



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΕΤΑΛΛΕΙΟΛΟΓΩΝ -ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΠΜΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΟ ΧΡΟΝΟ ΕΚΚΕΝΩΣΗΣ
ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΧΩΡΩΝ**

ΜΑΡΚΑΚΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Μαρία Μενεγάκη

Αθήνα , Ιούνιος 2023

Περιεχόμενα

Λίστα Εικόνων	i
Λίστα πινάκων	ii
Περίληψη.....	iii
Abstract	iv
Εισαγωγή	1
Κεφάλαιο 1.Η βάση δεδομένων.....	2
Κεφάλαιο 2.Ο χρόνος πριν την εκκένωση.....	4
2.1. Σύνοψη	6
Κεφάλαιο 3.Ταχύτητες εκκένωσης χώρων.....	7
3.1. Ανασκόπηση κεφαλαίου	10
Κεφάλαιο 4.Εκτίμηση χρόνου εκκένωσης για διαφορετικές συνθήκες ορατότητας	11
4.1. Αποτελέσματα	12
4.1.1. Εκκένωση χωρίς μειονεκτήματα ορατότητας.....	12
4.2. Ανασκόπηση κεφαλαίου	16
Κεφάλαιο 5. Αξιολογήσεις μεθόδων εκκένωσης	17
5.1. Εκκένωση του σταθμού του μετρό στη Δημοκρατίας	21
5.2. Ανάλυση του χρόνου εκκένωσης (NFPA)	23
5.3. Ανασκόπηση κεφαλαίου	36
Κεφάλαιο 6. Οι εφαρμογές επαυξημένης πραγματικότητας για εκκενώσεις κτιρίων	37
6.1. Η επαυξημένη πραγματικότητα	37
6.2. Εκκενώσεις κτιρίων	39
Κεφάλαιο 7.Ανάλυση διαδρομών εκκένωσης σε πειράματα VR για ασφάλεια σήραγγας.....	42
Κεφάλαιο 8.Περίπτωση μελέτης εφαρμογής της εικονικής πραγματικότητας.....	49
Ανασκόπηση και προτάσεις για μελλοντική έρευνα	56
Βιβλιογραφία	57

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1 Οι χώροι του κάθε ορόφου	13
Εικόνα 2 Οι διαδρομές εκκένωσης ανάλογα με τις εξόδους στο επίπεδο Β2	14
Εικόνα 3 Η τιμή απόδοσης εκκένωσης (EPV) αξιολογείται με βάση την επικρατούσα συνθήκη ορατότητας. Το EPV είναι μια σχετική κλίμακα που συγκρίνεται με το σενάριο 1, με την υπόθεση ότι σε κάθε τιμή (χρόνος, απόσταση, ταχύτητα) στο σενάριο 1 αποδίδεται μια τιμή "1". Το αποτέλεσμα που προκύπτει από το τμήμα του ορόφου συμβολίζεται ως F, ενώ το αποτέλεσμα που προκύπτει από τη σκάλα συμβολίζεται ως S.	15
Εικόνα 4 Μεταβολή της ταχύτητας κίνησης ανάλογα με το τύπο του χώρου	15
Εικόνα 5. Τα σχέδια του σταθμού του μετρό στη Δημοκρατία.....	22
Εικόνα 6. Η μέγιστη διανυόμενη απόσταση στο σταθμό Δημοκρατία.....	23
Εικόνα 7 Οπτικοποίηση τυχαίας διασποράς των συμμετεχόντων	26
Εικόνα 8 Παρουσία επιβαινόντων στο σταθμό του μετρό ως προς την ώρα (ID 1)	28
Εικόνα 9 Αριθμός επιβαινόντων που αποχώρησαν από το επίπεδο της πλατφόρμας.....	29
Εικόνα 10 Περιοχές για τον προσδιορισμό του φαινομένου υπερπληθυσμού	30
Εικόνα 11 Αριθμός επιβατών ως προς την απόσταση	31
Εικόνα 12 Ρυθμοί ροής σε επιλεγμένες σκάλες/κυλιόμενες σκάλες κατά τη διάρκεια του χρόνου εκκένωσης	32
Εικόνα 13 Χρόνος εκκένωσης ανάλογα με το ποσοστό των ατόμων που χρησιμοποιούν κύριες εξόδους	33
Εικόνα 14 Χρόνος εκκένωσης σε συνάρτηση με την ταχύτητα των ατόμων	35
Εικόνα 15 Το φάσμα πραγματικότητας-εικονικής πραγματικότητας.....	38
Εικόνα 16 Διάθεσιμος και απαιτούμενος χρόνος εκκένωσης	39
Εικόνα 17 Παραδείγματα διαδρομών κίνησης	45
Εικόνα 18 Στιγμιότυπο οθόνης της κατάστασης έκτακτης ανάγκης.....	50
Εικόνα 19 Σχηματική αναπαράσταση της σύραγγας	51
Εικόνα 20 Σχηματική αναπαράσταση του σεναρίου εκκένωσης.....	52
Εικόνα 21 Αναπαράσταση της ποικιλομορφίας των διαδρομών	53
Εικόνα 22 Οι τιμές των μέτρων σύγκλισης	55

Λίστα πινάκων

Πίνακας 1 Υπολογισμοί φορτίου επιβατών	23
Πίνακας 2 Διαδρομή εξόδου χρόνος περπατήματος.....	24
Πίνακας 3 χρόνος εκκένωσης της πλατφόρμας	26
Πίνακας 4 Χρόνος εκκένωσης σταθμού	27
Πίνακας 5 Επίδρασης της διακύμανσης στις τιμές ταχύτητας στο χρόνο εκκένωσης.....	34
Πίνακας 6 Χρόνοι εκκένωσης συναρτήσει της διαθεσιμότητας των οδών εξόδου.....	36

Περίληψη

Η ασφαλής εκκένωση χώρων αποτελεί ένα πολύ σημαντικό πεδίο μελέτης μιας και είναι συνυφασμένη με τη σωματική ακεραιότητα των πολιτών. Οι παράμετροι που μπορούν να εξασφαλίσουν μια επιτυχημένη εκκένωση σχετίζονται με:

A) το χρόνο πριν την εκκένωση, που αναφέρεται στη διάρκεια μεταξύ της αρχικής επίγνωσης μιας πιθανής εκκένωσης και της σκόπιμης έναρξης της κίνησης εκκένωσης.

B) την ταχύτητα εκκένωσης

Γ) το χρονικό διάστημα της μετάβασης σε ασφαλή σημεία.

Καθώς η εκκένωση είναι μια εξέχουσα στρατηγική στη διαχείριση καταστροφών που στοχεύει στον μετριασμό των δυσμενών επιπτώσεων τόσο των ανθρωπογενών όσο και των φυσικών κινδύνων σε άτομα που κατοικούν σε κτίρια, μια ποικιλία από σύγχρονες τεχνολογίες, όπως η εικονική πραγματικότητα, έχουν χρησιμοποιηθεί για να αυξήσουν την ετοιμότητα και την αποτελεσματικότητα των εκκενώσεων κτιρίων. Αυτά τα εργαλεία έχουν χρησιμοποιηθεί για τους σκοπούς της εξέτασης της ανθρώπινης συμπεριφοράς στο πλαίσιο έκτακτης ανάγκης κτιρίου, καθώς και για την εκπαίδευση των ενοίκων του κτιρίου σχετικά με στρατηγικές διαχείρισης των εκκενώσεων κτιρίων.

Η παρούσα μελέτη παρουσιάζει τις έρευνες που έχουν γίνει σχετικά με τους παράγοντες που καθορίζουν το χρόνο ανταπόκρισης των χρηστών σε εντολές εκκένωσης και πιο συγκεκριμένα το χρόνο προεκκένωσης, την ταχύτητα εκκένωσης και το συνολικό χρόνο της διαδικασίας εκκένωσης. Στα συμπεράσματα θα γίνουν προτάσεις προς την κατεύθυνση που πρέπει να στραφεί η έρευνα, καθώς υπάρχουν ελλιπή στοιχεία και οι υπόγειοι χώροι έχουν διαφοροποιήσεις που πρέπει να ληφθούν υπόψιν. Καθώς δεν έχει γίνει αντίστοιχη έρευνα, θα πρέπει εκείνη να λάβει χώρα με τη χρήση νέων τεχνολογιών.

Abstract

The safe evacuation of spaces is a very important field of study since it is intertwined with the physical integrity of citizens. The parameters that can ensure a successful evacuation are related to:

A) the pre-evacuation time, which refers to the duration between the initial awareness of a possible evacuation and the deliberate initiation of the evacuation movement.

B) the discharge velocity

C) the time interval of the transition to safe places.

As evacuation is a prominent strategy in disaster management aimed at mitigating the adverse effects of both man-made and natural hazards on building occupants, a variety of modern technologies, such as virtual reality, have been used to increase preparedness and the effectiveness of building evacuations. These tools have been used for the purposes of examining human behavior in the context of a building emergency, as well as educating building occupants on building evacuation management strategies.

This study presents the investigation related to the factors that determine the user's response to evacuation orders and more specifically the pre-evacuation time, the velocity, and the total time of the evacuation process. In the conclusions, suggestions are made for the directions of the investigations, as there are incomplete data. In addition, underground spaces have differences that must be considered. As no corresponding research has been done, this should be implemented using new technologies.

Εισαγωγή

Η συμπεριφορά του πλήθους που καλείται να εκκενώσει ένα κτίριο είναι ένα κρίσιμο συστατικό οποιουδήποτε συστήματος πυρασφάλειας που βασίζεται στην απόδοση. Η κατανόηση και η πρόβλεψη της συμπεριφοράς των ανθρώπων είναι απαραίτητη για την ενίσχυση της ασφάλειας των κτιρίων. Πολλά μοντέλα εξόδου έχουν δημιουργηθεί για την προσομοίωση εκκενώσεων πυρκαγιάς προκειμένου να διαπιστωθεί εάν ο απαιτούμενος χρόνος ασφαλούς διαφυγής είναι μικρότερος από τον διαθέσιμο ασφαλή χρόνο εξόδου (Kuligowski et. al. ,2010).

Η διαδικασία εκκένωσης ενός κτιρίου μπορεί να αναλυθεί σε διάφορα στάδια που περιλαμβάνουν ένα χρονικό πλαίσιο απόκρισης (Kuligowski, 2016). Γενικά, ο συνολικός χρόνος εκκένωσης αποτελείται από τον χρόνο πριν από την εκκένωση και τον χρόνο της διαδικασίας. Η περίοδος προεκκένωσης είναι το διάστημα μεταξύ της αποστολής (ή της λήψης άλλων ενδείξεων) ενός γενικού σήματος συναγερμού ή της προειδοποίησης και της πρώτης προγραμματισμένης κίνησης εκκένωσης (British Standard Institute 2004). Ο χρόνος διαδικασίας είναι ο χρόνος που απαιτείται για να φτάσει ένας εμπλεκόμενος σε μια ασφαλή τοποθεσία μετά την έναρξη της κίνησης προς μια έξοδο (British Standard Institute 2004).

Η απόδοση της εκκένωσης σε αυτές τις δύο φάσεις εξαρτάται από τις συνθήκες που αντιμετωπίζουν οι εκκενωμένοι και την ικανότητά τους να ανταποκρίνονται. Επομένως, οι χρήστες του μοντέλου εκκένωσης και οι μηχανικοί πυρασφάλειας πρέπει να προσδιορίσουν τις συνθήκες που χαρακτηρίζουν τα σενάρια συμβάντων που επιδιώκουν να μιμηθούν (Gwynne, ; Boyce, 2016).

1. Η βάση δεδομένων

Η ανακάλυψη και η χρήση δεδομένων προεκκένωσης που αντικατοπτρίζουν την αναμενόμενη απόδοση εξόδου με βάση προκαθορισμένα σενάρια πυρκαγιάς, είναι μια κρίσιμη πρόκληση για τους χρήστες των διάφορων μοντέλων. Αυτή η διαδικασία μπορεί να είναι προβληματική καθώς τα δεδομένα προεκκένωσης είναι γενικά περιορισμένα, ελλιπή, δύσκολα ανακτώνται ή δεν υποστηρίζονται από μοντέλα εκκένωσης (Gwynne, ; Boyce, 2016).

Στο Εγχειρίδιο SFPE (Gwynne, ; Boyce, 2016). οι Gwynne και Boyce έκαναν την πρώτη προσπάθεια να απλοποιήσουν αυτή τη διαδικασία συγκεντρώνοντας υπάρχοντα μηχανολογικά δεδομένα σε μια σειρά πινάκων στους οποίους θα μπορούσαν να έχουν εύκολη πρόσβαση οι μοντελιστές εκκένωσης. Ένα μέρος της δουλειάς των Gwynne και του Boyce επικεντρώθηκε στα δεδομένα πριν από την εκκένωση. Κατηγοριοποίησαν 76 περιπτωσιολογικές μελέτες (τέσσερα περιστατικά πυρκαγιάς και εβδομήντα δύο ασκήσεις εκκένωσης) σύμφωνα με τις κατηγορίες πληρότητας και τις παρουσίασαν σε εννέα πίνακες. Ο στόχος του κεφαλαίου SFPE είναι να δώσει στον χρήστη μια περιγραφή κάθε μελέτης περίπτωσης και να εμφανίσει τα αντίστοιχα δεδομένα εκκένωσης χρησιμοποιώντας τέσσερα περιγραφικά στατιστικά στοιχεία: μέση, τυπική απόκλιση, ελάχιστο και μέγιστο (ανάλογα με τη σύνοψη δεδομένων που είναι διαθέσιμη στο αρχικό υλικό πηγής).

Ο πρώτος περιορισμός αυτής της υπάρχουσας βάσης δεδομένων είναι ότι ένα ή περισσότερα από τα τέσσερα στατιστικά στοιχεία συχνά απουσιάζουν. Επιπλέον, τα στατιστικά στοιχεία που παρέχονται στην υπάρχουσα βάση δεδομένων δεν προορίζονται να χρησιμοποιηθούν απευθείας ως είσοδοι σε υπάρχοντα μοντέλα εκκένωσης, τα οποία απαιτούν από τους χρήστες να καθορίσουν τις παραμέτρους διανομής πριν από την εκκένωση. Αυτές οι συνοπτικές μετρήσεις είχαν σκοπό να εμπνεύσουν τον αναγνώστη να επιλέξει και να διερευνήσει τις προσφερόμενες πρωτότυπες πηγές δεδομένων.

Οι περιπτωσιολογικές μελέτες που περιέχονται σε αυτή τη διευρυμένη βάση δεδομένων ομαδοποιούνται με βάση το είδος του χώρου που εμπλέκεται (οικεία, επαγγελματικός χώρος κλπ.). Αρχικά, αυτή η κατηγοριοποίηση αντικατόπτριζε τη συνήθη μέθοδο που οι επαγγελματίες αναζητούσαν και επέλεγαν δεδομένα. Η αρχική

ταξινόμηση της πληρότητας έχει επεκταθεί για να ταιριάζει στις νέες περιπτωσιολογικές μελέτες που προσδιορίζονται, δηλαδή αν ο χώρος είναι ξενοδοχείο, οδική σήραγγα (δηλαδή συμπεριφορά εκκένωσης των οδηγών) και άλλα.

2. Ο χρόνος πριν την εκκένωση

Πολυάριθμες μελέτες (Kobes et. al., 2010; McConnel et. al. 2010) έχουν δείξει ότι ο χρόνος πριν από την εκκένωση μπορεί να αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό ποσό του συνολικού χρόνου εκκένωσης ενός χώρου, ο οποίος μπορεί να έχει σοβαρές επιπτώσεις ανάλογα με τη φύση του περιστατικού. Έχουν κατασκευαστεί εννοιολογικά μοντέλα για να απεικονίσουν τις ποικιλίες των αντιδράσεων και ακόμη και τις χρονικές στιγμές των συμπεριφορών των συμμετεχόντων πριν από την εκκένωση. Ένα από τα παλαιότερα από αυτά τα μοντέλα παρασχέθηκε από τους Canter, Breaux και Sime (1980), οι οποίοι χαρτογράφησαν διαδικασίες για όλες τις πιθανές ενέργειες και αποκρίσεις που μπορούσαν να κάνουν οι εκτοπισμένοι σε διάφορα είδη χώρων. Τα εννοιολογικά μοντέλα (Kuligowski et. al. ,2001) επηρεάστηκαν από το ευρύ μοντέλο προστατευτικής δράσης των Lindell και Perry (2012). Άλλες έρευνες (Bryan, 2002; Sherman et. al., 2011) εξέτασαν και ποσοτικοποίησαν τα εσωτερικά και εξωτερικά στοιχεία που μπορεί να επηρεάσουν τη συμπεριφορά πριν από την εκκένωση. Παρόλα αυτά, οι συμπεριφορές προεκκένωσης είναι συνήθως λιγότερο τεκμηριωμένες, μετρημένες και μοντελοποιημένες από τις συμπεριφορές κίνησης (Kobes et. al. , 2010).

Σε εννοιολογικό επίπεδο, τρεις κύριες προσεγγίσεις μοντελοποίησης έχουν παρουσιαστεί για να περιγράψουν τον χρόνο εκκένωσης κατά τη δημιουργία μοντέλων εκκένωσης (Kuligowski, 2013). Η πρώτη μέθοδος βασίζεται στο ότι ο χρήστης εκχωρεί έναν προκαθορισμένο χρόνο σε άτομα ή ομάδες (δηλαδή, μια ντετερμινιστική μέθοδο) ή έναν ψευδοτυχαίο αριθμό που δημιουργείται από μια κατανομή (δηλαδή, μια στοχαστική προσέγγιση). Η δεύτερη μέθοδος περιλαμβάνει την εκχώρηση ακολουθιών ενεργειών από τον χρήστη πριν από την εκκένωση. Για να ολοκληρώσουν τις εργασίες τους, οι συμμετέχοντες μετακινούνται σε διαφορετικές περιοχές του εικονικού κτιρίου. Ο χρήστης εκχωρεί μια προκαθορισμένη περίοδο για κάθε ενέργεια για κάθε συμμετέχοντα. Η τελευταία μέθοδος είναι η στρατηγική που βασίζεται σε προβλέψεις. Σε αυτήν την κατάσταση, οι συμμετέχοντες λαμβάνουν προληπτικά μέτρα ως απάντηση σε διάφορες εσωτερικές και εξωτερικές μεταβλητές.

Καθεμία από τις τρεις μεθόδους έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Για παράδειγμα, ο πρωταρχικός περιορισμός των δύο πρώτων προσεγγίσεων είναι ότι η συμπεριφορά δεν προβλέπεται στην πραγματικότητα από τα μοντέλα, αλλά μάλλον

βασίζεται σε υποθέσεις των χρηστών, ενώ ο πρωταρχικός περιορισμός της τρίτης προσέγγισης είναι η υπόθεση «ομογένειας» (δηλ. οι παράγοντες αντιδρούν σε συγκεκριμένα ερεθίσματα με παρόμοιο τρόπο) (Kuligowski, 2013). Το πρωταρχικό πλεονέκτημα της προσέγγισης με βάση την πρόβλεψη (δηλαδή, η τρίτη προσέγγιση) είναι ότι η συμπεριφορά των συμμετεχόντων στην πραγματικότητα μοντελοποιείται, ενώ οι άλλες δύο προσεγγίσεις απαιτούν από τους χρήστες να ορίσουν μια τέτοια συμπεριφορά επιλέγοντας μια κατανομή ή μια ακολουθία ενεργειών πριν από την εκκένωση. Αναγνωρίζεται, ωστόσο, ότι μια τέτοια προσέγγιση έχει χρησιμοποιηθεί μόνο σε λίγες περιπτώσεις (Lovreglio et. al., 2015). Όσον αφορά την εφαρμογή, και ως επί το πλείστον, οι χρήστες του μοντέλου εκκένωσης εξακολουθούν να βασίζονται στην πρώτη μέθοδο για να μιμηθούν τον χρόνο πριν από την εκκένωση (ιδιαίτερα τη στοχαστική προσέγγιση).

Η πρώτη προσέγγιση (είτε ντετερμινιστική είτε στοχαστική) απαιτεί από τους χρήστες του μοντέλου να παρέχουν δεδομένα χρονισμού πριν από την εκκένωση για να αναπαριστούν έμμεσα τους τύπους συμπεριφορών που εκτελούν διαφορετικά άτομα κατά τη χρονική περίοδο προεκκένωσης, καθώς και το συνολικό χρονικό διάστημα που απαιτείται για την εκτέλεση αυτών των σειρών συμπεριφοράς. Αυτό επιτυγχάνεται ζητώντας από τους χρήστες να ορίσουν κατανομές πριν από την εκκένωση που θα μπορούσαν να αντιπροσωπεύουν χρονική αβεβαιότητα.

Τα δεδομένα από ασκήσεις εκκένωσης και πραγματικές καταστροφές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση του χρόνου και των κατανομών πριν από την εκκένωση για διάφορους τύπους κτιρίων (Gwynne et. al., 2017). Τρεις βάσεις δεδομένων πριν από την εκκένωση έχουν προταθεί μέχρι σήμερα. Ο Shi παρουσίασε πολλά περιγραφικά στατιστικά στοιχεία για τα χρονοδιαγράμματα πριν από την εκκένωση που ελήφθησαν από 69 ασκήσεις εκκένωσης και τα κατηγοριοποίησε σε μικρό αριθμό ομάδων πληρότητας.

Η δεύτερη βάση δεδομένων που αναπτύχθηκε από τους Fahy και Proulx (2001) πρόσφερε στους χρήστες περιγραφικά στατιστικά στοιχεία για έναν αριθμό ασκήσεων πυρκαγιάς και περιστατικών πυρκαγιάς που είχαν συμβεί σε γραφεία, κτίρια κατοικιών, ξενοδοχεία και καταστήματα λιανεμπορίου. Οι Gwynne and Boyce παρείχαν την πιο πρόσφατη βάση δεδομένων στο Εγχειρίδιο SFPE (2016). Προσδιόρισαν 76 περιπτώσιολογικές μελέτες και παρουσίασαν περιγραφικά

στατιστικά στοιχεία για το χρόνο πριν από την εκκένωση ανά κατηγορία πληρότητας. Τα υπάρχοντα έργα έχουν την κύρια κοινότητα και τον περιορισμό της παροχής μόνο περιγραφικών στατιστικών στοιχείων πριν από την εκκένωση. Αν και αυτά τα στατιστικά στοιχεία προσφέρουν στους χρήστες την τάξη μεγέθους των χρονικών πλαισίων πριν από την εκκένωση για διάφορες καταστάσεις, είναι δύσκολο για τους χρήστες των μοντέλων εκκένωσης να τα μεταφράσουν σε μια πιθανολογική κατανομή. Αυτές οι κατανομές θα πρέπει ιδανικά να βρίσκονται στις αρχικές αναφορές που αναφέρονται στις τρέχουσες βάσεις δεδομένων από χρήστες μοντέλων εκκένωσης. Ωστόσο, αυτά συνήθως δεν δημοσιεύονται επειδή είναι εκτός του πεδίου εφαρμογής των αντίστοιχων εργασιών.

2.1. Σύνοψη

Από τις μελέτες που παρουσιάστηκαν στο παρόν κεφάλαιο και αφορούν το χρόνο πριν από την εκκένωση, μία αφορούσε τις αντιδράσεις των συμμετεχόντων και τέσσερις αφορούσαν το ρόλο που παίζει το είδος του κτιρίου που εκκενώνεται (γραφεία, οικείες, καταστήματα).

3. Ταχύτητες εκκένωσης χώρων

Τις τελευταίες δεκαετίες, τα μοντέλα υπολογιστών είναι ολοένα και πιο διαδεδομένα στη διαχείριση των διαδικασιών εκκένωσης και κίνησης του πλήθους, καθώς θεωρούνται η πιο αποτελεσματική προσέγγιση για την ακριβή μίμηση των συνεπειών της εκκένωσης σε όλους τους τύπους εγκαταστάσεων και την αξιολόγηση της ασφάλειας των συμμετεχόντων. Τα χαρακτηριστικά των ανθρώπων, όπως η ψυχολογία και η συντροφικότητα, δεν ακολουθούν ένα τυποποιημένο πρότυπο, καθιστώντας δύσκολη την πρόβλεψη και τη μίμηση της ανθρώπινης συμπεριφοράς κατά τις διαδικασίες εκκένωσης. Προκειμένου να προσομοιωθεί η ανθρώπινη συμπεριφορά κατά τη διάρκεια καταστάσεων έκτακτης ανάγκης, το λογισμικό προσομοίωσης εκκένωσης έχει παραμετροποιήσει ορισμένους θεμελιώδεις ανθρώπινους παράγοντες, όπως το μέγεθος του σώματος, την ταχύτητα περπατήματος, τη συμπεριφορά και την υποστήριξη.

