



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΠΜΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ
ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ

Μεταπτυχιακή Εργασία

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΚΛΙΣΗΣ ΟΔΙΚΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΣΤΗΝ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΦΩΤΙΑΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΕΚΚΕΝΩΣΗ

ΕΛΕΥΘΕΡΙΑ ΚΑΝΛΗ

Επιβλέπων: Ανδρέας Μπενάρδος,
Καθηγητής ΕΜΠ

| ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2024 |

Ευχαριστίες

Με την κατάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας που εκπονήθηκε στο πλαίσιο του ΔΠΜΣ «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων» του ΕΜΠ οφείλω πρωτίστως ένα ευχαριστώ από καρδιάς στον Μεταδιδάκτορα ΕΜΠ Αναστάσιο Καλλιανιώτη, για την υλοποίηση της εργασίας, την πολύτιμη καθοδήγηση, τον τεράστιο χρόνο που αφιέρωσε στην παρακολούθηση και στη διαμόρφωσή της και γενικότερα για την άριστη συνεργασία και το πλήθος των γνώσεων που μου μετέδωσε.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή ΕΜΠ Ανδρέα Μπενάρδο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε κατά ανάθεση της εργασίας και για την αξιολόγησή της.

Οφείλω ακόμη ένα ευχαριστώ στους Καθηγητές ΕΜΠ Μαρία Μενεγάκη και Δημήτρη Δαμίγο για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή.

Τέλος, θα αποτελούσε παράλειψη να μην ευχαριστήσω όλους τους συμφοιτητές και φίλους που με στήριξαν σε αυτό το ταξίδι των φοιτητικών ετών μου, αλλά και την οικογένειά μου για την αγάπη και την υποστήριξη που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Από τα μέσα του περασμένου αιώνα έχουν υλοποιηθεί σημαντικά τεχνικά επιτεύγματα σε σχέση με την ανάπτυξη των υπόγειων χώρων και ιδιαίτερα των σηράγγων. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μίας νέας πρόκλησης αυτή της ασφάλειας των υπόψη υποδομών, λόγω της ιδιαίτερης φύσης τους. Έτσι, με αφορμή αρκετά τραγικά δυστυχήματα που σημειώθηκαν, ένα από τα κυριότερα ζητήματα που προέκυψε είναι αυτό της πυρασφάλειας.

Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν γίνει βήματα έτσι ώστε να οριστεί το θεσμικό πλαίσιο και να καθοριστούν οι απαιτήσεις που πρέπει να πληρούνται τόσο σε διεθνές όσο και σε εθνικό επίπεδο σε περίπτωση πυρκαγιάς εντός σήραγγας. Ο πρωταρχικός στόχος είναι η διασφάλιση της ευημερίας των ατόμων κατά τη διάρκεια καταστάσεων έκτακτης ανάγκης πράγμα που αποτελεί μια θεμελιώδη πτυχή του σχεδιασμού υπόγειων χώρων. Συνεπώς, η αξιολόγηση των διαφόρων μέσων ταχείας εκκένωσης είναι βαρύνουσας σημασίας, ιδιαίτερα σε περίπτωση πυρκαγιάς.

Η διαδικασία της εκκένωσης επηρεάζεται άμεσα από την εξέλιξη του φαινομένου της φωτιάς. Κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς σε σήραγγα, δημιουργείται καπνός, μέσω του οποίου μεταφέρονται τα τοξικά αέρια της καύσης και ταυτόχρονα αυξάνεται η θερμοκρασία. Η κίνηση αυτή γίνεται από την εστία της φωτιάς προς την υπόλοιπη σήραγγα. Εάν η σήραγγα έχει κλίση ή αερισμό τότε ο καπνός προωθείται προς μία κατεύθυνση. Ειδικότερα για την περίπτωση της

κλίσης αυτό που παρατηρείται είναι το φαινόμενο της καμινάδας, κατά το οποίο ο καπνός διοχετεύεται προς τα ανηφορικά. Καθώς η κλίση αυξάνεται, το φαινόμενο ενισχύεται. Συνεπώς, αν λόγω της κλίσης ή του αερισμού ο καπνός κατευθύνεται προς τα εκεί που κινούνται οι χρήστες, η εκκένωση αναμένεται να επηρεαστεί αρνητικά. Η παρούσα Εργασία εξετάζει την επιρροή της κλίσης στην εξέλιξη του φαινομένου της φωτιάς, καθώς επίσης και την περίπτωση ταυτόχρονης ύπαρξης αερισμού. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση κατά την οποία η δράση της κλίσης και του αερισμού είναι αντίθετες.

Για την εκπόνηση της Εργασίας, διεξήχθησαν 10 προσομοιώσεις φωτιάς σε σήραγγα με το λογισμικό Pyrosim της εταιρείας ThunderHead Engineering. Οι μεταβαλλόμενες παράμετροι ήταν η κλίση της σήραγγας (0%, $\pm 1\%$ και $\pm 3\%$) και η ταχύτητα του αέρα (0 και 1 m/s). Η φωτιά σχεδιασμού περιγράφεται από τη Διοικητική Αρχή Σηράγγων (ΔΑΣ) και έχει μέγιστο ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας (HRR) 100 MW. Το μήκος της σήραγγας σχεδιάστηκε στα 800 m και η φωτιά τοποθετήθηκε στο κέντρο.

Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων προκύπτει ότι η κλίση διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην κίνηση του καπνού και κατ'επέκταση στην εξέλιξη της φωτιάς. Για μικρές τιμές κλίσης ο καπνός διαχέεται προς τα ανηφορικά κατά τρόπο ομοιόμορφο καλύπτοντας όλο το τμήμα από τη φωτιά μέχρι το στόμιο στα ανάντη. Για μεγαλύτερες τιμές η μεταβολή είναι πιο απότομη και ο καπνός συσσωρεύεται στα πρώτα 100 m από τη φωτιά. Αυτό συμβαίνει διότι το φαινόμενο της καμινάδας είναι εντονότερο και έτσι ο καπνός κινείται πιο γρήγορα προς τα ανηφορικά, χωρίς να μένει στάσιμος για μεγάλη έκταση.

Εάν ταυτόχρονα στη σήραγγα υπάρχει αερισμός, τότε η δράση του μπορεί να είναι είτε ομόφορη με αυτή της κλίσης είτε αντίθετη. Στην πρώτη περίπτωση ο καπνός κινείται γρήγορα προς μία κατεύθυνση χωρίς να εξαπλώνεται σε όλη τη σήραγγα και υπάρχει για μεγάλο χρονικό διάστημα καθαρός διάδρομος διαφυγής. Όταν η δράση του αερισμού είναι αντίθετη από αυτής της κλίσης για την περίπτωση ήπιας κλίσης το ο καπνός περιορίζεται στο κεντρικό τμήμα της σήραγγας εκατέρωθεν της φωτιάς. Αυξανόμενης της κλίσης, αλλά για την ίδια χαμηλή τιμή αερισμού, ο καπνός εξαπλώνεται σε όλο το τμήμα που το ωθεί η κλίση και δε συσσωρεύεται σε ένα περιορισμένο τμήμα (όπως συνέβη στην περίπτωση έντονης κλίσης χωρίς αερισμό).

Για τη μελέτη της εκκένωσης πραγματοποιήθηκαν 14 προσομοιώσεις με το λογισμικό Pathfinder της εταιρείας ThunderHead Engineering, βάσει των δεδομένων που εξήχθησαν από τις αναλύσεις της φωτιάς. Η έξοδος διαφυγής σχεδιάστηκε σε απόσταση 300 m από τη φωτιά, που είναι και η μέγιστη επιτρεπόμενη. Κατά τις προσομοιώσεις εξετάστηκαν 5 κατηγορίες χρηστών ανάλογα με την απόστασή τους από τη φωτιά τη στιγμή που ξέσπασε (10 m, 50 m, 100 m, 150 m και 200 m). Λόγω της κίνησης του καπνού μεταβάλλονται οι περιβαλλοντικές συνθήκες προσθέτοντας επιβάρυνση στους χρήστες η οποία παρακωλύει τη διαδικασία της εκκένωσης. Η επιβάρυνση αυτή ποσοτικοποιείται μέσω της κλασματικής δραστηκής δόσης (FED) και υπολογίζεται ξεχωριστά λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας και λόγω της τοξικότητας των αερίων. Εκ των δύο κρισιμότερη είναι η επιβάρυνση λόγω θερμοκρασίας και βάσει αυτής υπολογίζονται οι χρόνοι εκκένωσης. Μία επιπλέον παράμετρος η οποία έμμεσα παρεμποδίζει την εκκένωση είναι η μείωση της ορατότητας εξαιτίας της οποίας επιβραδύνεται η κίνηση των χρηστών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι χρήστες να παραμένουν για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα σε δυσμενείς συνθήκες.

Η Εργασία διερευνά πόσος είναι ο χρόνος που διαθέτουν οι χρήστες πριν ξεκινήσουν να εγκαταλείπουν τη σήραγγα. Αυτό γίνεται μέσω δοκιμών προσομοιώσεων εκκένωσης για διάφορες τιμές αρχικής χρονοκαθυστερήσης, μέχρι ο εκάστοτε χρήστης να φτάσει στην έξοδο διαφυγής οριακά, δηλαδή όταν η συνολική επιβάρυνση λόγω θερμοκρασίας λάβει την τιμή $FED = 0.3$. Λόγω της επίδρασης της κλίσης ο καπνός κινείται προς συγκεκριμένη κατεύθυνση, εάν αυτή είναι προς την αντίθετη πλευρά από εκείνη που επιχειρούν να κινηθούν οι χρήστες, τότε όπως ήταν αναμενόμενο ο διαθέσιμος χρόνος που έχουν είναι υπεραρκετός.

Ενδιαφέρον, παρουσιάζουν οι περιπτώσεις κατά τις οποίες ο καπνός κινείται ομόφορα με τους χρήστες. Πιο συγκεκριμένα, στα σενάρια χωρίς την ύπαρξη αερισμού, η έντονη κλίση επειδή συσσωρεύει τον καπνό στα πρώτα 100 m από τη φωτιά αφήνει στους χρήστες έναν καθαρό διάδρομο κίνησης και ως εκ τούτου έχουν αυξημένη διαθέσιμη χρονοκαθυστερήση, άνω των 225 sec. Αντίθετα, όταν ο καπνός διαχέεται ομοιόμορφα σε μεγαλύτερο μήκος, λόγω ηπιότερης κλίσης, τότε οι συνθήκες για τους χρήστες περιορίζουν το χρόνο που διαθέτουν προτού ξεκινήσουν με τη μικρότερη τιμή να αφορά τους κοντινότερους στη φωτιά χρήστες και να μην ξεπερνά τα 40 sec. Στην περίπτωση έντονης κλίσης και αντίθετου αερισμού, ο καπνός εξαπλώνεται σε μεγάλη έκταση προς τα ανηφορικά και οι χρήστες επίσης έχουν περιορισμένο χρόνο, με τη δυσμενέστερη περίπτωση να μην ξεπερνά τα 85 sec.

