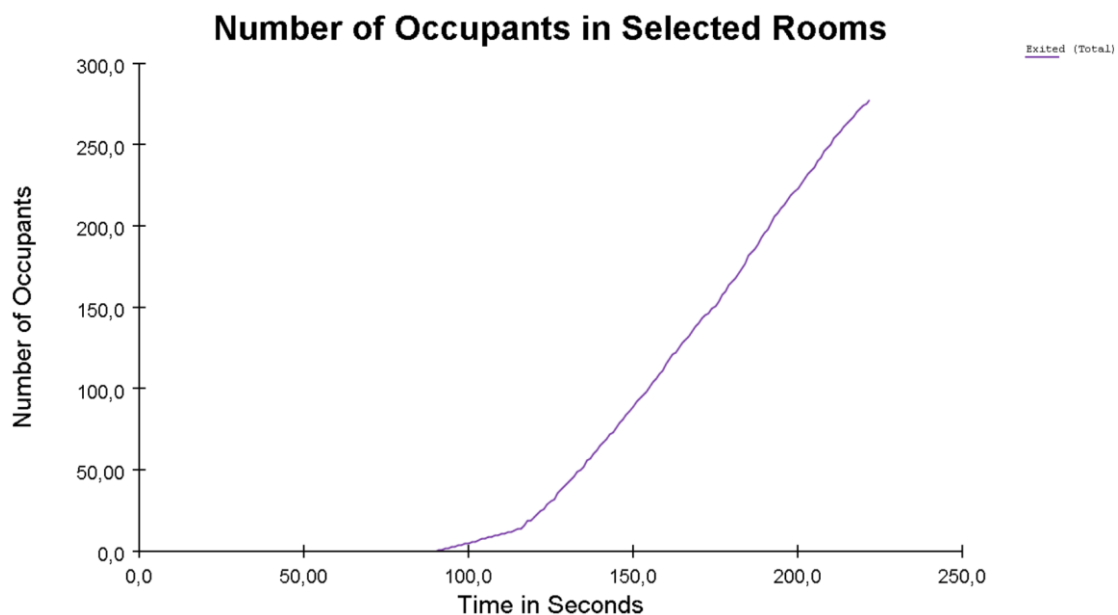
Στο Γράφημα 6 παρουσιάζεται ο συνολικός αριθμός των χρηστών που έχουν εκκένωση την αποβάθρα ανάλογα τη σκάλα που έχουν χρησιμοποιήσει για οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Σύμφωνα με την προσομοίωση προκύπτει ότι οι σκάλες Stair 13 και Stair 20+21 χρησιμοποιούνται από περισσότερα άτομα. Από την ανάλυση και όπως παρουσιάζεται και στα διαγράμματα προέκυψε ότι ο χρόνος εκκένωσης της αποβάθρας είναι 140 sec και όλου του σταθμού 239 sec.



Γράφημα 6: Πλήθος χρηστών στις σκάλες για την εκκένωση της αποβάθρας συναρτήσει του χρόνου