Το Society of Fire Protection Engineers (SFPE) έχει εγκρίνει μια αναλογία μεταξύ πυκνότητας πληθυσμού και ταχύτητας βάδισης καθώς και μια μέγιστη ταχύτητα μετακίνησης (Nelson, Mowrer 2002) που χρησιμοποιείται ευρέως σε παραδοσιακές μοντελοποιημένες προσομοιώσεις εκκένωσης με τη χρήση υπολογιστών για τον προσδιορισμό του χρόνου εκκένωσης.

Ο Peacock και οι συνεργάτες του (2011) έλαβαν μια πολύ πολύτιμη συλλογή δεδομένων για την ταχύτητα κίνησης κατά τη διάρκεια εκκένωσης σε άσκηση πυρκαγιάς σε πολυώροφο κτίριο χρησιμοποιώντας δεδομένα που συλλέχθηκαν από το Εθνικό Ινστιτούτο Προτύπων και Τεχνολογίας (NIST). Η έρευνα αποκαλύπτει ότι η μέση ταχύτητα κίνησης σε όλο το κτίριο είναι $0,48 \pm 0,16$ m/s, η οποία είναι συγκρίσιμη με το εύρος των τιμών που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία. Ωστόσο, η τοπική ταχύτητα κίνησης καθώς οι άνθρωποι κατεβαίνουν μια σκάλα φαίνεται να ποικίλλει πολύ μέσα σε ένα δεδομένο κλιμακοστάσιο, και κυμαίνεται από 0,056 m/s έως 1,7 m/s. Έτσι, η χρησιμοποίηση μιας κατανομής της ταχύτητας κίνησης αντί μιας συγκεκριμένης τιμής θα πρέπει να παρέχει πιο ρεαλιστική απεικόνιση της ταχύτητας κίνησης στα κλιμακοστάσια.

Προκειμένου να διερευνήσουν την ανθρώπινη κινητικότητα σε σενάρια έκτακτης ανάγκης σε πολυσύχναστες περιοχές, οι Kiyono και Mori (2004) συνέκριναν μοντέλα συμπεριφοράς εκκένωσης χρησιμοποιώντας ελλειπτικά στοιχεία με πραγματικές ροές

πεζών. Τα προσομοιωμένα αποτελέσματα ήταν συνεπή με τα παρατηρούμενα περιστατικά.

Επιπλέον, ο Kobes και οι συνεργάτες του (2010) ερεύνησαν τη δυνατότητα εφαρμογής της εικονικής πραγματικότητας στη μελέτη της ανθρώπινης συμπεριφοράς στις φλόγες και προσπάθησαν να υπολογίσουν την ταχύτητα περπατήματος διαιρώντας την (κατά προσέγγιση) απόσταση περπατήματος με το χρόνο κίνησης.

Ο Xie και οι συνεργάτες του (2020) διαπίστωσαν ότι ο δείκτης μάζας σώματος (ΔΜΣ) έχει σημαντική επίδραση στην ταχύτητα ανόδου κατά τη διαδικασία εκκένωσης και πρότειναν ένα μοντέλο για την πρόβλεψη της βέλτιστης διαδρομής εκκένωσης σε σκάλες. Η επίδραση των χαρακτηριστικών των ανθρώπων στην ταχύτητα ερπυσμού κατά τη διάρκεια των εκκενώσεων έχει ερευνηθεί από τους Kady και Davis (2009), οι οποίοι προσδιόρισαν ότι η μέση ταχύτητα ερπυσμού είναι 0,77 m/s, η οποία είναι πολύ υψηλότερη από προηγούμενες μελέτες που υποδεικνύουν ταχύτητα ερπυσμού περίπου 0,30 m /s (Fridolf, et. al., 2018; Jin, 1997). Αυτή η ανακάλυψη είναι ζωτικής σημασίας για τη βελτίωση της ακρίβειας των προσομοιώσεων εκκένωσης.

Άλλες έρευνες εξετάζουν την ταχύτητα του ανθρώπου σε εξωτερικό περιβάλλον σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης, όπως η μελέτη προσομοίωσης για την αξιολόγηση της ταχύτητας βαδίσματος κατά τη διάρκεια μιας εκκένωσης λόγω τσουνάμι στην Ινδονησία (Yosritzal; Kemal, 2017), η οποία απέδωσε μέση ταχύτητα 1.419 μέτρα ανά δευτερόλεπτο. Σε αυτό το πείραμα, οι εθελοντές έλαβαν οδηγίες να περπατήσουν γρήγορα από μια συγκεκριμένη τοποθεσία σε ένα συγκεκριμένο σημείο κοντά σε ένα καταφύγιο και οι παρατηρητές τοποθετήθηκαν σε έξι σημεία κατά μήκος της διαδρομής για να καταγράψουν την ώρα που οι εθελοντές πέρασαν από κάθε τοποθεσία.

Άλλες μελέτες που αφορούν την ταχύτητα μετακίνησης σε συνθήκες με χαμηλή όραση, όπως οι συνθήκες καπνού, έχουν δείξει ότι η τυπική ταχύτητα ταξιδιού μπορεί να μειωθεί έως και 70%, ανάλογα με την ορατότητα και το είδος καπνού (ερεθιστικός και μη ερεθιστικός). Ο Jin (1997) διεξήγαγε ένα πείραμα σε έναν διάδρομο μήκους 20 μέτρων στον οποίο παρήχθη εξαιρετικά εκνευριστικός λευκός καπνός και λιγότερο ενοχλητικός μαύρος καπνός. Ανέπτυξε ένα γράφημα που απεικονίζει τη σχέση

μεταξύ του συντελεστή κατάσβεσης και της ταχύτητας βαδίσματος τόσο για τον ερεθιστικό όσο και για τον μη ερεθιστικό καπνό. Για παράδειγμα, για συντελεστή κατάσβεσης 0,5, που αντιστοιχεί σε ορατότητα περίπου 6 m για ερεθιστικό καπνό και 12 m για μη ερεθιστικό καπνό, η ταχύτητα περπατήματος είναι 0,3 m/s για τον ερεθιστικό καπνό και 1 m/s για τον μη ερεθιστικό καπνό. Επιπλέον, ο Fridolf και οι συνεργάτες του (2018) αποκαλύπτουν ότι το κρίσιμο όριο ορατότητας έχει καθοριστεί στα 3 μέτρα και για τιμές κάτω από αυτό, η ταχύτητα βάρδισης μειώνεται δραματικά· πρόσφεραν επίσης μια παραλλαγή της ανεμπόδιστης ταχύτητας περπατήματος με βάση τα χαρακτηριστικά του πληθυσμού.

Οι υπόγειοι χώροι έχουν ειδικές απαιτήσεις επειδή διαφέρουν από ένα τυπικό επιφανειακό κτίριο στο ότι δεν υπάρχει φυσικός φωτισμός. Οι διαδρομές εξόδου είναι πάντα ανοδικές, προκαλώντας κόπωση και οι χρήστες έχουν περιορισμένη επίγνωση προσανατολισμού, η οποία επηρεάζει την ταχύτητα μετακίνησής τους.

Προκειμένου να υπολογιστεί ο χρόνος εξόδου της αίτησης ασφαλείας, η Εθνική Ένωση Πυροπροστασίας συνιστά μέγιστη ταχύτητα εξόδου 0,628 m/s κατά μήκος πλατφόρμων, διαδρόμων και ραμπών σε περιοχές με μεγαλύτερη συμφόρηση, 1,017 m/s σε περιοχές με μικρότερη συμφόρηση και 0,243 m/s για σκάλες σε υπόγεια συστήματα διέλευσης (σε περιπτώσεις κατακόρυφης διαδρομής, η ταχύτητα και η απόσταση ορίζονται ως προς την κατακόρυφη αλλαγή υψομέτρου που γεφυρώνεται από την εγκατάσταση). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι αυτοί οι αριθμοί προορίζονται για χρήση σε χειροκίνητους υπολογισμούς.

Οι μελέτες που συζητούν τα δεδομένα των κινήσεων σε υπόγειους χώρους περιορίζονται σε εκείνες σε πειράματα σήραγγας (τόσο σιδηροδρομικές όσο και οδικές) (Ronchi et. al., 2018). Σε ένα πείραμα πλήρους κλίμακας σε μια οδική σήραγγα ο Seike και οι συνεργάτες του (2016), αναφέρουν ότι η ταχύτητα κανονικής βάρδισης ("περπατήστε στο τούνελ όπως περπατάτε συνήθως") και η ταχύτητα εκκένωσης έκτακτης ανάγκης ("παρακαλώ αποφασίστε να εκκενώσετε και κάντε το εξαιρετικά γρήγορα") διερευνήθηκαν υπό διαφορετικούς περιορισμούς ορατότητας και αποκαλύφθηκαν μια διακύμανση μεταξύ 3,55 m/s και 1,1 m/s, αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, η μέγιστη κανονική ταχύτητα μειώθηκε από 2 m/s σε 1 m/s και η ταχύτητα εκκένωσης από 3,55 m/s σε 1,41 m/s. Παρουσία καπνού, η μέγιστη ταχύτητα μειώνεται γραμμικά στα 2,53 μέτρα ανά δευτερόλεπτο και η ελάχιστη

ταχύτητα στα 1,24 μέτρα ανά δευτερόλεπτο. Συμπερασματικά, πειράματα εκκένωσης σε σήραγγα γεμάτη καπνό δείχνουν ότι οι μέγιστες, ελάχιστες και μέσες τιμές της κανονικής ταχύτητας περπατήματος είναι σχεδόν σταθερές ανεξάρτητα από τον συντελεστή κατάσβεσης, ενώ η μέγιστη ταχύτητα εκκένωσης έκτακτης ανάγκης μειώνεται γρήγορα καθώς αυξάνεται η πυκνότητα καπνού. Επιπλέον, η πυκνότητα του καπνού έχει μικρή επίδραση στη μέση ταχύτητα εκκένωσης έκτακτης ανάγκης.

Σχετικά με την εκκένωση με τη χρήση κλιμακοστασίων ανόδου, ο Ronchi και οι συνεργάτες του διερεύνησαν τις επιπτώσεις της κόπωσης στις ταχύτητες βάρδισης, τη φυσιολογική απόδοση και τις συμπεριφορές σε περίπτωση εκκένωσης μακράς ανόδου και διαπίστωσε ότι η σωματική ικανότητα επηρέασε τις ταχύτητες βαδίσματος στην περίπτωση ανοδικής διαδρομής σκάλας (2015), με τη μέση τιμή να κυμαίνεται από 0,62 έως 0,83 μέτρα ανά δευτερόλεπτο. Υπάρχουν περισσότερες μελέτες που εξετάζουν την εκκένωση με άνοδο σκαλών που υποδεικνύουν διακύμανση στο ρυθμό (Chen et. al. ,2018).

3.1. Ανασκόπηση κεφαλαίου

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκαν έρευνες που είχαν ως αντικείμενο μελέτης της ταχύτητα διαφυγής. Παρουσιάστηκαν μελέτες(μοντέλα προσομοίωσης και κανονικά πειράματα) που ερευνούσαν την επίδραση στην ταχύτητα:

A) του δείκτη μάζας σώματος και των χαρακτηριστικών των ανθρώπων (4 μελέτες)

B) την πυκνότητα του πληθυσμού (1 μελέτη)

Γ) τις συνθήκες ορατότητας και την ύπαρξη φλογών (2 και 1 μελέτες αντίστοιχα)

Δ) τη μέγιστη ταχύτητα μετακίνησης (3 μελέτες)

E) τους υπόγειους χώρους (2 μελέτες)

Στ) την παρουσία σκαλών ανόδου για τη διαφυγή (2 μελέτες)

4. Εκτίμηση του χρόνου εκκένωσης από υπόγεια για διαφορετικές συνθήκες ορατότητας

Κατά την καθιέρωση ενός μοντέλου εκκένωσης κτιρίου λόγω πυρκαγιάς ως μέρος ενός σχεδιασμού για τον υπολογισμό του χρόνου εκκένωσης που απαιτείται, επιλέγεται ένα εικονικό σημείο ανάφλεξης ανάμεσα είτε στα πιθανά σημεία είτε μεταξύ των σημείων στα οποία μια πυρκαγιά θα μπορούσε να προκαλέσει τη μεγαλύτερη ζημιά.

Τα ψηλά, πολύπλοκα κτίρια, όπως οι ουρανοξύστες και οι υπόγειες μεταφορικές εγκαταστάσεις, έχουν δωμάτια με μεγάλες χωρητικότητες και μεγάλους, περίπλοκους διαδρόμους. Επιπλέον, οι είσοδοι και οι εξοδοι μεγάλων κτιρίων είναι πιο διαχωρισμένες ή απλωμένες από ό,τι οι μικρότερες ή τυπικές δομές. Λόγω των συνθηκών αυτών των τεράστιων πολύπλοκων κατασκευών και του γεγονότος ότι οι άνθρωποι δεν χρησιμοποιούν πάντα την πλησιέστερη έξοδο κινδύνου (Frantzich, 2001), οι χρόνοι εκκένωσης μπορεί να αυξηθούν. Ειδικά σε περίπτωση πυρκαγιάς σε εγκαταστάσεις υπόγειας διέλευσης, όπως σταθμοί του μετρό, η κατεύθυνση του καπνού που ταξιδεύει είναι ίδια με τη διαδρομή εκκένωσης, απαιτώντας από τους εκτοπισμένους να διασχίσουν τον όροφο για να φτάσουν στις σκάλες εξόδου (An et al., 2004). Ως αποτέλεσμα αυτών των παραγόντων, είναι πιθανό ότι οι εκτοπισμένοι να αντιμετωπίσουν κινδύνους ενώ θα αντιμετωπίσουν εμπόδια που σχετίζονται με τον καπνό κατά τη διάρκεια των εκκενώσεων.

Οι συμπεριφορές εκκένωσης κάτω από γεμάτες καπνό, στρεσογόνες καταστάσεις είναι μία από τις προκλήσεις για την αξιολόγηση ενός σχεδιασμού εκκένωσης με βάση την απόδοση της πυρκαγιάς και την εκτίμηση του χρόνου εκκένωσης. Οι αβεβαιότητες της πραγματικής εκκένωσης επηρεάζουν επίσης την αξιοπιστία των προσομοιώσεων εκκένωσης που βελτιστοποιούν την κίνηση ενός συμμετέχοντα. Προκειμένου να ενισχυθεί η αξιοπιστία των σχεδίων που βασίζονται στην απόδοση της πυρκαγιάς και των μοντέλων υπολογισμού της εκκένωσης, απαιτούνται ακριβή δεδομένα για τις εργασίες εκκένωσης σε συνθήκες με προβλήματα όρασης. Παρά την τεράστια βιβλιογραφία σχετικά με την ποσοτικοποίηση της ανθρώπινης κίνησης, λίγες ερευνητικές πρωτοβουλίες έχουν αντιμετωπίσει τις διακυμάνσεις στις ανθρώπινες φυσικές ικανότητες κάτω από αυτά τα περιβάλλοντα με ειδικές συνθήκες ορατότητας. Οι Jeon and Hong (2009) και ο Kobes και οι συνεργάτες του (2010)

διερεύνησαν πρόσφατα την κίνηση των επιβατών όταν η ορατότητα μειώνεται χρησιμοποιώντας ένα πείραμα εκκένωσης.

Σε προηγούμενες μελέτες για την εκκένωση, υποτέθηκε ότι η ταχύτητα κίνησης των επιβατών ποικίλλει ανάλογα με την πυκνότητα των επιβατών (Thompson ;Marchant ,1995), τους τύπους της διαδρομής (Kady; Davis, 2009), τις συνθήκες της μετάβασης (Lee et. al., 2003), τους τύπους των κτηρίων (Boyce et. al., 1999) και τα χαρακτηριστικά των μετακινούμενων ατόμων (Kady; Davis, 2009) .Οι Li (2004) και Yeo and He (2009) διεξήγαγαν έρευνα για την ταχύτητα κίνησης στις σκάλες, ενώ ο Shi (2009) παρείχε μια περίληψη των συλλεχθέντων δεδομένων από προηγούμενες μελέτες σχετικά με τη συμπεριφορά εκκένωσης και την ταχύτητα κίνησης. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η συντριπτική πλειοψηφία των μελετών σχετικά με την εκκένωση των επιβατών έχει επικεντρωθεί στην ταχύτητα κίνησης, ενώ η απόσταση κίνησης παραμένει ανεπαρκώς μελετημένη.

Αυτό το κεφάλαιο θα εξετάσει τα χαρακτηριστικά συμπεριφοράς και τις αλλαγές των εκτοπισμένων που αντιμετωπίζουν προβλήματα ορατότητας λόγω του καπνού κατά τη διάρκεια της πειραματικής δοκιμής. Το πείραμα διεξήχθη σε εξελιγμένες υπόγειες εγκαταστάσεις διέλευσης από τους Gyu-Yeob Jeon (2011). Καταγράφηκαν και αξιολογήθηκαν 125 ατομικές συμπεριφορές εκκένωσης των συμμετεχόντων. Με ποικίλες συνθήκες ορατότητας, αξιολογήθηκαν οι αλλαγές στον χρόνο εκκένωσης, την ταχύτητα κίνησης, τις διαδρομές εκκένωσης και την απόσταση μετακίνησης.

4.1. Αποτελέσματα

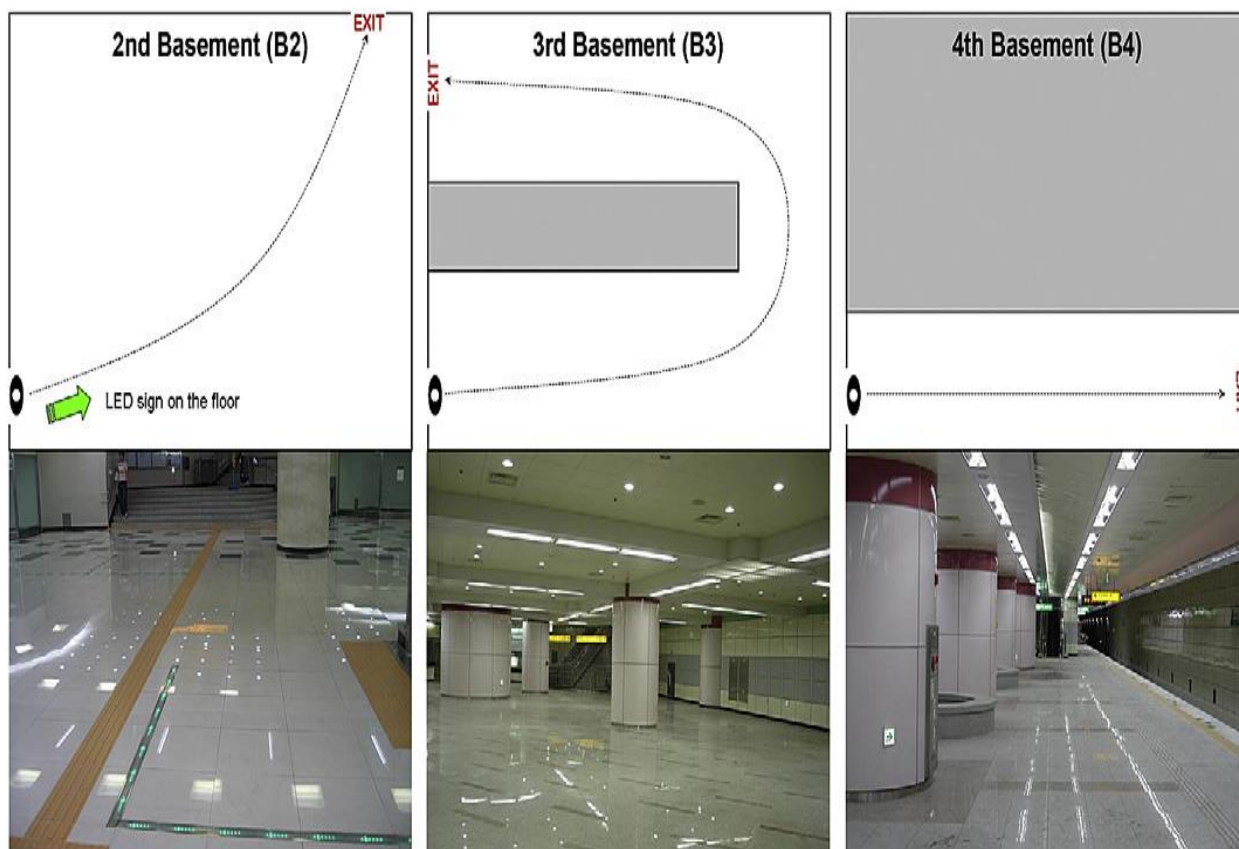
4.1.1. Εκκένωση χωρίς μειονεκτήματα ορατότητας

Με βάση την κατάσταση του συστήματος φωτισμού, τα σενάρια 1 και 2 περιγράφουν εκκενώσεις χωρίς μειονεκτήματα ορατότητας κατά τη διάρκεια εκκενώσεων πυρκαγιάς. Το σενάριο 1 είναι όταν το σύστημα φωτισμού λειτουργεί κανονικά και το σενάριο 2 είναι όταν διακόπτεται η παροχή ρεύματος και λειτουργεί μόνο το σύστημα φωτισμού έκτακτης ανάγκης.

Ένα πειραματικό σενάριο 1 είναι ένα τυπικό πείραμα εκκένωσης σε κανονικές συνθήκες χωρίς εμπόδια στην εκκένωση. Για το σενάριο 1, η πλειοψηφία των συμμετεχόντων διέφυγε τρέχοντας ή περπατώντας γρήγορα. Η πλειοψηφία των ατόμων έλαβε τις ενδείξεις κατεύθυνσης κανονικά και όλα τα άτομα απομακρύνθηκαν επιτυχώς. Η απόσταση εκκένωσης ήταν η μικρότερη από όλες τις

δοκιμές και η μέση ταχύτητα κίνησης από το σημείο εκκίνησης μέχρι το τελικό σημείο ήταν 2,82 μέτρα ανά δευτερόλεπτο, η ταχύτερη από οποιοδήποτε πείραμα. Η ταχύτητα κίνησης διέφερε μεταξύ επιπέδων και κλιμακοστασίων. Η μέση ταχύτητα σε ορόφους και κλιμακοστάσια ήταν 3,67 και 1,40 μέτρα ανά δευτερόλεπτο, αντίστοιχα.