Συγκρίνοντας όλα τα Σενάρια που μελετήθηκαν, η Εργασία καταλήγει ότι η καλύτερη κατασκευαστική λύση αφορά σε σήραγγα χωρίς κλίση και με μικρή τιμή αερισμού (1 m/s). Στην περίπτωση αυτή οι χρήστες έχουν αρκετό χρόνο προτού ξεκινήσουν να απομακρύνονται (άνω των 300 sec). Εφόσον χρειάζεται να έχει κλίση η σήραγγα (έως 1%), τότε επίσης με μικρή τιμή αερισμού (1 m/s) οι χρήστες έχουν στη διάθεσή τους τουλάχιστον 225 sec. Ωστόσο, εάν η σήραγγα πρέπει να κατασκευαστεί με εντονότερη κλίση (3%), τότε είναι προτιμότερο να μην υπάρχει αερισμός. Σε αυτή την περίπτωση οι χρήστες διαθέτουν τουλάχιστον 255 sec πριν την έναρξη της εκκένωσης.

Λέξεις Κλειδιά: φωτιά σε σήραγγα, κλίση σήραγγας, αερισμός σήραγγας, διαθέσιμος χρόνος εκκένωσης, φαινόμενο καμινάδας

Extended Abstract

This Master Thesis was prepared in the context of the interdepartmental master's program "Design and construction of underground works". The purpose of the Work is to study the effect of the slope of a road tunnel on the fire phenomenon and subsequently on the time available to the users until they start the evacuation.

Since the middle of the last century, significant technical achievements have been made in the development of underground spaces and tunnels. These constructions, although useful and necessary, have brought to the fore new challenges, mainly regarding their security. Fire safety in particular has become one of the main issues, due to the specific nature of underground spaces and the difficulty of dealing with fires in such conditions.

In recent years, significant efforts have been made to establish an institutional framework that defines fire safety requirements both internationally and nationally. These requirements are intended to protect people in the event of an emergency, such as a tunnel fire. Legislation and regulations put in place aim to ensure that these infrastructures are equipped with the appropriate systems and measures to prevent accidents.

The main objective of all these measures is to protect human life during emergency situations. An important area in underground space design is evaluating and ensuring effective rapid evacuation methods. In time and safe evacuation of people from tunnels in the event of a fire is critical in order to minimize the risks and ensure the well-being of people inside these infrastructures.

During a tunnel fire the main byproduct is smoke. Through the movement of the smoke, the toxic products of combustion are transported into the tunnel and at the same time the temperature rises. This happens because the smoke is a gas mass that moves in a direction from the hottest points (source of the fire) to the coldest (ceiling of the tunnel). However, when the slope of the tunnel is not zero, what is observed is the chimney effect, i.e. the hot smoke that is lighter is directed upwards, while the cooler air moves lower. As the slope increases, this phenomenon is more intense.

Tunnels usually have limited ventilation compared to open spaces, which can lead to the accumulation of smoke and hot, toxic gases near the ceiling. The buoyancy effect, caused by the lower-density hot gases, helps to lift them and create a layer of smoke and toxic gases on the ceiling of the tunnel. Thus, two additional phenomena that take place during the movement of smoke are the back layering effect and the stratification effect. During the back layering effect, a part of the smoke is channeled in the opposite direction to the rest of the smoke mass. During the phenomenon of smoke stratification, a difference in heating is observed at the height of the cross-section, with the hot air being higher.

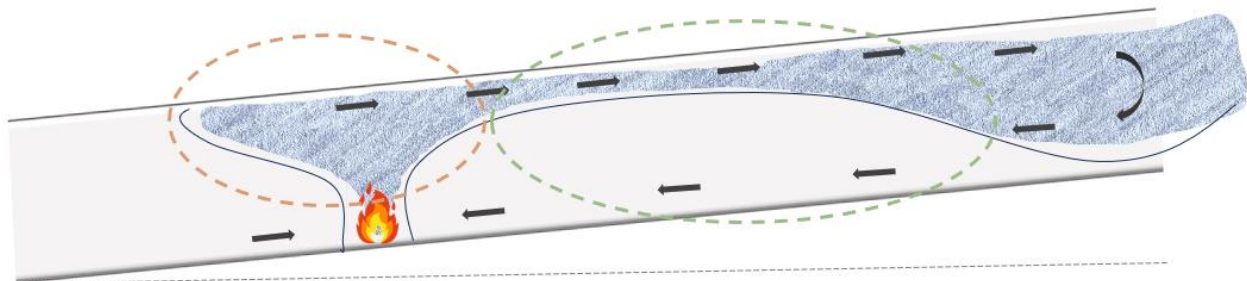


Figure 1: Tunnel with slope, where the smoke moves upwards due to the chimney effect. Within the pink circle it is shown the back layering effect and the green circle shows the layering effect.

In the case that the smoke is channeled in the direction that the users are also trying to move (either due to the slope or due to the ventilation of the tunnel), it is expected that the evacuation process will be negatively affected. However, if there is ventilation in the tunnel that pushes the air in the opposite direction, it is worth studying under what conditions its action will outweigh that of the slope.

This Thesis deals with the case of evacuation of a one-way road tunnel, when there is a fire in the middle of it. The tunnel under study has the following dimensions, length: 800 m, width: 11 m and height: 8 m. The design fire is described by the Greek Tunnel Authority Scenario No. 7 and has a maximum heat release rate of $HRR = 100 \text{ MW}$ and a value of $t^2 = 300 \text{ sec}$. It is highlighted that vehicles carrying dangerous goods are not involved. The escape exit is 300 m from the fire. The time duration of the fire simulations corresponds to 1400 sec, a value considered sufficient to study the evolution of the fire phenomenon and the evacuation process.