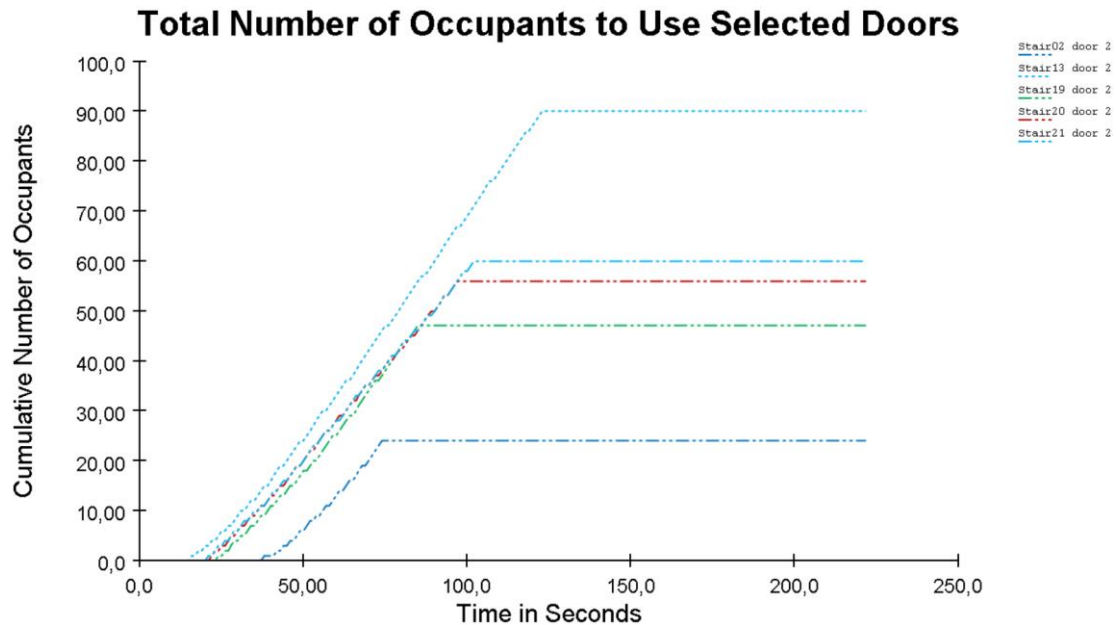
Προκαθορισμένη Κίνηση χρηστών στο χώρο με τη ρύθμιση Steering Mode για το 1^ο Σενάριο

Στη δεύτερη σειρά αναλύσεων που έγινε υπάρχουν διαδρομές κίνησης για ορισμένες ομάδες χρηστών οι οποίες είναι προκαθορισμένες. Στο Γράφημα 7 παρουσιάζεται ο συνολικός χρόνος που χρειάζεται προκειμένου όλοι οι χρήστες να εκκενώσουν τον χώρο. Επίσης δίνονται πληροφορίες σχετικά με τον αριθμό των χρηστών που έχουν εκκενώσει τον χώρο για οποιαδήποτε χρονική στιγμή, για παράδειγμα 140 άτομα χρειάζονται 170 sec για να εκκενώσουν το σταθμό. Επίσης ο πρώτος χρήστης εκκελώνει το σταθμό στο χρόνο 90 sec και ο τελευταίος στο χρόνο 221 sec.



Γράφημα 7: Πλήθος χρηστών που εκκελώνουν τον χώρο συναρτήσει του χρόνου

Στο Γράφημα 8 παρουσιάζεται ο συνολικός αριθμός των χρηστών που έχουν εκκένωση την αποβάθρα ανάλογα τη σκάλα που έχουν χρησιμοποιήσει για οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Σύμφωνα με την προσομοίωση προκύπτει ότι οι σκάλες Stair 20+21 χρησιμοποιούνται από περισσότερα άτομα. Από την ανάλυση και όπως παρουσιάζεται και στα διαγράμματα προέκυψε ότι ο χρόνος εκκένωσης της αποβάθρας είναι 123 sec και όλου του σταθμού 221 sec.



Γράφημα 8: :Πλήθος χρηστών στις σκάλες για την εκκένωση της αποβάθρας συναρτήσει του χρόνου