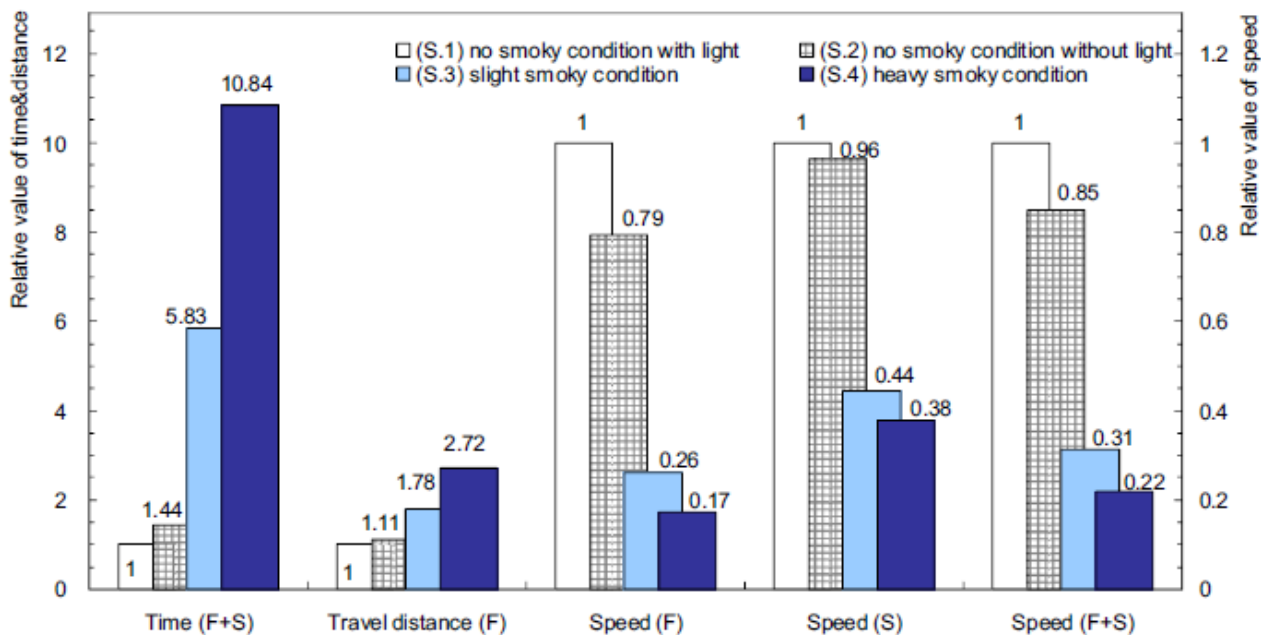
Στο σενάριο 2 σε σχετικά με αμυδρά προβλήματα ορατότητας, η πλειονότητα των ερωτηθέντων έτρεξε ή περπάτησε γρήγορα, παρόμοια με το σενάριο 1. Στο Πείραμα 2 η απόσταση και η ταχύτητα μετακίνησης του υποκειμένου ήταν μικρότερες από ό,τι στο Πείραμα 1, με αποτέλεσμα μεγαλύτερο χρόνο εκκένωσης από ό,τι στο Πείραμα 1. Συγκεκριμένα, η ταχύτητα κίνησης, η οποία είναι σημαντικό στοιχείο στην πρόβλεψη εκκένωσης, έπεσε μόνο στο τμήμα του ορόφου και όχι στο τμήμα της σκάλας. Στο σενάριο 2, η ταχύτητα κίνησης σε ορόφους ήταν 2,91 m/s και 1,35 m/s στις σκάλες.



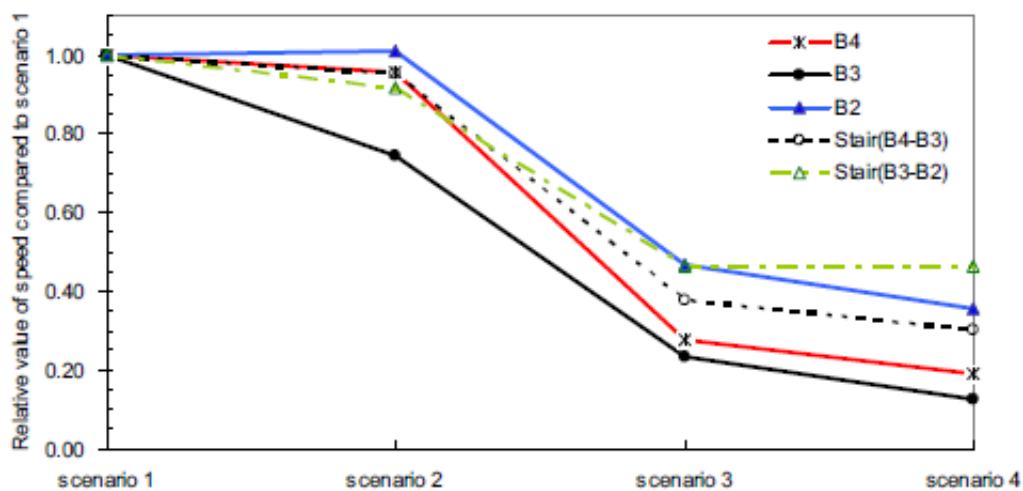
Εικόνα 1 Οι χώροι του κάθε ορόφου



Εικόνα 2 Οι διαδρομές εκκένωσης ανάλογα με τις εξόδους στο επίπεδο B2



Εικόνα 3 Η τιμή απόδοσης εκκένωσης (EPV evacuation performance value) αξιολογείται με βάση την επικρατούσα συνθήκη ορατότητας. Το EPV είναι μια σχετική κλίμακα που συγκρίνεται με το σενάριο 1, με την υπόθεση ότι σε κάθε τιμή (χρόνος, απόσταση, ταχύτητα) στο σενάριο 1 αποδίδεται μια τιμή "1". Το αποτέλεσμα που προκύπτει από το τμήμα του ορόφου συμβολίζεται ως F, ενώ το αποτέλεσμα που προκύπτει από τη σκάλα συμβολίζεται ως S.



Εικόνα 4 Μεταβολή της ταχύτητας κίνησης ανάλογα με το τύπο του χώρου

4.2. Ανασκόπηση κεφαλαίου

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται έρευνες σχετικά με την επίδραση στο χρόνο εκκένωσης υπόγειων χώρων σε συνθήκες:

- A) μειωμένης ορατότητας (3 μελέτες)
- B) μεταβαλλόμενης πυκνότητας ατόμων (1 μελέτη)
- Γ) διαφορετικού τύπου διαδρομής (1 μελέτη)
- Δ) διαφορετικής μετάβασης (1 μελέτη)
- E) διαφορετικών τύπων κτιρίων (2 μελέτες)

5. Αξιολογήσεις μεθόδων εκκένωσης

Μια από τις πιο καταστάσεις έκτακτης ανάγκης που μπορεί να οδηγήσει σε θανατηφόρο ατύχημα σε ένα υπόγειο περιβάλλον είναι μια πυρκαγιά. Αυτό όχι μόνο δημιουργεί πολύ υψηλές θερμοκρασίες, αλλά και τεράστιους όγκους καπνού που μπορεί να εμποδίσουν την ικανότητά τους των ατόμων να προβούν σε διαδικασίες απομάκρυνσης και μπορεί να απειλήσει τη ζωή τους. Ως αποτέλεσμα, οι εταιρείες πρέπει να εφαρμόσουν αποτελεσματικές διαδικασίες απόκρισης ασφαλείας.

Όλο και περισσότεροι άνθρωποι προσελκύονται στις αστικές περιοχές λόγω των υπόγειων ανέσεων που είναι διαθέσιμες εκεί. Ωστόσο, σε αντίθεση με ένα κτίριο κανονικής επιφάνειας, οι υπόγειες τοποθεσίες περιλαμβάνουν τα ακόλουθα διακριτικά χαρακτηριστικά:

- ανάγκη για συνεχή τεχνητό φωτισμό λόγω έλλειψης φυσικού φωτισμού
- ανάγκη για συνεχή αερισμό
- οι χρήστες έχουν κακή χωρική επίγνωση και δεν μπορούν να βρουν το δρόμο τους.
- οι διαδρομές καπνού και οι διαδρομές εκκένωσης ενδέχεται να διασταυρωθούν.

Ο χειροκίνητος υπολογισμός μιας εκκένωσης είναι μια άκαμπτη μέθοδος, ειδικά σε πολύπλοκα κτίρια ή επιχειρήσεις όπως ένας σταθμός ΜΕΤΡΟ. Η αριθμητική μοντελοποίηση εξετάζει πολλά σενάρια με βάση τις ανάγκες και τους πιθανούς κινδύνους της υπόθεσης που ερευνάται, ενώ η National Fire Protection Association (NFPA) 130 χρησιμοποιεί ένα κοινό σενάριο για όλες τις περιπτώσεις με περιορισμούς που προορίζονται για την προώθηση της ασφάλειας και την κάλυψη καταστάσεων έκτακτης ανάγκης. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να προσδιοριστεί το πότε τα χαρακτηριστικά και η πολυπλοκότητα του πειράματος απαιτούν τη χρήση αριθμητικής μοντελοποίησης έναντι του πότε οι χειροκίνητοι υπολογισμοί επαρκούν για μια ασφαλή αξιολόγηση της στρατηγικής εκκένωσης.

Τα αριθμητικά μοντέλα όχι μόνο προσφέρουν μια γραφική αναπαράσταση της διαδικασίας εκκένωσης, η οποία είναι πολύ πιο κατανοητή σε σχέση με τους αντίστοιχους χειροκίνητους υπολογισμούς, αλλά παρέχουν επίσης πολύπλοκους

υπολογισμούς συμπεριφοράς. Ωστόσο, κρίσιμες για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της μεθόδου εκκένωσης είναι

α) οι λεπτομέρειες σχετικά με το πιθανό μέγεθος της διαφοράς μεταξύ των υπολογισμών χειρός και των αριθμητικών μοντέλων και

β) οι θεμελιώδεις αιτίες αυτών των διαφορών.

Προηγούμενες εργασίες για τη μοντελοποίηση και την προσομοίωση εκκένωσης περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

- Ένα κλιμακοστάσιο που μπορεί να εκκενωθεί με μια αντίθετη ροή πυροσβεστών χρησιμοποιώντας μοντέλα εκκένωσης όπως EVAC, STEPS, Building EXODUS και Pathfinder.
- Το πόσο χρόνο θα πρέπει οι επιβάτες να ξεφύγουν από ένα φλεγόμενο βαγόνι τρένου που μπορεί να υπολογιστεί με τη χρήση των Simulex, building-EXODUS και Pathfinder.
- Το EvacTunnel που είναι ένα σύστημα υποστήριξης αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο (DSS) που έχει σχεδιαστεί για να βοηθά στον χειρισμό καταστάσεων έκτακτης ανάγκης σε οδικές σήραγγες (Carote et al., 2013)
- Την ανάλυση της αποτελεσματικότητας των μοντέλων εκκένωσης στην αξιολόγηση της ασφάλειας της οδικής σήραγγας (Ronchi et al., 2012).
- Πολλές μελέτες έχουν εξετάσει τον σχεδιασμό που αφορά την εκκένωση μιας σιδηροδρομικής σήραγγας (Wang & Lo, 2014), ενός σταθμού μετρό (Wang et al., 2012) και του συστήματος σιδηροδρομικής μεταφοράς μιας πόλης (Wang et al., 2012).

Σε παγκόσμιο επίπεδο, χρησιμοποιούνται πολλά διαφορετικά μοντέλα εκκένωσης, από αυτά που βασίζονται εξ ολοκλήρου σε υπολογισμούς με το χέρι μέχρι εκείνα που περιλαμβάνουν εξελιγμένες εξισώσεις που περιλαμβάνουν και την ικανότητα των κατοίκων των κτιρίων να κάνουν κρίσεις.

Τέλος, τα διάφορα μοντέλα εκκένωσης μπορούν να διακριθούν μεταξύ τους από τους ακόλουθους τέσσερις παράγοντες:

- Τη μέθοδο μοντελοποίησης που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του χρόνου που θα χρειαστεί για την εκκένωση των κτιρίων από ανθρώπους, ο οποίος μπορεί να αλλάξει ανάλογα με την ανθρώπινη συμπεριφορά.

- Τις διαδρομές που ακολουθούνται από τους ενοίκους προκειμένου να απομακρυνθούν από το κτίριο. Η διάταξη του κτιρίου καθορίζει πόσο ελεύθερα μπορούν να κυκλοφορούν τα άτομα στο εσωτερικό. Για να μελετήσουν τη μετάβαση από το ένα μέρος ενός κτιρίου στο άλλο, μπορούν είτε (α) να χρησιμοποιήσουν μια διαδρομή στην οποία κάθε όροφος αντιμετωπίζεται ως ένα ξεχωριστό κελί, (β) να χρησιμοποιήσουν ένα συνεχές δίκτυο που συνδέει όλα τα μέρη του κτιρίου, ή (γ) να διαχωριστεί κάθε όροφος σε διαμερίσματα, διαδρόμους, σκάλες κ.λπ. και οι ένοικοι να μετακινούνται από το ένα τμήμα στο άλλο.
- Υπάρχουν δύο πιθανοί τρόποι με τους οποίους το μοντέλο υπολογιστή και οι ένοικοι "βλέπουν" ο ένας τον άλλο: α) σε παγκόσμιο επίπεδο, όπου οι ένοικοι έχουν μια γνώση του κτιρίου ενώ το μοντέλο βλέπει τους ενοίκους ως μια ομοιογενή ομάδα που μπορεί να παρακολουθεί καθώς τα άτομα κινούνται μέσα στη διαδρομή εξόδου· ή β) μεμονωμένα, όπου οι ένοικοι επιλέγουν τη διαδρομή τους με βάση κριτήρια που καθορίζονται από τους ίδιους και το μοντέλο μπορεί να παρακολουθεί την κίνηση των ατόμων κατά μήκος της διαδρομής εξόδου.
- Από τη μη συμπεριφορά (στην οποία προσομοιώνεται μόνο η κίνηση) έως την τεχνητή νοημοσύνη (στην οποία οι ενέργειες των επιβαινόντων εξαρτώνται από τις δομικές και περιβαλλοντικές συνθήκες, την καθυστέρηση απόκρισης, την απομάκρυνση της οικογένειας ή τη βοήθεια και πολλά άλλα), το χαρακτηριστικό συμπεριφοράς καθορίζει την πολυπλοκότητα των αποφάσεων εκκένωσης των ατόμων. Η κίνηση χρησιμοποιεί μαθηματικούς αλγόριθμους για να οργανώσει την πιο αποτελεσματική διαδρομή από την είσοδο στην έξοδο ή άλλο καθορισμένο ασφαλές σημείο, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως η θέση άλλων ατόμων και τα εμπόδια, το μήκος της γραμμής και η παρουσία καπνού ή φωτιάς.

Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε μια μελέτη η οποία συνδυάζει τους κανόνες NFPA και το λογισμικό μοντελοποίησης κίνησης πλήθους Pathfinder για τον εντοπισμό σημαντικών προβλημάτων κινητικότητας των χρηστών. Ως παράδειγμα χρησιμοποιείται ο σταθμός του μετρό Δημοκρατίας, σταθμός μετρό της κεντρικής Θεσσαλονίκης υπό ανάπτυξη.

Ο στόχος είναι να εκτιμηθεί ο χρόνος εκκένωσης του πλήθους και να αποτραπούν ανεπιθύμητες επιπτώσεις. Για την προσομοίωση καταστάσεων έκτακτης ανάγκης και της ανθρώπινης συμπεριφοράς, υλοποιούνται διάφορα σενάρια από τις πιο συνηθισμένες συνθήκες έως τις χειρότερες περιπτώσεις που αντιμετωπίζονται, εφαρμόζοντας διαφορετικές τιμές ταχύτητας ως δεδομένα εισόδου με ντετερμινιστικό τρόπο και αποκλείοντας διαφορετικές διαδρομές εξόδου.

Ο υπόγειος σταθμός της μελέτης περίπτωσης ελέγχει τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Αυτή η μεθοδολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιονδήποτε υπόγειο σταθμό και τα αποτελέσματα δείχνουν πόσο σημαντικά είναι τα κριτήρια έγκαιρης εκκένωσης. Για όλη τη διαδικασία χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο που βασίζεται σε διάφορους παράγοντες. Οι επιλογές εξόδου των επιβατών ευθύνονται για την πιθανή επίδραση της συμπεριφοράς στην εκκένωση.

Για την κάλυψη όλων των σεναρίων, χρησιμοποιούνται τρεις τύποι αριθμητικής προσομοίωσης: α) αναλύσεις εκκένωσης σταθμού σε σύγκριση με υπολογισμούς με το χέρι, β) προσομοίωση του αποτελέσματος επιλογής εξόδου στον χρόνο εκκένωσης: τρία σενάρια όπου μια οδός εξόδου αποκλείεται ή δεν είναι διαθέσιμη κατά τη διαδικασία εκκένωσης, και γ) Παραμετρική ανάλυση ταχύτητας: δέκα σενάρια με δέκα διαφορετικές τιμές ταχύτητας για την εξέταση της επίδρασης της ταχύτητας των επιβατών στο χρόνο εκκένωσης.

Η παρούσα μελέτη στοχεύει στη διεξαγωγή μιας συνολικής ανασκόπησης των παραμέτρων εκκένωσης που σχετίζονται με ένα σχέδιο εκκένωσης.

Μια ουσιαστική πτυχή που απαιτεί σωστό σχεδιασμό και συντήρηση είναι οι διαδρομές εξόδου. Αυτές οι διαδρομές αναφέρονται σε ένα απρόσκοπτο και ανεμπόδιστο μέσο εξόδου από οποιαδήποτε τοποθεσία μέσα σε ένα κτίριο ή ένα οικοδόμημα σε μια δημόσια οδό που οδηγεί απευθείας έξω, όπως δρόμο, διάδρομο, καταφύγιο, δημόσιο δρόμο ή ανοιχτό χώρο.

Διάφοροι οργανισμοί, συμπεριλαμβανομένου του National Fire Protection Association (NFPA), των European Guidelines (CFPA) και του Building Code of Australia (BCA), έχουν θεσπίσει ελάχιστες απαιτήσεις και πρότυπα σχετικά με τον περιορισμό συγκεκριμένων παραμέτρων. Αυτές οι παράμετροι περιλαμβάνουν, αλλά δεν περιορίζονται:

- A) στο μήκος της διαδρομής εξόδου.
 - B) στη διανυόμενη απόσταση
 - Γ) στη χωρητικότητα της διαδρομής εξόδου
 - Δ) στη σχετική θέση των θυρών των εξόδων.
 - E) στον αριθμό των επιβατών.
- Στ) στη χρονική διάρκεια που απαιτείται για τη διαδικασία εκκένωσης μιας συγκεκριμένης περιοχής.

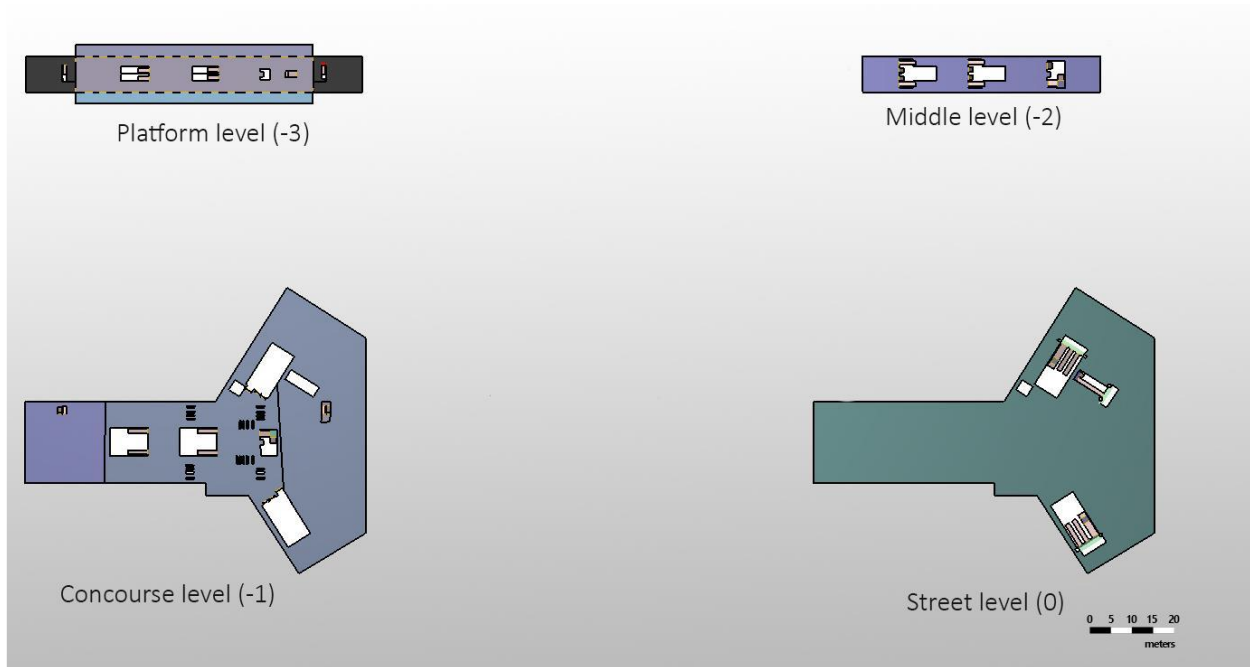
Οι προαναφερθέντες περιορισμοί των παραμέτρων αποσκοπούν στη βελτιστοποίηση των συνθηκών της διαδικασίας εκκένωσης και τον μετριασμό τυχόν ζημίας που προκύπτει τόσο σε άτομα όσο και σε περιουσιακά στοιχεία. Φυσικά, πρέπει να πραγματοποιηθούν τροποποιήσεις λαμβάνοντας υπόψη την ταξινόμηση της εγκατάστασης και την ποσότητα των ατόμων που τη χρησιμοποιούν, γνωστή και ως φορτίο χωρητικότητας.

5.1. Εκκένωση του σταθμού του μετρό στη Δημοκρατία

Το δίκτυο κύριας γραμμής του Μετρό Θεσσαλονίκης αποτελείται από δύο μονοκατευθυντήριες σήραγγες συνολικού μήκους 9,6 km και 13 σταθμών. Η εξέταση του περιστατικού έκτακτης ανάγκης γίνεται στον σταθμό Δημοκρατίας, έναν κεντρικό σταθμό εξέδρας που αποτελείται από πέντε επίπεδα. Το επίπεδο του εδάφους, γνωστό και ως Επίπεδο 0, στεγάζει τις δύο κύριες εισόδους, ενώ το Επίπεδο -1 χρησιμεύει ως επίπεδο συνεδρίου, αφιερωμένο στην πώληση εισιτηρίων και στην επικύρωση. Οι δύο έξοδοι συνδέονται με ένα ζευγάρι κυλιόμενες σκάλες και μια σκάλα. Οι κύριες εγκαταστάσεις H&M βρίσκονται στο Επίπεδο -2, το οποίο αντιστοιχεί στο μεσαίο επίπεδο. Η πλατφόρμα του σταθμού που βρίσκεται στο Επίπεδο -3 έχει μήκος 60 μέτρα και πλάτος 10 μέτρα, παρέχοντας άφθονο χώρο για φιλοξενία επιβατών. Το επίπεδο σιδηροτροχιάς που δηλώνεται ως Επίπεδο -4 απαγορεύεται αυστηρά για την πρόσβαση επιβατών.

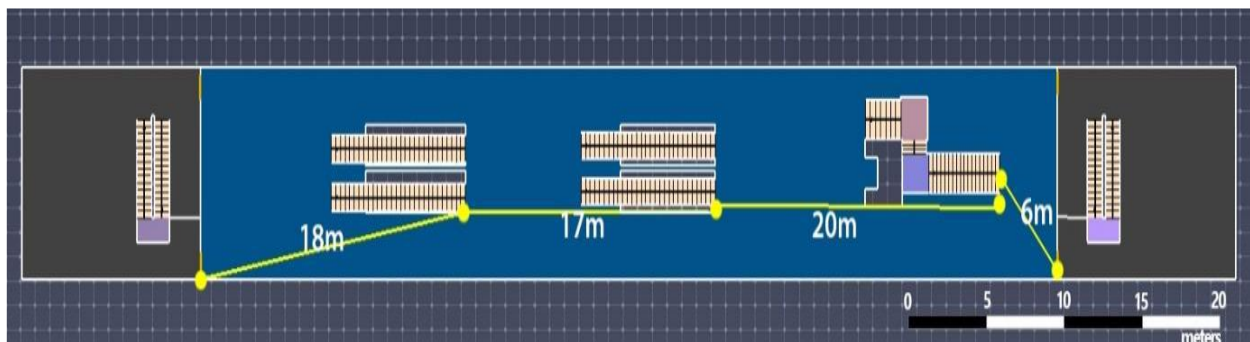
Η κατακόρυφη μεταφορά μεταξύ των επιπέδων του σταθμού και της πλατφόρμας διευκολύνεται από τέσσερις κυλιόμενες σκάλες, μια σταθερή σκάλα και έναν ανελκυστήρα που προορίζεται για χρήση από άτομα με αναπηρία και το προσωπικό εξυπηρέτησης. Δεν λαμβάνεται υπόψη η πρόσβαση στον ανελκυστήρα σε

καταστάσεις έκτακτης ανάγκης. Επιπλέον, η πλατφόρμα είναι εξοπλισμένη με δύο σκάλες έκτακτης ανάγκης, πλάτους 1 μέτρου η καθεμία, που βρίσκονται και στα δύο άκρα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.



