



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Βελτιστοποίηση σχεδίου εκκένωσης υπόγειου
χώρου διάθεσης επικίνδυνων αποβλήτων**

Νικόλαος Γκιουζέλης

Επιβλέπων:

Δ. Καλιαμπάκος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2018



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Βελτιστοποίηση σχεδίου εκκένωσης υπόγειου χώρου
διάθεσης επικίνδυνων αποβλήτων**

Νικόλαος Γκιουζέλης

Επιβλέπων:

Δ. Καλιαμπάκος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Τριμελής Επιτροπή Παρακολούθησης:

Δ. Καλιαμπάκος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Μ. Μενεγάκη, Αναπλ. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Α. Μπενάρδος, Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2018

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θέλω να εκφράσω ολόψυχα τις ευχαριστίες μου στους ανθρώπους που συνέβαλαν καθοριστικά στην ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Κατ' αρχήν, θέλω να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον διδάκτορα, συνάδελφο και από την πρώτη μέρα φίλο Τάσο Α. Καλλιανιώτη. Σε κάθε περίπτωση φέρει μεγάλο μερίδιο στο αποτέλεσμα αυτής της διπλωματικής εργασίας καθώς η κατάρτιση του και οι επιστημονικές του γνώσεις συνέβαλλαν σε τεράστιο βαθμό στην ολοκλήρωση της. Παρόλο το φόρτο και τις υποχρεώσεις του, αφιέρωσε άπλετο χρόνο για να με βοηθήσει και να με συμβουλέψει και ήταν δίπλα μου όποτε τον χρειαζόμουν.

Παράλληλα ευχαριστώ θερμά τον καθηγητή και επιβλέποντα της εργασίας κ. Δ. Καλιαμπάκο για την υποστήριξη και την καθοδήγηση του καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Η αποφασιστικότητα και η επιμονή του με παρότρυναν να βάζω συνεχώς ψηλά τον πήχη και να μην επαναπαύομαι στα εύκολα. Χωρίς την καίρια συμβολή του το εγχείρημα της εκκένωσης στον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Π.Α. δεν θα είχε πραγματοποιηθεί.

Επίσης ευχαριστώ θερμά τον καθηγητή κ. Α. Μπενάρδο για τη συνεχή διαθεσιμότητα των επιστημονικών του γνώσεων αλλά και για τη μεγάλη συμβολή που είχε στην ολοκλήρωση του πειράματος εκκένωσης στο Λαύριο. Ένα μεγάλο ευχαριστώ και στον διδάκτορα κ. Θ. Μαυρίκο για όλες τις φορές που αφού του χτύπαγα την πόρτα γεμάτος απορίες, έφευγα με ανακούφιση και χαμόγελο.

Οφείλω ένα ευχαριστώ σε όλους τους συναδέλφους και φίλους που συμμετείχαν στο πείραμα εκκένωσης του υπόγειου χώρου στο Τ.Π.Π.Α.. Στην ομάδα Mott & MacDonald και Thunderhead Engineering, για την παροχή εκπαιδευτικής άδειας χρήσης της πλατφόρμας STEPS και Pygosis αντίστοιχα, καθώς και στο ανθρώπινο δυναμικό τους για την άριστη και άμεση συνεργασία όποτε αυτό υπήρξε αναγκαίο.

Θέλω να ευχαριστήσω θερμά το Νίκο, το Γιώργο, τη Μίνα, τη Δέσποινα που έκαναν το χώρο του εργαστηρίου το ιδανικό μέρος απόδρασης από την καθημερινότητα. Το φίλο και πολλές φορές συμπαίκτη Μωυσή για τη διάθεση των επιστημονικών του γνώσεων και καταρτίσεων αλλά και για τις πολλές στιγμές γέλιου και χαβαλέ. Τους φίλους, συντρόφους και συνάδελφους Γιάννη Δ. και Δημήτρη για τις εμπειρίες ζωής που μοιραστήκαμε μαζί τόσο στα αμφιθέατρα όσο και στο δρόμο τα τελευταία 7 χρόνια. Στον φίλο μου Γιάννη Π. οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ για όλα αυτά που περάσαμε μαζί, τις στιγμές που "ντύθηκε" μεγάλος αδελφός μου και για το "μικρόβιο" της ενασχόλησης με τα κοινά που μου μετέδωσε. Ευχαριστώ τη μητέρα μου για την έμπρακτη βοήθεια και στήριξη της σε όλη τη σταδιοδρομία μου. Τη Τζο για τη στήριξη, κατανόηση και για τις πάντα ευχάριστες επισκέψεις της στο εργαστήριο της 2.24.

Τέλος ευχαριστώ από καρδιάς όλους τους συντρόφους του Α.Χ.Μ.ΜΕΤ., μεγαλύτερους και νεότερους, για τους αγώνες που δώσαμε και θα δώσουμε και για τις στιγμές που πιασμένοι χέρι-χέρι αντιμετωπίσαμε κάθε πρόκληση χωρίς φόβο. Για τις ξεχωριστές στιγμές που ζήσαμε αυτά τα χρόνια και για το διαρκή αγώνα για μια καλύτερη κοινωνία. Τους ευχαριστώ που μου έμαθαν να σκέφτομαι συλλογικά και να ενδιαφέρονμαι για το συνάνθρωπο μου. Μα προπαντός τους ευγνωμονώ που έκαναν τη φοιτητική μου ζωή να μην μοιάζει καθόλου με φοιτητική.

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα

A. Εισαγωγή.....	1
A.1. Υπόγειοι χώροι.....	1
A.1.1. Παραδείγματα υπόγειων χώρων.....	4
A.1.2. Ο υπόγειος χώρος του Λαυρίου.....	6
A.2. Ασφάλεια υπόγειων χώρων.....	7
A.3. Η μεταλλευτική δραστηριότητα του αρχαίου Λαυρίου.....	8
A.4. Νεότερη ιστορία των μεταλλείων του Λαυρίου.....	14
B. Εκκένωση εγκαταστάσεων σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης.....	17
B.1. Σχεδιασμός της εκκένωσης.....	18
B.1.1. Οδεύσεις διαφυγής.....	18
B.1.2. Διαδικασία εκκένωσης.....	20
B.1.2.1. Προσδιορισμός των χρόνων εκκένωσης.....	21
B.1.3. Προσδιορισμός κανονισμών εκκένωσης.....	28
B.1.3.1. Χωρητικότητα των μέσων εξόδου.....	28
B.1.3.2. Αριθμός μέσων εξόδου.....	29
B.1.3.3. Ενεργό πλάτος όδευσης διαφυγής.....	29
B.2. Μοντέλα εκκένωσης.....	31
B.3. Κίνδυνοι πυρκαγιάς και πυρασφάλεια υπογείων χώρων.....	37
B.4. Επίδραση καπνού στην υγεία του ανθρώπου.....	38
B.4.1. Κλασματική Δραστική Δόση (ΚΔΔ) – Fractional Effective Dose (FED).....	43
B.5. Λογισμικά προσομοίωσης φωτιάς.....	43
Γ. Ανάλυση εκκένωσης του υπόγειου χώρου του Τ.Π.Λ.....	44
Γ.1. Υπολογισμός θεωρητικού πληθυσμού του υπόγειου χώρου.....	44
Γ.2. Υπολογισμός ικανότητας οδεύσεων διαφυγής στον υπόγειο χώρο του Λαυρίου.....	46
Γ.3. Προσομοίωση εκκένωσης στον υπόγειο χώρο στο Λαύριο μέσω του STEPS.....	53
Γ.3.1. Σχεδιασμός του υπόγειου χώρου.....	54
Γ.3.2. Εισαγωγή βασικών παραμέτρων εκκένωσης.....	57
Γ.3.3. Προσομοίωση της εκκένωσης στο STEPS.....	61
Γ.4. Ανάλυση σεναρίων φωτιάς στον υπόγειο χώρο του Λαυρίου.....	64
Γ.4.1. Εφαρμογή του Pyrosim στον υπόγειο χώρο του Λαυρίου.....	68
Γ.4.2. Ανάλυση αποτελεσμάτων προσομοίωσης φωτιάς.....	71
Γ.4.2.1. 1 ^ο Σενάριο – Φωτιά σε ηλεκτροκίνητο μηχάνημα εκφόρτωσης.....	72
Γ.4.2.2. 1 ^ο Σενάριο – Φωτιά σε ηλεκτροκίνητο μηχάνημα εκφόρτωσης με ενεργοποιημένο σύστημα τεχνητού αερισμού.....	77

Γ.4.2.3. 2 ^ο Σενάριο – Φωτιά στα γραφεία του υπόγειου χώρου του Τ.Π.Π.Λ.....	83
Γ.4.2.4. Συγκριτική ανάλυση σημειακών συσκευών μέτρησης	87
Γ.4.3. Επίδραση φωτιάς στην εκκένωση του υπόγειου χώρου του Τ.Π.Π.Λ.....	93
Δ. Πείραμα εκκένωσης στο Λαύριο.....	98
Δ.1. Σχεδιασμός πειράματος και καθορισμός παραμέτρων.....	98
Δ.2. 1 ^η Δοκιμή εκκένωσης	100
Δ.3. 2 ^η Δοκιμή εκκένωσης	101
Δ.4. 3 ^η Δοκιμή εκκένωσης	103
Δ.5. Ανάλυση αποτελεσμάτων πειράματος	104
Ε. Συμπεράσματα	107
Ζ. Βιβλιογραφία.....	109

Περίληψη

Το αντικείμενο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας υπήρξε ο τομέας της ασφάλειας και η διαδικασία εκκένωσης του υπόγειου χώρου του Τεχνολογικού Πολιτιστικού Πάρκου Λαυρίου (Τ.Π.Π.Λ.). Η εγκατάσταση αυτή ολοκληρώθηκε το 2010 με σκοπό να γίνει χώρος αποθήκευσης ρυπασμένων εδαφών και αποβλήτων που προέρχονται από παλαιότερες μεταλλευτικές δραστηριότητες της περιοχής του Λαυρίου.

Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας αφού έγινε μια εκτενής περιγραφή εκείνων των στοιχείων και παραμέτρων που καθορίζουν τη διαδικασία της εκκένωσης, πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός της εκκένωσης του υπό μελέτη υπόγειου χώρου βάση των εγχώριων και διεθνών κανονισμών ασφαλείας. Στην συνέχεια, έγινε η μοντελοποίηση της εκκένωσης του υπόγειου χώρου του Τ.Π.Π.Λ. μέσω του λογισμικού προσομοίωσης STEPS. Με τη βοήθεια του συγκεκριμένου λογισμικού πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για διαφορετικά σενάρια με μεταβλητές παραμέτρους τον πληθυσμό των χρηστών του χώρου και τη διαθεσιμότητα των εξόδων διαφυγής με σκοπό τον προσδιορισμό του απαιτούμενου χρόνου εκκένωσης.

Έχοντας αναγνωρίσει την περίπτωση εκδήλωσης πυρκαγιάς μια από τις πιο συνήθεις και ταυτόχρονα επικίνδυνες περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης, κρίθηκε αναγκαία η προσομοίωση δύο πιθανών σεναρίων φωτιάς στον υπό μελέτη υπόγειο χώρο. Αυτό επιτεύχθηκε μέσω του λογισμικού Pyrosim το οποίο όχι μόνο προσομοιάζει με οπτικό τρόπο την εκδήλωση και την εξέλιξη της φωτιάς στο χώρο, αλλά δίνει και τη δυνατότητα στον χρήστη να υπολογίσει ορισμένα κρίσιμα μεγέθη που επηρεάζουν την ανθρώπινη ασφάλεια και υγεία κατά την εκκένωση (συγκέντρωση μονοξειδίου του άνθρακα, θερμοκρασία περιβάλλοντος χώρου, ορατότητα).

Επιπλέον, εισάγοντας τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των δύο σεναρίων φωτιάς στο λογισμικό STEPS καταφέραμε να δείξουμε οπτικά το πώς επηρεάζει η εκδήλωση φωτιάς την εκκένωση του υπόγειου χώρου μέσω κυρίως της μεταβολής της ταχύτητας κίνησης των ενοίκων. Έπειτα, ακολούθησε ο προσδιορισμός και η σύγκριση των νέων απαιτούμενων χρόνων εκκένωσης με τους αντίστοιχους χωρίς την παρουσία φωτιάς.

Κατά την εκπόνηση αυτής της εργασίας, ολοκληρώθηκε ένα απαιτητικό και δύσκολο εγχείρημα που περιλάμβανε τη διεξαγωγή ενός πειράματος εκκένωσης υπόγειου χώρου σε πραγματικό χρόνο. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν τρεις δοκιμές εκκένωσης του υπόγειου χώρου του Τ.Π.Π.Λ., δύο εκ των οποίων προσομοίαζαν συνθήκες πυρκαγιάς μέσω της παρουσίας τεχνητού καπνού, στις οποίες συμμετείχαν σαράντα εθελοντές. Για κάθε δοκιμή προσδιορίστηκε ο χρόνος εκκένωσης και η ταχύτητα κίνησης του κάθε συμμετέχοντα στα επιμέρους στοιχεία των οδεύσεων διαφυγής του υπό μελέτη χώρου, μέσω βίντεο από κάμερες που τοποθετήθηκαν σε όλο το χώρο. Τελικά, έγινε η σύγκριση τόσο των πειραματικών χρόνων εκκένωσης με αυτούς που προέκυψαν για αντίστοιχες δοκιμές στο STEPS, όσο και των πειραματικών ταχυτήτων κίνησης των ενοίκων με αυτές που υπαγορεύουν οι διεθνείς κανονισμοί.

Abstract

The subject of this dissertation was the domain of safety and procedure of the evacuation of the subterranean space of Lavrion Technological Cultural Park (LTCP). This installation was completed in 2010 in order to become a depository of contaminated soils and waste derived from earlier mining activities in Lavrio region.

After having described thoroughly the elements and factors that determine the evacuation procedure, we planned the evacuation of this specific underground space based on the internal and international safety regulations. Later on, we modeled the evacuation via STEPS, an evacuation simulating software. STEPS enabled us to perform several simulations that varied from the number of occupants to the availability of the means of egress, in order to define the required evacuation time in each occasion.

Having recognized fire as one of the most usual and perilous emergencies, simulating two different possible fire scenarios in the subterranean space of LTCP was necessary. This task was achieved via Pyrosim, which is a Fire Dynamics Simulator (FDS), not only simulating fire breakout and progression, but also providing the user with the capability of calculating certain crucial parameters for human health and safety (concentration of carbon monoxide, high temperatures, visibility) during the evacuation.

Moreover, by inputting the simulation results of both fire scenarios in the STEPS software, we managed to visualize the influence of fire on the evacuation of the underground space of LTCP which mainly had to do with the alteration of occupants' walking speed. Then, we defined the new required evacuation times and compared them with the respective times without the presence of fire.

During the fulfillment of this thesis, a crucial and challenging task was completed. More precisely, forty volunteers participated in a large-scale experiment that involved the evacuation of the subterranean space of LTCP in real time. Three distinct evacuation trials took place, two of which simulated fire conditions via the presence of dense artificial smoke. For each single trial we estimated the required evacuation time as well as the walking speed of each occupant. The movement of each individual was monitored by several cameras installed all around the underground space. Moving towards the end, we compared both the experimental evacuation times with those that resulted from the respective simulations in STEPS, and the calculated walking speeds of the Lavrion experiment with those that the international regulations prescribe.

A. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο γίνεται εκτενής αναφορά στους υπόγειους χώρους, απαριθμώντας μεταξύ άλλων τις χρήσεις, τα πλεονεκτήματα τους και τις ιδιαιτερότητές τους σε σχέση με τις λοιπές εγκαταστάσεις. Στη συνέχεια γίνεται μια γενική περιγραφή του υπόγειου χώρου του Τεχνολογικού και Πολιτιστικού Πάρκου Λαυρίου (Τ.Π.Π.), ο οποίος θα μας απασχολήσει καθ' όλη τη διάρκεια αυτής της διπλωματικής. Τέλος, γίνεται μια ιστορική αναδρομή στη μεταλλευτική δραστηριότητα του Λαυρίου από την αρχαιότητα μέχρι σήμερα.

A.1. Υπόγειοι χώροι

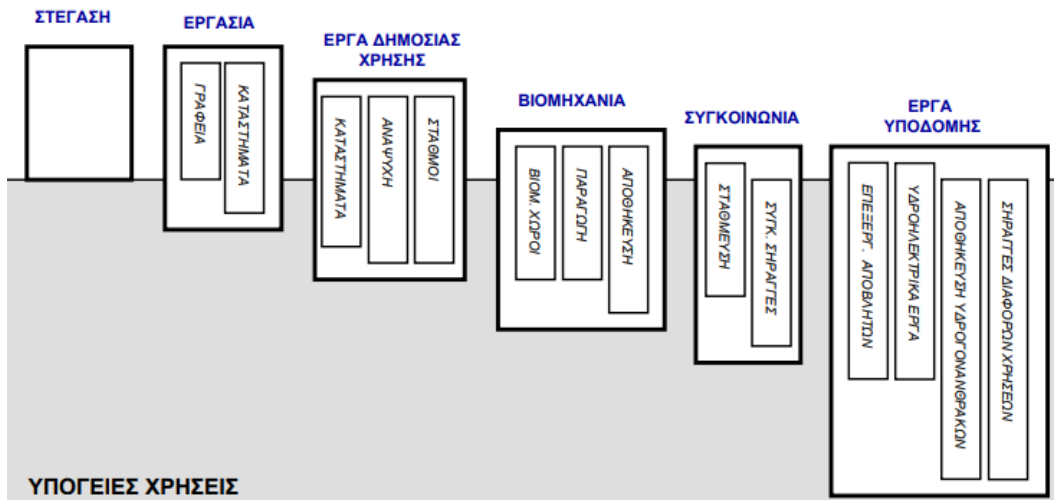
Εξ ορισμού, ο υπόγειος χώρος είναι ένα κοίλωμα αρκετά μεγάλο που έχει προκύψει από την εξαγωγή του υλικού κάτω από το έδαφος, με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε η επιφάνεια της ιδιοκτησίας δεν επηρεάζεται παρά μόνο στην περιοχή των εισόδων και των ανοιγμάτων των αεραγωγών. Οι χώροι αυτοί μπορεί να είναι μεταβλητού μεγέθους και να έχουν ποικίλες χρήσεις αφού έχουν τροποποιηθεί κατάλληλα μέσω της υλοποίησης υπόγειων έργων (Κυρίτσης, 2010).

Ως υπόγεια έργα μπορούν να οριστούν όλες οι τεχνικές κατασκευές που πραγματοποιούνται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Διανοίγονται σε βάθη που ποικίλλουν από πολύ μικρά έως πολύ μεγάλα, πάνω ή κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα, με διαστάσεις και έκταση που κυμαίνεται αναλόγως τη χρήση τους. Η ανάπτυξη και δυναμική που εμφανίζουν τα τελευταία χρόνια τα υπόγεια έργα, τροφοδοτείται από το γενικότερο πνεύμα της αιεφόρου ανάπτυξης που καθορίζει σε στρατηγικό επίπεδο τις επιλογές του σύγχρονου κόσμου.

Η απότομη αύξηση του πληθυσμού, σε συνδυασμό με την έλλειψη του ανάλογου χωροταξικού σχεδιασμού στις αστικές περιοχές, όπου πολύ συχνά παρατηρείται το φαινόμενο έλλειψης χώρου και περιβαλλοντικών προϋποθέσεων για την ανάπτυξη ζωτικών δραστηριοτήτων, οδήγησε στην αναζήτηση εναλλακτικών λύσεων. Οι λύσεις αυτές ξεπερνούν τα παραδοσιακά έργα υποδομής και στρέφονται προς την αξιοποίηση της τρίτης διάστασης, είτε αυτή είναι η οικοδόμηση κτιριακών εγκαταστάσεων αρκετά μεγάλου ύψους είτε η δημιουργία υπόγειων κατασκευών.

Η πρώτη εναλλακτική λύση, αν και έχει κατεξοχήν χρησιμοποιηθεί, υπόκειται σε αρκετούς περιορισμούς, δεν εξασφαλίζει ευελιξία εγκατάστασης διαφόρων χρήσεων και φαίνεται πλέον να εξαντλεί τη δυναμική της κυρίως με την κάλυψη οικιστικών αναγκών. Από την άλλη πλευρά, οι υπόγειοι χώροι είναι σε θέση να καλύψουν ένα ευρύ φάσμα αναγκών και να φιλοξενήσουν χρήσεις που δεν είναι επιβεβλημένο ή αναγκαίο να βρίσκονται στην επιφάνεια του εδάφους, όπως εγκαταστάσεις συγκοινωνιακής υποδομής, χώρους στάθμευσης, αποθήκευσης αγαθών ή αποβλήτων, παραγωγή ενέργειας κ.ά.

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΧΡΗΣΕΙΣ



Εικόνα

1. Διάκριση υπογείων χρήσεων [Πηγή: (Α.Μπενάρδος, 2010)]

Η συνηθέστερη διάκριση των υπόγειων κατασκευών γίνεται με βάση τη μορφή και το σχήμα τους και παρουσιάζεται παρακάτω (Α.Μπενάρδος, 2010):

- Σήραγγες:

Είναι επιμήκη, οριζόντια ανοίγματα, με διάμετρο διατομής που μπορεί να κυμαίνεται από 1-15 m. Συνήθως έχουν μικρή κλίση, εφόσον όμως η κλίση γίνει σημαντική (10°-45°), τότε ονομάζονται κεκλιμένες στοές

- Θάλαμοι:

Είναι ανοίγματα μεγάλων διαστάσεων, το ύψος των οποίων μπορεί να ξεπερνά τα 30-35 m ενώ το πλάτος τους τα 20-25 m. Το μήκος τους συνήθως δεν ξεπερνά τα 200 -250 m.

- Φρέατα:

Είναι επιμήκη κατακόρυφα ανοίγματα, το πλάτος της διατομής των οποίων κυμαίνεται από 3-8 m ενώ το βάθος τους μπορεί να φτάνει και στα 500 m. Τα φρέατα των οποίων η κλίση είναι μικρότερη των 90° ονομάζονται κεκλιμένα φρέατα.

Στην Εικόνα 2 παρουσιάζονται στοιχεία σχετικά με το εύρος χρήσης – εφαρμογών για κάθε τύπο υπόγειου έργου.

Χρήση	Σήραγγες	Φρέατα	Θάλαμοι
<i>Συγκοινωνιακή υποδομή</i>	1. Διαβάσεις πεζών 2. Οδικές 3. Σιδηροδρομικές 4. Μετρό	1. Μεταφορά ανθρώπων 2. Υλικού φορτίου 3. Εξοπλισμού	1. Σταθμοί (π.χ. Metro) 2. Χώροι στάθμευσης
<i>Μεταφορά / απαγωγή</i>	1. Υδρορευση / άρδευση 2. Αποχέτευση 3. Αντιπλημμυρικά έργα	1. Υδρορευση / άρδευση 2. Αποχέτευση 3. Αντιπλημμυρικά έργα	
<i>Υπηρεσίες κοινής ωφέλειας</i>	Δίκτυα - Γραμμές: 1. Τηλεφώνου 2. Ηλεκτρικού 3. Ειδικές καλωδιώσεις	Πρόσβαση	Διάφοροι κόμβοι
<i>Αποθήκευση</i>	1. Διαφόρων υγρών 2. Καυσίμων 3. Αποβλήτων	1. Διαφόρων υγρών 2. Καυσίμων	1. Διαφόρων υγρών 2. Καυσίμων 3. Αποβλήτων 4. Τροφίμων 5. Κατάγλυξη προϊόντων
<i>Αναψυχή</i>			1. Πισίνες 2. Αθλητ. εγκαταστάσεις 3. Υπόγεια θέατρα
<i>Άμυνα</i>	1. Καταφύγια 2. Στρατιωτικές εγκαταστάσεις	1. Στρατιωτικές εγκαταστάσεις	1. Καταφύγια 2. Στρατιωτικές εγκαταστάσεις 3. Αποθήκευση στρατιωτικού υλικού
<i>Εκμετάλλευση κοιτασμάτων</i>	1. Αερισμός 2. Προσπέλαση 3. Μεταφορά 4. Εξόρυξη	1. Αερισμός 2. Προσπέλαση 3. Μεταφορά	1. Εξόρυξη
<i>Εκμετάλλευση υπόγειων νερών και αποστράγγιση</i>	1. Υδρομάστευση 2. Αποστράγγιση	1. Υδρομάστευση 2. Αποστράγγιση	

Εικόνα 2. Τύποι υπογείων χρήσεων [Πηγή: (Μπενάρδος, 2001)]

Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν οι υπόγειοι χώροι είναι τα εξής:

- Η υψηλή «διαθεσιμότητα» και οι μειωμένες ανάγκες για επιφανειακούς χώρους
- Η ιδιότητα της απομόνωσης-απόκρυψης που εμφανίζουν, γεγονός που οδηγεί σε αυξημένο βαθμό προστασίας
- Η υψηλή περιβαλλοντική προστασία που προσφέρουν
- Η μειωμένη επίδραση σε αυτά των ενεργών γεωλογικών φαινομένων (σεισμοί, διάβρωση-αποσάθρωση-απόθεση)

Οι υπόγειοι χώροι όμως παρουσιάζουν και ορισμένα μειονεκτήματα, τα κυριότερα των οποίων είναι:

- Τα υψηλά ποσά αρχικής επένδυσης και η αβεβαιότητα που επικρατεί για την καλή τεχνική και οικονομική λειτουργία του έργου
- Η ανθρώπινη ψυχολογία που πολλές φορές δημιουργεί φοβίες και αμφιβολίες σχετικά με τη χρήση του εκάστοτε υπόγειου χώρου

A.1.1. Παραδείγματα υπόγειων χώρων

Η αξιοποίηση του υπόγειου χώρου έχει προσφέρει αποτελεσματικές λύσεις σε ένα ευρύ φάσμα αναγκών και σε διάφορους τομείς της σύγχρονης ζωής. Οι κυριότερες χρήσεις του υπόγειου χώρου όπως καταγράφονται σε διεθνές επίπεδο, είναι (Α.Μπενάρδος, 2010):

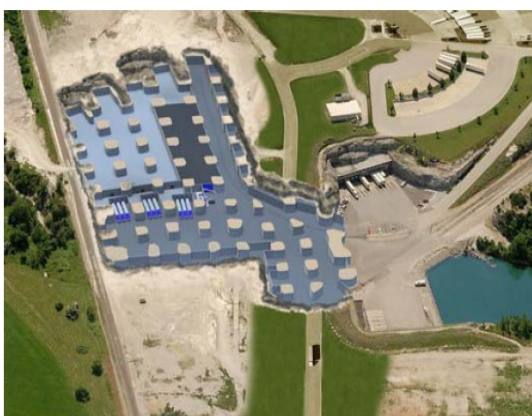
- Υπόγεια αποθηκευτικά – διαμετακομιστικά κέντρα (τροφίμων, εμπορευμάτων, αρχείων, κ.λπ.)
- Υπόγειοι χώροι στάθμευσης
- Υπόγειοι χώροι αποθήκευσης καυσίμων και φυσικού αερίου
- Υπόγειοι ενεργειακοί σταθμοί
- Υπόγειοι χώροι διάθεσης επικίνδυνων και ραδιενεργών αποβλήτων
- Υπόγειοι χώροι στρατιωτικών εφαρμογών
- Υπόγειες εγκαταστάσεις για επεξεργασία νερού και αστικών λυμάτων
- Άλλες χρήσεις υπογείων χώρων (εργαστήρια, αθλητικές εγκαταστάσεις, κ.λπ.)

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας θα εξεταστούν οι πιο συνήθεις και σημαντικές χρήσεις των υπογείων χώρων, και θα παρουσιαστούν τα σημαντικότερα παραδείγματα τους (Α.Μπενάρδος, 2010).

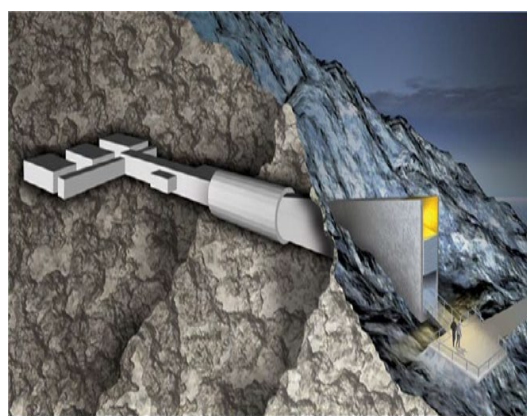
Υπόγειοι αποθηκευτικοί χώροι:

Οι υπόγειοι αποθηκευτικοί χώροι αποτελούν μία από τις πιο διαδεδομένες χρήσεις του υπεδάφους. Διαμορφώνονται κατάλληλα με τις απαραίτητες τροποποιήσεις και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποθήκευση εμπορευμάτων, τροφίμων, ακόμα και για τη φύλαξη αρχείων και δεδομένων. Τα πλεονεκτήματα των χώρων αυτών περιλαμβάνουν τις σταθερές θερμοκρασιακές συνθήκες, τη δυνατότητα επέκτασης του υπόγειου χώρου αν μεταβληθούν οι ανάγκες στο μέλλον, την αυξημένη ασφάλεια για τα προϊόντα και τους εργαζομένους λόγω της ελεγχόμενης εισόδου στον υπόγειο χώρο, καθώς και την απομόνωση του χώρου από την επιφάνεια με αποτέλεσμα την απουσία θορύβων και δονήσεων.

Ορισμένα από τα πλέον χαρακτηριστικά παραδείγματα υπογείων αποθηκευτικών χώρων παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 3. Υπόγειο αποθηκευτικό – διαμετακομιστικό κέντρο



Εικόνα 4. Τρισδιάστατη φωτορεαλιστική απεικόνιση του υπόγειου χώρου Svalbard Global Seed Vault Springfield Underground

Υπόγειοι χώροι στάθμευσης:

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα των μεγάλων αστικών κέντρων είναι η έλλειψη χώρων στάθμευσης. Σε πρώτο στάδιο το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίστηκε με τη διαμόρφωση κατάλληλων επιφανειακών χώρων και την κατασκευή πολυώροφων κτιρίων για τη στάθμευση των αυτοκινήτων. Η λύση όμως αυτή σε αρκετές περιπτώσεις φάνηκε

ανεπαρκής λόγω της εξάντλησης των επιφανειακών χώρων και τη συνεχή αύξηση του αριθμού των αυτοκινήτων. Έτσι μία λύση που εφαρμόζεται πλέον συστηματικά είναι η ανάπτυξη υπογείων χώρων στάθμευσης (Εικόνα 5).

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα που προσφέρουν οι υπόγειοι χώροι στάθμευσης είναι:

- Αντιμετώπιση του προβλήματος της στάθμευσης των οχημάτων και πιθανή αποσυμφόρηση της περιβάλλουσας περιοχής
- Η εξοικονόμηση πολύτιμου χώρου
- Μηδενική οπτική ρύπανση (εκτός από τις στοές εισόδου – εξόδου)
- Υψηλή προστασία των οχημάτων από τα καιρικά φαινόμενα
- Εναλλακτική χρήση των χώρων ως καταφύγια σε περίπτωση πολέμου αν πληρούν τις απαραίτητες προδιαγραφές

Οι υπόγειοι χώροι στάθμευσης όμως παρουσιάζουν και κάποια σημαντικά μειονεκτήματα:

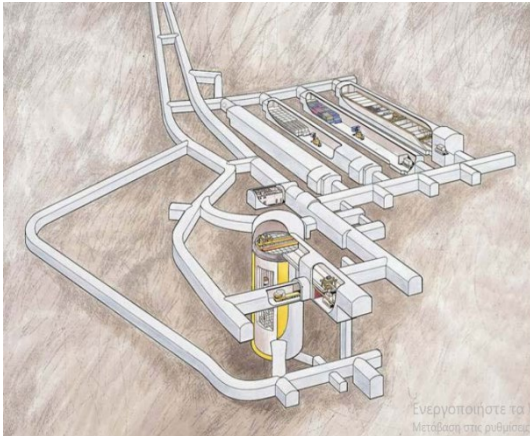
- Αυξημένο κόστος κατασκευής έναντι των επιφανειακών χώρων στάθμευσης
- Ανάγκη για αερισμό του υπόγειου χώρου, για να απομακρύνονται τα εκπεμπόμενα αέρια των αυτοκινήτων
- Αυξημένο κόστος φωτισμού, λόγω της ανάγκης συνεχούς φωτισμού του χώρου
- Περιορισμοί στα σημεία όπου μπορούν να αναπτυχθούν οι υπόγειοι χώροι
- Δημιουργία προβλημάτων κυκλοφοριακής συμφόρησης κατά τη διάρκεια ανάπτυξης του υπόγειου χώρου



Εικόνα 5. Άποψη υπόγειου χώρου στάθμευσης

Υπόγειοι χώροι διάθεσης επικίνδυνων αποβλήτων:

Μια πολύ σημαντική χρήση του υπόγειου χώρου αφορά στη διάθεση και αποθήκευση επικίνδυνων αποβλήτων (Εικόνα 6). Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του υπόγειου χώρου προσφέρουν ένα ασφαλές περιβάλλον αποθήκευσης καθώς η ύπαρξη του γεωλογικού μέσου σε συνδυασμό με την εγκατάσταση κατάλληλων τεχνητών φραγμών, εμποδίζουν τη διάδοση των ρύπων και την επαφή τους με τη βιόσφαιρα. Ιδιαίτερα πλεονεκτικοί γεωλογικοί σχηματισμοί σε ζητήματα απομόνωσης των αποβλήτων, θεωρούνται τα αργιλικά πετρώματα, τα πλουτώνια πετρώματα σε συμπαγή μορφή χωρίς ασυνέχειες και το ορυκτό άλας. Βασικό χαρακτηριστικό τους είναι ότι τα απόβλητα απομονώνονται και δεν αλληλοεπιδρούν με άλλους γεωλογικούς σχηματισμούς ούτε διεισδύουν στον υδροφόρο ορίζοντα.



Εικόνα 6. Σκαρίφημα υπόγειου χώρου διάθεσης επικίνδυνων αποβλήτων



Εικόνα 7. Μεταφορά αποβλήτων στο χώρο τελικής διάθεσης Herfa Neurode

A.1.2. Ο υπόγειος χώρος του Λαυρίου

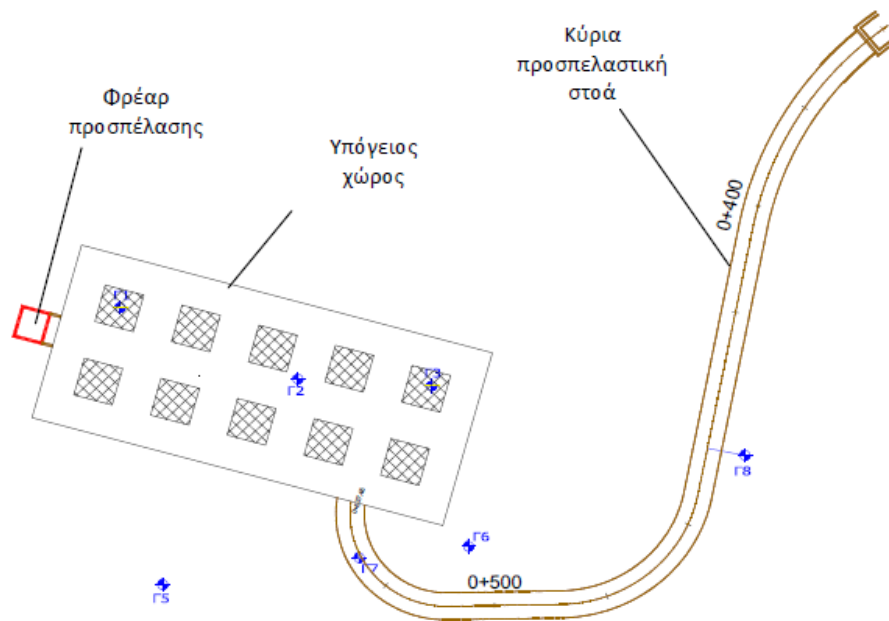
Στον Ελλαδικό χώρο έχει κατασκευαστεί ο υπόγειος χώρος τελικής διάθεσης επικίνδυνων αποβλήτων στο χώρο του Τεχνολογικού Πολιτιστικού Πάρκου Λαυρίου (Τ.Π.Π.Λ.). Η θέση κατασκευής του έργου αυτού εντοπίζεται στο βορειοδυτικό τμήμα του πάρκου, εντός της λοφώδους δομής που αναπτύσσεται εκεί με μέγιστο υψόμετρο (εντός των ορίων του Τ.Π.Π.Λ. που φτάνει τα 54 m.) Το υπόγειο έργο κατασκευάστηκε εφαρμόζοντας τη μεταλλευτική μέθοδο θαλάμων και στύλων με τη χρήση εκρηκτικών υλών, ενώ έχουν υιοθετηθεί υψηλοί συντελεστές ασφαλείας για τους στύλους του συγκροτήματος. Το επίπεδο κατασκευής του βρίσκεται στο +12 m, το ύψος του χώρου ανέρχεται στα 5.5 m, ενώ το ύψος των υπερκειμένων κυμαίνεται από 30 m – 40 m. Βρίσκεται σε ασφαλή απόσταση από το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα (+2 m περίπου) και γενικά η θέση κατασκευής του προσφέρει πλεονεκτικό γεωλογικό υπόβαθρο. Συγκεκριμένα, τα ανώτερα στρώματα της λοφώδους δομής αποτελούνται από χαμηλής αντοχής αλλά αδιαπέρατους σχηματισμούς (σχιστόλιθοι, φυλλίτες, γραφιτικοί σχιστόλιθοι) ενώ στο κατώτερο τμήμα συναντάται το στρώμα του ασβεστολιθικού πετρώματος («ανώτερο μάρμαρο»), εντός του οποίου είναι κατασκευασμένος ο υπόγειος χώρος, το οποίο προσφέρει ευστάθεια στην κατασκευή.

Ο χώρος θα φιλοξενήσει υλικά και ρυπασμένα εδάφη που προέρχονται από παλαιότερες μεταλλευτικές δραστηριότητες στο σημερινό Τ.Π.Π.Λ. Τα απόβλητα αυτά, που αφορούν κυρίως αρσενικούχες ενώσεις πολύ υψηλής συγκέντρωσης (6% As), θα τοποθετηθούν σε ειδικά βαρέλια, που θα επιτρέψουν την ασφαλή διάθεσή τους για μεγάλο χρονικό διάστημα στον ειδικά διαμορφωμένο υπόγειο χώρο. Η απομόνωση αυτών των αποβλήτων επιτυγχάνεται μέσω τεχνητών φραγμών, καθώς το έργο έχει κατασκευαστεί εντός υδροπερατού πετρώματος (ασβεστόλιθου).

Οι τεχνητοί αυτοί φραγμοί αποτελούνται από τη χρήση εκτοξευμένου σκυροδέματος με ειδικά πρόσμικτα με σκοπό τη στεγάνωση της οροφής και των τοιχωμάτων του χώρου, την εγκατάσταση ειδικού χημικά ανθεκτικού και αδιαπέρατου βιομηχανικού δαπέδου και την τοποθέτηση των αποβλήτων σε ειδικά μεταλλικά βαρέλια. Επιπλέον, στο χώρο έχει εγκατασταθεί σύστημα ανίχνευσης αερίων, σύστημα πυρανίχνευσης, καθώς και αυτόματο σύστημα καταιονισμού ύδατος (sprinklers) και επιπρόσθετο σύστημα πυρόσβεσης με ειδικό αδρανές αέριο.

Το έργο αυτό ολοκληρώθηκε το 2010 και το συνολικό κόστος κατασκευής του έφτασε περίπου τα 2.7 εκ. €. Το αντίστοιχο κόστος για τη μεταφορά και απόθεση αυτής της ποσότητας ειδικών αποβλήτων θα έφτανε τα 7.5 εκ. € στο εξωτερικό (Α.Μπενάρδος, 2010).

Παρακάτω παρουσιάζεται σε κάτοψη ο υπόγειος χώρος του Λαυρίου:



Εικόνα 8. Κάτοψη του υπόγειου χώρου του Τ.Π.Π.Α. και των αντίστοιχων έργων προσπέλασης [Πηγή: (Α.Μπενάρδος, 2010)]

Σε αυτό το σημείο κρίνεται χρήσιμο να οριστεί ένα μέγεθος που είναι απαραίτητο για τη μελέτη της πυρασφάλειας και κατ' επέκταση της ασφάλειας ενός κτιρίου.

Θεωρητικός πληθυσμός είναι ο τεχνικός (θεωρητικός) υπολογισμός των ατόμων ενός κτιρίου ως βάση υπολογισμού για τη λήψη των κατάλληλων μέτρων και μέσων πυροπροστασίας, χωρίς να αποτελεί κριτήριο του μέγιστου πληθυσμού που δύναται να συγκεντρωθεί (Κανονισμός πυροπροστασίας κτιρίων, 2018).

Ο υπόγειος χώρος του Λαυρίου απαρτίζεται από περίπου 223 m² γραφείων και 2220 m² μικτής επιφάνειας αποθήκης επικίνδυνων στερεών αποβλήτων. Συνεπώς, όταν εξετάζεται η ασφάλεια του υπόγειου αυτού χώρου είναι απαραίτητο να υπολογιστεί ο θεωρητικός πληθυσμός του σαν ένα αλγεβρικό άθροισμα δύο επιμέρους θεωρητικών πληθυσμών, των γραφείων και της αποθήκης.

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονίσουμε ότι στα πλαίσια της διπλωματικής αυτής επιλέξαμε να «γεμίζουμε» με κίτρινο χρώμα τα στοιχεία εκείνα των πινάκων που χρησιμοποιήσαμε κατά την ευρύτερη μελέτη της εκκένωσης του υπόγειου χώρου του Τ.Π.Π.Α..

A.2. Ασφάλεια υπόγειων χώρων

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

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά εκκένωσης των υπογείων χώρων και των λοιπών εγκαταστάσεων.

Πίνακας 1. Σύγκριση υπόγειων χώρων και λοιπών εγκαταστάσεων ως προς τα χαρακτηριστικά εκκένωσης [Πηγή: (Κυρίτσης, 2010)]

Χαρακτηριστικά υπογείων έργων	Χαρακτηριστικά σε λοιπές εγκαταστάσεις
Ανοδική πορεία στα κλιμακοστάσια	Καθοδική πορεία σε κλιμακοστάσια
Ο καπνός κινείται προς τις εξόδους διαφυγής	Ο καπνός κινείται στο πλησιέστερο άνοιγμα, παράθυρο κτλ.
Ταχύτερη αύξηση θερμοκρασίας για την ίδια καύσιμη ύλη	Μικρότερη αύξηση της θερμοκρασίας
Οι ένοικοι έχουν μικρή αίσθηση προσανατολισμού	Υπάρχει ευκολότερος προσανατολισμός και πιθανόν φυσικός φωτισμός
Οι ένοικοι έχουν την τάση να βγουν από την είσοδο - έξοδο που μπήκαν	Οι ένοικοι τείνουν να ακολουθούν τις πινακίδες και τη σήμανση
Αργεί να ξεκινήσει η εκκένωση	Η εκκένωση έχει μικρότερη καθυστέρηση έναρξης
Μεγαλύτερη κόπωση των ενοίκων λόγω ανόδου σε ράμπες και σκάλες	Λιγότερη κόπωση των ενοίκων

Λαμβάνοντας υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των υπογείων χώρων, σε σχέση με τις λοιπές εγκαταστάσεις, καθώς και το γεγονός ότι οι άνθρωποι χρησιμοποιούν σε παγκόσμια κλίμακα πιο πολύ από ποτέ άλλοτε τους υπόγειους χώρους, η ανάγκη εκπόνησης σχεδίων εκκένωσης υπογείων χώρων κρίνεται επιτακτική.

Για να θεωρηθεί σωστός και ασφαλής ο σχεδιασμός της εκκένωσης για έναν υπόγειο χώρο, θα πρέπει πρωτίστως να πληροί συγκεκριμένους κανονισμούς και προδιαγραφές.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να επισημανθεί πως για τη σύνταξη ενός σχεδίου εκκένωσης ενός υπόγειου χώρου δεν υπάρχουν σχετικές διατάξεις, προβλέψεις και οδηγίες στην ισχύουσα Ελληνική νομοθεσία και στις ισχύουσες κανονιστικές διατάξεις. Η μοναδική αναφορά που γίνεται σε υπόγειους χώρους εντοπίζεται σε υπόγεια που προορίζονται για στάθμευση αυτοκινήτων με έως και τρία επίπεδα. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι κι η συγκεκριμένη περίπτωση αντιμετωπίζεται ως κτίριο με αυξημένες απαιτήσεις ασφαλείας και ιδιαίτερη επικινδυνότητα.

Συνεπώς για να συντάξει κανείς ένα σχέδιο εκκένωσης υπόγειου χώρου θα πρέπει να μελετήσει διατάξεις του Αμερικάνικου κανονισμού πυροπροστασίας για υπόγειους χώρους οι οποίοι αναλύονται σε παρακάτω κεφάλαιο.

A.3. Η μεταλλευτική δραστηριότητα του αρχαίου Λαυρίου

Στην αρχαιότητα υπήρξαν δύο πολύτιμα σπάνια μέταλλα τα οποία δεν ήταν κατάλληλα για όπλα και εργαλεία αλλά ήταν πιο ποθητά από τους ανθρώπους, ο χρυσός και ο άργυρος. Τα μέταλλα αυτά χάρη στις μοναδικές φυσικές και χημικές ιδιότητές τους ήταν ιδανικά για κοσμήματα και πολυτελή αγγεία, ενώ η αγοραστική τους αξία ήταν μεγάλη διότι ήταν δυσεύρετα. Επιπλέον, όταν κατά τον 7ο αιώνα π.Χ. επινοήθηκαν τα νομίσματα, ήταν τα μοναδικά μέταλλα που χρησιμοποιήθηκαν ως πρώτη ύλη αυτών των νομισμάτων. Αυτός είναι ο κυριότερος λόγος που τα πολύτιμα μέταλλα χαρακτηρίζονται ως πηγή πλούτου και δύναμης. Ο άργυρος βρίσκεται στη φύση σε αυτοφυή κατάσταση και λαμβάνεται κυρίως από μεταλλεύματα του αργυρούχου μολύβδου, ενώ είχε μεγαλύτερη αξία από το χρυσό ως ένα σπάνιο και πολύτιμο μέταλλο με δαπανηρή παραγωγή. Στον κυρίως Ελλαδικό χώρο υπήρχε άργυρος στο Λαύριο, από τα νησιά άργυρο και χρυσό είχαν η Θάσος, Σίφνος, ενώ στη Β. Ελλάδα άργυρο και χρυσό είχαν η Μακεδονία και Θράκη (Τσάιμου, 1997).

Τα μεταλλεία στην περιοχή του Λαυρίου είναι από τα αρχαιότερα μεταλλεία στον Ελλαδικό χώρο και κατά την αρχαιότητα αποτελούσαν την κύρια πηγή παραγωγής αργύρου εκμεταλλευόμενα τα μεταλλεύματα αργυρούχου μολύβδου. Η ιστορία των μεταλλείων του

Λαυρίου είναι άμεσα συνυφασμένη με την ιστορία της Αθήνας ενώ υπάρχει και μία βαθιά συσχέτιση ανάμεσα στη ζωή των δύο αυτών περιοχών. Στο σημείο αυτό θα ακολουθήσει περιγραφή των σημαντικότερων μεταλλευτικών στοιχείων του αρχαίου Λαυρίου (Τσάιμου, 1997).

Τα αργυρούχα μεταλλεύματα της Λαυρεωτικής

Τα μεταλλεύματα που εκμεταλλεύτηκαν εντατικά οι αρχαίοι στο Λαύριο ήταν τα μολυβδούχα μεταλλεύματα και αυτό γιατί μέσα στο μόλυβδο υπάρχει και ένα ποσοστό αργύρου. Τα μεταλλεύματα αυτά ήταν δύο ειδών, τα οξειδωμένα και τα θειούχα αργυρούχα μεταλλεύματα. Στα οξειδωμένα μεταλλεύματα ανήκουν ο ανθρακικός μόλυβδος (κερουσίτης, CO_3Pb) και ο ανθρακικός ψευδάργυρος (καλαμίνα) ενώ στα θειούχα ανήκει ο γαληνίτης (PbS). Οι Αθηναίοι ενδιαφέρονταν για το γαληνίτη και τον κερουσίτη, διότι αυτά είναι τα μόνα αργυρούχα, και τα ονόμαζαν «αργυρίτις γη».

Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται ορισμένα από τα χρήσιμα για τους αρχαίους μεταλλεύματα.



Εικόνα 9. Μετάλλευμα ανθρακικού μολύβδου (κερουσίτη)



Εικόνα 10. Θειούχα μεταλλεύματα Λαυρεωτικής: γαληνίτης – σφαλερίτης – σιδηροπυρίτης

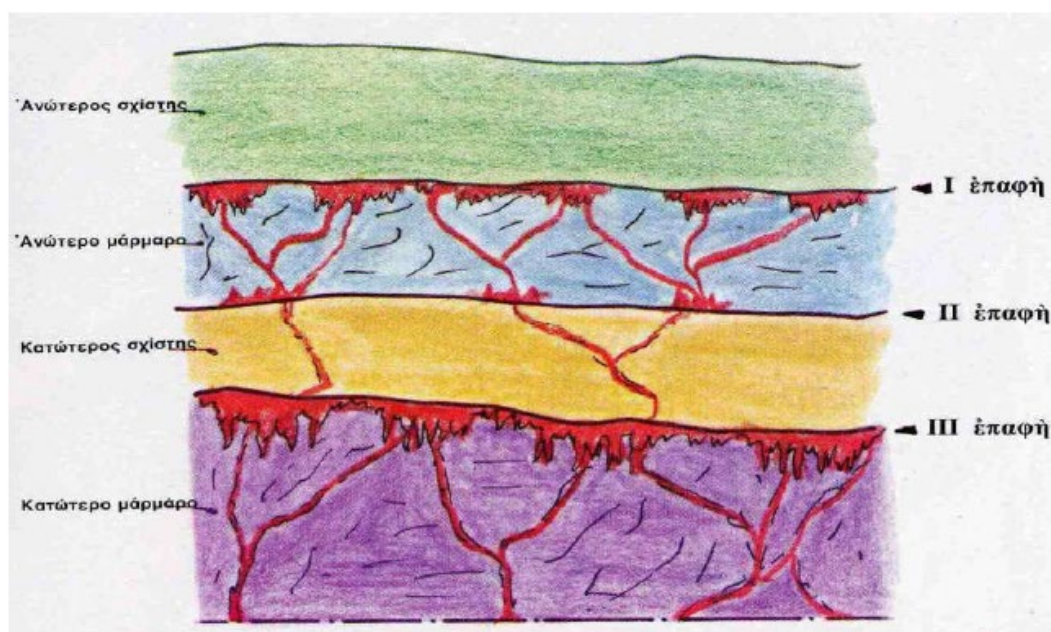
Όταν ένα μετάλλευμα ήταν πλούσιο σε μόλυβδο, ήταν πλούσιο και σε άργυρο γιατί ο άργυρος ακολουθεί το μόλυβδο σε σταθερή σχεδόν αναλογία. Συγκεκριμένα κατά τον 5^ο αιώνα π.Χ. η μέση περιεκτικότητα σε άργυρο ήταν 2 kg αργύρου περίπου ανά τόνο περιεχόμενου μολύβδου, το ποσοστό της οποίας διέφερε από περιοχή σε περιοχή των μεταλλείων.

Στοιχεία γεωλογίας και κοιτασματολογίας της Λαυρεωτικής

Στη Λαυρεωτική υπάρχουν κατά σειρά αυξανόμενης γεωλογικής ηλικίας από πάνω προς τα κάτω τα εξής στρώματα:

- Ανώτερος σχιστόλιθος
- Ανώτερο μάρμαρο
- Κατώτερος σχιστόλιθος
- Κατώτερο μάρμαρο

Κάθε πέτρωμα είναι σε επαφή με το κατώτερο του και σχηματίζει μια επιφάνεια επαφής με αυτό. Όπως φαίνεται παραστατικά στην Εικόνα 11 υπάρχουν τρεις επαφές στρωμάτων. Το μεταλλευμα βρίσκεται στην επαφή μαρμάρου και σχιστόλιθου, μέσα στο μάρμαρο, δηλαδή στις επαφές III και I της Εικόνας 11 κατά σειρά ποσοτήτων.



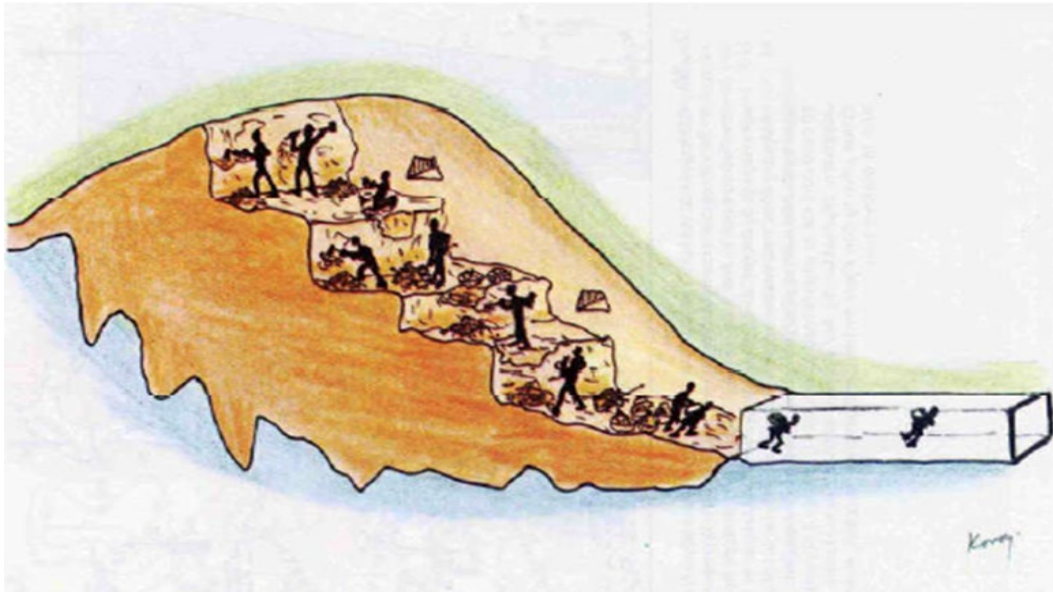
Εικόνα 11. Παράσταση των στρωμάτων των πετρωμάτων της Λαυρεωτικής [Πηγή: (Τσάιμου, 1997)]

Η επικρατέστερη θεωρία της μεταλλοφορίας των επαφών, είναι η θεωρία της «υδροθερμικής μεταλλογένεσης». Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, θερμά νερά που περιείχαν μεταλλευμα σε χημικές ενώσεις από τα βάθη της γης, ανέβηκαν με πίεση προς τα πάνω, συνάντησαν τις επαφές των πετρωμάτων του υπεδάφους και διαχύθηκαν μέσα σε αυτές. Πρέπει να σημειωθεί ότι το μάρμαρο είναι εύθραυστο, ευδιάβρωτο και έχει ρήγματα, ενώ ο σχιστόλιθος είναι πλαστικότερος, χωρίς ρωγμές, δυσδιάλυτος και αδιάβρωτος. Έτσι καθώς τα θερμά νερά ανέβαιναν από κάτω προς τα πάνω, από τα κατακόρυφα ρήγματα του μαρμάρου, έβρισκαν εμπόδιο στον αδιαπέραστο σχιστόλιθο και στις επαφές αυτές σχηματιζόταν μεγάλη ποσότητα μεταλλεύματος.

Εξόρυξη των μεταλλευμάτων

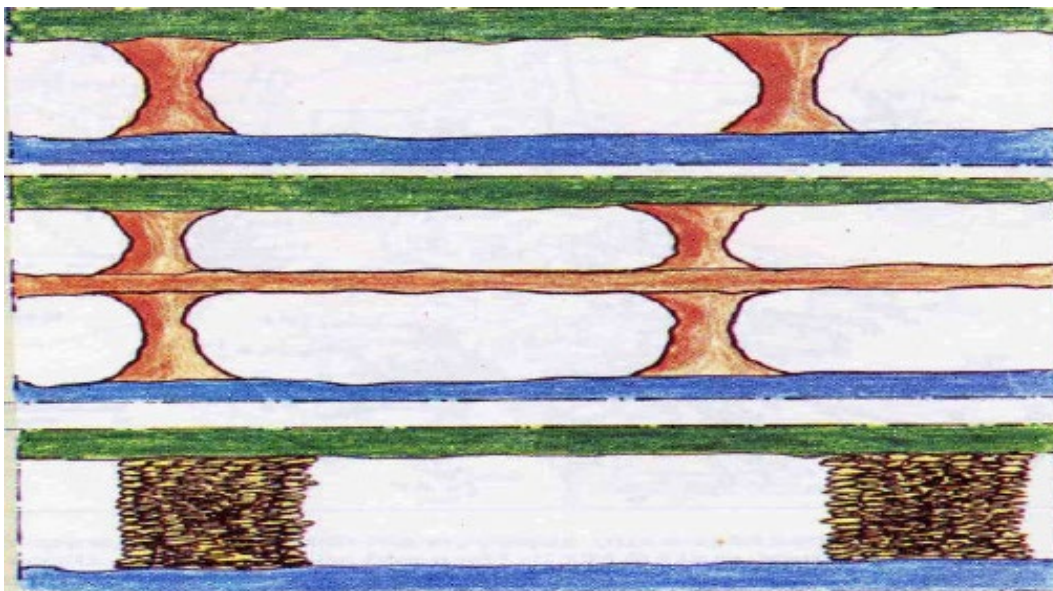
Οι αρχαίοι για να ανιχνεύσουν αν υπάρχει μεταλλευμα στην περιοχή που τους ενδιέφερε, έκαναν στοές μικρής διατομής. Όταν με μια ερευνητική στοά έφταναν στο μεταλλευμα, προχωρούσαν τη στοά παίρνοντας το μεταλλευμα μέχρι το άκρο του κοιτάσματος και στη συνέχεια διένοιγαν και άλλες ερευνητικές στοές προς διάφορες κατευθύνσεις για να διαπιστώσουν την έκταση και τη θέση του μεταλλεύματος.

Αν το μεταλλευμα ήταν σε μορφή οριζόντιων στρώσεων, ή σχεδόν οριζόντιων, αλλά μικρού πάχους (π.χ. 2 m) το έπαιρναν με τον κασμά. Όταν έβρισκαν μεταλλευμα μεγάλου πάχους ή η φλέβα του κοιτάσματος ήταν κατακόρυφη, τότε για την εξόρυξη του μεταλλεύματος ακολουθούσαν τη μέθοδο των «βαθμίδων» όπως φαίνεται και στην Εικόνα 12.