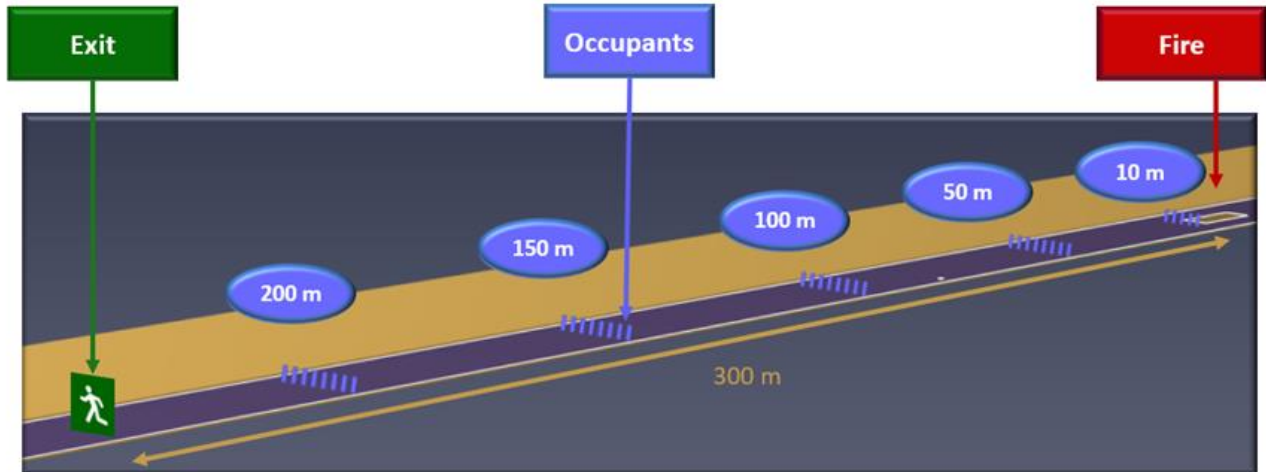


Figure 2: Part of the tunnel showing the location of the fire, the escape exit and the location of the users at the time the fire started.

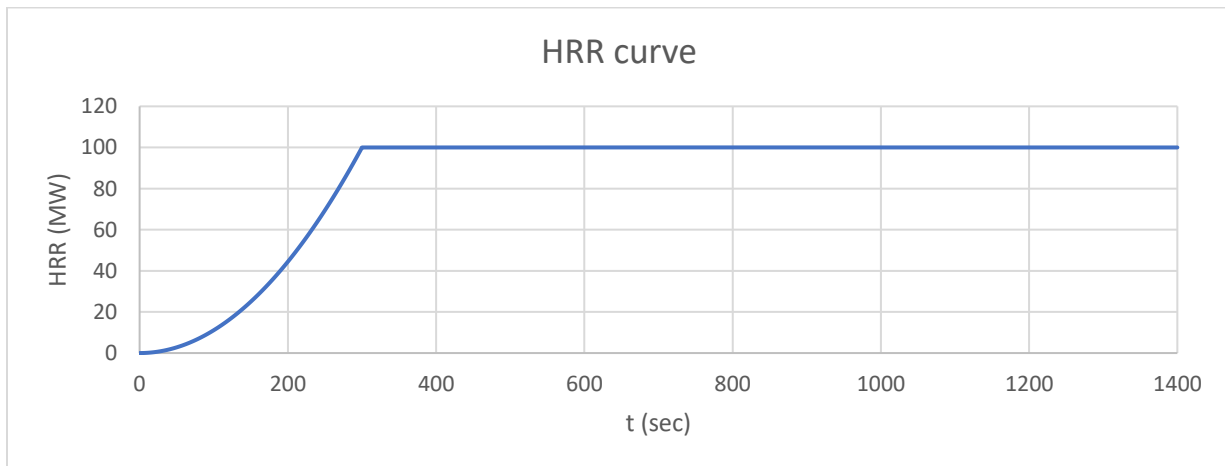


Figure 3: HRR design fire curve based on Greek Tunnel Authority Scenario No. 7 for the first 1400 sec.

For the purpose of the work, 14 scenarios were carried out simulating cases of fire in a tunnel in which users should evacuate. Fire and evacuation simulation were performed using Pyrosim and

Pathfinder software respectively. The parameters that are varied in each simulated scenario are the tunnel slope (0%, $\pm 1\%$ and $\pm 3\%$) and the wind speed inside the tunnel (0 m/s and ± 1 m/s).

Table 1: Scenarios analyzed overall in the thesis

No. Scenario	Tunnel slope	Wind velocity (m/s)
1	0	0
2	1%	0
3	-1%	0
4	3%	0
5	-3%	0
6	0%	1
7	1%	1
8	-1%	1
9	3%	1
10	-3%	1
11	0%	-1
12	-1%	-1
13	1%	-1
14	3%	-1

For each Scenario a fire analysis is performed using the Pyrosim software and then the evacuation is simulated using the Pathfinder software. First, the required data obtained from the simulations in the Pyrosim are transferred to the Pathfinder. These data are related to the evolution in space and time of the parameters of temperature, gas concentration and visibility. Then the users inside the tunnel are defined, their categorization is done based on their distance from the fire (10, 50, 100, 150 and 200 m). Through evacuation simulations, the Thesis calculates how much time users have before they start to leave. This was done by testing various initial time delay values until the user reaches the escape output marginally, i.e. the cumulative temperature load takes the value $FED = 0.3$.