Εικόνα 5. Τα σχέδια του σταθμού του μετρό στη Δημοκρατίας

Οι αποστάσεις μεταξύ των εξόδων της πλατφόρμας αντιπροσωπεύονται με κίτρινες γραμμές στην Εικόνα 6. Δεδομένου ότι η μέγιστη απόσταση είναι 20 μέτρα, μπορεί να συναχθεί ότι η μέγιστη απόσταση ταξιδιού του ατόμου για πρόσβαση στην πλατφόρμα της διαδρομής εξόδου (σκάλα) είναι περίπου 10 μέτρα. Η παρουσία διπλών εξόδων κινδύνου και στα δύο άκρα κάθε πλατφόρμας διασφαλίζει την



απουσία οποιουδήποτε κοινού μονοπατιού ή αδιεξόδου εντός της περιοχής.

5.2. Ανάλυση του χρόνου εκκένωσης (NFPA)

Η χωρητικότητα φορτίου «συντριβής» του τρένου στο σταθμό του ΜΕΤΡΟ Δημοκρατίας είναι 600 επιβάτες. Επιπλέον, τα τρένα εκτελούν δρομολόγια 3 λεπτών προς κάθε κατεύθυνση.

Οι πληροφορίες για το φορτίο επιβατών για τον υπολογισμό της εκκένωσης φαίνονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1 Υπολογισμοί φορτίου επιβατών

Κατεύθυνση αιχμής Συμπαγωγικό φορτίο κατά τη διάρκεια αιχμής 15 λεπτών	987
Κατεύθυνση εκτός αιχμής Συμπαγωγικό φορτίο κατά τη διάρκεια αιχμής 15 λεπτών	20
Κατεύθυνση αιχμής Συμπαγωγικό φορτίο	789
Παρασυρτικό φορτίο κατεύθυνσης εκτός αιχμής	4
Συνολικό Συμπαγωγικό φορτίο	793
Φόρτωση συνδέσμου κατεύθυνσης αιχμής κατά τη διάρκεια αιχμής 15 λεπτών	13
Φόρτωση συνδέσμου κατεύθυνσης εκτός αιχμής κατά τη διάρκεια αιχμής 15 λεπτών	1352
Κατεύθυνση αιχμής Φορτίο αμαξοστοιχίας κατά τη διάρκεια αιχμής 15 λεπτών	3
Κατεύθυνση εκτός αιχμής Φορτίο αμαξοστοιχίας κατά τη διάρκεια αιχμής 15 λεπτών	270
Συνολικό φορτίο αμαξοστοιχίας	273
Συνολικό φορτίο επιβατών σταθμού (πλατφόρμα) (Op)	1066

Το επίπεδο ασφάλειας θεωρείται το επίπεδο του εδάφους. Ο Πίνακας 2 παρουσιάζει το συνολικό χρόνο μέχρι τη μετάβαση στο ασφαλές επίπεδο.

Πίνακας 2 Διαδρομή εξόδου χρόνος περπατήματος

Θέση εξόδου	Απόσταση (m)	Ταχύτητα περπατήματος (m/min) NFA 130	Χρόνος (min)
Στην πλατφόρμα	20	37,7	0,29
Από την πλατφόρμα μέχρι τη μέση	5,5	14,6	0,38
Στη μέση	0	37,7	0
Από τη μέση μέχρι την αίθουσα του σταθμού	5,5	14,6	0,38
Στην αίθουσα του σταθμού	30	37,7	0,80
Μέχρι το επίπεδο ασφάλειας	5,5	14,6	0,38
Συνολικός χρόνος			2,22

Στο μοντέλο Pathfinder, οι ένοικοι έχουν τη δυνατότητα να βλέπουν τα κτίρια σε ατομική λειτουργία, ενώ τα κτίρια μπορούν να προβληθούν από τους ενοίκους σε καθολική λειτουργία. Επιπλέον, το λογισμικό Pathfinder διευκολύνει πολλές επιλογές για τη συμπεριφορά και την κίνηση των επιβατών, όπως προσαρμογές στην ταχύτητα, τη διαθεσιμότητα των εξόδων και την εξέταση των χαρακτηριστικών των επιβατών.

Η Εικόνα 6 απεικονίζει το σενάριο που προσομοιώνεται στο λογισμικό Pathfinder, όπου συνολικά 1066 άτομα εμπλέκονται στη διαδικασία εκκένωσης. Η προσομοίωση χρησιμοποιεί μια λειτουργία διεύθυνσης, η οποία εκτελείται με μια επιλογή τρόπου συμπεριφοράς διεύθυνσης. Η εν λόγω παρατηρούμενη συμπεριφορά είναι ένα τυπικό χαρακτηριστικό του συστήματος Pathfinder, σύμφωνα με το οποίο όλα τα άτομα εντός του συστήματος συμμετέχουν σε αλληλεπιδράσεις με άλλες παραμέτρους που υπάρχουν στο περιβάλλον, συμπεριλαμβανομένων των συνεπιβατών, των φυσικών φραγμών και άλλων εμποδίων (Pathfinder, 2017).

Η λειτουργία διεύθυνσης βασίζεται στην προσέγγιση "Συμπεριφορά διεύθυνσης" του Craig Reynolds, η οποία οριοθετεί τη συμπεριφορά κίνησης των αυτοδιοικούμενων οντοτήτων για εφαρμογή σε εικόνες που δημιουργούνται από υπολογιστή και διαδραστικά μέσα. Τα εν λόγω άτομα έχουν την ικανότητα να

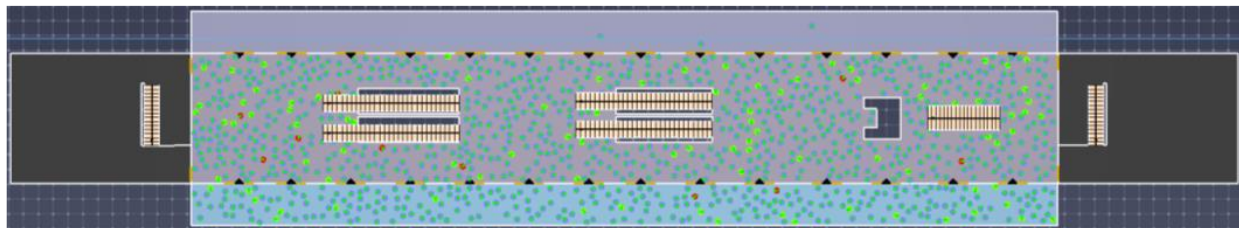
αλλάζουν την τροχιά τους προκειμένου να παρακάμψουν ένα εμπόδιο διατηρώντας παράλληλα την επιδιωκόμενη πορεία τους προς τον στόχο τους. Έτσι, οι άνθρωποι είναι σε θέση να προσαρμοστούν σε ένα μεταβαλλόμενο και εξελισσόμενο περιβάλλον.

Είναι σημαντικό να αναγνωρίσουμε ότι η ανάλυση δεν ενσωματώνει τις δυναμικές αλλαγές που προκύπτουν από την περιβαλλοντική εξέλιξη, όπως η πυκνότητα καπνού και η ορατότητα της εξόδου, όπως περιγράφεται από τον Ronchi (2012). Η ταχύτητα των ατόμων που εκκενώνουν ρυθμίζεται από μια συσχέτιση ταχύτητας-πυκνότητας, η οποία έχει προταθεί από το SFPE.

Η θεματική ομάδα του μοντέλου προσομοίωσης περιλαμβάνει 92% ενήλικες, 5% παιδιά και 3% άτομα με ειδικές ανάγκες χωρίς βοήθεια. Η ομάδα πληθυσμού δημιουργήθηκε με βάση τις οδηγίες που παρέχονται από την Εταιρεία Μηχανικών Πυροπροστασίας (SFPE) και τα ευρήματα ερευνητών που μελέτησαν τα δημογραφικά στοιχεία που χρησιμοποιούν τα υπόγεια σιδηροδρομικά συστήματα για σκοπούς μετακίνησης. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αποκαλύπτουν ότι η απασχόληση μιας ομοιογενούς ομάδας ατόμων, που χαρακτηρίζεται από σταθερό τύπο, μέγεθος και ταχύτητα, στον σταθμό Δημοκρατίας με 1066 επιβαίνοντες, έχει ως αποτέλεσμα μείωση περίπου 10%-15% στους χρόνους εκκένωσης. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τις προσομοιώσεις που θεωρούν έναν μη ομοιόμορφο πληθυσμό, ο οποίος αποδίδει μέσο χρόνο εκκένωσης σταθμού 295 δευτερόλεπτα και μέσο χρόνο εκκένωσης πλατφόρμας 205 δευτερόλεπτα.

Το μέγιστο φορτίο του σταθμού των 1066 επιβατών περιλαμβάνει άτομα που βρίσκονται τόσο στην πλατφόρμα του σταθμού όσο και στα τρένα. Στη διαδικασία μοντελοποίησης, έχει υποτεθεί ότι τα άτομα βρίσκονται αρχικά στην πλατφόρμα του σταθμού στην αρχή της προσομοίωσης. Η συνεκτίμηση των αρχικών συνθηκών είναι ζωτικής σημασίας, καθώς η διάταξη και η διασπορά των επιβατών μπορεί να έχει αντίκτυπο στην αποτελεσματικότητα της προσομοίωσης. Παρά ταύτα, λαμβάνοντας υπόψη την πυκνότητα των ατόμων στην πλατφόρμα του σταθμού στα σενάρια που αξιολογήθηκαν, η οποία ήταν 1,75 άτομα ανά τετραγωνικό μέτρο, υπάρχει ελάχιστη διακύμανση στη διάταξη και την κατανομή τους (βλ. Εικόνα 7). Για να ληφθούν υπόψη οι πιθανές μεταβλητές που προκύπτουν από τη διασπορά, συνιστάται η διεξαγωγή 10 εκτελέσεων προσομοίωσης. Αυτή η προσέγγιση έχει βρεθεί ότι

αποδίδει ελάχιστες διακυμάνσεις στον χρόνο εξόδου, όπως αποδεικνύεται από τους Πίνακες 3 και 4.



Εικόνα 7 Οπτικοποίηση τυχαίας διασποράς των συμμετεχόντων

Πίνακας 3 χρόνος εκκένωσης της πλατφόρμας

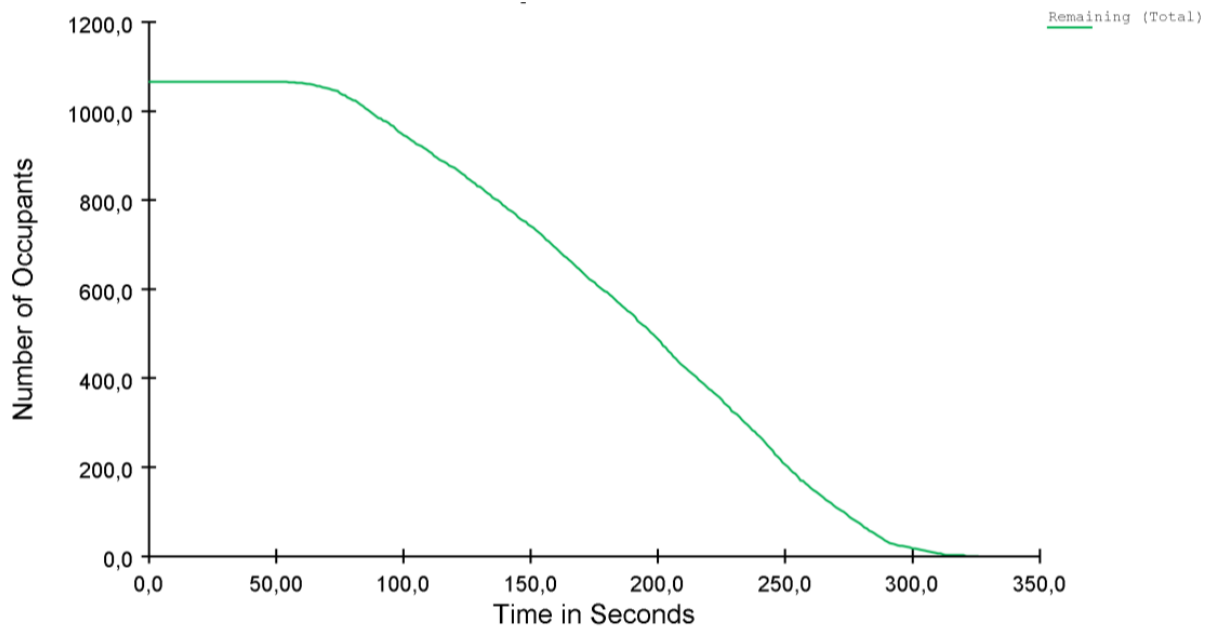
Αριθμός προσομοίωσης	Χρόνος (sec)	Μέσος όρος χρόνου (sec)
1	218	
2	233	
3	222	
4	229	
5	219	
6	223	225
7	230	
8	228	
9	221	
10	225	

Εκτός από την αρχική ανάλυση, πραγματοποιήθηκαν δύο περαιτέρω παραμετρικές αναλύσεις για να εξεταστεί ο αντίκτυπος της ταχύτητας των επιβατών και της επιλογής εξόδου, οι οποίες κρίνονται απαραίτητες για την επιτυχή εκκένωση.

Πίνακας 4 Χρόνος εκκένωσης σταθμού

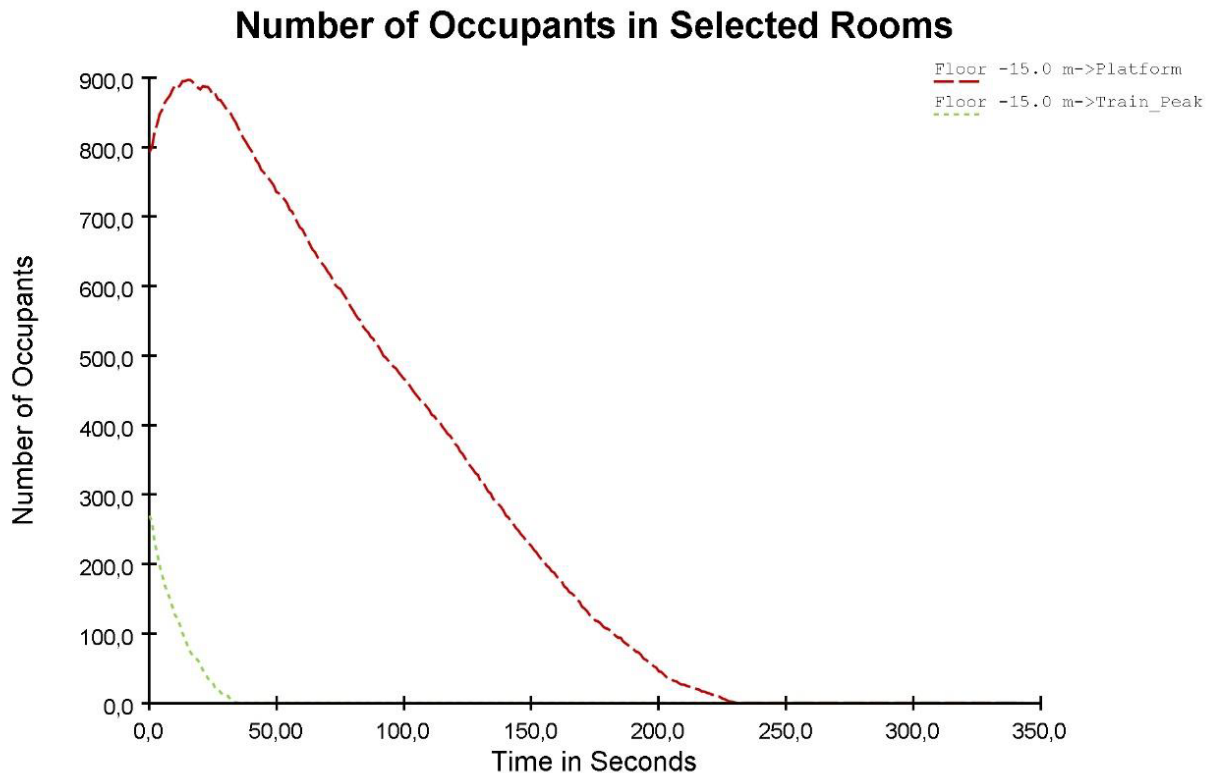
Αριθμός προσομοίωσης	Χρόνος (sec)	Μέσος όρος χρόνου (sec)
1	325	
2	334	
3	317	
4	341	
5	321	
6	319	326
7	331	
8	328	
9	320	
10	324	

Οι επιβάτες που δεν έχουν φτάσει ακόμη στο καθορισμένο σημείο ασφαλείας απεικονίζονται με την πάροδο του χρόνου, όπως μετρήθηκε από την έναρξη της εκκένωσης, στην Εικόνα 8. Η διαδικασία εκκένωσης θεωρείται ολοκληρωμένη μόλις το τελικό άτομο βγει από τις εγκαταστάσεις, σε διάρκεια 325 δευτερόλεπτα ή 5 λεπτά και 25 δευτερόλεπτα από την αρχική έναρξη της εκκένωσης. Το προαναφερθέν γράφημα μπορεί να χρησιμεύσει ως μέτρηση για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της διαδικασίας εκκένωσης και της χρονικής της εξέλιξης. Σε καταστάσεις όπου υπάρχουν εφικτά εμπόδια, που υποδηλώνουν έλλειψη χρονικής διακύμανσης, είναι εύλογο ότι ένα εμπόδιο στη διαδικασία εκκένωσης, όπως η ουρά σε εξόδους ή αποκλεισμένες εξόδους, μπορεί να εμποδίζει την πρόοδο. Επομένως, απαιτείται περαιτέρω ανάλυση. Στην Εικόνα 8, μπορεί να παρατηρηθεί ότι εκτός από το αρχικό οροπέδιο στον αριθμό των επιβαινόντων μέσα στα πρώτα 70 δευτερόλεπτα, το οποίο μπορεί να αποδοθεί στον χρόνο που απαιτείται για να πλοηγηθούν οι εκκενωμένοι εντός του σταθμού πριν φτάσουν στις εξόδους, δεν σημειώθηκαν άλλα περιστατικά. Στη γραφική παράσταση, εκτός από το αρχικό πλατό που υποδηλώνει τη διάρκεια που απαιτείται για να φτάσουν οι εκκενωμένοι στις εξόδους, δεν παρατηρούνται άλλα περιστατικά.



Εικόνα 8 Παρουσία επιβαινόντων στο σταθμό του μετρό ως προς την ώρα (ID 1)

Τα δεδομένα που παρουσιάζονται στην Εικόνα 9 απεικονίζουν τον αριθμό των ατόμων που επιμένουν στο επίπεδο της πλατφόρμας κατά τη διάρκεια ολόκληρης της διαδικασίας εκκένωσης. Το επίπεδο της πλατφόρμας εκκενώθηκε από τους επιβαίνοντες εντός χρονικού πλαισίου 224 δευτερολέπτων, που ισοδυναμεί με 3 λεπτά και 44 δευτερόλεπτα.



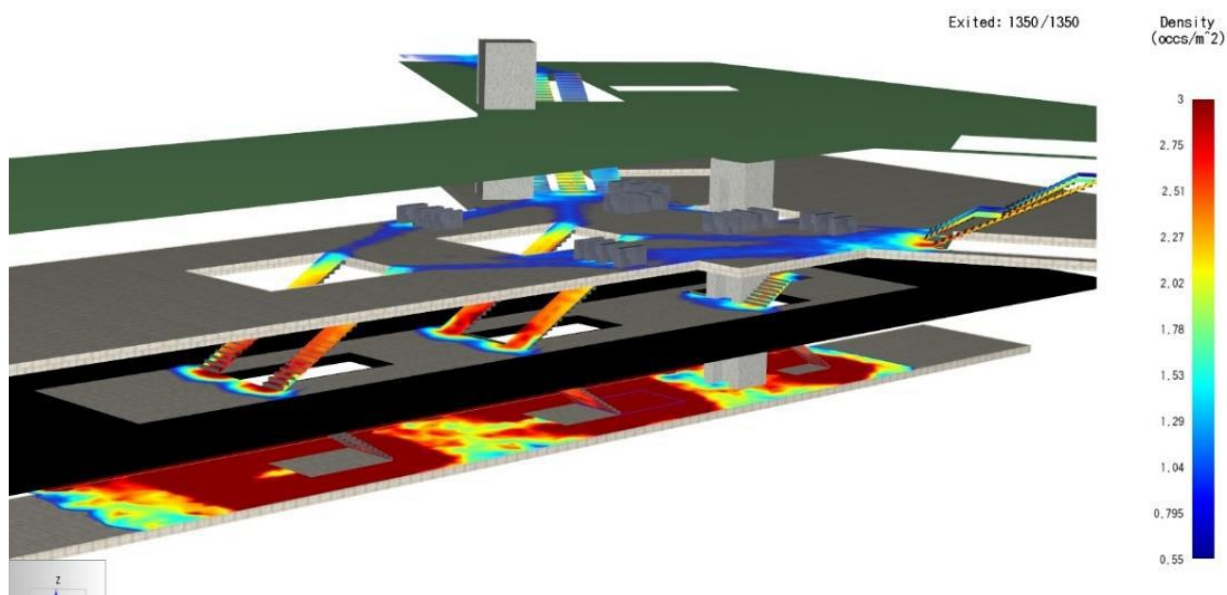
Εικόνα 9 Αριθμός επιβαινόντων που αποχώρησαν από το επίπεδο της πλατφόρμας

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν ότι οι συνολικοί χρόνοι εξόδου του σταθμού εμπίπτουν στις παραμέτρους της δοκιμής 4 και 6 λεπτών, αποδεικνύοντας έτσι τη συμμόρφωση με τις απαιτήσεις εξόδου που περιγράφονται στο NFPA 130.

Η παρατηρούμενη αύξηση της ποσότητας ατόμων που υπάρχουν στη ζώνη της πλατφόρμας (όπως υποδεικνύεται από την κόκκινη γραμμή) κατά τα αρχικά 50 δευτερόλεπτα της εκκένωσης, από 800 σε 900, μπορεί να αποδοθεί στην είσοδο επιβατών από τα τρένα (όπως αντιπροσωπεύεται από η πράσινη διακεκομμένη γραμμή). Το γράφημα δεν απεικονίζει τον μέγιστο αριθμό 1066 ατόμων, καθώς συμπίπτει με τη συνεχιζόμενη κατακόρυφη μετατόπιση των επιβατών από την πλατφόρμα σε υψηλότερες βαθμίδες.