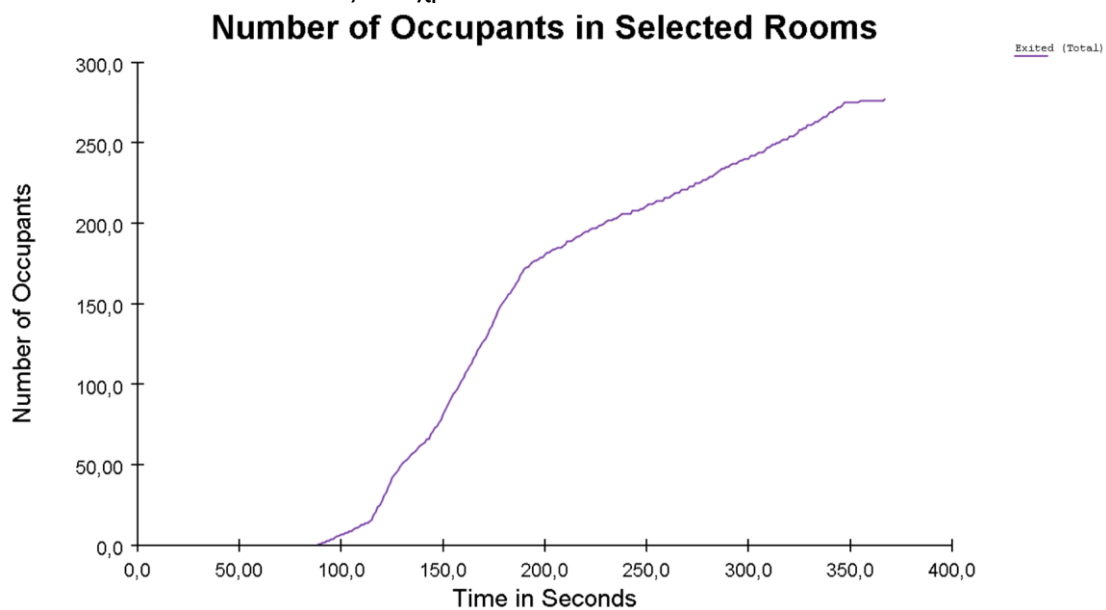
2^ο Σενάριο

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω η εστία της φωτιάς στο δεύτερο σενάριο επιλέχθηκε να είναι στο μέσον του συρμού με το μεγαλύτερο επιβατικό φορτίο. Βάση του κανονισμού η μια κεντρική κυλιόμενη σκάλα δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τους χρήστες κατά την διαδικασία της εκκένωσης. Επίσης βάση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης του Pyrosim προκύπτει ότι η πυκνότητα του καπνού επηρεάζει σημαντικά την ορατότητα των χρηστών ειδικά μετρά τα πρώτα 180 sec. Ως εκ τούτου η ταχύτητα κίνησης των χρηστών μειώνεται κατά τη διάρκεια της εκκένωσης βάση της ορατότητας που επικρατεί στον εκάστοτε χώρο κίνησης.

Κίνηση χρηστών με τη ρύθμιση SFPE για το 2^ο Σενάριο

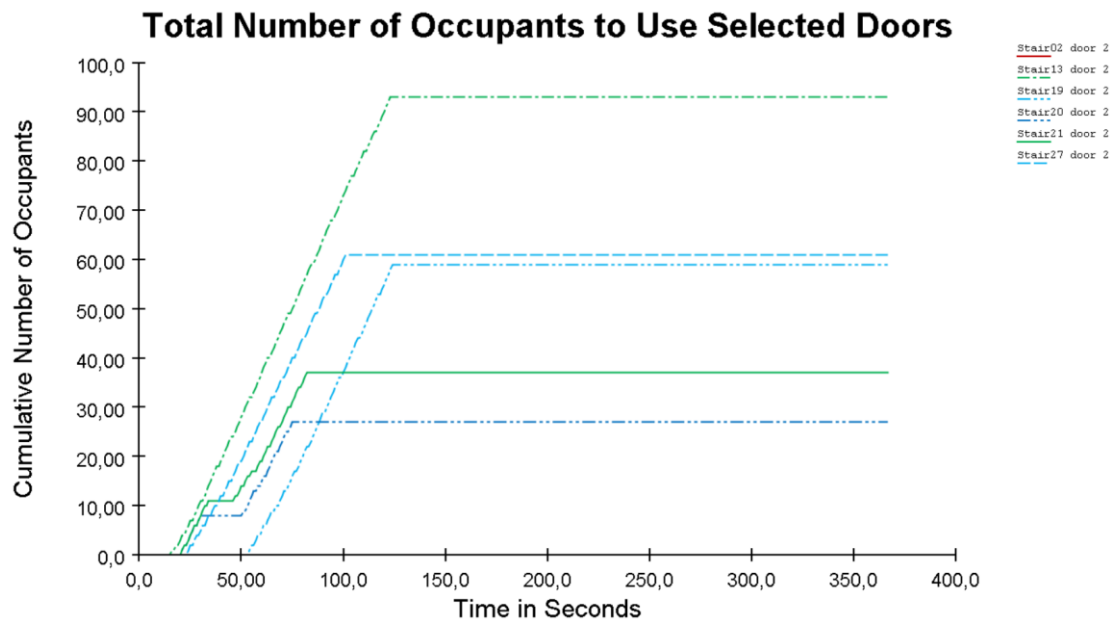
Ελεύθερη Κίνηση χρηστών στο χώρο με τη ρύθμιση SFPE για το 2^ο Σενάριο