The effect of the slope of the tunnel determines the movement of the smoke which can be either in the direction that the users are trying to move during the evacuation, or in the opposite direction. The location of the occupants at the time the fire breaks out plays a significant role in the time delay that intervenes from the start of the fire until they begin the evacuation process. Values for the time delay range from 10 sec to 300 sec. These two values are extreme cases to show that either the category in question does not have any available time to evacuate, or that it has too much time of at least 5 min. The period of 5 min is considered a sufficient and no longer time delay is studied. The evacuation of a user is successful when they manage to reach the escape exit.

The results show that the slope plays an important role in the movement of smoke and, consequently, in the evolution of the fire. More specifically, due to the chimney effect, smoke tends to flow uphill. This is also observed for small slopes, as it applies to the slope value equal to 1%, while as the slope increases this phenomenon becomes more intense.

It was found that for a small slope value without the existence of ventilation, the smoke diffused uphill in a more uniform way throughout the tunnel section from the fire position to the mouth and the temperature did not exceed 100°C. On the contrary, for a steeper slope also without ventilation, what was noted was the accumulation of smoke in the first 100 m from the fire with very high temperatures above 150°C and in places above 200°C, while in the rest of the section until the exit the temperatures remained low below 50°C. This was because the chimney effect is stronger with increasing gradient, causing the smoke to move more rapidly upstream and thus not spreading the smoke evenly throughout the tunnel and causing a significant increase in temperature in the area closest to the fire, while in the rest of the tunnel the temperatures should be significantly more sustainable and not exceed 50°C. In addition, increasing the slope, a decrease in the back layering effect was observed, due to the increased effect of the chimney effect.

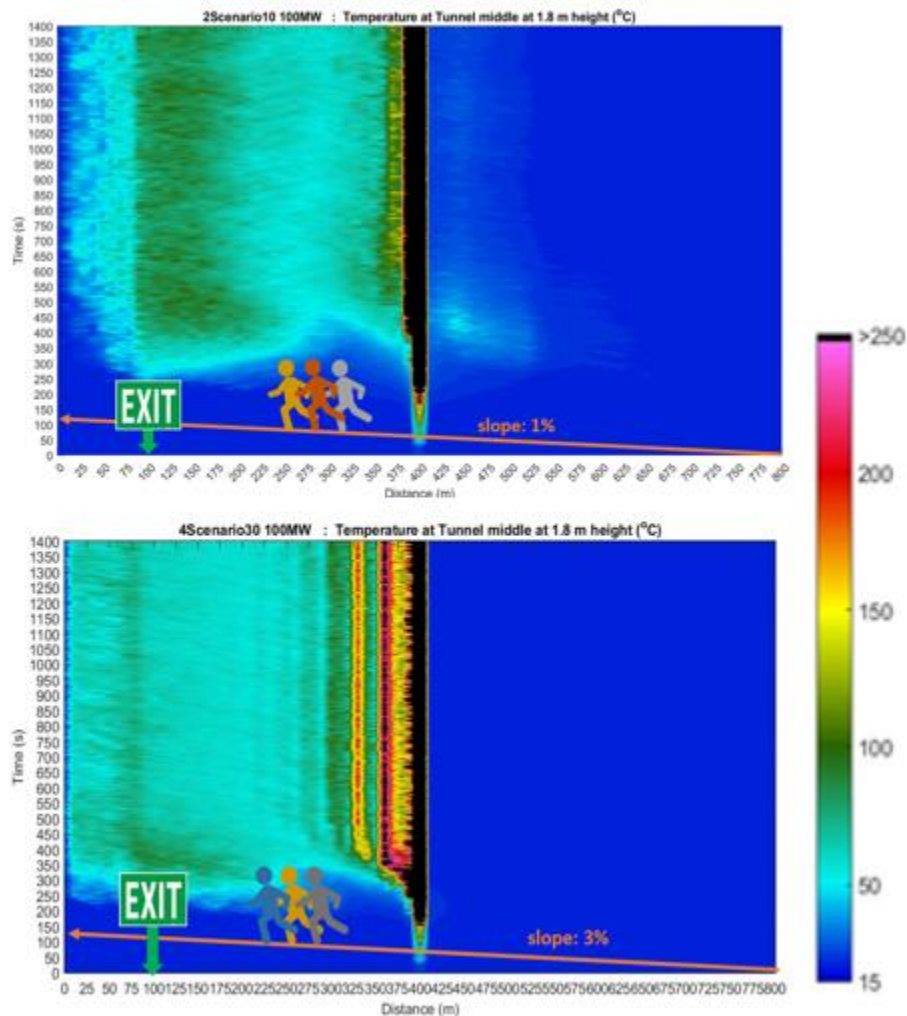


Figure 4: Temperature distribution diagram for the Fire Scenarios without ventilation with a slope value of 1% and 3%.

From all the analyzes performed, those in which the users had less than 300 sec before starting to move away in order to evacuate safely are gathered in the following diagram.