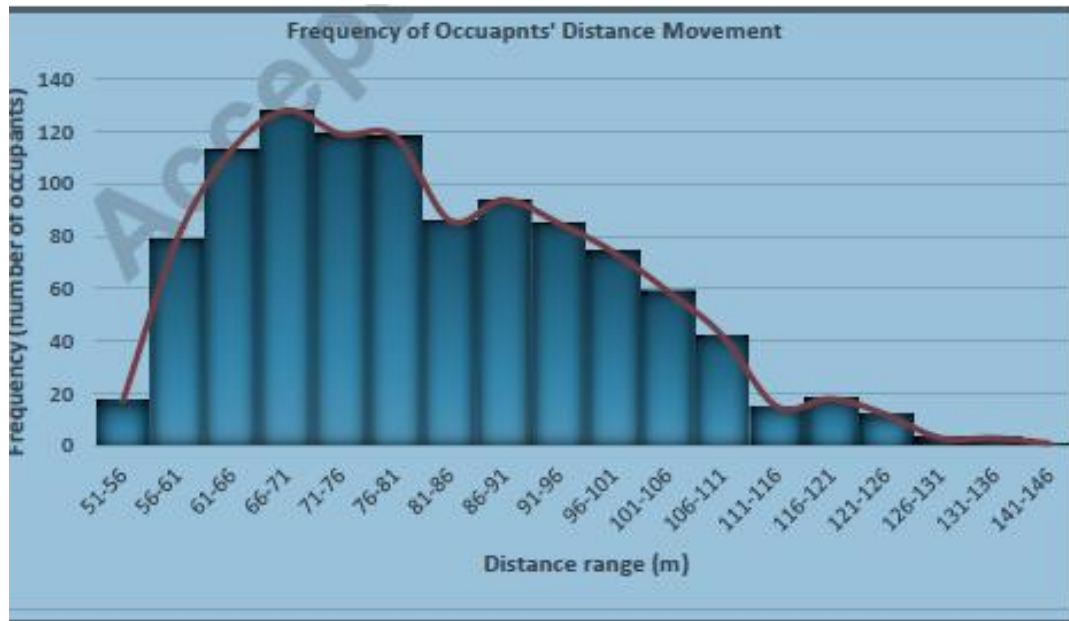
Για να εξακριβωθεί ο αντίκτυπος του υπερπληθυσμού, υπολογίζεται η μέγιστη πυκνότητα επιβατών σε κάθε τμήμα του σταθμού και απεικονίζεται γραφικά σε συγκεκριμένα διαστήματα. Η Εικόνα 10 απεικονίζει τη χαρτογράφηση για

διάρκεια 361,5 δευτερολέπτων. Η διαβάθμιση του χρώματος που χρησιμοποιείται στην αναπαράσταση υποδηλώνει την υψηλότερη δυνατή συγκέντρωση ατόμων ανά τετραγωνικό μέτρο, που κυμαίνεται από το χαμηλότερο επίπεδο που απεικονίζεται από τη βαθύ μπλε απόχρωση έως το υψηλότερο επίπεδο που απεικονίζεται από τη βαθιά κόκκινη απόχρωση.



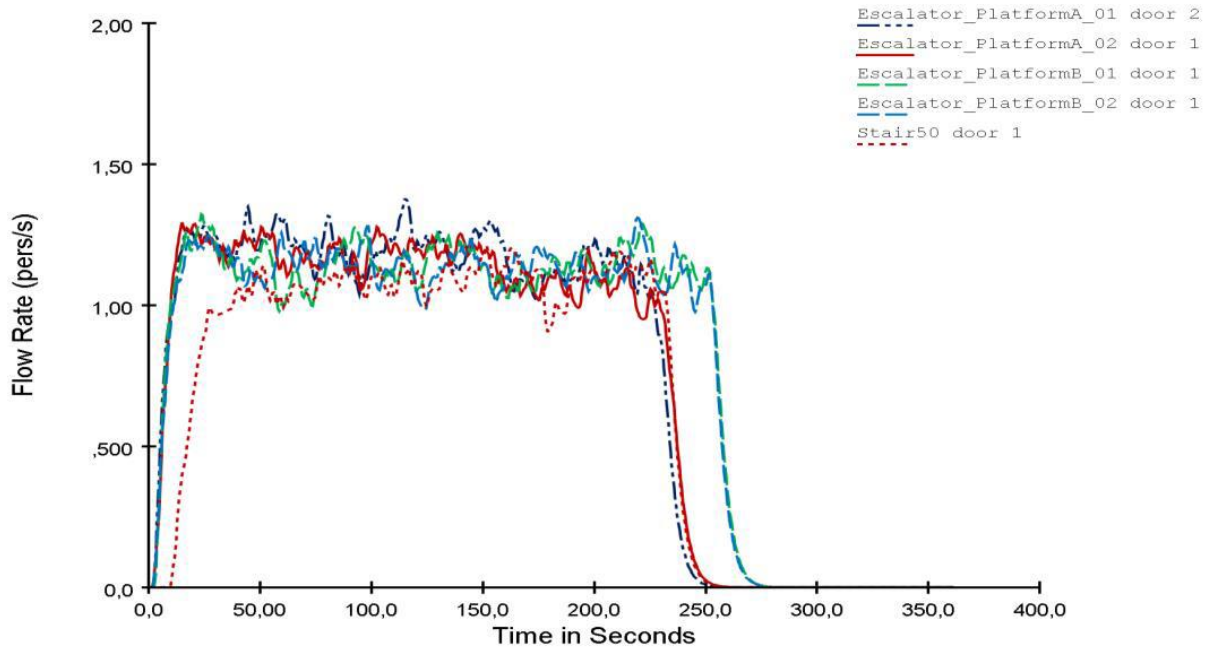
Εικόνα 10 Περιοχές για τον προσδιορισμό του φαινομένου υπερπληθυσμού

Ένα διάγραμμα κατανομής που απεικονίζει την απόσταση ταξιδιού των επιβατών δημιουργήθηκε με βάση τα δεδομένα εξόδου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 11. Μετά την εξέταση της υπόθεσης, καθορίστηκε ότι η μέση απόσταση που διανύθηκε ήταν περίπου 82 μέτρα. Οι μεγαλύτερες και ελάχιστες αποστάσεις που καταγράφηκαν ήταν περίπου 142 μέτρα και 52 μέτρα, αντίστοιχα.



Εικόνα 11 Αριθμός επιβατών ως προς την απόσταση

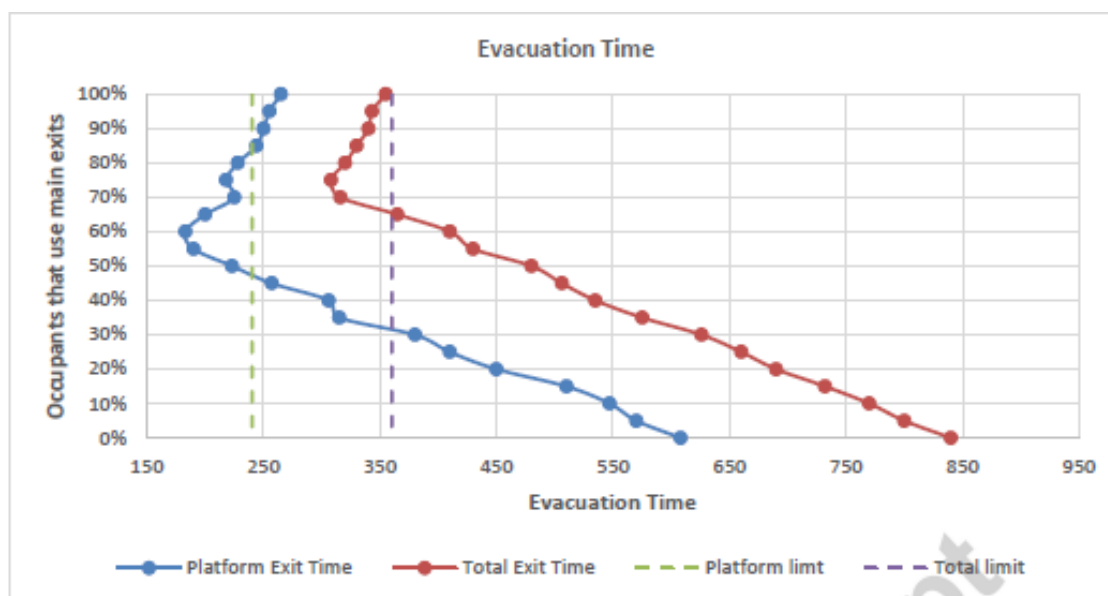
Μια άλλη μεταβλητή που καταγράφηκε και αξιολογήθηκε ήταν το μοτίβο χρήσης των ατόμων. Η μελέτη αποκάλυψε ότι τα σταθερά κλιμακοστάσια, που αποτελούνταν από δύο «διπλές» κυλιόμενες σκάλες και μια ενιαία σκάλα που βρίσκονται πίσω από τον ανελκυστήρα, εμφάνιζαν συγκρίσιμα πρότυπα χρήσης των επιβατών, με εκτιμώμενο εύρος 150-200 επιβατών. Η συνολική χρήση των κλιμακοστασίων έκτακτης ανάγκης είναι περίπου ισοδύναμη, με 100 και 120 άτομα να τις χρησιμοποιούν, αντίστοιχα. Ο ρυθμός ροής κάθε διαδρομής εξόδου με την πάροδο του χρόνου απεικονίζεται στην Εικόνα 12. Η ενοποίηση κάθε μεθοδολογίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσεγγίσει τη συνολική ποσότητα των ατόμων που χρησιμοποιούν τα αντίστοιχα μέσα εξόδου.



Εικόνα 12 Ρυθμοί ροής σε επιλεγμένες σκάλες/κυλιόμενες σκάλες κατά τη διάρκεια του χρόνου εκκένωσης

Η ανάλυση του αντίκτυπου της επιλογής εξόδου παρουσιάζεται στην Εικόνα 13. Οι κάθετες γραμμές που απεικονίζονται στην εικόνα υποδηλώνουν τη μέγιστη επιτρεπόμενη διάρκεια εκκένωσης, όπως προτείνεται από τις κατευθυντήριες γραμμές NFPA 130. Συγκεκριμένα, ο χρόνος εκκένωσης της πλατφόρμας δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 4 λεπτά, ενώ ο χρόνος εκκένωσης του σταθμού δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 6 λεπτά. Το διάγραμμα δείχνει ότι ο χρόνος εκκένωσης πληροί το προδιαγεγραμμένο όριο για τα κριτήρια εκκένωσης όταν οι κύριες εξοδοί χρησιμοποιούνται ως οδός εξόδου από ένα εύρος από 45% έως 85% των επιβατών. Στις προαναφερθείσες αναλογίες, η διαδικασία εκκένωσης παρατηρείται ότι πραγματοποιείται εντός περίπου 200 δευτερολέπτων (που ισοδυναμεί με 3 λεπτά και 20 δευτερόλεπτα). Το ανώτατο όριο χρόνου που απαιτείται για την εκκένωση, σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης, είναι περίπου 600 δευτερόλεπτα ή 10 λεπτά. Αυτή η διάρκεια παρατηρείται όταν η διαδρομή εκκένωσης περιορίζεται μόνο σε εξόδους κινδύνου, ξεκινώντας από το επίπεδο πλατφόρμας και οδηγώντας στο σημείο ασφαλείας. Σε περίπτωση πλήρους εκκένωσης του σταθμού του μετρό, που περιλαμβάνει όλα τα επίπεδα, έχει καθοριστεί ότι τα βέλτιστα όρια πληρότητας για τις κύριες εξόδους αυξάνονται σε εύρος από 65% έως 100%. Τα δύο διαγράμματα

παρουσιάζουν ένα ομοιόμορφο μοτίβο στην περιοχή από 65% έως 85%, το οποίο θεωρείται ως κατάλληλο ποσοστό για τις κύριες εξόδους που πρέπει να χρησιμοποιηθούν κατά τη διαδικασία εκκένωσης.



Εικόνα 13 Χρόνος εκκένωσης ανάλογα με το ποσοστό των ατόμων που χρησιμοποιούν κύριες εξόδους

Σύμφωνα με τις οδηγίες που παρέχονται από την Εθνική Ένωση Πυροπροστασίας (NFPA), η τυπική ανεμπόδιστη ταχύτητα καθορίζεται στα 1,19 μέτρα ανά δευτερόλεπτο. Σε κρίσιμες καταστάσεις, ενδέχεται να προκύψουν διακυμάνσεις στις ταχύτητες βαδίσματος λόγω των χαρακτηριστικών των επιβατών (όπως ηλικία ή αναπηρία) ή περιβαλλοντικών παραγόντων (όπως η χαμηλή ορατότητα). Έχει διεξαχθεί μια παραμετρική ανάλυση για την αξιολόγηση της επίδρασης των τιμών εισόδου της ταχύτητας στο χρόνο εκκένωσης. Αυτή η ανάλυση στοχεύει να εκτιμήσει την επίδραση της διακύμανσης της ταχύτητας στη διαδικασία εκκένωσης.

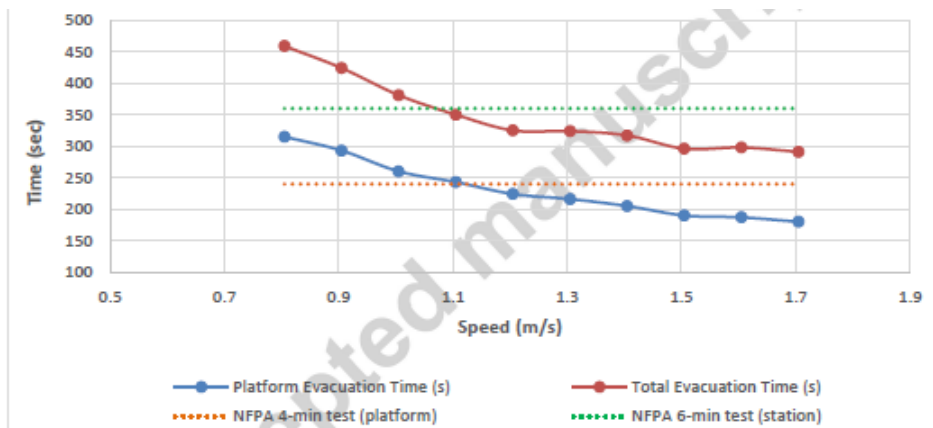
Ο Πίνακας 5 παρουσιάζει μια εκτίμηση της επίδρασης της διακύμανσης στις τιμές ταχύτητας στο χρόνο εκκένωσης, μαζί με τα αποτελέσματα μιας ανάλυσης που διεξήχθη χρησιμοποιώντας διάφορες τιμές ταχύτητας. Τα ευρήματα δείχνουν ότι ο σταθμός Δημοκρατίας εμφανίζει μια τιμή κατωφλίου 1,1 m/s για τη μέση ταχύτητα, η οποία οριοθετεί το όριο μεταξύ της τήρησης των προτύπων και της αστοχίας. Το γράφημα παρέχει πληροφορίες για το ποσοστό των επιβαινόντων που εξέρχονται από

την πλατφόρμα και τον σταθμό μέσω των πρωταρχικών εξόδων, κάτι που είναι κρίσιμο για την επίτευξη μιας επιτυχημένης διαδικασίας εκκένωσης εντός των χρονικών παραμέτρων που περιγράφονται από το NFPA 130.

Πίνακας 5 Επίδρασης της διακύμανσης στις τιμές ταχύτητας στο χρόνο εκκένωσης

Ταχύτητα (m/s)	Μέγιστη ταχύτητα (m/s)	Μέση ταχύτητα (m/s)	Χρόνος εκκένωσης της πλατφόρμας (s)	Συνολικός χρόνος εκκένωσης (s)
0,69	0,92	0,805	315	459
0,79	1,02	0,905	293	424
0,89	1,12	1,005	260	381
0,99	1,22	1,105	243	350
1,09	1,32	1,205	224	325
1,19	1,42	1,305	216	324
1,29	1,52	1,405	205	317
1,39	1,62	1,505	190	296
1,49	1,72	1,605	187	298
1,59	1,82	1,705	180	291

Η γραφική αναπαράσταση στην Εικόνα 14 απεικονίζει τη συσχέτιση μεταξύ ταχύτητας και χρόνου εκκένωσης με άμεσο τρόπο. Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, τα σωματικά ικανά άτομα παρουσιάζουν μέγιστο εύρος ταχύτητας βαδίσματος από 1,1 m/s έως 0,85 m/s. Αυτή η εκτίμηση εξαρτάται από πυκνότητα πληθυσμού μικρότερη από 0,54 άτομα/m², καθώς υψηλότερες πυκνότητες μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα μειωμένη ταχύτητα λόγω υπερπληθυσμού.



Εικόνα 14 Χρόνος εκκένωσης σε συνάρτηση με την ταχύτητα των ατόμων

Η εικόνα 14 αποκαλύπτει ότι η κρίσιμη τιμή ταχύτητας τόσο για τον χρόνο εκκένωσης της πλατφόρμας όσο και του σταθμού είναι περίπου 1,1 m/s. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο σταθμός αποτυγχάνει να ικανοποιήσει τα κριτήρια χρόνου NFPA όταν η ταχύτητα πέσει κάτω από αυτό το όριο. Ως εκ τούτου, οποιαδήποτε σημαντική αλλαγή στη σύνθεση του πληθυσμού του δείγματος θα είχε ως αποτέλεσμα μια αντίστοιχη τροποποίηση στην υψηλότερη δυνατή μέση ταχύτητα, επηρεάζοντας έτσι τη διάρκεια της διαδικασίας εκκένωσης.

Σύμφωνα με τους κανονισμούς NFPA, απαιτείται να θεωρείται μια κυλιόμενη σκάλα ως μη λειτουργική κατά τους υπολογισμούς με το χέρι. Η προαναφερθείσα επιλογή εξετάζεται κατά τους χειροκίνητους υπολογισμούς για την ενίσχυση του περιθωρίου ασφαλείας της ανάλυσης. Αυτό οφείλεται στο ότι είναι επίπονο, αν όχι ανέφικτο, η αναπαραγωγή άλλων μεταβλητών, όπως οι διακυμάνσεις της ταχύτητας, η ανθρώπινη συμπεριφορά ή η επιλογή εξόδου, μεταξύ άλλων. Επιπλέον, αυτό το έγγραφο εξετάζει τον αντίκτυπο της επιλογής εξόδου στον χρόνο εκκένωσης μέσω της προσομοίωσης τριών σεναρίων στα οποία μια οδός εξόδου παρεμποδίζεται ή καθίσταται άχρηστη κατά τη διαδικασία εκκένωσης λόγω πιθανής δομικής κατάρρευσης ή πυρκαγιάς.

Ο Πίνακας 6 εμφανίζει τις διάρκειες εκκένωσης για καταστάσεις στις οποίες οι διαθέσιμες οδοί εξόδου δεν είναι πλέον προσβάσιμες. Έχει σημειωθεί ότι σχεδόν όλα τα σενάρια εμφανίζουν χρόνους εκκένωσης που υπερβαίνουν τις επιθυμητές τιμές

που περιγράφονται από το NFPA. Η παράταση της διάρκειας εκκένωσης μπορεί να αποδοθεί κυρίως στη διάρκεια του χρόνου που δαπανάται σε ουρές.

Πίνακας 6 Χρόνοι εκκένωσης συναρτήσει της διαθεσιμότητας των οδών εξόδου

Μη διαθέσιμες εξοδοί	Χρόνος εκκένωσης της πλατφόρμας (s)	Συνολικός χρόνος εκκένωσης (s)	Μέσος χρόνος αναμονής (s)
Κανονική λειτουργία	224	325	7607
Κυλιόμενες σκάλες 01	376	465	123,5
Κυλιόμενες σκάλες 02	325	412	113,7
Σκάλες ανεγκυστήρα	298	399	105
Έξοδος κινδύνου 01	250	350	88
Έξοδος κινδύνου 02	253	366	92

5.3. Ανασκόπηση κεφαλαίου

Στο παρόν κεφάλαιο μελετήθηκε η επίδραση των διαδρομών εξόδου. Πιο συγκεκριμένα αναφέρθηκαν:

- A) το μήκος της διαδρομής εξόδου
- B) η απόσταση που πρέπει να διανύσουν οι διαφυγόντες
- Γ) η χωρητικότητα της διαδρομής εξόδου
- Δ) η σχετική θέση των θυρών εξόδου

6. Η εφαρμογές επαυξημένης πραγματικότητας για εκκενώσεις κτιρίων

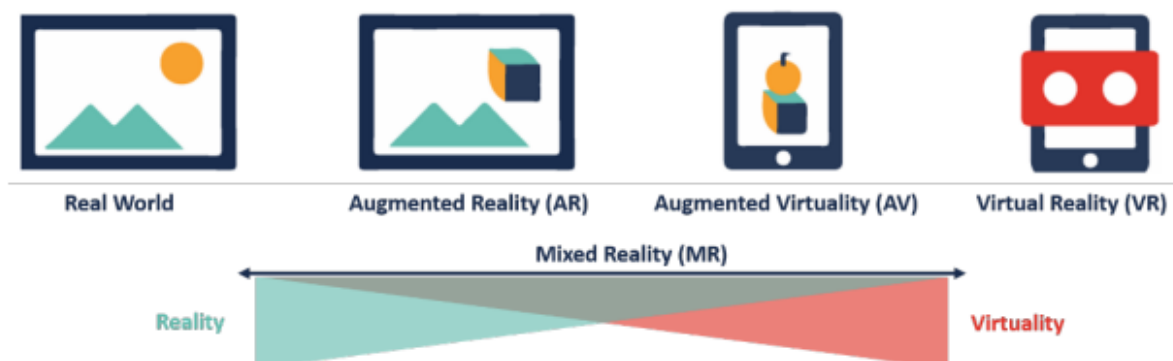
Οι νέες τεχνολογίες, όπως η εικονική πραγματικότητα και τα εικονικά παιχνίδια, έχουν αποδειχθεί απαραίτητα εργαλεία για την έρευνα των καταστροφών και την ενίσχυση της ετοιμότητας των κατοίκων των κτιρίων. Για παράδειγμα, η εικονική πραγματικότητα έχει χρησιμοποιηθεί:

- (1) για τη διερεύνηση της αντίληψης των ενοίκων των συστημάτων εκκένωσης (Olander et al., 2017).
- (2) για τη διερεύνηση των διαδρομών και των επιλογών εξόδου των εκκενωμένων (Cosma ; Ronchi ; Nilsson, 2016)· και
- (3) για την καθοδήγηση των ενοίκων (Lovreglio et. al., 2018)

Η Επαυξημένη Πραγματικότητα (AR) είναι μια επαναστατική τεχνολογία που κερδίζει απήχηση στο κοινό. Παράλληλα, είναι μια τεχνολογία που θα μπορούσε να βελτιώσει τις εκκενώσεις κτιρίων παρέχοντας στους ανθρώπους ψηφιακές πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο. Αυτό θα επέτρεπε στους ανθρώπους να λαμβάνουν αποφάσεις επί τόπου, σε πραγματικό χρόνο σχετικά με τις βέλτιστες ενέργειες κατά τη διάρκεια εκκενώσεων και καταστάσεων έκτακτης ανάγκης.

6.1. Η επαυξημένη πραγματικότητα

Η Επαυξημένη Πραγματικότητα (AR) είναι μια ζωντανή προβολή του πραγματικού περιβάλλοντος του οποίου τα στοιχεία έχουν "επαυξημένη" οπτική πληροφορία που δημιουργείται από υπολογιστή (Carmigniani et. al., 2011). Κατά συνέπεια, αυτή η τεχνολογία καταλαμβάνει μια ιδιαίτερη θέση στο συνεχές πραγματικότητας-εικονικότητας που απεικονίζεται στην Εικόνα 15.



Εικόνα 15 Το φάσμα πραγματικότητας-εικονικής πραγματικότητας

Η Εικόνα 15 δείχνει ότι η επαυξημένη πραγματικότητα καταλαμβάνει την αριστερή πλευρά του φάσματος πραγματικότητας- εικονικής πραγματικότητας, καθώς η πραγματικότητα είναι το κύριο συστατικό και οι οπτικές πληροφορίες που παράγονται από υπολογιστή είναι ένα δευτερεύον στοιχείο που συμπληρώνει την πραγματικότητα.

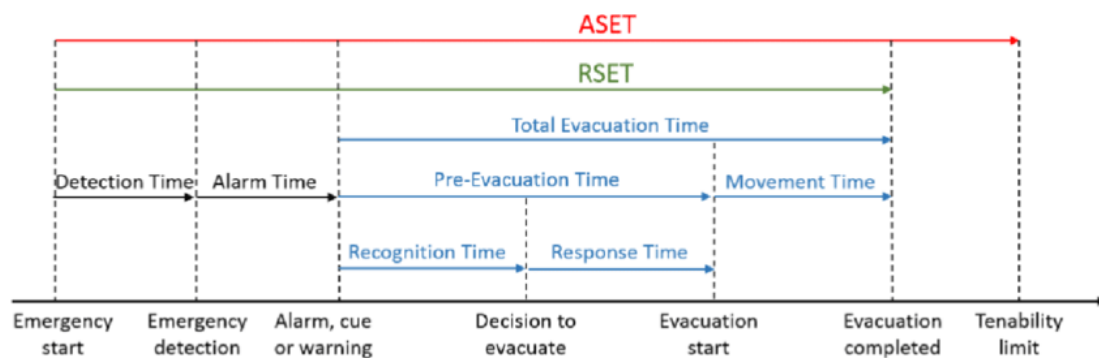
Το AR μπορεί να παρέχει μια άμεση ή έμμεση άποψη του επαυξημένου κόσμου σε πραγματικό χρόνο. Μια άμεση προβολή μπορεί να ληφθεί χρησιμοποιώντας φακούς που προβάλλουν πληροφορίες που παράγονται από υπολογιστή στα μάτια του χρήστη ή μια έμμεση προβολή μπορεί να αποκτηθεί χρησιμοποιώντας μια κάμερα και μια οθόνη που δείχνει μια ζωντανή, επαυξημένη ροή βίντεο (Carmigniani et. al., 2011).