Στη πρώτη σειρά αναλύσεων που έγινε όλοι οι χρήστες κινούνταν ελεύθερα στο χώρο του σταθμού. Στο Γράφημα 10 παρουσιάζεται ο συνολικός χρόνος που χρειάζεται προκειμένου όλοι οι χρήστες να εκκενώσουν τον χώρο. Επίσης δίνονται πληροφορίες σχετικά με τον αριθμό των χρηστών που έχουν εκκενώσει τον χώρο για οποιαδήποτε χρονική στιγμή, για παράδειγμα 140 άτομα χρειάζονται 175 sec για να εκκενώσουν το σταθμό. Επίσης ο πρώτος χρήστης εκκελώνει το σταθμό στο χρόνο 90 sec και ο τελευταίος στο χρόνο 367 sec.



Γράφημα 10: : Πλήθος χρηστών που εκκενώνουν τον χώρο συναρτήσει του χρόνου

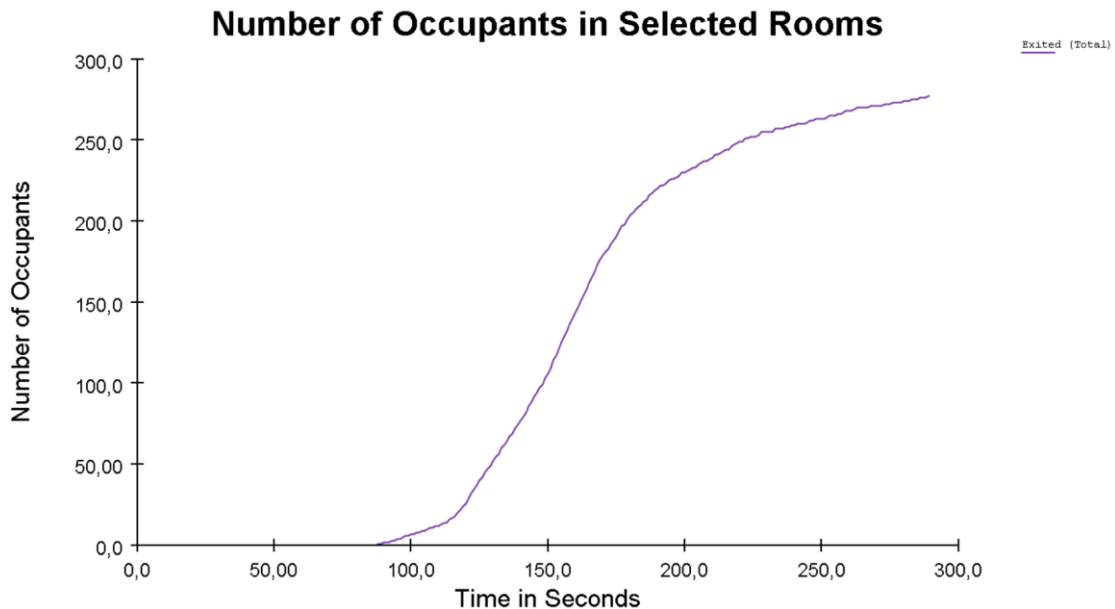
Στο Γράφημα 11 παρουσιάζεται ο συνολικός αριθμός των χρηστών που έχουν εκκένωση την αποβάθρα ανάλογα τη σκάλα που έχουν χρησιμοποιήσει για οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Σύμφωνα με την προσομοίωση προκύπτει ότι η σκάλα Stair 13 χρησιμοποιείται από περισσότερα άτομα. Από την ανάλυση και όπως παρουσιάζεται και στα διαγράμματα προέκυψε ότι ο χρόνος εκκένωσης της αποβάθρας είναι 124 sec και όλου του σταθμού 367 sec.