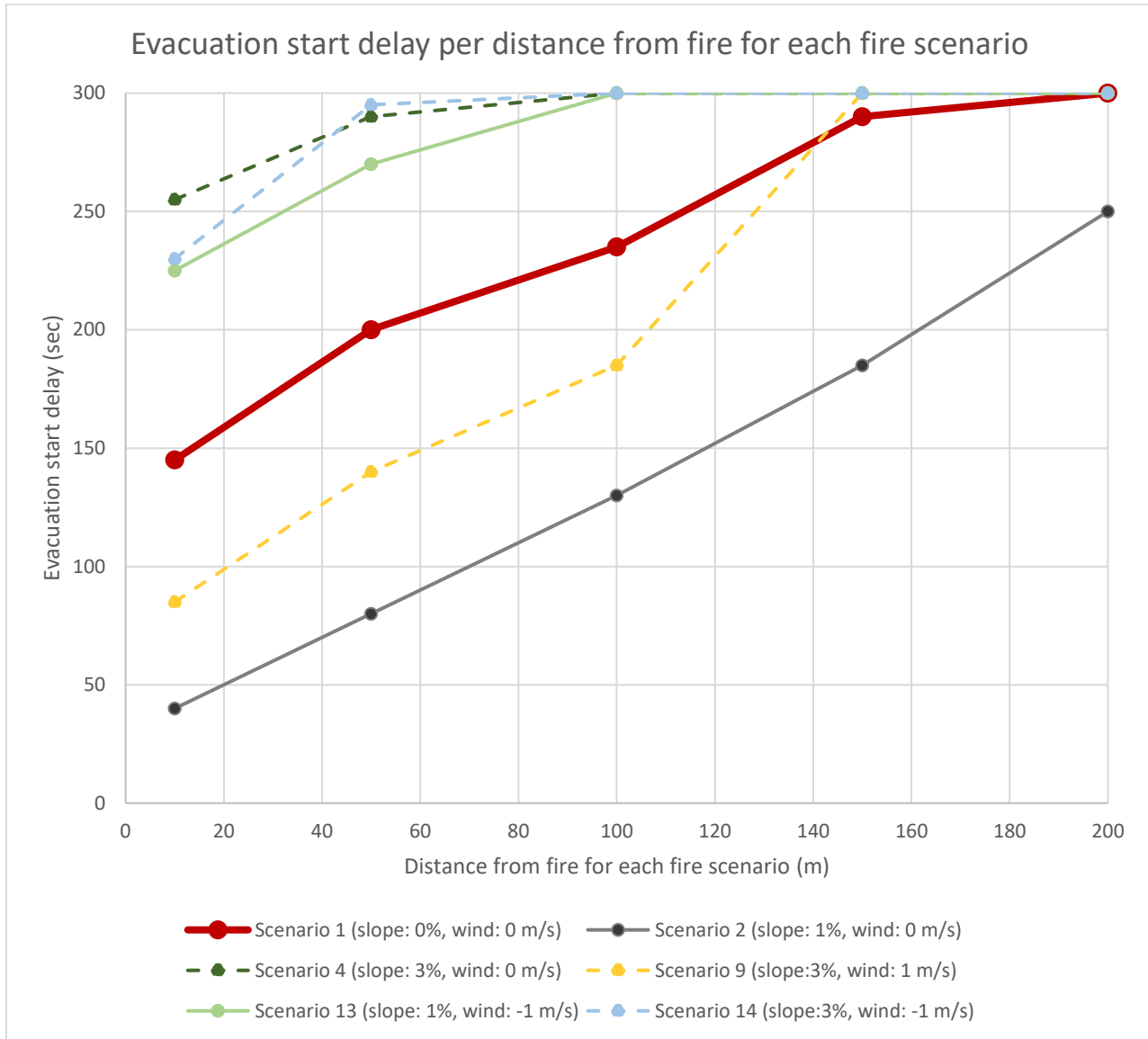


Figure 5: Available Evacuation Start Delay per distance from fire for each Fire Scenario

From the diagram above it becomes apparent that the curves of each Scenario have a similar slope. This means that all Scenarios have the same sensitivity to changing the tunnel ventilation and slope parameters. At the same time, the constant slope in each Scenario implies that as the distance from the fire increases, so does the available time users have until they start evacuating. It is worth noting that the value of the tangent describing all Scenarios has a value of 1, that is, with each additional meter of distance from the fire, users gain an additional second.

What was observed during the Thesis' investigation is that in cases where the movement of smoke left a clear path to the escape exit for a sufficient period of time from the start of the fire, then the occupants had sufficient time before initiating to move away. This happened because the smoke accumulated near the fire and gradually after some time it spread. This phenomenon was observed in the case where the slope was steep but there was no ventilation. Therefore, in this Scenario users had enough time before they started to move away (over 250 sec).

Of interest are the cases in which the smoke moves along with the users. More specifically, in the scenarios without ventilation, due to steep slope smoke accumulates in the first 100 m from the fire leaving users with smoke-free movement path and therefore have an increased available time delay, of 225 sec. Conversely, when the smoke spreads evenly over a longer length due to a gentler slope, then the conditions for users limit the time they have before starting with the smallest value being for those closest to the fire and not exceeding 40 sec. In the case of a strong slope and counter ventilation, the smoke spreads over a large area uphill and the users have a limited time, with the worst case being no more than 85 sec.