Οι τυπικοί αλγόριθμοι επαυξημένης πραγματικότητας (AR) αποτελούνται από δύο στάδια: παρακολούθηση και ανακατασκευή/αναγνώριση. Η παρακολούθηση μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας δείκτες (όπως κωδικούς QR) ή συστήματα χωρίς δείκτες. Στο πρώτο σενάριο, οι αλγόριθμοι αναζητούν συνεχώς καθορισμένους δείκτες που θα χρησιμοποιηθούν ως σημεία αναφοράς για την επιβολή ψηφιακών στοιχείων. Στο δεύτερο σενάριο, πιο εξελιγμένες προσεγγίσεις, όπως η ταυτόχρονη τοπική προσαρμογή και χαρτογράφηση (SLAM) και η δομή από την κίνηση (SfM), χρησιμοποιούνται για τη χαρτογράφηση των σχετικών θέσεων των πιστών δεικτών (Carmigniani et. al., 2011). Οι Wagner and Schmalstieg (2009) παρέχουν μια έρευνα για τις μεθόδους παρακολούθησης, αλληλεπίδρασης και εμφάνισης AR.

6.2. Εκκενώσεις κτιρίων

Για να εξετάσουμε τις εφαρμογές επαυξημένης πραγματικότητας (AR) για την εκκένωση κτιρίων, είναι απαραίτητο να περιγράψουμε συνοπτικά τα στάδια και τα γεγονότα που καθορίζουν τις εκκενώσεις.

Αρκετά διαδοχικά γεγονότα περιλαμβάνουν την εκκένωση μιας δομής που κινδυνεύει από ανθρωπογενείς ή φυσικές καταστροφές. Η βιβλιογραφία αναφέρεται στον χρόνο που απαιτείται για την εκκένωση ενός κτιρίου ως τον απαιτούμενο χρόνο ασφαλούς διαφυγής (RSET). Αυτός ο χρόνος πρέπει να είναι μικρότερος από τον διαθέσιμο ασφαλή χρόνο εξόδου (ASET), ο οποίος είναι ο διαθέσιμος χρόνος για να βγουν οι ένοικοι από μια εγκατάσταση με ασφάλεια προτού οι συνθήκες της γίνουν επικίνδυνες (Lovreglio, 2016). Όπως υποδεικνύεται στην Εικόνα 16, το RSET μπορεί να διαχωριστεί σε πολλές διαδοχικές φορές. Ως αποτέλεσμα, απαιτούνται πολλά μέτρα για την επιτυχή εκκένωση.



Εικόνα 16

Επειδή λαμβάνει υπόψη την ανθρώπινη συμπεριφορά και την απόκριση έκτακτης ανάγκης, ολόκληρος ο χρόνος εκκένωσης είναι ένας από τους πιο κρίσιμους χρόνους. Για ορισμένους τύπους καταστροφών, όπως πυρκαγιά, η φάση προεκκένωσης μπορεί να είναι η πιο κρίσιμη, καθώς οι ένοικοι του κτιρίου χρειάζονται χρόνο για να αναγνωρίσουν την κατάσταση έκτακτης ανάγκης και να προετοιμαστούν πριν από την πραγματική εκκένωση. Για άλλες φυσικές καταστροφές, όπως οι σεισμοί, οι ένοικοι του κτιρίου μπορούν να ανιχνεύσουν αμέσως το τρέμουλο του κτιρίου, αν και μπορεί να χρειάζονται χρόνο για να αντιδράσουν (Lovreglio et. al., 2017).

Η τελική φάση της εκκένωσης ενός κτιρίου είναι η πραγματική μετεγκατάσταση σε μια ασφαλή τοποθεσία, όπως ένα σημείο συγκέντρωσης. Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης, οι ένοικοι του κτιρίου λαμβάνουν οδηγίες να εντοπίσουν μια ασφαλή έξοδο χρησιμοποιώντας τις πληροφορίες που παρέχονται από τους πυροσβέστες και τα συστήματα εκκένωσης του κτιρίου, όπως ο φωτισμός εκκένωσης.

Η εικονική πραγματικότητα και η επαυξημένη εικονικότητα έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως για τη μελέτη της ανθρώπινης συμπεριφοράς και την καθοδήγηση των ενοίκων του κτιρίου σε διάφορες φάσεις αξιολόγησης. Αρκετές αξιολογήσεις που εξετάζουν τους διάφορους στόχους εκκένωσης των τεχνολογιών εικονικής πραγματικότητας έχουν δημοσιευτεί μέχρι σήμερα (Zhenan Feng et. al., 2018). Ωστόσο, η πλήρης αξιολόγηση της βιβλιογραφίας σχετικά με τις εφαρμογές AR για την εκκένωση κτιρίων δεν είναι ακόμη διαθέσιμη.

Προκειμένου να καλυφθεί αυτό το κενό, ο Loveglio (2018) πραγματοποίησε έρευνα. Στην έρευνα αυτή η προτεινόμενη αξιολόγηση των εφαρμογών επαυξημένης πραγματικότητας (AR) για εκκένωση κτιρίων αποσκοπεί στην επίτευξη των ακόλουθων τριών στόχων:

- Προσδιορισμός καταστροφών κτιρίων όπου έχουν εφαρμοστεί εφαρμογές επαυξημένης πραγματικότητας.
- Την έρευνα για το ποιο στάδιο εκκένωσης επηρεάστηκε από την εφαρμογή του AR.
- Τη μελέτη του υλικού που χρησιμοποιείται σε εφαρμογές επαυξημένης πραγματικότητας.

Αυτοί οι στόχοι διαμορφώθηκαν για να παρέχουν μια ευρεία επισκόπηση αυτού του θέματος και να τονίσουν τα ερευνητικά κενά για μελλοντική μελέτη και ανάπτυξη AR.

Η ανάλυση καταδεικνύει ότι ένας αριθμός εφαρμογών έχει δημιουργηθεί κυρίως για καταστροφές όπως τσουνάμι, σεισμοί και πυρκαγιές που απειλούν εκπαιδευτικές δομές και δομές μεγάλης κλίμακας. Ως αποτέλεσμα, οι αιτήσεις για πολλές άλλες ανθρωπογενείς ή φυσικές καταστροφές (όπως τρομοκρατικές επιθέσεις, πυρκαγιές και τυφώνες) δεν έχουν ακόμη εξεταστεί.

Η εξεταζόμενη βιβλιογραφία δείχνει ότι οι εφαρμογές επαυξημένης πραγματικότητας (AR) έχουν χρησιμοποιηθεί για την ενίσχυση του ρεαλισμού των τυπικών ασκήσεων εκκένωσης με την προσθήκη ψηφιακών πληροφοριών. Επιπλέον, έχει δημιουργηθεί ένας αριθμός εφαρμογών σε μια προσπάθεια βελτίωσης της απόδοσης εκκένωσης των ενοίκων του κτιρίου διευκολύνοντας την πλοήγηση. Η χρήση επαυξημένης πραγματικότητας για την απεικόνιση του αποτελέσματος της προσομοίωσης εκκένωσης σε πραγματικές ρυθμίσεις είναι μια νέα εφαρμογή.

Η ανασκόπηση προτείνει ότι οι έμμεσες λύσεις AR, όπως το Oculus, μπορούν να προκαλέσουν δυσκολίες κίνησης των ενοίκων, αλλά οι λύσεις άμεσης τεχνολογίας AR, όπως το Moverio, έχουν περιορισμένο οπτικό πεδίο που μειώνει την προσομοίωση. Χρησιμοποιώντας πιο σύγχρονες επιλογές υλικού άμεσου AR, όπως το Microsoft HoloLens και το Meta 2, είναι εύλογο να ισχυριστεί κανείς ότι αυτοί οι υπάρχοντες περιορισμοί μπορούν να επιλυθούν εύκολα. Στη βιβλιογραφία, ωστόσο, αυτές οι δύο μοναδικές λύσεις δεν έχουν ακόμη εφαρμοστεί.

Η έρευνα καταδεικνύει ότι όλες οι εφαρμογές επαυξημένης πραγματικότητας (AR) σχεδιάστηκαν για να επηρεάσουν τη φάση της κίνησης κατά τη διάρκεια των εκκενώσεων κτιρίων και ότι μόνο δύο εφαρμογές χρησιμοποιήθηκαν για εκπαιδευτικούς σκοπούς κατά τη φάση πριν από την εκκένωση. Ως εκ τούτου, απαιτείται μελλοντική έρευνα για να μελετηθεί πώς τα εργαλεία επαυξημένης πραγματικότητας (AR) μπορούν να βελτιώσουν την εκπαίδευση πριν από την εκκένωση και πώς μπορούν να βοηθήσουν τους κατοίκους του κτιρίου σε πραγματικές καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, συμβουλευοντάς τους τη βέλτιστη πορεία δράσης.

7. Ανάλυση διαδρομών εκκένωσης σε πειράματα εικονικής πραγματικότητας για ασφάλεια σήραγγας

Ορισμένα θανατηφόρα περιστατικά, συμπεριλαμβανομένης της πυρκαγιάς στη σήραγγα του Mont Blanc το 1999 και της πυρκαγιάς του Saint Gotthard το 2001, ώθησαν την κοινότητα ασφάλειας των μεταφορών να εξετάσει τις εκκενώσεις πυρκαγιάς σε σήραγγα. Λόγω της πιθανότητας επιπτώσεων απειλητικών για τη ζωή, αυτά τα συμβάντα έδειξαν ότι η εκκένωση από τη φωτιά έχει ιδιαίτερη σημασία για τα ατυχήματα του οδικού δικτύου (Carvel ;Beard ,2005). Προκειμένου να κατανοηθεί πώς οι συμπεριφορές των επιβατών σε σήραγγα επηρεάζουν την ασφάλεια της σήραγγας, η μελέτη της κίνησης εκκένωσης έγινε αντικείμενο εντατικής έρευνας (Fridolf et. al., 2001).

Για τη μελέτη της ανθρώπινης συμπεριφοράς σε περιστατικά πυρκαγιάς και την εκκένωση των κατοίκων, διατίθενται ποικίλες μεθοδολογίες. Μελέτες περιπτώσεων (δηλαδή, ανάλυση ή/και ανακατασκευή πραγματικών περιστατικών (Purser, 2009), τεχνικές μοντελοποίησης (Ronchi, et. al., 2012) και πειράματα εκκένωσης (δηλ. πειράματα υποθετικών σεναρίων, εργαστηριακά πειράματα και πειράματα πεδίου, (Nilsson,2009) αποτελούν παραδείγματα μεθοδολογιών έρευνας. Η εικονική πραγματικότητα (VR) χρησιμοποιείται σε διάφορα είδη έρευνας εκκένωσης λόγω του μεγάλου πειραματικού της ελέγχου, της έλλειψης ηθικών ορίων λόγω σωματικού τραυματισμού και των υλικοτεχνικών και οικονομικών πλεονεκτημάτων. Το VR έχει χρησιμοποιηθεί στη σφαίρα της έρευνας πυρασφάλειας για διάφορους σκοπούς, συμπεριλαμβανομένης της διερεύνησης της εκπαίδευσης των επιβατών στην εκκένωση σήραγγας (Kinateder et. al., 2013), των συμπεριφορών πριν από την εκκένωση (Fridolf et. al.,2013) και της επίδρασης των συστημάτων εντοπισμού δρόμου (Kobes et. al. 2010).

Μέχρι σήμερα, τα πειράματα εκκένωσης σήραγγας (τόσο σε πραγματικές συνθήκες (Nilsson et. al. 2009) ή στην εικονική πραγματικότητα (Kinateder et. al. ,2014) έχουν κυρίως εξετάσει τις επιπτώσεις διαφόρων συνθηκών ή μεταβλητών στην απόδοση των επιβατών όσον αφορά τη χρήση εξόδου και την επίδρασή τους στους συνολικούς χρόνους εκκένωσης.

Αυτή η γνώση είναι απαραίτητη καθώς επιτρέπει την αξιολόγηση διαφόρων σχεδιαστικών λύσεων, παραγόντων που επηρεάζουν την ανθρώπινη συμπεριφορά,

τακτικών διαχείρισης έκτακτης ανάγκης, κ.λπ. ενώ δεν αξιολογεί ποσοτικά τα μοτίβα διαδρομών εκκένωσης.

Τα πειράματα με την εικονική πραγματικότητα επιτρέπουν την ακριβή ανακατασκευή των διαδρομών εκκένωσης στο χώρο και στο χρόνο. Γενικά, χρησιμοποιούνται ποσοτικές μέθοδοι (π.χ. στατιστικές συμπερασμάτων) για την ανάλυση δεδομένων σχετικά με τη χρήση εξόδου και τους χρόνους εκκένωσης (Kinateder et. al., 2013). Αντίθετα, οι αναλυτές κάνουν συχνά ποιοτικές γενικεύσεις σχετικά με τις διαδρομές των επιβαινόντων και την επίδραση διαφόρων παραγόντων στη συμπεριφορά τους. Η υιοθέτηση μιας ποσοτικής μεθόδου για την ανάλυση της κίνησης των επιβατών θα παρείχε αντίθετα τη σύγκριση των μοτίβων ταξιδιού (π.χ. για σκοπούς επικύρωσης), η οποία θα μπορούσε να ενισχύσει τη δυνατότητα εφαρμογής των πειραματικών αποτελεσμάτων.

Η εγκυρότητα των δεδομένων σχετικά με την κινητικότητα των ατόμων σε VR μπορεί να είναι περιορισμένη (η συμπεριφορά των επιβατών στο VR μπορεί να διαφέρει σε ένα γνήσιο σενάριο εκκένωσης). Στην πραγματικότητα, είναι αδύνατο να διεξαχθούν πλήρως έγκυρα πειράματα VR λόγω μεθοδολογικών, ηθικών και πρακτικών εμποδίων (Andrée et. al., 2013). Από την άλλη πλευρά, παλαιότερες έρευνες έχουν δείξει ότι τα πειράματα εικονικής πραγματικότητας (VR) είναι μια αποτελεσματική μέθοδος για την αξιολόγηση των αιτιωδών σχέσεων μεταξύ ανεξάρτητων μεταβλητών και ανθρώπινης συμπεριφοράς (Gamberini et. al., 2003). Λόγω της πολυπλοκότητας των σεναρίων πυρκαγιάς σε σήραγγα και της αδυναμίας επίτευξης πλήρους πειραματικού ελέγχου κατά τη διάρκεια απροειδοποίητων ασκήσεων, οι μελέτες VR επιτρέπουν τον πλήρη πειραματικό έλεγχο, κάτι που είναι εξαιρετικά δύσκολο να επιτευχθεί με άλλες πειραματικές μεθόδους και αδύνατο κατά τις απροειδοποίητες ασκήσεις. Αυτές οι δυσκολίες μπορεί να δημιουργήσουν μια συλλογή ερωτήσεων. Πώς μελετάμε τους περιορισμούς και το απρόβλεπτο των πειραματικών διαδρομών ταξιδιού VR; Πώς συγκρίνουμε ποσοτικά την κίνηση εκκένωσης σε ένα περιβάλλον εικονικής πραγματικότητας με άλλα δεδομένα (από τον πραγματικό κόσμο, άλλα περιβάλλοντα VR ή μελέτες μοντελοποίησης);

Για την ποσοτική διερεύνηση των διαδρομών ταξιδιού εκκένωσης, οι (Ronchi et. al., 2015), πραγματοποίησαν μια εργασία η οποία μπορεί να προσφέρει τη χρήση τελεστών εμπνευσμένων από τις έννοιες της θεωρίας λειτουργικής ανάλυσης. Η

συναρτησιακή ανάλυση είναι ένας κλάδος των μαθηματικών που εφαρμόζει γενικεύσεις διανυσματικών μετρήσεων σε συναρτήσεις. Η λειτουργική ανάλυση χρησιμοποιείται για να αναφερθεί στη γενίκευση της γραμμικής άλγεβρας, της ανάλυσης και της γεωμετρίας.

Οι σήραγγες έχουν συνήθως απλές (γενικά ευθείες) γεωμετρίες χωρίς διαμερίσματα, όπου η σχετική απόσταση των επιβαινόντων από τον κίνδυνο (δηλαδή την πηγή της πυρκαγιάς και τα χαρακτηριστικά της) και η διάρκεια του χρόνου που δαπανάται μέσα στη σήραγγα είναι συνήθως οι πιο σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ασφάλεια ζωής. Επιπλέον, προηγούμενες δοκιμές (Fridolf, et. al., 2013) έδειξαν ότι η θέση των ανθρώπων επηρεάζει την πιθανότητα χρήσης μιας διαφυγής έκτακτης ανάγκης και την ταχύτητα κίνησής τους.

Η μέθοδος για τη μελέτη των διαδρομών εκκένωσης VR μπορεί να συνοψιστεί σε τρία βήματα:

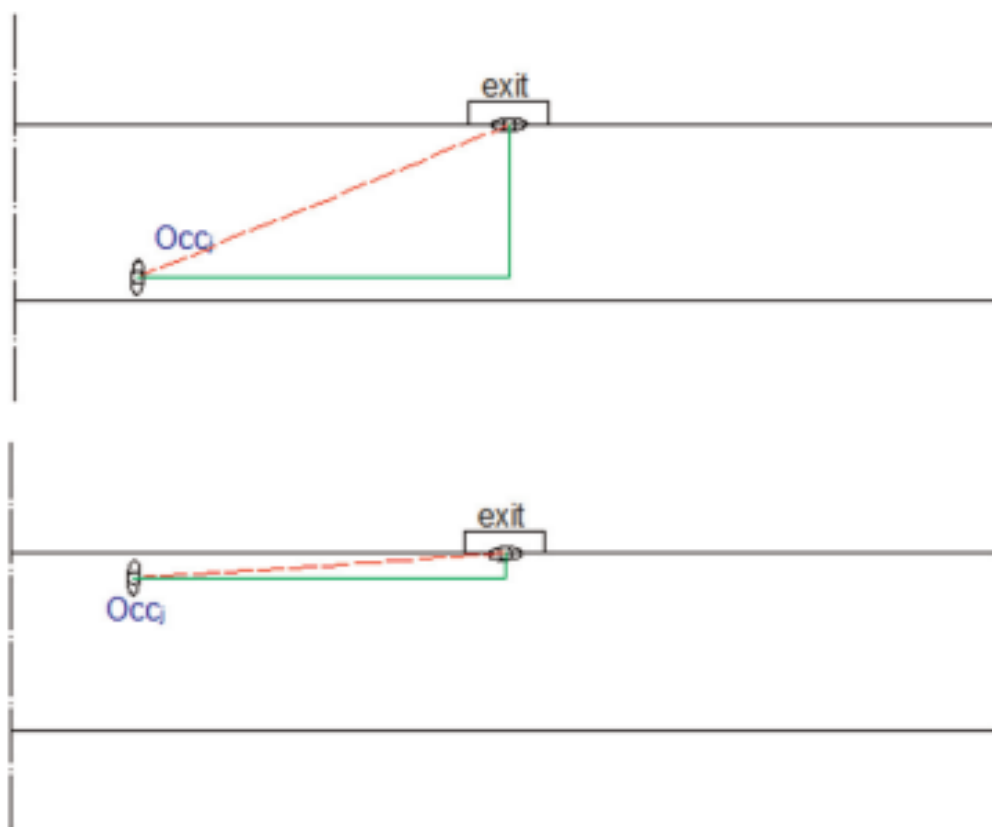
- 1) Καθορίζονται οι μεταβλητές ενδιαφέροντος (παραμετρικές εξισώσεις μοτίβων διαδρομής εκκένωσης) που περιγράφουν τις διαδρομές διαφυγής.
- 2) Καθορίζεται η σύγκλιση των μεταβλητών ενδιαφέροντος και τα κριτήρια αποδοχής για την αβεβαιότητα που σχετίζεται με την εκτίμηση των μέσων συντεταγμένων. Η ανάλυση ολοκληρώνεται με τον υπολογισμό ενός συνόλου μέτρων σύγκλισης (που επηρεάζονται από τη θεωρία λειτουργικής ανάλυσης) των συντεταγμένων VR των πειραματικών διαδρομών ταξιδιού προς την κατεύθυνση του μέσου όρου.
- 3) Γίνεται ποσοτική σύγκριση μεταξύ διαδρομών ταξιδιού.

Η προσέγγιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πραγματοποίηση δύο βασικών ειδών ανάλυσης:

- (1) Μελέτες επικύρωσης: Σύγκριση μονοπατιών διαδρομών VR με μονοπάτια αναφοράς (π.χ. διαδρομές εκκένωσης από τον πραγματικό κόσμο, διαδρομές που προέρχονται από άλλα επικυρωμένα μοντέλα κ.λπ.).
- (2) Ανάλυση διαφορετικών συνθηκών: Η σύγκριση διακριτών υποσυνόλων διαδρομών ταξιδιού επιτρέπει τη διερεύνηση της επίδρασης διαφόρων μεταβλητών στην κίνηση των ανθρώπων.

Προηγούμενες έρευνες έχουν αποδείξει ότι η σύγκριση πειραματικών διαδρομών με διαδρομές αναφοράς είναι μια καλή μέθοδος για την επικύρωση υποθέσεων και τον προσδιορισμό των αιτιακών σχέσεων μεταξύ των μεταβλητών κατά την εκκένωση (Hoskins ;Milke, 2012). Για παράδειγμα, είναι δυνατή η σύγκριση διαδρομών VR με διαδρομές που προέρχονται από δεδομένα πραγματικών δοκιμών, μοντέλα εκκένωσης, διαδρομές που καθορίζονται από τον χρήστη, συντομότερες διαδρομές κ.λπ.

Η Εικόνα 17 απεικονίζει δύο παραδείγματα διαδρομών μετακίνησης αναφοράς σε σχέση με το σημείο εκκίνησης ενός ατόμου που πλησιάζει σε μια έξοδο.



Εικόνα 17

Η συνεχής γραμμή είναι μια υποθετική διαδρομή που ορίζεται από τον χρήστη. Οι διακεκομμένες γραμμές υποδεικνύουν τις συντομότερες διαδρομές. Οι συντομότερες διαδρομές μπορεί να αντιστοιχούν στις διαδρομές που επιλέγονται από τα μοντέλα προσομοίωσης εκκένωσης, τα οποία συχνά υποθέτουν ότι οι άνθρωποι επιλέγουν τις συντομότερες διαδρομές (Kuligowski et. al., 2010 ; Ronchi- Kinsey, 2011).

Η σύγκριση με διαδρομές αναφοράς μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας είτε μια μοναδική διαδρομή αναφοράς Occr είτε μια συλλογή διαδρομών αναφοράς (εάν, για παράδειγμα, χρησιμοποιείται μια κατανομή διαφόρων μονοπατιών ταξιδιού). Αφορούν ένα ενιαίο (ένα μονοπάτι αναφοράς) ή ένα πολυάριθμο (πολλές διαδρομές αναφοράς) σύνολο παραμετρικών εξισώσεων, αντίστοιχα.