Γράφημα 11: Πλήθος χρηστών στις σκάλες για την εκκένωση της αποβάθρας συναρτήσει του χρόνου

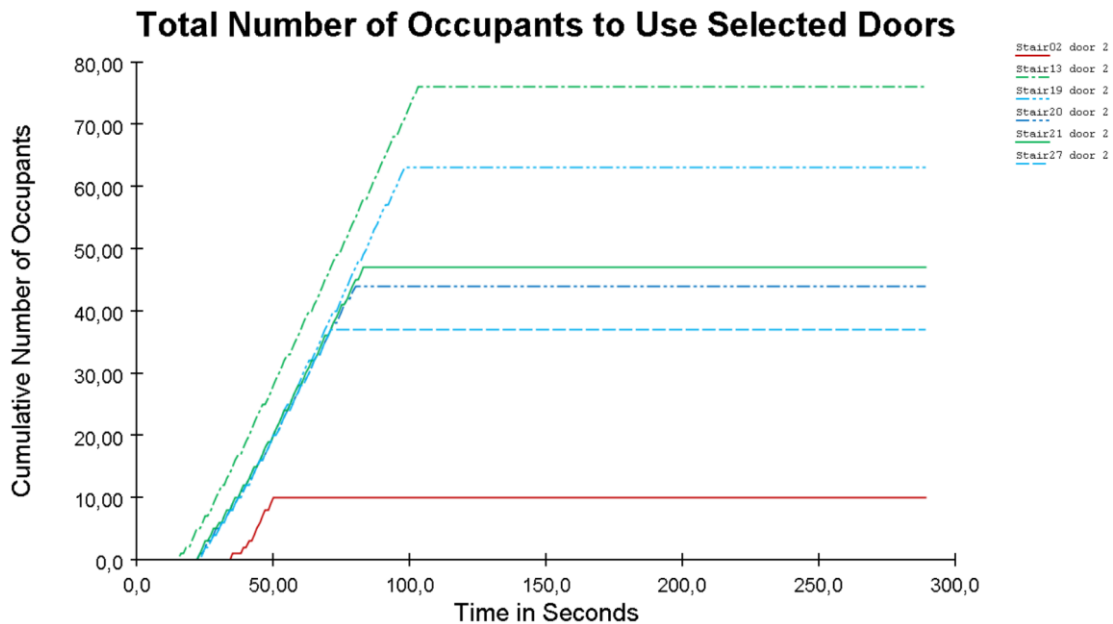
Προκαθορισμένη Κίνηση χρηστών στο χώρο με τη ρύθμιση SFPE για το 2^ο Σενάριο

Στη δεύτερη σειρά αναλύσεων που έγινε υπάρχουν διαδρομές κίνησης για ορισμένες ομάδες χρηστών οι οποίες είναι προκαθορισμένες. Στο Γράφημα 12 παρουσιάζεται ο συνολικός χρόνος που χρειάζεται προκειμένου όλοι οι χρήστες να εκκενώσουν τον χώρο. Επίσης δίνονται πληροφορίες σχετικά με τον αριθμό των χρηστών που έχουν εκκενώσει τον χώρο για οποιαδήποτε χρονική στιγμή, για παράδειγμα 140 άτομα χρειάζονται 160 sec για να εκκενώσουν το σταθμό. Επίσης ο πρώτος χρήστης εκκελώνει το σταθμό στο χρόνο 90 sec και ο τελευταίος στο χρόνο 286 sec.



Γράφημα 12: Πλήθος χρηστών που εκκελώνουν τον χώρο συναρτήσει του χρόνου

Στο Γράφημα 13 παρουσιάζεται ο συνολικός αριθμός των χρηστών που έχουν εκκένωση την αποβάθρα ανάλογα τη σκάλα που έχουν χρησιμοποιήσει για οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Σύμφωνα με την προσομοίωση προκύπτει ότι οι σκάλες Stair 20+21 χρησιμοποιούνται από περισσότερα άτομα. Από την ανάλυση και όπως παρουσιάζεται και στα διαγράμματα προέκυψε ότι ο χρόνος εκκένωσης της αποβάθρας είναι 103 sec και όλου του σταθμού 286 sec.