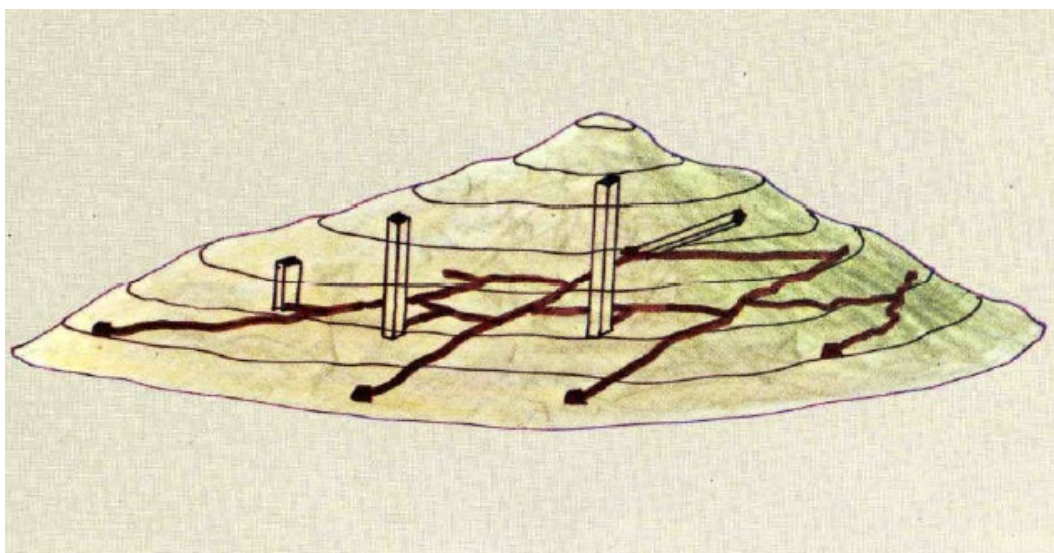
Εικόνα 12. Τρόπος εξόρυξης μεταλλεύματος με τη μέθοδο των «βαθμίδων» [Πηγή: (Τσαίμου, 1997)]

Κατά τη μέθοδο αυτή το μέταλλευμα κόβεται σε σκαλοπάτια. Με αυτόν τον τρόπο οι ορύκτες έχουν τη δυνατότητα να εργάζονται και στα υψηλότερα τμήματα, ακόμα και να παίρνουν τα μεταλλεύματα που είναι κοντά στην κορυφή. Ο ορύκτης προχωρεί την εξόρυξη κόβοντας το μέταλλευμα στην κατακόρυφη πλευρά της «βαθμίδας» και έτσι η εξόρυξη προχωρεί σε βάθος διατηρώντας παράλληλα τα σκαλιά. Για τη στήριξη της οροφής οι αρχαίοι άφηναν καθ' ύψος κολώνες από το ίδιο μέταλλευμα. Η μέθοδος αυτή, η οποία εφαρμόστηκε και τα νεότερα χρόνια στο Λαύριο, ονομάζεται εξόρυξη με «θαλάμους και στύλους» (Εικόνα 13).



Εικόνα 13. Υποστήριξη οροφής με κολώνες, μέθοδος «θαλάμων και στύλων» [Πηγή: (Καλλιανιώτης Α., 2006)]

Ο αερισμός για τους εργάτες επιτυγχανόταν μέσω της κεντρικής στοάς καθώς και μέσω αναγκαίων φρεάτων αερισμού που ανοιγόntonταν κατά διαστήματα (Εικόνα 14).



Εικόνα 14. Σκαρίφημα φρεάτων αερισμού [Πηγή: (Καλλιανιώτης Α. , 2006)]

Διαδικασία παραγωγής

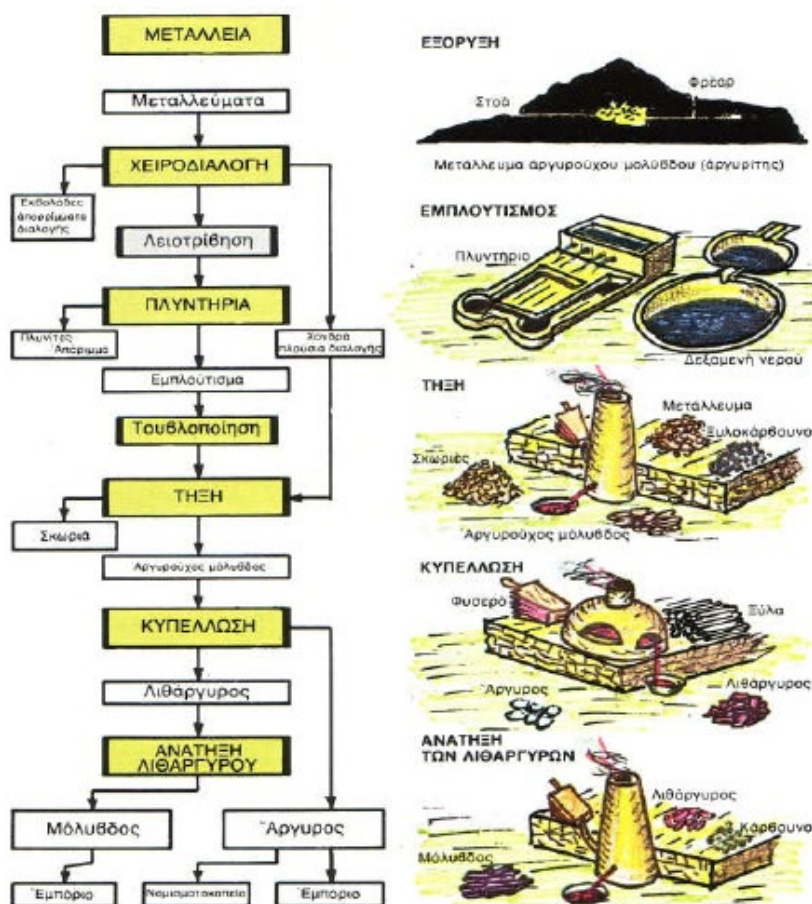
Στα αρχαία μεταλλεία του Λαυρίου δεν λάμβανε χώρα μόνο η εξόρυξη του μεταλλεύματος, αλλά γινόταν και ο εμπλουτισμός του ενώ παράλληλα είχαν αναπτυχθεί και μεταλλουργικές διεργασίες για την επεξεργασία του.

Η διαδικασία του εμπλουτισμού περιλαμβάνει τη θραύση τη λειοτρίβηση και τα πλυντήρια. Σκοπός της διαδικασίας αυτής ήταν να σπάσει το μέταλλευμα σε κόκκους μικρότερους του 1 mm και στη συνέχεια να χωρίσουν, σε ρεύμα νερού, οι κόκκοι σε βαρύτερους και ελαφρύτερους. Ο διαχωρισμός αυτός γινόταν στα πλυντήρια επίπεδης ή σπανιότερα ελικοειδούς μορφής. Οι βαρύτεροι κόκκοι έχουν μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε μόλυβδο και αποτελούσαν το συμπύκνωμα που υποβαλλόταν σε μεταλλουργικές διεργασίες.

Η τήξη είναι η κύρια μεταλλουργική διαδικασία. Σε αυτήν έλειωνε το μέταλλευμα μέσα σε μία ειδική κάμινο, χρησιμοποιώντας το κατάλληλο καύσιμο. Σκοπός της διαδικασίας αυτής είναι η απόληψη από το μέταλλευμα ορισμένων μετάλλων σε μεταλλική κατάσταση (ή σπανιότερα σε χημικές ενώσεις). Για το πολύ ψιλό μέταλλευμα, το οποίο δε μπορούσε να μπει στη κάμινο (θα την έφραζε) χρησιμοποιήθηκε η διαδικασία της τουβλοποίησης κατά την οποία συσσωματώνονταν τα ψιλά μεταλλεύματα. Αυτά τοποθετούνταν στην κάμινο και με τον τρόπο αυτό δεν έφραζε πια. Μία άλλη μεταλλουργική διαδικασία είναι αυτή της κυπέλλωσης. Η κυπέλλωση είναι η μεταλλουργική πράξη κατά την οποία ο άργυρος χωρίζεται από τον αργυρούχο μόλυβδο, με την οξειδωση του μολύβδου με τον αέρα, μέσα σε ένα κύπελλο όπου η θερμοκρασία είναι τέτοια ώστε το οξείδιο του μολύβδου να είναι λιωμένο. Οι αρχαίοι Έλληνες το οξείδιο του αργύρου το ονόμαζαν λιθάργυρο, δηλαδή λίθο του αργύρου. Ο λιθάργυρος ήταν η πρώτη ύλη για την παραγωγή του εμπορεύσιμου μολύβδου που ήταν, πλέον, απαλλαγμένος από τον άργυρο. Για την ανάτξη (καθαρισμό) του λιθάργυρου χρησιμοποιούσαν τις ίδιες καμίνους τήξεως που χρησιμοποιούσαν και στο μέταλλευμα. Η διαδικασία αυτή χρειαζόταν κάρβουνο 8 – 10% για κάθε τόνο λιθάργυρου το οποίο τροφοδοτείται με λίγη σκουριά, η οποία γέμιζε την κάμινο και μείωνε, με τον τρόπο αυτό, τις απώλειες από εξάτμιση. Έτσι ο παραγόμενος μόλυβδος περιείχε ελάχιστο άργυρο (20 – 200 γραμμάρια ανά τόνο) αλλά αρκετό χαλκό, αντιμόνιο και αρσενικό (όλα μαζί δεν υπερέβαιναν το 2%). Οι μεταλλικές αυτές «ακαθαρσίες» έδιναν σκληρότητα στο μόλυβδο, μία ιδιότητα χρήσιμη αν αναλογιστούμε τις αρχαίες εφαρμογές αυτού του μετάλλου (Καλλιανιώτης Α. , 2006).

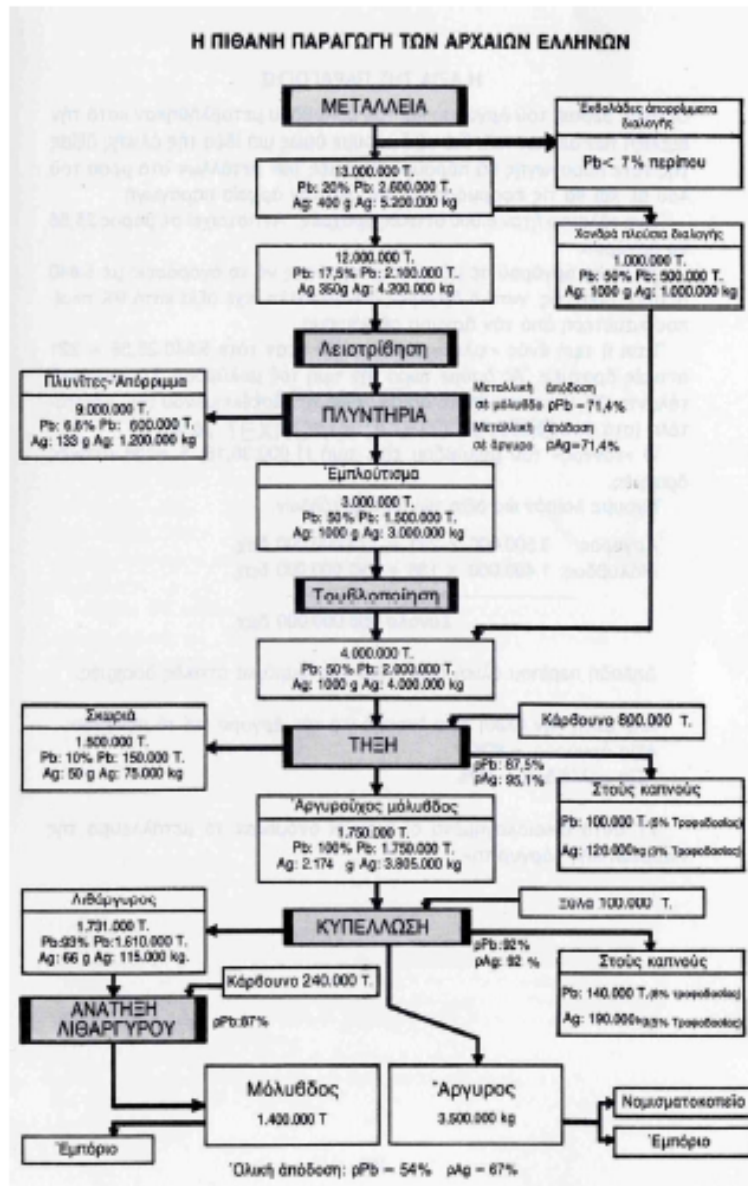
Στην Εικόνα 15 παρουσιάζεται διαγραμματικά η κατεργασία του μεταλλεύματος στο αρχαίο Λαύριο.

ΤΟ ΑΡΧΑΙΟ ΛΑΥΡΙΟ
ΓΕΝΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΟΥ «ΑΡΓΥΡΙΤΟΥ»



Εικόνα 15. Γενικό διάγραμμα κατεργασίας του «αργυρίτου»

Όπως φαίνεται τώρα στην Εικόνα 16, η ολική παραγωγή των αρχαίων από όλες αυτές τις διαδικασίες, φαίνεται να ήταν 3.500 τόνοι σε άργυρο και 1.400.000 τόνοι σε μόλυβδο. Τα εξορυχθέντα για κατεργασία μεταλλεύματα υπολογίζονται σε 13 εκατομμύρια τόνους, με περίπου 20% μόλυβδο και 400 γραμμάρια άργυρο ανά τόνο μεταλλεύματος.



Εικόνα 16. Διάγραμμα παραγωγής στο αρχαίο Λαύριο

A.4. Νεότερη ιστορία των μεταλλείων του Λαυρίου

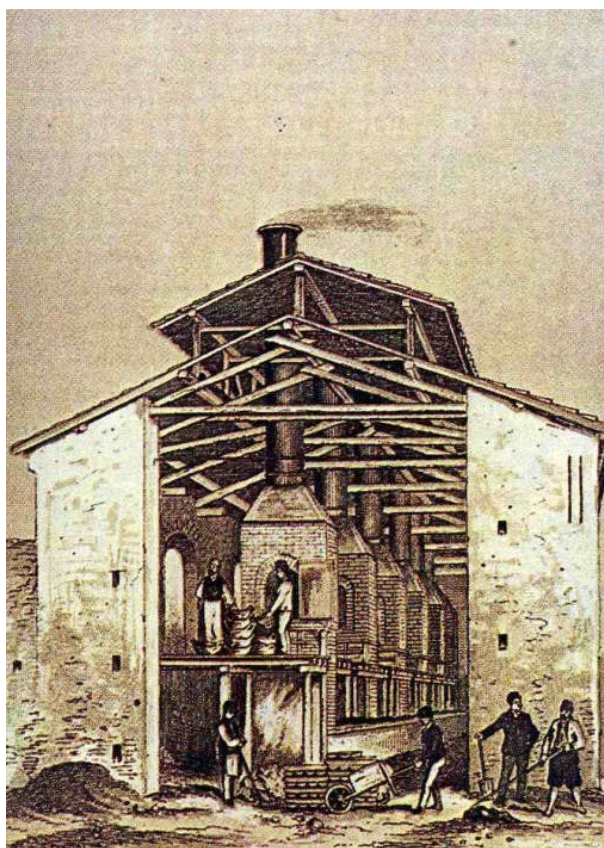
Τα μεταλλεία της Λαυρεωτικής χερσονήσου ύστερα από τη συστηματική εκμετάλλευση που γνώρισαν τα αρχαία χρόνια, έμειναν αναξιοποίητα μέχρι τα μέσα του 19^{ου} αιώνα μ.Χ. Πιο συγκεκριμένα τη δεκαετία του 1860 ξεκινάει η νεότερη περίοδος μεταλλευτικών δραστηριοτήτων στη Λαυρεωτική με στόχο να εκμεταλλευτεί κυρίως τα υπολείμματα της κατεργασίας των μεταλλευμάτων από τους αρχαίους. Τα υπολείμματα αυτά είναι τεράστια και φτάνουν τους 1,5 εκ. τόνους σκουριάς και 10 εκ. τόνους εκβολάδων, όπως ονομάζονται τα φτωχά μεταλλεύματα που απορρίπτονται μετά από τη διαλογή και τον εμπλουτισμό.

Το 1865 εταιρεία Γαλλο-Ιταλικών συμφερόντων αγοράζει τα δικαιώματα των σκουριών του Λαυρίου και προχωρεί στην εγκατάσταση μεταλλουργείου κοντά στην παραλία του σημερινού λιμανιού του Λαυρίου. Η εταιρεία αυτή όμως πέρα από την εκμετάλλευση των πλουσιότερων σκουριών άρχισε να επεξεργάζεται και τις αρχαίες εκβολάδες για τις οποίες δεν είχε το δικαίωμα εκμετάλλευσης. Αυτό είχε ως επακόλουθο τη δημιουργία ενός μεγάλου πολιτικού ζητήματος, το οποίο είναι γνωστό ως «λαυρεωτικό ζήτημα», και τον τερματισμό της εκμετάλλευσης των μεταλλείων από τη συγκεκριμένη εταιρεία. Το ζήτημα αυτό λύνεται με τη δημιουργία δύο νέων εταιρειών, την Ελληνική εταιρεία μεταλλουργιών και τη Γαλλική

εταιρεία μεταλλείων Λαυρίου, οι οποίες θα εκμεταλλευτούν τα αρχαία υπολείμματα για τις επόμενες δεκαετίες.

Η Ελληνική εταιρεία αναπτύσσει τις εργασίες της, συμπληρώνει τα εργοστάσια κοντά στο λιμάνι του Λαυρίου και λιώνει τις σκουριές και τις εκβολάδες, για τις οποίες είχε πλέον την αποκλειστική εκμετάλλευση. Τις εκβολάδες κατεργαζόταν για εμπλουτισμό σε σύγχρονα, για την εποχή, πλυντήρια και με τον τρόπο αυτό τροφοδοτούσαν στις καμίνους τις σκουριές και το τουβλοποιημένο συμπύκνωμα των εκβολάδων. Η λειτουργία της σταματά το 1917 όταν τα αποθέματα που εκμεταλλεύονταν τελειώνουν, με την παραγωγή της να φτάνει τους 370.000 τόνους αργυρούχου μολύβδου στα χρόνια λειτουργίας της.

Η Γαλλική εταιρεία ήταν μακροβιότερη, η λειτουργία της σταμάτησε το 1981, καθώς εκμεταλλεύονταν μεγαλύτερα και πλουσιότερα κοιτάσματα στο υπέδαφος του Λαυρίου. Εγκατέστησε εργοστάσια μεταλλουργίας μολύβδου και αξιόλογα μηχανικά πλυντήρια εμπλουτισμού των μεταλλευμάτων. Η εταιρεία άρχισε την παραγωγή μαλακού καθαρού μολύβδου, για τις ανάγκες της Ελλάδος, με σύγχρονες για την εποχή μεταλλουργικές εγκαταστάσεις, αλλά και την παραγωγή προϊόντων μολύβδου, λιθάργυρου και μίνιου. Το 1930 εγκαταστάθηκε για πρώτη φορά στην Ελλάδα, εργοστάσιο διαφορικού εμπλουτισμού ενώ το 1942 άρχισε για πρώτη φορά η παραγωγή του αργύρου ως μέταλλο και όχι ως κράμα. Η Γαλλική εταιρεία παρήγαγε στα 100 χρόνια της ζωής της, 490.000 τόνους μόλυβδο, από λαυρευτικά μεταλλεύματα. Αν συγκρίνει κανείς στο σημείο αυτό, τη συνολική αρχαία παραγωγή με τη σύγχρονη, θα καταλήξει στο συμπέρασμα ότι η σύγχρονη παραγωγή ενός ολόκληρου αιώνα είναι λιγότερη από το 60% της παραγωγής των αρχαίων.



Εικόνα 17. Κάμινος τήξεως Γαλλικής Εταιρείας

Τέλος, το 1992 το κτηριακό συγκρότημα των βιομηχανιών της γαλλικής εταιρείας αγοράζεται από το Δημόσιο για να παραχωρηθεί στο Πολυτεχνείο με σκοπό τη δημιουργία ενός χώρου αφιερωμένου στην ανάπτυξη υψηλών, και περιβαλλοντικά φιλικών, τεχνολογιών, και ενός

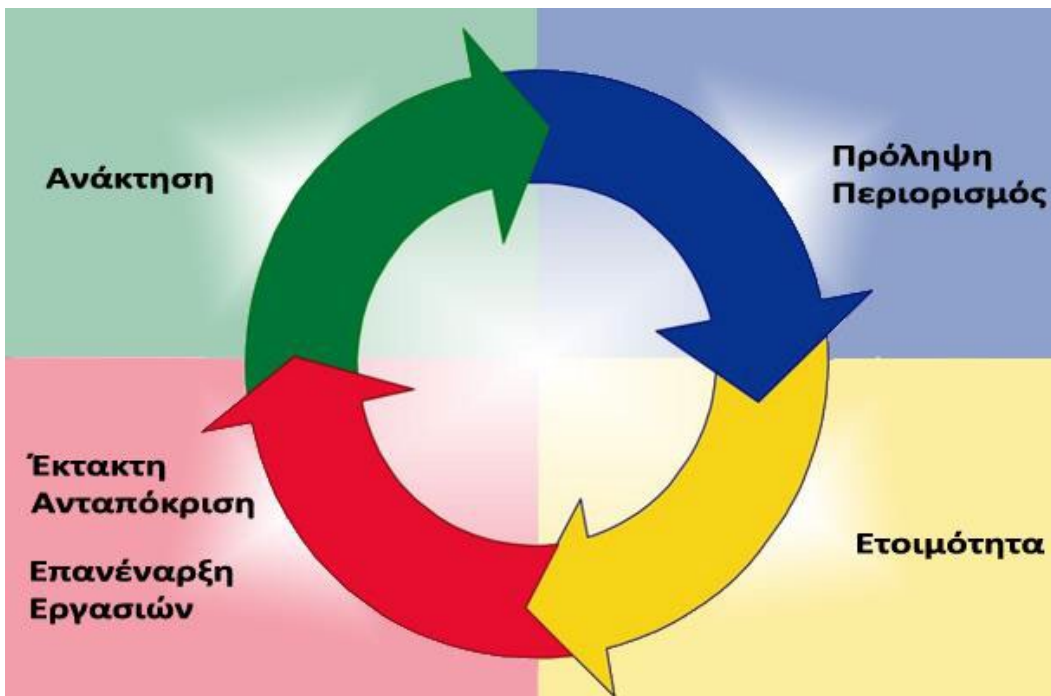
τεχνολογικού μουσείου (Καλλιανιώτης Α., 2006), (Λαυρεωτική - Τεχνολογικό Πάρκο Λαυρίου - Λαύριο).



Εικόνα 18. Πανοραμική άποψη του σημερινού Τεχνολογικού και Πολιτιστικού Πάρκου Λαυρίου (Τ.Π.Π.Λ.)

B. Εκκένωση εγκαταστάσεων σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης

Είναι γεγονός ότι όλο και περισσότεροι άνθρωποι σε παγκόσμιο επίπεδο, περνούν το μεγαλύτερο μέρος της καθημερινότητάς τους σε κτιριακές εγκαταστάσεις. Αυτές μπορούν να αποτελούν είτε το χώρο εργασίας τους, είτε το χώρο διαμονής τους είτε το χώρο αναψυχής τους. Συνεπώς, γίνεται πιο επιτακτική από ποτέ η ανάγκη για όσο το δυνατόν πιο ασφαλείς κτιριακές εγκαταστάσεις με γνώμονα πάντα την προστασία των ανθρώπινων ζών σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης και φυσικών καταστροφών. Για την όσο το δυνατόν καλύτερη και ασφαλέστερη αντιμετώπιση τέτοιων φαινομένων, απαιτείται η ύπαρξη ενός σχεδίου έκτακτης ανάγκης. Η δημιουργία ενός τέτοιου σχεδίου ξεκινάει από την κατανόηση των επιχειρηματικών λειτουργιών και την αξιολόγηση των κινδύνων. Η σημαντικότητα μιας έκτακτης ανάγκης πρέπει να εξετάζεται σε σύγκριση με την πιθανότητα να συμβεί. Ένα σωστά δομημένο και αποτελεσματικό σχέδιο πρέπει να περιλαμβάνει διατάξεις οι οποίες καλύπτουν ένα κύκλο διαδικασιών, που εξετάζει και εν συνόλω αλλά και ξεχωριστά τους πιθανούς κινδύνους που μπορούν να οδηγήσουν σε περιστατικό έκτακτης ανάγκης. Ένας τέτοιος κύκλος διεργασιών παρουσιάζεται στην Εικόνα 19:



Εικόνα 19. Κύκλος διεργασιών για σωστά δομημένο σχέδιο [Πηγή: (Καλλιανιώτης Α. , 2015)]

Η εκκένωση είναι από τα σημαντικότερα στοιχεία που καθιστούν ασφαλές ένα κτίριο ή μια εγκατάσταση. Όταν λάβει χώρα μια φυσική καταστροφή, ξεσπάσει μια πυρκαγιά ή γίνει κλήση για απειλή βόμβας, ενδέχεται να χρειαστεί εκκένωση του κτιρίου ή των εγκαταστάσεων. Η συστηματική και πλήρης διαφυγή όλων των ενοίκων απαιτεί προσεκτική πρόβλεψη των διαδρομών εξόδου και καταμέτρηση όλων των ατόμων μετά την εκκένωση. Παρά το γεγονός ότι πολλοί άνθρωποι τείνουν να βλέπουν την εκκένωση ως μια απλή και στοιχειώδη διαδικασία, αν δεν έχει προγραμματιστεί και ολοκληρωθεί σωστά μπορεί να οδηγήσει σε ακόμη περισσότερους θανάτους και υλικές ζημιές από αυτές που προκύπτουν από την αρχική πηγή της εκδήλωσης της έκτακτης ανάγκης. Αυτό συμβαίνει διότι, κατά τη διάρκεια μιας εκκένωσης, το υπεύθυνο προσωπικό για τη σωστή διεξαγωγή της, υπόκειται όχι μόνο σε κίνδυνο λόγω της ίδιας της κατάστασης έκτακτης ανάγκης (π.χ. φωτιά, καπνό), αλλά και σε κινδύνους λόγω πανικού και υστερίας (π.χ. περίπτωση ποδοπατήματος), καθώς και σε προσωπικούς κινδύνους στρες (π.χ. καρδιακή προσβολή), όπως επίσης και σε

κινδύνους που προκύπτουν από τα φυσικά χαρακτηριστικά και τον εξοπλισμό των εγκαταστάσεων και των κοινών εργασιών (π.χ. στενά περάσματα, απότομες σκάλες, μπλοκαρισμένα περάσματα εξόδου, συμπεριλαμβανομένων και των προσπαθειών των ομάδων βοήθειας έκτακτης ανάγκης που βρίσκεται σε εξέλιξη) (Καλλιανιώτης Α. , 2015).

B.1. Σχεδιασμός της εκκένωσης

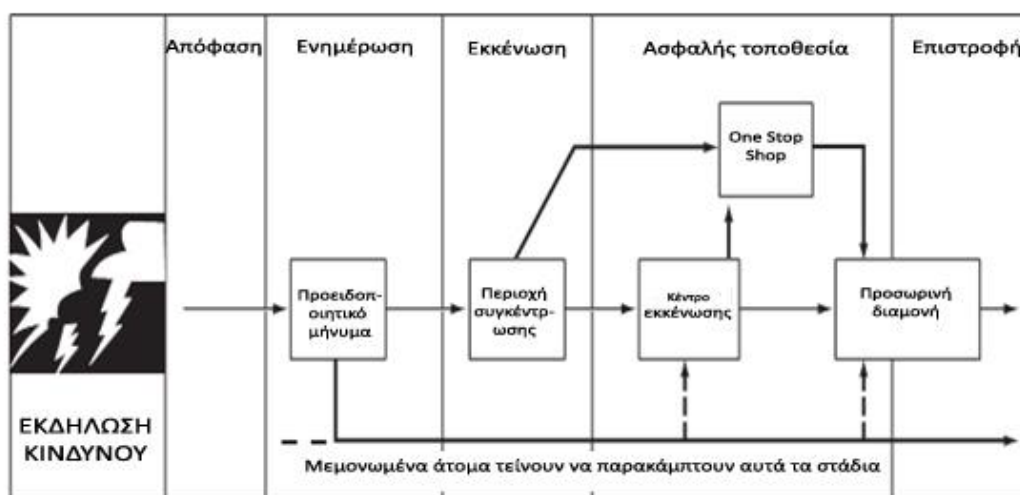
Η εκκένωση αφορά τη μετακίνηση των ενοίκων σε μια ασφαλέστερη τοποθεσία. Ωστόσο, για να είναι αποτελεσματική, πρέπει να σχεδιαστεί και να εκτελεστεί σωστά. Η όλη διαδικασία της εκκένωσης συνήθως περιλαμβάνει και την επιστροφή του οργανισμού στις δραστηριότητες του. Η φύση μιας συγκεκριμένης καταστροφής καθώς και ενός επικείμενου κινδύνου για την ασφάλεια των ενοίκων ενός οργανισμού, είναι βασικό μέλημα που καθορίζει την έναρξη της εκκένωσης.

Οι βασικές αρχές ενός ορθού σχεδιασμού εκκένωσης περιλαμβάνουν:

- Καθορισμό ατόμων με εξουσία ώστε να μπορούν να δώσουν εντολή για εκκένωση
- Σαφή προσδιορισμό των ρόλων και των ευθυνών
- Ανάπτυξη κατάλληλων και ευέλικτων σχεδίων
- Αποτελεσματικό σύστημα προειδοποίησης και ενημέρωσης
- Εξασφάλιση δυνατότητας μετακίνησης (οδεύσεις διαφυγής)
- Δημιουργία και διατήρηση της εμπιστοσύνης και της συνεργασίας όλων των επηρεαζόμενων φορέων
- Κατάλληλη εκπαίδευση και συντονισμός ασκήσεων, πάνω στα ανεπτυγμένα σχέδια εκκένωσης.

Για να γίνει πιο απλός ο σχεδιασμός της εκκένωσης, μπορεί κανείς να θεωρήσει πως η διαδικασία της εκκένωσης περιλαμβάνει πέντε στάδια (Καλλιανιώτης Α. , 2015):

- Εντολή - Απόφαση έναρξης εκκένωσης
- Προειδοποίηση – Ενημέρωση
- Απομάκρυνση των ενοίκων σε ασφαλή τοποθεσία
- Επιλογή τοποθεσίας αναφοράς
- Επιστροφή στις εγκαταστάσεις



Εικόνα 20. Στάδια διαδικασίας εκκένωσης [Πηγή: (Καλλιανιώτης Α. , 2015)]

B.1.1. Οδεύσεις διαφυγής

Ως οδευση διαφυγής ορίζεται μια συνεχής και χωρίς εμπόδια πορεία για τη διαφυγή από οποιοδήποτε σημείο ενός κτιρίου προς ένα ασφαλή, υπαίθριο συνήθως χώρο, σε περίπτωση πυρκαγιάς. Οι οδεύσεις διαφυγής πρέπει να παραμένουν ασφαλείς και αποτελεσματικές για

τη χρονική διάρκεια που χρειάζονται και να είναι σαφώς αντιληπτές και προσπελάσιμες από όλους τους χρήστες. Η χρήση του κτιρίου και οι ανάγκες των ενοίκων καθορίζουν τον τρόπο σχεδιασμού, τη διαστασιολόγηση καθώς και τη θέση των οδεύσεων διαφυγής.

Η παροχή της όδευσης διαφυγής καθορίζεται με βάση την ειδική χρήση του κτιρίου και υπολογίζεται για κάθε όροφο ανάλογα με τον θεωρητικό πληθυσμό του. Ο όροφος με το μεγαλύτερο αριθμό ενοίκων (πληθυσμό) καθορίζει την παροχή της κατακόρυφης όδευσης διαφυγής (κλιμακοστασίου). Σε περίπτωση κτιρίων με περισσότερους των 6 ορόφων (συμπεριλαμβανομένου και του ισογείου) η παροχή της κατακόρυφης όδευσης διαφυγής – κλιμακοστασίου, ισούται με το άθροισμα των παροχών δύο διαδοχικών ορόφων.

Ως πλάτος της όδευσης διαφυγής ορίζεται το ελεύθερο πλάτος στο στενότερο σημείο, το οποίο δεν θα πρέπει να είναι μικρότερο του 0.70 του μέτρου, και μέχρι ύψους 2.00 μέτρων. Το πλάτος της όδευσης διαφυγής δεν επιτρέπεται να μειώνεται σε καμιά περίπτωση στην πορεία προς την τελική έξοδο. Επίσης αξίζει να σημειωθεί σε αυτό το σημείο πως η μονάδα πλάτους της όδευσης διαφυγής ορίζεται σε 0.60 του μέτρου.

Επιπλέον, το πλάτος των τελικών εξόδων στον όροφο ή το επίπεδο εκκένωσης πρέπει να επαρκεί για το άθροισμα των παροχών $\alpha + \beta + \gamma$ όπου:

α): παροχή κλιμακοστασίων και ραμπών από υπερκείμενους ορόφους ή επίπεδα

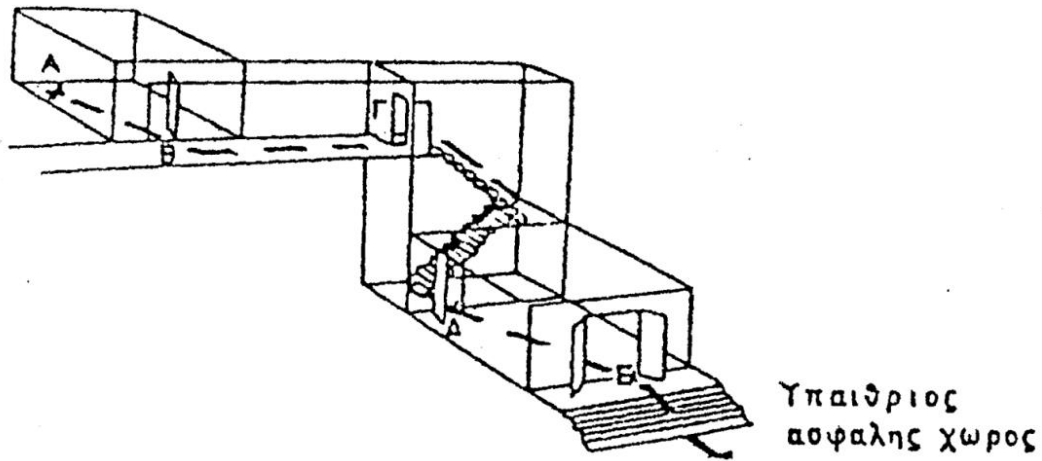
β): παροχή κλιμακοστασίων και ραμπών από υποκείμενους ορόφους ή επίπεδα

γ): παροχή από τον ίδιο όροφο ή επίπεδο εκκένωσης

Το ελάχιστο πλάτος των οδεύσεων διαφυγής ορίζεται σε 1.00 μέτρο, ενώ το ελάχιστο ελεύθερο πλάτος για τις πόρτες των οδεύσεων διαφυγής είναι 0.85 του μέτρου (Κανονισμός πυροπροστασίας κτιρίων, 2018).

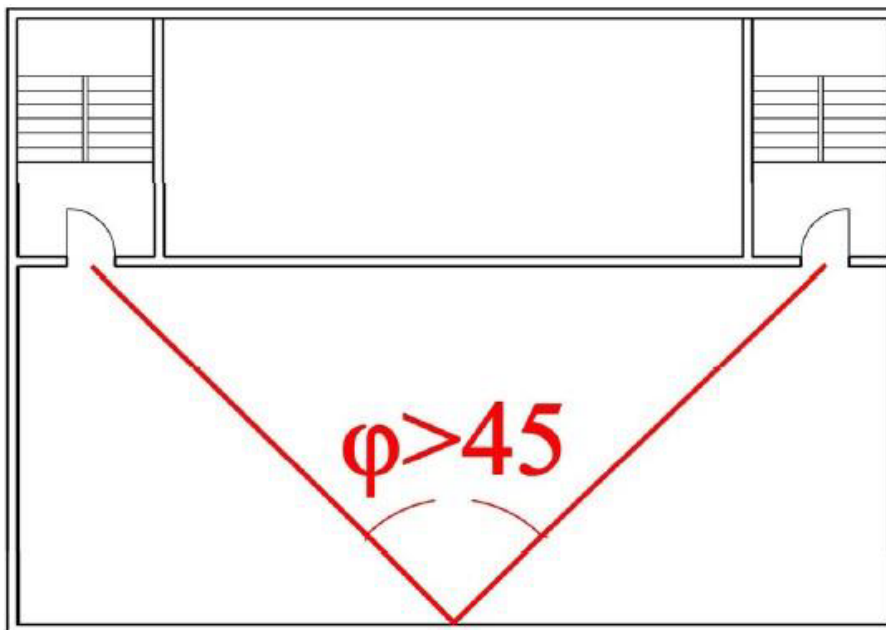
Μία όδευση διαφυγής απαρτίζεται από τρία ξεχωριστά και διακριτά μεταξύ τους στοιχεία:

- Το πρώτο στάδιο της όδευσης διαφυγής (ΑΒΓ στην Εικόνα 21) ονομάζεται απροστάτευτη όδευση διαφυγής και αφορά στην πορεία από ένα τυχόν σημείο του κτιρίου μέχρι ένα χώρο ασφαλή ή σχετικά ασφαλή, που μπορεί να είναι:
 - i. Μια τελική έξοδος προς υπαίθριο χώρο
 - ii. Μια έξοδος κινδύνου ορόφου προς μια πυροπροστατευμένη όδευση διαφυγής
 - iii. Μια οριζόντια έξοδος
- Το δεύτερο στάδιο ονομάζεται έξοδος κινδύνου, (ΓΔ στην Εικόνα 21) και αφορά στην πορεία από μια έξοδο κινδύνου (τέλος του πρώτου σταδίου), μέχρι την έξοδο στο επίπεδο του ορόφου εκκένωσης. Όλη αυτή η πορεία είναι πυροπροστατευμένη, περιβάλλεται δηλαδή από δομικά στοιχεία με προκαθορισμένο δείκτη πυραντίστασης. Το στάδιο αυτό, αποτελείται συνήθως από πυροπροστατευμένα κλιμακοστάσια (τμήμα ΓΔ), αλλά μερικές φορές μπορεί να συμπεριλαμβάνει και πυροπροστατευμένους οριζόντιους διαδρόμους (τμήμα ΒΓ) ή πυροπροστατευμένο προθάλαμο.
- Το τρίτο στάδιο της όδευσης διαφυγής, (ΔΕ στην Εικόνα 21) αποτελεί την οριζόντια όδευση διαφυγής προς την τελική έξοδο και την εκκένωση των ενοίκων σε χώρο απόλυτα ασφαλή, κοινόχρηστο δρόμο ή υπαίθρο. Είναι η συνέχεια των προστατευμένων οδεύσεων διαφυγής από τους υπέργειους (ή υπόγειους) ορόφους προς το εξωτερικό του κτιρίου και από κει, αν απαιτείται σε περιοχή ελεύθερη και ασφαλή. Η όδευση του τρίτου σταδίου μέσα στο κτίριο πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο σύντομη, ευθεία και πυροπροστατευμένη καθώς επίσης η τελική έξοδος ή έξοδοι πρέπει να τοποθετούνται κατάλληλα στην κάτοψη του κτιρίου, έτσι ώστε να είναι σαφής η κατεύθυνση διαφυγής προς το υπαίθρο (Κανονισμός πυροπροστασίας κτιρίων, 2018).



Εικόνα 21. Στάδια οδεύσεων διαφυγής [Πηγή: (Κανονισμός πυροπροστασίας κτιρίων, 2018)]

Τέλος, οι οδεύσεις διαφυγής από τυχόν σημείο ενός ανοικτού χώρου προς τις δύο εναλλακτικές εξόδους πρέπει να σχηματίζουν γωνία μεγαλύτερη των 45° , όπως φαίνεται στην Εικόνα 22, για να θεωρηθεί ότι αποτελούν δύο ξεχωριστές οδεύσεις (Κανονισμός πυροπροστασίας κτιρίων, 2018).



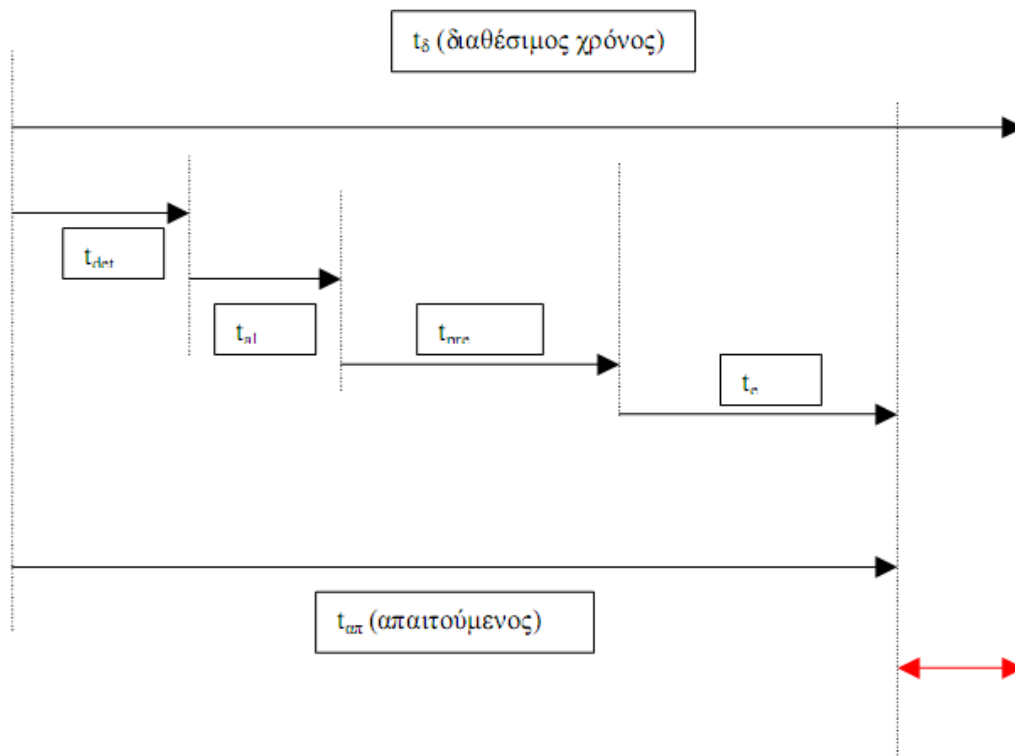
Εικόνα 22. Οι οδεύσεις διαφυγής σχηματίζουν γωνία μεγαλύτερη των 45° [Πηγή: (Κανονισμός πυροπροστασίας κτιρίων, 2018)]

Β.1.2. Διαδικασία εκκένωσης

Για να κριθεί επιτυχημένος ο σχεδιασμός μιας εκκένωσης, θα πρέπει να υπολογισθούν με ακρίβεια ορισμένοι κρίσιμοι παράγοντες έτσι ώστε να διασφαλιστεί προπαντός η ασφάλεια των ατόμων που καλούνται να εκκενώσουν έναν εκάστοτε χώρο ή κτίριο. Δύο τέτοιοι κρίσιμοι παράγοντες είναι ο προσδιορισμός του χρόνου που χρειάζεται για την εκκένωση του χώρου και τα προβλήματα συνωστισμού που μπορούν να δημιουργηθούν.

B.1.2.1. Προσδιορισμός των χρόνων εκκένωσης

Σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης, η εκκένωση κρίνεται ασφαλής μόνο σε περίπτωση όπου ο απαιτούμενος χρόνος εκκένωσης ($t_{απ}$) είναι μικρότερος από τον διαθέσιμο χρόνο εκκένωσης ($t_δ$). Συνεπώς το πιο σημαντικό στάδιο για την ολοκλήρωση του σχεδιασμού της εκκένωσης είναι ο προσδιορισμός των δύο παραπάνω χρόνων. Στην Εικόνα 23 παρουσιάζονται διαγραμματικά οι κύριοι χρόνοι εκκένωσης και οι συνιστώσες τους .



Εικόνα 23. Συνιστώσες χρόνων εκκένωσης [Πηγή: (Κυρίτσης, 2010)]

Στην Εικόνα 23 με κόκκινο χρώμα συμβολίζεται το περιθώριο ασφαλείας t_{safety} , δηλαδή ο χρόνος που απομένει από την ολοκλήρωση της εκκένωσης μέχρι οι συνθήκες στις εγκαταστάσεις να είναι ανυπόφορες. Ο χρόνος ασφαλείας δίνει το περιθώριο ασφαλείας για όλο το έργο σε περίπτωση ανάγκης εκκένωσης μετά από κάποιο έκτακτο συμβάν (Καλλιανιώτης Α. , 2015).

- **Προσδιορισμός διαθέσιμου χρόνου εκκένωσης ($t_δ$)**

Ο διαθέσιμος χρόνος εκκένωσης υπολογίζεται από τη στιγμή έναρξης του συμβάντος έκτακτης ανάγκης μέχρι τη στιγμή όπου οι συνθήκες στον χώρο θα είναι ανυπόφορες για τους ενοίκους (Harold E. “Bud” Nelson, 2002).

Για ένα υπόγειο έργο οι διαθέσιμοι χρόνοι εκκένωσης παρατίθενται στον Πίνακα 2:

Πίνακας 2. Διαθέσιμος χρόνος ανά περίπτωση ατυχήματος [Πηγή: (Κυρίτσης, 2010)]

Είδος ατυχήματος	Διαθέσιμος χρόνος (min)	
Φωτιά	Χωρίς ιδιαίτερη πρόληψη	15
	Με επιπλέον σύστημα αερισμού ανάγκης	30
	Με εσωτερικούς διαχωρισμούς	45
Διαρροή τοξικών ουσιών	Ύπαρξη μόνο ανιχνευτών	15
	Επιπλέον, με σύστημα αερισμού ανάγκης	30
Πλημμύρα - εισροή υδάτων	45	
Γενική απειλή (π.χ. βόμβα)	15-30	
Σεισμός	30	
Βλάβη συστήματος αερισμού	Εξαρτάται	

Σε περιπτώσεις φωτιάς, οι ένοικοι κατά τη διάρκεια της εκκένωσης καλούνται να αντιμετωπίσουν δύσκολες συνθήκες όπως είναι η παρουσία πυκνού καπνού, η εκπομπή τοξικών ουσιών παράγωγων της φωτιάς καθώς και η έντονη θερμική ακτινοβολία. Συνεπώς για έναν ακριβέστερο προσδιορισμό του t_{δ} απαιτείται ο υπολογισμός καμπυλών χρόνων συγκέντρωσης για καπνό, βασικά τοξικά προϊόντα και θερμότητα (CFPA - Europe, 2009).

Ένας τρόπος για την ακριβή χάραξη αυτών των καμπυλών είναι η θεώρηση υποθετικών σεναρίων εκδήλωσης φωτιάς, λαμβάνοντας υπ' όψη τη γεωμετρία του χώρου (όγκος, ύψος οροφής κ.α.) ή τη θεώρηση μιας φωτιάς σχεδιασμού. Όλοι οι υπολογισμοί των σεναρίων και της φωτιάς σχεδιασμού, έχουν σκοπό τον προσδιορισμό της κίνησης της φωτιάς, των συγκεντρώσεων των τοξικών παραγόντων, του καπνού και της θερμότητας. Αυτές οι παράμετροι συγκρίνονται με τα κριτήρια διαβίωσης μέσα στο χώρο που έχουν τεθεί αρχικά και προκύπτει ο διαθέσιμος χρόνος. Για τους σκοπούς αυτούς υπάρχουν λογισμικά προσομοίωσης που προβλέπουν τα αποτελέσματα εξάπλωσης φωτιάς σε συγκεκριμένο όγκο, ανάλογα με τα υλικά που βρίσκονται μέσα σε αυτά και ανάλογα με τα συστήματα πυρόσβεσης, αν υπάρχουν (Καλλιανιώτης Α. , 2015).

- **Υπολογισμός απαιτούμενου χρόνου εκκένωσης ($t_{\text{απ}}$)**

Ο απαιτούμενος χρόνος εκκένωσης ($t_{\text{απ}}$) ορίζεται ως το χρονικό διάστημα από τη στιγμή έναρξης του επικίνδυνου συμβάντος μέχρι τη στιγμή όπου ο τελευταίος ένοικος των εγκαταστάσεων θα φτάσει σε ασφαλές μέρος. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 23 ο $t_{\text{απ}}$ απαρτίζεται από τέσσερις ξεχωριστούς επιμέρους χρόνους οι οποίοι με τη σειρά τους εξαρτώνται από τις διαθέσιμες διατάξεις ασφαλείας, σε συνάρτηση με τα ατομικά χαρακτηριστικά των ενοίκων και τη συμπεριφορά τους (Καλλιανιώτης Α. , 2015).

Με άλλα λόγια ισχύει:

$$t_{\text{απ}} = t_{\text{det}} + t_{\text{ai}} + t_{\text{pre}} + t_{\text{oe}}$$

Όπου,

t_{det} : Ο χρόνος εντοπισμού

t_{ai} : Ο χρόνος συναγερμού

t_{pre} : Ο χρόνος πριν τη μετακίνηση των ενοίκων

t_{e} : Ο χρόνος κίνησης για εκκένωση

Χρόνος Εντοπισμού t_{det} :

Σε ένα αυτόματο σύστημα ο χρόνος εντοπισμού μιας φωτιάς ή μιας διαρροής εξαρτάται από την ευαισθησία του συστήματος, οπότε αυτός ο χρόνος μπορεί να προκύψει από τις

προδιαγραφές του συστήματος χωρίς περαιτέρω μελέτη. Αν δεν υπάρχει τέτοιο σύστημα στο χώρο, ο χρόνος εντοπισμού μπορεί να εξαχθεί από το σχεδιασμό των σεναρίων πυρκαγιάς. Κάποια χαρακτηριστικά που μπορεί να επηρεάσουν το χρόνο εντοπισμού είναι τα παρακάτω:

- Χαρακτηριστικά ενοίκων, όπως η ικανότητα αντίληψης
- Χαρακτηριστικά εγκατάστασης
- Χαρακτηριστικά φωτιάς, όπως η ταχύτητα εξάπλωσης, καπνός κ.α.

Για υπόγειους χώρους που έχουν κατασκευαστεί με τη μέθοδο θαλάμων και στύλων, υπάρχουν περιοχές μειωμένης αντίληψης και ο χρόνος εντοπισμού κάποιας βλάβης ή συμβάντος από τον άνθρωπο αυξάνεται. Γενικά ο χρόνος εντοπισμού παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3. Χρόνοι t_{det} ανά κατηγορία συστήματος ανίχνευσης [Πηγή: (Καλλιανιώτης Α. , 2015)]

Κατηγορία συστήματος	Χρόνος εντοπισμού (min)
Αυτόματο σύστημα ανίχνευσης	1
Απουσία αυτόματου συστήματος ανίχνευσης	2

Χρόνος συναγερμού t_{al} :

Ο χρόνος συναγερμού εξαρτάται αφενός από το σχεδιασμό του σχεδίου εκκένωσης και τον τρόπο που προβλέπει την εκπομπή του σήματος εκκένωσης, και αφετέρου από το σχεδιασμό αντίδρασης του συστήματος ανίχνευσης. Στον Πίνακα 4 παρατίθενται ορισμένοι πρότυποι χρόνοι συναγερμού (t_{al}) ανά κατηγορία συστήματος συναγερμού.

Πίνακας 4. Χρόνοι t_{al} ανά κατηγορία συστήματος συναγερμού [Πηγή: (Καλλιανιώτης Α. , 2015)]

Κατηγορία συστήματος συναγερμού	Χρόνος συναγερμού (min)
Κατηγορία 1	1
Κατηγορία 2	2-5
Κατηγορία 3	Πλειοψηφία μόνιμων ενοίκων: min 5
	Πλειοψηφία επισκεπτών: min 6

Εγκαταστάσεις που περιλαμβάνουν σύστημα που οι αισθητήρες είναι ρυθμισμένοι να εντοπίζουν θερμότητα, τοξικές ουσίες, καπνό και μεταφέρουν τα δεδομένα σε κεντρικό υπολογιστή, όπου λαμβάνεται η απόφαση εκκένωσης βάση λογισμικού ανήκουν στην κατηγορία 1. Επίσης, ο χρόνος που μεσολαβεί από τον εντοπισμό μέχρι το συναγερμό είναι μηδενικός.

Στους χώρους κατηγορίας 2 υπάρχει σύστημα ανίχνευσης, αλλά ο γενικός συναγερμός και η ειδοποίηση για εκκένωση δεν ακολουθεί άμεσα, καθώς μια ειδοποίηση κατευθύνεται πρώτα στο κέντρο ελέγχου και ανάλογα με τη στρατηγική του σχεδίου εκκένωσης για κάθε περίπτωση γίνεται αξιολόγηση και δίνεται ή όχι το σήμα γενικού συναγερμού εκκένωσης.

Τέλος, στην κατηγορία 3, το σύστημα συναγερμού δίνεται χειροκίνητα από τοπικό χειριστήριο κοντά στο συμβάν, από κάποιο άνθρωπο στο χώρο που το αντιλαμβάνεται, με αποτέλεσμα το εύρος του χρόνου που απαιτείται να ποικίλει ως προς το είδος των εργαζομένων και των ενοίκων γενικότερα (ηλικία, εκπαίδευση, μόνιμος ή επισκέπτης του χώρου) (Καλλιανιώτης Α. , 2015).

Για να μειωθεί ο χρόνος ανταπόκρισης των ενοίκων στο σύστημα συναγερμού στο ελάχιστο, θα πρέπει να λάβουν χώρα οι παρακάτω δράσεις (Καλλιανιώτης Α. , 2015):

- Το εγκατεστημένο σύστημα πρέπει να προσφέρει συγκεκριμένες οδηγίες ανάλογα με τον τύπο συναγερμού
- Η σήμανση του συναγερμού πρέπει να ακολουθείται με φωνητικές οδηγίες για να αποσπάσουν την προσοχή των ενοίκων

- Μαγνητοφωνημένα μηνύματα πρέπει να χρησιμοποιούνται ανάλογα με τον τύπο του συναγερμού
- Πρέπει να γίνεται ειδοποίηση εκείνων των ενοίκων-εργαζομένων που είναι επιφορτισμένοι με την εκκένωση, ώστε αυτοί να αναλάβουν δράση σε ειδικούς χώρους, όπως είναι οι υπόγειοι.

Χρόνος πριν τη μετακίνηση t_{pre} :

Μέχρι πρόσφατα, οι περισσότεροι ερευνητές που μελετούσαν την ανθρώπινη συμπεριφορά κατά την εκκένωση ήταν διστακτικοί στο να καταλήγουν σε ποσοτικά και αριθμητικά δεδομένα λόγω των περιορισμένων ερευνών στο αντικείμενο αυτό. Παρ' όλα αυτά λόγω της αυξανόμενης ανάγκης για όλο και πιο ασφαλή σχέδια εκκένωσης πραγματοποιήθηκαν έρευνες που υπολογίζουν ποσοτικά τον χρόνο πριν τη μετακίνηση των ενοίκων κατά την εκκένωση, ή αλλιώς τον χρόνο καθυστέρησης κίνησης των ενοίκων (Movement of People: The Evacuation Timing, 2002).

Ο Πίνακας 5 παρουσιάζει τον χρόνο πριν τη μετακίνηση (t_{pre}) για διάφορες εγκαταστάσεις ανάλογα με το σύστημα συναγερμού που είναι εγκατεστημένο την κάθε φορά.

Πίνακας 5. Χρόνοι t_{pre} ανά κατηγορία συστήματος συναγερμού [Πηγή: (Movement of People: The Evacuation Timing, 2002)]

Τύπος εγκατάστασης	Σ1 (min)	Σ2 (min)	Σ3 (min)
Γραφεία, εμπορικά και βιομηχανικά κτίρια, σχολεία, κολλέγια, πανεπιστημιακά ιδρύματα	< 1	3	> 4
Μαγαζιά, μουσεία, κέντρα άθλησης, χώροι συνάθροισης	< 2	3	> 6
Κατοικίες, κοιτώνες	< 2	4	> 5
Ξενοδοχεία	< 2	4	> 6
Νοσοκομεία, χώροι νοσηλείας	< 3	5	> 8

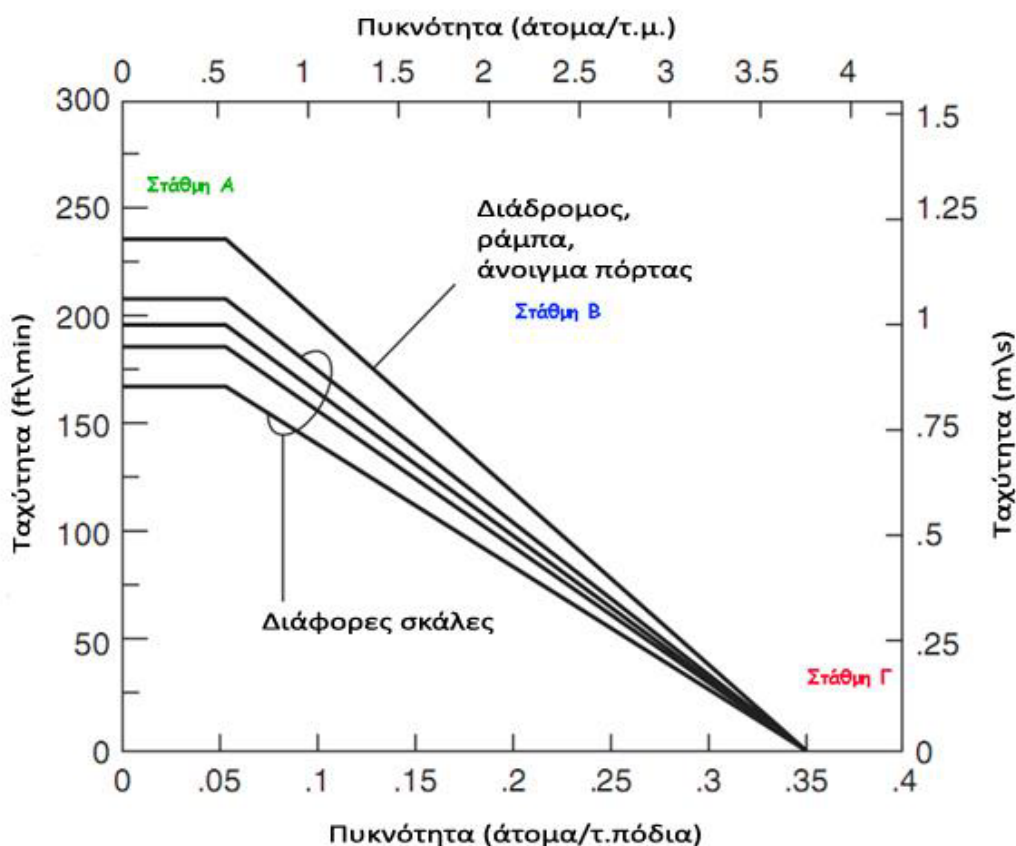
Οι κατηγορίες Σ1, Σ2, Σ3 στον Πίνακα 5 έχουν να κάνουν με το σύστημα συναγερμού και τα χαρακτηριστικά του. Συγκεκριμένα (Movement of People: The Evacuation Timing, 2002):

- Κατηγορία Σ1: παρέχονται σε πραγματικό χρόνο οδηγίες χρησιμοποιώντας φωνητικά μηνύματα από το κέντρο ελέγχου, που είναι εξοπλισμένο με κλειστό κύκλωμα παρακολούθησης, ή οδηγίες σε συνδυασμό με καλά εκπαιδευμένα μέλη προσωπικού με διακριτικά, που κατευθύνουν τον κόσμο
- Κατηγορία Σ2: δίνονται μαγνητοφωνημένα μηνύματα σε συνδυασμό με βίντεο οδηγιών από εκπαιδευμένο προσωπικό
- Κατηγορία Σ3: σύστημα συναγερμού και σειρήνες με προσωπικό χωρίς σχετική εκπαίδευση

Χρόνος κίνησης για εκκένωση t_e :

Ο χρόνος αυτός επηρεάζεται από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του χώρου (πλάτος οδούσεων διαφυγής, μήκος διαδρομής, πλάτος εξόδων, είδος σκάλας, ραμπών κ.α.) καθώς επίσης από την ταχύτητα κίνησης και την πυκνότητα των ενοίκων στο χώρο. Στην Εικόνα 24

παρουσιάζεται διαγραμματικά η συσχέτιση της ταχύτητας κίνησης με την πυκνότητα των ενοίκων.