Η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης μεθόδου εξαρτάται από τη συνδυασμένη μελέτη συντεταγμένων που χρησιμοποιούν ERD, EPC και SC για την κατανόηση της ποικιλομορφίας των τροχιών των επιβατών, καθώς και από την ανάλυση των IA για να ληφθεί υπόψη η ελκυστική/απωθητική δύναμη μιας πηγής εξόδου/πυρκαγιάς. Αντίθετα, η μόνη χρήση στατιστικών δοκιμών για την ανάλυση των IA μπορεί να έχει το ζήτημα της εξέτασης ίσων περιοχών ακόμη και αν αντιστοιχούν σε διάφορες καμπύλες (η ίδια ακέραια τιμή μπορεί να επιτευχθεί για καμπύλες με διαφορετικά σχήματα). Μπορεί να είναι σε θέση να αξιολογήσει τη διακύμανση των μονοπατιών χωρίς τη χρήση της ιδέας IA, εφαρμόζοντας τους τελεστές διανύσματος που επηρεάζονται από τη θεωρία της συναρτησιακής ανάλυσης και αθροίζοντας τα τετράγωνα. Ωστόσο, αυτό δεν λαμβάνει υπόψη τη δύναμη απόθησης/έλξης ενός στοιχείου γεωμετρίας (π.χ., η μελέτη μιας πηγής έκθεσης σε κίνδυνο). Η χρήση τελεστών διανυσμάτων σε συνδυασμό με μια στατιστική ανάλυση των IA επιτρέπει μια ολοκληρωμένη ποσοτική αξιολόγηση της διαφοράς μεταξύ των πειραματικών διαδρομών ταξιδιού. Το ERD και το EPC επιτρέπουν την αξιολόγηση της συμφωνίας μεταξύ των καμπυλών που αντιπροσωπεύουν διαφορετικές τροχιές (είτε από την ίδια πειραματική ομάδα, διαφορετικές πειραματικές ομάδες ή πείραμα έναντι μονοπατιών αναφοράς), δηλαδή είναι ένα ποσοτικό μέτρο των διαφορών μεταξύ των συντεταγμένων των τροχιών. Το SC είναι ικανό να συλλαμβάνει τις διαφορές μεταξύ των σχημάτων των καμπυλών που αντιπροσωπεύουν τις συντεταγμένες. Έτσι, οι τελεστές διανυσμάτων επιτρέπουν τη λήψη συνολικής ποσοτικής αξιολόγησης των διαφορών μεταξύ των καμπυλών, ενώ οι στατιστικές δοκιμές των IA επιτρέπουν τον προσδιορισμό του εάν αυτές οι διαφορές είναι στατιστικά σημαντικές όταν λαμβάνεται υπόψη η δύναμη απόθησης/έλξης ενός στοιχείου γεωμετρίας.

Η προτεινόμενη στρατηγική είναι εφαρμόσιμη σε πολλά είδη ταξιδιωτικών διαδρομών. Για παράδειγμα, τα δεδομένα που λαμβάνονται από πειράματα VR

μπορούν να συγκριθούν με δεδομένα κίνησης εκκένωσης που λαμβάνονται από άλλες μορφές πειραματικών δεδομένων (π.χ. μελέτες πεδίου, εργαστηριακές δοκιμές κ.λπ.), πραγματικά ατυχήματα και μελέτες προσομοίωσης. Η χρήση της προσέγγισης για σύγκριση με δεδομένα του πραγματικού κόσμου, για παράδειγμα, θα προσφέρει μια πλήρη ποσοτική επικύρωση της κίνησης εκκένωσης που παρατηρείται στο VR. Οι προτεινόμενες μεθοδολογίες ξεπερνούν την υπάρχουσα κατάσταση των δυνατοτήτων επικύρωσης, καθώς χρησιμοποιούνται κυρίως απλοποιημένες μειώσεις των αποτελεσμάτων συμπεριφοράς (όπως ο αριθμός των εκκενωμένων, ο συνολικός χρόνος εκκένωσης κ.λπ.). Επιπλέον, αυτού του είδους η ποσοτική επικύρωση των μονοπατιών διαδρομών VR ξεπερνά τις δυνατότητες ποιοτικών αξιολογήσεων των διαδρομών ταξιδιού.

Μέσω της εξέτασης των παρατηρούμενων θέσεων των επιβαινόντων με την πάροδο του χρόνου, η νέα μέθοδος παρήγαγε χρήσιμες πληροφορίες. Στην πραγματικότητα, η μέθοδος προορίζεται να επιτρέψει μια ενδελεχή αναθεώρηση των υποκείμενων υποθέσεων του μοντέλου εκκένωσης. Για παράδειγμα, η υπόθεση πολλών μοντέλων εκκένωσης ότι οι χρήστες της σήραγγας θα επιλέγουν πάντα τη συντομότερη διαδρομή προς την έξοδο κινδύνου μπορεί να είναι υπερβολικά απλοϊκή. Από την περιγραφική ανάλυση των τροχιών κίνησης, μπορούσαν να ανιχνευθούν δύο μοτίβα συμπεριφοράς. Πρώτον, οι συμμετέχοντες προτιμούν να κάνουν σύντομα διαλείμματα κατά τη διάρκεια των εκκενώσεων και δεν ακολουθούν τη συντομότερη διαδρομή προς την έξοδο κινδύνου. Δεύτερον, οι συμμετέχοντες επιλέγουν διάφορα μονοπάτια για την επείγουσα διαφυγή. Από την αρχική θέση, το μονοπάτι κατά μήκος του δεξιού τοίχου της σήραγγας επιλέχθηκε πιο συχνά. Στο επίπεδο της σήμανσης έκτακτης ανάγκης, οι συμμετέχοντες πέρασαν στην αντίθετη πλευρά της σήραγγας και στη συνέχεια ακολούθησαν τον τοίχο της σήραγγας μέχρι την έξοδο. Αυτά τα ευρήματα συνάδουν με προηγούμενες έρευνες που δείχνουν ότι οι χρήστες της σήραγγας ταξιδεύουν κατά μήκος του τοίχου της σήραγγας σε σήραγγες γεμάτες καπνό (Fridolf et. al., 2013). Άλλοι συμμετέχοντες, ωστόσο, διάλεξαν τη μέση του δρόμου.

Η μελλοντική έρευνα μπορεί να εφαρμόσει την προτεινόμενη μέθοδο για να εξετάσει τη θέση των ενοίκων στη διατομή ενός κτιρίου (ή σε οποιαδήποτε άλλη χωρική διάσταση). Στην πραγματικότητα, η χρήση της εξόδου κινδύνου σε σήραγγες γεμάτες καπνό επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως

- 1) τη φυσική ορατότητα της εξόδου κινδύνου,
- 2) τη πιθανότητα ο επιβάτης να αντιληφθεί πραγματικά την έξοδο,
- 3) τη πιθανότητα οι επιβάτες να δώσουν προσοχή στην έξοδο και τη χρήση των παρεχόμενων πληροφοριών (π.χ. μια πινακίδα που υποδεικνύει την έξοδο κινδύνου),
- 4) την πιθανότητα οι επιβάτες να χρησιμοποιήσουν τις πληροφορίες που ελήφθησαν και
- 5) προηγούμενη εμπειρία και εκπαίδευση (Kinateder et. al., 2013).

Από την άποψη της ασφάλειας ζωής, η θέση των επιβατών στη διατομή μπορεί να επηρεάσει τις τέσσερις πρώτες παραμέτρους που περιγράφονται παραπάνω, επηρεάζοντας έτσι την πιθανότητα χρήσης της διαφυγής και την έκθεση σε κίνδυνο που προκύπτει. Αυτό είναι ακόμη ένα παράδειγμα της καλύτερης κατανόησης της συμπεριφοράς εκκένωσης που προκύπτει από την εφαρμογή της προτεινόμενης στρατηγικής.

Οι παρατηρήσεις από τις ασκήσεις εκκένωσης ενδέχεται να στερούνται πειραματικών ελέγχων. Ως εκ τούτου, δεν μπορούν να ληφθούν αιτιολογικές ερμηνείες σχετικά με τις μετρήσεις συμπεριφοράς. Η σύγκριση των πειραμάτων VR και των υποθέσεων που χρησιμοποιούνται στις προσομοιώσεις εκκένωσης επέτρεψε τον εντοπισμό μιας σημαντικής έλλειψης μιας από τις συχνά χρησιμοποιούμενες υποθέσεις στα μοντέλα εκκένωσης, δηλαδή ότι μπορεί να υπεραπλουστεύουν την κίνηση των ανθρώπων. Απαιτούνται πρόσθετα πειράματα για να δοκιμαστεί αυτή η θεωρία. Απαιτείται μελλοντική έρευνα για τη σύγκριση των παρόντων αποτελεσμάτων με έρευνες πεδίου και εργαστηρίου.

8. Περίπτωση μελέτης εφαρμογής της εικονικής πραγματικότητας

Οι Ronchi et. al., 2015, παρουσίασαν μια περίπτωση μελέτης με τη χρήση της τεχνολογίας της εικονικής πραγματικότητας προκειμένου να διερευνήσουν τα μονοπάτια εκκένωσης σε περίπτωση πυρκαγιάς σε σήραγγα.

Σε περίπτωση εκκένωσης σήραγγας λόγω πυρκαγιάς, οι επιβάτες ενδέχεται να αντιμετωπίσουν περιορισμούς στις ικανότητες επεξεργασίας πληροφοριών και στην ικανότητά τους να επιλέξουν την κατάλληλη στρατηγική εκκένωσης λόγω της παρουσίας ασαφών ή αντικρουόμενων πληροφοριών (Nilsson, 2009). Η ερμηνεία του φυσικού περιβάλλοντος μπορεί να δημιουργήσει προκλήσεις, όπως οι επιπτώσεις του καπνού στις αλληλεπιδράσεις των επιβατών με τα σήματα εξόδου (Ronchi et. al., 2012). Η τρέχουσα μελέτη περίπτωσης εξετάζει τη συμπεριφορά που προέκυψε μετά την έξοδο των επιβατών της σήραγγας από το όχημά τους λόγω πυρκαγιάς. Το επίκεντρο της μελέτης είναι στη φάση μετακίνησης της διαδικασίας εκκένωσης, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η συμπεριφορά πριν από την εκκένωση μέσα στα αυτοκίνητα. Τα άτομα τοποθετήθηκαν με τα πόδια μέσα σε μια προσομοιωμένη οδική σήραγγα εικονικής πραγματικότητας. Στην τοποθεσία, οι παρατηρητές παρατήρησαν καύση ενός οχήματος βαρέων εμπορευμάτων (HGV) που είχε ως αποτέλεσμα την εκπομπή καπνού που άρχισε να διαχέεται προς τα άτομα που ήταν παρόντα. Η τρέχουσα έρευνα εξετάζει τις διαδρομές ταξιδιού ατόμων που χρησιμοποιούσαν την ίδια έξοδο κινδύνου.

Η έρευνα πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο 3D-multisensory CAVE που βρίσκεται στο Τμήμα Ψυχολογίας του Πανεπιστημίου του Würzburg. Το σύστημα προσομοίωσης τοποθετεί αποτελεσματικά τα άτομα σε ένα εικονικό περιβάλλον, προκαλώντας έτσι μια ισχυρή αίσθηση παρουσίας. Τα εικονικά περιβάλλοντα που απεικονίζονται στη μελέτη δημιουργούνται χρησιμοποιώντας μια εσωτερικά αναπτυγμένη τροποποίηση για πολλούς παίκτες (VrSessionMod 0.5) του βιντεοπαιχνιδιού πρώτου προσώπου Half-Life 2, το οποίο χρησιμοποιεί το Source Engine που αναπτύχθηκε από τη Valve, μια εταιρεία με έδρα το Bellevue, Ουάσιγκτον, ΗΠΑ (όπως φαίνεται στο Σχήμα 3). Το λογισμικό εικονικής πραγματικότητας Cyber Session CS-Research 5.6 (VTplusGmbH, Würzburg, Γερμανία, διαθέσιμο στη διεύθυνση www.cybersession.info) χρησιμοποιήθηκε για τη

δημιουργία πειραματικού ελέγχου και την καταγραφή δεδομένων. Οι αποδιδόμενες σκηνές παρουσιάστηκαν οπτικά σε ένα 5-sided Cave Automatic Virtual Environment που βρίσκεται στο ISpacebyBARCO, Kuurne, Βέλγιο (Εικόνα 18).

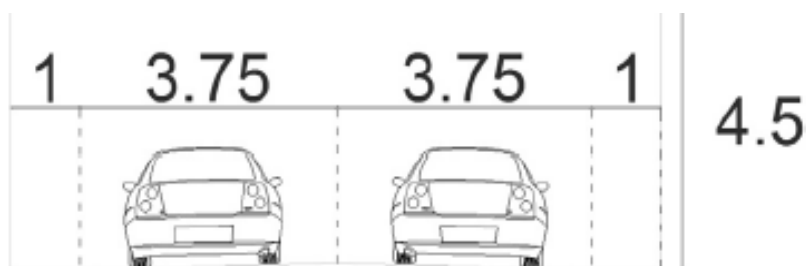


Εικόνα 18 Στιγμιότυπο οθόνης της κατάστασης έκτακτης ανάγκης

Οι σκηνές προβλήθηκαν χρησιμοποιώντας έξι προβολείς, με αποτέλεσμα ένα οπτικό μέγεθος 4 επί 3 επί 3 μέτρα. Οι προβολείς είχαν ανάλυση 1920 επί 1200 pixel, με εξαίρεση τον μπροστινό τοίχο που ήταν εξοπλισμένος με δύο προβολείς και είχε υψηλότερη ανάλυση 2016 επί 1486 pixel. Για τη δημιουργία στερεοσκοπικών εικόνων, χρησιμοποιήθηκε ένα ζευγάρι προσωπικών υπολογιστών για κάθε προβολέα. Ο συμπληρωματικός προσωπικός υπολογιστής χρησιμοποιήθηκε για τη λειτουργία τόσο του λογισμικού ελέγχου, του Cyber Session, όσο και της μονάδας ελέγχου που είναι υπεύθυνη για την απόδοση. Η παραγωγή στερεοσκοπικών εικόνων περιλάμβανε τη χρήση γυαλιών παθητικής παρεμβολής φιλτραρίσματος, συγκεκριμένα του μοντέλου Infitec Premium που κατασκευάζεται από την Infitec του Ulm, Γερμανία. Το ακουστικό περιεχόμενο παραδόθηκε μέσω διαμόρφωσης ήχου

Surround 7.1. Η μελέτη χρησιμοποίησε ένα ενεργό υπέρυθρο σύστημα παρακολούθησης LED με τέσσερις κάμερες (Phase Space Impulse, Phase Space Inc., San Leandro, CA, USA) για την παρακολούθηση δεδομένων κίνησης και προσανατολισμού. Η πλοήγηση στο περιβάλλον εικονικής πραγματικότητας διευκολύνθηκε μέσω ενός ασύρματου game pad που ήταν εξοπλισμένο με στόχο παρακολούθησης. Η προσαρμογή της απεικόνισης τρισδιάστατης εικόνας βασίστηκε στη θέση και τον προσανατολισμό του κεφαλιού.

Η μελέτη περιελάμβανε μια προσομοίωση ενός σεναρίου εκκένωσης μέσα σε μια οδική σήραγγα μονής κατεύθυνσης. Το εμβαδόν διατομής της σήραγγας ήταν 9,50 m, σύμφωνα με τις προδιαγραφές που περιγράφονται στα γερμανικά πρότυπα [RABT 2012]. Η σήραγγα αποτελείται από δύο λωρίδες και πλευρικούς πεζόδρομους από άμμο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 19.

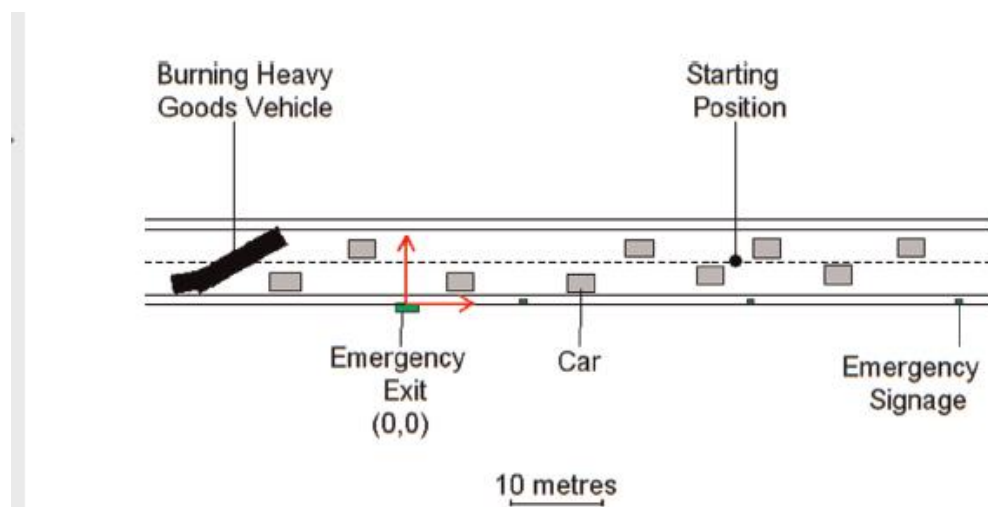


Εικόνα 19 Σχηματική αναπαράσταση της σήραγγας

Η έξοδος κινδύνου παρέχει πρόσβαση σε μια σήραγγα έκτακτης ανάγκης για πεζούς που συνδέει τα δυο ανοίγματα της οδικής σήραγγας. Ο φωτιζόμενος πίνακας που εμφανίζει το σήμα εξόδου συμμορφώνεται με την τυπική ευρωπαϊκή οπίσθια φωτεινή πινακίδα.

Η σήραγγα ήταν εξοπλισμένη με τυπική ευρωπαϊκή σήμανση έκτακτης ανάγκης, η οποία ήταν τοποθετημένη σε διαστήματα 25 μέτρων (RABT 2012). Ένα βαρύ φορτηγό όχημα (HGV) που φλεγόταν εμπόδισε το οδόστρωμα κοντά στην έξοδο κινδύνου. Η προσομοιωμένη σήραγγα γέμισε με καπνό για να προκαλέσει μειωμένες συνθήκες ορατότητας. Το εύρος των συνθηκών ορατότητας που παρατηρήθηκαν εκτιμήθηκε ότι είναι μεταξύ 8-15 μέτρων για αντικείμενα που αντανακλούν το φως. Αυτό έγινε σύμφωνα με προηγούμενη έρευνα (Jin, 2008). Ο καπνός παρατηρήθηκε

να κινείται προς την κατεύθυνση της αρχικής θέσης των συμμετεχόντων, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 20.



Εικόνα 20 Σχηματική αναπαράσταση του σεναρίου εκκένωσης

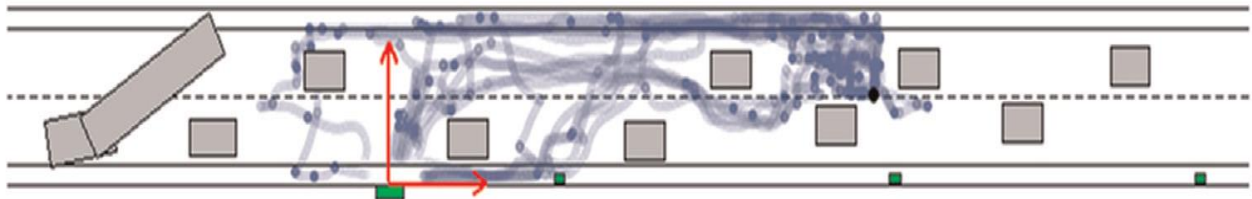
Η προσομοίωση εκκένωσης έγινε μέσα σε μια μοναδική οπή της σήραγγας, από τις δύο διαθέσιμες. Η αρχική θέση των συμμετεχόντων στην έναρξη κάθε δοκιμής απεικονίζεται στην Εικόνα 20. Το πείραμα διεξήχθη με τους συμμετέχοντες να το εκτελούσαν μεμονωμένα στο CAVE, έναν κάθε φορά. Οι δοκιμές δεν αφορούσαν την έξοδο από το αυτοκίνητο, αλλά ξεκίνησαν με τους συμμετέχοντες να στέκονται στη σήραγγα με την υπόθεση ότι είχαν ήδη εκκενώσει το όχημά τους. Η σήραγγα που απεικονίζεται στην Εικόνα 20 έδειξε την παρουσία πρόσθετων αυτοκινήτων. Τα υποκείμενα της μελέτης έπρεπε να πλοηγηθούν σε ένα περιβάλλον που σταδιακά γέμισε καπνό προκειμένου να εντοπίσουν και να αποκτήσουν πρόσβαση στην έξοδο κινδύνου.

Η επιτροπή δεοντολογίας της ιατρικής σχολής στο Πανεπιστήμιο του Würzburg, Γερμανία παρείχε ηθική έγκριση για τη μελέτη και όλοι οι συμμετέχοντες παρείχαν ενημερωμένη συγκατάθεση πριν από την έναρξη της πειραματικής συνεδρίας.

Το πείραμα διεξήχθη με συνολικά 21 συμμετέχοντες. Από τους συμμετέχοντες που συμμετείχαν στο πείραμα, συνολικά δεκαπέντε άτομα προχώρησαν προς την έξοδο κινδύνου, ενώ πέντε άτομα πλησίασαν το τηλέφωνο έκτακτης ανάγκης. Επιπλέον, ένας συμμετέχων παρατηρήθηκε να κατευθύνεται προς την είσοδο της σήραγγας. Η παρούσα μελέτη περίπτωσης χρησιμοποίησε δεδομένα από 15 συμμετέχοντες που είχαν πρόσβαση στην έξοδο κινδύνου, εκ των οποίων οι 9 ήταν

γυναίκες. Η αξιολόγηση του άγχους κατάστασης (STAI) (Laux ,1981) και του άγχους λόγω σήραγγας (TAQ; Mühlberger and Pauli, 2000) διεξήχθη λόγω της πιθανής επίδρασης του άγχους και του φόβου στη συμπεριφορά εκκένωσης. Επιπλέον, η μελέτη αξιολόγησε την εμφάνιση παρουσίας, η οποία αναφέρεται στην αίσθηση της πλήρους δέσμευσης στο περιβάλλον εικονικής πραγματικότητας, και της ασθένειας του προσομοιωτή, η οποία περιλαμβάνει συμπτώματα ναυτίας και ζάλης που προκύπτουν από τη βύθιση σε περιβάλλον εικονικής πραγματικότητας. Το ερωτηματολόγιο παρουσίας ομάδας (IPQ; Schubert, 2003) και το ερωτηματολόγιο ασθένειας προσομοιωτή (SSQ; Kennedy et. al., 1993) χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση αυτών των φαινομένων μετά το πείραμα.

Κατά μέσο όρο, τα άτομα που προχώρησαν προς την έξοδο κινδύνου χρειάστηκαν περίπου 34,6 δευτερόλεπτα (με τυπική απόκλιση 13,2 δευτερόλεπτα) για να φτάσουν στον προορισμό τους. Σύμφωνα με τους συγγραφείς, η σημαντική απόκλιση συνδέεται κυρίως με την ποικιλομορφία των διαδρομών που ακολούθησαν οι συμμετέχοντες κατά τη δοκιμή εκκένωσης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 21. Μια ολοκληρωμένη παρακολούθηση της χωρικής θέσης των συμμετεχόντων διενεργήθηκε με συχνότητα κάθε 0,016 δευτερόλεπτα.



Εικόνα 21 Αναπαράσταση της ποικιλομορφίας των διαδρομών

Η μελέτη περιλαμβάνει μια σύγκριση μεταξύ μιας υποθετικής διαδρομής αναφοράς, η οποία αντιπροσωπεύει τις υποκείμενες υποθέσεις ενός μοντέλου εκκένωσης, και των διαδρομών ταξιδιού που λαμβάνονται από πειράματα VR. Αυτός ο τύπος σύγκρισης είναι επωφελής για τη διεξαγωγή μελετών επικύρωσης μοντέλων εκκένωσης.