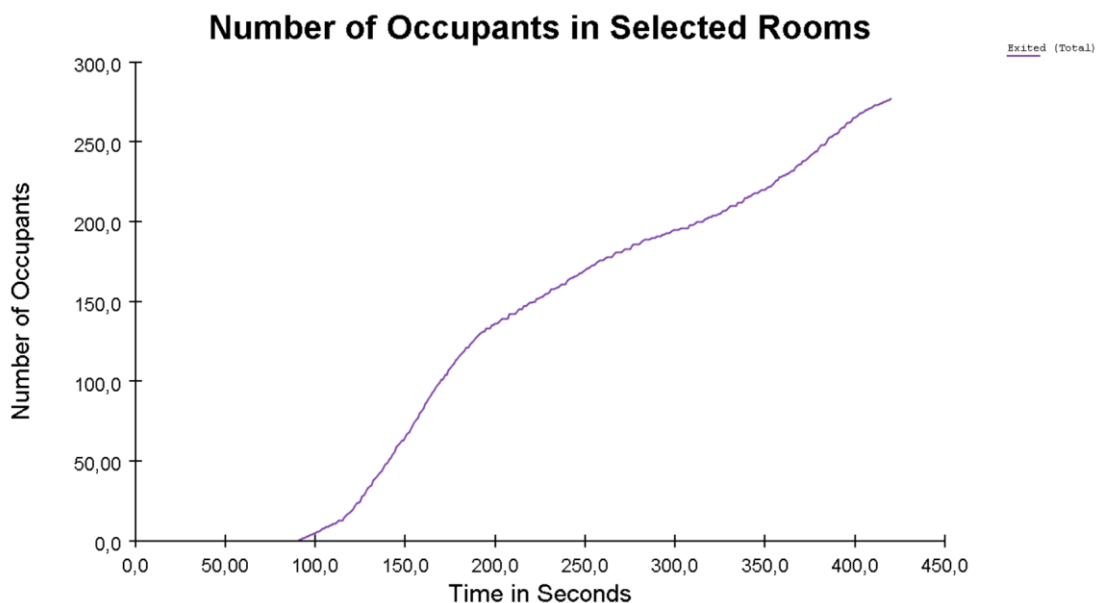


Γράφημα 13: Πλήθος χρηστών στις σκάλες για την εκκένωση της αποβάθρας συναρτήσει του χρόνου

Κίνηση χρηστών με τη ρύθμιση Steering Mode για το 2^ο Σενάριο

Ελεύθερη Κίνηση χρηστών στο χώρο με τη ρύθμιση Steering Mode για το 2^ο Σενάριο

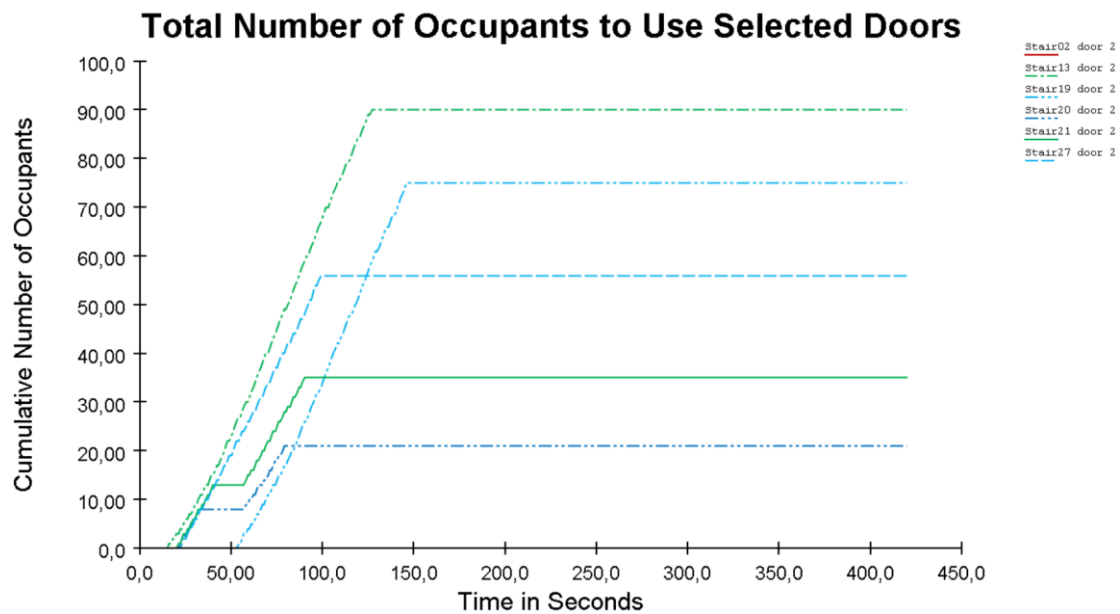
Στη πρώτη σειρά αναλύσεων που έγινε όλοι οι χρήστες κινούνταν ελεύθερα στο χώρο του σταθμού. Στο Γράφημα 14 παρουσιάζεται ο συνολικός χρόνος που χρειάζεται προκειμένου όλοι οι χρήστες να εκκενώσουν τον χώρο. Επίσης δίνονται πληροφορίες σχετικά με τον αριθμό των χρηστών που έχουν εκκενώσει τον χώρο για οποιαδήποτε χρονική στιγμή, για παράδειγμα 140 άτομα χρειάζονται 207 sec για να εκκενώσουν το σταθμό. Επίσης ο πρώτος χρήστης εκκελώνει το σταθμό στο χρόνο 90 sec και ο τελευταίος στο χρόνο 420 sec.