Εικόνα 24. Ταχύτητες κίνησης κατά τη διαδικασία εκκένωσης συναρτήσει της πυκνότητας [Πηγή: (Harold E. "Bud" Nelson, 2002)]

Με βάση την Εικόνα 24 παρατηρούνται τρεις στάθμες εξυπηρέτησης ως εξής (Καλλιανιώτης Α., 2015):

A: Κίνηση πεζών χωρίς καμία επιρροή μεταξύ τους και καμία αλληλεπίδραση μεταξύ του προσωπικού χώρου του κάθε πεζού

B: Κίνηση πεζών μέχρι το όριο όπου υπάρχει ανεκτικότητα μεταξύ τους και τα όρια των προσωπικών τους χώρων είναι ελάχιστα

Γ: Υπάρχει έντονος συνωστισμός, ενδεχομένως να γίνεται κάποια κίνηση, αλλά θεωρείται μηδενική

Επιπλέον όπως φαίνεται στην Εικόνα 24, αν η πυκνότητα του πληθυσμού είναι μικρότερη από 0,54 άτομα/m², τότε οι ένοικοι θα κινούνται με τη δική τους ταχύτητα, ανεξαρτήτως της κίνησης των γειτονικών ατόμων. Στην περίπτωση αυτή, η μέγιστη ταχύτητα κατά την ανεμπόδιση κίνηση των ενοίκων τόσο σε οριζόντιο επίπεδο όσο και σε σκάλες παρατίθεται στον Πίνακα 6.

Πίνακας 6. Μέγιστη ταχύτητα ανεμπόδιση κίνησης [Πηγή: (Harold E. "Bud" Nelson, 2002)]

Στοιχείο όδευσης διαφυγής		Μέγιστη ταχύτητα ανεμπόδιση κίνησης	
		(ft/min)	(m/s)
Διάδρομοι, ράμπες, πόρτες		235	1.19
Σκάλες			
Ύψος σκαλοπατιού (in)	Πλάτος σκαλοπατιού (in)		
7.5	10	167	0.85

7	11	187	0.95
6.5	12	196	1
6.5	13	207	1.05

Αν η πυκνότητα ξεπερνά τα 3,8 άτομα/m², τότε δεν παρατηρείται καμία κίνηση μέχρι τη στιγμή που ικανός αριθμός ατόμων θα φύγει από την πυκνή περιοχή και θα μειωθεί η τοπική πυκνότητα.

Τέλος, μεταξύ των πυκνοτήτων 0,54 και 3,8 άτομα/m², η σχέση μεταξύ ταχύτητας και πυκνότητας είναι μια γραμμική εξίσωση (Harold E. "Bud" Nelson, 2002):

$$S = k - akD \quad (\text{Εξίσωση 1})$$

Όπου,

S: Η ταχύτητα κατά τη διεύθυνση της διαδρομής

D: Η πυκνότητα των ατόμων ανά μονάδα επιφάνειας

K: Μια σταθερά, στους πίνακες θα δίνεται k₁ για ταχύτητα σε (ft/min) και k₂ για ταχύτητα σε (m/s) για να αποφευχθεί η σύγχυση, αλλά και τα δύο αναφέρονται στο k της (Εξίσωσης 1)

a: 2,86 για ταχύτητα σε (ft/min) και 0,266 για ταχύτητα σε (m/s)

Στον Πίνακα 7 παρατίθενται οι τιμές που δύνανται να πάρει η σταθερά k της (Εξίσωσης 1) για κάθε στοιχείο μιας όδευσης διαφυγής.

Πίνακας 7. Σταθερά k [Πηγή: (Harold E. "Bud" Nelson, 2002)]

Στοιχείο όδευσης διαφυγής		k ₁ (ft/min)	k ₂ (m/s)
Διάδρομος, ράμπα, πόρτα		275	1.4
Σκάλες			
Ύψος σκαλοπατιού (in)	Πλάτος σκαλοπατιού (in)		
7.5	10	196	1
7	11	212	1.08
6.5	12	229	1.16
6.5	13	242	1.23

Για τον προσδιορισμό της ταχύτητας κίνησης των ΑμεΑ, πραγματοποιήθηκε μια μελέτη στη Β. Ιρλανδία κατά την οποία μία ομάδα 155 ατόμων με αναπηρία κλήθηκε να εκκενώσει 5 κέντρα φροντίδας. Από αυτά τα άτομα, τα 121 μπορούσαν να κινηθούν χωρίς κάποια βοήθεια ενώ τα υπόλοιπα 34 ζήτησαν βοήθεια προκειμένου να κινηθούν κατά τη διάρκεια της μελέτης αυτής. Επιπλέον, 6 από τα άτομα αυτά δεν ήταν ΑμεΑ. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης παρατίθενται στον Πίνακα 8.

Πίνακας 8. Ταχύτητα κίνησης ΑμεΑ σε οριζόντια επιφάνεια [Πηγή: (Movement of People: The Evacuation Timing, 2002)]

Κατηγορία δυσλειτουργίας κίνησης (αριθμός)	Μέση ταχύτητα (m/s)	Τυπική απόκλιση (m/s)	Εύρος (m/s)	Ενδοτεταρτομοριακό εύρος (m/s)
Με κινητικό πρόβλημα (n=101)	0.80	0.37	0.10 – 1.68	0.57 – 1.02
Κίνηση χωρίς κάποια βοήθεια (n=52)	0.95	0.32	0.24 – 1.68	0.70 – 1.02
Κίνηση με πατερίτσες (n=6)	0.94	0.30	0.63 – 1.35	0.67 – 1.24

Κίνηση με βοηθητικό μπαστούνι (n=33)	0.81	0.38	0.26 – 1.60	0.49 – 1.08
Κίνηση με χρήση Π (n=10)	0.57	0.29	0.10 – 1.02	0.34 – 0.83
Κίνηση χωρίς κάποια αναπηρία (n=6)	1.25	0.32	0.82 – 1.77	1.05 – 1.34
Κίνηση με ηλεκτρικό αμαξίδιο (n=2)	0.89	-	0.85 – 0.93	-
Κίνηση με χειροκίνητο αμαξίδιο (n=12)	0.69	0.35	0.13 – 1.35	0.38 – 0.94
Κίνηση με χειροκίνητο αμαξίδιο και βοήθεια άλλου ατόμου (n=16)	1.30	0.34	0.84 – 1.98	1.02 – 1.59
Με ιατρική βοήθεια (n=18)	0.78	0.34	0.21 – 1.40	0.58 – 0.92

Στη συνέχεια, 30 άτομα, εκ των οποίων 8 δεν ήταν ΑμεΑ, από το δείγμα της παραπάνω μελέτης κλήθηκαν να ανεβοκατεβούν σκάλες και μετρήθηκε η ταχύτητά τους. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 9.

Πίνακας 9. Ταχύτητα κίνησης ΑμεΑ σε σκάλες [Πηγή: (Movement of People: The Evacuation Timing, 2002)]

Κατηγορία δυσλειτουργίας κίνησης (αριθμός)	Μέση ταχύτητα (m/s)	Τυπική απόκλιση (m/s)	Εύρος (m/s)	Ενδοτεταρτομοριακό εύρος (m/s)
Άνοδος				
Με αναπηρία κίνησης (n=30)	0.38	0.14	0.13 – 0.62	0.26 – 0.52
Κίνηση χωρίς κάποια βοήθεια (n=19)	0.43	0.13	0.14 – 0.62	0.35 – 0.55
Κίνηση με πατερίτσες (n=1)	0.22	-	0.13 – 0.31	0.26 – 0.45
Κίνηση με βοηθητικό μπαστούνι (n=9)	0.35	0.11	0.18 – 0.49	-
Κίνηση με χρήση Π (n=1)	0.14	-	-	-
Κίνηση χωρίς κάποια αναπηρία (n=8)	0.70	0.24	0.55 – 0.82	0.55 – 0.78
Κάθοδος				
Με αναπηρία κίνησης (n=30)	0.33	0.16	0.11 – 0.70	0.22 – 0.45
Κίνηση χωρίς κάποια βοήθεια (n=19)	0.36	0.14	0.13 – 0.70	0.20 – 0.47
Κίνηση με πατερίτσες (n=1)	0.22	-	-	-
Κίνηση με βοηθητικό μπαστούνι (n=9)	0.32	0.12	0.11 – 0.49	0.24 – 0.46
Κίνηση με χρήση Π (n=1)	0.16	-	-	-

Κίνηση χωρίς κάποια αναπηρία (n=8)	0.70	0.26	0.45 – 1.10	0.53 – 0.90
------------------------------------	------	------	-------------	-------------

B.1.3. Προσδιορισμός κανονισμών εκκένωσης

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται οι κανονισμοί που πρέπει να ακολουθούνται ώστε να δημιουργηθεί ένας χώρος ο οποίος θα μπορεί να προσφέρει ασφαλείς συνθήκες σε πιθανή περίπτωση άμεσης εκκένωσής του. Συγκεκριμένα, αναφέρονται οι κανονισμοί και προδιαγραφές που έχουν άμεση σχέση με την τοποθέτηση των εξόδων διαφυγής στο χώρο. Οι πληροφορίες αντλήθηκαν τόσο από τον Κανονισμό Πυροπροστασίας Κτιρίων του Πυροσβεστικού Σώματος Ελλάδος, που είναι η μοναδική πηγή πληροφοριών και υποχρεώσεων στον Ελλαδικό χώρο για την δημιουργία οποιουδήποτε είδους και χρήσης κτιρίου, όσο και από διεθνείς κανονισμούς όπως ο NFPA 101 Life Safety Code Handbook ή ο NFPA 520 που αναφέρεται στους υπόγειους χώρους.

B.1.3.1. Χωρητικότητα των μέσων εξόδου

Η συνολική χωρητικότητα των μέσων εξόδου για κάθε όροφο, μπαλκόνι, ή άλλο κατεχόμενο χώρο, πρέπει να είναι επαρκής για το φορτίο των επιβατών αυτών. Σε περιπτώσεις όπου περισσότερες από μία οδεύσεις διαφυγής απαιτούνται, θα πρέπει η μέγιστη χωρητικότητα της κάθε οδεύσεως διαφυγής να είναι μεγαλύτερη από το 50% της μέγιστης χωρητικότητας του ευρύτερου χώρου σε περίπτωση που κάποια από τις υπόλοιπες οδεύσεις διαφυγής γίνει μη διαθέσιμη κατά τη διάρκεια της εκκένωσης.

Το φορτίο των χρηστών δεν πρέπει να είναι μικρότερο από τον αριθμό των ατόμων που καθορίζεται διαιρώντας το εμβαδόν του ορόφου που αντιστοιχεί στην εν λόγω χρήση με τον συντελεστή φορτίου των χρηστών για τη συγκεκριμένη χρήση. Στον Πίνακα 17 δίνεται ο συντελεστής φορτίου ανάλογα με τη χρήση του χώρου. Το κανονικό φορτίο των χρηστών δεν είναι απαραίτητα κατάλληλο κριτήριο, διότι ο μεγαλύτερος κίνδυνος μπορεί να συμβεί όταν ένα ασυνήθιστα μεγάλο πλήθος είναι παρών, που είναι μια δύσκολη κατάσταση για τις αρμόδιες αρχές. Στις περιπτώσεις αυτές, όπου δηλαδή το πλήθος των ατόμων που είναι παρόντες σε ένα χώρο μια δεδομένη χρονικά στιγμή ξεπερνά τον θεωρητικό πληθυσμό του χώρου αυτού, οι αρμόδιες αρχές έχουν την ευθύνη ώστε ο συγκεκριμένος χώρος να μπορεί να συμπεριλάβει τέτοιες πληθυσμιακές αυξήσεις τηρώντας ταυτόχρονα τους κανονισμούς ασφαλείας (G.E. Harrington, 2018).

Ένα ακόμα πολύ σημαντικό μέγεθος για τον σχεδιασμό και την ανάλυση μιας εκκένωσης, είναι η φέρουσα ικανότητα των επιμέρους στοιχείων μίας οδεύσεως διαφυγής. Στον Πίνακα 10 παρουσιάζονται οι συντελεστές χωρητικότητας για τα στοιχεία αυτά.

Πίνακας 10. Συντελεστές χωρητικότητας [Πηγή: (G.E. Harrington, 2018)]

Κατηγορία κτιρίου	Σκάλες (πλάτος ανά άτομο)		Πόρτες, διάδρομοι, ράμπες ενός ορόφου (πλάτος ανά άτομο)	
	in.	mm.	in.	mm.
Κτίριο διαμονής ηλικιωμένων	0.4	10	0.2	5
Κτίριο νοσηλείας με αυτόματη πυρόσβεση	0.3	7.6	0.2	5
Κτίριο νοσηλείας χωρίς αυτόματη πυρόσβεση	0.6	15	0.5	13
Κτίριο αποθήκευσης επικίνδυνων υλικών	0.7	18	0.4	10
Όλα τα υπόλοιπα	0.3	7.6	0.2	5

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι ο υπόγειος χώρος του Λαυρίου εντάσσεται στην κατηγορία “Όλα τα υπόλοιπα” του Πίνακα 10 και όχι στην κατηγορία των κτιρίων αποθήκευσης επικίνδυνων υλικών καθώς κρίνεται πως δεν έχει έντονο πυροθερμικό φορτίο.

B.1.3.2. Αριθμός μέσων εξόδου

Σε κάθε κτίριο οι έξοδοι κινδύνου πρέπει να τοποθετούνται σε θέσεις σαφώς αντιληπτές από τους ενοίκους έτσι ώστε η πορεία διαφυγής να είναι προφανής και πραγματοποιήσιμη (Κανονισμός πυροπροστασίας κτιρίων, 2018).

Σύμφωνα με τους διεθνείς κανονισμούς ένας οποιοσδήποτε χώρος θα πρέπει να έχει τουλάχιστον δύο οδεύσεις διαφυγής, έτσι ώστε να επιτρέπεται η άμεση εκκένωση των παρευρισκόμενων στο χώρο σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης, ακόμα και σε περίπτωση που μία από τις οδεύσεις διαφυγής κριθεί ακατάλληλη και επικίνδυνη για χρήση κατά τη διάρκεια της εκκένωσης.

Πιο συγκεκριμένα, ανάλογα με το φορτίο των χρηστών ο αριθμός των μέσων εξόδου προκύπτει ως εξής (G.E. Harrington, 2018):

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

Προσβάσιμα μέσα εξόδου που δεν χρησιμοποιούν ανελκυστήρες, επιτρέπεται να χρησιμεύσουν και να λειτουργούν ως μέρος του ελάχιστου απαιτούμενου αριθμού των μέσων εξόδου ή να αποτελούν το συνολικό σύστημα του ελάχιστου απαιτούμενου αριθμού των μέσων εξόδου.

Το φορτίο των χρηστών κάθε ορόφου μεμονωμένα θα πρέπει να χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του αριθμού των μέσων εξόδου σε κάθε όροφο, διασφαλίζοντας ότι ο απαιτούμενος αριθμός των μέσων εξόδου δε μειώνεται στην κατεύθυνση της διαδρομής εκκένωσης (G.E. Harrington, 2018).

B.1.3.3. Ενεργό πλάτος όδευσης διαφυγής

Κατά τη διάρκεια σχεδιασμού και μελέτης μιας εκκένωσης, είναι ιδιαίτερα κρίσιμος ο προσδιορισμός του πλάτους μίας όδευσης διαφυγής καθώς και όλων των επιμέρους στοιχείων που την απαρτίζουν. Γνωρίζοντας όλα τα επιμέρους πλάτη μιας όδευσης διαφυγής μπορεί κανείς να υπολογίσει στη συνέχεια και τον μέγιστο πληθυσμό ατόμων που μπορεί να εξυπηρετήσει η όδευση αυτή.

Στο σημείο αυτό πρέπει σημειωθεί ότι για να προσδιοριστεί ο μέγιστος πληθυσμός ατόμων που μπορεί να εξυπηρετήσει μια όδευση διαφυγής χρησιμοποιείται η έννοια του ενεργού πλάτους και όχι του καθαρού ή πλασματικού πλάτους της όδευσης διαφυγής.

Καθαρό πλάτος ονομάζουμε:

- Την απόσταση από τοίχο σε τοίχο αν πρόκειται για διαδρόμους ή ράμπες
- Το μήκος του σκαλοπατιού αν πρόκειται για σκάλες
- Το πραγματικό άνοιγμα μιας πόρτας

Πιο συγκεκριμένα, καθώς τα άτομα διασχίζουν μία όδευση διαφυγής ή τα επιμέρους στοιχεία της, όπως διάδρομοι, ράμπες, σκάλες ή πόρτες, δεν αξιοποιούν πλήρως το καθαρό πλάτος των στοιχείων αυτών καθώς είτε μπορεί να συναντήσουν σταθερά εμπόδια κατά τη διαδρομή τους, όπως κάθε είδους έπιπλα, είτε απλά διατηρούν μια απόσταση ασφαλείας από τα γύρω τοιχώματα της πορείας τους.

Έτσι κρίνεται αναγκαίο να οριστεί ένα νέο μέγεθος που προκύπτει αν αφαιρέσεις από το καθαρό πλάτος το όριο όδευσης, το οποίο ονομάζεται ενεργό πλάτος (Harold E. “Bud” Nelson, 2002).

Δηλαδή, το ενεργό πλάτος προκύπτει από την παρακάτω σχέση:

$$W_e = W_c - B \quad \text{Εξίσωση 2}$$

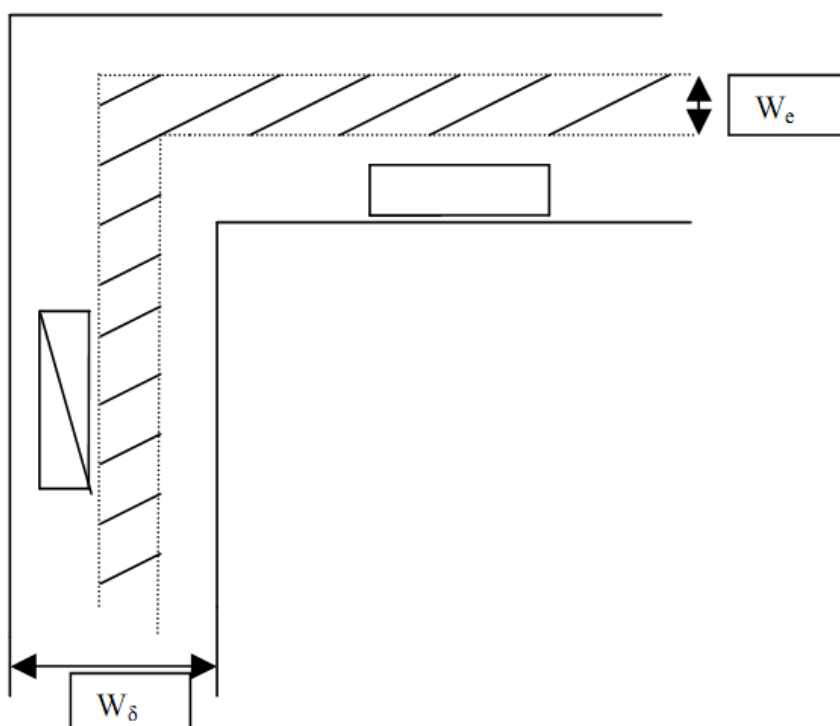
Όπου,

W_e : το ενεργό πλάτος

W_c : το καθαρό πλάτος

B : το όριο όδευσης

Στην Εικόνα 25 παρουσιάζονται το καθαρό πλάτος (W_c) και το ενεργό πλάτος (W_e) ενός διαδρόμου υπόγειου χώρου καθώς και εμπόδια τα οποία μπορεί να αξιοποιούνται για στάθμευση κάποιου μηχανήματος ή για προσωρινή αποθήκευση.



Εικόνα 25. Ενεργό πλάτος σε σχέση με πλάτος διαδρόμου λόγω εμποδίων [Πηγή: (Καλλιανιώτης Α. , 2015)]

Στον Πίνακα 11 παρατίθενται τα όρια όδευσης για τα επιμέρους στοιχεία που μπορεί να απαρτίζουν μία όδευση διαφυγής.

Πίνακας 11. Πλάτη ορίων όδευσης [Πηγή: (Harold E. "Bud" Nelson, 2002)]

Στοιχείο όδευσης διαφυγής	Όριο όδευσης	
	in	cm
Σκάλες	6	15
Κιγκλιδώματα	3.5	9
Θέσεις θεάτρου, πάγκοι σταδίων	0	0
Διάδρομοι, ράμπες	8	20
Εμπόδια	4	10
Ευρείες αίθουσες	<18	46
Πόρτες, αψιδωτές πύλες	6	15

B.2. Μοντέλα εκκένωσης

Για να επιτευχθεί η βελτιστοποίηση ενός σχεδιασμού εκκένωσης οι μηχανικοί ασφαλείας χρησιμοποιούν όλο και περισσότερο μοντέλα εκκένωσης σε υπολογιστές. Αυτή τη στιγμή υπάρχει μια σειρά από μοντέλα εκκένωσης που μπορεί να επιλέξει κάποιος, με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και λειτουργίες το καθένα. Τα μοντέλα αυτά μπορεί να περιορίζονται στο να παρέχουν μια αποτελεσματική χρήση των "χειροκίνητων υπολογισμών" ή μπορεί ακόμα να περιλαμβάνουν σύνθετες εξισώσεις και προσομοίωση συμπεριφοράς των ενοίκων. Κάποια από τα μοντέλα αυτά προσομοιάζουν εκκενώσεις διαφόρων εγκαταστάσεων παρόλα αυτά τα περισσότερα μοντέλα εκκένωσης επικεντρώνονται στην προσομοίωση εκκένωσης κτιρίων (Erica D. Kuligowski, 2010).

Ο Πίνακας 12 περιλαμβάνει τα πιο διαδεδομένα μοντέλα εκκένωσης.

Πίνακας 12. Μοντέλα εκκένωσης και τα κύρια χαρακτηριστικά τους

Μοντέλο	Διαθέσιμο στο κοινό	Μέθοδος Μοντελοποίησης	Σκοπός	Δομή/ Πλέγμα	Προοπτική	Συμμεριφορά	Μετακίνηση	Δεδομένα πυρκαγιάς	CAD	Οπτική παρουσίαση	Εγκυρότητα
EVACNET4	Y	M-O	1	C	G	N	UC	N	N	N	FD
WAYOUT	Y	M	5	C	G	N	D	N	N	2-D	FD
STEPS ^c	Y	B	1	F	I	C, P	P, E	Y1,2	Y	2,3-D	C, FD, PE
PEDROUTE	Y	PB	3	C	G	I	D	N	Y	2,3-D	N
Simulex ^b	Y	PB	1	Co.	I	I	ID	N	Y	2-D	FD, PE, 3P
GridFlow	Y	PB	1	Co.	I	I	D	N	Y	2,3-D	FD, PE
FDS+Evac ^c	Y	PB	1	Co.	I	I, C, P	ID	Y3	N/Y	2,3-D	FD, PE, OM
Pathfinder 2009 ^c	Y	PB	1	Co.	I/G	I	D, ID	N	Y	2,3-D	C, FD, PE, OM
SimWalk ^c	Y	PB	1,3	Co.	I	C, P	P	N	Y	2,3-D	FD, PE, 3P
PEDFLOW ^c	Y	B	1	Co.	I	C, P	ID	Y2	Y	2,3-D	PE
PedGo ^c	Y, N1	PB/B	1	F	I/I, G	I/C, P	P, E (CA), C	Y2	Y	2,3-D	FD, PE, OM, 3P
ASERI ^c	Y	B-RA	1	Co.	I	C, P	ID	Y1,2	Y	2,3-D	FD, PE
BldEXO ^b	Y	B	1	F	I	C, P	P, E	Y1,2	Y	2,3-D	FD, PE, OM, 3P
Legion ^c	Y, N1	B	1	Co.	I	AI, P	ID, C	Y1	Y	2,3-D	C, FD, PE, 3P
SpaceSensor ^c	Y	B	3	Co.	I	C, P	C, Ac_K	N	Y	2,3-D	FD, OM
EPT ^c	Y, N1	B	1	F	I	AI	UC, C	Y2	Y	2,3-D	FD
Myriad II ^c	Y, N1	B	1	C, F, Co.	I	AI	D, UC, IP, Ac_K	Y1	Y	2,3-D	PE, 3P
MassMotion ^c	Y, N1	B	1	Co.	I/I, G	AI, P	C	N	Y	2,3-D	C, FD, PE, OM
PathFinder	N1	M	1	F	I/G	N	D	N	Y	2-D	N
ALLSAFE	N1	PB	5	C	G	I	Un_F	Y1,2	N	2-D	OM
CRISP	N1	B-RA	1	F	I	C, P	E, D	Y3	Y	2,3-D	FD
EGRESS 2002	N1	B	1	F	I	C, P	P, D (CA)	Y2	N	2-D	FD
SGEM ^c	N1	PB	1	Co.	I	I	D	N	Y	2-D	FD, OM
EXIT89 ^c	N2	PB	1	C	I	I/C, P	D	Y1	N	N	FD, 3P
MASSEgress ^b	N2	B	1	Co.	I	C, AI	C	N	Y	2,3-D	PE, OM
EvacuationNZ ^c	N2	B	1	C	I/I, G	I, C, P	D, UC	Y2	Y	2-D	FD, PE, OM

Τα μοντέλα εκκένωσης που παρατίθενται στον Πίνακα 12 κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με τα εξής κύρια χαρακτηριστικά (Erica D. Kuligowski, 2010):

- Διαθεσιμότητα μοντέλου στο κοινό
- Μέθοδος μοντελοποίησης

- Σκοπός μοντέλου
- Τύπος πλέγματος / Δομή μοντέλου
- Προοπτική μοντέλου και ενοίκων
- Συμπεριφορά ανθρώπων - ενοίκων
- Κίνηση των ενοίκων
- Ενσωμάτωση δεδομένων σε μοντέλο προσομοίωσης πυρκαγιάς
- Συνεργασία με ψηφιακά τεχνικά σχέδια (CAD)
- Μέθοδοι οπτικοποίησης
- Μέθοδοι επικύρωσης-εγκυρότητας

Διαθεσιμότητα μοντέλου

Στον Πίνακα 12, τα μοντέλα που είναι διαθέσιμα στο κοινό δωρεάν ή με κάποιο κόστος αγοράς επισημαίνονται με ένα **[Y]**, τα μοντέλα που είναι διαθέσιμα μέσω της εταιρείας ανάπτυξης και μόνο τα αποτελέσματα τους παρέχονται στον χρήστη με συμβουλευτικό χαρακτήρα είναι επισημασμένα με **[N1]**, και τα μοντέλα που δεν έχουν κυκλοφορήσει για εμπορική χρήση, είναι χαρακτηρισμένα με **[N2]**.

Μέθοδος μοντελοποίησης

Αυτή η κατηγορία περιγράφει τη μέθοδο της μοντελοποίησης που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των χρόνων εκκένωσης των κτιρίων. Σύμφωνα με την κατηγορία μοντελοποίησης, στα μοντέλα έχει αποδοθεί μία από τις ακόλουθες τρεις ετικέτες:

1. Μοντέλα συμπεριφοράς - (Behavioural models) **[B]**: τα μοντέλα αυτά ενσωματώνουν διάφορες ενέργειες των ανθρώπων-ενοίκων σε συμπλήρωση της κίνησης προς ένα καθορισμένο στόχο (έξοδος). Τα μοντέλα αυτά μπορεί επίσης να ενσωματώσουν τη λήψη αποφάσεων των ενοίκων σχετικά με τις συνθήκες που επικρατούν στο κτίριο. Τα μοντέλα που έχουν τις δυνατότητες αξιολόγησης του κινδύνου, χαρακτηρίζονται με **[B-RA]**
2. Μοντέλα κίνησης - (Movement models) **[M]**: στα μοντέλα αυτά οι ένοικοι μετακινούνται από ένα σημείο του χώρου σε ένα άλλο (συνήθως προς την έξοδο ή σε θέση ασφαλείας), χωρίς να υπολογίζεται η ανθρώπινη συμπεριφορά. Αυτά τα μοντέλα είναι χρήσιμα στην απεικόνιση των περιοχών συμφόρησης εντός του προσομοιωμένου χώρου. Για τα ειδικά μοντέλα οπτικής παρουσίασης των αποτελεσμάτων, δίνεται η ετικέτα **[MO]**
3. Μοντέλα μερικής συμπεριφοράς - (Partial behavior models) **[PB]**: τα μοντέλα αυτά υπολογίζουν κατά κύριο λόγο την κίνηση των ενοίκων, αλλά αρχίζουν να προσομοιώνουν συμπεριφορές. Συμπεριφορές μεταξύ των ενοίκων σε καταστάσεις πριν την έναρξη της εκκένωσης, καθώς και άλλες συμπεριφορές όπως αλλαγή πορείας (προσπέραση) και μεταβολή στην κίνηση των ενοίκων από την εισαγωγή του καπνού, μπορούν να αναπαρασταθούν. Ωστόσο, αυτά τα μοντέλα δεν προσομοιώνουν τη σαφή λήψη αποφάσεων των ενοίκων.

Σκοπός μοντέλου

Αυτή η υποκατηγορία περιγράφει τη χρήση του μοντέλου, όσον αφορά στους τύπους των χώρων. Μερικά από τα μοντέλα επικεντρώνουν τις λειτουργίες τους για χρήση σε ένα συγκεκριμένο τύπο κτιρίου και άλλα μπορεί να χρησιμοποιηθούν σε ένα ευρύ φάσμα χώρων. Οι κατηγορίες που επισημαίνονται στον Πίνακα 12, περιλαμβάνουν μοντέλα που μπορεί να προσομοιώσουν κάθε είδους χώρων **[1]**, μοντέλα που ειδικεύονται σε κατοικίες **[2]**, μοντέλα που ειδικεύονται σε δημόσιους σταθμούς μεταφορών **[3]**, μοντέλα που είναι πιο κατάλληλα για προσομοίωση χαμηλών κτιρίων (χαμηλότερα από 15 ορόφους) **[4]** και μοντέλα που προσομοιώνουν μόνο μια έξοδο του κτιρίου **[5]**.

Τύπος πλέγματος / Δομή μοντέλου

Η υποκατηγορία αυτή, χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της μεθόδου της κίνησης των ενοίκων σε ολόκληρο το χώρο. Ένα πυκνό δίκτυο [F], χωρίζει την κάτοψη του μοντέλου σε μια σειρά από μικρά κελιά που οι ένοικοι μετακινούνται από και προς αυτά. Σε ένα πυκνό δίκτυο, τα κελιά συνήθως επιτρέπουν τη χρήση μόνο από ένα άτομο μια συγκεκριμένη στιγμή και συχνά το μέγεθος τους είναι 0,5 m x 0,5 m (χώρος που απαιτείται για ένα άτομο). Τα μοντέλα με αραιό δικτύου [C] χωρίζουν την κάτοψη σε δωμάτια, διαδρόμους, κλιμακοστάσια, κλπ. και οι ένοικοι μετακινούνται από το ένα δωμάτιο/τομέα του χώρου σε ένα άλλο. Προφανώς, πολλοί ένοικοι μπορούν να καταλαμβάνουν την ίδια περιοχή ταυτόχρονα. Σε ένα μοντέλο με συνεχές δίκτυο [Co], εφαρμόζεται ένα 2-D (συνεχές) επίπεδο στις κατόψεις του κτιρίου, επιτρέποντας στους ενοίκους να μετακινούνται από ένα σημείο στο χώρο σε ένα άλλο, σε όλο το χώρο. Οι ένοικοι δε δεσμεύονται σε κάποιο κελί του χώρου, αλλά συχνά υπάρχουν κανόνες που περιορίζουν την ελάχιστη απόσταση μεταξύ τους. Τα πυκνά και τα συνεχή δίκτυα έχουν την ικανότητα να προσομοιώνουν την παρουσία εμποδίων στο χώρο, τα οποία επηρεάζουν την επιλογή των ενοίκων για τη διαδρομή που θα ακολουθήσουν προς την έξοδο, ενώ στα αραιά δίκτυα οι ένοικοι μετακινούνται μόνο από ένα τμήμα του χώρου σε άλλο.

Προοπτική μοντέλου και ενοίκων

Η υποκατηγορία αυτή εξηγεί τον τρόπο με τον οποίο το μοντέλο εκκένωσης αντιλαμβάνεται τους ενοίκους και το πώς οι ένοικοι αντιλαμβάνονται το χώρο.

- Υπάρχουν δύο τρόποι με τους οποίους ένα μοντέλο μπορεί να αντιληφθεί το άτομο, σε γενικό επίπεδο [G] και ατομικά [I]. Μια ατομική προοπτική του μοντέλου πραγματοποιείται όταν το μοντέλο παρακολουθεί την κίνηση των ενοίκων σε όλη την προσομοίωση και μπορεί να δώσει πληροφορίες για τον καθένα (π.χ. θέση σε χρονικά σημεία κατά τη διάρκεια της εκκένωσης). Όταν το μοντέλο έχει γενική άποψη των ενοίκων, τότε τους αντιλαμβάνεται ως μια ομοιογενή ομάδα ατόμων. Σε αυτή την περίπτωση, είναι δυνατός ο προσδιορισμός της πυκνότητας και της μέσης ταχύτητας σε μια δεδομένη στιγμή και τοποθεσία, αλλά είναι αδύνατον να εντοπίζεται η θέση των ενοίκων ατομικά καθώς κινούνται προς την έξοδο. Είναι σαφές ότι η ατομική προοπτική είναι πιο λεπτομερής, δεδομένου ότι η θέση του κάθε ατόμου είναι γνωστή ανά πάσα στιγμή, αλλά εξαρτάται από το σκοπό της προσομοίωσης ως προς το ποια εναλλακτική προοπτική είναι η καλύτερη.
- Ο ένοικος επίσης μπορεί να αντιληφθεί το χώρο είτε σε γενικό επίπεδο [G] είτε σε ειδικό επίπεδο [I]. Όσον αφορά την ειδική προοπτική του ένοικου προς το κτίριο, ο ένοικος δεν γνωρίζει όλες τις οδεύσεις και τις εξόδους διαφυγής του κτιρίου και η επιλογή της πορείας του βασίζεται σε καθορισμένα από το χρήστη κριτήρια (π.χ. κατά την έναρξη της εκκένωσης όλοι οι ένοικοι μπορεί να γνωρίζουν την κύρια είσοδο, αλλά μόνο μερικοί γνωρίζουν τις διαδρομές για τις άλλες εξόδους), πληροφορίες των επιπέδων, προσωπική εμπειρία, ενώ σε ορισμένα μοντέλα, λαμβάνονται και πληροφορίες από τους γύρω ενοίκους. Από την άλλη, σε μια γενική προοπτική, όλοι οι ένοικοι γνωρίζουν αυτόματα τη βέλτιστη όδευση διαφυγής (π.χ. ταχύτερη, κοντινότερη, κλπ.) και λειτουργούν σαν να έχουν μια ολοκληρωμένη άποψη του κτιρίου. Η ειδική προσέγγιση απαιτεί έντονη υπολογιστική ισχύ, ενώ η γενική προσέγγιση είναι προτιμότερη για χώρους όπου υπάρχει μεγάλη εξοικείωση των ενοίκων με το χώρο και με τις διαφορετικές διαδρομές εξόδου.

Συμπεριφορά ανθρώπων – ενοίκων

Η συμπεριφορά των ενοίκων αναπαρίσταται με πολλούς διαφορετικούς τρόπους στα μοντέλα εκκένωσης. Οι χαρακτηρισμοί που δίνονται στον Πίνακα 12 είναι οι εξής:

- **Καμία συμπεριφορά [N]:** δηλώνει ότι η μόνη προσομοίωση είναι η κίνηση της εκκένωσης
- **Έμμεση συμπεριφορά [I]:** αντιπροσωπεύει τα μοντέλα που προσπαθούν να προσομοιώσουν τη συμπεριφορά έμμεσα, ενσωματώνοντας ορισμένες καθυστερήσεις απόκρισης ή χαρακτηριστικά των ενοίκων που επηρεάζουν την κίνηση σε όλη την εκκένωση
- **Υπό όρους (ή με προϋποθέσεις) [C]:** σε αυτά τα μοντέλα, η συμπεριφορά ενσωματώνεται ως επιμέρους δράσεις ενός ατόμου ή συνόλου ενοίκων, με βάση τις τοπικές συνθήκες π.χ. κτιριακές ή περιβαλλοντικές συνθήκες της εκκένωσης
- **Τεχνητή νοημοσύνη [AI]:** η συμπεριφορά αυτή προσπαθεί να μιμηθεί την ανθρώπινη νοημοσύνη σε όλη τη διαδικασία εκκένωσης
- **Πιθανολογική [P]:** αντιπροσωπεύει ότι πολλά μοντέλα που ενσωματώνουν την συμπεριφορά υπό όρους (ή με προϋποθέσεις), το κάνουν με στοχαστικό τρόπο, επιτρέποντας διακυμάνσεις στα αποτελέσματα με την επανάληψη προσομοιώσεων

Κίνηση των ενοίκων

Η υποκατηγορία αυτή αναφέρεται στον τρόπο κίνησης των ενοίκων, βασισμένη σε κάποιον αλγόριθμο. Ορισμένα μοντέλα μπορεί να επιτρέπουν στο χρήστη να καθορίσει άλλες μεθόδους. Στα περισσότερα μοντέλα, οι ένοικοι έχουν συνήθως μια συγκεκριμένη ταχύτητα, που καθορίζεται από το χρήστη ή τη μέθοδο μοντελοποίησης. Οι μεγαλύτερες διαφορές προσομοίωσης στα μοντέλα συμβαίνουν όταν οι ένοικοι βρεθούν σε πολύ κοντινές αποστάσεις, με αποτέλεσμα να αυξηθεί πολύ η τοπική πυκνότητα, η αναμονή σε ουρά και η κυκλοφοριακή συμφόρηση στο χώρο. Παρακάτω παρουσιάζονται οι διαφορετικοί τρόποι με τους οποίους τα μοντέλα εκκένωσης εκφράζουν την κίνηση των ενοίκων:

- **Συσχέτιση πυκνότητας [D]:** Στα μοντέλα αυτά, η ταχύτητα και η ροή των ατόμων ή των ομάδων, υπολογίζεται με βάση την πυκνότητά τους στους χώρους
- **Επιλογή χρήστη [UC]:** Ο χρήστης ορίζει την ταχύτητα, τη ροή, και την πυκνότητα σε ορισμένους χώρους του κτιρίου
- **Απόσταση μεταξύ των ενοίκων [ID]:** Κάθε άτομο βρίσκεται εντός μιας φυσαλίδας που το αναγκάζει να έχει μια ορισμένη ελάχιστη απόσταση από τους άλλους ενοίκους, τα εμπόδια, και τα στοιχεία του χώρου (τοιχοί, γωνίες, κιγκλιδώματα, κλπ.)
- **Δυναμικό [P]:** Σε κάθε κελί στο χώρο δίνεται μια συγκεκριμένη αξία ή δυναμική, από το οποίο θα κινηθούν οι ένοικοι σε όλο το χώρο προς ορισμένες κατευθύνσεις. Οι ένοικοι ακολουθούν έναν δυναμικό χάρτη και προσπαθούν να μειώσουν το δυναμικό τους με κάθε βήμα ή κελί στο οποία μετακινούνται. Το δυναμικό της διαδρομής μπορεί να μεταβληθεί με διάφορες μεταβλητές, όπως η υπομονή του ατόμου, η ελκυστικότητα της εξόδου, η εξοικείωση του ατόμου με το χώρο, κλπ. (οι οποίες συνήθως καθορίζονται από το χρήστη)
- **Διαθεσιμότητα του επόμενου κελιού [E]:** Σε ορισμένα μοντέλα, ο ένοικος δεν μπορεί να μετακινηθεί σε ένα κελί που έχει ήδη καταληφθεί από κάποιον άλλο. Ως εκ τούτου, ο ένοικος θα περιμένει μέχρι να ελευθερωθεί το επόμενο κελί και το μοντέλο αναλαμβάνει

να ορίζει ποιος θα μετακινηθεί πρώτος αν υπάρχουν περισσότεροι από ένας ένοικοι σε αναμονή

- **Υπό όρους [C]:** Σε αυτά τα μοντέλα η μετακίνηση σε όλο το χώρο εξαρτάται από τις συνθήκες του περιβάλλοντος, τη δομή, τους άλλους ένοικους, και τα δεδομένα της πυρκαγιάς (εφόσον υπάρχουν). Σε αυτή την περίπτωση, δεν δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην κυκλοφοριακή συμφόρηση στο εσωτερικό του χώρου
- **Εμπειρική [Ac K]:** Σε αυτή την περίπτωση, η κίνηση βασίζεται αποκλειστικά και μόνο στη γνώση-εμπειρία που αποκτάται κατά τη διάρκεια της εκκένωσης. Σε αυτά τα μοντέλα δεν υπάρχει πραγματικός αλγόριθμος κίνησης, επειδή δεν υπολογίζεται ο χρόνος εκκένωσης
- **Ανεμπόδιση ροή [Un F]:** Σε τέτοια μοντέλα, υπολογίζεται μόνο η ανεμπόδιση κίνηση των ενοίκων. Από τον υπολογισμένο χρόνο εκκένωσης, προστίθενται ή αφαιρείται ο χρόνος καθυστέρησης και οι χρόνοι βελτίωσης, ώστε να εξαχθεί το τελικό αποτέλεσμα του χρόνου εκκένωσης
- **Κυψελοειδείς αυτοματισμοί [CA]:** Οι ένοικοι σε αυτή την κίνηση μετακινούνται από ένα κελί σε ένα άλλο με τη χρήση μιας προσομοιωμένης σταθμισμένης μήτρας

Ενσωμάτωση δεδομένων σε μοντέλο προσομοίωσης πυρκαγιάς

Η υποκατηγορία αυτή, δίνει πληροφορίες σχετικές με το αν το μοντέλο επιτρέπει στο χρήστη να ενσωματώσει τις επιπτώσεις της φωτιάς στην προσομοίωση της εκκένωσης. Ωστόσο, τα μοντέλα ενσωματώνουν αυτά τα δεδομένα με ποικίλους τρόπους. Το μοντέλο μπορεί να ενσωματώνει τα δεδομένα της φωτιάς με τους ακόλουθους τρόπους όπως φαίνεται και στον Πίνακα 12.

Εισαγωγή δεδομένων πυρκαγιάς, που έχουν προσομοιωθεί και εξαχθεί από άλλο μοντέλο [Y1], επιτρέποντας στο χρήστη να εισάγει συγκεκριμένα δεδομένα πυρκαγιάς σε συγκεκριμένες στιγμές κατά τη διάρκεια της εκκένωσης [Y2] ή το μοντέλο μπορεί να έχει ενσωματωμένη μια εφαρμογή προσομοίωσης πυρκαγιάς και μπορεί να λειτουργεί ταυτόχρονα με τη λειτουργία εκκένωσης [Y3]. Εάν το μοντέλο δεν μπορεί να ενσωματώνει δεδομένα φωτιάς, τότε χαρακτηρίζεται με [N].

Συνεργασία με ψηφιακά τεχνικά σχέδια

Στην υποκατηγορία αυτή, προσδιορίζεται αν το μοντέλο επιτρέπει στο χρήστη να εισάγει ψηφιακά σχέδια (CAD), ή άλλα αρχεία που περιέχουν το σχεδιάγραμμα του κτιρίου, μέσα στο μοντέλο. Σε πολλές περιπτώσεις, η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για εξοικονόμηση χρόνου και μεγαλύτερη ακρίβεια. Εάν το μοντέλο επιτρέπει την είσοδο σχεδίων CAD, χαρακτηρίζεται με [Y], ενώ αν όχι με [N] στον Πίνακα 12.

Μέθοδοι οπτικοποίησης

Στην υποκατηγορία αυτή προσδιορίζεται η ικανότητα του μοντέλου να παρέχει στο χρήστη οπτική εικόνα της διαδικασίας εκκένωσης. Οι απεικονίσεις της εκκένωσης επιτρέπουν στο χρήστη να παρατηρεί τα σημεία συμφόρησης και τις επιβαρυμένες περιοχές του κτιρίου. Πολλά μοντέλα επιτρέπουν μια δισδιάστατη απεικόνιση [2-D], ενώ τα πιο πρόσφατα έχουν τη δυνατότητα τρισδιάστατης απεικόνισης [3-D]. Άλλα μοντέλα δεν έχουν καμία δυνατότητα απεικόνισης [N]. Για χρήστες που δεν είναι εξοικειωμένοι με το χώρο ή σε περιπτώσεις με πολύπλοκες γεωμετρίες, η οπτικοποίηση παρέχει μια καλύτερη αίσθηση των γεγονότων που λαμβάνουν χώρα.

Μέθοδοι επικύρωσης – εγκυρότητας

Επίσης, τα μοντέλα χαρακτηρίζονται από τη μέθοδο επικύρωσης, δηλαδή, τη διαδικασία προσδιορισμού και το βαθμό στον οποίο το μοντέλο και τα υποκείμενα δεδομένα είναι ακριβείς αναπαραστάσεις του πραγματικού κόσμου. Οι τρέχουσες διαδικασίες επικύρωσης μοντέλων εκκένωσης σύμφωνα με τον Πίνακα 12, είναι οι εξής: επικύρωση μέσω κώδικα [C], επικύρωση από ασκήσεις πυρκαγιάς ή δοκιμές εκκένωσης [FD], την επικύρωση μέσω της βιβλιογραφίας από δοκιμές εκκένωσης (ρυθμοί ροής, κλπ.) [PE], την επικύρωση από άλλα μοντέλα [OM] και επικύρωση από τρίτους [3P] (δηλαδή άλλη ομάδα εκτός αυτής που ανέπτυξε το μοντέλο). Για τα μοντέλα που δεν υπάρχει καμία ένδειξη της επικύρωσης δίνεται ο χαρακτηρισμός [N].

Επιπλέον, υπάρχουν και άλλες ειδικές λειτουργίες βάση των οποίων κατηγοριοποιούνται τα μοντέλα εκκένωσης. Αυτές είναι (Erica D. Kuligowski, 2010):

- Αντιστροφή ροής
- Εισαγωγή εμποδίων και μπλοκαρισμένων εξόδων
- Επιρροή συμπεριφοράς από πυρκαγιά
- Τοξικότητα στους ενοίκους (βαθμός επιρροής)
- Ορισμός ομάδων
- Εισαγωγή ατόμων με ειδικές ανάγκες
- Καθυστερήσεις/υπολογισμός χρόνων πριν την έναρξη της εκκένωσης
- Χρήση ανελκυστήρων
- Επίλογή διαδρομής ενοίκων

B.3. Κίνδυνοι πυρκαγιάς και πυρασφάλεια υπογείων χώρων

Η περίπτωση της πυρκαγιάς είναι μία από τις πιο συνήθεις και ταυτόχρονα επικίνδυνες περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης. Η εκδήλωση φωτιάς διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στον τρόπο που θα εξελιχθεί ένα ατύχημα και συντελεί στην κλιμάκωση των συνθηκών που ευνοούν την πρόκληση μεγάλων καταστροφών.

Ειδικά για τους υπόγειους χώρους, όπως ο χώρος του Τ.Π.Π.Α. που μελετάμε, η εκδήλωση πυρκαγιάς μπορεί να έχει καταστροφικές συνέπειες τόσο για τις εγκαταστάσεις κάθε φύσεως όσο και για την ανθρώπινη ασφάλεια. Αυτό οφείλεται στις ιδιαίτερες συνθήκες ενός υπόγειου χώρου όπως είναι ο περιορισμένος αερισμός και οι σχετικά περιορισμένες διαστάσεις του. Πιο συγκεκριμένα, ο συνδυασμός του περιορισμένου χώρου με τις υψηλές θερμοκρασίες και της έντονης έκλυσης καπνού από τα αρχικά στάδια γένεσης της φωτιάς, είναι ικανός να δημιουργήσει θανάσιμες συνθήκες σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα. Κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς συγκεκριμένοι είναι οι παράγοντες που θέτουν την ανθρώπινη ασφάλεια σε κίνδυνο. Οι παράγοντες αυτοί είναι:

- Η εκπομπή θερμικής ακτινοβολίας
- Η εισπνοή του καπνού και των παραγώγων του
- Η μειωμένη ορατότητα λόγω της ύπαρξης καπνού

Για να αντληφθεί κανείς τα ολέθρια αποτελέσματα που μπορεί να έχουν αυτοί οι παράγοντες για την ανθρώπινη ασφάλεια κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς, αρκεί να αναφερθεί το γεγονός πως η συντριπτική πλειοψηφία των θανάτων σε περιπτώσεις πυρκαγιάς οφείλεται σε ασφυξία λόγω καπνού. Επιπλέον, η εκπομπή θερμικής ακτινοβολίας σε συνδυασμό με τη μειωμένη ορατότητα λόγω της παρουσίας καπνού επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τη ψυχολογία και τη συμπεριφορά των ανθρώπων σε περιπτώσεις φωτιάς. Πιο συγκεκριμένα κατά τη διαδικασία εκκένωσης ενός χώρου που έχει πάρει φωτιά οι παραπάνω παράγοντες είναι από μόνοι τους ικανοί να δημιουργήσουν συνθήκες πανικού, θέτοντας έτσι σε άμεσο κίνδυνο ανθρώπινες ζωές.

Για να αποφευχθεί ή να αντιμετωπιστεί μια πυρκαγιά σε έναν υπόγειο χώρο λαμβάνονται ορισμένα μέτρα πυρασφάλειας. Τα μέτρα αυτά μπορεί να έχουν ληφθεί από το στάδιο της

πρόληψης πυρκαγιών ή λαμβάνονται από τους υπεύθυνους της πυρόσβεσης στη φάση της καταπολέμησης πυρκαγιάς. Τα σημαντικότερα μέτρα πυρασφάλειας για έναν υπόγειο χώρο περιλαμβάνουν τα εξής:

- Εγκατάσταση συστήματος αερισμού
- Εγκατάσταση συστήματος πυρανίχνευσης
- Εγκατάσταση συστήματος πυρόσβεσης
- Εγκατάσταση επαρκούς δικτύου φωτισμού
- Εγκατάσταση κυκλώματος CCTV
- Εγκατάσταση μεγάλφωνων για παροχή ηχογραφημένων οδηγιών σε περίπτωση φωτιάς
- Διαθεσιμότητα πλήρως εκπαιδευμένου και καταρτισμένου προσωπικού σε συνθήκες πυρκαγιάς
- Ανάρτηση σχεδίου εκκένωσης, αποτελούμενο από σχέδια και τεχνική έκθεση οδηγιών, σε πληθώρα σημείων του υπόγειου χώρου

B.4. Επίδραση καπνού στην υγεία του ανθρώπου

Όταν οι άνθρωποι βρίσκονται αντιμέτωποι με μία φωτιά τα πράγματα μπορεί να εξελιχθούν πολύ άσχημα για τους ίδιους. Συγκεκριμένα οι συνθήκες μπορεί να γίνουν θανάσιμες μέσα σε μερικά λεπτά, καθώς η φωτιά αναπτύσσεται ταχύτατα και μαζί της αυξάνονται και οι εκπομπές θερμικής ακτινοβολίας, καπνού και τοξικών αερίων. Σε αυτές τις περιπτώσεις κομβικής σημασίας είναι ο προσδιορισμός του χρόνου στον οποίο ο άνθρωπος αποδυναμώνεται σε τέτοιο βαθμό από την πυρκαγιά, που δεν μπορεί να αντιδράσει προστατεύοντας τον εαυτό του. Οι παράγοντες της πυρκαγιάς που επηρεάζουν την ικανότητα του ανθρώπου να εκκενώσει τον εκάστοτε χώρο είναι οι εξής (O'Connor, 2017) και φαίνονται στην Εικόνα 26 :

1. Πόνοι, αναπνευστικά προβλήματα και ερεθισμοί που προκαλεί ο καπνός και τα τοξικά παράγωγά του
2. Έκθεση σε έντονη θερμική ακτινοβολία που προκαλεί πόνους, εγκαύματα και στη συνέχεια λιποθυμία
3. Μειωμένη όραση λόγω της παρουσίας καπνού



Εικόνα 26. Επικίνδυνοι παράγοντες σε μια πυρκαγιά [Πηγή: (Ρoh, 2011)]

1. Ασφυξιογόνα και τοξικά παράγωγα του καπνού:

Τα ασφυξιογόνα αέρια επιφέρουν σε πρώτη φάση αναισθησία παρεισφρώνοντας στο κεντρικό νευρικό και καρδιαγγειακό σύστημα του ανθρώπινου οργανισμού. Επιπλέον, τα αέρια αυτά προκαλούν υποξία στους ιστούς του εγκεφάλου μη επιτρέποντας ουσιαστικά τη σωστή οξυγόνωση του. Τα κυριότερα αέρια που προκαλούν ασφυξία σε περίπτωση φωτιάς είναι το

μονοξείδιο του άνθρακα (CO), που βρίσκεται πάντα σε συγκεντρώσεις που ποικίλλουν στον καπνό μιας φωτιάς, και το υδροκυάνιο (HCN), το οποίο εμφανίζεται μόνο όταν καίγονται υλικά που περιέχουν στις ενώσεις τους άζωτο.

ι. Μονοξείδιο του άνθρακα (CO):

Το μονοξείδιο του άνθρακα ενώνεται με την αιμοσφαιρίνη στο αίμα και σχηματίζει την ένωση COHb που προκαλεί ασφυξία στον ανθρώπινο οργανισμό ενώ είναι θανατηφόρα σε μεγάλες συγκεντρώσεις στο αίμα (O'Connor, 2017). Στον Πίνακα 13 παρουσιάζονται τα συμπτώματα που προκαλεί η παρουσία του μονοξειδίου του άνθρακα στο αίμα, μέσω της ένωσης COHb συναρτήσει της συγκέντρωσής της.

Πίνακας 13. Συμπτώματα στον ανθρώπινο οργανισμό ανά συγκέντρωση COHb στο αίμα [Πηγή: (O'Connor, 2017)]

Ποσοστό συγκέντρωσης COHb στο αίμα (%)	Συμπτώματα στον ανθρώπινο οργανισμό
< 10	Ελαφρά αδιαθεσία
10-20	Πονοκέφαλοι
20-30	Έντονοι πονοκέφαλοι και προβλήματα στην όραση
30-40	Επιδείνωση προ υπαρχουσών συμπτωμάτων, ναυτία και εμετός, γενικευμένη αδυναμία
40-50	Ταχυκαρδία, λιποθυμία
50-60	Κωματώδη κατάσταση, σπασμοί
60-70	Θάνατος από καρδιακή ανακοπή

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί πως η οριακή συγκέντρωση του μονοξειδίου του άνθρακα στο αίμα, για να μην τεθεί αδύναμος ο ανθρώπινος οργανισμός ενός υγιή ενήλικα, είναι το 30-40% COHb. Ορισμένες φορές πάντως, για ανθρώπους που αντιμετωπίζουν καρδιακές ανεπάρκειες συγκεντρώσεις του ύψους του 20% μπορεί να αποδειχθούν θανατηφόρες (O'Connor, 2017).

Σύμφωνα τώρα με μια διαφορετική προσέγγιση προκύπτει ο Πίνακας 14 που εκφράζει τα συμπτώματα που προκαλεί η συγκέντρωση του μονοξειδίου του άνθρακα (εκφρασμένη σε ppm) στον άνθρωπο.

Πίνακας 14. Συμπτώματα στον ανθρώπινο οργανισμό ανά συγκέντρωση CO στον περιβάλλοντα χώρο [Πηγή: (Carbon Monoxide and death, 2014)]

Συγκέντρωση CO	Συμπτώματα
35 ppm (0,0035%)	Πονοκέφαλος και ζαλάδα μέσα σε 6-8 ώρες συνεχούς έκθεσης
100 ppm (0,01%)	Ήπιος πονοκέφαλος μέσα σε 2-3 ώρες
200 ppm (0,02%)	Ήπιος πονοκέφαλος μέσα σε 2-3 ώρες, απώλεια σωστής κρίσης
400 ppm (0,04%)	Έντονος πονοκέφαλος μέσα σε 1-2 ώρες
800 ppm (0,08%)	Ζαλάδα, ναυτία και σπασμοί μέσα σε 45 λεπτά. Λιποθυμία μέσα σε 2 ώρες
1600 ppm (0,16%)	Πονοκέφαλος, ταχυπαλμία, ζαλάδα και ναυτία μέσα σε 20 λεπτά. Θάνατος σε λιγότερο από 2 ώρες
3200 ppm (0,32%)	Πονοκέφαλος, ζαλάδα και ναυτία μέσα σε 5-10 λεπτά. Θάνατος μέσα σε 30 λεπτά
6400 ppm (0,64%)	Πονοκέφαλος και ναυτία μέσα σε 1-2 λεπτά. Σπασμοί, αναπνευστικά προβλήματα και θάνατος σε λιγότερο από 20 λεπτά
12800 ppm (1,28%)	Απώλεια αισθήσεων μετά από 2-3 ανάσες. Θάνατος σε λιγότερο από 3 λεπτά

Σύμφωνα τώρα με τους διεθνείς κανονισμούς ασφαλείας, δίνονται αρκετές πληροφορίες σχετικά με τις οριακές τιμές της συγκέντρωσης του μονοξειδίου του άνθρακα. Συγκεκριμένα η οριακή τιμή συγκέντρωσης του CO για ένα περιβάλλον εργασίας, με οκτάωρη έκθεση είναι 35 ppm ενώ για ακαριαία έκθεση είναι 1500 ppm (Occupational Safety and Health Administration , 2018).

ii. Υδροκυάνιο (HCN):

Σε αντίθεση με το μονοξείδιο του άνθρακα, το υδροκυάνιο δεν συγκεντρώνεται στο αίμα αλλά στον εγκέφαλο. Σημαντικότερη επίδραση στον ανθρώπινο οργανισμό, από τη συγκέντρωση του υδροκυανίου, έχει ο ρυθμός με τον οποίο ο άνθρωπος προσροφά το υδροκυάνιο (O'Connor, 2017). Στον Πίνακα 15 παρουσιάζονται τα συμπτώματα που προκαλεί το υδροκυάνιο στον άνθρωπο συναρτήσει της συγκέντρωσής του.