Comparing all the Scenarios studied, the Thesis concludes that the best construction solution concerns a tunnel without slope and with a small ventilation value (1 m/s). In this case users have enough time before they start moving away (over 300 sec). If the tunnel needs to be inclined (up to 1%), then also with a small ventilation value (1 m/s) users have at least 225 sec at their disposal. However, if the tunnel is to be built with a steeper gradient (3%), then it is preferable to have no ventilation. In this case users have at least 255 sec before the start of the evacuation.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή.....	1
1.1 Η σημασία της ασφάλειας των σηράγγων στις οδικές μεταφορές.....	1
1.2 Η ευρωπαϊκή οδηγία για την ασφάλεια των οδικών σηράγγων.....	4
1.3 Αντικείμενο-Σκοπός	5
1.4 Περιγραφή του Προβλήματος: Η επιρροή της κλίσης της σήραγγας στην εξέλιξη της πυρκαγιάς.....	5
1.5 Δομή της Εργασίας.....	6
1.6 Μεθοδολογία	9
.....	10
2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση και εργαλεία	10
2.1 Εισαγωγή.....	10
2.2 Αρχές σχεδιασμού φωτιάς σε οδική σήραγγα.....	11
2.2.1 Γενικά.....	11
2.2.2 Ανάλυση κινδύνου φωτιάς σε σήραγγα (Tunnel Fire Risk Analysis).....	11
2.2.2.1 Πιθανοτική Προσέγγιση (Probabilistic Approach).....	11
Αιτίες πρόκλησης πυρκαγιάς σε σήραγγα.....	12
Δέντρα Σφαλμάτων (Fault Trees)	12
2.2.2.2 Ντετερμινιστική Προσέγγιση (Detesministic Approach).....	14
Ρυθμός Απελευθέρωσης Θερμότητας (Heat Release Rate – HRR)	14
Παράγοντες που επηρεάζουν το Ρυθμό Απελευθέρωσης Θερμότητας (HRR).....	17
2.2.3 Σενάρια φωτιάς σχεδιασμού.....	20
2.2.3.1 Προτυποποιημένα σενάρια πυρκαγιάς σχεδιασμού με βάση τη ΔΑΣ.....	21
Αρχές και παραδοχές σχεδιασμού καμπύλων HRR προτυποποιημένων πυρκαγιών .	21
Καμπύλη φωτιάς σχεδιασμού (design fire curve).....	24
2.2.4 Το λογισμικό Pyrosim: Προσομοίωση φωτιάς με μοντέλα CFD	25
2.2.4.1 Μοντέλα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD)	25
FDS (Fire Dynamics Simulator).....	25
FLUENT (Fluent Inc.).....	25
SMARTFIRE.....	26
PYROSIM	26
Υπολογιστικές παράμετροι για προσομοίωση πυρκαγιάς και εκκένωση σε οδική σήραγγά	27

2.2.4.2 Το λογισμικό PyroSim	27
2.3 Αρχές σχεδιασμού ασφαλούς εκκένωσης σε οδική σήραγγα	29
2.3.1 Γενικά.....	29
2.3.2 Η φιλοσοφία των κανονισμών ασφαλείας των υπογείων χώρων.....	30
2.3.2.1 Οι κανονισμοί και τα πρότυπα για την πυροπροστασία των υποδομών	31
Ο κανονισμός πυροπροστασίας των ΗΠΑ (NFPA).....	31
Ο κανονισμός πυροπροστασίας της ΕΕ (CFPA)	31
Οι κατευθυντήρες οδηγίες της PIARC για την ασφάλεια των σιράγγων	32
2.3.3 Στάδια Εκκένωσης	32
Απόφαση.....	33
Ενημέρωση.....	33
Εκκένωση	33
Ασφαλής Τοποθεσία.....	34
Επιστροφή.....	34
2.3.4 Ποσοτική αξιολόγηση των συνθηκών ασφαλείας εκκένωσης με βάση τις Ευρωπαϊκές οδηγίες	34
2.3.4.1 Ποσοτική εκτίμηση του διαθέσιμου χρόνου για ασφαλή εκκένωση (ASET) – Όρια βιωσιμότητας.....	35
Κλασματική Δραστική Δόση- Fractional Effective Dose (FED)	35
Επίδραση της θερμότητας	36
Συναγώμενη θερμότητα	36
Ακτινοβολούμενη θερμότητα.....	37
Επίδραση της παραγωγής τοξικών αερίων και της μείωσης του οξυγόνου	41
Ορατότητα	46
Κλασματική Δραστική Συγκέντρωση- Fractional Effective Concentration (FEC)	47
Οριακές τιμές βιωσιμότητας ανά παράμετρο.....	48
2.3.4.2 Ποσοτική εκτίμηση του απαιτούμενου χρόνου για ασφαλή εκκένωση (RSET) ..	49
Χρόνος ανίχνευσης (Detection Time).....	49
Χρόνος συναγερμού (Alarm Time)	49
Χρόνος πριν από την απομάκρυνση (Pre – Movement Time)	49
Χρόνος απομάκρυνσης (Travel Time).....	49
2.3.5 Το λογισμικό Pathfinder: Προσομοίωση εκκένωσης CFD.....	50
2.3.5.1 Αρχή λειτουργίας του Pathfinder και απαιτούμενες παράμετροι που πρέπει να εισαχθούν (input data)	51
Εισαγωγή γεωμετρίας.....	51