Γράφημα 14: Πλήθος χρηστών που εκκελώνουν τον χώρο συναρτήσει του χρόνου

Στο Γράφημα 15 παρουσιάζεται ο συνολικός αριθμός των χρηστών που έχουν εκκένωση την αποβάθρα ανάλογα τη σκάλα που έχουν χρησιμοποιήσει για οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Σύμφωνα με την προσομοίωση προκύπτει ότι η σκάλα Stair 13 χρησιμοποιείται από περισσότερα

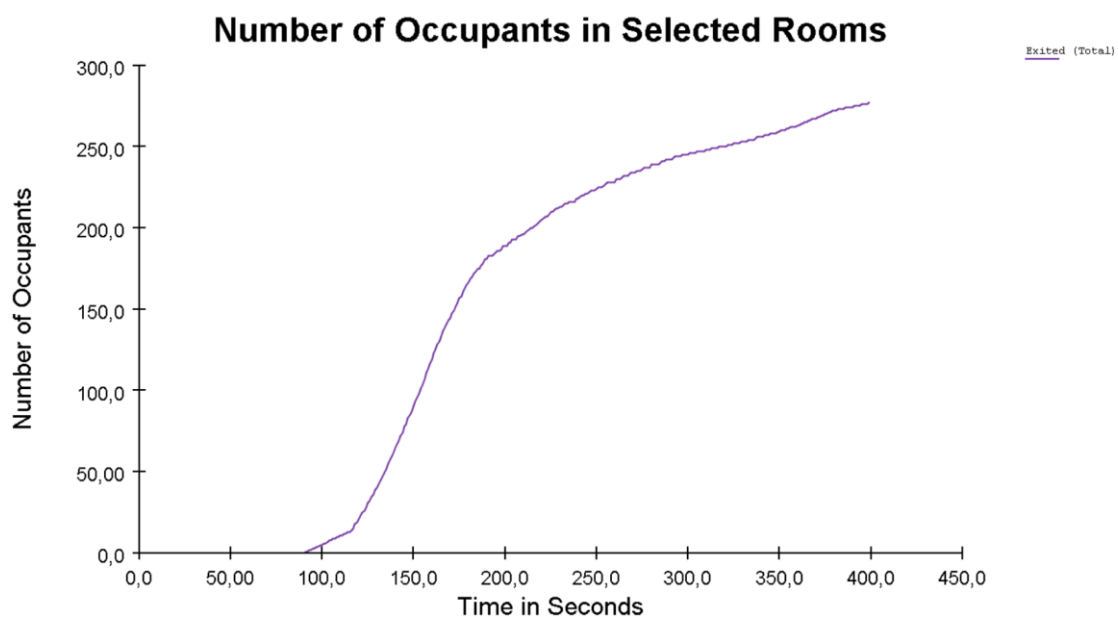
άτομα. Από την ανάλυση και όπως παρουσιάζεται και στα διαγράμματα προέκυψε ότι ο χρόνος εκκένωσης της αποβάθρας είναι 145 sec και όλου του σταθμού 420 sec.