Πίνακας 15. Συμπτώματα στον ανθρώπινο οργανισμό συναρτήσει της συγκέντρωσης HCN [Πηγή: (O'Connor, 2017)]

Συγκέντρωση HCN (ppm)	Συμπτώματα στον ανθρώπινο οργανισμό
80	Έντονη αδιαθεσία μετά από μία ώρα
100	Απώλεια αισθήσεων μεταξύ 23-30 λεπτών
200	Απώλεια αισθήσεων μετά από 2 λεπτά
300+	Γρήγορος θάνατος
444	Έχει καταγραφεί ένας επιζών
1000	Μία ανάσα προκαλεί λιποθυμία στον άνθρωπο

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί πως η οριακή συγκέντρωση του υδροκυανίου, για να μην τεθεί αδύναμος ο ανθρώπινος οργανισμός, είναι τα 140 ppm (Ρoh, 2011).

iii. Διοξείδιο του άνθρακα (CO₂):

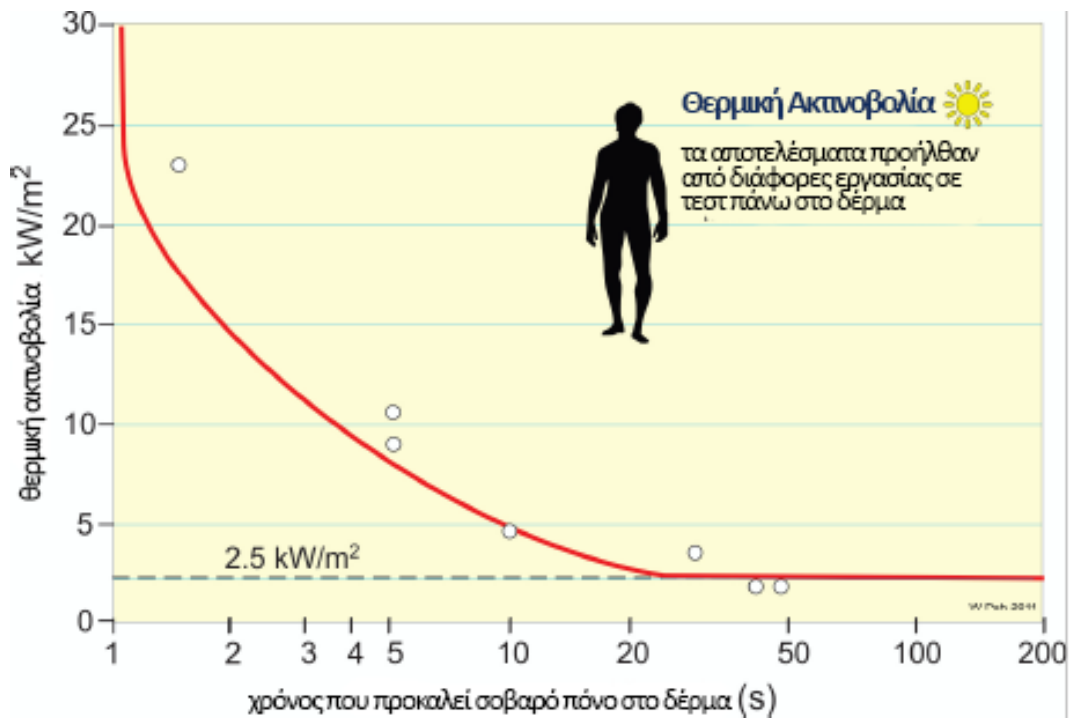
Το διοξείδιο του άνθρακα όπως και το μονοξείδιο απαντάται σε όλες τις φωτιές. Το διοξείδιο του άνθρακα δεν είναι τοξικό για τον άνθρωπο σε συγκεντρώσεις μικρότερες του 5%, παρόλα αυτά προκαλεί επιτάχυνση του ρυθμού αναπνοής. Συγκεκριμένα, το διοξείδιο σε συγκέντρωση 3% διπλασιάζει τον ανθρώπινο ρυθμό αναπνοής ενώ σε συγκέντρωση 5% τον τριπλασιάζει. Κατά αυτόν τον τρόπο προκαλείται αύξηση στον ρυθμό με τον οποίο ο άνθρωπος προσροφά τοξικά προϊόντα καπνού όπως το μονοξείδιο του άνθρακα και το υδροκυάνιο. Συνεπώς με την αύξηση της συγκέντρωσης του διοξειδίου του άνθρακα μειώνεται πρακτικά ο χρόνος που ο αποδυναμώνεται ο ανθρώπινος οργανισμός κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς (O'Connor, 2017).

2. Έκθεση σε θερμική ακτινοβολία και υψηλές θερμοκρασίες:

Κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς ο ανθρώπινος οργανισμός εκτίθεται σε υψηλή θερμική ακτινοβολία και θερμοκρασίες που προκαλούν υπερθερμία, εγκαύματα και πολλές φορές οδηγούν σε θάνατο.

i. Θερμική ακτινοβολία:

Ακόμα και με τη μη άμεση επαφή με τον καυτό καπνό, υπάρχει σοβαρός κίνδυνος εγκαυμάτων από τα υψηλά επίπεδα θερμικής ακτινοβολίας λόγω πυρκαγιάς. Για να βρεθούν οι οριακές για τον ανθρώπινο οργανισμό τιμές της θερμικής ακτινοβολίας, πραγματοποιήθηκε πληθώρα δοκιμών, από τις οποίες προέκυψε το διάγραμμα της Εικόνας 27 .

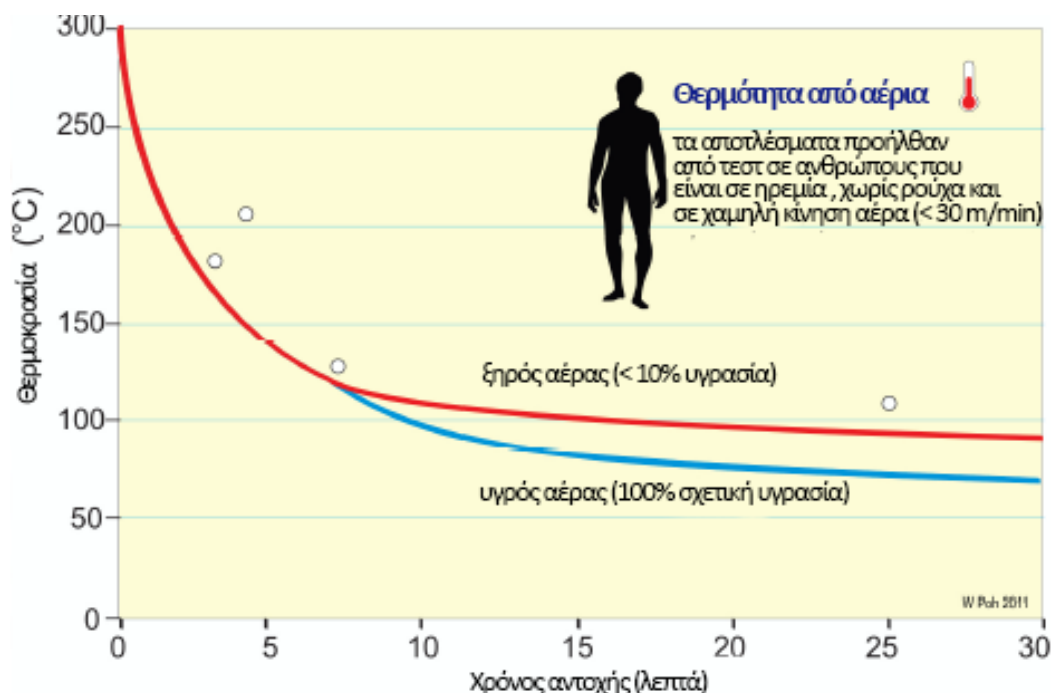


Εικόνα 27. Διάγραμμα έκθεσης σε θερμική ακτινοβολία [Πηγή: (Ρoh, 2011)]

Παρατηρείται πως για την έκθεση γυμνού σημείου του ανθρώπινου δέρματος, αντιστοιχεί η οριακή τιμή των 2,5 kW/m² ώστε να μην αποδυναμωθεί ο ανθρώπινος οργανισμός (Ρoh, 2011).

ii. Υψηλές θερμοκρασίες λόγω αερίων:

Η παραμονή σε περιβάλλοντα που αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να προκαλέσει υπερθερμία εντός 15 λεπτών. Παρόλα αυτά ακόμα και σε πιο σύντομες εκθέσεις του ανθρώπινου οργανισμού σε υψηλές θερμοκρασίες παρατηρούνται έντονοι πόνοι και εγκαύματα. Μετά από πολλές έρευνες προέκυψε το διάγραμμα της Εικόνας 28 που παρουσιάζει τον χρόνο αντοχής του ανθρώπου σε υψηλές θερμοκρασίες.

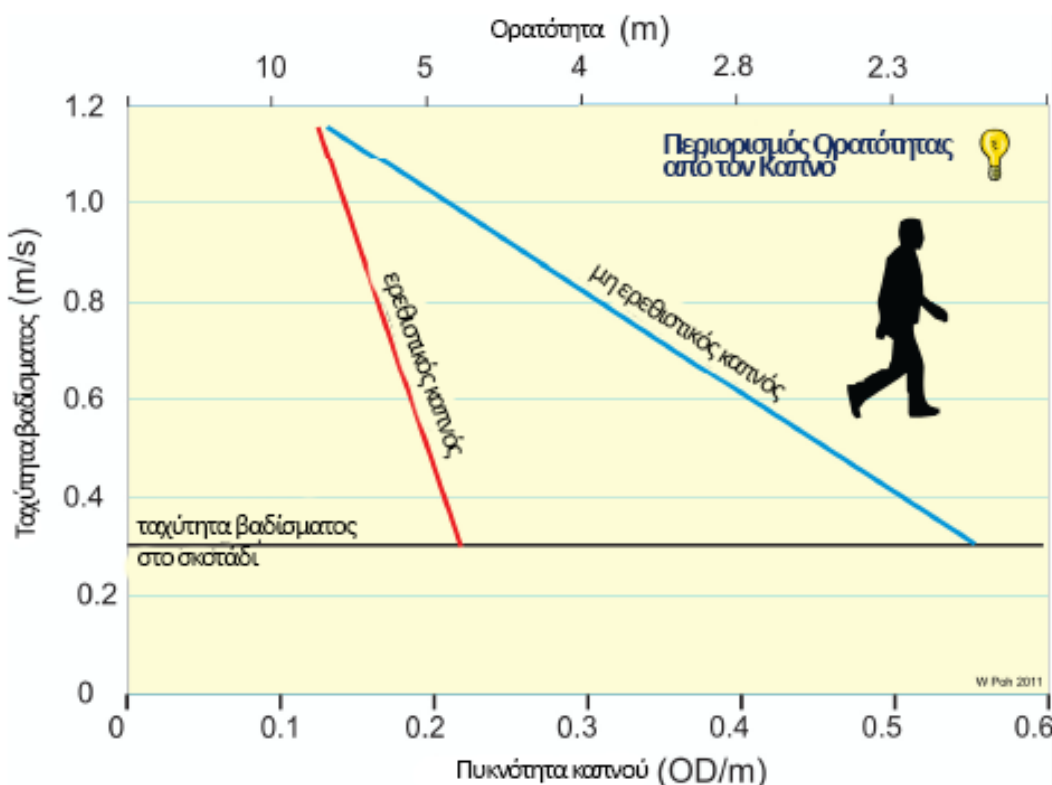


Εικόνα 28. Διάγραμμα έκθεσης σε υψηλές θερμοκρασίες λόγω αερίων για ξηρό και αέρα με μεγάλη υγρασία [Πηγή: (Poh, 2011)]

Παρατηρείται πως για την έκθεση του ανθρώπινου οργανισμού σε υψηλές θερμοκρασίες, δίνονται ποικίλλες οριακές τιμές ώστε να μην αποδυναμωθεί ο ανθρώπινος οργανισμός όπως 100°C (Poh, 2011) και 120°C (NFPA, 2014).

3. Μειωμένη ορατότητα λόγω ύπαρξης καπνού:

Ο παράγοντας της ορατότητας σε περιπτώσεις πυρκαγιάς έχει γίνει αντικείμενο μελέτης πολλών ερευνών. Σε μια πυρκαγιά δεν είναι η μείωση της ορατότητας σε μια όδευση διαφυγής που θέτει σε κίνδυνο τον άνθρωπο, αλλά η εκτεταμένη έκθεση του σε υψηλές θερμοκρασίες και τοξικά αέρια. Σαφέστερα, οι συνθήκες μειωμένης ορατότητας οδηγούν σε μείωση της ταχύτητας κίνησης των ανθρώπων κατά την εκκένωση, έχοντας σαν αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη παραμονή τους σε ένα πιθανά θανατηφόρο περιβάλλον. Επιπλέον, η μειωμένη ορατότητα δυσχεραίνει τη διαδικασία εύρεσης των οδεύσεων και εξόδων διαφυγής, θέτοντας αυτομάτως σε περαιτέρω κίνδυνο ανθρώπινες ζωές, μέσω πιθανής εκδήλωσης ψυχολογικών προβλημάτων όπως ο πανικός. Στο διάγραμμα της Εικόνας 29 που ακολουθεί παρουσιάζεται η σχέση μείωσης της ταχύτητας κίνησης με την ορατότητα για δύο είδη καπνού.



Εικόνα 29. Διάγραμμα μείωσης της ταχύτητας κίνησης για δύο είδη καπνού [Πηγή: (Poh, 2011)]

Έχει διαπιστωθεί ότι η οριακή τιμή της ορατότητας σε περιβάλλον καπνού για έναν ασφαλή σχεδιασμό εκκένωσης είναι 5 m για μικρές εγκαταστάσεις και 10 m για μεγάλες (O'Connor, 2017).

Στον Πίνακα 16 φαίνονται συγκεντρωτικά οι οριακές τιμές, για κάθε επιμέρους παράγοντα της πυρκαγιάς, που καθιστούν ασφαλή την εκκένωση μιας εγκατάστασης και στην περίπτωση μας του υπόγειου χώρου του Τ.Π.Π.Λ..

Πίνακας 16. Οριακές τιμές για τους επικίνδυνους παράγοντες μιας πυρκαγιάς

Παράγοντας πυρκαγιάς	Οριακή τιμή
Συγκέντρωση μονοξειδίου του άνθρακα	30-40% COHb ή 1500 ppm
Συγκέντρωση Υδροκυανίου	140 ppm
Έκθεση σε θερμική ακτινοβολία	2,5 Kw/m ²
Έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες	100 °C
Μειωμένη ορατότητα λόγω καπνού	10 m

B.4.1. Κλασματική Δραστική Δόση (ΚΔΔ) – Fractional Effective Dose (FED)

Για να γίνει μια σωστή εκτίμηση ενός πιθανού κινδύνου τοξικής φύσεως σε μια πυρκαγιά, είναι απαραίτητο να οριστεί η ποσότητα της τοξικής δόσης που έχει εισπνεύσει κάθε άνθρωπος. Μια μέθοδος προσδιορισμού αυτής της ποσότητας, γίνεται μέσω του υπολογισμού της Κλασματικής Δραστικής Δόσης (ΚΔΔ) ή όπως είναι ευρέως γνωστή, Fractional Effective Dose (FED). Ως FED ορίζεται το εξής πηλίκο:

$$FED = \frac{\text{Ληφθείσα δόση σε χρόνο } t}{\text{Δραστική δόση ικανή να προκαλέσει αναισθησία ή θάνατο}}$$

Όπως είναι λογικό για FED=1, έχουμε συνθήκες όπου οδηγούν είτε σε απώλεια αισθήσεων είτε ακόμα και σε θάνατο. Για να υπάρχει όμως ένα περιθώριο ασφαλείας το οποίο θα εξασφαλίζει την ακεραιότητα και των πιο ευαίσθητων κοινωνικών ομάδων, έχει καθιερωθεί ως οριακή τιμή η FED=0,3 (NFPA, 2014).

B.5. Λογισμικά προσομοίωσης φωτιάς

Ένα πεδίο έρευνας που διαχρονικά απασχολούσε πολυάριθμο επιστημονικό και ερευνητικό δυναμικό, είναι αυτό της ροής και της δυναμικής των υγρών. Στην εποχή μας, ο σύγχρονος ερευνητής ή μηχανικός έχει στα χέρια του ένα σημαντικότερο εργαλείο που τον βοηθά αποφασιστικά στην καλύτερη κατανόηση της δυναμικής των υγρών και ονομάζεται CFD (Computational Fluid Dynamics). Πρόκειται για ένα λογισμικό το οποίο μεταξύ άλλων υπολογίζει την ταχύτητα ροής, την πυκνότητα, την πίεση και τη θερμοκρασία ενός οποιουδήποτε υγρού καθώς και τη συγκέντρωση του στον υπό μελέτη χώρο. Η λειτουργία του μοντέλου αυτού βασίζεται στη δημιουργία πολυάριθμων κελιών μικρού μεγέθους που απαρτίζουν το πλέγμα (Mesh). Μέσα σε αυτό το πλέγμα, το CFD υπολογίζει μια πληθώρα φυσικών μεγεθών και παραμέτρων του εκάστοτε υγρού. Με το πέρας της υπολογιστικής διαδικασίας, τα λογισμικά τύπου CFD δίνουν τη δυνατότητα οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων στο χρήστη, για την εξαγωγή καλύτερων και ασφαλέστερων συμπερασμάτων.

Μια υποκατηγορία των υπολογιστικών μοντέλων CFD είναι τα λογισμικά προσομοίωσης φωτιάς FDS (Fire Dynamics Simulator) τα οποία εξειδικεύονται στη μοντελοποίηση των ρευμάτων καπνού και άλλων αερίων που παράγονται κατά τη διάρκεια μιας φωτιάς. Αφού ο χρήστης εισάγει υπό μορφή CAD αρχείο τα σχέδια του χώρου που θέλει να μελετήσει, το λογισμικό προσομοίωσης φωτιάς μπορεί να υπολογίσει τα πλέον κρίσιμα μεγέθη για τον μελέτη μιας φωτιάς. Πιο συγκεκριμένα, ένα λογισμικό FDS περιγράφει λεπτομερώς μια φωτιά καθ' όλη τη διάρκεια της μέσω της καμπύλης έκλυσης θερμότητας (HRR), υπολογίζει τις συγκεντρώσεις των εκλυόμενων παραγώγων του καπνού (CO, CO₂, κάπνας κ.ά.) και παρουσιάζει οπτικά την εξέλιξη της φωτιάς και την πορεία του καπνού στο χώρο για ένα δεδομένο χρονικό διάστημα. Τέτοια λογισμικά προσφέρουν μια σειρά προνομιών και οφελών. Η ευρέως διαδεδομένη χρήση τους παρέχει έναν μεγάλο όγκο πληροφοριών για μια πυρκαγιά, παίζοντας καταλυτικό ρόλο στη διαμόρφωση και στο σχεδιασμό των συστημάτων πυρασφάλειας. Επιπλέον, ήρθαν να μειώσουν ή και να αντικαταστήσουν τα πολυδάπανα και

χρονοβόρα πειράματα φωτιάς μεγάλης κλίμακας, μειώνοντας σημαντικά το κόστος της πυρασφάλειας. Συμπερασματικά μπορεί κάποιος να πει πως τα λογισμικά προσομοίωσης φωτιάς καθιστούν την ανθρώπινη παρουσία σε κλειστούς χώρους πιο ασφαλή από ποτέ.

Γ. Ανάλυση εκκένωσης του υπόγειου χώρου του Τ.Π.Π.Λ.

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παραθέσαμε μια σειρά από παράγοντες που η διεξοδική μελέτη και ο υπολογισμός τους είναι απαραίτητα στοιχεία για τον σχεδιασμό μιας εκκένωσης. Στα πλαίσια αυτού του κεφαλαίου τώρα θα υπολογίσουμε τους παράγοντες αυτούς εξειδικεύοντας τους στον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Π.Λ.. Στη συνέχεια θα προσομοιάσουμε τρία σενάρια εκκένωσης με τη βοήθεια του μοντέλου εκκένωσης που επιλέξαμε (STEPS). Τέλος, κρίναμε πως η περίπτωση της πυρκαγιάς είναι μια περίπτωση έκτακτης ανάγκης η οποία χρήζει περαιτέρω μελέτης, καθώς θέτει σε σοβαρό κίνδυνο ανθρώπινες ζωές και επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό μια διαδικασία εκκένωσης. Έτσι, αναλύσαμε δύο πιθανά σενάρια φωτιάς στον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Π.Λ. και μέσω του λογισμικού προσομοίωσης φωτιάς Pyrosim, παρατηρήσαμε τη μεταβολή που επέφερε η πυρκαγιά στα αποτελέσματα της προηγούμενης προσομοίωσης.

Γ.1. Υπολογισμός θεωρητικού πληθυσμού του υπόγειου χώρου

Εφόσον ο υπόγειος χώρος δεν είναι προς το παρόν σε λειτουργία και δεν έχει υπολογιστεί ο αριθμός των ανθρώπων που βρίσκονται εκεί, για να πραγματοποιηθούν τα σενάρια εκκένωσης πρέπει να προσδιοριστεί ο θεωρητικός πληθυσμός των ενοίκων. Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής, ο θεωρητικός πληθυσμός υπολογίστηκε σύμφωνα με τον Ελληνικό κανονισμό πυροπροστασίας κτιρίων καθώς και με το πως ορίζει ο εθνικός οργανισμός πυροπροστασίας της Αμερικής (NFPA).

➤ Σύμφωνα με τον Ελληνικό κανονισμό πυροπροστασίας κτιρίων

Σύμφωνα με τον Ελληνικό κανονισμό πυροπροστασίας κτιρίων, ο θεωρητικός πληθυσμός των κτιρίων γραφείων υπολογίζεται με την αναλογία 1 ατόμου/9 m² καθαρού εμβαδού δαπέδου. Συνεπώς ο χώρος των γραφείων έχει θεωρητικό πληθυσμό $223 \text{ m}^2 / 9 \text{ m}^2 \approx 25$ άτομα.

Όσον αφορά τώρα τον υπόλοιπο χώρο της αποθήκης, ο Ελληνικός κανονισμός πυροπροστασίας κτιρίων ορίζει την αναλογία 1 ατόμου/50 m² μικτής επιφάνειας για το υπολογισμό του θεωρητικού πληθυσμού των αποθηκών.

Συνεπώς ο χώρος της αποθήκης έχει θεωρητικό πληθυσμό $2220 \text{ m}^2 / 50 \text{ m}^2 \approx 44$ άτομα.

Συμπερασματικά, ο συνολικός θεωρητικός πληθυσμός του Λαυρίου είναι $25+44 = 69$ άτομα.

➤ Σύμφωνα με τον NFPA

Ο κανονισμός αυτός υπολογίζει τον θεωρητικό πληθυσμό κατατάσσοντας τα κτίρια σε επιμέρους κατηγορίες σύμφωνα με τον Πίνακα 17.

Πίνακας 17. Κατηγορία κτιρίου – Θεωρητικός πληθυσμός [Πηγή: (G.E. Harrington, 2018)]

Κατηγορία κτιρίου	Χρήση κτιρίου	Αναλογία m ² ανά άτομο
Χώροι συνάθροισης	Μεγάλη συγκέντρωση ατόμων χωρίς καθορισμένες θέσεις	0.65 καθαρή επιφάνεια
	Λιγότερη συγκέντρωση ατόμων χωρίς καθορισμένες θέσεις	1.4 καθαρή επιφάνεια
	Με θέσεις υπό μορφή πάγκων	1 άτομο ανά 455 γραμμικά mm
	Με καθορισμένες θέσεις	Αριθμός καθορισμένων θέσεων
	Με χώρους αναμονής	
	Χώροι μαγειρικής	9.3

	Βιβλιοστάσια	9.3
	Χώρος ανάγνωσης βιβλιοθηκών	4.6 καθαρή επιφάνεια
	Πισίνες	4.6
	Κατάστρωμα πισίνας	2.8
	Χώροι εκγύμνασης με εξοπλισμό	4.6
	Χώροι εκγύμνασης χωρίς εξοπλισμό	1.4
	Σκηνές θεάματος	1.4 καθαρή επιφάνεια
	Χώροι επίδειξης	9.3 καθαρή επιφάνεια
	Καζίνο και χώροι τυχερών παιγνίων	1
	Παγοδρόμια	4.6
Για εκπαιδευτική χρήση	Σχολικές τάξεις	1.9 καθαρή επιφάνεια
	Εργαστήρια	4.6 καθαρή επιφάνεια
	Χώροι ολοήμερης απασχόλησης	3.3 καθαρή επιφάνεια
Κτίρια κοινωνικής πρόνοιας	Χώροι θεραπείας νοσηλευόμενων	22.3
	Δωμάτια ασθενών	11.1
	Χώροι κινητής μονάδας θεραπείας	9.3
	Σωφρονιστικά ιδρύματα	11.1
Κατοικήσιμοι χώροι	Ξενοδοχεία και κοιτώνες	18.6
	Διαμερίσματα κτιρίου	18.6
	Μονάδα διαμονής ηλικιωμένων	18.6
Για βιομηχανική χρήση	Βιομηχανίες παραγωγής προϊόντων γενικής φύσεως και υψηλής επικινδυνότητας	9.3
	Βιομηχανίες παραγωγής ειδικών προϊόντων	-
	Χώροι για επαγγελματική χρήση	9.3
	Πύργος ελέγχου αεροδρομίου	3.7
Για αποθηκευτική χρήση	Αποθηκευτικοί χώροι	-
	Αποθηκευτικοί χώροι εμπορικής χρήσης	27.9
	Λοιποί αποθηκευτικοί χώροι	46.5

Το ποσοστό της μεικτής επιφάνειας ισχύει για την κατασκευή στο σύνολό της (η περιοχή εντός των περιμετρικών τοιχωμάτων του κτιρίου, συμπεριλαμβανομένων των περιοχών που καταλαμβάνονται από στοιχεία που οι άνθρωποι δεν χρησιμοποιούν), ενώ το ποσοστό της καθαρής επιφάνειας όπου αναγράφεται στον Πίνακα 17 ισχύει για τον πραγματικά κατειλημμένο χώρο, όπως είναι οι αίθουσες, και δεν περιλαμβάνει τους διαδρόμους, την περιοχή που καταλαμβάνεται από τοίχους ή άλλες ελεύθερες περιοχές (G.E. Harrington, 2018).

Όπως φαίνεται, τα γραφεία του υπόγειου χώρου στο Τ.Π.Π.Λ. εντάσσονται στην κατηγορία των χώρων για επαγγελματική χρήση και έτσι ο θεωρητικός πληθυσμός τους υπολογίζεται με την αναλογία 1 ατόμου/9,3 m².

Συνεπώς, τα γραφεία στον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Π.Λ. έχουν θεωρητικό πληθυσμό $223 \text{ m}^2/9.3 \text{ m}^2 \approx 24$ άτομα.

Ο χώρος της αποθήκης τώρα δεν μπορεί να θεωρηθεί σε καμία περίπτωση εμπορικής χρήσεως και λόγω της εξεζητημένης φύσης των προϊόντων που θα φιλοξενεί στο μέλλον, επικίνδυνα στερεά απόβλητα, εντάσσεται στην κατηγορία των λοιπών αποθηκευτικών χώρων του Πίνακα 17.

Έτσι ο θεωρητικός πληθυσμός των αποθηκών υπολογίζεται με την αναλογία $1 \text{ ατόμου}/46.5 \text{ m}^2$.

Συνεπώς για την αποθήκη του υπόγειου ο θεωρητικός πληθυσμός είναι $2220 \text{ m}^2/46.5 \text{ m}^2 \approx 48$ άτομα.

Συμπερασματικά, ο συνολικός θεωρητικός πληθυσμός του υπό μελέτη χώρου σύμφωνα με τον NFPA είναι $24+48 = 72$ άτομα.

Στον Πίνακα 18 παρατίθεται ο θεωρητικός πληθυσμός του υπόγειου χώρου του Τ.Π.Π.Λ. σύμφωνα με τον Ελληνικό κανονισμό πυροπροστασίας και τον NFPA.

Πίνακας 18. Θεωρητικός πληθυσμός υπόγειου χώρου στο Τ.Π.Π.Λ.

Κανονισμός	Θεωρητικός πληθυσμός
Ελληνικός κανονισμός πυροπροστασίας	69 άτομα
NFPA	72 άτομα

Γ.2. Υπολογισμός ικανότητας οδεύσεων διαφυγής στον υπόγειο χώρο του Λαυρίου

Στο σημείο αυτό θα υπολογίσουμε τον μέγιστο αριθμό ατόμων που μπορούν να εκκενώσουν με ασφάλεια τον υπόγειο χώρο του Λαυρίου καθώς και τη μέγιστη χωρητικότητα που μπορούν να εξυπηρετήσουν οι οδεύσεις διαφυγής και τα επιμέρους στοιχεία τους σύμφωνα με τον Ελληνικό κανονισμό πυροπροστασίας κτιρίων και τους κανονισμούς του NFPA (National Fire Protection Association). Για τους υπολογισμούς αυτούς, πρέπει αρχικά να μετράμε το καθαρό πλάτος των οδεύσεων διαφυγής και των στοιχείων που τις απαρτίζουν στο στενότερο σημείο τους (G.E. Harrington, 2018).

Στη συνέχεια από το καθαρό πλάτος που έχει μετρηθεί θα πρέπει να αφαιρείται σε κάθε περίπτωση το αντίστοιχο όριο όδευσης ώστε να προκύπτει το επιθυμητό ενεργό πλάτος των στοιχείων της κάθε όδευσης διαφυγής (Harold E. "Bud" Nelson, 2002).

Ο υπόγειος χώρος του Λαυρίου ο οποίος μελετάται στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής, έχει τις παρακάτω δύο οδεύσεις διαφυγής:

- i. Το φρέαρ
- ii. Τη στοά

i. Η πρώτη όδευση διαφυγής αποτελείται:

- Από τους διαδρόμους του υπόγειου χώρου
- Από την πόρτα που οδηγεί στο κλιμακοστάσιο
- Από τη σκάλα που ακολουθεί
- Από την τελική πόρτα εξόδου στην επιφάνεια

Διάδρομοι (Εικόνα 30):

Για να υπολογίσουμε το μέγιστο αριθμό ενοίκων που μπορούν να εξυπηρετήσουν οι διάδρομοι θα αποκλείσουμε από τους υπολογισμούς μας ένα μεγάλο χώρο του υπόγειου, στον οποίο σε βάθος χρόνου δεν θα έχει πρόσβαση κανένα άτομο καθώς θα φιλοξενεί έναν μεγάλο αριθμό από βαρέλια γεμάτα με ποσότητες αρσενικού, καδμίου και μολύβδου.

Έτσι κάνοντας αυτόν τον αποκλεισμό, προκύπτει ότι το καθαρό πλάτος των διαδρόμων στο πιο στενό σημείο τους είναι 5.44 m. Σύμφωνα με τον Πίνακα 11 το όριο όδευσης για τους διαδρόμους είναι 20 cm.

Άρα το ενεργό πλάτος των διαδρόμων είναι:

$$W_{e\delta} = 5.44 - 0.20 \longleftrightarrow W_{e\delta} = 5.24 \text{ m}$$

➤ **Ελληνικός κανονισμός πυροπροστασίας κτιρίων**

Σύμφωνα με αυτόν τον κανονισμό η παροχή για τις αποθήκες, όπως ο υπόγειος χώρος του Λαυρίου, για οριζόντιες οδεύσεις (διάδρομοι) είναι 100 άτομα ανά 0.60 του μέτρου. Άρα οι διάδρομοι εξυπηρετούν μέχρι:

$$Q_{\delta} = (W_{e\delta}/0.6) * 100 = (5.24/0.6) * 100 = 8.73 * 100 \longleftrightarrow Q_{\delta} = 873 \text{ άτομα}$$

➤ **Κανονισμοί του NFPA**

Σύμφωνα με τους κανονισμούς του NFPA και από τον Πίνακα 10 προκύπτει η αναλογία ενός ατόμου ανά 5 mm ενεργού πλάτους διαδρόμου. Άρα οι διάδρομοι εξυπηρετούν μέχρι:

$$Q'_{\delta} = W_{e\delta}/0.005 = 5.24/0.005 \longleftrightarrow Q'_{\delta} = 1048 \text{ άτομα}$$



Εικόνα 30. Διάδρομος του υπόγειου χώρου του Λαυρίου

Πόρτα κλιμακοστασίου (Εικόνα 31):

Το καθαρό άνοιγμα της πόρτας αυτής είναι 0.95 m. Σύμφωνα με τον Πίνακα 11 το όριο όδευσης για τις πόρτες είναι 15 cm.

Άρα το ενεργό πλάτος της πόρτας αυτής είναι:

$$W_{επκ} = 0.95 - 0.15 \longleftrightarrow W_{επκ} = 0.80 \text{ m}$$

➤ **Ελληνικός κανονισμός πυροπροστασίας κτιρίων**

Σύμφωνα με αυτόν τον κανονισμό η παροχή για τις αποθήκες, όπως ο υπόγειος χώρος του Λαυρίου, για οριζόντιες οδεύσεις (πόρτες) είναι 100 άτομα ανά 0.60 του μέτρου. Άρα η πόρτα που οδηγεί στο κλιμακοστάσιο εξυπηρετεί μέχρι:

$$Q_{\text{πκ}} = (W_{\text{επκ}}/0.6)*100 = (0.8/0.6)*100 = 1.33*100 \longleftrightarrow Q_{\text{πκ}} = 133 \text{ άτομα}$$

➤ **Κανονισμοί του NFPA**

Σύμφωνα με τους κανονισμούς αυτούς και από τον Πίνακα 10 προκύπτει η αναλογία ενός ατόμου ανά 5 mm ενεργού πλάτους πόρτας. Άρα η συγκεκριμένη πόρτα μπορεί να εξυπηρετήσει μέχρι:

$$Q'_{\text{πκ}} = W_{\text{επκ}}/0.005 = 0.8/0.005 \longleftrightarrow Q'_{\text{πκ}} = 160 \text{ άτομα}$$



Εικόνα 31. Πόρτα κλιμακοστασίου του υπόγειου χώρου του Λαυρίου

Σκάλα κλιμακοστασίου (Εικόνα 32):

Το καθαρό άνοιγμα της σκάλας του κλιμακοστασίου (μήκος σκαλοπατιού) είναι 1.06 m. Σύμφωνα με τον Πίνακα 11 το όριο όδευσης για τις σκάλες είναι 15 cm.

Άρα το ενεργό πλάτος της σκάλας είναι:

$$W_{\text{εσκ}} = 1.06 - 0.15 \rightarrow W_{\text{εσκ}} = 0.91 \text{ m}$$

➤ **Ελληνικός κανονισμός πυροπροστασίας κτιρίων**

Σύμφωνα με τον κανονισμό αυτό, η παροχή για τις αποθήκες, όπως ο υπόγειος χώρος του Λαυρίου, για κατακόρυφες οδεύσεις (σκάλες) είναι 60 άτομα ανά 0.60 του μέτρου. Άρα οι σκάλες εξυπηρετούν μέχρι:

$$Q_{σκ} = (W_{εσκ}/0.6) * 60 = (0.91/0.6) * 60 = 1.516 * 60 \longleftrightarrow Q_{σκ} = 91 \text{ άτομα}$$

➤ **Κανονισμοί του NFPA**

Από τον Πίνακα 10 προκύπτει η αναλογία ενός ατόμου ανά 7.6 mm του ενεργού πλάτους σκάλας. Άρα οι σκάλες μπορούν να εξυπηρετήσουν μέχρι:

$$Q'_{σκ} = W_{εσκ}/7.6 = 0.91/7.6 \longleftrightarrow Q'_{σκ} = 120 \text{ άτομα}$$



Εικόνα 32. Άποψη σκάλας του υπογείου χώρου του Λαυρίου

Πόρτα εξόδου στην επιφάνεια (Εικόνα 33):

Το καθαρό άνοιγμα της συγκεκριμένης πόρτας είναι 1.00 m. Σύμφωνα με τον Πίνακα 11 το όριο όδευσης για τις πόρτες είναι 15 cm.

Άρα το ενεργό πλάτος της πόρτας αυτής είναι:

$$W_{επε} = 1.00 - 0.15 \longleftrightarrow W_{επε} = 0.85 \text{ m}$$

➤ **Ελληνικός κανονισμός πυροπροστασίας κτιρίων**

Η παροχή για τις αποθήκες για οριζόντιες οδεύσεις (πόρτες) είναι 100 άτομα ανά 0.60 του μέτρου. Άρα η πόρτα εξόδου από τις σκάλες στην επιφάνεια μπορεί να εξυπηρετήσει μέχρι:

$$Q_{πε} = (W_{επε}/0.6) * 100 = (0.85/0.6) * 100 = 1.42 * 100 \longleftrightarrow Q_{πε} = 142 \text{ άτομα}$$

➤ **Κανονισμοί του NFPA**

Σύμφωνα με αυτούς τους κανονισμούς και τον Πίνακα 10 προκύπτει η αναλογία ενός ατόμου ανά 5 mm ενεργού πλάτους πόρτας. Άρα αυτή η πόρτα εξυπηρετεί μέχρι:

$$Q'_{πε} = W_{επε}/0.005 = 0.85/0.005 \longleftrightarrow Q'_{πε} = 170 \text{ άτομα}$$



Εικόνα 33. Πόρτα εξόδου στην επιφάνεια από το φρέαρ (στα δεξιά)

Ο μέγιστος αριθμός των ατόμων που μπορεί να εξυπηρετήσει η όδευση διαφυγής που περιλαμβάνει το φρέαρ, ταυτίζεται όπως είναι λογικό με την ελάχιστη μέγιστη χωρητικότητα των επιμέρους στοιχείων της όδευσης αυτής.

Με άλλα λόγια συγκρίνοντας τις τιμές των χωρητικότητων των παραπάνω στοιχείων της συγκεκριμένης όδευσης διαφυγής και βρίσκοντας την μικρότερη, θα προκύψουν δύο μέγιστες χωρητικότητες για την πρώτη όδευση διαφυγής. Μία για τον Ελληνικό κανονισμό πυροπροστασίας κτιρίων και μία τιμή που θα είναι σύμφωνη με τους κανονισμούς του NFPA.

➤ **Ελληνικός κανονισμός πυροπροστασίας κτιρίων**

Συγκρίνοντας τις παραπάνω χωρητικότητες των στοιχείων της 1^{ης} όδευσης διαφυγής, που προέκυψαν σύμφωνα με τον κανονισμό αυτό, συμπεραίνουμε πως η ελάχιστη τιμή είναι αυτή της χωρητικότητας της σκάλας, $Q_{σκ} = 91$ άτομα.

Συνεπώς η πρώτη όδευση διαφυγής μπορεί να εξυπηρετήσει μέχρι 91 άτομα.

➤ **Κανονισμοί του NFPA**

Συγκρίνοντας τις παραπάνω χωρητικότητες των στοιχείων της 1^{ης} όδευσης διαφυγής, που προέκυψαν σύμφωνα με τον κανονισμό αυτό, συμπεραίνουμε πως η ελάχιστη τιμή είναι αυτή της χωρητικότητας της σκάλας, $Q'_{σκ} = 120$ άτομα.

Συνεπώς η 1^η όδευση διαφυγής μπορεί να εξυπηρετήσει μέχρι 120 άτομα.

ii. Η δεύτερη όδευση διαφυγής αποτελείται:

- Από τους διαδρόμους του υπόγειου χώρου
- Από το κεκλιμένου επίπεδο (ράμπα) που οδηγεί στην επιφάνεια

Διάδρομοι (Εικόνα 30):

Για τους διαδρόμους της όδευσης αυτής δεν αλλάζει κάτι σε σχέση με τους διαδρόμους της 1^{ης} όδευσης διαφυγής, αφού γίνεται λόγος στην ουσία για τους ίδιους διαδρόμους, και έτσι

οι μέγιστες χωρητικότητες που των διαδρόμων είναι ίδιες στις δύο οδεύσεις διαφυγής και για τους δύο κανονισμούς που εξετάζονται.

Ράμπα που οδηγεί στην επιφάνεια (Εικόνα 34):

Το καθαρό άνοιγμα της ράμπας αυτής είναι 4.72 m. Σύμφωνα με τον Πίνακα 11 το όριο όδευσης για τις ράμπες είναι 20 cm.

Άρα το ενεργό πλάτος της ράμπας είναι:

$$W_{ep} = 4.72 - 0.20 \longleftrightarrow W_{ep} = 4.52 \text{ m}$$

➤ **Ελληνικός κανονισμός πυροπροστασίας κτιρίων**

Σύμφωνα με τον κανονισμό αυτό, η παροχή για τις αποθήκες, όπως ο υπόγειος χώρος του Λαυρίου, για κατακόρυφες οδεύσεις (ράμπες) είναι 60 άτομα ανά 0.60 του μέτρου. Άρα οι ράμπα εξυπηρετεί μέχρι:

$$Q_p = (W_{ep}/0.6) * 60 = (4.52/0.6) * 60 = 7.53 * 60 \longleftrightarrow Q_p = 452 \text{ άτομα}$$

➤ **Κανονισμοί του NFPA**

Σύμφωνα με αυτούς τους κανονισμούς και τον Πίνακα 10 προκύπτει η αναλογία ενός ατόμου ανά 5 mm ενεργού πλάτους ράμπας. Άρα αυτή η ράμπα εξυπηρετεί μέχρι:

$$Q'_p = W_{ep}/0.005 = 4.52/0.005 \longleftrightarrow Q'_p = 904 \text{ άτομα}$$



Εικόνα 34. Άποψη ράμπας του υπόγειου χώρου του Λαυρίου



Εικόνα 35. Έξοδος στοάς του υπόγειου χώρου του Λαυρίου

Κατά πλήρη αντιστοιχία με τη διαδικασία που ακολουθήθηκε για την πρώτη όδευση διαφυγής, θα προκύψουν δύο μέγιστες χωρητικότητες για τη δεύτερη όδευση διαφυγής. Μία για τον Ελληνικό κανονισμό πυροπροστασίας κτιρίων και μία τιμή που θα είναι σύμφωνη με τους κανονισμούς του NFPA.

➤ **Ελληνικός κανονισμός πυροπροστασίας κτιρίων**

Συγκρίνοντας τις παραπάνω χωρητικότητες των στοιχείων της δεύτερης όδευσης διαφυγής, που προέκυψαν σύμφωνα με τον κανονισμό αυτό, συμπεραίνουμε πως η ελάχιστη τιμή είναι αυτή της χωρητικότητας της ράμπας, $Q_p = 452$ άτομα. Συνεπώς η δεύτερη όδευση διαφυγής μπορεί να εξυπηρετήσει μέχρι 452 άτομα.

➤ **Κανονισμοί του NFPA**

Συγκρίνοντας τις παραπάνω χωρητικότητες των στοιχείων της δεύτερης όδευσης διαφυγής, που προέκυψαν σύμφωνα με τον κανονισμό αυτό, συμπεραίνουμε πως η ελάχιστη τιμή είναι αυτή της χωρητικότητας της ράμπας, $Q'_p = 904$ άτομα. Συνεπώς η 1^η όδευση διαφυγής μπορεί να εξυπηρετήσει μέχρι 904 άτομα. (Erica D. Kuligowski, 2010).

Όμως σύμφωνα με τον NFPA για να είναι ασφαλής ένας σχεδιασμός εκκένωσης θα πρέπει σε περιπτώσεις όπου περισσότερες από μία οδεύσεις διαφυγής απαιτούνται, η μέγιστη χωρητικότητα της κάθε όδευσης διαφυγής να είναι μεγαλύτερη από το 50% της μέγιστης χωρητικότητας του ευρύτερου χώρου σε περίπτωση που κάποια από τις υπόλοιπες οδεύσεις διαφυγής γίνει μη διαθέσιμη κατά τη διάρκεια της εκκένωσης.

Για να ικανοποιηθεί αυτό το κριτήριο αρκεί ο μέγιστος πληθυσμός του ευρύτερου χώρου να είναι διπλάσιος από την ικανότητα εξυπηρέτησης της μικρότερης εξόδου. Με άλλα λόγια αρκεί:

➤ **Για τον Ελληνικό κανονισμό πυροπροστασίας κτιρίων**

$$\text{Exitload}_{\text{admin}} \geq \text{Maxload}/2 \leftrightarrow 91 \geq \text{Maxload}/2 \leftrightarrow \text{Maxload} = 182 \text{ άτομα}$$

➤ **Για τον NFPA**

$$\text{Exitload}_{\text{min}} \geq \text{Maxload}/2 \leftrightarrow 120 \geq \text{Maxload}/2 \leftrightarrow \text{Maxload} = 240 \text{ άτομα}$$

Πλέον με τα νέα δεδομένα, ο μέγιστος πληθυσμός που μπορεί να εξυπηρετήσει ο υπόγειος χώρος του Λαυρίου, που ικανοποιεί όλους τους κανονισμούς που αναφερθήκαν, είναι 182 άτομα με βάση τις προδιαγραφές του Ελληνικού κανονισμού πυροπροστασίας κτιρίων και 240 άτομα με βάση τις προδιαγραφές του NFPA.

Στον Πίνακα 19 παρουσιάζονται αναλυτικά οι μέγιστες χωρητικότητες των δύο οδεύσεων διαφυγής και των επιμέρους στοιχείων τους.

Πίνακας 19. Μέγιστες χωρητικότητες των δύο οδεύσεων διαφυγής και των επιμέρους στοιχείων τους

Όδευση διαφυγής	Επιμέρους στοιχεία	Μέγιστη χωρητικότητα επιμέρους στοιχείων		Μέγιστη χωρητικότητα οδεύσεων διαφυγής	
		Ελληνικός Κανονισμός πυροπροστασίας	NFPA	Ελληνικός κανονισμός πυροπροστασίας	NFPA
Φρέαρ (1 ^η)	Διάδρομοι	873	1048	91	120
	Πόρτα κλιμακοστασίου	133	160		
	Σκάλες	91	120		
	Πόρτα εξόδου στην επιφάνεια	142	170		
Στοά (2 ^η)	Διάδρομοι	873	1048	452	904
	Ράμπα που οδηγεί στην επιφάνεια	452	904		
Συνολικό				543	1024
Κριτήριο του 50%				182	240

Γ.3. Προσομοίωση εκκένωσης στον υπόγειο χώρο στο Λαύριο μέσω του STEPS

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής μελετήθηκαν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και οι λειτουργίες των μοντέλων εκκένωσης που παρουσιάζονται στον Πίνακα 12. Από τη μελέτη αυτή επιλέχθηκε το μοντέλο STEPS (Mott MacDonald) για τη σχεδίαση και την προσομοίωση της εκκένωσης στον υπόγειο χώρο του Λαυρίου, καθώς παρουσιάζει μια σειρά πλεονεκτημάτων έναντι των υπόλοιπων μοντέλων.

Πιο συγκεκριμένα, το STEPS είναι διαθέσιμο στο κοινό και κάθε χρήστης μπορεί να το εγκαταστήσει και να το λειτουργήσει στον προσωπικό του υπολογιστή, χωρίς την παρέμβαση της εταιρίας ανάπτυξης και σχεδίασης του μοντέλου όπως γίνεται σε άλλα μοντέλα εκκένωσης. Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα του STEPS, είναι ότι λαμβάνει υπόψη του τις διάφορες ενέργειες των ανθρώπων – ενοίκων και ενσωματώνει τη λήψη αποφάσεων τους κατά την εκκένωση, καθιστώντας την αυτομάτως πιο ρεαλιστική. Επιπρόσθετα, σε αντίθεση με άλλα μοντέλα εκκένωσης υπάρχει η δυνατότητα παρουσίας εμποδίων στο χώρο, τα οποία επηρεάζουν την επιλογή των ενοίκων για τη διαδρομή που θα ακολουθήσουν προς την έξοδο, όπως δηλαδή συμβαίνει και στην πραγματικότητα. Επιπλέον, το μοντέλο αυτό προσφέρει μεγάλη ευελιξία στον χρήστη καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκκένωση κάθε είδους χώρου και κτιρίου.

Στην περίπτωση μας, όπου σχεδιάζουμε την εκκένωση στον υπόγειο χώρο του Λαυρίου, γίνεται η παραδοχή ότι δεν έχουν όλοι οι ένοικοι μεγάλη εξοικείωση με το χώρο, συμπεριλαμβάνοντας έτσι και τους απλούς επισκέπτες. Αυτομάτως γίνεται σαφές ότι το να

γνωρίζει ο χρήστης μέσω του μοντέλου εκκένωσης, όπως συμβαίνει με το STEPS, την ακριβή θέση του κάθε ενόικου στο χώρο ανά πάσα στιγμή κρίνεται επιτακτικό. Επιπλέον, το STEPS μας δίνει τη δυνατότητα να εισάγουμε με ψηφιακά σχέδια (CAD) το σχεδιάγραμμα του κτιρίου, παρέχοντας μεγαλύτερη ακρίβεια στον σχεδιασμό εξοικονομώντας παράλληλα χρόνο για το χρήστη. Μας δίνει επίσης τη δυνατότητα εισαγωγής δεδομένων πυρκαγιάς που έχουν προσομοιωθεί και εξαχθεί από άλλο μοντέλο επιτρέποντας μας έτσι να κάνουμε νέες προσομοιάσεις εκκενώσεων, όπου το έκτακτο συμβάν είναι η πυρκαγιά, καθιστώντας έτσι πιο ρεαλιστικό τον υπόλοιπο σχεδιασμό.

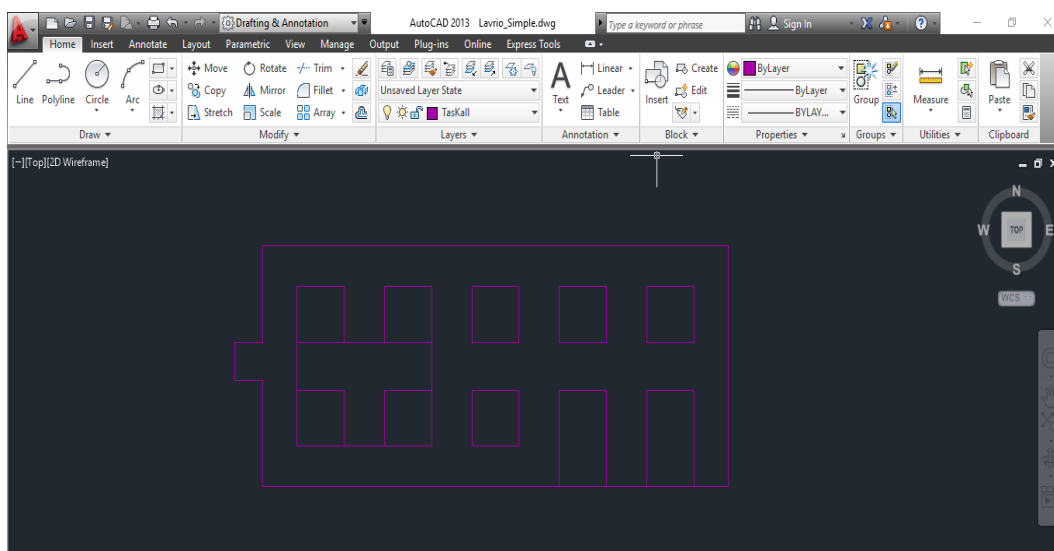
Ένα μοντέλο εκκένωσης αξιολογείται σε μεγάλο βαθμό σχετικά με τις μεθόδους επικύρωσης των δεδομένων και παραμέτρων που χρησιμοποιεί καθώς και των αποτελεσμάτων που εξάγει. Στο STEPS η εκκένωση είναι μια ακριβής αναπαράσταση του πραγματικού κόσμου καθώς υπάρχει επικύρωση μέσω ενσωμάτωσης διεθνών κανονισμών ασφαλείας και μέσω άλλων δοκιμών εκκένωσης που έχουν πραγματοποιηθεί. Τέλος, το STEPS δίνει τη δυνατότητα οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων της εκκένωσης τόσο σε διδιάστατη όσο και σε τρισδιάστατη απεικόνιση. Με αυτό το τρόπο δίνεται στο χρήστη μια καλύτερη εικόνα των γεγονότων που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της εκκένωσης και εξάγονται πιο ασφαλή συμπεράσματα.

Γ.3.1. Σχεδιασμός του υπόγειου χώρου

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει αναφορά στις επιμέρους εντολές και λειτουργίες του STEPS που χρησιμοποιήσαμε ώστε να ολοκληρωθεί ο σχεδιασμός του υπόγειου χώρου του Τ.Π.Π.Α. στο συγκεκριμένο μοντέλο εκκένωσης και να ακολουθήσει η προσομοίωση της εκκένωσης. Για την ολοκλήρωση του σχεδιασμού πραγματοποιήθηκαν κατά σειρά τα εξής:

Βήμα 1^ο – Σχεδιασμός του κυρίου χώρου:

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, ένα από τα πλεονεκτήματα του STEPS είναι ότι δίνει στον χρήστη τη δυνατότητα μεταφοράς ψηφιακών σχεδίων (CAD), επιτυγχάνοντας έτσι εξοικονόμηση χρόνου και μεγαλύτερη ακρίβεια στον σχεδιασμό. Εκμεταλλευόμενοι αυτή τη δυνατότητα, μεταφέραμε στο πρόγραμμα την κάτοψη του υπόγειου χώρου του Τ.Π.Π.Α. (Εικόνα 36), την οποία είχαμε δημιουργήσει στο AutoCAD.

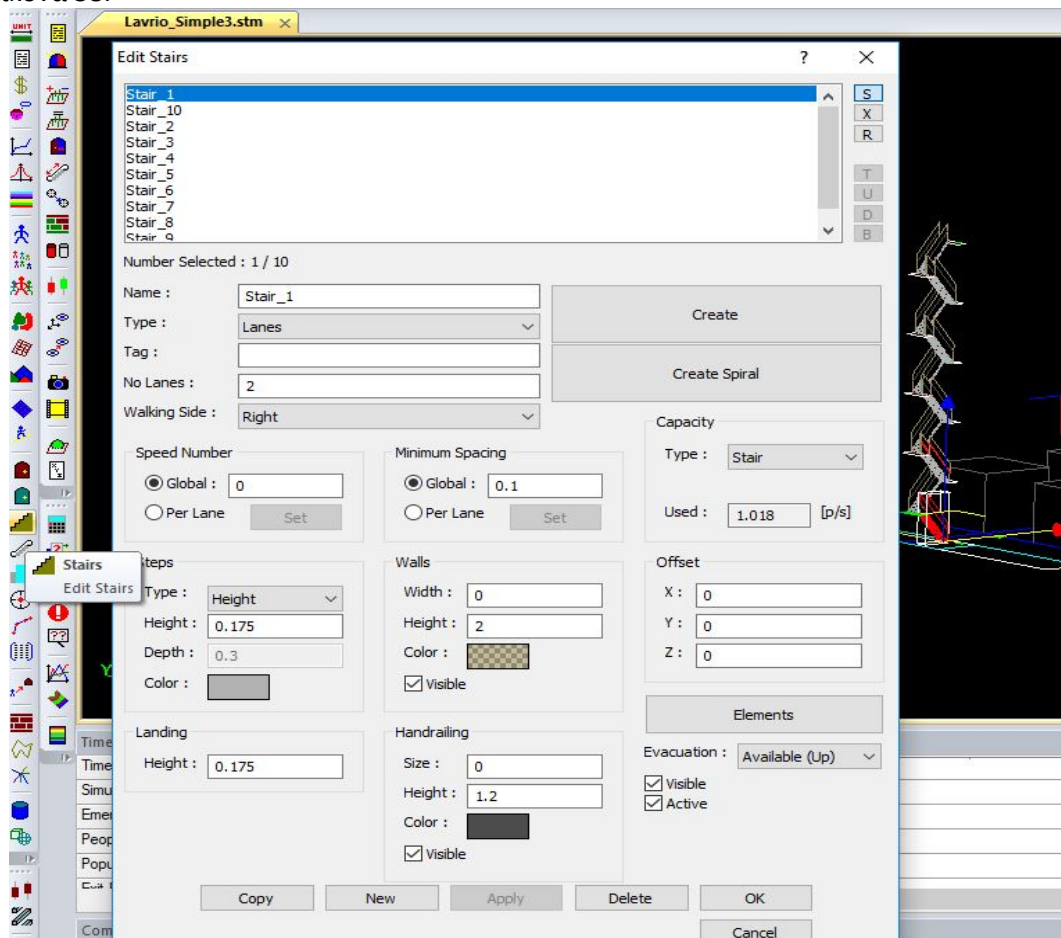


Εικόνα 36. Κάτοψη υπόγειου χώρου του Τ.Π.Π.Α. σε CAD αρχείο

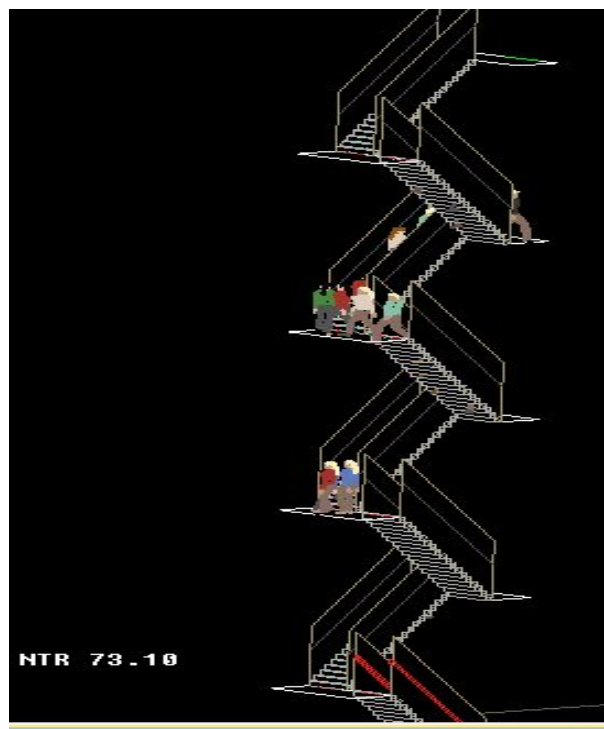
Βήμα 2^ο – Σχεδιασμός του κλιμακοστασίου του φρέατος:

Με την επιλογή *Edit Stairs* (Εικόνα 37) στο STEPS, εισάγοντας τις ακριβείς διαστάσεις όπως προέκυψαν από την κάτοψη του υπόγειου χώρου στο AutoCAD, δημιουργήσαμε δέκα

αυτοτελείς σκάλες που ενωμένες δίνουν τη τελική μορφή του φρέατος όπως φαίνεται στην Εικόνα 38.



Εικόνα 37. Παράθυρο δημιουργίας και επεξεργασίας σκαλών στο STEPS



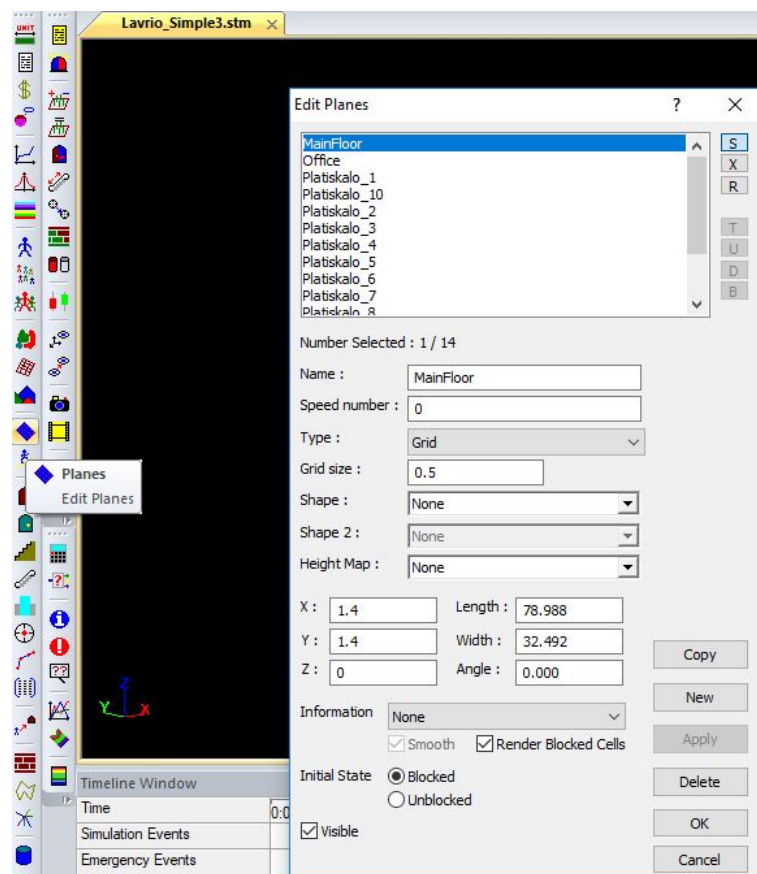
Εικόνα 38. Τελική μορφή σκαλών φρέατος

Βήμα 3^ο – Σχεδιασμός της επιμήκους στοάς:

Από τα αρχεία CAD που επεξεργαστήκαμε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής προκύπτει ότι η επιμήκης στοά προσπέλασης στον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Α. έχει 175 m μήκος και 17% κλίση. Για τη σωστή απεικόνιση της, σχεδιάσαμε στο STEPS ένα επίπεδο μήκους 175 m και πλάτους 4.7 m δίνοντας του ένα «τοπικό βαθμό δυσκολίας κίνησης» (alocal), εκφράζοντας έτσι την κλίση της στοάς μέσω της αλλαγής στην ταχύτητα κίνησης των ενοίκων κατά την εκκένωση.