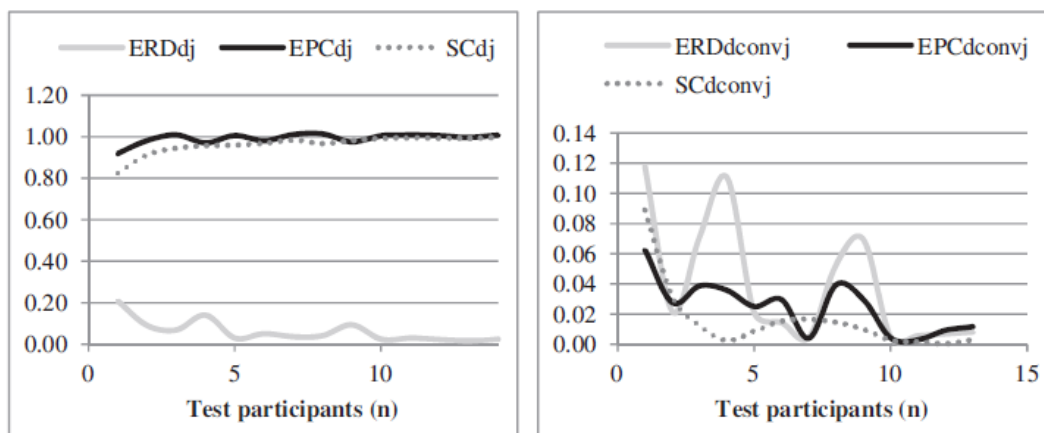
Η παρούσα μελέτη χρησιμοποιεί μια διαδρομή αναφοράς που προϋποθέτει σταθερή ταχύτητα βαδίσματος 1,25 m/s μεταξύ των επιβατών, οι οποίοι αναμένεται να διασχίσουν τη συντομότερη δυνατή διαδρομή. Σύμφωνα με αυτή την υπόθεση, εκτιμάται ότι ένα άτομο θα χρειαζόταν 30,3 δευτερόλεπτα για να διανύσει μια απόσταση 37,9 μέτρων (δηλαδή την ελάχιστη απόσταση από το σημείο εκκίνησης μέχρι την έξοδο κινδύνου) και να φτάσει στην έξοδο κινδύνου. Η χρήση αυτής της διαδρομής αναφοράς έχει εφαρμοστεί λόγω της επικρατούσας χρήσης της υπόθεσης της συντομότερης διαδρομής στην προσομοίωση της ανθρώπινης κίνησης στα μοντέλα εκκένωσης (Kuligowski et. al., 2010). Η ταχύτητα με την οποία τα άτομα διασχίζουν το μονοπάτι αναφοράς καθορίζεται από τη συσχέτιση που χρησιμοποιείται στο μοντέλο εκκένωσης για την μίμηση της ανθρώπινης κινητικότητας σε συνθήκες καπνού, όπως περιγράφεται σε μια μελέτη που περιλαμβάνει ενήλικα άτομα (Ronchi et. al., 2013).

Αυτή η εργασία παρουσιάζει ένα ενδεικτικό παράδειγμα διερεύνησης της χρονικής μετατόπισης των υποκειμένων της δοκιμής και της αληθοφάνειας προσέγγισης των κινήσεών τους με μια θεωρητική τροχιά αναφοράς, όπως συνήθως τίθεται από τα μοντέλα εκκένωσης. Όσον αφορά την εκκένωση της σήραγγας, η ανάλυση των συντεταγμένων των επιβαινόντων μπορεί να βοηθήσει στην αξιολόγηση του εάν η επιλεγμένη διαδρομή αναφοράς είναι ικανή όχι μόνο να εκτιμήσει συγκρίσιμες διάρκειες εκκένωσης αλλά και να προσεγγίσει τη θέση των επιβατών σε όλη τη σήραγγα. Αυτό έχει μεγάλη σημασία, καθώς επιτρέπει την έμμεση εκτίμηση της έκθεσης των επιβατών σε κίνδυνο, ιδίως της εγγύτητάς τους στην πηγή της πυρκαγιάς.

Η τρέχουσα έρευνα χρησιμοποιεί χειριστές εμπνευσμένους από τη θεωρία λειτουργικής ανάλυσης για να εξετάσει τη χρονική εξέλιξη της απόστασης από την έξοδο κινδύνου κατά μήκος των διαδρομών εκκένωσης της σήραγγας. Εκτελείται ο υπολογισμός της σύγκλισης των συντεταγμένων που αντιπροσωπεύουν τις διαδρομές ταξιδιού προς το μέσο όρο. Η εξέταση της σύγκλισης επιτρέπει την αξιολόγηση της επάρκειας του χρησιμοποιούμενου μεγέθους δείγματος για την αναπαράσταση των μέσων συντεταγμένων των τροχιών μετακίνησης. Καθιερώθηκε ένα όριο σύγκλισης για το διαδοχικό συνολικό δείγμα των επιβατών, με κριτήριο 10% σε μια ομάδα 5 συμμετεχόντων.

Τα κριτήρια επιλέχθηκαν με βάση διάφορες εκτιμήσεις, συμπεριλαμβανομένου του εύρους ανάλυσης, που σχετίζεται με την αξιολόγηση της απόστασης εξόδου κινδύνου με την πάροδο του χρόνου, του σεναρίου εκκένωσης, που περιλαμβάνει μια σήραγγα, και των πιθανών αβεβαιοτήτων που σχετίζονται με τις τεχνικές συλλογής δεδομένων. Με βάση τους παράγοντες που περιγράφονται παραπάνω, οι συγγραφείς υποστηρίζουν ότι οι επιλεγμένες τιμές για τα κατώφλια είναι επαρκείς για να επιτρέψουν μια αρχική ποσοτική αξιολόγηση των διαδρομών ταξιδιού με εύλογο επίπεδο ακρίβειας. Είναι σημαντικό να αναγνωριστεί ότι η επιλογή των κριτηρίων αποδοχής για τη δοκιμή σημαντικότητας πραγματοποιείται συνήθως με συγκρίσιμο τρόπο.

Ο υπολογισμός των μέτρων σύγκλισης πραγματοποιείται με σκοπό τον προσδιορισμό της απόστασης από την έξοδο κινδύνου των διαδρομών εκκένωσης εικονικής πραγματικότητας. Η Εικόνα 22 δείχνει τις τιμές των μέτρων σύγκλισης. Τα μέτρα σύγκλισης έχουν το καθένα ικανοποιήσει τα αντίστοιχα κριτήρια σύγκλισης. Το μέγεθος του δείγματος που χρησιμοποιήθηκε και στα δύο πειράματα κρίνεται



επαρκές για να ικανοποιήσει το κριτήριο αποδοχής του 10%.

Εικόνα 22 Οι τιμές των μέτρων σύγκλισης

9. Ανασκόπηση και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στην παρούσα βιβλιογραφική έρευνα διερευνήσαμε τις παραμέτρους που έχουν μελετηθεί κατά καιρούς σχετικά με την εκκένωση χώρων. Από το σύνολο των εργασιών που παρουσιάσαμε επτά μελέτες ασχολήθηκαν με παραμέτρους σχετικά με το χρόνο πριν την εκκένωση καθώς αυτός αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα για την ασφάλεια και την αποδοτικότητα των σχεδίων διαφυγής. Δεκαέξι μελέτες επικεντρώθηκαν στην ταχύτητα εκκένωσης των χώρων, εστιάζοντας στην επίδραση διαφορετικών παραγόντων σε αυτή. Αναφορικά με τα υπόγεια κτίρια, ο αριθμός των μελετών που παρουσιάστηκαν ήταν δέκα, όπου και εκεί μελετήθηκαν η επαναστατική τεχνολογία της επαυξημένης πραγματικότητας καθώς και της εικονικής πραγματικότητας.

Στις μελέτες που παρουσιάστηκαν γίνεται φανερό ότι τα χαρακτηριστικά των ατόμων έχουν ληφθεί υπόψη και στο χρόνο εκκένωσης αλλά και στην ταχύτητα εκκένωσης. Με τον όρο χαρακτηριστικά των ατόμων είδαμε να μελετάται ουσιαστικά η σωματοδομή μέσα από το Δείκτη Μάζας Σώματος. Δεν παρατηρήθηκε καμία μελέτη σχετικά με τις παραμέτρους που επηρεάζουν μια ασφαλή και έγκαιρη εκκένωση των χώρων σε άτομα με ειδικές ανάγκες. Με δεδομένο ότι ως κοινωνία οφείλουμε να υποστηρίζουμε το δικαίωμα στη λειτουργικότητα, την αυτονομία και την ασφάλεια όλων των ατόμων θεωρούμε αυτό το πεδίο χρήζει έρευνας.

Ένα πολύ ικανό και αποτελεσματικό εργαλείο για τις μελλοντικές αυτές έρευνες το οποίο μπορεί να εξασφαλίσει τόσο την επικύρωσή τους όσο και τη διάδοσή τους είναι η χρήση της εικονικής πραγματικότητας. Ο απόλυτος καθορισμός των συνθηκών και η παραμετροποίηση κάθε πειράματος μπορεί να εξασφαλίσει τη σάρωση πολλών αναγκαίων πεδίων, οδηγώντας με τον τρόπο αυτό την επιστημονική κοινότητα σε πιο τεκμηριωμένα αποτελέσματα.

Βιβλιογραφία

- An EH, Kang SJ, Lee KH. A characteristic analysis of spatial choice and preference in transition space and movement pattern in large-scale underground shopping environment. *Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design* 2004;20(9):21e8
- Andrée K., M. Kinateder, D. Nilsson, *Immersive Virtual Environment as a Method to Experimentally Study Human Behaviour in Fire*, Royal Holloway College, Nr Windsor, UK, 2013.
- Boyce KE, Shields TJ, Silcock GWH. Toward the characterization of building occupancies for fire safety engineering: capabilities of disabled people moving horizontally and on an incline. *Fire Technology* 1999; 35:51e67.
- British Standard Institute, PD 7974-6:2004 *The application of fire safety engineering principles to fire safety design of buildings: Part 6: Human factors: Life safety strategies - Occupant evacuation, behaviour and condition*, 2004.
- Bryan J., *Behavioral Response to Fire and Smoke*, in: J.D. DiNenno, E. Al. (Eds.), *SFPE Handb. Fire Prot. Eng.* 3th Ed., National Fire Protection Association, 2002: p. 3.315-3.341.
- Canter D., J. Breaux, Jonathan Sime., *Domestic, Multiple Occupancy and Hospital Fires*, in: D. Canter (Ed.), *Fires Hum. Behav.*, John Wiley & Sons, New York, 1980: pp. 117–136.
- Capote, J. A. et al., 2012. *Children Evacuation: Empirical Data and Egress Modelling*. s.l., s.n.
- Carmigniani, J. et al. (2011) ‘Augmented reality technologies, systems and applications’, *Multimedia Tools, and Applications*. Springer US, 51(1), pp. 341–377. doi: 10.1007/s11042-010-0660-6.
- Carvel R., A. Beard, *The Handbook of Tunnel Fire Safety*, Thomas Telford, London (2005) 514
- Chen, J.; Wang, J.; Wang, B.; Liu, R.; Wang, Q. An experimental study of visibility effect on evacuation speed on stairs. *Fire Saf. J.* 2018, 96, 189–202. [CrossRef]

- Cosma, G., Ronchi, E. and Nilsson, D. (2016) ‘Way-finding lighting systems for rail tunnel evacuation: A virtual reality experiment with Oculus Rift®’, *Journal of Transportation Safety & Security*. Taylor & Francis, 8(sup1), pp. 101–117. doi: 10.1080/19439962.2015.1046621.
- Fahy R.F, G. Proulx, toward creating a database on delay times to start evacuation and walking speeds for use in evacuation modeling, in: *Second Int. Symp. Hum. Behav. Fire*, 2001.
- Frantzich H. Occupant behaviour and response time e results from evacuation experiments. In: *Proceeding of 2nd international symposium on human behaviour in fire*, Boston, USA; 2001. p. 159e65
- Fridolf K., E. Ronchi, D. Nilsson, H. Frantzich, Movement speed and exit choice in smoke-filled rail tunnels, *Fire Saf. J.* 59 (2013) 8–21.
- Fridolf K., D. Nilsson, H. Frantzich, Fire evacuation in underground transportation systems: a review of accidents and empirical research, *Fire Technol.* 49 (2) (2011) 451–475
- Fridolf, K.; Nilsson, D.; Frantzic, H.; Ronchi, E.; Arias, S. Walking Speed in Smoke: Representation in Life Safety Verifications. In *Proceedings of the 12th International Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods Conference*, Oahu, HI, USA, 23–27 April 2018.
- Gamberini L., P. Cottone, A. Spagnolli, D. Varotto, G. Mantovani, Responding to a fire emergency in a virtual environment: different patterns of action for different situations, *Ergonomics* 46 (8) (2003) 842–858.
- Gwynne S.M.V., E.D. Kuligowski, K.E. Boyce, D. Nilsson, A.P. Robbins, R. Lovreglio, J.R. Thomas, A. Roy-Poirier, Enhancing egress drills: Preparation and assessment of evacuee performance, *Fire Mater.* (2017). doi:10.1002/fam.2448.
- Gwynne S.M.V., K.E. Boyce, Representing egress data for engineers, in: *Interflam 2016*, 2016.
- Gyu-Yeob Jeon, Ju-Young Kim, Won-Hwa Hong, Godfried Augenbroe. Evacuation performance of individuals in different visibility conditions *Building and Environment* 46 (2011) 1094e1103

- Hoskins B.L., J.A. Milke, Differences in measurement methods for travel distance and area for estimates of occupant speed on stairs, *Fire Saf. J.* 48 (2012) 49–57.
- Jeon GY, Hong WH. An experimental study on how phosphorescent guidance equipment influences on evacuation in handicapped visibility. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 2009; 22:934e42.
- Jin, T. Studies on Human Behavior and Tenability In Fire Smoke. *Fire Saf. Sci.* 1997, 5, 3–21. [CrossRef]
- Kady RA, Davis J. The effect of occupant characteristics on crawling speed in evacuation. *Fire Safety Journal* 2009; 44:451e7.
- Kinateder M., P. Pauli, M. Müller, J. Krieger, F. Heimbecher, I. Rönnau, et al., Human behaviour in severe tunnel accidents: effects of information and behavioural training, *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.* 17 (2013) 20–32.
- Kinateder, M., Ronchi, E., Nilsson, D., Kobes, M., Müller, M., Pauli, P. & Mühlberger, A. Virtual Reality for Fire Evacuation Research. In *1st Complex Events and Information Modelling at the 2014 Federated Conference on Computer Science and Information Systems*, (pp. 319 – 327), Warsaw, Poland.
- Kiyono, J.; Mori, N. Simulation for Emergency Evacuation Behavior During a Disaster by Use of Elliptic Distinct Elements. In *13th World Conference on Earthquake Engineering*; WCEE: Vancouver, BC, Canada, 2004.
- Kobes M., I. Helsloot, B. de Vries, J.G. Post, Building safety and human behaviour in fire: A literature review, *Fire Saf. J.* 45 (2010) 1–11. doi: 10.1016/j.firesaf.2009.08.005
- Kobes M., I. Helsloot, B. de Vries, J.G. Post, N. Oberijé, K. Groenewegen, Way finding during fire evacuation; an analysis of unannounced fire drills in a hotel at night, *Build. Environ.* 45 (3) (2010) 537–548.
- Kobes, M.; Helsloot, I.; de Vries, B.; Post, J. Exit choice, (pre-)movement time and (pre-) evacuation behaviour in hotel fire evacuation—Behavioural analysis and validation of the use of serious gaming in experimental research. *Procedia Eng.* 2010, 3, 37–51. [CrossRef]

- Kuligowski E., Predicting Human Behavior During Fires, *Fire Technol.* 49 (2013) 101–120. doi:10.1007/s10694-011-0245-6.
- Kuligowski E.D., Human behavior in fire, in: *SFPE Handb. Fire Prot. Eng.*, Springer, 2016: pp. 2070–2114.
- Kuligowski E.D., R.D. Peacock, B.L. Hoskins, A Review of Building Evacuation Models, 2nd Edition-Technical Note (NIST TN) - 1680, Gaithersburg, 2010.
- Kuligowski E.D., R.D. Peacock, J.D. Averill, Modeling the Evacuation of the World Trade Center Towers on September 11, 2001, *Fire Technol.* 49 (2011) 65–81. doi:10.1007/s10694-011-0240-y.
- Lee D, Kim H, Park JH, Park BJ. The current status and future issue in human evacuation from ships. *Safety Science* 2003; 41:861e76.
- Li YQ. Building fire protection engineering. Beijing: Chemistry Industry Press; 2004.
- Lindell M.K., R.W. Perry, The Protective Action Decision Model: Theoretical Modifications and Additional Evidence, *Risk Anal.* 32 (2012) 616–632. doi:10.1111/j.1539-6924.2011.01647.x.
- Lovreglio, R. (2016) Modelling Decision-Making in Fire Evacuation based on the Random Utility Theory. Politecnico of Bari, Milan and Turin. doi: 10.13140/RG.2.1.1695.5281/1.
- Lovreglio, R. et al. (2017) ‘Enhancing earthquake evacuee safety by using virtual reality serious games’, in *Lean & Computing in Construction Congress (LC3) 2017*
- Lovreglio, R. et al. (2018) ‘Prototyping Virtual Reality Serious Games for Earthquake Preparedness: the Auckland City Hospital Case Study’, under review.
- Lovreglio, R., Ronchi, E. and Nilsson, D. (2015a) ‘A model of the decision-making process during pre-evacuation’, *Fire Safety Technology*. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2015.07.001>.
- Lovreglio, R., Ronchi, E. and Nilsson, D. (2016) ‘An Evacuation Decision Model based on perceived risk, social influence and behavioural uncertainty’, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 66(April), pp. 226–242. doi: 10.1016/j.simpat.2016.03.006.

- McConnell N.C., K.E. Boyce, J. Shields, E.R. Galea, R.C. Day, L.M. Hulse, The UK 9/11 evacuation study: Analysis of survivors' recognition and response phase in WTC1, *Fire Saf. J.* 45 (2010) 21–34. doi: 10.1016/j.firesaf.2009.09.001.
- Nelson, H.E.; Mowrer, F.W. Emergency Movement. In *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*; NFPA: Quincy, MA, USA, 2002; pp. 367–380.
- Nilsson D., Exit choice in fire emergencies: influencing choice of exit with flashing lights, Dept. of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University, Lund, Sweden, 2009.
- Nilsson D., M. Johansson, H. Frantzich, Evacuation experiment in a road tunnel: A study of human behaviour and technical installations, *Fire Saf. J.* 44 (4) (2009) 458–468.
- Olander, J. et al. (2017) 'Dissuasive exit signage for building fire evacuation', *Applied Ergonomics*, 59, pp. 84–93.
- Peacock, R.D.; Hoskins, B.L.; Kuligowski, E.D. Overall and Local Movement Speeds During Fire Drill Evacuations in Buildings up to 31 Stories. In *Pedestrian and Evacuation Dynamics*; Springer: Gaithersburg, MD, USA, 2011; pp. 25–35.
- Purser D.A. Application of human behaviour and toxic hazard analysis to the validation of CFD modelling for the Mont Blanc Tunnel fire incident. Santander, Spain: in: Capote, J. et al.; 2009. pp. 23–57.
- Ronchi E., M. Kinsey. Evacuation models of the future: Insights from an online survey on user's experiences and needs. Santander, Spain: Capote, J. et al.; 2011. p. 145–155.
- Ronchi E., P. Colonna, J. Capote, D. Alvear, N. Berloco, A. Cuesta, The evaluation of different evacuation models for assessing road tunnel safety analysis, *Tunn. Undergr. Space Technol.* 30 (2012) 74–84.
- Ronchi E., P.A. Reneke, R.D. Peacock, A method for the analysis of behavioural uncertainty in evacuation modelling, *Fire Technol.* 50 (2014) 1545–1571 (Available from) <http://dx.doi.org/10.1007/s10694-013-0352-7>.
- Ronchi, E. et al., 2012. The evaluation of different evacuation models for assessing road tunnel safety analysis. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 30, pp. 74–84.

- Ronchi, E.; Fridolf, K.; Frantzich, H.; Nilsson, D.; Walter, A.L.; Modig, H. A tunnel evacuation experiment on movement speed and exit choice in smoke. *Fire Saf. J.* 2018, 97, 126–136. [CrossRef]
- Ronchi, E.; Norén, J.; Delin, M.; Kuklane, K.; Halder, A.; Arias, S.; Fridolf, K. Ascending Evacuation in Long Stairways: Physical Exertion, Walking Speed and Behaviour—Report 3192; Lund University: Lund, Sweden, 2015.
- Seike, M.; Kawabata, N.; Hasegawa, M. Experiments of evacuation speed in smoke-filled tunnel. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 2016, 53, 61–67. [CrossRef]
- Seike, M.; Kawabata, N.; Hasegawa, M.; Chi, L.Y. Evacuation speed distribution in smoke filled full-scale tunnel experiments. Proceedings of the 8th International Conference Tunnel Safety and Ventilation—New Developments in Tunnel Safety, Graz, Austria, 25–26 April 2016
- Sherman M.F., M. Peyrot, L.A. Magda, R.R.M. Gershon, Modeling pre-evacuation delay by evacuees in World Trade Center Towers 1 and 2 on September 11, 2001: A revisit using regression analysis, *Fire Saf. J.* 46 (2011) 414–424. doi: 10.1016/j.firesaf.2011.07.001.
- Shi L, Xie Q, Cheng X, Chen L, Zhou Y, Zhang R. Developing a database for emergency evacuation model. *Building and Environment* 2009; 44:1724e9
- Shi L., Q. Xie, X. Cheng, L. Chen, Y. Zhou, R. Zhang, Developing a database for emergency evacuation model, *Build. Environ.* 44 (2009) 1724–1729. doi: 10.1016/j.buildenv.2008.11.008.
- Thompson PA, Marchant EW. A computer model for the evacuation of large building populations. *Fire Safety Journal* 1995; 24:131e48.
- Wagner, D. and Schmalstieg, D. (2009) ‘History and Future of Tracking for Mobile Phone Augmented Reality’, in 2009 International Symposium on Ubiquitous Virtual Reality. IEEE, pp. 7–10. doi: 10.1109/ISUVR.2009.11.
- Wang, W. & Lo, T. J., 2014. A Simulation Study on Passenger Escape in Rail Tunnels. *Procedia Engineering*, Volume 71, pp. 552-557.
- Xie, R.; Pan, Y.; Zhou, T.; Ye, W. Smart safety design for fire stairways in underground space based on the ascending evacuation speed and BMI. *Saf. Sci.* 2020, 125, 104619. [CrossRef]

- Yeo SK, He Y. Commuter characteristics in mass rapid transit in Singapore. *Fire Safety Journal* 2009;44(2):183e91.
- Yosritzal; Kemal, B.M.; Purnawan; Putra, H. An observation of the walking speed of evacuees during a simulated tsunami evacuation in Padang, Indonesia. In *Proceedings of the 4th International Conference on Civil and Environmental Engineering for Sustainability (IConCEES 2017)*, Langkawi, MA, USA, 4–5 December 2017
- Zhenan Feng et al. (2018) *Immersive Virtual Reality Serious Games for Evacuation Training and Research: A Systematic Review - Working Paper*
- Ronchi E., Nilsson D., Gwynne S.M.V., *Modelling the Impact of Emergency Exit Signs inTunnels,Fire Technol.*48(4) (2012) 961–988.
- RABT. *Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (Guidelines for design and Operation of road tunnels)* [in German].*Forschungsgesellschaft für strassen-und verkehrswesen arbeitsgruppe verkehrsführung und verkehrssicherheit*; 2006.
- Jin. T. *Visibility and Human Behavior in Fire Smoke. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (thirded.)*. Di Nenno P. Quincy, MA (USA): National Fire ProtectionAssociation;2008.p.2–42–2–53.
- Laux L.,Spielberger C.D, *State-Trait-Angstinventar, Beltz Test, Weinheim, Germany,1981*.
- Mühlberger A., Pauli P., *Tunnelangstfragebogen (TAF) [Tunnel Anxiety Questionnaire: short-description and questionnaire]*, Leibniz Institute for Psychology Information, Trier, Germany, 2000.
- Schubert T.W., *The sense of presence in virtual environments: A three-component scale measurings patial presence, involvement, and realness, ZFür Medienwiss*15(2003)69–71.
- Kennedy R.S.,Lane N.E, Berbaum K.S., Lilienthal M.G. ,*Simulator sickness questionnaire: an enhanced method for quantifying simulator sickness, Int. J. Aviat.Psychol.*3(3)(1993)203–220.
- Ronchi E., Gwynne S.M.V...,Colonna D.A.Purser P, *Representation of the impact of smoke on agent walking speeds in evacuation models, FireTechnol.*49 (2) (2013)411–431.