Γράφημα 15: Πλήθος χρηστών στις σκάλες για την εκκένωση της αποβάθρας συναρτήσει του χρόνου

Προκαθορισμένη Κίνηση χρηστών στο χώρο με τη ρύθμιση Steering Mode για το 2^ο Σενάριο

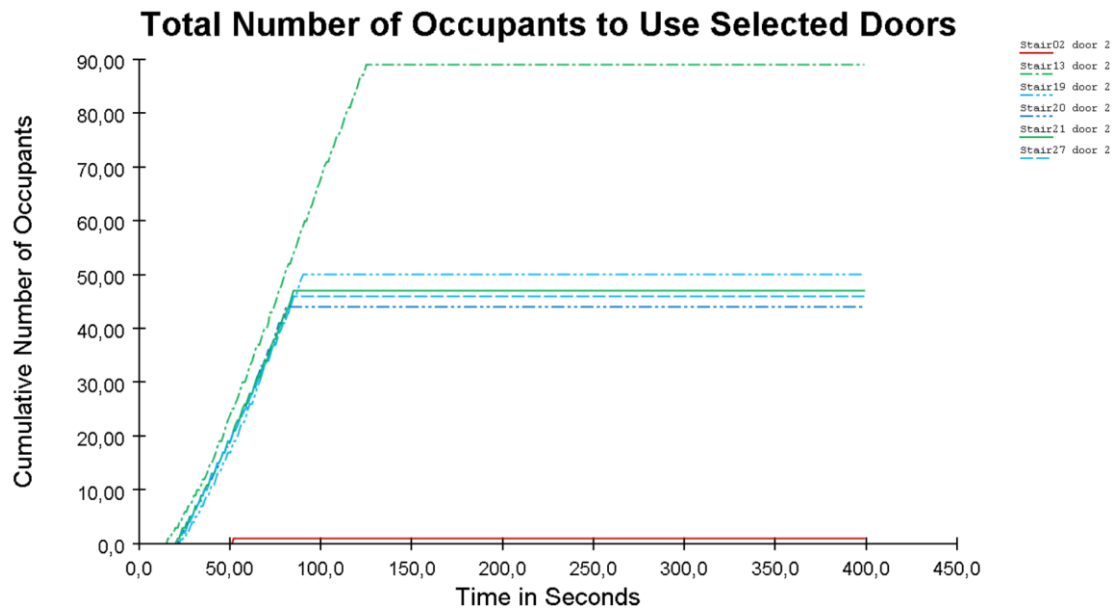
Στη δεύτερη σειρά αναλύσεων που έγινε υπάρχουν διαδρομές κίνησης για ορισμένες ομάδες χρηστών οι οποίες είναι προκαθορισμένες. Στο Γράφημα 16 παρουσιάζεται ο συνολικός χρόνος που χρειάζεται προκειμένου όλοι οι χρήστες να εκκενώσουν τον χώρο. Επίσης δίνονται πληροφορίες σχετικά με τον αριθμό των χρηστών που έχουν εκκενώσει τον χώρο για οποιαδήποτε χρονική στιγμή, για παράδειγμα 140 άτομα χρειάζονται 168 sec για να εκκενώσουν το σταθμό. Επίσης ο πρώτος χρήστης εκκελώνει το σταθμό στο χρόνο 90 sec και ο τελευταίος στο χρόνο 399 sec.



Γράφημα 16: Πλήθος χρηστών που εκκελώνουν τον χώρο συναρτήσει του χρόνου

Στο Γράφημα 17 παρουσιάζεται ο συνολικός αριθμός των χρηστών που έχουν εκκένωση την αποβάθρα ανάλογα τη σκάλα που έχουν χρησιμοποιήσει για οποιαδήποτε χρονική στιγμή.

Σύμφωνα με την προσομοίωση προκύπτει ότι οι σκάλες Stair 13 και Stair 20+21 χρησιμοποιούνται από περισσότερα άτομα. Από την ανάλυση και όπως παρουσιάζεται και στα διαγράμματα προέκυψε ότι ο χρόνος εκκένωσης της αποβάθρας είναι 124 sec και όλου του σταθμού 399 sec.



Γράφημα 17: Πλήθος χρηστών στις σκάλες για την εκκένωση της αποβάθρας συναρτήσει του χρόνου