Βήμα 4^ο – Δημιουργία επιπέδων:

Για να γίνει η προσομοίωση μιας οποιασδήποτε εκκένωσης στο STEPS θα πρέπει πρώτα να δημιουργήσαμε τα απαραίτητα εκείνα επίπεδα (planes) στα οποία θα κινούνται οι ένοικοι. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της εντολής *Edit Planes* (Εικόνα 39), προσδιορίζοντας τις διαστάσεις και την ακριβή θέση του εκάστοτε επιπέδου στον χώρο. Στο στάδιο αυτό δημιουργήσαμε μια σειρά επιπέδων για την αποθήκη του χώρου, τα γραφεία, τη σήραγγα και τις σκάλες.

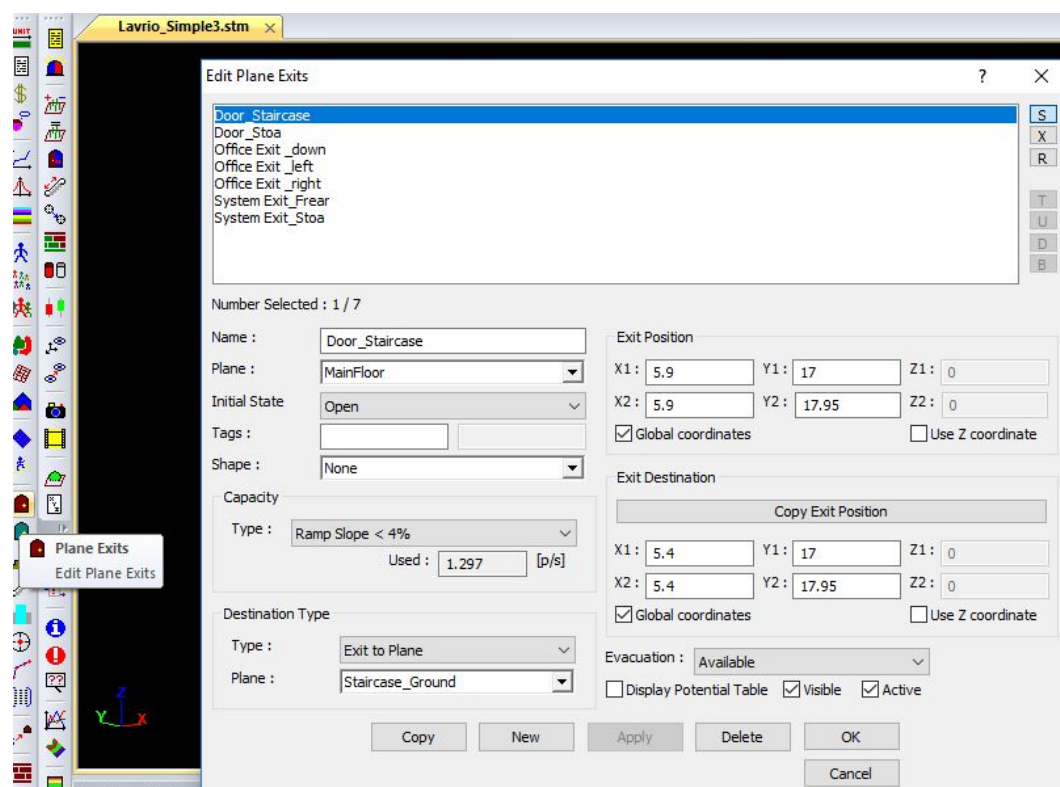


Εικόνα 39. Παράθυρο δημιουργίας και επεξεργασίας επιπέδων στο STEPS

Βήμα 5^ο – Δημιουργία εξόδων κινδύνου:

Για να μπορούν οι ένοικοι να συνεχίζουν την κίνηση τους περνώντας μέσω διαφορετικών επιπέδων καθώς και να εκκενώνουν τον εκάστοτε χώρο μέσω των τελικών εξόδων διαφυγής, είναι απαραίτητη η δημιουργία εξόδων κινδύνου (Plane Exits). Μέσω της εντολής *Edit Plane Exits* του STEPS (Εικόνα 40), δημιουργήσαμε μια σειρά από εξόδους - πόρτες, σύμφωνα πάντα με τις πραγματικές τους διαστάσεις και θέση στο χώρο. Πιο συγκεκριμένα δημιουργήσαμε τρεις πόρτες διαφυγής από και προς τα γραφεία του υπόγειου, μια πόρτα

που οδηγεί στο κλιμακοστάσιο, μια έξοδος που ενώνει την αποθήκη με την επιμήκη στοά και δύο τελικές εξόδους διαφυγής μέσω του φρέατος και της στοάς.



Εικόνα 40. Παράθυρο δημιουργίας και επεξεργασίας εξόδων κινδύνου στο STEPS

Γ.3.2. Εισαγωγή βασικών παραμέτρων εκκένωσης

Αν μελετήσει κανείς τον υπόγειο χώρο στο Λαύριο, μπορεί να εξαγάγει το συμπέρασμα ότι θα πρέπει να απαγορεύεται αυστηρά η είσοδος σε άτομα με οποιεσδήποτε κινητικές δυσκολίες καθώς επίσης και η χρήση του από υπερήλικα άτομα να είναι περιορισμένη. Πιο συγκεκριμένα, η πρώτη όδευση διαφυγής περιλαμβάνει ένα φρέαρ που καλύπτει υψομετρική διαφορά 30 m και αποτελείται από σκάλες 9 ορόφων. Η δεύτερη όδευση διαφυγής περιλαμβάνει ουσιαστικά μια σήραγγα 175 m μήκους και περίπου 17% κλίσης. Επιπλέον, ο ανελκυστήρας που βρίσκεται στον χώρο χρησιμοποιείται μόνο για τη μεταφορά προϊόντων από και προς την επιφάνεια, καθώς επίσης σε περίπτωση εκκένωσης του χώρου η χρήση του κρίνεται απαγορευτική (Κανονισμός πυροπροστασίας κτιρίων, 2018).

Συνεπώς, ο πληθυσμός που χρησιμοποιήθηκε στο STEPS απαρτίζεται από τους ενήλικους και τα παιδιά. Για τους δύο αυτούς πληθυσμούς δημιουργήσαμε δύο κατανομές για το ύψος τους, που ονομάστηκαν "Adults Height" και "Kids Height".

Ένα πολύ σημαντικό μέγεθος για τη μελέτη και ερμηνεία των αποτελεσμάτων μιας εκκένωσης είναι η ταχύτητα κίνησης του εκάστοτε πληθυσμού που πραγματοποιεί την εκκένωση.

Για την ταχύτητα των ενηλίκων στο οριζόντιο επίπεδο επιλέχθηκε μια κατανομή με μέση ταχύτητα τη 1.19 m/s όπως προκύπτει από τον Πίνακα 6 και ελάχιστη και μέγιστη ταχύτητα, τις 1.09 m/s και 1.29 m/s αντίστοιχα (μειωμένη και αυξημένη της μέσης κατά 0.1 m/s).

Για την ταχύτητα των παιδιών στο οριζόντιο επίπεδο, λάβαμε υπόψιν μας μια έρευνα ενός κέντρου φροντίδας παιδιών στη Δανία κατά την οποία συμμετείχαν δύο ομάδες παιδιών χωρισμένες ανάλογα με την ηλικία τους.

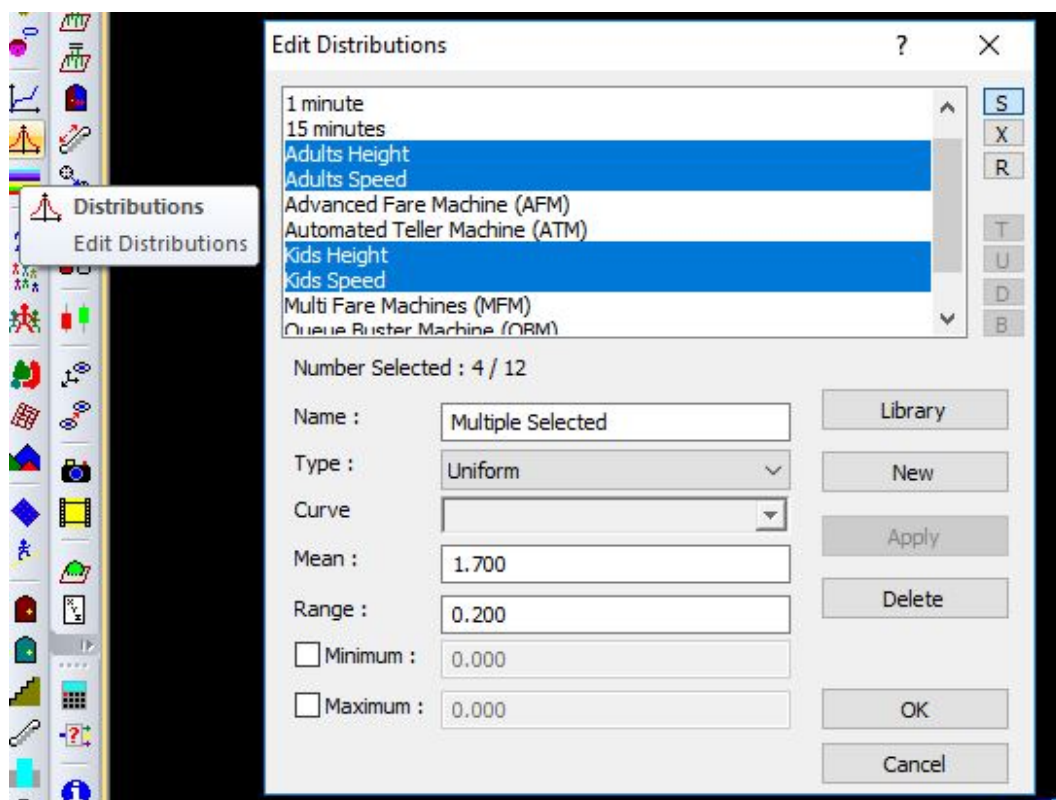
- 0 – 2 ετών
- 3 – 6 ετών

Τα παιδιά αυτά εκκένωσαν ένα κτίριο παιδικού σταθμού και μετρήθηκε η ταχύτητά τους στο οριζόντιο επίπεδο. (Aldís Rún Lárusdóttir, 2010)

Εμείς όπως είναι φυσικό μελετήσαμε τη δεύτερη ηλικιακή ομάδα παιδιών (3 – 6 ετών), καθώς τα παιδιά 0 – 2 ετών είναι πολύ μικρά για να τους επιτραπεί η είσοδος στον υπόγειο χώρο που μελετάμε. Η μέση ταχύτητα κίνησης για τα παιδιά αυτά στο οριζόντιο επίπεδο μετρήθηκε στα 0.84 m/s.

Συνεπώς προέκυψαν δύο κατανομές για την ταχύτητα κίνησης στο οριζόντιο επίπεδο, που εισήχθησαν στο STEPS. Η κατανομή "Adults Speed" και η "Kids Speed".

Οι κατανομές που αναφέρθηκαν δημιουργήθηκαν με την εντολή *Edit Distributions* του STEPS όπως φαίνεται στην Εικόνα 41.



Εικόνα 41. Παράθυρο δημιουργίας και επεξεργασίας κατανομών στο STEPS

Στην περίπτωση μας, το οριζόντιο επίπεδο αποτελείται από την αποθήκη και τις εγκαταστάσεις γραφείων (main floor και office αντίστοιχα στο STEPS). Θα πρέπει όμως να υπολογιστούν και οι ταχύτητες των ενηλίκων και των παιδιών στην επιμήκη στοά καθώς και στις σκάλες του φρέατος που οδηγούν στην επιφάνεια.

Για την ταχύτητα κίνησης στην επιμήκη στοά:

Η στοά έχει μήκος 175 m και καλύπτει μια υψομετρική διαφορά 30 m. Συνεπώς για την κλίση της έχουμε:

$$\epsilon\phi\omega = 30/175 = 17\%$$

Σύμφωνα με την έρευνα (Walking speeds (slope in %), 2015), προκύπτει ότι για κλίσεις που είναι (10% - 20%) η ταχύτητα κίνησης έχει μετρηθεί στα 3.98 km/h ή αλλιώς στα 1.06 m/s.

Από το STEPS γνωρίζω ότι:

$$V = \alpha local * Vmax \quad (\text{Εξίσωση 3})$$

Όπου,

V: η ταχύτητα κίνησης στο κεκλιμένο επίπεδο

V_{max}: η μέση ταχύτητα κίνησης στο οριζόντιο επίπεδο

α_{local}: παράγοντας που εκφράζει τον βαθμό δυσκολίας κατά την κίνηση

Η V_{max} προκύπτει από τον Πίνακα 6 (V_{max}=1.19 m/s) ενώ ισχύει από τα παραπάνω ότι η ταχύτητα κίνησης στην σήραγγα με κλίση είναι V=1.06 m/s.

Άρα λύνοντας την (Εξίσωση 3) ως προς α_{local} έχουμε:

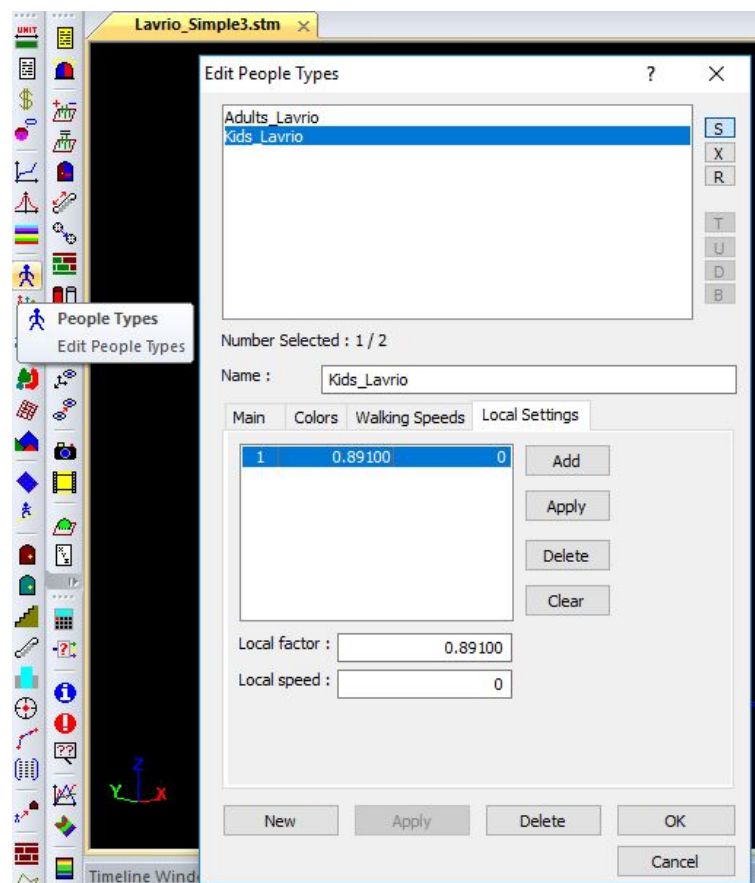
$$\alpha_{local} = V/V_{max} = 1.06/1.19 \longleftrightarrow \alpha_{local} = 0.891$$

Συνεπώς, στο STEPS στο παράθυρο *Edit People Types* και στην επιλογή *Local Settings*, όπως φαίνεται στην Εικόνα 42 έχουμε και για τους ενήλικες και για τα παιδιά:

Local settings: 1

Local factor: 0.891

Local speed: 0



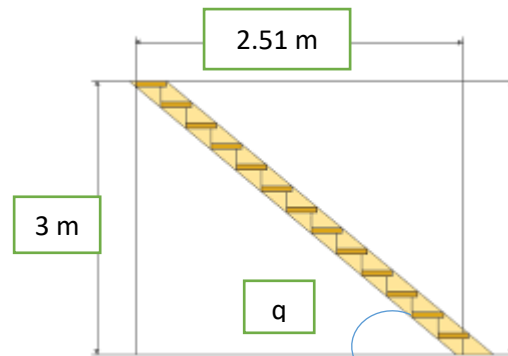
Εικόνα 42. Παράθυρο επεξεργασίας του παράγοντα που εκφράζει τον βαθμό δυσκολίας κατά την κίνηση (α_{local})

Για την ταχύτητα κίνησης στις σκάλες του φρέατος:

Στο παράθυρο του STEPS *Edit People Types* και στην επιλογή *Walking Speeds* (Εικόνα 44), εμφανίζεται ο τύπος:

$$\text{Up slope factor} = \alpha_{slope} * \sin \varphi \quad (\text{Εξίσωση 4})$$

Στην Εικόνα 43 παρουσιάζεται η πλάγια όψη της σκάλας από κεφαλόσκαλο σε κεφαλόσκαλο (ένας όροφος).



Εικόνα 43. Υπολογισμός κλίσης γωνίας

Για να υπολογίσω τη γωνία α της σκάλας, θα πρέπει πρώτα να υπολογίσω την κλίση της:

$$\text{Κλίση} = \epsilon\phi\alpha = 3/2.51 = 1.195 \quad \leftrightarrow \quad \alpha = 50,1^\circ$$

$$\text{Άρα, } \sin\alpha = 0.767$$

Γνωρίζω τώρα ότι το STEPS υπολογίζει την ταχύτητα κίνησης σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$V = \alpha\text{slope} * V_{\max} \quad (\text{Εξίσωση 5})$$

Όπου,

V = η μέγιστη ταχύτητα ανόδου της σκάλας που προκύπτει από τον Πίνακα 6

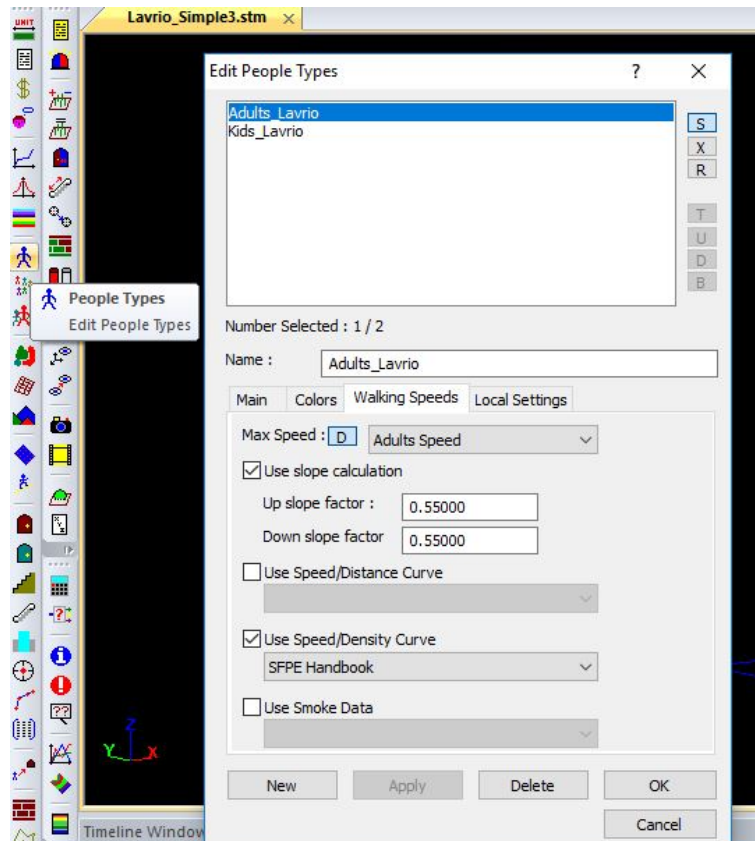
V_{\max} = η μέγιστη ταχύτητα σε οριζόντιο επίπεδο που προκύπτει από τον Πίνακα 6

Λύνοντας την (Εξίσωση 5) ως προς το αslope , έχω:

$$\alpha\text{slope} = V/V_{\max} = 0.85/1.19 \quad \leftrightarrow \quad \alpha\text{slope} = 0.71$$

Συμπερασματικά, η (Εξίσωση 4) και για τους ενήλικες και για τα παιδιά γίνεται:

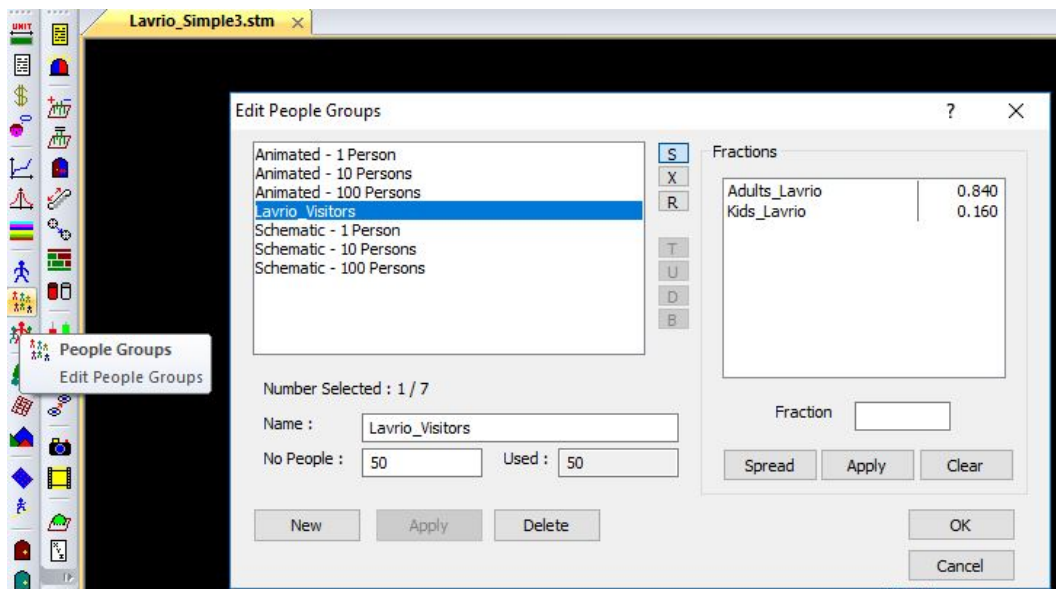
$$\text{Up slope factor} = 0.71 * 0.767 \quad \leftrightarrow \quad \text{Up slope factor} = 0.55$$



Εικόνα 44. Παράθυρο επεξεργασίας της ταχύτητας κίνησης των ενοίκων

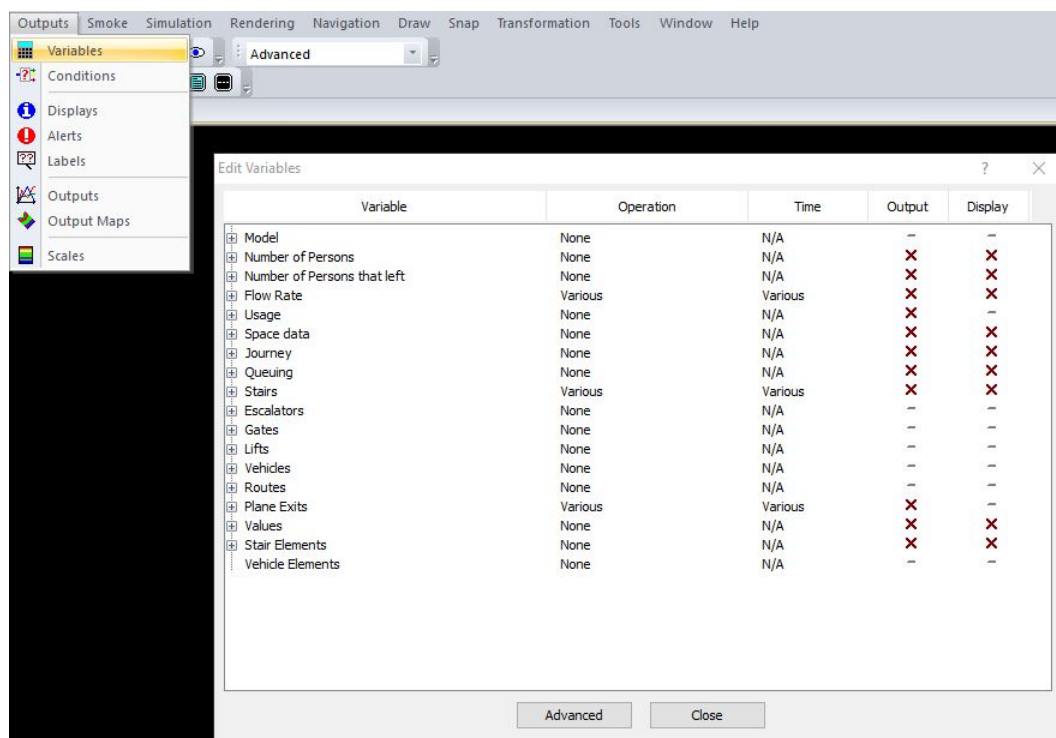
Γ.3.3. Προσομοίωση της εκκένωσης στο STEPS

Αφού ολοκληρώθηκε ο σχεδιασμός του υπόγειου χώρου του Τ.Π.Π.Λ. στο STEPS, εκτελέσαμε μια σειρά από προσομοιώσεις εκκενώσεων για τρία διαφορετικά σενάρια εκκένωσης. Για να γίνει αυτό, μέσω της εντολής *Edit People Groups* του STEPS (Εικόνα 45), δημιουργήσαμε μια ομάδα ενοίκων με το όνομα *Lavrio_Visitors*, έχοντας τη δυνατότητα να αυξομειώνουμε τον αριθμό των ενοίκων της ομάδας αυτής κατά το δοκούν.



Εικόνα 45. Παράθυρο δημιουργίας και επεξεργασίας ομάδας ενοίκων στο STEPS

Για να εξάγουμε τα απαραίτητα συμπεράσματα για κάθε σενάριο εκκένωσης, το STEPS μας δίνει τη δυνατότητα εμφάνισης των επιθυμητών για μας μεταβλητών μέσω της επιλογής *Outputs* → *Variables* (Εικόνα 46).



Εικόνα 46. Παράθυρο οπτικοποίησης μεταβλητών στο STEPS

Εμείς με τη σειρά μας επιλέξαμε να εμφανίζονται οι παρακάτω μεταβλητές:

- Συνολικός χρόνος εκκένωσης
- Συνολικός αριθμός ενοίκων
- Αριθμός ενοίκων που βγήκαν από το φρέαρ
- Αριθμός ενοίκων που βγήκαν από τη στοά

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί πως για κάθε σενάριο εκκένωσης εκτελέστηκαν 20 επαναλήψεις της προσομοίωσης, αντλώντας έτσι ασφαλέστερα συμπεράσματα για κάθε σενάριο.

1^ο Σενάριο εκκένωσης:

Για το σενάριο αυτό επιλέξαμε να εκκενώσουν τον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Λ. 40 άτομα τα οποία μπορούσαν να χρησιμοποιήσουν και τις δύο οδεύσεις διαφυγής, φρέαρ και στοά. Ο πληθυσμός των 40 ατόμων επιλέχθηκε ώστε να υπάρχει ταύτιση της προσομοίωσης της εκκένωσης του STEPS, με την 1^η δοκιμή πραγματικής άσκησης εκκένωσης που πραγματοποιήθηκε στον ίδιο χώρο και συμμετείχαν επίσης 40 άτομα. Με αυτόν τρόπο μπορούμε να κάνουμε ορθότερες συγκρίσεις και να εξάγουμε ασφαλέστερα συμπεράσματα. Τα αποτελέσματα του σεναρίου αυτού παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 20.

Πίνακας 20. Αποτελέσματα 1^{ου} σεναρίου εκκένωσης (N=40)

Προσομοίωση εκκένωσης	Αριθμός ατόμων που χρησιμοποίησε την έξοδο διαφυγής του φρέατος	Αριθμός ατόμων που χρησιμοποίησε την έξοδο διαφυγής της στοάς	Χρόνος εκκένωσης (min:sec)
1 ^η	17	23	4:50
2 ^η	19	21	4:47
3 ^η	16	24	4:57
4 ^η	11	29	4:53
5 ^η	9	31	4:54
6 ^η	18	22	4:48
7 ^η	8	32	4:58
8 ^η	16	24	4:49
9 ^η	21	19	4:51
10 ^η	14	26	4:57
11 ^η	16	24	4:46
12 ^η	14	26	4:55
13 ^η	14	26	4:53
14 ^η	15	25	4:47
15 ^η	11	29	4:48
16 ^η	14	26	4:58
17 ^η	25	15	4:33
18 ^η	18	22	4:42
19 ^η	16	24	5:03
20 ^η	11	29	4:55
Μέσος όρος	15	25	4:51

2^ο Σενάριο εκκένωσης:

Για το σενάριο αυτό επιλέξαμε να εκκενώσουν τον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Π.Α. 240 άτομα τα οποία μπορούσαν να εκκενώσουν το χώρο μόνο μέσω του φρέατος. Ο πληθυσμός των 240 ατόμων επιλέχθηκε, καθώς είναι ο μέγιστος που μπορεί να εξυπηρετηθεί σε περίπτωση που μία όδευση διαφυγής (επιμήκης στοά) γίνει μη διαθέσιμη, όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο Γ.2.. Τα αποτελέσματα του σεναρίου αυτού παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 21.

Πίνακας 21. Αποτελέσματα 2^{ου} σεναρίου εκκένωσης (N=240)

Προσομοίωση εκκένωσης	Χρόνος εκκένωσης (min:sec)
1 ^η	12:14
2 ^η	14:31
3 ^η	13:54
4 ^η	12:44
5 ^η	14:50
6 ^η	13:25
7 ^η	13:45
8 ^η	14:37
9 ^η	11:12
10 ^η	14:05
11 ^η	12:36
12 ^η	14:05
13 ^η	14:09
14 ^η	14:49
15 ^η	11:48
16 ^η	13:30
17 ^η	11:59
18 ^η	13:10

19 ^η	12:05
20 ^η	14:12
Μέσος όρος	13:23

3^ο Σενάριο εκκένωσης:

Για το σενάριο αυτό επιλέξαμε να εκκενώσουν τον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Π.Λ. 240 άτομα τα οποία μπορούσαν να εκκενώσουν το χώρο μόνο μέσω της στοάς. Ο πληθυσμός των 240 ατόμων επιλέχθηκε, καθώς είναι ο μέγιστος που μπορεί να εξυπηρετηθεί σε περίπτωση που μία όδευση διαφυγής (φρέαρ) γίνει μη διαθέσιμη. Τα αποτελέσματα του σεναρίου αυτού παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 22.

Πίνακας 22. Αποτελέσματα 3^{ου} σεναρίου εκκένωσης (N=240)

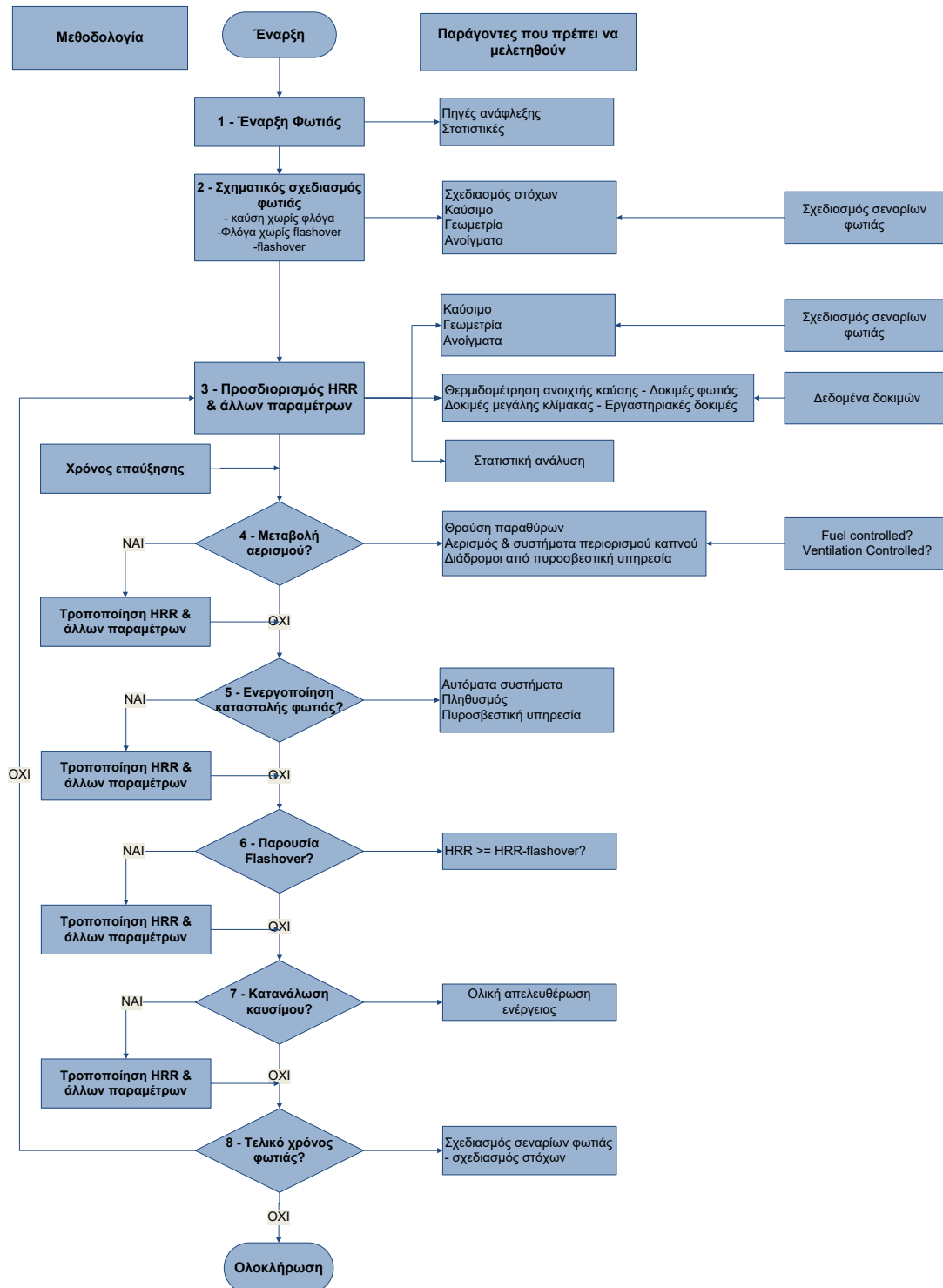
Προσομοίωση εκκένωσης	Χρόνος εκκένωσης (min:sec)
1 ^η	6:40
2 ^η	6:44
3 ^η	6:43
4 ^η	6:41
5 ^η	6:36
6 ^η	7:05
7 ^η	6:34
8 ^η	6:48
9 ^η	6:44
10 ^η	6:37
11 ^η	6:45
12 ^η	6:40
13 ^η	6:48
14 ^η	6:35
15 ^η	6:48
16 ^η	6:31
17 ^η	6:39
18 ^η	6:46
19 ^η	6:40
20 ^η	6:35
Μέσος όρος	6:41

Γ.4. Ανάλυση σεναρίων φωτιάς στον υπόγειο χώρο του Λαυρίου

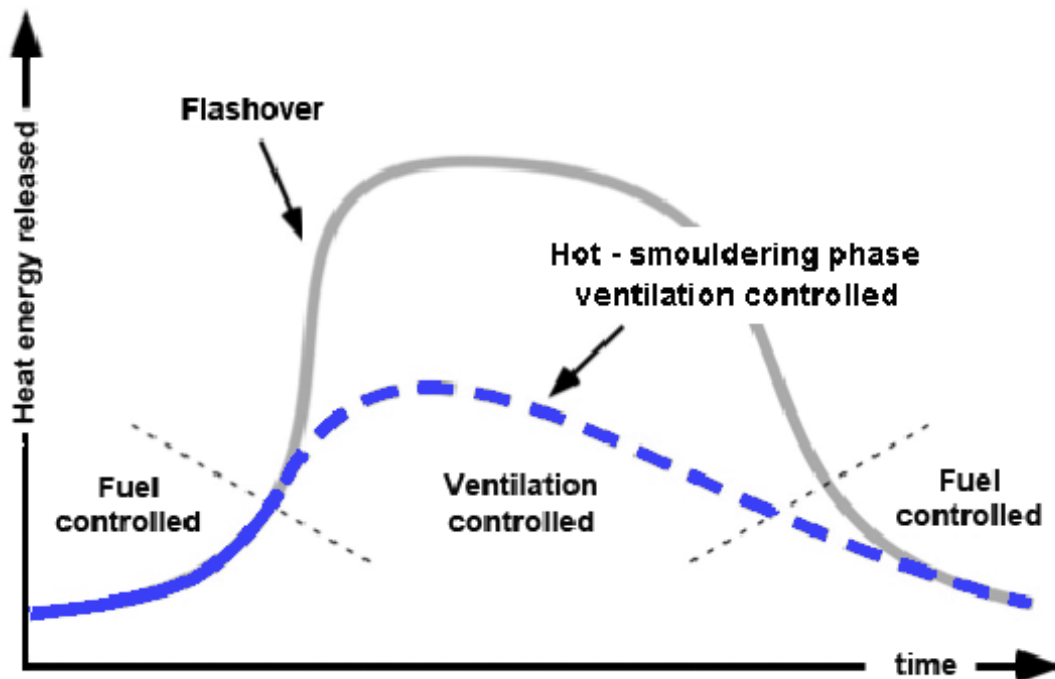
Από τις περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης αυτή που κρίνεται ως η πιο επικίνδυνη, είναι η πυρκαγιά και οι συνέπειες τις καθώς και τα σχέδια αντιμετώπισής της μελετώνται εις βάθος από τους μηχανικούς πυρασφάλειας.

Για την εξασφάλιση της μέγιστης δυνατής ασφάλειας σε περίπτωση πυρκαγιάς σε έναν οποιοδήποτε χώρο, ο μηχανικός πυρασφάλειας θα πρέπει να αναλύσει διεξοδικά ορισμένα σενάρια πυρκαγιάς στον χώρο αυτό έχοντας σαν στόχο προπαντός την προστασία των ανθρώπινων ζώων και μετέπειτα την προστασία του περιβάλλοντος και του εκάστοτε χώρου που έχει πάρει φωτιά καθώς και τη διασφάλιση της συνέχισης των όποιων λειτουργιών και εργασιών που λάμβαναν χώρα στο χώρο αυτό. Ο μηχανικός πυρασφάλειας θα πρέπει να αποφύγει την επιλογή σεναρίων φωτιάς χαμηλής επικινδυνότητας, κάτι που θα συντελούσε σε ανεπαρκή πυρασφάλεια του χώρου, καθώς και σεναρίων φωτιάς πολύ μεγάλης επικινδυνότητας που πολλές φορές δεν έχουν ξεσπάσει ποτέ στο παρελθόν αποφεύγοντας έτσι συντηρητικές εκτιμήσεις και υπέρογκες δαπάνες για την πυροπροστασία. Με άλλα λόγια κρίνεται ιδανική η επιλογή σεναρίων υψηλής επικινδυνότητας που έχουν όμως κάποια πιθανότητα να συμβούν υπό πραγματικές και ρεαλιστικές συνθήκες.

Επιπλέον, μέσω των επιλεγθέντων σεναρίων φωτιάς θα πρέπει να υπολογίζονται κρίσιμα μεγέθη όπως είναι η καμπύλη παραγωγής θερμότητας (HRR), ο ρυθμός έκλυσης καπνού καθώς και οι ποσότητες εκλυόμενων τοξικών παραγώγων καπνού. Στην Εικόνα 47 παρουσιάζεται βήμα-βήμα η διαδικασία επιλογής και υπολογισμού κρίσιμων παραμέτρων ενός σεναρίου φωτιάς.



Εικόνα 47. Μέθοδος ανάλυσης ενός σεναρίου φωτιάς με βήματα [Πηγή: (Staffansson, 2010)]



Εικόνα 48. Διάκριση σταδίων σε καμπύλη έκλυσης θερμότητας [Πηγή: (Service, 2014)]

Ως «flashover» ορίζεται μια στιγμιαία μετάβαση μιας μικρής σε έκταση και ένταση φωτιάς, σε μια πλήρως ανεπτυγμένη φωτιά στην οποία φλέγονται όλα τα διαθέσιμα αντικείμενα στο χώρο. Κατά το στάδιο αυτό, η καμπύλη έκλυσης θερμότητας (HRR) λαμβάνει ακαριαία τη μέγιστη τιμή της.

Μία φωτιά τώρα μπορεί να χαρακτηριστεί, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 48, ως «fuel controlled» ή «ventilation controlled» δηλαδή ως εξαρτώμενη από την ποσότητα καυσίμου ή από τον αερισμό του χώρου, αντίστοιχα. Κατά τη διάρκεια μιας φωτιάς που βρίσκεται στο στάδιο ανάπτυξής της και πριν το «flashover», υπάρχει οξυγόνο σε περίσσεια ποσότητα στο χώρο και έτσι η εξέλιξη της φωτιάς εξαρτάται αποκλειστικά από την εκάστοτε καύσιμο. Αντιθέτως, μετά το πέρας του «flashover» το οξυγόνο στο χώρο δεν επαρκεί για την καύση όλων των διαθέσιμων υλικών και συνεπώς η πορεία της φωτιάς εξαρτάται από τον αποκλειστικά από τον αερισμό.

Επειδή όμως σκοπός της εργασίας αυτής δεν είναι η εμβάθυνση στη μηχανική της φωτιάς και η εις βάθος ανάλυση των σεναρίων φωτιάς, δεν ακολουθήσαμε κατά βήμα τη μέθοδο της Εικόνας 47 αλλά υπολογίσαμε τις πιο κρίσιμες παραμέτρους μιας πυρκαγιάς.

Πιο συγκεκριμένα, για τον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Π.Α. επιλέξαμε δύο σενάρια φωτιάς που κρίναμε πιθανά και με υψηλή επικινδυνότητα για τον χώρο και τους ενοίκους του. Για τα σενάρια αυτά προσδιορίσαμε τον τρόπο έναυσης της φωτιάς και υπολογίσαμε τα μεγέθη εκείνα που είναι απαραίτητα στοιχεία εισαγωγής στο μοντέλο προσομοίωσης της φωτιάς, στην περίπτωση μας το Pyrosim. Τέτοια στοιχεία είναι η καμπύλη παραγωγής θερμότητας (HRR), οι ποσότητες εκλυόμενων παραγώγων του καπνού καθώς και η ποσότητα εκλυόμενης θερμότητας του υλικού που καίγεται στο κάθε σενάριο.

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι το λογισμικό Pyrosim που χρησιμοποιήθηκε για να προσομοιωθούν τα δύο σενάρια φωτιάς μπορεί να κάνει τους απαραίτητους υπολογισμούς μόνο για ένα φλεγόμενο υλικό, δίνοντας στον χρήστη να εισάγει τον χημικό του τύπο. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι για κάθε ένα σενάριο φωτιάς επιλέχθηκε μόνο ένα υλικό για καύση.

Τα δύο σενάρια φωτιάς που επιλέχθηκαν αναλύονται παρακάτω:

1° Σενάριο – Φωτιά σε ηλεκτροκίνητο μηχάνημα εκφόρτωσης:

Σε αυτό το σενάριο, η φωτιά θα ξεκινήσει από ένα ηλεκτροκίνητο μηχάνημα εκφόρτωσης (clark) που θα χρησιμοποιείται για τη μεταφορά των βαρελιών που θα εμπεριέχουν τις επικίνδυνες αρσενικούχες ενώσεις, σε ένα τυχαίο σημείο του υπόγειου χώρου. Οι πόρτες του χώρου που φιλοξενεί τα γραφεία θα είναι κλειστές και έτσι ο παραγόμενος καπνός δεν θα περνά μέσα από τα γραφεία.

Το σενάριο αυτό επιλέχθηκε γιατί οι φωτιές σε κτίρια λόγω βλάβης μηχανημάτων εκφόρτωσης είναι ένα πιθανό φαινόμενο. Επιπλέον επιλέχθηκε το ηλεκτροκίνητο μηχάνημα εκφόρτωσης έναντι άλλων (πετρελαιοκίνητο, βενζινοκίνητο, υγραεριοκίνητο) καθώς πέραν του γεγονότος ότι παρουσιάζει μια σειρά από πλεονεκτήματα έναντι των υπολοίπων (μηδενικές εκπομπές αερίων, χαμηλότερα κόστη συντήρησης και λειτουργίας, κ.ά.) ενδείκνυται για χρήσεις σε εσωτερικούς χώρους, όπως ο υπόγειος χώρος του Τ.Π.Π.Λ..

Σύμφωνα με έρευνες και στατιστικές του NFPA που έλαβαν χώρα στην Αμερική την περίοδο 2003-2006, από τις 1220 φωτιές που ξέσπασαν σε ετήσια βάση λόγω βλάβης βιομηχανικών μηχανημάτων εκφόρτωσης, οι 140 (11%) συνέβησαν σε χώρους αποθήκευσης όπως ο υπόγειος χώρος που μελετάμε. Επιπλέον, στο 65% των συνολικών περιπτώσεων φωτιάς των μηχανημάτων εκφόρτωσης, η φωτιά ξεκίνησε στην περιοχή του κινητήρα, του κιβωτίου ταχυτήτων ή των ελαστικών και στα αντικείμενα που πιάνουν πιο συχνά πρώτα φωτιά εντάσσονται τα εύφλεκτα υγρά ή αέρια (36%) και τα ηλεκτρικά καλώδια ή οι μονώσεις τους (26%) (Ahrens, 2009).

Στο σενάριο που εξετάζουμε η φωτιά ξεκινάει στην περιοχή του κινητήρα από κάποια απροσδιόριστη μηχανική ή ηλεκτρική βλάβη και τα πρώτα αντικείμενα που φλέγονται είναι τα ηλεκτρικά καλώδια και οι μονώσεις τους. Στη συνέχεια, η φωτιά μεταφέρεται στην περιοχή των ελαστικών των οποίων τη συμπεριφορά μελετάμε κατά τη διάρκεια της φωτιάς.



Εικόνα 49. Φλεγόμενο μηχάνημα εκφόρτωσης

2° Σενάριο – Φωτιά στα γραφεία του υπόγειου χώρου του Τ.Π.Π.Λ.:

Στο σενάριο αυτό η φωτιά θα ξεκινήσει στο χώρο που στεγάζει τα γραφεία του υπόγειου χώρου ενώ οι πόρτες των γραφείων θα είναι ανοικτές και έτσι ο παραγόμενος καπνός θα εξαπλωθεί και στον υπόλοιπο χώρο.

Το σενάριο αυτό επιλέχθηκε γιατί οι φωτιές σε γραφεία και ειδικά σε αυτά που αξιοποιούνται για επαγγελματική χρήση, έχουν μεγάλη συχνότητα και αφήνουν πίσω τους μεγάλες υλικές κυρίως ζημιές. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με έρευνες και στατιστικές του NFPA που έλαβαν χώρα στην Αμερική την περίοδο 2007-2011 από τις 3340 συνολικές φωτιές που ξέσπασαν σε ετήσια βάση σε χώρους γραφείων, το 29% προκλήθηκε από μαγειρικό εξοπλισμό ενώ η αμέσως επόμενη πιθανότερη αιτία είναι τα συστήματα διάδοσης της ηλεκτρικής ενέργειας και ο εξοπλισμός φωτισμού (12%). Επιπλέον το 22% των πυρκαγιών ξέσπασε στην περιοχή μαγειρέματος ενώ το 12% στην περιοχή του γραφείου. Τέλος, στα αντικείμενα που πιάνουν φωτιά πρώτα με μεγαλύτερη συχνότητα εντάσσονται τα υλικά μαγειρέματος συμπεριλαμβανομένου και του φαγητού (20%) και τα ηλεκτρικά καλώδια ή οι μονώσεις τους (12%) (Campbell, 2013).

Στο σενάριο που εξετάζουμε εμείς παρόλα αυτά, επιλέξαμε το χώρο του γραφείου έναντι του χώρου μαγειρέματος ως την περιοχή έναρξης της φωτιάς, καθώς έχει πολύ μεγαλύτερο πυροθερμικό φορτίο από την κουζίνα και οι συνέπειες από μια πυρκαγιά στον χώρο αυτό θα ήταν δυσμενέστερες. Συνεπώς κρίθηκε πως μια φωτιά που θα ξεσπάσει στον κύριο χώρο του γραφείου από μια απροσδιόριστη βλάβη στα συστήματα διάδοσης της ηλεκτρικής ενέργειας χρήζει περισσότερης μελέτης. Τα πρώτα αντικείμενα που φλέγονται είναι τα ηλεκτρικά καλώδια και οι μονώσεις τους και στη συνέχεια φλέγονται τα γραφεία και οι ντουλάπες του χώρου των οποίων τη συμπεριφορά μελετάμε κατά τη διάρκεια της φωτιάς.

Γ.4.1. Εφαρμογή του Pyrosim στον υπόγειο χώρο του Λαυρίου

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής κρίθηκε αναγκαία η χρησιμοποίηση ενός λογισμικού προσομοίωσης φωτιάς FDS (Fire Dynamics Simulator) τόσο για να αναπαραστήσουμε οπτικά δύο σενάρια πυρκαγιάς στον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Π.Λ., όσο και για να εξετάσουμε και να ερμηνεύσουμε τις μεταβολές που θα προκαλέσει η φωτιά και τα παράγωγα του καπνού στα αποτελέσματα της εκκένωσης του χώρου.

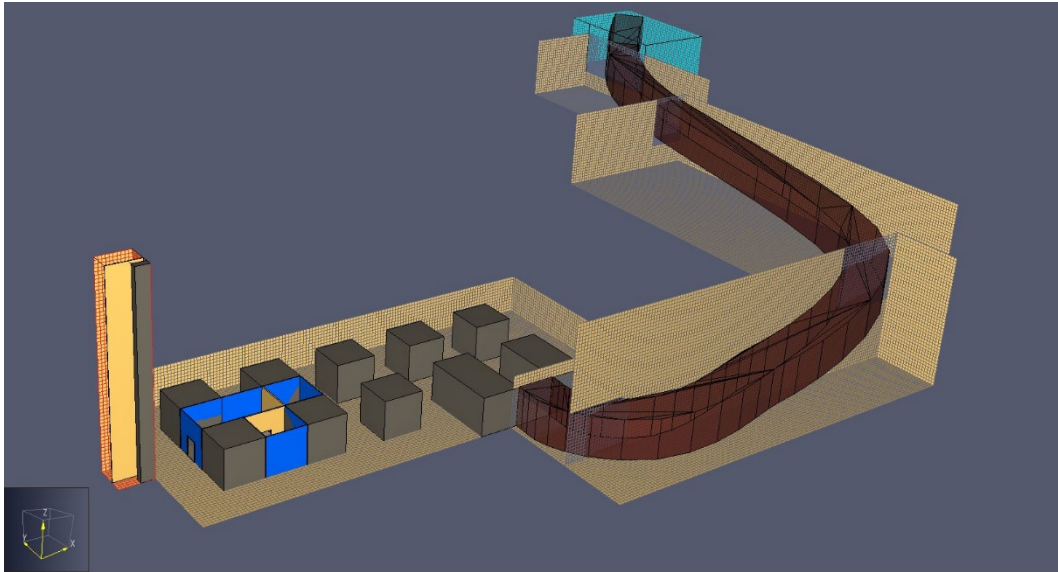
Για τον σκοπό αυτό επιλέξαμε το λογισμικό Pyrosim της εταιρίας Thunderhead Engineering το οποίο ουσιαστικά προσομοιώνει σενάρια φωτιάς με τον σχεδιασμό να λαμβάνει χώρα σε γραφικό περιβάλλον. Για να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση των δύο σεναρίων φωτιάς που επιλέξαμε, ακολουθήσαμε συγκεκριμένα βήματα που θα περιγράψουμε παρακάτω.

Βήμα 1^ο – Σχεδιασμός του υπόγειου χώρου:

Όπως συνέβη και στο STEPS, εισήγαμε μέσω της εντολής *File → Import CAD File* την κάτοψη του υπόγειου χώρου του Τ.Π.Π.Λ. (Εικόνα 36), την οποία είχαμε δημιουργήσει στο AutoCAD. Έπειτα, μέσω της ίδιας εντολής εισάχθηκε η σήραγγα του υπόγειου χώρου. Έπειτα δημιουργήσαμε επτά επιμέρους πλέγματα (meshes), πλαισιώνοντας τα τμήματα του υπόγειου χώρου (αποθήκη, φρέαρ, σήραγγα, κ.ά.), που είναι απαραίτητοι ώστε να μπορέσει ο παραγόμενος καπνός να κυκλοφορήσει μέσα σε αυτούς και να εξάγουμε τα απαραίτητα συμπεράσματα.

Στη συνέχεια για να αναπαραστήσουμε το χώρο των γραφείων, σχεδιάσαμε μέσω της εντολής *New Obstruction* τους εξωτερικούς τοίχους και μέσω της εντολής *New Hole* τις αντίστοιχες πόρτες των γραφείων.

Στην Εικόνα 50 φαίνεται ολοκληρωμένος ο υπόγειος χώρος του Τ.Π.Π.Λ. και διακρίνονται τα επιμέρους πλέγματα.



Εικόνα 50. Ο υπόγειος χώρος του Τ.Π.Π.Α. χωρισμένος σε πλέγματα

Βήμα 2^ο – Καθορισμός συσκευών και δυσδιάστατων επιφανειών μέτρησης:

Πέρα από την τελική οπτική απεικόνιση του καπνού στο χώρο, κρίναμε απαραίτητη τη μέτρηση συγκεκριμένων κομβικών, για την ανθρώπινη ασφάλεια, μεγεθών στα επιμέρους σενάρια φωτιάς.

Για να υπολογιστούν αυτά τα στοιχεία κατά την προσομοίωση μιας πυρκαγιάς, το Pyrosim μας δίνει τη δυνατότητα να δημιουργήσουμε ορισμένες δυσδιάστατες επιφάνειες για τη μέτρηση ενός μεγέθους σε οποιοδήποτε σημείο στο χώρο (*slices*). Με αυτόν τον τρόπο δίνεται στον χρήστη η δυνατότητα της οπτική απεικόνισης των εκάστοτε επιθυμητών μεγεθών καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Επιπρόσθετα, ο χρήστης μπορεί να καθορίσει και να τοποθετήσει στο χώρο ορισμένες σημειακές συσκευές μέτρησης των μεγεθών που τον ενδιαφέρουν και να εξάγει σε τελικό στάδιο τα αποτελέσματά του διαγραμματικά (*devices*).

Στη δική μας περίπτωση τώρα, μας απασχόλησε ιδιαίτερα η συγκέντρωση μονοξειδίου του άνθρακα στο χώρο, η ορατότητα και η θερμοκρασία του χώρου. Συνεπώς δημιουργήσαμε τις παρακάτω συσκευές και δυσδιάστατες επιφάνειες μέτρησης και για τα δύο σενάρια φωτιάς:

Σημειακή συσκευή μέτρησης:

- Συγκέντρωσης μονοξειδίου του άνθρακα στην είσοδο του φρέατος (CO_FrearIn)
- Συγκέντρωσης μονοξειδίου του άνθρακα στην έξοδο του φρέατος (CO_FrearOut)
- Συγκέντρωσης μονοξειδίου του άνθρακα στην είσοδο της στοάς (CO_StoaIn)
- Συγκέντρωσης μονοξειδίου του άνθρακα στην έξοδο της στοάς (CO_StoaOut)
- Συγκέντρωσης μονοξειδίου του άνθρακα σε κεντρικό σημείο της αποθήκης (CO_ExitRoute_Center)
- Ορατότητας σε κεντρικό σημείο της αποθήκης (Visibility_ExitRoute_Center)
- Ορατότητας στα 75 m της στοάς (Visibility_Stoa_75m)
- Ορατότητας στα 125 m της στοάς (Visibility_Stoa_125m)

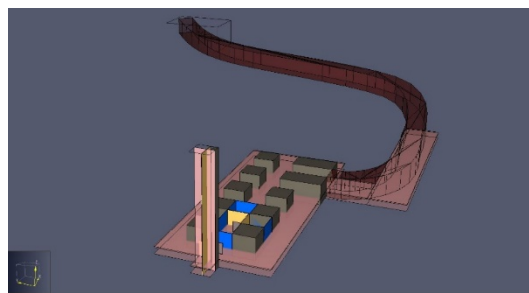
Δυσδιάστατη επιφάνεια μέτρησης:

- Συγκέντρωσης μονοξειδίου του άνθρακα στην αποθήκη
- Θερμοκρασίας στην αποθήκη
- Θερμοκρασίας στο φρέαρ
- Ορατότητας στο ύψος των 1.75 m της αποθήκης
- Ορατότητας στο φρέαρ

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται σε κάτοψη οι σημειακές συσκευές και οι δυοδιάστατες επιφάνειες μέτρησης, στον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Π.Λ.



Εικόνα 51. Σημειακές συσκευές μέτρησης στον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Π.Λ.



Εικόνα 52. Δυσδιάστατες επιφάνειες μέτρησης στον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Π.Λ.

Βήμα 3^ο – Προσομοίωση των δύο σεναρίων φωτιάς:

Στο στάδιο αυτό μέσω της εντολής *Edit Surfaces* δημιουργήσαμε μία επιφάνεια προς καύση και εισήγαμε τη μέγιστη ισχύ της φωτιάς καθώς και τις χαρακτηριστικές τιμές της για τον προσδιορισμό της καμπύλης έκλυσης θερμότητας (HRR) για κάθε επιμέρους σενάριο.

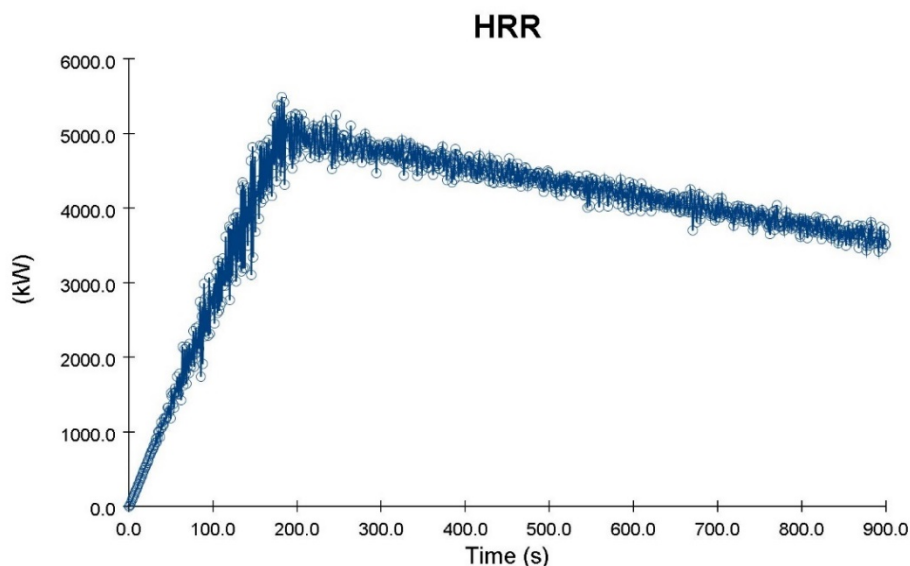
Στη συνέχεια μέσω της εντολής *Edit Reactions* δημιουργήσαμε δύο επιμέρους αντιδράσεις, μία για κάθε σενάριο, εισάγοντας τα απαραίτητα εκείνα στοιχεία όπως τον χημικό τύπο και την ποσότητα εκλυόμενης θερμότητας του αντικειμένου που θα καεί, καθώς και τα ισοζύγια μάζας του εκλυόμενου μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και της κάπνας.

Οι υπολογισμοί των βασικών παραμέτρων που εισήχθησαν για κάθε σενάριο παρουσιάζονται παρακάτω:

➤ 1^ο Σενάριο – Φωτιά σε ηλεκτροκίνητο μηχάνημα εκφόρτωσης:

Για τον προσδιορισμό της καμπύλης έκλυσης θερμότητας (HRR), επιλέξαμε μια προτυποποιημένη πυρκαγιά ενός επιβατικού οχήματος με μέγιστη ισχύ τα 5 MW με τις εξής χαρακτηριστικές τιμές (Διοικητική Αρχή Σηράγγων, 2011):

- $t_{max} = 180 \text{ sec}$ (Ο χρόνος που η HRR φτάνει τη μέγιστη τιμή της)
- $t_D = 180 \text{ sec}$ (Ο χρόνος που η HRR εισέρχεται στη φάση εξασθένησης)
- $t_d = 2700 \text{ sec}$ (Η συνολική χρονική διάρκεια της πυρκαγιάς)



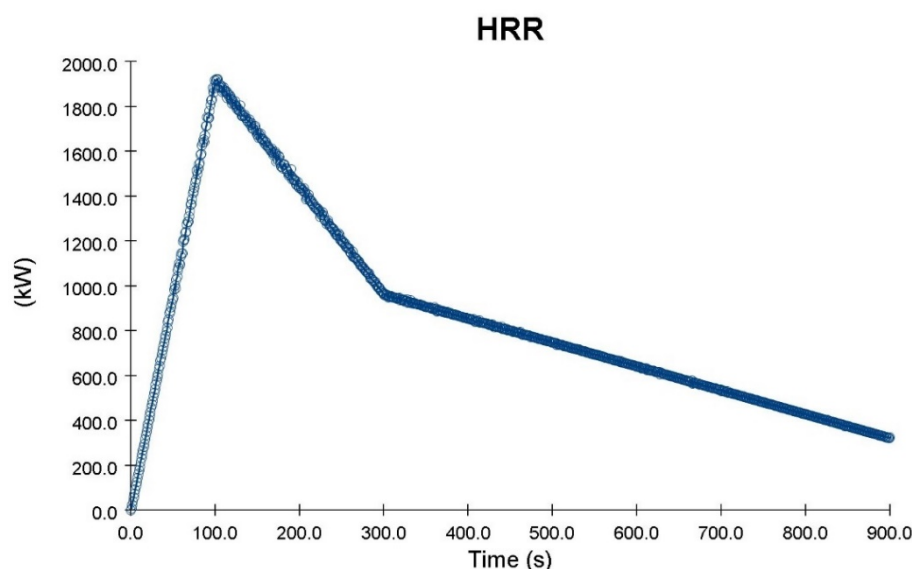
Εικόνα 53. Καμπύλη έκλυσης θερμότητας της φωτιάς σε ηλεκτροκίνητο μηχάνημα εκφόρτωσης

Τα ελαστικά του μηχανήματος εκφόρτωσης που επιλέξαμε σαν το κύριο αντικείμενο καύσης δεν διαφέρουν από τα ελαστικά των απλών επιβατικών οχημάτων και αποτελούνται κατά κύριο λόγο από τον υδρογονάνθρακα 1-3 βουταδιένιο με χημικό τύπο C₄H₆. Με τη καύση του υδρογονάνθρακα 1-3 βουταδιένιο σε χώρο με καλό αερισμό εκλύεται μονοξείδιο του άνθρακα και κάπνα με ισοζύγια εκπομπής $\gamma_{CO} = 0,048$ και $\gamma_{soot} = 0,125$ αντίστοιχα. Τέλος, η ποσότητα εκλυόμενης θερμότητας του υδρογονάνθρακα 1-3 βουταδιένιου ανέρχεται στα 32 MJ/kg (Staffansson, 2010).

➤ 2^ο Σενάριο – Φωτιά στα γραφεία του υπόγειου χώρου του Τ.Π.Π.Λ.:

Τα γραφεία και οι ντουλάπες του χώρου, των οποίων τη συμπεριφορά μελετάμε κατά τη διάρκεια της φωτιάς, είναι κατασκευασμένα από νοβοπάν με επένδυση ενός φιλμ μελαμίνης. Για τον προσδιορισμό της καμπύλης έκλυσης θερμότητας (HRR), έχουμε μέγιστη ισχύ τα 1,92 MW με τις εξής χαρακτηριστικές τιμές (Jahn, 2007):

- $t_{max} = 100 \text{ sec}$
- $t_D = 100 \text{ sec}$
- $t_d = 1200 \text{ sec}$



Εικόνα 54. Καμπύλη έκλυσης θερμότητας της φωτιάς στα γραφεία του Τ.Π.Π.Λ.

Το νοβοπάν με επένδυση φιλμ μελαμίνης εισάγεται στο Pyrosim με το χημικό τύπο C₁H_{1.7}O_{0.74}N_{0.002} και με την καύση του εκλύεται μονοξείδιο του άνθρακα και κάπνα με ισοζύγια εκπομπής $\gamma_{CO} = 0,004$ και $\gamma_{soot} = 0,015$ αντίστοιχα (Thunderhead Engineering, 2018). Τέλος, η ποσότητα εκλυόμενης θερμότητας του υλικού αυτού ανέρχεται στα 17,5 MJ/kg (Staffansson, 2010).

Τέλος μέσω της εντολής Analysis → Run FDS πραγματοποιείται η προσομοίωση των δύο σεναρίων φωτιάς.

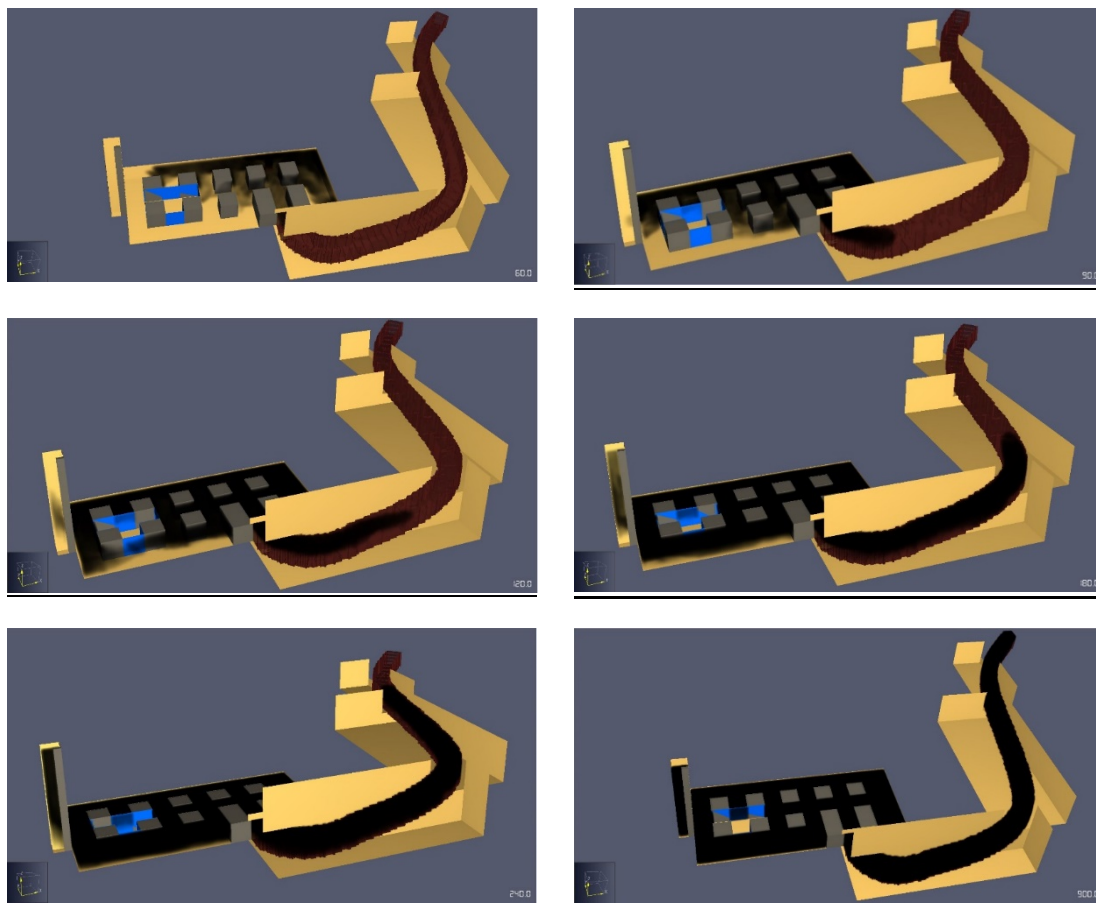
Γ.4.2. Ανάλυση αποτελεσμάτων προσομοίωσης φωτιάς

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των δύο σεναρίων φωτιάς στον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Π.Λ. με οπτική απεικόνιση. Ο χρόνος που επιλέξαμε να διαρκέσει η προσομοίωση της φωτιάς ήταν 900 sec (15 min) για όλα τα σεναρία. Η επιλογή του χρόνου αυτού δεν ήταν τυχαία καθώς υπερκαλύπτει χρονικά τη βραδύτερη εκκένωση από τα τρία σεναρία που προσομοιάστηκαν στο STEPS. Συγκεκριμένα, ο μέγιστος

χρόνος εκκένωσης παρατηρήθηκε στο 2^ο σενάριο εκκένωσης στο STEPS (Πίνακας 21), όπου 240 άτομα εκκένωσαν τον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Π.Λ. μέσα σε 803 sec (13 min, 23 sec).

Γ.4.2.1. 1^ο Σενάριο – Φωτιά σε ηλεκτροκίνητο μηχάνημα εκφόρτωσης

Έχοντας ολοκληρώσει την προσομοίωση αυτού του σεναρίου, είμαστε σε θέση να παραθέσουμε ορισμένα οπτικά αποτελέσματα. Αρχικά, θα παρουσιαστεί όλη η εξέλιξη και η πορεία του καπνού στον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Π.Λ. από τη στιγμή που ξεκίνησε η εξάπλωση του, μέχρι το τέλος της προσομοίωσης.



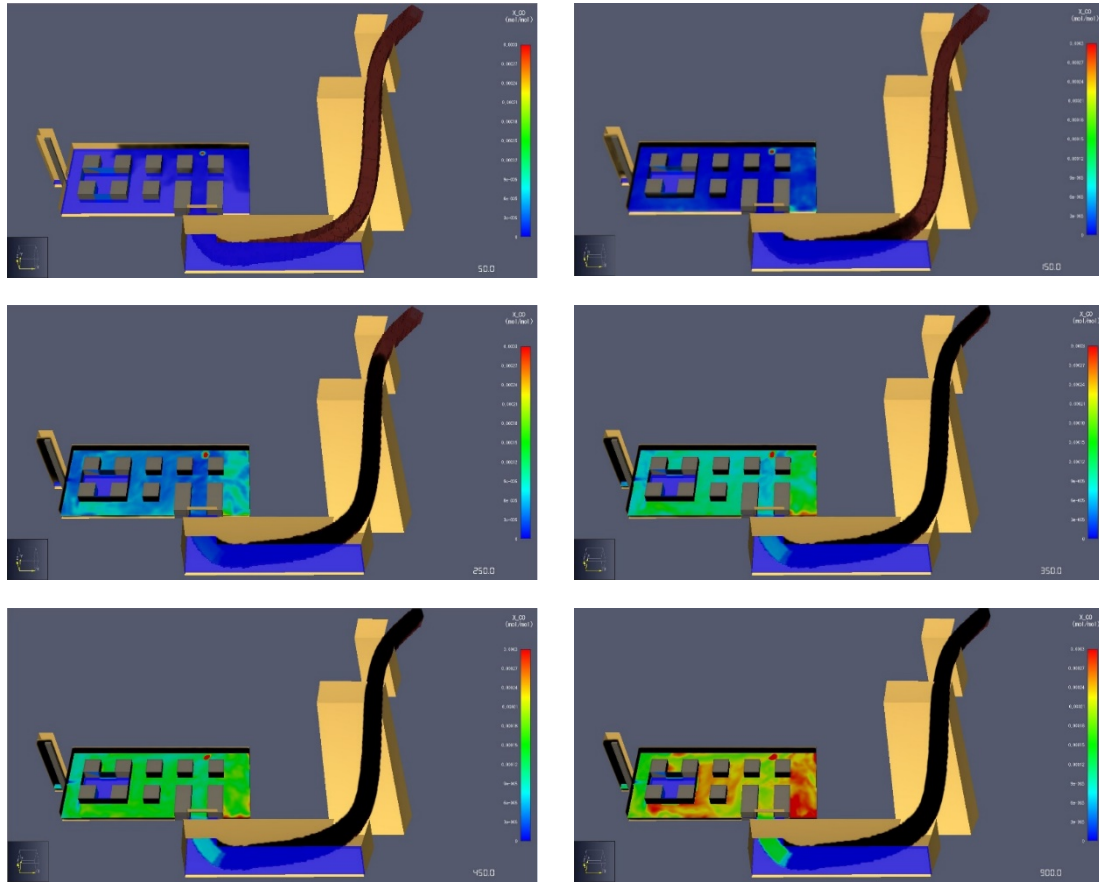
Εικόνα 55. Στιγμιότυπα κίνησης καπνού για το 1^ο σενάριο φωτιάς

Στα στιγμιότυπα της Εικόνας 55, παρατηρούμε πως ο καπνός που παράγεται από τη φωτιά στο ηλεκτροκίνητο μηχάνημα εκφόρτωσης είναι πυκνός και εξαπλώνεται με πολύ γρήγορο ρυθμό σε όλο το χώρο του υπόγειου. Συγκεκριμένα, βλέπουμε ότι στα 90 sec ο καπνός έχει καλύψει σχεδόν όλη την αποθήκη του υπόγειου και αρχίζει να εισέρχεται στη στοά και στο φρέαρ. Στα 240 sec φαίνεται ότι η αποθήκη και το φρέαρ έχουν γεμίσει ασφυκτικά με καπνό, ενώ στη στοά ο καπνός έχει διανύσει το μεγαλύτερο μέρος της και κατευθύνεται προς την επιφάνεια. Τέλος, μέχρι τα 900 sec ο καπνός βγαίνει στην επιφάνεια από το φρέαρ και τη στοά με πολύ πιο αργό ρυθμό από ότι παράγεται (η διάρκεια της πυρκαγιάς είναι 2700 sec) και αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο υπόγειος χώρος να είναι τελείως καλυμμένος με καπνό.

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, πέρα από την οπτική απεικόνιση του καπνού στον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Π.Λ., κρίθηκε απαραίτητος ο προσδιορισμός ορισμένων μεγεθών που επηρεάζουν την ανθρώπινη ασφάλεια και υγεία, καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Για το σκοπό αυτό δημιουργήθηκαν ορισμένες δυσδιάστατες επιφάνειες μέτρησης και συγκεντρώθηκαν τα παρακάτω οπτικά αποτελέσματα:

i. Συγκέντρωση μονοξειδίου του άνθρακα στον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Α.:

Με τη βοήθεια των παρακάτω χαρακτηριστικών χρονικών στιγμιότυπων της προσομοίωσης, παρουσιάζεται η συγκέντρωση του μονοξειδίου του άνθρακα στον εξεταζόμενο υπόγειο χώρο.



Εικόνα 56. Στιγμιότυπα συγκέντρωσης CO στην αποθήκη για το 1^ο σενάριο φωτιάς

Στα στιγμιότυπα της Εικόνας 56, η συγκέντρωση του μονοξειδίου του άνθρακα είναι εκφρασμένη σε mol/mol. Αν η ποσότητα αυτή πολλαπλασιαστεί με 10^6 , τότε η συγκέντρωση του CO εκφράζεται σε ppm. Πραγματοποιώντας αυτή τη μετατροπή, παρατηρούμε πως η παραπάνω κλίμακα έχει ως μέγιστη τιμή (κόκκινο χρώμα) τα 300 ppm CO σε περιβάλλοντα αέρα. Με άλλα λόγια κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης αυτού του σεναρίου φωτιάς η συγκέντρωση του CO στον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Α. κυμαίνεται από 0-300 ppm.

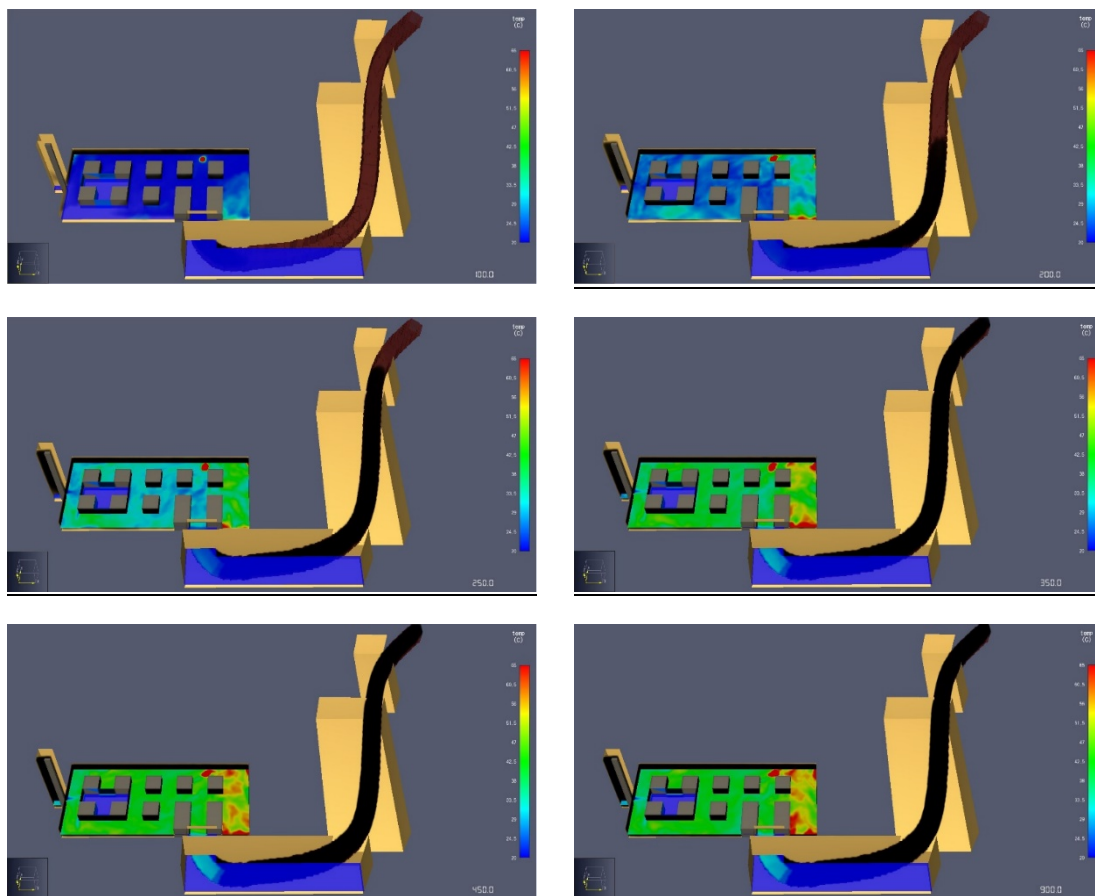
Συγκεκριμένα, μέχρι τα 250 sec η συγκέντρωση του CO στον υπόγειο χώρο δεν ξεπερνάει τα 120 ppm ενώ στα 450 sec η συγκέντρωση του CO ανέρχεται στα 180 ppm σε όλη την αποθήκη του υπόγειου χώρου. Τέλος, στα 900 sec η συγκέντρωση του CO κυμαίνεται στα 240-300 ppm στο χώρο της αποθήκης.

Από τον Πίνακα 14 για συγκέντρωση μονοξειδίου του άνθρακα 300 ppm, παρατηρείται πονοκέφαλος και ενδεχόμενη απώλεια κρίσης σε έναν άνθρωπο για έκθεση 2 ωρών. Το γεγονός αυτό δεν εμπνέει κάποια ανησυχία για την ανθρώπινη ασφάλεια καθώς η συγκέντρωση CO των 300 ppm είναι μικρότερη από την οριακή συγκέντρωση ασφαλείας για τον άνθρωπο των 1500 ppm, που δίνεται στον Πίνακα 16. Επιπλέον, είδαμε πως για τον συγκεκριμένο υπόγειο χώρο η βραδύτερη εκκένωση από όλα τα πιθανά σενάρια που εξετάστηκαν ολοκληρώθηκε σε 803 sec (13 min, 23 sec), όπως φαίνεται και στον Πίνακα 21. Συνεπώς, εάν και εφόσον τηρούνται οι διεθνείς και εγχώριοι κανονισμοί ασφαλείας που

αφορούν τη μέγιστη χωρητικότητα σε ενοίκους, ο υπόγειος χώρος του Τ.Π.Π.Λ. θα έχει εκκενωθεί σε διάστημα πολύ μικρότερο των 2 ωρών.

ii. Θερμοκρασία στην αποθήκη του υπόγειου χώρου του Τ.Π.Π.Λ.:

Με τη βοήθεια των παρακάτω χαρακτηριστικών χρονικών στιγμιότυπων της προσομοίωσης, παρουσιάζεται η θερμοκρασία της αποθήκης του υπόγειου χώρου σε κλίμακα.



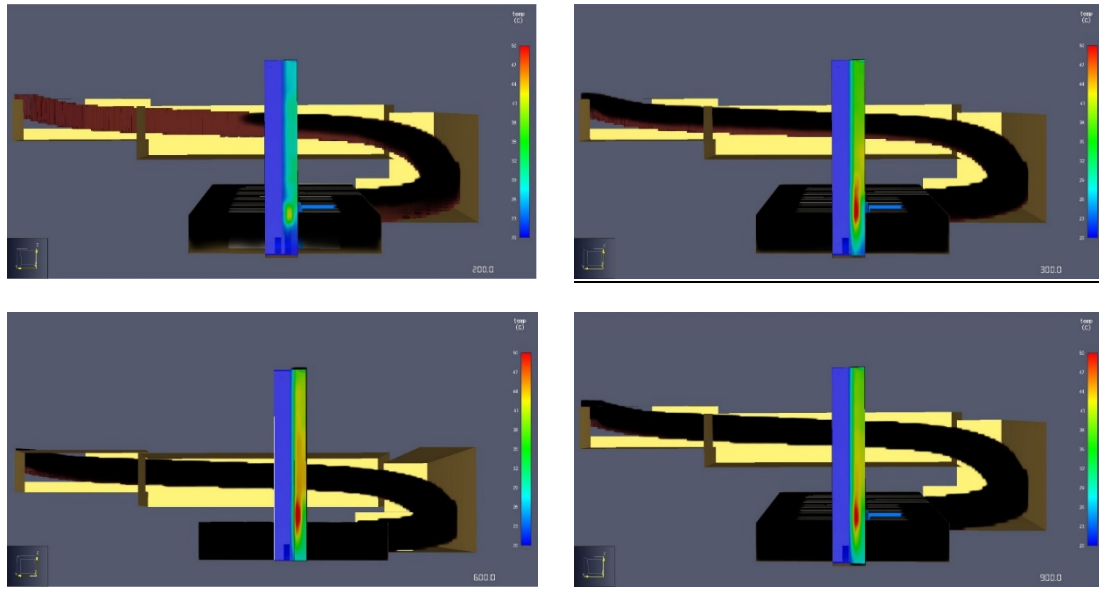
Εικόνα 57. Στιγμιότυπα θερμοκρασίας στην αποθήκη για το 1^ο σενάριο φωτιάς

Από τα στιγμιότυπα της Εικόνας 57, παρατηρούμε πως σε αυτό το σενάριο φωτιάς η θερμοκρασία στην αποθήκη του υπόγειου χώρου του Τ.Π.Π.Λ. κυμαίνεται στους 20-65°C. Στα 200 sec η θερμοκρασία στην αποθήκη κυμαίνεται από 25-35°C, ενώ στα 450 sec και μέχρι το τέλος της προσομοίωσης η θερμοκρασία ξεπερνά τους 40°C στην αποθήκη και σε σημεία κοντά στο φλεγόμενο ηλεκτροκίνητο μηχανήμα εκφόρτωσης ξεπερνά τους 55°C.

Από τον Πίνακα 16 ωστόσο συμπεραίνουμε πως η μέγιστη θερμοκρασία των 65°C που επικρατεί στην αποθήκη του υπόγειου χώρου στη διάρκεια του συγκεκριμένου σεναρίου φωτιάς, είναι μικρότερη από την οριακή θερμοκρασία ασφαλείας για τον άνθρωπο, των 100°C, και έτσι δεν τίθεται κάποιο θέμα επισφάλειας.

iii. Θερμοκρασία στο φρέαρ του υπόγειου χώρου του Τ.Π.Π.Λ.:

Με τη βοήθεια των παρακάτω χαρακτηριστικών χρονικών στιγμιότυπων της προσομοίωσης, παρουσιάζεται η θερμοκρασία στο φρέαρ του υπόγειου χώρου σε κλίμακα.

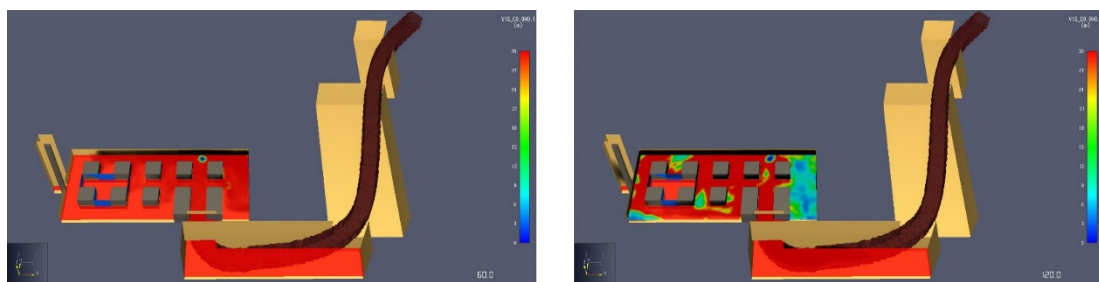


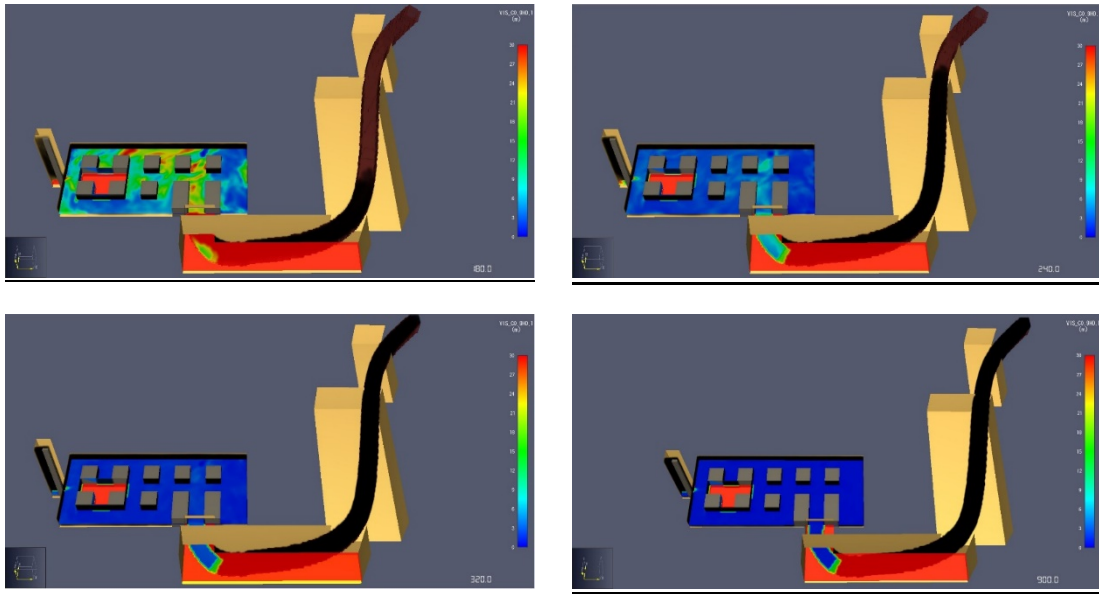
Εικόνα 58. Στιγμιότυπα θερμοκρασίας στο φρέαρ για το 1^ο σενάριο φωτιάς

Παρατηρώντας τα στιγμιότυπα της Εικόνας 58, βλέπουμε πως η θερμοκρασία του φρέατος αυξάνεται μόνο στο τμήμα εκείνο που υπάρχει ο ανελκυστήρας (δεξιά), ενώ στο κλιμακοστάσιο του φρέατος (αριστερά), όπου χρησιμοποιείται από τους ένοικους κατά την εκκένωση του χώρου, η θερμοκρασία παραμένει σταθερή στους 20°C καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης της πυρκαγιάς. Αυτό οφείλεται στο ύψος της πόρτας που οδηγεί στο κλιμακοστάσιο του φρέατος, που δεν επιτρέπει τα θερμά αέρια και τον καπνό να περάσουν. Συνεπώς, στο κλιμακοστάσιο του φρέατος οι ένοικοι δεν διατρέχουν κάποιο κίνδυνο από τα θερμά παραγόμενα αέρια της πυρκαγιάς.

iv. Ορατότητα στο ύψος των 1.75 m στην αποθήκη του υπόγειου χώρου του Τ.Π.Π.Λ.:

Με τη βοήθεια των παρακάτω χαρακτηριστικών χρονικών στιγμιότυπων της προσομοίωσης, παρουσιάζεται η ορατότητα στην αποθήκη του υπόγειου χώρου σε κλίμακα. Το ύψος των 1.75 m, επιλέχθηκε ώστε να ταυτιστεί σε μεγάλο βαθμό η συγκεκριμένη ορατότητα με την ανθρώπινη στον χώρο αυτό.





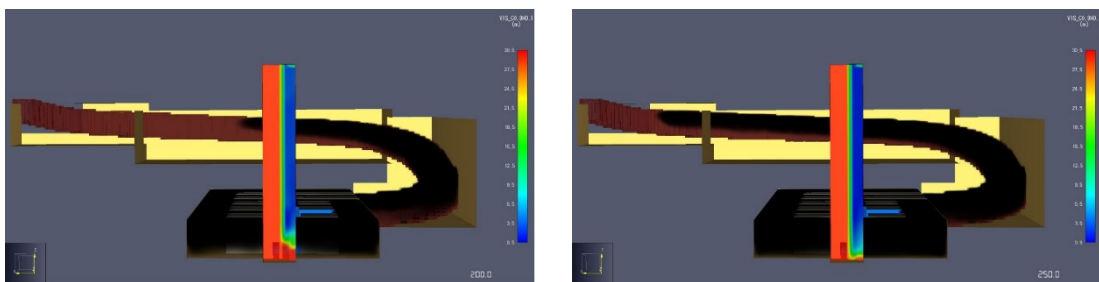
Εικόνα 59. Στιγμιότυπα ορατότητας στην αποθήκη για το 1^ο σενάριο φωτιάς

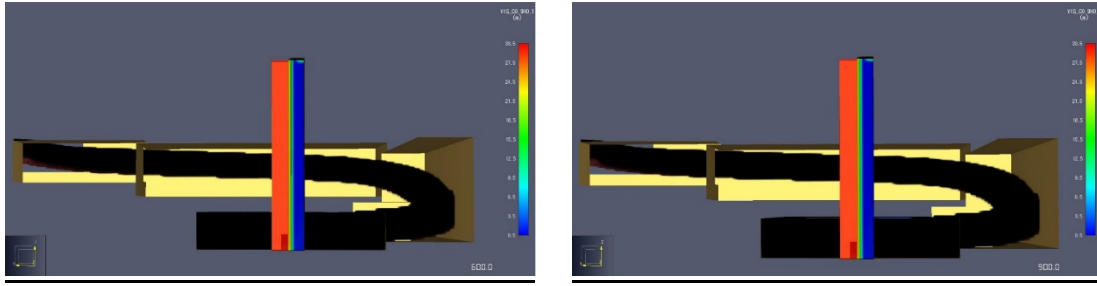
Από τον Πίνακα 16 προκύπτει ως οριακή ορατότητα για την ανθρώπινη ασφάλεια, τα 10 m σε μεγάλες εγκαταστάσεις όπως ο υπόγειος χώρος που μελετάμε. Σύμφωνα με τα στιγμιότυπα της Εικόνας 59 τώρα, παρατηρούμε πως μέχρι τα 60 sec η ορατότητα στο χώρο είναι άριστη φτάνοντας μέχρι τα 30 m. Από τα 120 sec η ορατότητα σε ορισμένα τμήματα της αποθήκης πέφτει κάτω από το περιθώριο ασφαλείας των 10 m, αλλά τα τμήματα αυτά δεν περιλαμβάνονται στη βασική όδευση διαφυγής. Όσο περνά η ώρα, η ορατότητα μειώνεται κι άλλο σε όλη την έκταση της αποθήκης και από τα 240 sec και ύστερα πέφτει κάτω από τα 6 m.

Μπορούμε έτσι να συμπεράνουμε πως η μείωση της ορατότητας σε αυτό το σενάριο φωτιάς αποτελεί τον πιο επικίνδυνο παράγοντα για την ανθρώπινη ασφάλεια και την εκκένωση του χώρου.

v. Ορατότητα στο φρέαρ του υπόγειου χώρου του Τ.Π.Λ.:

Με τη βοήθεια των παρακάτω χαρακτηριστικών χρονικών στιγμιότυπων της προσομοίωσης, παρουσιάζεται η ορατότητα στο φρέαρ του υπόγειου χώρου σε κλίμακα.





Εικόνα 60. Στιγμιότυπα ορατότητας στο φρέαρ για το 1^ο σενάριο φωτιάς

Όσον αφορά τώρα το φρέαρ, παρατηρούμε πως από τα 200 sec και μέχρι το πέρας της προσομοίωσης η ορατότητα στο τμήμα του ανελκυστήρα είναι κάτω από τα 6 m, ενώ στο τμήμα του κλιμακοστασίου όπου χρησιμοποιείται κατά την εκκένωση του χώρου από τους ενοίκους η ορατότητα φτάνει τα 30 m καθ' όλη τη διάρκεια της πυρκαγιάς. Αυτό συμβαίνει γιατί όπως αναφέραμε και νωρίτερα το ύψος της πόρτας που οδηγεί στο κλιμακοστάσιο είναι τέτοιο που δεν επιτρέπει στον καπνό να περάσει και να επηρεάσει την ορατότητα. Συνεπώς, στο κλιμακοστάσιο του φρέατος οι ένοικοι έχουν άριστη ορατότητα και δεν διατρέχουν κάποιο κίνδυνο.

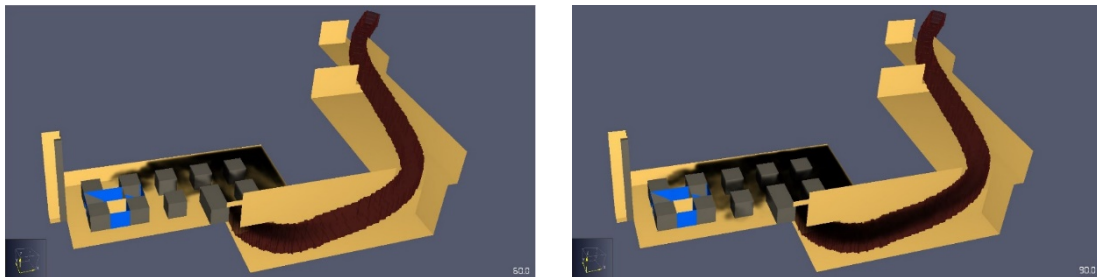
Γ.4.2.2. 1^ο Σενάριο – Φωτιά σε ηλεκτροκίνητο μηχάνημα εκφόρτωσης με ενεργοποιημένο σύστημα τεχνητού αερισμού

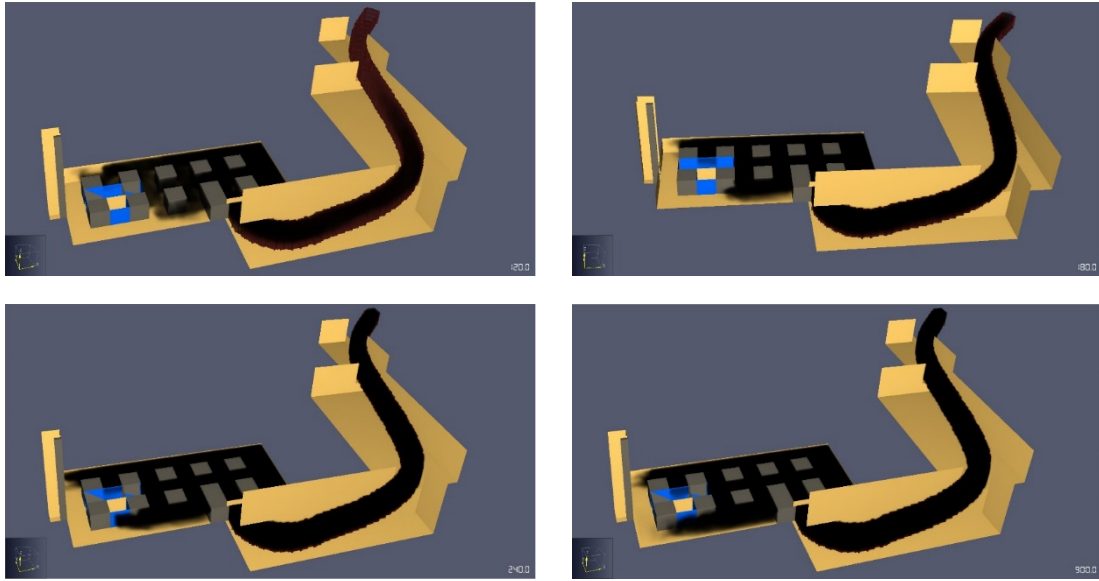
Εξετάζοντας την προσομοίωση της φωτιάς στο 1^ο σενάριο, παρατηρούμε πως η ορατότητα μειώνεται με πολύ γρήγορο βαθμό στο χώρο της αποθήκης και συνιστά οποιαδήποτε εκκένωση άκρως επισφαλή.

Για να αντισταθμίσουμε τον παράγοντα αυτό, πραγματοποιήσαμε ακόμα μια προσομοίωση για το ίδιο σενάριο φωτιάς στο Pyrosim, μόνο που αυτή τη φορά με ενεργοποιημένο το σύστημα αερισμού που είναι εγκατεστημένο στον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Π.Α.. Σαφέστερα, επειδή το σημείο που έπιασε η φωτιά το μηχάνημα εκφόρτωσης βρίσκεται πιο κοντά στη στοά του υπόγειου, επιλέξαμε να κατευθύνουμε τον καπνό μέσω του συστήματος αερισμού προς τη στοά και να οδηγήσουμε τους ανθρώπους στην επιφάνεια μέσω μόνο του φρέατος. Το σύστημα τεχνητού αερισμού που βρίσκεται στο χώρο κάνει 30 sec να φτάσει στην πλήρη ισχύ του η οποία είναι 50 m³ αέρα το δευτερόλεπτο.

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί πως για την προσομοίωση αυτού του σεναρίου φωτιάς θα παρατεθούν για όλα τα υπολογισθέντα μεγέθη, στιγμιότυπα ίδιων χρόνων με αυτά του προηγούμενου σεναρίου, όπου δεν είναι ενεργοποιημένο το σύστημα αερισμού, ώστε να μπορεί να γίνει καλύτερη σύγκριση μεταξύ των δύο σεναρίων.

Όπως και για το προηγούμενο σενάριο έτσι και τώρα, θα παρουσιαστεί όλη η εξέλιξη και η πορεία του καπνού στον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Π.Α. από τη στιγμή που ξεκίνησε η εξάπλωση του, μέχρι το τέλος της προσομοίωσης.





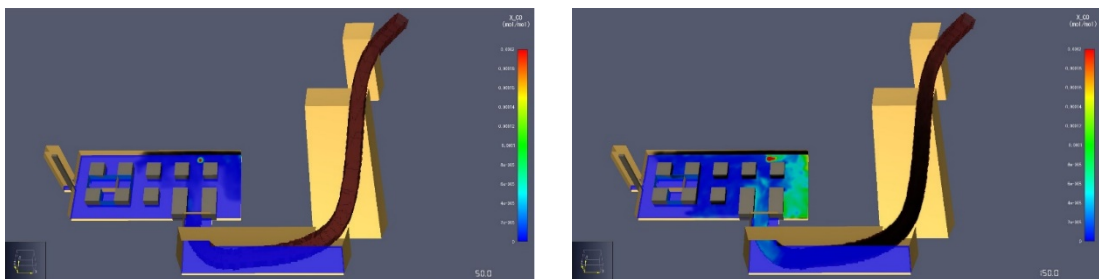
Εικόνα 61. Στιγμιότυπα κίνησης καπνού για το 1^ο σενάριο φωτιάς με αερισμό

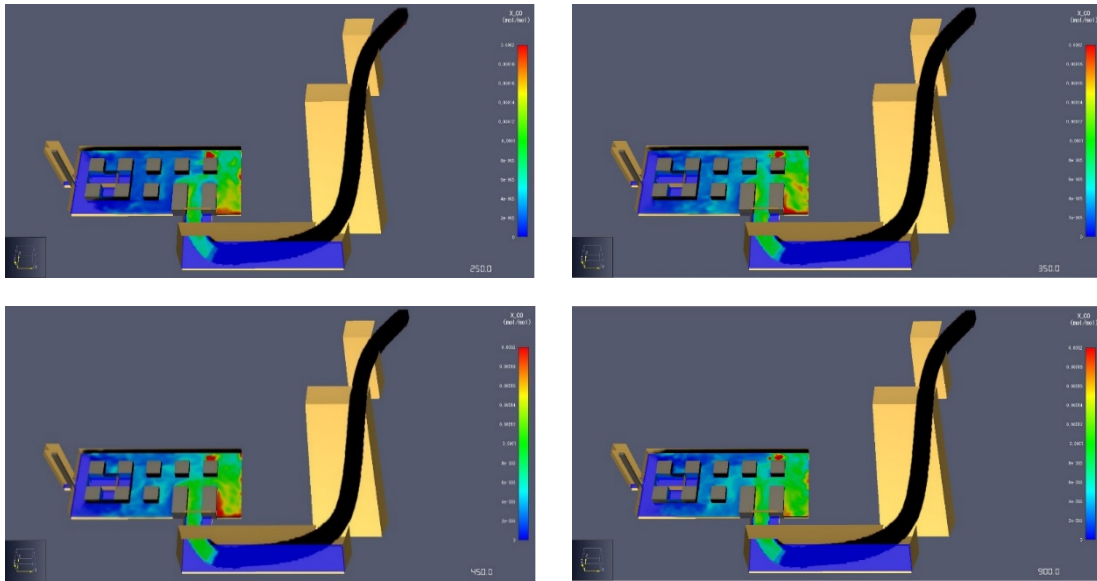
Σε αντίθεση με τα αντίστοιχα στιγμιότυπα της εξέλιξης του καπνού του προηγούμενου σεναρίου, όπου ο καπνός από τα 120 sec και μετά κατακλύζει όλο τον υπόγειο χώρο, παρατηρούμε πως στην Εικόνα 61 από τα 120 sec και μετά ο καπνός ενώ έχει γεμίσει ασφυκτικά το μεγαλύτερο μέρος της αποθήκης και της στοάς, δεν προχωρά προς το φρέαρ καθώς τον εμποδίζει το σύστημα αερισμού. Συνεπώς στο τέλος της προσομοίωσης στο φρέαρ και σε ένα τμήμα της αποθήκης που βρίσκεται κοντά του δεν υπάρχει καθόλου καπνός, την ώρα που η στοά και το υπόλοιπο τμήμα της αποθήκης είναι καλυμμένα με καπνό.

Πέρα όμως μόνο από την οπτική απεικόνιση του καπνού στον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Π.Λ., κρίθηκε απαραίτητος ο προσδιορισμός ορισμένων μεγεθών που επηρεάζουν την ανθρώπινη ασφάλεια και υγεία, καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Για το σκοπό αυτό δημιουργήθηκαν ορισμένες δυσδιάστατες επιφάνειες μέτρησης και συγκεντρώθηκαν τα παρακάτω οπτικά αποτελέσματα:

i. Συγκέντρωση μονοξειδίου του άνθρακα στον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Π.Λ.:

Με τη βοήθεια των παρακάτω χαρακτηριστικών χρονικών στιγμιότυπων της προσομοίωσης, παρουσιάζεται η συγκέντρωση του μονοξειδίου του άνθρακα στον εξεταζόμενο υπόγειο χώρο.





Εικόνα 62. Στιγμιότυπα συγκέντρωσης CO στην αποθήκη για το 1^ο σενάριο φωτιάς με αερισμό

Στα στιγμιότυπα της Εικόνας 62, η συγκέντρωση του μονοξειδίου του άνθρακα είναι εκφρασμένη σε mol/mol. Πολλαπλασιάζοντας την ποσότητα αυτή με 10^6 , η συγκέντρωση του CO εκφράζεται σε ppm. Πραγματοποιώντας αυτή τη μετατροπή, παρατηρούμε πως η παραπάνω κλίμακα έχει ως μέγιστη τιμή (κόκκινο χρώμα) τα 200 ppm CO σε περιβάλλοντα αέρα. Με άλλα λόγια κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης αυτού του σεναρίου φωτιάς η συγκέντρωση του CO στον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Π.Α. κυμαίνεται από 0-200 ppm.

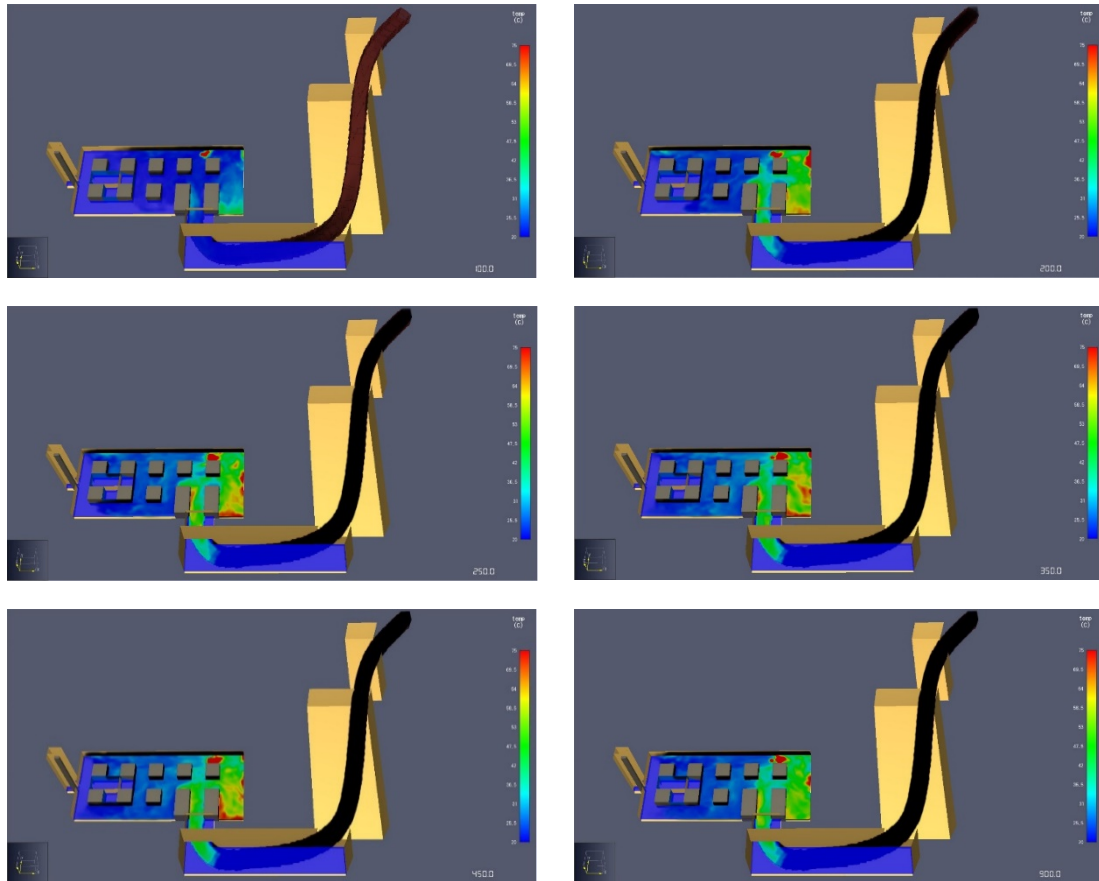
Συγκεκριμένα, παρατηρούμε πως στο μεγαλύτερο τμήμα της αποθήκης, πλησίον του φρέατος, η συγκέντρωση του μονοξειδίου του άνθρακα δεν ξεπερνά τα 60 ppm καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Αντιθέτως, στο τμήμα της αποθήκης που βρίσκεται κοντά στη στοά η συγκέντρωση του CO κυμαίνεται από τα 100-200 ppm μέχρι το τέλος της προσομοίωσης.

Από τον Πίνακα 14 προκύπτει ότι για συγκεντρώσεις CO από 100-200 ppm παρατηρείται ήπιος πονοκέφαλος σε έναν άνθρωπο για συνεχή έκθεση 2-3 ωρών. Αυτό δεν εμπνέει κάποια ανησυχία για την ανθρώπινη ασφάλεια για πολλούς λόγους. Αρχικά η συγκέντρωση CO των 200 ppm είναι μικρότερη από την οριακή συγκέντρωση ασφαλείας για τον άνθρωπο των 1500 ppm, που δίνεται στον Πίνακα 16. Επιπλέον, το συγκεκριμένο τμήμα της αποθήκης όπου παρατηρούνται οι υψηλές συγκεντρώσεις CO δεν περιλαμβάνεται στη βασική όδευση διαφυγής των ενοίκων και τέλος, όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο ο υπόγειος χώρος του Τ.Π.Π.Α. θα έχει εκκενωθεί σε διάστημα πολύ μικρότερο των 2 ωρών σε κάθε περίπτωση.

Σε αντίθεση τώρα με το προηγούμενο σενάριο φωτιάς όπου το σύστημα τεχνητού αερισμού δεν είναι ενεργό, παρατηρούνται υψηλές συγκεντρώσεις CO μόνο στο τμήμα της αποθήκης που βρίσκεται κοντά στη στοά. Αυτό είναι λογικό καθώς ο αερισμός περιορίζει τον καπνό σε αυτό το τμήμα και αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι ένοικοι να μην βρίσκονται σε περιβάλλον υψηλής συγκέντρωσης σε CO κατά την εκκένωση από το φρέαρ.

ii. Θερμοκρασία στην αποθήκη του υπόγειου χώρου του Τ.Π.Π.Α.:

Με τη βοήθεια των παρακάτω χαρακτηριστικών χρονικών στιγμιότυπων της προσομοίωσης, παρουσιάζεται η θερμοκρασία της αποθήκης του υπόγειου χώρου σε κλίμακα.



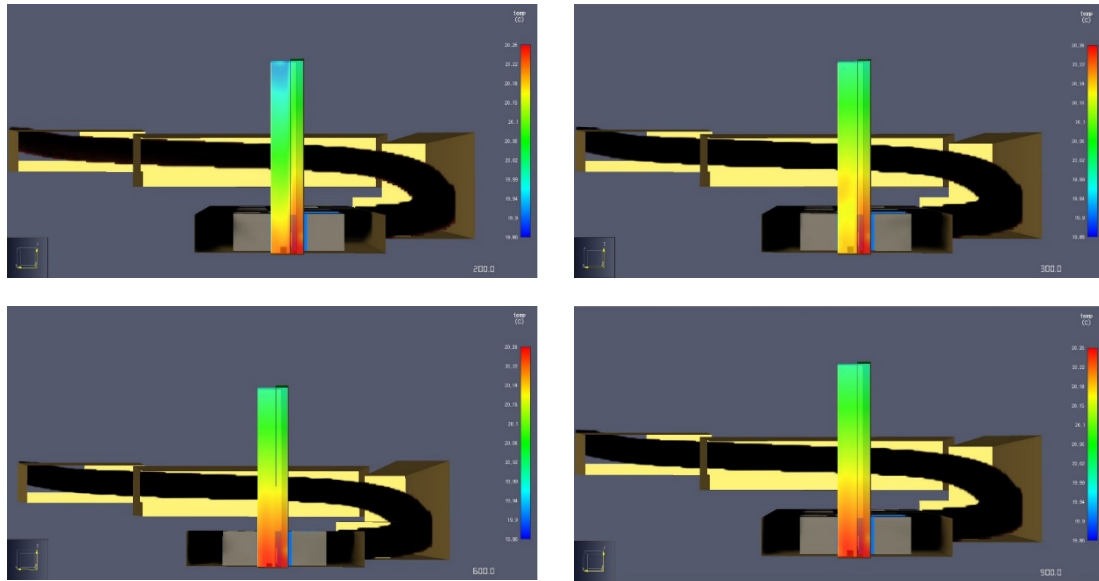
Εικόνα 63. Στιγμιότυπα θερμοκρασίας στην αποθήκη για το 1^ο σενάριο φωτιάς με αερισμό

Από τα στιγμιότυπα της Εικόνας 63, παρατηρούμε πως σε αυτό το σενάριο φωτιάς η θερμοκρασία στην αποθήκη του υπόγειου χώρου του Τ.Π.Π.Α. κυμαίνεται στους 20-75°C. Στο τμήμα της αποθήκης που βρίσκεται κοντά στο φρέαρ, που περιλαμβάνει τις βασικές οδεύσεις διαφυγής της εκκένωσης, η θερμοκρασία δεν ξεπερνά τους 35°C μέχρι το τέλος της προσομοίωσης καθώς το σύστημα αερισμού περιορίζει στο τμήμα αυτό τα θερμά αέρια παράγωγα του καπνού. Αντίθετα, στην υπόλοιπη αποθήκη η θερμοκρασία από τα 200 sec και μετά κυμαίνεται στους 45-75°C.

Σε κάθε περίπτωση πάντως, από τον Πίνακα 16 συμπεραίνουμε πως ο παράγοντας της θερμοκρασίας στην αποθήκη του υπόγειου χώρου δεν εγκυμονεί κάποιον ενδεχόμενο κίνδυνο καθώς η μέγιστη θερμοκρασία των 75°C στο συγκεκριμένο σενάριο φωτιάς, είναι μικρότερη από την οριακή θερμοκρασία ασφαλείας για τον άνθρωπο, των 100°C.

iii. Θερμοκρασία στο φρέαρ του υπόγειου χώρου του Τ.Π.Π.Α.:

Με τη βοήθεια των παρακάτω χαρακτηριστικών χρονικών στιγμιότυπων της προσομοίωσης, παρουσιάζεται η θερμοκρασία στο φρέαρ του υπόγειου χώρου σε κλίμακα.



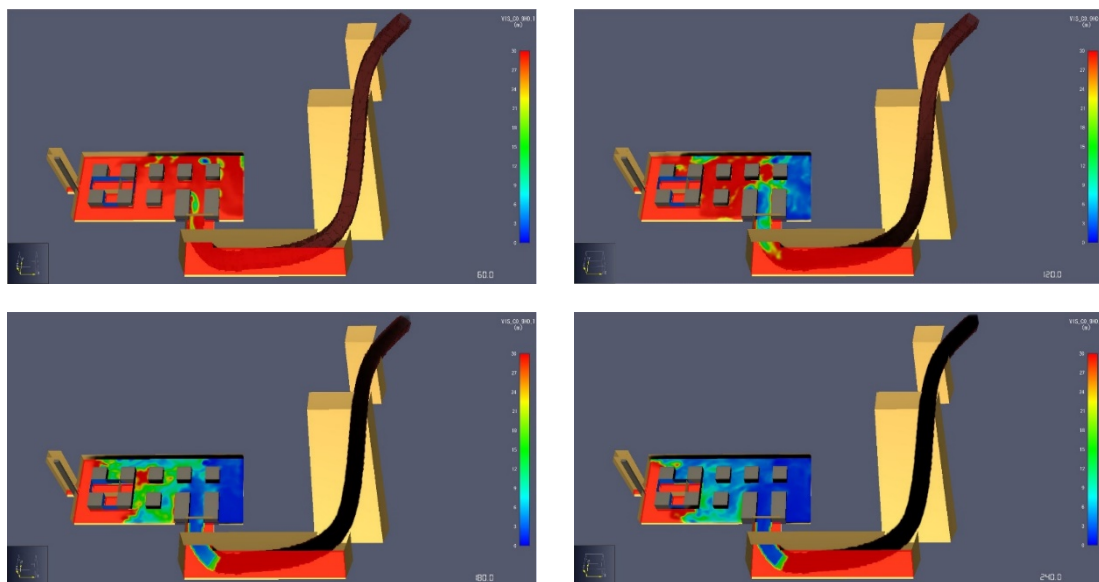
Εικόνα 64. Στιγμιότυπα θερμοκρασίας στο φρέαρ για το 1^ο σενάριο φωτιάς με αερισμό

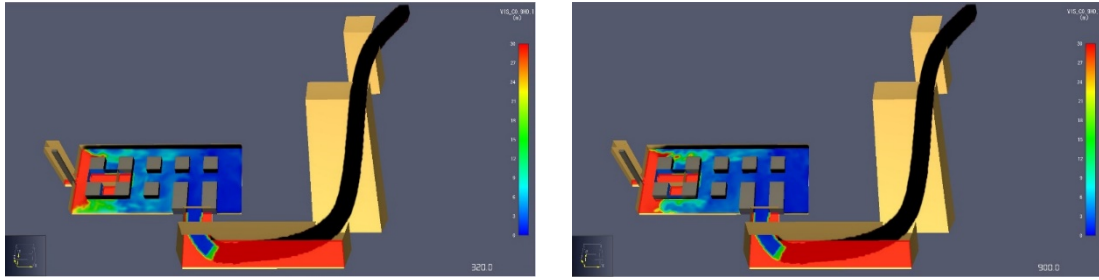
Παρατηρώντας τη θερμοκρασιακή κλίμακα των στιγμιότυπων της Εικόνας 64, βλέπουμε πως η θερμοκρασία στο φρέαρ παραμένει ουσιαστικά σταθερή στους 20°C σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Αυτό συμβαίνει γιατί το σύστημα αερισμού δεν επιτρέπει την είσοδο του καπνού και των θερμών αερίων στο φρέαρ.

Συνεπώς, στο κλιμακοστάσιο του φρέατος οι ένοικοι δεν διατρέχουν κανένα κίνδυνο από τα θερμά παραγόμενα αέρια της πυρκαγιάς.

iv. Ορατότητα στο ύψος των 1.75 m στην αποθήκη του υπόγειου χώρου του Τ.Π.Π.Λ.:

Με τη βοήθεια των παρακάτω χαρακτηριστικών χρονικών στιγμιότυπων της προσομοίωσης, παρουσιάζεται η ορατότητα στην αποθήκη του υπόγειου χώρου σε κλίμακα.





Εικόνα 65. Στιγμιότυπα ορατότητας στην αποθήκη για το 1^ο σενάριο φωτιάς με αερισμό

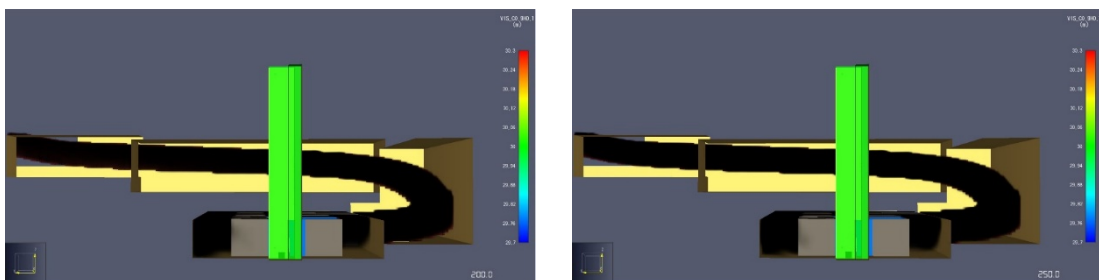
Από τον Πίνακα 16 προκύπτει ως οριακή ορατότητα για την ανθρώπινη ασφάλεια, τα 10 m σε μεγάλες εγκαταστάσεις όπως ο υπόγειος χώρος που μελετάμε. Στο συγκεκριμένο σενάριο όπου το σύστημα τεχνητού αερισμού ωθεί τον καπνό προς τη στοά και οι ένοικοι εκκενώνουν το χώρο μόνο μέσω του φρέατος, επιθυμούμε να είναι καλή η ορατότητα κυρίως στο τμήμα της αποθήκης που βρίσκεται κοντά στο φρέαρ ώστε να κριθεί ασφαλής η εκκένωση.

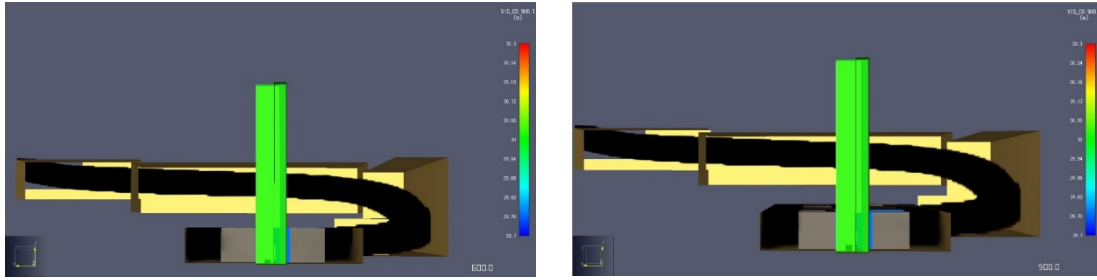
Από τα στιγμιότυπα της Εικόνας 65 βλέπουμε πως η ορατότητα στο τμήμα της αποθήκης κοντά στη στοά πέφτει, όπως είναι λογικό λόγω της παρουσίας πυκνού καπνού, κάτω από τα 10 m από τα 120 sec της προσομοίωσης και μετά. Από τα 180 sec και με την πάροδο του χρόνου η ορατότητα μειώνεται στο κεντρικό τμήμα της αποθήκης, μέχρι να φτάσει τα 8 m στα 320 sec και να μειωθεί κι άλλο μέχρι το τέλος της προσομοίωσης. Στο τμήμα της αποθήκης ωστόσο που βρίσκεται κοντά στο φρέαρ η ορατότητα δεν πέφτει κάτω από τα 10 m καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης ενώ σε ορισμένα σημεία η ορατότητα μπορεί να χαρακτηριστεί ως άριστη καθώς δεν πέφτει κάτω από τα 30 m.

Μπορούμε συνεπώς να συμπεράνουμε πως εάν οι ένοικοι κατευθυνθούν εντός τριών λεπτών με σχετικά γρήγορο ρυθμό προς το φρέαρ, η ορατότητα τους θα είναι πολύ καλή και δεν θα διατρέξουν κάποιο κίνδυνο. Έτσι, με τις νέες συνθήκες που δημιουργήσαμε, με τον τεχνητό αερισμό να ωθεί τον αέρα προς τη στοά και τους ενοίκους να εκκενώνουν τον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Π.Λ. μόνο από το φρέαρ, το πρόβλημα της εξαιρετικά μειωμένης ορατότητας στην αποθήκη του προηγούμενου σεναρίου αντιμετωπίστηκε και η όλη εκκένωση μπορεί να χαρακτηριστεί πια ως ασφαλής.

v. Ορατότητα στο φρέαρ του υπόγειου χώρου του Τ.Π.Π.Λ.:

Με τη βοήθεια των παρακάτω χαρακτηριστικών χρονικών στιγμιότυπων της προσομοίωσης, παρουσιάζεται η ορατότητα στο φρέαρ του υπόγειου χώρου σε κλίμακα.





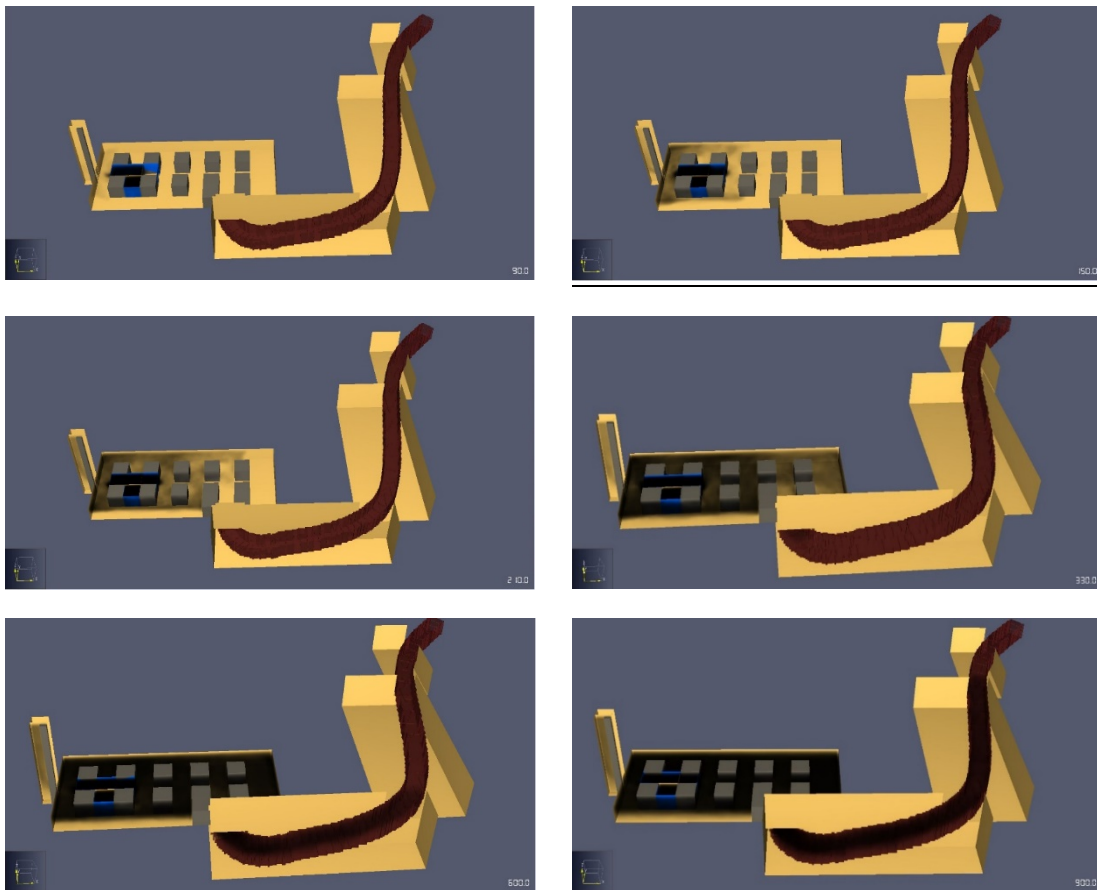
Εικόνα 66. Στιγμιότυπα ορατότητας στο φρέαρ για το 1^ο σενάριο φωτιάς με αερισμό

Όσον αφορά τώρα το φρέαρ, παρατηρούμε πως σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης η ορατότητα είναι σταθερή στα 30 m. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως δεν εισέρχεται καθόλου καπνός στο φρέαρ λόγω του τεχνητού αερισμού.

Συνεπώς, στο κλιμακοστάσιο του φρέατος οι ένοικοι έχουν άριστη ορατότητα και δεν διατρέχουν κανένα κίνδυνο.

Γ.4.2.3. 2^ο Σενάριο – Φωτιά στα γραφεία του υπόγειου χώρου του Τ.Π.Α.

Για το σενάριο αυτό, θα παρουσιαστεί όλη η εξέλιξη και η πορεία του καπνού στον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Α. από τη στιγμή που ξεκίνησε η εξάπλωση του, μέχρι το τέλος της προσομοίωσης.



Εικόνα 67. Στιγμιότυπα κίνησης καπνού για το 2^ο σενάριο φωτιάς

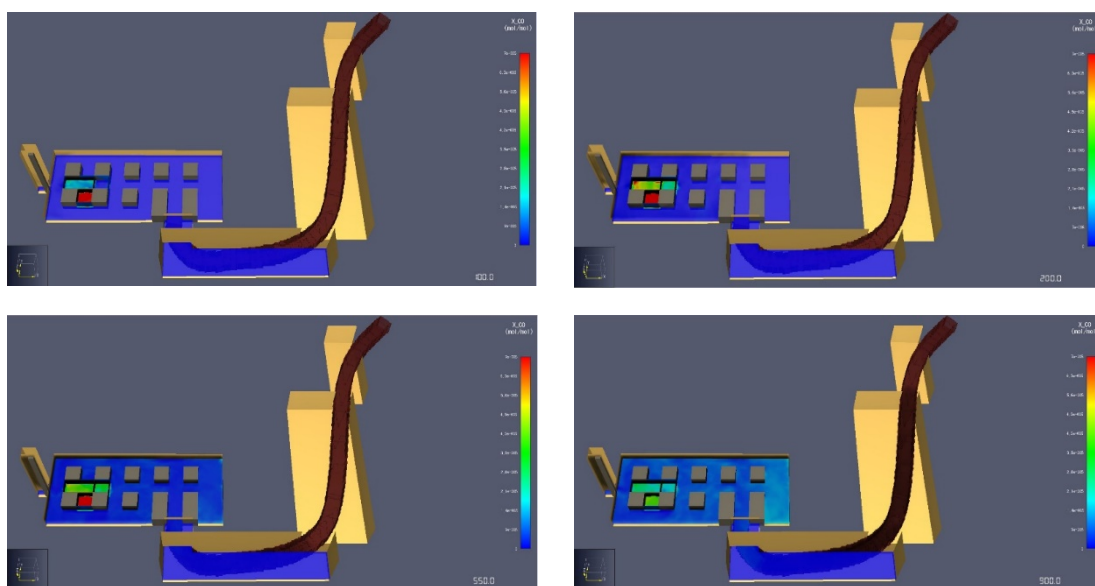
Στα στιγμιότυπα της Εικόνας 67, παρατηρούμε πως ο καπνός που παράγεται, αφού γεμίσει ασφυκτικά το χώρο των γραφείων, εξαπλώνεται προς τον υπόλοιπο χώρο του υπόγειου, αφού οι πόρτες των γραφείων ήταν ανοιχτές την ώρα της φωτιάς.

Συγκεκριμένα, βλέπουμε ότι στα 150 sec ο καπνός απλώνεται στον χώρο της αποθήκης ενώ εισέρχεται και στο φρέαρ. Στα 330 sec ο καπνός έχει καλύψει σχεδόν όλη την αποθήκη του υπόγειου και αρχίζει να εισέρχεται και στη στοά. Τέλος, μέχρι τα 900 sec το μεγαλύτερο μέρος της στοάς έχει γεμίσει με καπνό.

Όπως συνέβη και στο 1^ο σενάριο φωτιάς, έτσι και σε αυτό δεν κρίθηκε επαρκής μόνο η οπτική απεικόνιση του καπνού στον υπόγειο χώρο κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς. Πιο συγκεκριμένα με τη βοήθεια των ίδιων δυσδιάστατων επιφανειών μέτρησης, που χρησιμοποιήθηκαν στο 1^ο σενάριο φωτιάς, υπολογίστηκαν τα αντίστοιχα μεγέθη:

i. Συγκέντρωση μονοξειδίου του άνθρακα στον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Π.Λ.:

Με τη βοήθεια των παρακάτω χαρακτηριστικών χρονικών στιγμιότυπων της προσομοίωσης, παρουσιάζεται η συγκέντρωση του μονοξειδίου του άνθρακα στον εξεταζόμενο υπόγειο χώρο.



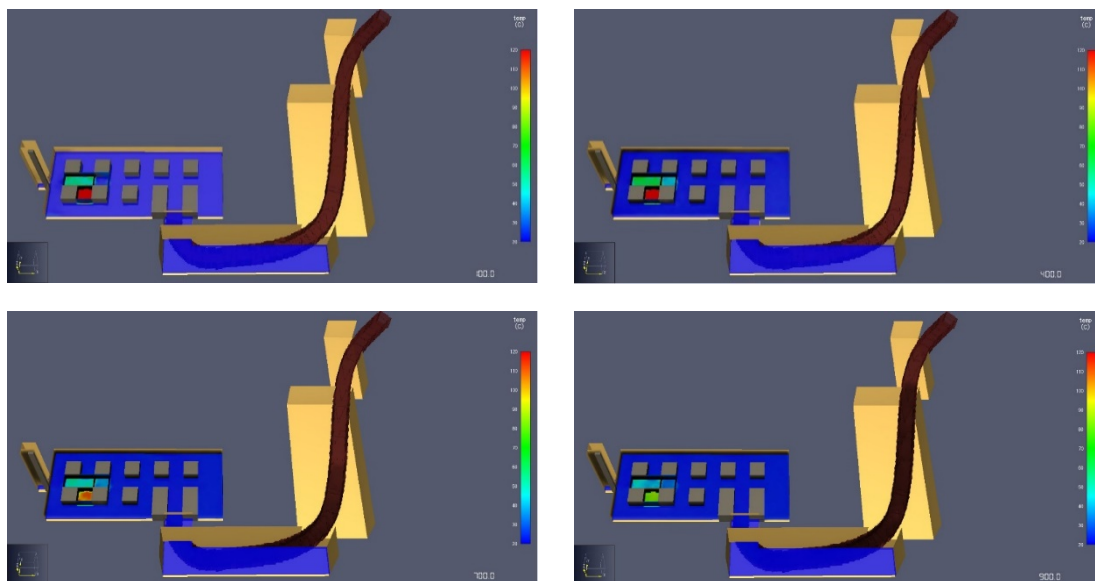
Εικόνα 68. Στιγμιότυπα συγκέντρωσης CO στην αποθήκη για το 2^ο σενάριο φωτιάς

Όπως και στις άλλες δύο περιπτώσεις έτσι και τώρα στα στιγμιότυπα της Εικόνας 68, η συγκέντρωση του μονοξειδίου του άνθρακα είναι εκφρασμένη σε mol/mol. Πολλαπλασιάζοντας την ποσότητα αυτή με 10⁶, εκφράζουμε τη συγκέντρωση του CO σε ppm. Πραγματοποιώντας αυτή τη μετατροπή, παρατηρούμε πως η παραπάνω κλίμακα έχει ως μέγιστη τιμή (κόκκινο χρώμα) τα 70 ppm CO σε περιβάλλοντα αέρα. Με άλλα λόγια κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης αυτού του σεναρίου φωτιάς η συγκέντρωση του CO στον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Π.Λ. κυμαίνεται από 0-70 ppm.

Παρατηρούμε πως κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης της φωτιάς μόνο στον χώρο των γραφείων συναντάται μια σχετικά αυξημένη συγκέντρωση μονοξειδίου του άνθρακα (25-70 ppm), η οποία ελαττώνεται με την πάροδο του χρόνου, ενώ στον υπόλοιπο χώρο της αποθήκης η συγκέντρωση του μονοξειδίου είναι απειροελάχιστη και δεν ξεπερνά τα 20 ppm. Οι συγκεντρώσεις μονοξειδίου αυτής της κλίμακας σε καμία περίπτωση δεν προκαλούν κάποια ανησυχία και δεν συνιστούν κίνδυνο για την ανθρώπινη ασφάλεια στην περίπτωση μας. Συγκεκριμένα, από τον Πίνακα 14 για συγκέντρωση μονοξειδίου του άνθρακα 70 ppm, παρατηρείται ήπιος πονοκέφαλος σε έναν άνθρωπο για συνεχή έκθεση 3-4 ωρών, ένα χρονικό διάστημα το οποίο είναι πολύ μεγαλύτερο από αυτό που κρατάει η βραδύτερη εκκένωση του υπόγειου χώρου.

ii. Θερμοκρασία στην αποθήκη του υπόγειου χώρου του Τ.Π.Α.:

Με τη βοήθεια των παρακάτω χαρακτηριστικών χρονικών στιγμιότυπων της προσομοίωσης, παρουσιάζεται η θερμοκρασία της αποθήκης του υπόγειου χώρου σε κλίμακα.



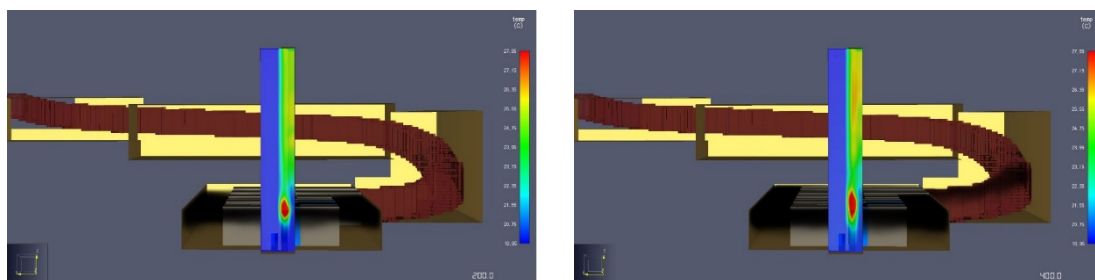
Εικόνα 69. Στιγμιότυπα θερμοκρασίας στην αποθήκη για το 2^ο σενάριο φωτιάς

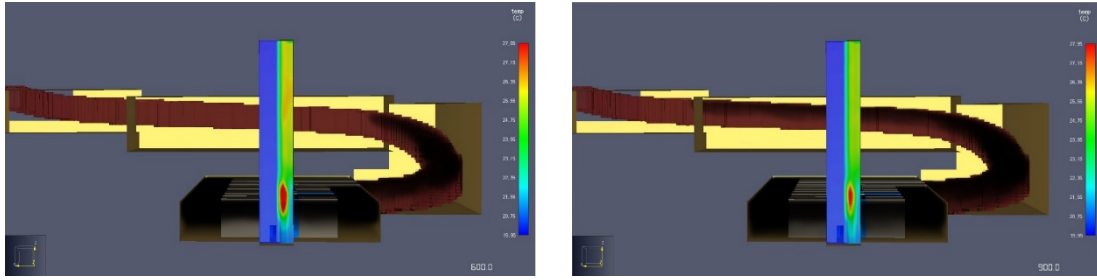
Από τα στιγμιότυπα της Εικόνας 69, μπορούμε να εξάγουμε δυο συμπεράσματα σχετικά με την αύξηση της θερμοκρασίας στον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Α., για το σενάριο αυτό. Αρχικά βλέπουμε πως στον χώρο της αποθήκης η θερμοκρασία παραμένει σταθερή στους 20°C καθ' όλη τη διάρκεια της πυρκαγιάς, καθιστώντας την έτσι ένα απολύτως ασφαλές περιβάλλον για την εκκένωση. Αντιθέτως στο χώρο των γραφείων, όπου ξεσπάει η φωτιά, απαντώνται υψηλές θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 50°C μέχρι 120°C στο δωμάτιο απ' όπου ξεκινάει η πυρκαγιά.

Από τον Πίνακα 16 ωστόσο συμπεραίνουμε πως η οριακή θερμοκρασία ασφαλείας για τον άνθρωπο είναι 100°C, κάτι που σημαίνει ότι οι άνθρωποι που βρίσκονται στον χώρο των γραφείων τη στιγμή έναυσης της φωτιάς θα πρέπει να απομακρυνθούν ταχύτατα γιατί ενδέχεται να βρεθούν σε μεγάλο κίνδυνο.

iii. Θερμοκρασία στο φρέαρ του υπόγειου χώρου του Τ.Π.Α.:

Με τη βοήθεια των παρακάτω χαρακτηριστικών χρονικών στιγμιότυπων της προσομοίωσης, παρουσιάζεται η θερμοκρασία στο φρέαρ του υπόγειου χώρου σε κλίμακα.



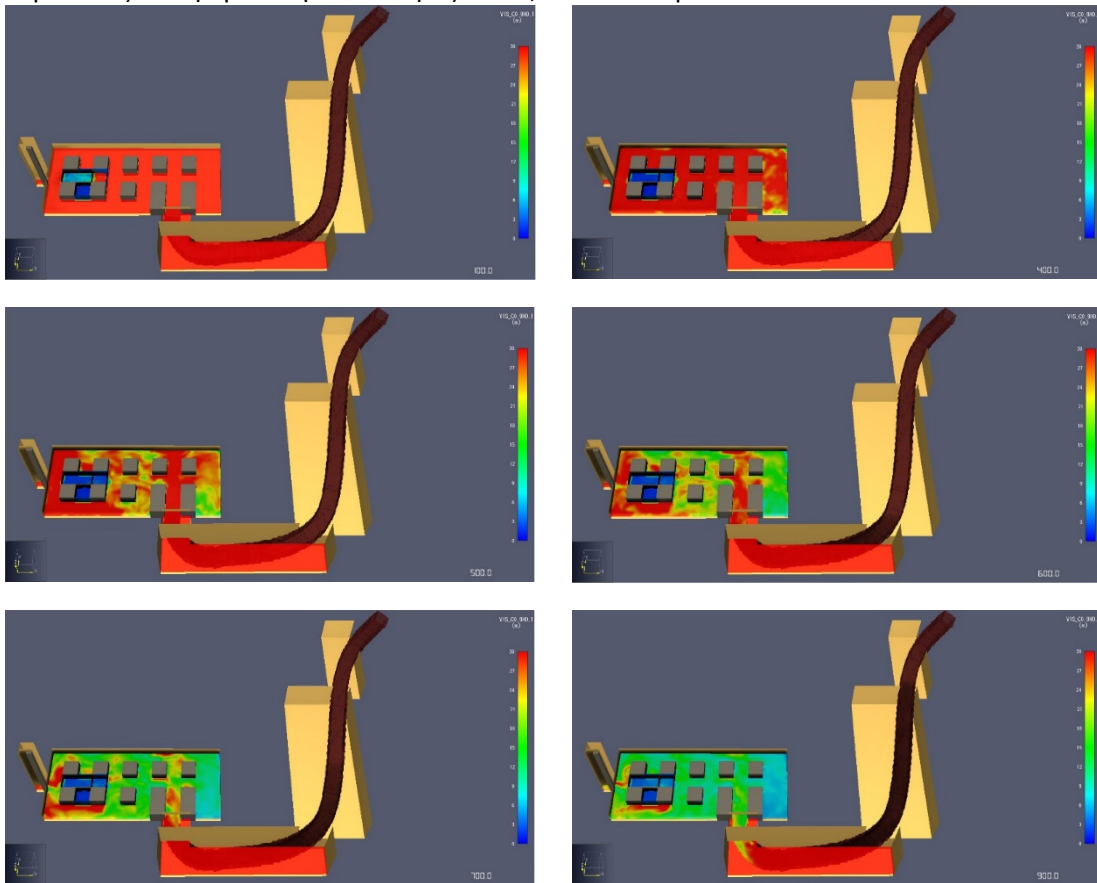


Εικόνα 70. Στιγμιότυπα θερμοκρασίας στο φρέαρ για το 2^ο σενάριο φωτιάς

Παρατηρώντας τα στιγμιότυπα της Εικόνας 70, βλέπουμε πως η θερμοκρασία του φρέατος καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης της πυρκαγιάς φτάνει μέχρι τους 28°C, κάτι που δεν γεννά καμία ανησυχία και επιτρέπει τους ενοίκους να εκκενώσουν με ασφάλεια το χώρο.

iv. Ορατότητα στο ύψος των 1.75 m στην αποθήκη του υπόγειου χώρου του Τ.Π.Λ.:

Με τη βοήθεια των παρακάτω χαρακτηριστικών χρονικών στιγμιότυπων της προσομοίωσης, παρουσιάζεται η ορατότητα στο ύψος των 1,75 m σε κλίμακα.



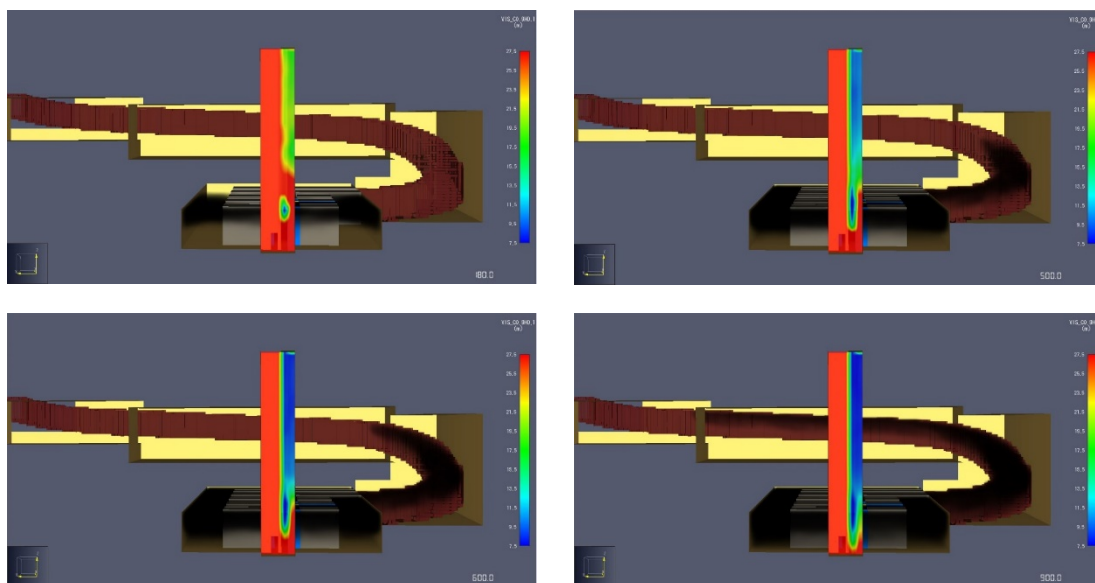
Εικόνα 71. Στιγμιότυπα ορατότητας στην αποθήκη για το 2^ο σενάριο φωτιάς

Από τον Πίνακα 16 προκύπτει ως οριακή ορατότητα για την ανθρώπινη ασφάλεια, τα 10 m σε μεγάλες εγκαταστάσεις όπως ο υπόγειος χώρος που μελετάμε. Σύμφωνα με τα στιγμιότυπα της Εικόνας 71 τώρα, παρατηρούμε πως μετά τα 100 sec η ορατότητα στο χώρο των γραφείων ουσιαστικά μηδενίζεται κάτι που συνιστά πολύ μεγάλο κίνδυνο για την εκκένωση του χώρου και την ασφάλεια των ενοίκων. Για τον υπόλοιπο χώρο τώρα βλέπουμε πως η ορατότητα δεν πέφτει κάτω από τα 25 m μέχρι τα 500 sec. Για 200 sec ακόμα η

ορατότητα μειώνεται σταδιακά, σε ασφαλή πάντα επίπεδα. Από τα 700 sec και μέχρι το τέλος της προσομοίωσης η ορατότητα πέφτει σε ορισμένα τμήματα της αποθήκης κάτω από τα 10 m, κάτι που όμως δεν συνιστά παράγοντα κινδύνου καθώς τα τμήματα αυτά δεν περιλαμβάνονται στη βασική όδευση διαφυγής.

v. Ορατότητα στο φρέαρ του υπόγειου χώρου του Τ.Π.Α.:

Με τη βοήθεια των παρακάτω χαρακτηριστικών χρονικών στιγμιότυπων της προσομοίωσης, παρουσιάζεται η ορατότητα στο φρέαρ του υπόγειου χώρου σε κλίμακα.



Εικόνα 72. Στιγμιότυπα ορατότητας στο φρέαρ για το 2^ο σενάριο φωτιάς

Όσον αφορά τώρα το φρέαρ, παρατηρούμε πως από τα 500 sec και μέχρι το πέρας της προσομοίωσης η ορατότητα στο τμήμα του ανελκυστήρα είναι κάτω από τα 10 m, ενώ στο τμήμα του κλιμακοστασίου όπου χρησιμοποιείται κατά την εκκένωση του χώρου από τους ενοίκους η ορατότητα φτάνει τα 28 m καθ' όλη τη διάρκεια της πυρκαγιάς.

Συνεπώς, στο κλιμακοστάσιο του φρέατος οι ένοικοι έχουν άριστη ορατότητα και δεν διατρέχουν κάποιο κίνδυνο.

Γ.4.2.4. Συγκριτική ανάλυση σημειακών συσκευών μέτρησης

Στο κεφάλαιο αυτό θα ακολουθήσει η παρουσίαση και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις σημειακές συσκευές μέτρησης που τοποθετήθηκαν στον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Α., στα πλαίσια της προσομοίωσης των σεναρίων φωτιάς στο Pyrosim.

Συγκεκριμένα τοποθετήθηκαν οκτώ συσκευές, οι πέντε εκ των οποίων μετρούσαν συγκεντρώσεις μονοξειδίου του άνθρακα και οι υπόλοιπες τρεις την ορατότητα στο χώρο. Οι συσκευές αυτές τοποθετήθηκαν στο ύψος των 1.75 m ώστε τα αποτελέσματα που θα εξαχθούν, να ταυτιστούν όσο το δυνατόν περισσότερο με την απορρόφηση του CO στο ύψος του ανθρώπου και την ανθρώπινη ορατότητα. Για κάθε συσκευή οι μετρήσεις των σεναρίων φωτιάς που εξετάστηκαν, τοποθετήθηκαν σε ένα διάγραμμα ώστε να γίνει μια συγκριτική ανάλυση των αποτελεσμάτων.

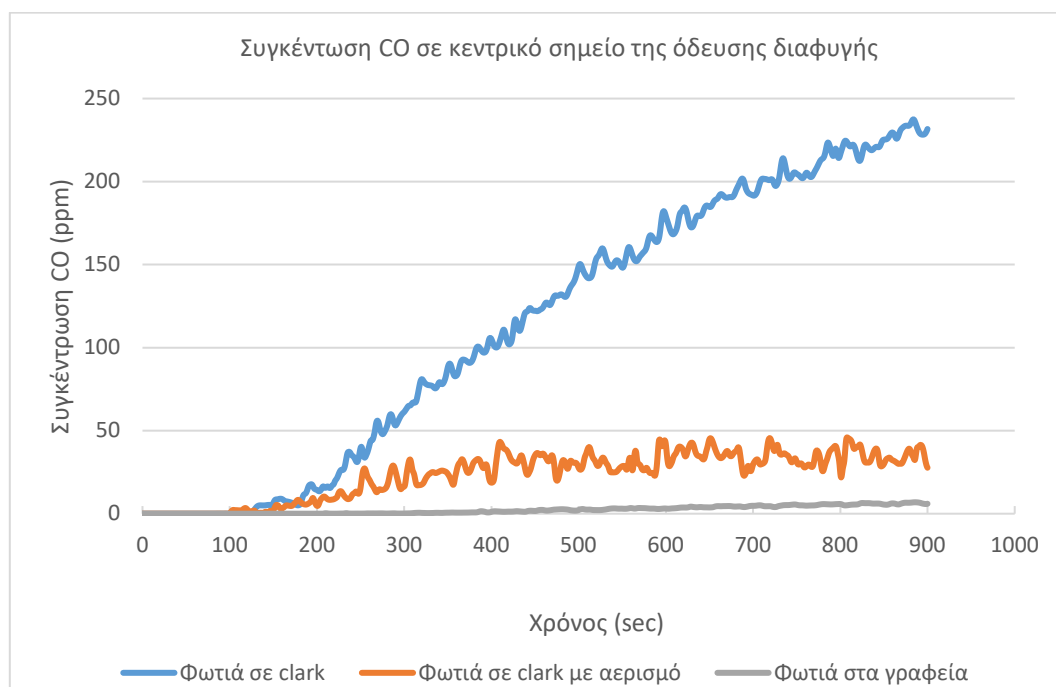
• Σημειακές συσκευές μέτρησης μονοξειδίου του άνθρακα:

Αυτές οι συσκευές τοποθετήθηκαν στο Pyrosim σε συγκεκριμένα σημεία του υπόγειου χώρου του Τ.Π.Α. και υπολόγισαν τη συγκέντρωση του μονοξειδίου του άνθρακα συναρτήσει του χρόνου της προσομοίωσης των σεναρίων φωτιάς. Στα αποτελέσματα που προέκυψαν δεν θα

μπορούσε να παρουσιαστεί διαγραμματικά η οριακή τιμή ασφαλείας των 1500 ppm καθώς οι συγκεντρώσεις που απαντώνται στον υπό μελέτη υπόγειο χώρο είναι πολύ μικρότερες.

ι. Συγκέντρωση CO σε κεντρικό σημείο της όδευσης διαφυγής:

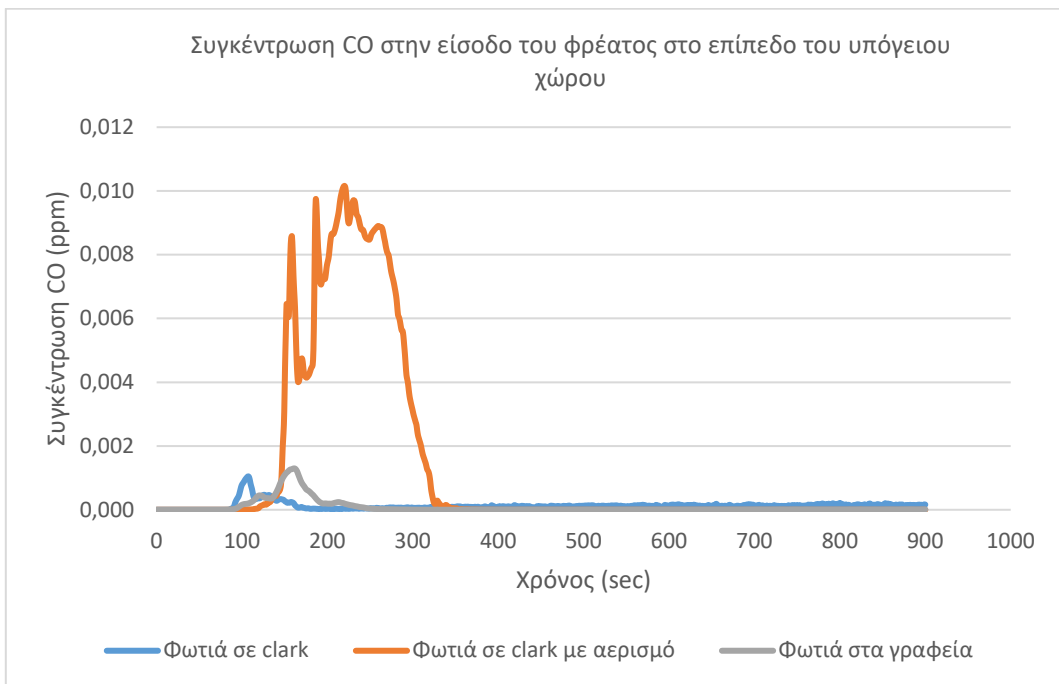
Η συσκευή αυτή τοποθετήθηκε σε ένα κεντρικό σημείο της αποθήκης που αποτελεί βασικό πέρασμα και των δύο οδεύσεων διαφυγής (φρέαρ, στοά). Τα αποτελέσματα και για τα τρία σενάρια φωτιάς φαίνονται στο διάγραμμα της Εικόνας 73.



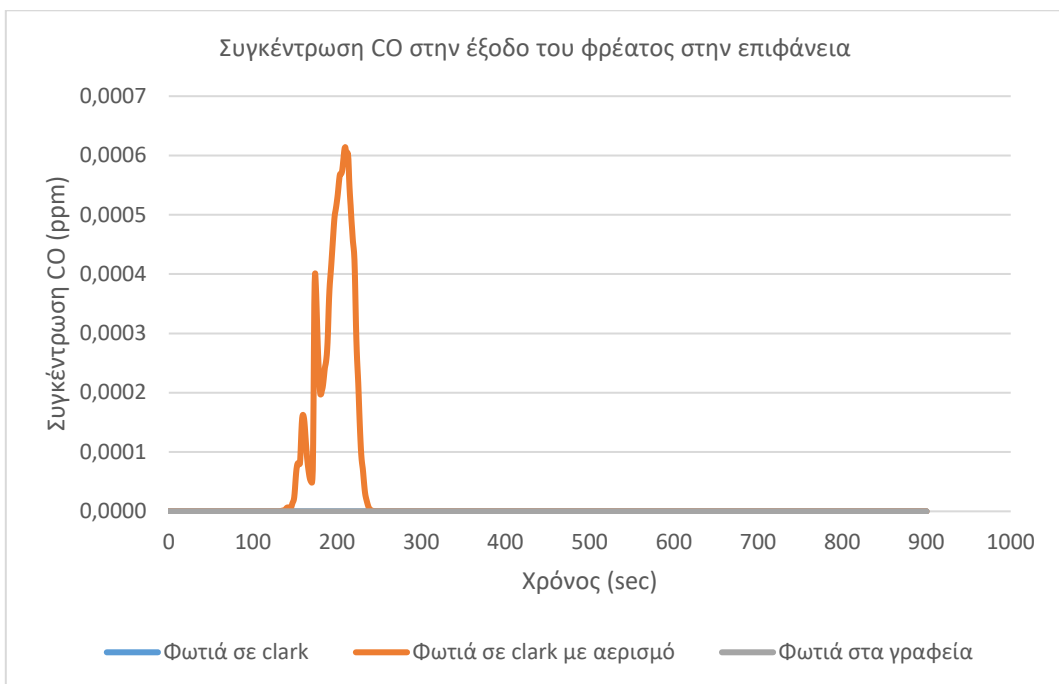
Εικόνα 73. Συγκέντρωση CO σε κεντρικό σημείο της όδευσης διαφυγής

Οι συγκεντρώσεις του CO για τη φωτιά στο ηλεκτροκίνητο μηχάνημα εκφόρτωσης (clark) είναι αρκετά υψηλότερες από τη φωτιά στα γραφεία του υπόγειου χώρου, που είναι σχεδόν μηδενικές. Αυτό συμβαίνει γιατί το ισοζύγιο εκπομπής μονοξειδίου του άνθρακα της φωτιάς στο clark είναι πολύ μεγαλύτερο από το αντίστοιχο της φωτιάς στα γραφεία ($Y_{CO}=0.048$ και $Y'_{CO}=0.004$ αντίστοιχα). Επιπλέον, παρατηρούμε πως για το σενάριο της φωτιάς στο clark, το σύστημα τεχνητού αερισμού μειώνει τη συγκέντρωση του CO στο συγκεκριμένο σημείο καθώς απομακρύνει τον καπνό και τα παράγωγά του προς τη στοά. Τέλος, στο σημείο αυτό η συγκέντρωση του CO κυμαίνεται σε ασφαλή για τον ανθρώπινο οργανισμό επίπεδα σε όλη τη διάρκεια των προσομοιώσεων, καθώς είναι πολύ χαμηλότερη της οριακής συγκέντρωσης των 1500 ppm.

ii. Συγκέντρωση CO στην είσοδο και έξοδο του φρέατος του υπόγειου χώρου:



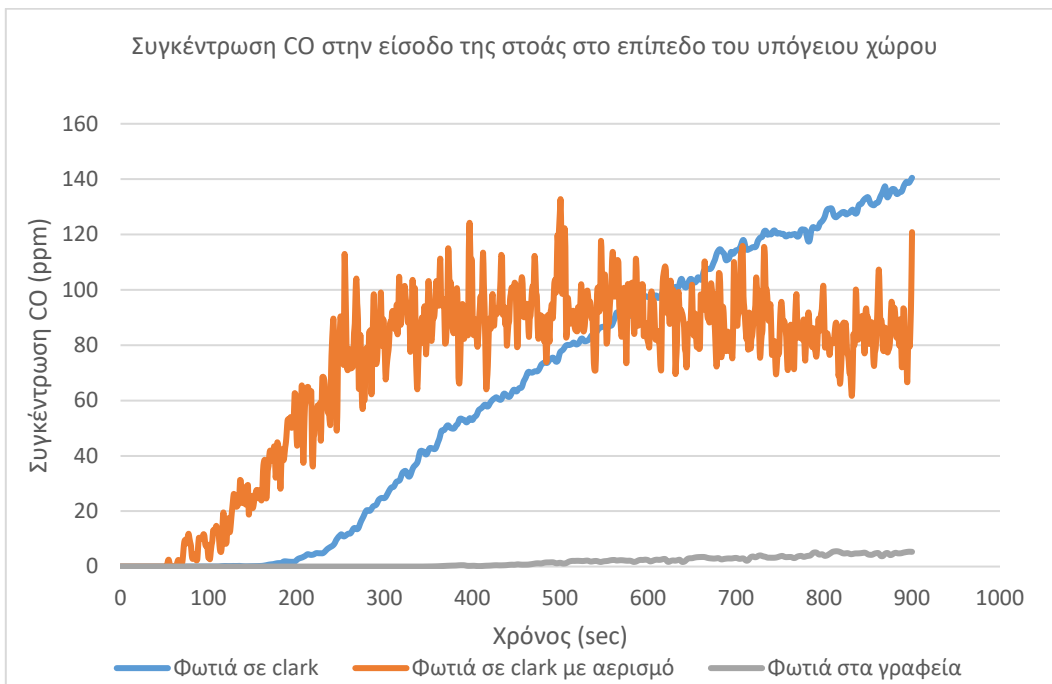
Εικόνα 74. Συγκέντρωση στην είσοδο του φρέατος στο επίπεδο του υπόγειου χώρου



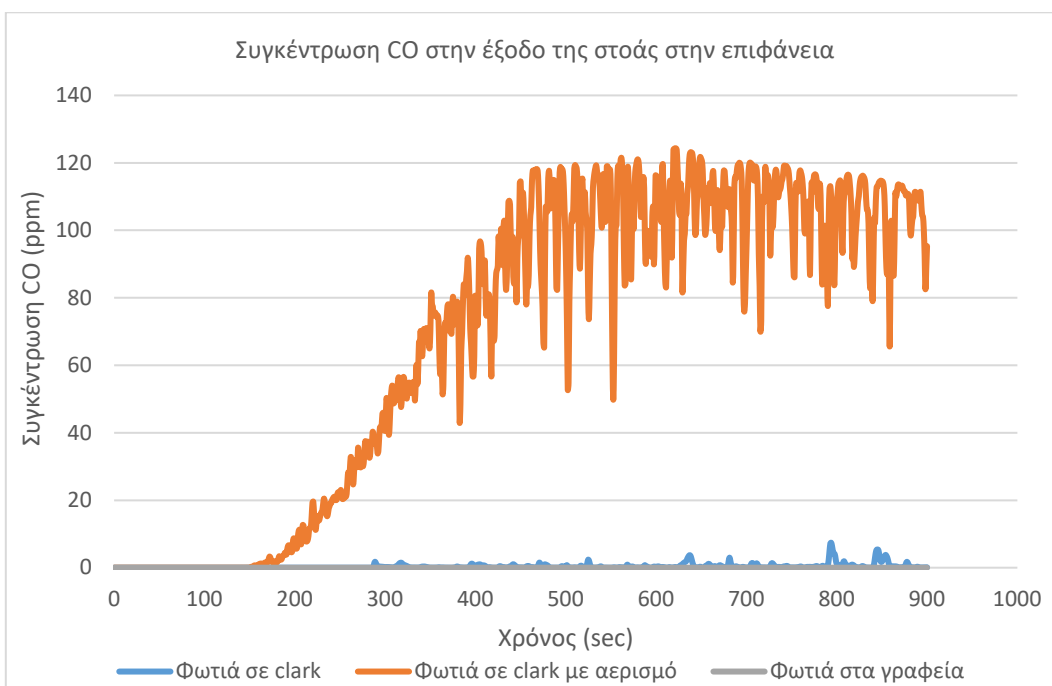
Εικόνα 75. Συγκέντρωση CO στην έξοδο του φρέατος στην επιφάνεια

Όπως φαίνεται στα δύο διαγράμματα της Εικόνας 74 και της Εικόνας 75, οι συγκεντρώσεις του CO για όλα τα σενάρια είναι μηδενικές καθώς ο καπνός δεν κατεβαίνει σε αρκετά χαμηλό ύψος ώστε να εισέλθει από την πόρτα εισόδου στο φρέαρ από την αποθήκη.

iii. Συγκέντρωση CO στην είσοδο και έξοδο της στοάς του υπόγειου χώρου:



Εικόνα 76. Συγκέντρωση CO στην είσοδο της στοάς στο επίπεδο του υπόγειου χώρου



Εικόνα 77. Συγκέντρωση CO στην έξοδο της στοάς στην επιφάνεια

Στην είσοδο της στοάς στο επίπεδο του υπόγειου χώρου (Εικόνα 76), βλέπουμε πως στο σενάριο της φωτιάς στο clark η συγκέντρωση του CO αρχίζει να αυξάνεται με γραμμικό σχεδόν τρόπο, από τα 150 sec και ύστερα, μέχρι να φτάσει τα 140 ppm στα 900 sec. Για την ίδια φωτιά όπου ο αερισμός ωθεί τον καπνό προς την στοά, παρατηρούμε πως από τα 30 sec

(όπου το σύστημα τεχνητού αερισμού φτάνει την πλήρη ισχύ του) μέχρι τα 300 sec, η συγκέντρωση του CO αυξάνεται και ύστερα σταθεροποιείται περίπου στα 110 ppm μέχρι το τέλος των προσομοιώσεων.

Στην έξοδο της στοάς στην επιφάνεια (Εικόνα 77), η συγκέντρωση του CO στο σενάριο της φωτιάς στο clark είναι απειροελάχιστη την ώρα που για την ίδια φωτιά με ενεργοποιημένο το σύστημα τεχνητού αερισμού, αυξάνεται από τα 150 sec και ύστερα, έως ότου να σταθεροποιηθεί περίπου στα 110 ppm.

Όσον αφορά τη φωτιά στα γραφεία του υπόγειου χώρου, η συγκέντρωση του CO τόσο στην είσοδο όσο και στην έξοδο της στοάς στην επιφάνεια είναι σχεδόν μηδενική.

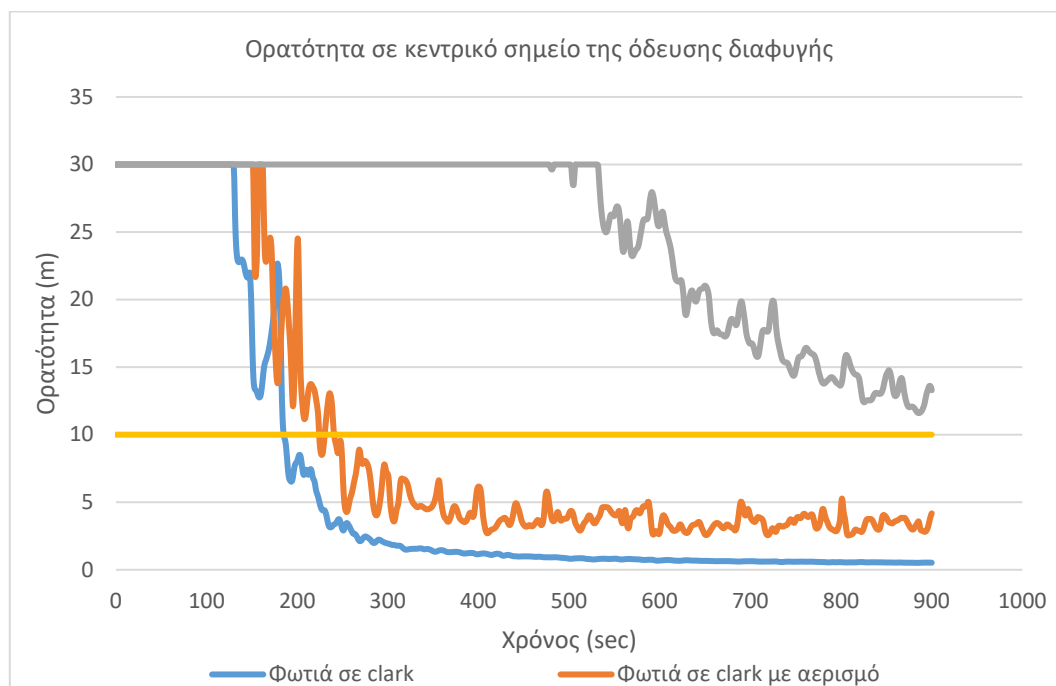
Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί πως στο σενάριο φωτιάς στο clark με τεχνητό αερισμό η εκκένωση του υπόγειου χώρου πραγματοποιείται μόνο μέσω του φρέατος. Συνεπώς ακόμα και αν η συγκέντρωση του CO ήταν αρκετά υψηλότερη στη στοά για το συγκεκριμένο σενάριο, δεν θα υπήρχε κανένας επικείμενος κίνδυνος για τους ενοίκους του χώρου καθώς δεν θα είχαν πρόσβαση στη στοά. Για όλα τα σενάρια βέβαια η συγκέντρωση του CO είναι πολύ χαμηλότερη των 1500 ppm και δεν αποτελεί κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία.

- **Σημειακές συσκευές μέτρησης της ορατότητας:**

Οι συγκεκριμένες συσκευές τοποθετήθηκαν στο Pyrosim σε συγκεκριμένα σημεία του υπόγειου χώρου του Τ.Π.Π.Α. και υπολόγισαν ένα από τα πιο κρίσιμα μεγέθη για την ασφάλεια μιας εκκένωσης, την ορατότητα στο χώρο συναρτήσει του χρόνου της προσομοίωσης των σεναρίων φωτιάς. Στα αποτελέσματα που προέκυψαν προστέθηκε η οριακή ορατότητα ασφαλείας των 10 m η οποία παρουσιάζεται διαγραμματικά με μια ευθεία κίτρινου χρώματος, παράλληλη στον άξονα του χρόνου.

ι. Ορατότητα σε κεντρικό σημείο της όδευσης διαφυγής:

Η συσκευή αυτή τοποθετήθηκε στο ίδιο κεντρικό σημείο της αποθήκης όπου τοποθετήθηκε και η συσκευή μέτρησης της συγκέντρωσης του CO. Τα αποτελέσματα και για τα τρία σενάρια φωτιάς φαίνονται στο διάγραμμα της Εικόνας 78.



Εικόνα 78. Διάγραμμα ορατότητας σε κεντρικό σημείο της όδευσης διαφυγής

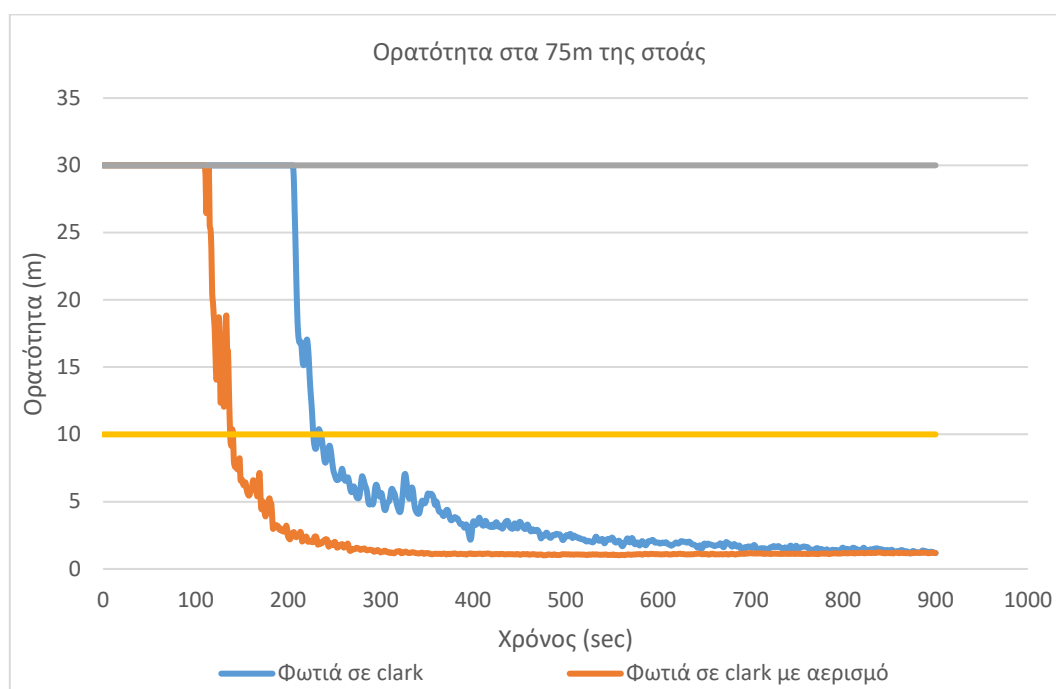
Όπως φαίνεται στο διάγραμμα της Εικόνας 78, στο σενάριο της φωτιάς στα γραφεία του υπόγειου χώρου η ορατότητα δεν πέφτει κάτω από τα 10 m στο υπό μελέτη σημείο του υπόγειου χώρου και έτσι δεν τίθεται κάποιο θέμα ασφαλείας.

Αντιθέτως στο σενάριο της φωτιάς στο clark η ορατότητα ξεκινά να μειώνεται μετά από τα 150 sec και στα 200 sec πέφτει κάτω από το επίπεδο ασφαλείας των 10 m. Στη συνέχεια η ορατότητα ελαττώνεται και άλλο μέχρι ουσιαστικά να μηδενιστεί.

Για το ίδιο σενάριο τώρα όπου είναι ενεργό το σύστημα αερισμού, παρουσιάζονται αισθητά καλύτερα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, σε αυτή την περίπτωση η ορατότητα ξεκινά να μειώνεται στα 180 sec μέχρι να φτάσει τα 10 m στα 250 sec. Έπειτα η ορατότητα πέφτει έως τα 4 m χωρίς όμως να μηδενίζεται μέχρι το πέρας της προσομοίωσης.

ii. Ορατότητα στα 75 m της στοάς:

Η συγκεκριμένη συσκευή τοποθετήθηκε στα 75 m της στοάς (σχεδόν στη μέση της) και τα αποτελέσματα και για τα τρία σενάρια φωτιάς φαίνονται στο διάγραμμα της Εικόνας 79.



Εικόνα 79. Διάγραμμα ορατότητας στα 75 m της στοάς

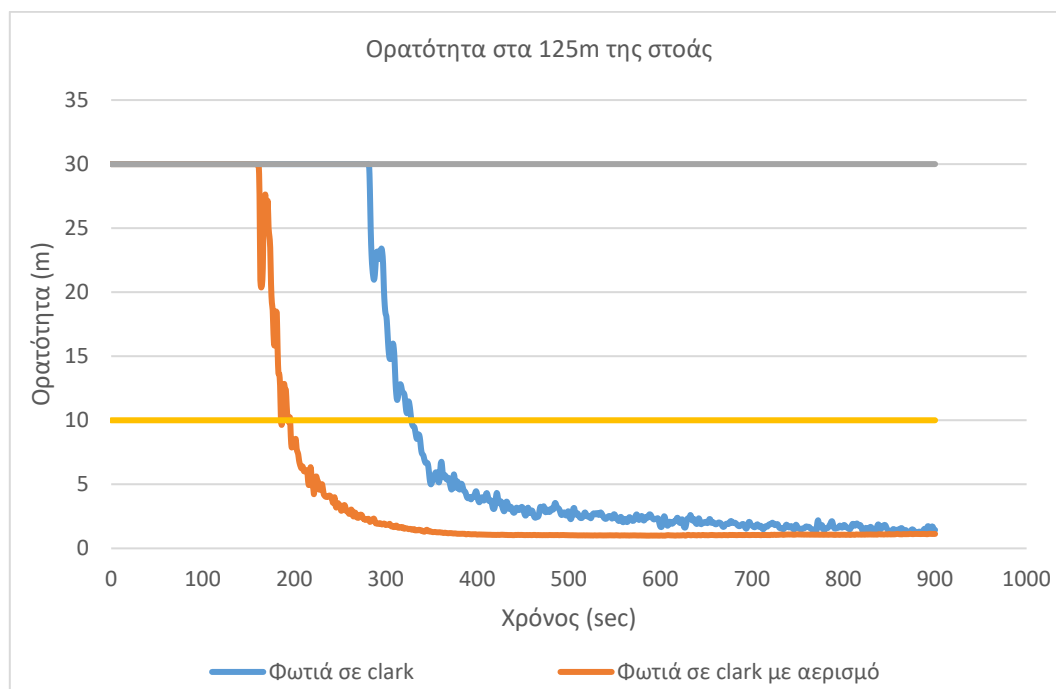
Όπως φαίνεται στο διάγραμμα της Εικόνας 79, στο σενάριο της φωτιάς στα γραφεία του υπόγειου χώρου η ορατότητα είναι άριστη και παραμένει σταθερή στα 30 m στο υπό μελέτη σημείο του υπόγειου χώρου. Αυτό δεν συνιστά έκπληξη καθώς ο καπνός που βρίσκεται εντός της στοάς στο σενάριο αυτό είναι πολύ ψηλότερα από το ανθρώπινο μάτι (1.75 m) και δεν επηρεάζει την ορατότητα.

Στο σενάριο της φωτιάς στο clark η ορατότητα ξεκινά να μειώνεται στα 220 sec και πέφτει σχεδόν ακαριαία κάτω από το επίπεδο ασφαλείας των 10 m. Στη συνέχεια μειώνεται και άλλο μέχρι ουσιαστικά να μηδενιστεί στο τέλος της προσομοίωσης, αποτελώντας έτσι έναν πολύ επικίνδυνο παράγοντα για την ανθρώπινη ασφάλεια κατά την εκκένωση.

Για το ίδιο σενάριο τώρα όπου είναι ενεργό το σύστημα αερισμού, παρουσιάζονται χειρότερα αποτελέσματα σε αυτό το σημείο της στοάς. Συγκεκριμένα, σε αυτή την περίπτωση η ορατότητα ξεκινά να μειώνεται νωρίτερα (120 sec) και πέφτει ακαριαία κάτω από τα 10 m. Με την πάροδο της προσομοίωσης η ορατότητα μειώνεται με γρηγορότερο ρυθμό και μηδενίζεται από τα 200 sec και ύστερα. Σε αυτήν την περίπτωση κάτι τέτοιο δεν γεννά οποιαδήποτε ανησυχία καθώς οι ένοικοι δεν έχουν πρόσβαση στη στοά κατά την εκκένωση.

iii. Ορατότητα στα 125 m της στοάς:

Η συγκεκριμένη συσκευή τοποθετήθηκε στα 125 m της στοάς, προς το τέλος της και κοντά στην επιφάνεια. Τα αποτελέσματα και για τα τρία σενάρια φωτιάς φαίνονται στο διάγραμμα της Εικόνας 80.



Εικόνα 80. Διάγραμμα ορατότητας στα 125 m της στοάς

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα της Εικόνας 80, στο σενάριο της φωτιάς στα γραφεία του υπόγειου χώρου η ορατότητα είναι άριστη και παραμένει σταθερή στα 30 m στο υπό μελέτη σημείο του υπόγειου χώρου.

Στο σενάριο της φωτιάς στο Clark η ορατότητα ξεκινά να μειώνεται στα 310 sec και πέφτει κάτω από το επίπεδο ασφαλείας των 10 m στα 330 sec. Στη συνέχεια μειώνεται και άλλο μέχρι ουσιαστικά το μηδενισμό της στο τέλος της προσομοίωσης, αποτελώντας έτσι έναν εν δυνάμει κίνδυνο για τους ένοικους κατά την εκκένωση.

Για το ίδιο σενάριο τώρα όπου είναι ενεργό το σύστημα αερισμού, η ορατότητα ξεκινά να μειώνεται πολύ νωρίτερα (200 sec) και πέφτει ακαριαία κάτω από τα 10 m. Έπειτα η ορατότητα μειώνεται με γρηγορότερο ρυθμό και ουσιαστικά μηδενίζεται από τα 300 sec και ύστερα. Σε αυτήν την περίπτωση όμως κάτι τέτοιο δεν γεννά οποιαδήποτε ανησυχία καθώς οι ένοικοι εκκενώνουν το χώρο μόνο από το φρέαρ και όχι από τη στοά.

Γ.4.3. Επίδραση φωτιάς στην εκκένωση του υπόγειου χώρου του Τ.Π.Π.Λ.

Στα προηγούμενα κεφάλαια προσομοιάστηκαν τρία σενάρια εκκένωσης του υπόγειου χώρου του Τ.Π.Π.Λ. χωρίς την παρουσία φωτιάς στο STEPS, αλλά και τρία σενάρια φωτιάς μέσω του λογισμικού Pygosim. Επιπρόσθετα σε αυτά, κρίθηκε αναγκαία η ανάδειξη της επίδρασης που θα είχε η εκδήλωση ενός από τα σενάρια φωτιάς που εξετάστηκαν στην εκκένωση του υπό μελέτη υπόγειου χώρου. Για να γίνει αυτό, επιλέχθηκαν δύο σενάρια εκκένωσης, το ένα με την παρουσία φωτιάς και το άλλο χωρίς, τα οποία αφού προσομοιάσαμε στο STEPS, τα συγκρίναμε μεταξύ τους. Η σύγκριση είχε να κάνει με τον απαιτούμενο χρόνο εκκένωσης και τη μέση ταχύτητα κίνησης των ενοίκων του κάθε σεναρίου.

Για την ταχύτητα κίνησης των ενοίκων εισήγαμε στο STEPS μέσω της εντολής *Edit Distributions* μια κατανομή με μέση ταχύτητα τη 1.19 m/s όπως προκύπτει από τον Πίνακα 6

και ελάχιστη και μέγιστη ταχύτητα, τις 1.09 m/s και 1.29 m/s αντίστοιχα (μειωμένη και αυξημένη της μέσης κατά 0.1 m/s).

Τα σενάρια που επιλέχθηκαν ήταν τα πιο επικίνδυνα από τα πιθανά, ώστε να εξεταστεί η ασφάλεια της εκκένωσης κάτω από τις πιο ακραίες συνθήκες.

Συγκεκριμένα και στα δύο σενάρια η έξοδος του φρέατος δεν ήταν διαθέσιμη και οι ένοικοι εκκένωσαν το χώρο μόνο μέσω της στοάς. Η μη διαθεσιμότητα του φρέατος έχει να κάνει με το γεγονός πως το φρέαρ αποτελεί την πιο ασφαλή όδευση διαφυγής σε περίπτωση πυρκαγιάς ενώ εμείς θέλουμε τα σενάρια που εξετάστηκαν να προσομοιάζουν τις πιο δύσκολες συνθήκες για τους ενοίκους. Ο πληθυσμός που επιλέχθηκε ήταν 240 άτομα καθώς είναι ο μέγιστος που μπορεί να εξυπηρετηθεί σε περίπτωση που μία όδευση διαφυγής (φρέαρ) γίνει μη διαθέσιμη. Για κάθε σενάριο πραγματοποιήθηκαν 10 προσομοιώσεις για την εξαγωγή ορθότερων και ασφαλέστερων αποτελεσμάτων.

4° Σενάριο εκκένωσης:

Στο σενάριο αυτό 240 άτομα εκκένωσαν τον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Π.Λ. μόνο μέσω της στοάς, χωρίς την παρουσία φωτιάς. Υπολογίστηκε ο απαιτούμενος χρόνος εκκένωσης καθώς και η μέση ταχύτητα κίνησης των ενοίκων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 23:

Πίνακας 23. Αποτελέσματα 4^{ου} σεναρίου εκκένωσης (N=240)

Προσομοίωση εκκένωσης	Χρόνος εκκένωσης (s)	Μέση ταχύτητα κίνησης (m/s)
1 ^η	226	1,14
2 ^η	221	1,16
3 ^η	221	1,14
4 ^η	224	1,15
5 ^η	223	1,15
6 ^η	222	1,14
7 ^η	221	1,14
8 ^η	223	1,14
9 ^η	226	1,14
10 ^η	220	1,16
Μέσος όρος	223	1,15

5° Σενάριο εκκένωσης με παρουσία φωτιάς 5MW:

Στο σενάριο αυτό 240 άτομα εκκένωσαν τον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Π.Λ. μόνο μέσω της στοάς, με την παρουσία φωτιάς. Το σενάριο φωτιάς που επιλέχθηκε ήταν το 1^ο από αυτά που εξετάστηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο, της φωτιάς σε ηλεκτροκίνητο μηχάνημα εκφόρτωσης (clark) με ισχύ 5MW. Το σενάριο αυτό προτιμήθηκε έναντι της φωτιάς στα γραφεία του υπόγειου χώρου καθώς όπως είδαμε δημιουργεί πολύ πιο επισφαλείς συνθήκες, κυρίως όσον αφορά την εξαιρετικά μειωμένη ορατότητα, κατά την εκκένωση του χώρου. Επιπλέον για να συμπεριληφθεί και το όποιο ενδεχόμενο βλάβης στα εγκατεστημένα συστήματα ασφαλείας, στο σενάριο αυτό οι ένοικοι ξεκίνησαν την εκκένωση του χώρου με μια καθυστέρηση 190 sec λόγω απροσδιόριστης βλάβης στο σύστημα πυρανίχνευσης. Το χρονικό αυτό διάστημα δεν είναι τυχαίο καθώς παρατηρήσαμε πως μετά τα 190 sec η ορατότητα πέφτει αισθητά στο ύψος των 1,75 m σε όλο τον υπόγειο χώρο, επηρεάζοντας την ταχύτητα κίνησης των ενοίκων και την όλη εκκένωση συνολικά. Για να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση της εκκένωσης στο STEPS με την παρουσία πυρκαγιάς, ακολουθήθηκαν τα εξής βήματα:

- Μέσω της εντολής *Smoke* → *FDS* → *Import* του STEPS, εισήγαμε το αρχείο με τη φωτιά στο clark από το Pyrosim (μορφής .psm)
- Μέσω της εντολής *Smoke* → *Sample Planes* του STEPS, επιλέξαμε ως ενεργή τη δυσδιάστατη επιφάνεια του *SOOT EXTINCTION COEFFICIENT Z=1,75 m*. Την επιφάνεια

αυτή την είχαμε ορίσει στο ύψος των 1,75 m στο Pyrosim και ουσιαστικά επηρεάζει την κίνηση των ενοίκων συναρτήσει της ανθρώπινης ορατότητας κατά την εκκένωση στο STEPS.

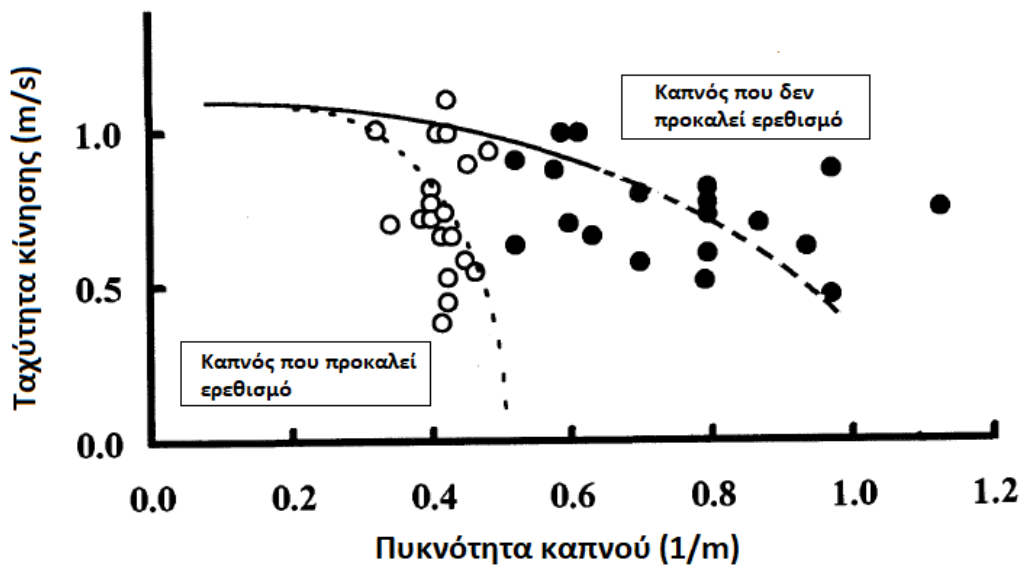
- Μέσω της εντολής *Edit People Types* → *Walking Speeds* → *Use Smoke Data* → *Jin and Yamada (non-irritant)* το λογισμικό του STEPS εισάγει τον παράγοντα της μειωμένης ορατότητας, λόγω της παρουσίας καπνού που δεν προκαλεί ερεθισμό, στον υπολογισμό της ταχύτητας κίνησης των ενοίκων.
- Μέσω της εντολής *People Events* → *Delay* του STEPS, ορίσαμε ως καθυστέρηση στην έναρξη κίνησης των ενοίκων τα 190 sec.

Μετά την περάτωση των παραπάνω ενεργειών πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση της εκκένωσης, τα αποτελέσματα της οποία ήταν τα εξής:

Πίνακας 24. Αποτελέσματα 5^{ου} σεναρίου εκκένωσης με παρουσία φωτιάς 5MW (N=240)

Προσομοίωση εκκένωσης	Συνολικός χρόνος εκκένωσης (s)	Χρονικό διάστημα κίνησης των ενοίκων (s)	Μέση ταχύτητα κίνησης (m/s)
1 ^η	492	302	0,85
2 ^η	453	263	0,97
3 ^η	493	303	0,85
4 ^η	459	269	0,94
5 ^η	493	303	0,84
6 ^η	483	293	0,87
7 ^η	467	277	0,92
8 ^η	490	300	0,86
9 ^η	489	299	0,86
10 ^η	487	297	0,87
Μέσος όρος		291	0,88

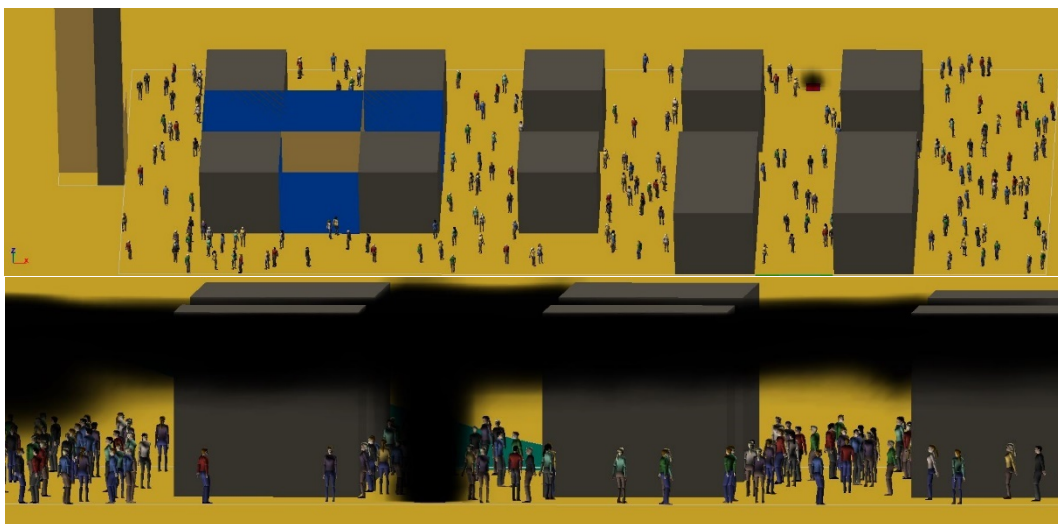
Συγκρίνοντας το χρονικό διάστημα κίνησης των ενοίκων του 4^{ου} και 5^{ου} σεναρίου εκκένωσης, παρατηρούμε πως στην εκκένωση με παρουσία φωτιάς, οι ένοικοι κινήθηκαν στο χώρο του υπογείου 68 sec περισσότερο από ότι στο σενάριο χωρίς φωτιά. Αυτή η αύξηση στον χρόνο εκκένωσης οφείλεται στην μείωση της μέσης ταχύτητας κίνησης των ενοίκων, λόγω της μειωμένης ορατότητας από τον παραγόμενο καπνό. Συγκεκριμένα η μέση ταχύτητα κίνησης μειώθηκε από 1,15 m/s σε 0,88 m/s (23,5%) στο 5^ο σενάριο εκκένωσης λόγω της ύπαρξης πυκνού καπνού στο χώρο.



Εικόνα 81. Διάγραμμα μεταβολής ταχύτητας κίνησης συναρτήσει της πυκνότητας καπνού [Πηγή: (Jin, 1997)]

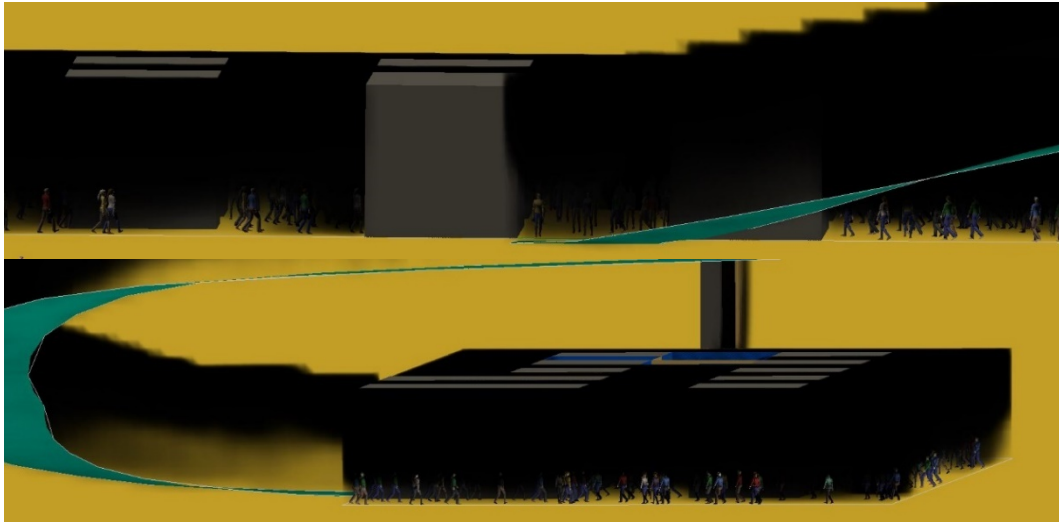
Το διάγραμμα της Εικόνας 81 παρουσιάζει τη μεταβολή της ταχύτητας κίνησης σε ένα περιβάλλον όπου υπάρχει εκδήλωση φωτιάς, συναρτήσει της πυκνότητας καπνού που προκαλεί αλλά και δεν προκαλεί ερεθισμό. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα στην περίπτωση που η φύση του καπνού είναι τέτοια ώστε να μην προκαλεί τυχόν ερεθισμό, η ταχύτητα κίνησης μειώνεται σταδιακά όσο αυξάνεται η πυκνότητα του καπνού. Για καπνό τώρα που προκαλεί ερεθισμό βλέπουμε πως η ταχύτητα κίνησης μειώνεται με πολύ γρήγορο ρυθμό μετά από μια συγκεκριμένη πυκνότητα καπνού.

Στην Εικόνα 82 παρουσιάζονται ορισμένα στιγμιότυπα της εκκένωσης προτού οι ένοικοι ξεκινήσουν να κινούνται προς τη στοά.



Εικόνα 82. Στιγμιότυπα του υπογείου χώρου πριν την έναρξη της εκκένωσης

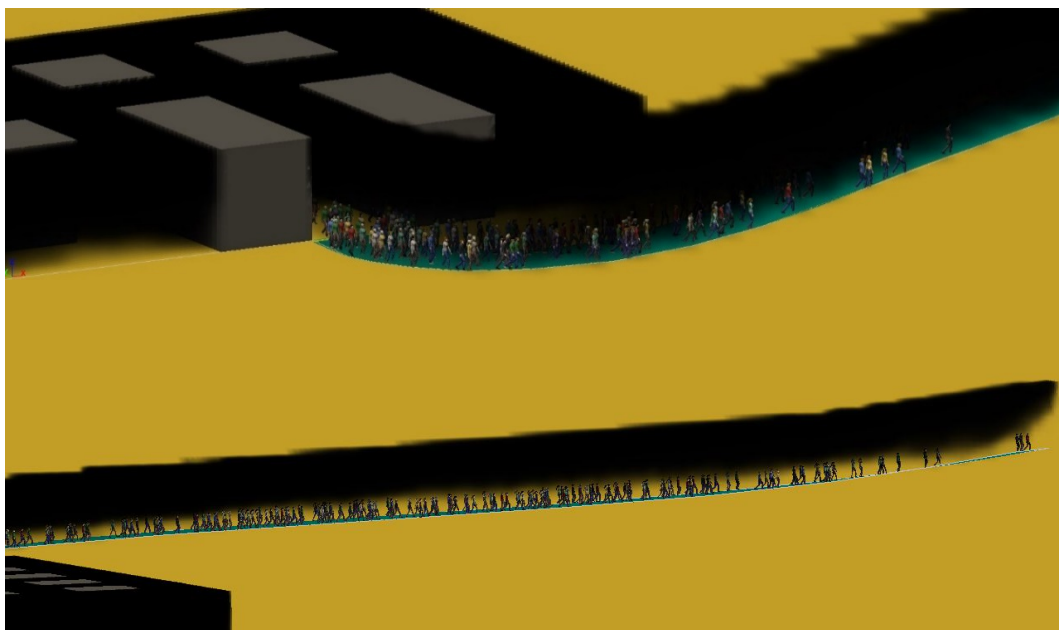
Στην Εικόνα 83 φαίνονται δύο στιγμιότυπα στα 190 sec της προσομοίωσης, δηλαδή τη στιγμή που οι ένοικοι ξεκινούν να εκκενώνουν το χώρο.



Εικόνα 83. Στιγμιότυπα της στιγμής έναρξης της εκκένωσης (190 sec)

Όπως φαίνεται στις εικόνες αυτές ο καπνός έχει κατέβει μέχρι το ύψος των 1,75 m μειώνοντας την ορατότητα των ενοίκων και επηρεάζοντας τη ταχύτητα κίνησης τους στην αποθήκη του υπόγειου χώρου.

Στην Εικόνα 84 παρουσιάζεται η κίνηση των ενοίκων στη στοά του υπόγειου χώρου.



Εικόνα 84. Στιγμιότυπα κίνησης των ενοίκων στη στοά του υπόγειου χώρου

Όπως μπορούμε να διακρίνουμε στα παραπάνω στιγμιότυπα, ο καπνός στη στοά είναι πάνω από τους ενοίκους, χωρίς να επηρεάζει την ορατότητα τους και τη ταχύτητα κίνησης τους στη στοά.

Δ. Πείραμα εκκένωσης στο Λαύριο

Κατά τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της διπλωματικής εργασίας, πραγματοποιήσαμε ένα πείραμα εκκένωσης στον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Π.Α.. Το εγχείρημα αυτό υλοποιήθηκε με σκοπό να μελετήσουμε την εκκένωση του υπόγειου χώρου υπό πραγματικές συνθήκες και να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα αυτού του πειράματος μεγάλης κλίμακας με αυτά της προσομοιωμένης (μέσω λογισμικών) εκκένωσης του ίδιου χώρου. Κύριος στόχος του πειράματος ήταν ο υπολογισμός του χρόνου εκκένωσης του χώρου για τρία επιμέρους σενάρια, καθώς και ο υπολογισμός της ταχύτητας κίνησης των συμμετεχόντων.

Δ.1. Σχεδιασμός πειράματος και καθορισμός παραμέτρων

Προτού πραγματοποιηθεί το πείραμα αυτό, λάβαμε σοβαρά υπόψη τα δομικά και τεχνικά χαρακτηριστικά του υπόγειου χώρου του Τ.Π.Π.Α. κρίνοντας πως είναι ασφαλές για τη περάτωση μιας τέτοιας άσκησης εκκένωσης. Παρόλα αυτά, το γεγονός ότι ο συγκεκριμένος χώρος βρίσκεται 30 m κάτω από την επιφάνεια σε συνδυασμό με το ότι οι συμμετέχοντες δεν είχαν κάποια παρόμοια εμπειρία από άσκηση εκκένωσης υπόγειου χώρου, μπορούσε εύκολα να δημιουργήσει μια ψυχολογία αμφιβολίας και ανησυχίας στους συμμετέχοντες. Για να αποφευχθεί κάτι τέτοιο, το πείραμα αυτό σχεδιάστηκε προσεκτικά και διεξοδικά ώστε να αποφευχθούν οποιαδήποτε προβλήματα κατά τη διάρκεια της εκκένωσης με γνώμονα πάντα την ανθρώπινη ασφάλεια.

Πιο συγκεκριμένα, με την άφιξη των συμμετεχόντων στο Λαύριο πραγματοποιήθηκε ενημέρωση για τη διαδικασία της εκκένωσης και απαγορεύτηκε η συμμετοχή στο πείραμα όσων ένιωθαν την οποιαδήποτε ανασφάλεια κατά την επίσκεψη τους σε υπόγειους χώρους. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε ξενάγηση στον υπόγειο χώρο, με σκοπό την εξοικείωση των συμμετεχόντων με το χώρο, και επισήμανση των οδεύσεων και εξόδων διαφυγής που θα ήταν διαθέσιμες κατά τη διάρκεια της εκκένωσης. Επιπλέον, για την ασφαλέστερη διεξαγωγή του πειράματος ορίστηκαν αρκετοί υπεύθυνοι ασφαλείας οι οποίοι είχαν περισσότερη εμπειρία με ασκήσεις εκκένωσης και μεγαλύτερη εξοικείωση με το συγκεκριμένο χώρο. Οι υπεύθυνοι αυτοί φορούσαν διακριτικά για να είναι εύκολα αναγνωρίσιμοι από τους συμμετέχοντες και ήταν οι τελευταίοι που εκκένωναν το χώρο αφού είχαν βεβαιωθεί ότι όλοι οι συμμετέχοντες είχαν οδηγηθεί στην επιφάνεια με ασφάλεια.

Για την καταγραφή του χρόνου εκκένωσης, ο κάθε συμμετέχων είχε στην κατοχή του ένα χρονόμετρο το οποίο ενεργοποιούσε με το ηχητικό σήμα έναρξης της εκκένωσης και απενεργοποιούσε τη στιγμή που έβγαινε στην επιφάνεια. Για την καλύτερη παρακολούθηση της άσκησης, την εξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων και τον υπολογισμό της ταχύτητας κίνησης των συμμετεχόντων τοποθετήθηκαν επτά κάμερες, πέντε εκ των οποίων βρισκότουσαν εντός του υπόγειου χώρου και δύο τοποθετημένες στις τελικές εξόδους στην επιφάνεια (Εικόνα 87).

Για να υπολογίσουμε την ταχύτητα κίνησης των συμμετεχόντων στην αποθήκη του υπόγειου, τοποθετήσαμε αυτοκόλλητη ταινία σήμανσης ανά 5 m καθ' όλο το μήκος και πλάτος του δαπέδου στο χώρο (Εικόνα 86). Με αυτό το τρόπο μπορέσαμε, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 85, μέσω των βίντεο από τις κάμερες να υπολογίσουμε την απόσταση που διένυσε το κάθε άτομο στο χώρο της αποθήκης συναρτήσει του χρόνου, υπολογίζοντας έτσι την ταχύτητα κίνησης για τον κάθε συμμετέχοντα.

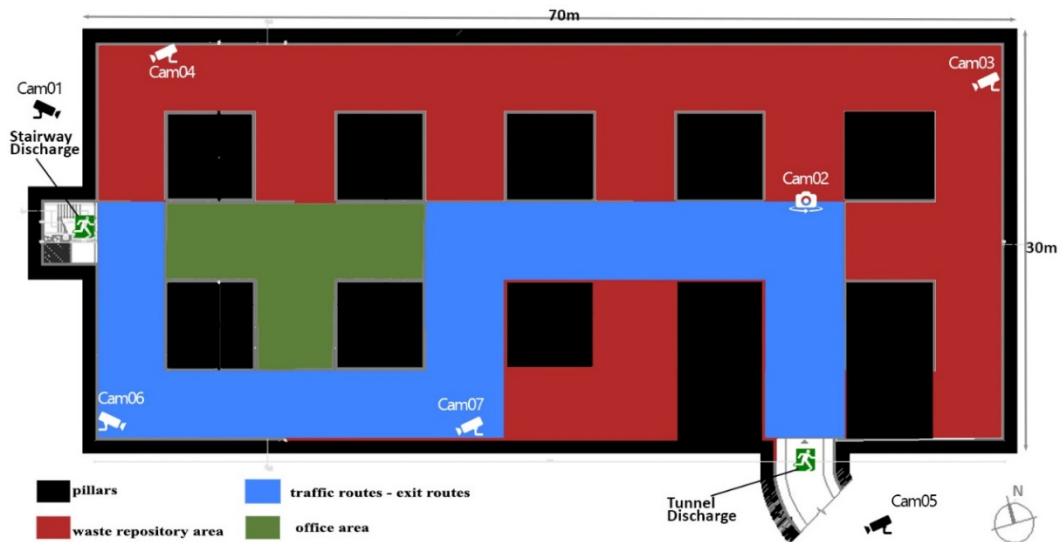


Εικόνα 85. Στιγμιότυπο που παρουσιάζει την κίνηση των συμμετεχόντων καταγεγραμμένη από όλες τις εγκατεστημένες κάμερες

Για τον υπολογισμό της ταχύτητας κίνησης στις σκάλες του φρέατος και στη στοά, ακολουθήθηκε διαφορετική μεθοδολογία. Συγκεκριμένα μετρήσαμε το μήκος της διαδρομής που είχαν να διανύσουν οι συμμετέχοντες στη στοά και κατά τον άξονα κίνησής τους στις σκάλες του φρέατος, 175 m και 85 m αντίστοιχα, και υπολογίζοντας το χρόνο που έκαναν να διανύσουν αυτές τις οδούς προέκυψε η ταχύτητα κίνησης για κάθε συμμετέχοντα.



Εικόνα 86. Αυτοκόλλητες ταινίες σήμανσης στο δάπεδο του υπόγειου χώρου του Τ.Π.Π.Λ.



Εικόνα 87. Θέση καμερών στον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Π.Α.

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί πως η ηλικία των ανθρώπων που συμμετείχαν στο πείραμα κυμάνθηκε από 14-68 ετών.

Τέλος, μετά την ολοκλήρωση του πειράματος δόθηκε στους συμμετέχοντες ένα ερωτηματολόγιο προς συμπλήρωση.

Δ.2. 1^η Δοκιμή εκκένωσης

Στο πλαίσιο της 1^{ης} δοκιμής και αφού τελείωσε η ξενάγηση στο χώρο, ζητήθηκε από τους συμμετέχοντες να διασκορπιστούν τυχαία στον υπόγειο χώρο μη έχοντας πρόσβαση στο χώρο των γραφείων. Στη συνέχεια και με το σήμα έναρξης της δοκιμής, οι συμμετέχοντες κλήθηκαν να εκκενώσουν το χώρο επιλέγοντας την πλησιέστερη όδευση διαφυγής εκ των δύο διαθέσιμων (φρέαρ και στοά). Στη δοκιμή αυτή συμμετείχαν 40 άτομα και οι χρόνοι εκκένωσής τους (κατά αύξουσα σειρά), οι ηλικίες και οι ταχύτητες κίνησης τους παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 25. Αποτελέσματα 1^{ης} δοκιμής εκκένωσης (Εξοδος από στοά)

ΕΞΟΔΟΣ ΑΠΟ ΣΤΟΑ				
A/A	Ηλικία	Χρόνος εκκένωσης (min:sec)	Ταχύτητα κίνησης στην αποθήκη (m/s)	Ταχύτητα κίνησης στη στοά (m/s)
ID1	32	2:22	1,42	1,30
ID2	20	2:29	1,25	1,37
ID3	30	2:35	1,00	1,22
ID4	24	2:40	1,36	1,22
ID5	21	2:42	0,63	1,22
ID6	24	2:42	1,70	1,23
ID7	35	2:44	1,10	1,14
ID8	35	2:45	0,83	1,13
ID9	22	2:47	1,25	1,22
ID10	21	2:51	1,13	1,19
ID11	24	2:53	1,00	1,17
ID12	26	2:57	1,38	1,13
ID13	47	3:01	1,25	1,13
ID14	15	3:03	1,25	1,11
ID15	15	3:13	1,25	1,05
ID16	15	3:13	1,36	1,05

ID17	68	3:20	1,07	1,02
ID18	63	3:22	1,00	0,95
ID19	66	3:25	1,00	1,01

Πίνακας 26. Αποτελέσματα 1^{ης} δοκιμής εκκένωσης (Έξοδος από φρέαρ)

ΕΞΟΔΟΣ ΑΠΟ ΦΡΕΑΡ				
A/A	Ηλικία	Χρόνος εκκένωσης (min:sec)	Ταχύτητα κίνησης στην αποθήκη (m/s)	Ταχύτητα κίνησης στο φρέαρ (m/s)
ID1	24	2:50	1,25	0,56
ID2	27	2:52	0,83	0,59
ID3	60	2:53	1,00	0,53
ID4	14	2:54	1,25	0,55
ID5	15	2:54	1,25	0,55
ID6	24	3:05	0,83	0,54
ID7	28	3:08	0,83	0,54
ID8	15	3:10	1,00	0,54
ID9	25	3:22	1,25	0,49
ID10	24	3:29	1,00	0,48
ID11	26	3:30	1,00	0,49
ID12	39	3:31	0,92	0,48
ID13	15	3:32	1,25	0,49
ID14	15	3:32	1,25	0,49
ID15	19	3:34	1,43	0,50
ID16	15	3:35	1,13	0,49
ID17	15	3:35	1,25	0,49
ID18	25	3:38	1,13	0,44
ID19	25	3:39	1,25	0,49
ID20	21	3:39	1,13	0,50
ID21	26	3:40	1,19	0,49

Παρατηρώντας τους δύο παραπάνω πίνακες, συμπεραίνουμε ότι 19 άτομα βγήκαν από τη στοά ενώ 21 εξήλθαν από το φρέαρ. Επιπλέον, παρατηρούμε ότι ο απαιτούμενος χρόνος εκκένωσης του χώρου ήταν 3' 40'' ή αλλιώς 220 sec.

Δ.3. 2^η Δοκιμή εκκένωσης

Κατά την 2^η δοκιμή εκκένωσης, η οποία διαδέχτηκε την 1^η, οι συμμετέχοντες συγκεντρώθηκαν στο χώρο των γραφείων και κλήθηκαν να εκκενώσουν τον υπόγειο χώρο μόνο από την έξοδο της στοάς με τη παρουσία πυκνού καπνού που προσομοίαζε συνθήκες πυρκαγιάς. Τον καπνό αυτό παρήγαγε μηχανήμα μέσω της καύσης παραφινέλαιου, η διάταξη του οποίου καθώς και ο παραγόμενος καπνός φαίνονται στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 88. Διάταξη μηχανήματος παραγωγής καπνού



Εικόνα 89. Παρουσία καπνού στο χώρο

Στη δοκιμή αυτή συμμετείχαν 42 άτομα και οι χρόνοι εκκένωσής τους (κατά αύξουσα σειρά) καθώς και οι ηλικίες τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 27 .

Πίνακας 27. Αποτελέσματα 2^{ης} δοκιμής εκκένωσης (Έξοδος από στοά με καπνό)

A/A	Ηλικία	Χρόνος εκκένωσης (min:sec)
ID1	32	3:09
ID2	15	3:09
ID3	14	3:12
ID4	19	3:14
ID5	25	3:14
ID6	24	3:17
ID7	20	3:19
ID8	24	3:20
ID9	27	3:20
ID10	26	3:31
ID11	21	3:31
ID12	21	3:33
ID13	21	3:39
ID14	28	3:41
ID15	15	3:48
ID16	15	3:49
ID17	15	3:51
ID18	24	3:53
ID19	26	3:55
ID20	15	3:55
ID21	24	4:00
ID22	68	4:00
ID23	39	4:10
ID24	25	4:10
ID25	42	4:12
ID26	65	4:12
ID27	20	4:12
ID28	47	4:14
ID29	15	4:14
ID30	15	4:15
ID31	40	4:16
ID32	15	4:16
ID33	30	4:17

ID34	63	4:17
ID35	35	4:19
ID36	25	4:29
ID37	22	4:31
ID38	25	4:34
ID39	25	4:35
ID40	25	4:36
ID41	25	4:37
ID42	24	4:40

Παρατηρούμε ότι ο απαιτούμενος χρόνος εκκένωσης του χώρου ήταν 4' 40'' ή αλλιώς 280 sec.

Δ.4. 3^η Δοκιμή εκκένωσης

Για την 3^η δοκιμή εκκένωσης η μηχανή καπνού τοποθετήθηκε στο χώρο των γραφείων. Όσα άτομα συμμετείχαν στην άσκηση αυτή πέρασαν πιασμένοι χέρι-χέρι, σε μορφή αλυσίδας, διαμέσου των ασφυκτικά γεμάτων με καπνό γραφείων. Στη συνέχεια εκκένωσαν τον υπόγειο χώρο από το φρέαρ.



Εικόνα 90. Άποψη της εκκένωσης με παρουσία καπνού στο χώρο

Στη δοκιμή αυτή συμμετείχαν 23 άτομα και οι χρόνοι εκκένωσής τους (κατά αύξουσα σειρά) καθώς και οι ηλικίες τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 28.

Πίνακας 28. Αποτελέσματα 3^{ης} δοκιμής εκκένωσης (Εξοδος από φρέαρ με καπνό)

A/A	Ηλικία	Χρόνος εκκένωσης (min:sec)
ID1	32	2:21
ID2	39	2:45
ID3	30	2:57
ID4	35	2:58
ID5	24	3:03

ID6	42	3:09
ID7	25	3:10
ID8	22	3:10
ID9	20	3:12
ID10	25	3:22
ID11	21	3:26
ID12	21	3:27
ID13	25	3:33
ID14	26	3:35
ID15	21	3:39
ID16	26	3:40
ID17	24	3:43
ID18	27	3:48
ID19	28	3:48
ID20	24	3:50
ID21	25	3:55
ID22	24	3:56
ID23	26	4:10

Παρατηρούμε ότι ο υπόγειος χώρος εκκενώθηκε πλήρως σε 4' 10'' ή αλλιώς 250 sec.

Δ.5. Ανάλυση αποτελεσμάτων πειράματος

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια συνοπτική παρουσίαση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων που εξήγαμε από τη διεκπεραίωση των δοκιμών εκκένωσης στον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Π.Λ.. Αρχικά καταγράψαμε τους τελικούς χρόνους εκκένωσης και για τις τρεις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, οι οποίοι φαίνονται στον Πίνακα 29:

Πίνακας 29. Χρόνοι εκκένωσης για τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν

Δοκιμή Εκκένωσης	Χρόνος Εκκένωσης (s)
1 ^η	220
2 ^η	280
3 ^η	250

Στη συνέχεια υπολογίσαμε τις ταχύτητες κίνησης των συμμετεχόντων στην αποθήκη, στη στοά και στις σκάλες του φρέατος. Στον Πίνακα 30 παρουσιάζεται η μέση και η μέγιστη ταχύτητα κίνησης στα επιμέρους στοιχεία των οδεύσεων διαφυγής του υπόγειου χώρου στο Τ.Π.Π.Λ. που υπολογίσαμε από τις δοκιμές που εκπονήθηκαν, σε σύγκριση με τις μέγιστες ανεμπόδιστες ταχύτητες κίνησης που προκύπτουν από τους κανονισμούς του NFPA.

Πίνακας 30. Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών ταχυτήτων κίνησης

Στοιχείο οδού διαφυγής στον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Π.Λ.	Πειραματική μέση ταχύτητα κίνησης (m/s)	Πειραματική μέγιστη ταχύτητα κίνησης (m/s)	Μέγιστη ανεμπόδιση ταχύτητα κίνησης NFPA (m/s)
Επιμήκης στοά	1,15	1,37	1,19
Οριζόντιο επίπεδο αποθήκης	1,14	1,70	1,19
Σκάλες φρέατος	0,51	0,59	0,85

Συγκρίνοντας τις πειραματικές ταχύτητες κίνησης με αυτές που ορίζουν οι κανονισμοί του NFPA, αντιλαμβανόμαστε πως δεν αποκλίνουν σημαντικά μεταξύ τους. Παρόλα αυτά μας δίνεται η δυνατότητα να κάνουμε ορισμένες παρατηρήσεις.

Συγκεκριμένα, την ώρα που διαπιστώνουμε ότι η μέση πειραματική ταχύτητα κίνησης για την επιμήκη στοά και την αποθήκη (1,15 m/s και 1,14 m/s) σχεδόν ταυτίζονται με τις αντίστοιχες μέγιστες ταχύτητες του NFPA (1,19 m/s), παρατηρούμε μια σχετική απόκλιση στις αντίστοιχες μέγιστες πειραματικές ταχύτητες κίνησης (1,37 m/s και 1,70 m/s). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά τη διεξαγωγή των δοκιμών εκκένωσης του υπόγειου χώρου στο Τ.Π.Π.Λ., ορισμένοι συμμετέχοντες κατευθύνθηκαν με γρήγορο βηματισμό προς τις εξόδους διαφυγής αγνοώντας τις οδηγίες των υπευθύνων.

Επιπλέον, στον Πίνακα 30 παρατηρήθηκε μια σχετική απόκλιση μεταξύ της πειραματικής μέσης και μέγιστης ταχύτητας κίνησης στις σκάλες του φρέατος (0,51 m/s και 0,59 m/s αντίστοιχα) και της μέγιστης ανεμπόδιστης ταχύτητας κίνησης του NFPA (0,85 m/s). Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως στην περίπτωση του υπόγειου χώρου που μελετάμε το φρέαρ αποτελείται από σκάλες 9 ορόφων, γεγονός που δυσχέρανε και επιβράδυνε τις προσπάθειες των συμμετεχόντων, ενώ η ταχύτητα που ορίζουν οι κανονισμοί του NFPA προέκυψε με βάση μόνο των διαστάσεων των σκαλοπατιών και όχι της υψομετρικής διαφοράς που καλύπτουν οι σκάλες.

Όπως αναφέραμε σε προηγούμενο κεφάλαιο, μετά το πέρας των τριών δοκιμών εκκένωσης δόθηκε στους συμμετέχοντες ένα ερωτηματολόγιο προς συμπλήρωση. Το ερωτηματολόγιο αυτό είχε επτά ερωτήσεις και παρουσιάζεται στην Εικόνα 91:

ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ

Παρακαλώ σημειώστε με ένα X τα στοιχεία που σας αφορούν:

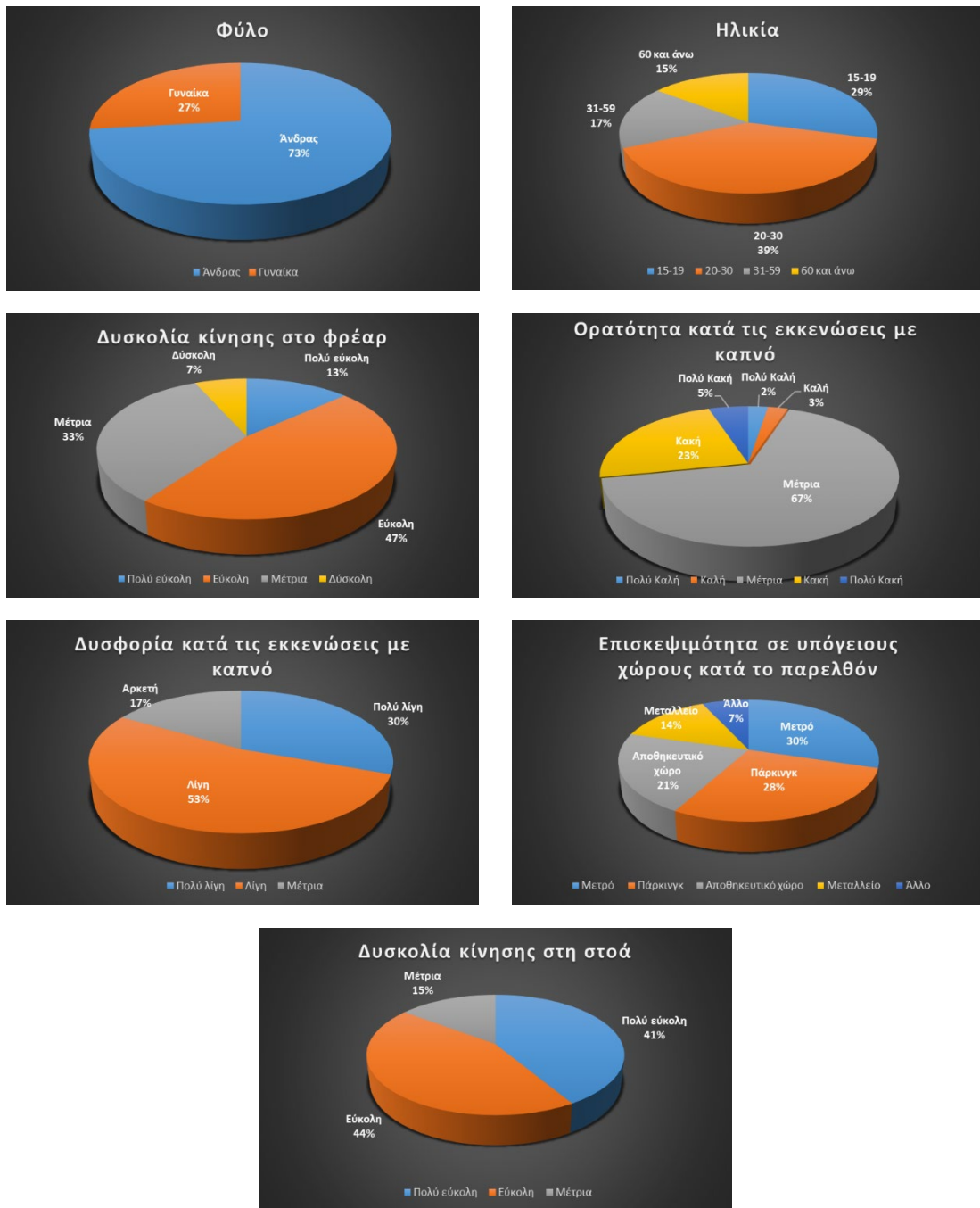
- Φύλο: Άνδρας Γυναίκα
- Ηλικία:
- Έχετε ξαναβρεθεί σε υπόγειο χώρο; Αν ναι, επιλέξτε ποιους από τους παρακάτω.
Μετρό Πάρκινγκ Αποθηκευτικό χώρο Μεταλλείο Άλλο
- Ποια έξοδο χρησιμοποιήσατε κατά την 1^η εκκένωση;
Σήραγγα Φρέαρ
- Περιγράψτε το βαθμό δυσκολίας που αντιμετωπίσατε κατά την έξοδο σας από την σήραγγα (αν χρησιμοποιήσατε έστω και μια φορά αυτή την έξοδο διαφυγής).
Πολύ εύκολη Εύκολη Μέτρια Δύσκολη Πολύ δύσκολη
- Περιγράψτε το βαθμό δυσκολίας που αντιμετωπίσατε κατά την έξοδο σας από το φρέαρ (αν χρησιμοποιήσατε έστω και μια φορά αυτή την έξοδο διαφυγής).
Πολύ εύκολη Εύκολη Μέτρια Δύσκολη Πολύ δύσκολη
- Περιγράψτε την ορατότητα σας κατά την διεξαγωγή της 2^{ης} και 3^{ης} εκκένωσης.
Πολύ Καλή Καλή Μέτρια Κακή Πολύ Κακή

8. Περιγράψτε την δυσφορία που νιώσατε κατά την διεξαγωγή της 2^{ης} και 3^{ης} εκκένωσης, λόγω της ύπαρξης καπνού.
Πολύ Λίγη Λίγη Μέτρια Έντονη Πολύ Έντονη

9. Προσθέστε τυχόν επιπλέον παρατηρήσεις:

Εικόνα 91. Ερωτηματολόγιο που μοιράστηκε στους συμμετέχοντες του πειράματος προς συμπλήρωση

Οι απαντήσεις των συμμετεχόντων στο ερωτηματολόγιο αυτό παρουσιάζονται στα γραφήματα της Εικόνας 92.



Εικόνα 92. Κατανομή των απαντήσεων των συμμετεχόντων στις ερωτήσεις του δοθέντος ερωτηματολογίου

Από τις απαντήσεις που έδωσαν οι συμμετέχοντες στα ερωτηματολόγια που τους δόθηκαν (Εικόνα 91), μπορούμε να εξάγουμε ορισμένα συμπεράσματα.

Αρχικά παρατηρούμε πως στις δοκιμές εκκένωσης συμμετείχαν άτομα από διαφορετικές ηλικιακές ομάδες και ανεξαρτήτου φύλου, δίνοντας μας τη δυνατότητα εξαγωγής ασφαλέστερων και εγκυρότερων τελικών αποτελεσμάτων. Επιπλέον, οι συμμετέχοντες ήταν εξοικειωμένοι με τους υπόγειους χώρους, καθώς είχαν επισκεφθεί στο παρελθόν μια πληθώρα τέτοιων όπως σταθμοί του μετρό ή υπόγεια πάρκινγκ, κάτι που τους βοήθησε να αισθανθούν πιο «άνετα» στο συγκεκριμένο υπόγειο χώρο. Για την κίνηση στις οδεύσεις διαφυγής του υπόγειου χώρου, η πλειοψηφία των συμμετεχόντων τη χαρακτήρισε ως

αρκετά εύκολη στη στοά ενώ ένα σημαντικό ποσοστό δυσκολεύτηκε στην ανάβαση του φρέατος.

Όσον αφορά τώρα τις δύο δοκιμές σε συνθήκες φωτιάς, μέσω της παρουσίας τεχνητού καπνού, οι περισσότεροι συμμετέχοντες χαρακτήρισαν την ορατότητα ως μέτρια ενώ αρκετοί ως κακή. Τέλος, οι πιο πολλοί συμμετέχοντες ένωσαν λίγη έως αρκετή δυσφορία λόγω της παρουσίας καπνού.

Ε. Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρατεθούν περιληπτικά όλα εκείνα τα αποτελέσματα, στοιχεία και συμπεράσματα που εξήχθησαν κατά την εκπόνηση της διπλωματικής αυτής εργασίας. Αντικείμενο έρευνας και μελέτης σε αυτήν την εργασία αποτέλεσε ο υπόγειος χώρος του Τ.Π.Π.Α. που προορίζεται για την αποθήκευση επικίνδυνων αποβλήτων. Όπως είναι φυσικό, κύριο μέλημα μας ήταν ο τομέας της ασφάλειας και ειδικότερα η διαδικασία εκκένωσης του υπόγειου χώρου στην περίπτωση που προκύψει μια έκτακτη ανάγκη. Μια από τις βασικές και πιο επικίνδυνες αιτίες πρόκλησης έκτακτης ανάγκης είναι η πυρκαγιά. Για το λόγο αυτό προσομοιάσαμε δύο σενάρια φωτιάς που θεωρήθηκαν αρκετά πιθανά και επικίνδυνα για τον υπόγειο χώρο που εξετάσαμε.

Για το σενάριο όπου ξεσπά φωτιά στα γραφεία του υπόγειου χώρου, η εκκένωση του χώρου χαρακτηρίζεται ως ασφαλής στην περίπτωση που δεν υπάρχουν ένοικοι στα γραφεία. Σε αντίθετη περίπτωση, αν δεν απομακρυνθούν γρήγορα (εντός 100 sec) από το χώρο των γραφείων μπορεί να διατρέξουν σοβαρό κίνδυνο λόγω των πολύ υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται εκεί. Για το σενάριο όπου ένα ηλεκτροκίνητο μηχάνημα εκφόρτωσης πιάνει φωτιά στην αποθήκη του χώρου η διαδικασία της εκκένωσης κρίνεται επισφαλής λόγω της εξαιρετικά μειωμένης ορατότητας στη στοά και την αποθήκη του υπόγειου χώρου. Για να αντιμετωπιστεί ο επικίνδυνος αυτός παράγοντας, κατευθύναμε μέσω του τεχνητού συστήματος αερισμού, που είναι εγκατεστημένος στο χώρο, τον καπνό προς τη στοά και οδηγήσαμε τους ενοίκους του χώρου στην επιφάνεια μόνο μέσω του φρέατος. Με αυτόν τον τρόπο διασφαλίσαμε πως εάν οι ένοικοι κατευθυνθούν εντός τριών λεπτών προς το φρέαρ, η ορατότητα τους θα είναι πολύ καλή και δεν θα διατρέξουν κάποιο κίνδυνο. Συμπερασματικά μπορεί να ειπωθεί πως στα σενάρια φωτιάς που εξετάστηκαν, ο καπνός δεν εισέρχεται στο κλιμακοστάσιο του φρέατος, από όπου εκκενώνουν το χώρο οι ένοικοι, και συνεπώς η ορατότητα στο φρέαρ είναι άριστη σε όλες τις περιπτώσεις ενώ δεν συναντώνται υψηλές συγκεντρώσεις μονοξειδίου του άνθρακα ή υψηλές θερμοκρασίες. Συνεπώς το φρέαρ αποτελεί την πιο ασφαλή έξοδο διαφυγής και πρέπει να προτιμάται έναντι της στοάς για κάθε περίπτωση έκτακτης ανάγκης.

Σημαντικά συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν και από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των προσομοιώσεων εκκένωσης που πραγματοποιήθηκαν με και χωρίς την παρουσία φωτιάς, σχετικά με την επίδραση της πυρκαγιάς στην εκκένωση του υπόγειου χώρου που μελετάμε. Πιο συγκεκριμένα στον Πίνακα 31 παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα των δύο αυτών εκκενώσεων.

Πίνακας 31. Επίδραση της φωτιάς στην εκκένωση του υπόγειου χώρου του Τ.Π.Π.Λ.

Τύπος εκκένωσης	Χρονικό διάστημα κίνησης των ενοίκων (s)	Μέση ταχύτητα κίνησης (m/s)	Ποσοστιαία μεταβολή του χρόνου εκκένωσης	Ποσοστιαία μεταβολή της μέσης ταχύτητας κίνησης
Εκκένωση χωρίς την παρουσία φωτιάς	223	1,15	30,5%	23,5%
Εκκένωση με παρουσία φωτιάς ισχύος 5MW	291	0,88		

Παρατηρούμε πως στην εκκένωση με παρουσία φωτιάς ισχύος 5MW, η μέση ταχύτητα κίνησης των ενοίκων εμφανίζεται μειωμένη κατά 23,5% σχετικά με αυτήν στην εκκένωση χωρίς φωτιά. Η μείωση αυτή οφείλεται στην μειωμένη ορατότητα των ενοίκων και επηρεάζει και τον συνολικό χρόνο εκκένωσης, αυξάνοντας τον κατά 30,5%.

Επιπλέον, όπως φαίνεται και στα στιγμιότυπα της εκκένωσης με παρουσία φωτιάς, ο καπνός επηρεάζει τη ταχύτητα κίνησης των ενοίκων μόνο στο χώρο της αποθήκης όπου βρίσκεται χαμηλά, καθώς στη στοά βρίσκεται πάνω από τα 1,75 m. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι ένοικοι να κινούνται στη στοά με την ίδια ταχύτητα και στα δυο σενάρια εκκένωσης που εξετάστηκαν (με και χωρίς φωτιά).

Για να εξαχθούν ασφαλέστερα συμπεράσματα σχετικά με την ασφάλεια της εκκένωσης, πραγματοποιήθηκε η εκκένωση του υπόγειου χώρου του Τ.Π.Π.Λ. σε πραγματικό χρόνο. Μία από τις προσομοιώσεις που εκτελέστηκαν στο λογισμικό του STEPS, ταυτίστηκε πλήρως με μια δοκιμή αυτού του πειράματος όπου σαράντα ένοικοι εκκένωσαν τον υπόγειο χώρο και από τις δύο εξόδους διαφυγής. Οι χρόνοι εκκένωσης των δύο εκκενώσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 32.

Πίνακας 32. Σύγκριση θεωρητικών και πραγματικών χρόνων εκκένωσης

Κατηγορία	Χρόνος εκκένωσης (sec)	Ποσοστιαία μεταβολή του χρόνου εκκένωσης
Προσομοίωση εκκένωσης στο STEPS	291	32,3%
Πειραματική εκκένωση σε πραγματικό χρόνο	220	

Παρατηρούμε πως ο χρόνος εκκένωσης που προέκυψε από την προσομοίωση της εκκένωσης στο STEPS είναι αυξημένος κατά 32.3% σε σχέση με τον αντίστοιχο πειραματικό. Αυτή η μεταβολή οφείλεται στην διαφορά της πειραματικής ταχύτητας κίνησης που υπολογίστηκε με αυτήν που ορίζουν οι κανονισμοί του NFPA, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 30. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι το λογισμικό χρησιμοποιεί πιο συντηρητικές μεθόδους υπολογισμού που προσφέρουν μεγαλύτερο βαθμό ασφαλείας στα αποτελέσματα.

Στο σημείο αυτό αξίζει να σχολιαστεί η χρησιμότητα και ο ρόλος που είχαν στη διεκπεραίωση αυτής της διπλωματικής τα λογισμικά προσομοίωσης STEPS και Pyrosim. Έχοντας υλοποιήσει το πείραμα εκκένωσης του υπόγειου χώρου του Τ.Π.Π.Λ. σε πραγματικό χρόνο αντιληφθήκαμε πόσες δυσκολίες και απαιτήσεις έχει ένα τέτοιο εγχείρημα καθώς υπάρχουν πολλοί παράγοντες που πρέπει να υπολογίσεις και να ελέγξεις. Παράγοντες όπως ο μεγάλος αριθμός των εθελοντών που συμμετέχουν στο πείραμα και η σωστή καθοδήγηση τους, η παρακολούθηση της κίνησης τους στο χώρο και η σωστή καταγραφή των αποτελεσμάτων όπως και πολλά άλλα πιθανά προβλήματα απροσδιόριστης φύσεως. Αυτές οι δυσκολίες αντισταθμίστηκαν με τη χρήση του STEPS το οποίο μας έδωσε τη δυνατότητα εκτέλεσης

πολλών προσομοιώσεων σε ελάχιστο χρόνο κάτι που είναι φαινομενικά αδύνατο μέσω πειραματικών δοκιμών.

Όσον αφορά την προσομοίωση των σεναρίων φωτιάς, καταφέραμε να εξάγουμε και να παρουσιάσουμε οπτικά μια πληθώρα κρίσιμων συμπερασμάτων τόσο για τα χαρακτηριστικά της φωτιάς όσο και για την επικινδυνότητάς της για την ανθρώπινη υγεία. Κάτι τέτοιο δεν θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί χωρίς τη χρήση ενός λογισμικού προσομοίωσης φωτιάς όπως το Pyrosim.

Εν κατακλείδι θα μπορούσαμε να πούμε πως μετά από την εξέταση και ανάλυση μιας πληθώρας σεναρίων έκτακτης ανάγκης, ο υπόγειος χώρος του Λαυρίου κρίνεται ως ένα πολύ ασφαλές περιβάλλον για εργασία και επίσκεψη καθώς δεν παρουσίασε καμία ανησυχητική επίπτωση στην υγεία των ανθρώπων και στην ασφάλεια της εκκένωσης.

Z. Βιβλιογραφία

- Ahrens, M. (2009). *Industrial loader and forklift fires*. National Fire Protection Association.
- Aldís Rún Lárusdóttir, A. D. (2010). *Evacuation dynamics of children*. Copenhagen: Denmark Technical University.
- Campbell, R. (2013). *U.S. structure fires in office properties*. National Fire Protection Association.
- Carbon Monoxide and death*. (2014, Μάρτιος 1). Ανάκτηση από Cielotech Online: <https://cielotech.wordpress.com/tag/gas-burner-design/>
- CFPA - Europe. (2009). *Fire safety engineering concerning evacuation from buildings*.
- Erica D. Kuligowski, R. D. (2010). *A Review of Building Evacuation Models, 2nd Edition*. National Institute Of Standards And Technology.
- G.E. Harrington, K. B. (2018). NFPA 101 Life Safety Code Handbook.
- Harold E. "Bud" Nelson, F. W. (2002). Emergency Movement. Στο *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (σσ. 3-367 - 3-380).
- Jahn, T. S. (2007). *Laboratory Experiments*. Edinburgh: BRE Centre for Fire Safety Engineering.
- Jin, T. (1997). *Studies on Human Behavior and Tenability in Fire Smoke*. Tokyo.
- Movement of People: The Evacuation Timing. (2002). In G. Proulx, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (pp. 3-342 - 3-366).
- NFPA. (2014). *Committee Input No. 77-NFPA 130-2014 [Chapter B]*.
- O'Connor, D. J. (2017). *Guide to Human Behavior in Fire*. SFPE.
- Occupational Safety and Health Administration . (2018). *Carbon Monoxide In Workplace Atmospheres (Direct-Reading Monitor)*.
- Poh, D. W. (2011). *Tenability criteria for design of smoke hazard management systems*.
- Service, N. R. (2014, Δεκέμβριος 27). *Stages in Fire Behaviour III*. Ανάκτηση από Tathra Volunteer Rural Brigade: http://www.tathrafirebrigade.org.au/index.php?option=com_content&view=article&id=82&Itemid=173
- Staffansson, L. (2010). *Selecting design fires*. Lund.
- Thunderhead Engineering. (2018, Ιανουάριος 15). *Multiple Fuels with PyroSim*. Ανάκτηση από www.thunderheadeng.com/2018/01/multiple-fuels-with-pyrosim/
- Walking speeds (slope in %)*. (2015, Σεπτέμβριος 30). Ανάκτηση από https://figshare.com/articles/_Walking_speeds_slope_in_percent_/1561122
- A.Μπενάρδος, Δ. (2010). *Υπόγεια έργα*. Αθήνα.
- Διοικητική Αρχή Σηράγγων. (2011). *Οδηγίες για την εκπόνηση ανάλυσης επικινδυνότητας χωρίς εμπλοκή οχημάτων που μεταφέρουν επικίνδυνα εμπορεύματα μέσα από οδικές σήραγγες που emπίπτουν στο πεδίο εφαρμογής του Π.Δ. 230/07 (σεναριακή προσέγγιση)*. Αθήνα.

- Καλλιανιώτης, Α. (2006). *Σχεδιασμός Εικονικού περιβάλλοντος με θέμα τη μεταλλευτική δραστηριότητα στο αρχαίο Λαύριο*. Αθήνα.
- Καλλιανιώτης, Α. (2015). *Βελτιστοποίηση συνθηκών εκκένωσης υπογείων χώρων: αξιολόγηση και βελτιστοποίηση θέσεων εξόδων διαφυγής*. Αθήνα.
- Κανονισμός πυροπροστασίας κτιρίων. (2018). *Εφημερίδα της κυβέρνησης της Ελληνικής δημοκρατίας*, 1-111.
- Κυρίτσης, Φ. (2010). *Καθορισμός διαδικασιών εκπόνησης σχεδίου εκκένωσης σε υπόγειο χώρο με εξέταση ιδιαίτερων χαρακτηριστικών. Παράδειγμα εφαρμογής στον υπόγειο χώρο του Τεχνολογικού Πάρκου Λαυρίου*.
- Λαυρεωτική - Τεχνολογικό Πάρκο Λαυρίου - Λαύριο. (n.d.). Ανάκτηση από <http://www.environ-develop.ntua.gr/htdocs/pantazidou/index.htm>
- Μπενάρδος, Α. (2001). *Εκτίμηση επικινδυνότητας κατά την όρυξη σηράγγων με μηχανές ολομέτωπης κοπής*.
- Τεχνολογικό Πολιτιστικό Πάρκο Λαυρίου. (n.d.). Ανάκτηση από <http://www.ltp.ntua.gr/home>
- Τσάιμου, Κ. Γ. (1997). *Αρχαιογνωσία των μετάλλων*. Αθήνα.