Χαρακτηριστικά επιβατών.....	51
Δεδομένα εμποδίων.....	51
Πληροφορίες των εξόδων διαφυγής.....	51
Επιπλέον χαρακτηριστικά.....	51
Ρυθμίσεις προσομοίωσης.....	51
Λογική πλοήγησης.....	51
Ανάλυση αποτελεσμάτων.....	52
3. Προσομοίωση της φωτιάς και της εκκένωσης.....	53
3.1 Εισαγωγή.....	53
3.1.1 Χαρακτηριστικά της σήραγγας.....	53
Γεωμετρία.....	53
Αερισμός.....	54
3.1.2 Χαρακτηριστικά της φωτιάς.....	54
3.1.2.1 Μέγεθος φωτιάς – τυπικές τιμές καμπύλης HRR.....	54
3.1.2.2 Θέση φωτιάς και έξοδος διαφυγής.....	55
3.2 Παράμετροι εισαγωγής στο λογισμικό Pyrosim.....	55
3.2.1 Κάνναβος πεπερασμένων στοιχείων (Mesh).....	55
3.2.2 Εισαγωγή της γεωμετρίας της σήραγγας.....	55
3.2.3 Επιφάνειες περιβαλλοντικών συνθηκών (Vents).....	56
3.2.4 Μοντελοποίηση της φωτιάς.....	57
3.2.4.1 Καμπύλη ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας (HRR).....	58
3.2.5 Μοντελοποίηση λοιπών περιβαλλοντικών συνθηκών.....	59
3.2.5.1 Αερισμός.....	59
3.2.5.2 Κλίση σήραγγας.....	59
3.2.5.3 Στόμια.....	59
3.2.6 Προσθήκη εικονικών συσκευών (Devices).....	59
3.2.7 Χρονική διάρκεια της προσομοίωσης της φωτιάς.....	60
3.3 Παράμετροι εισαγωγής στο λογισμικό Pathfinder.....	60
3.3.1 Δεδομένα που εισάγονται από το λογισμικό Pyrosim.....	60
3.3.2 Παραμετροποίηση χρηστών.....	61
3.3.2.1 Χρήστες (Occupants).....	61
3.3.2.2 Συμπεριφορές (Behaviors).....	61
3.4 Σενάρια φωτιάς και εκκένωσης.....	61

4. Ανάλυση αποτελεσμάτων προσομοίωσης φωτιάς και εκκένωσης	62
4.1 Γενικά	62
4.2 Μεθοδολογία ανάλυσης αποτελεσμάτων προσομοίωσης φωτιάς με το λογισμικό Pyrosim	62
4.2.1 Ειδικές επισημάνσεις για τη διαγραμματική απεικόνιση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης της φωτιάς	63
Θερμοκρασία	63
Συγκέντρωση μονοξειδίου του άνθρακα (CO)	63
Ορατότητα	63
4.3 Μεθοδολογία ανάλυσης αποτελεσμάτων προσομοίωσης εκκένωσης με το λογισμικό PathFinder	64
4.3.1.1 Ειδικές επισημάνσεις για τον υπολογισμό της κλασματικής δραστικής δόσης FED	64
Θερμοκρασία	64
Τοξικά αέρια-υποξία	64
4.4 Αποτελέσματα προσομοιώσεων για κάθε σενάριο	65
Μεθοδολογία ανάλυσης αποτελεσμάτων της φωτιάς	65
Μεθοδολογία ανάλυσης αποτελεσμάτων της εκκένωσης	65
4.4.1 Σενάριο 1: Κλίση 0 %, Αέρας: 0 m/s	66
Φαινόμενο διαστρωμάτωσης του καπνού	67
4.4.2 Σενάριο 2: Κλίση 1 %, Αέρας: 0 m/s	69
Φαινόμενο αναστροφής του καπνού (back layering)	70
4.4.3 Σενάριο 3: Κλίση -1 %, Αέρας: 0 m/s	72
4.4.4 Σενάριο 4: Κλίση 3 %, Αέρας: 0 m/s	74
4.4.5 Σενάριο 5: Κλίση -3%, Αέρας: 0 m/s	76
4.4.6 Σενάριο 6: Κλίση 0%, Αέρας 1 m/s	77
4.4.7 Σενάριο 7: Κλίση 1%, Αέρας 1 m/s	78
4.4.8 Σενάριο 8: Κλίση -1%, Αέρας 1 m/s	80
4.4.9 Σενάριο 9: Κλίση 3%, Αέρας 1 m/s	81
4.4.10 Σενάριο 10: Κλίση -3%, Αέρας 1 m/s	83
4.5 Επιπρόσθετα Σενάρια και ανάλυση αποτελεσμάτων	85
Σενάρια κατά τα οποία ο καπνός διοχετεύτηκε προς την αντίθετη κατεύθυνση σε σχέση με την έξοδο διαφυγής	85
4.5.1 Σενάριο 11: Κλίση 0%, Αέρας: -1 m/s (φωτιά από Σενάριο 6)	86

4.5.2 Σενάριο 12: Κλίση -1%, Αέρας: -1 m/s (φωτιά από Σενάριο 7).....	88
4.5.3 Σενάριο 13: Κλίση 1%, Αέρας: -1 m/s (φωτιά από Σενάριο 8).....	89
4.5.4 Σενάριο 14: Κλίση 3%, Αέρας: -1 m/s (φωτιά από Σενάριο 10).....	90
4.6 Σύνοψη αποτελεσμάτων.....	91
4.6.1 Γενικές παρατηρήσεις για την ανάλυση της φωτιάς	91
4.6.1.1 Φαινόμενο της καμινάδας.....	91
4.6.1.2 Αντικρουόμενες δράσεις κλίσης και αερισμού	92
4.6.1.3 Φαινόμενο διαστρωμάτωσης καπνού	92
4.6.1.4 Φαινόμενο αναστροφής καπνού (back layering).....	92
4.6.2 Συγκριτικά αποτελέσματα από τις αναλύσεις εκκένωσης	93
4.6.2.1 Σενάρια κατά τα οποία οι χρήστες επηρεάζονται από τη φωτιά	93
5. Συμπεράσματα.....	96
5.1 Γενικά	96
5.2 Κανονιστικό πλαίσιο	96
5.3 Επιρροή της κλίσης της σήραγγας στο φαινόμενο της φωτιάς.....	97
5.3.1.1 Επίδραση της κλίσης χωρίς την ύπαρξη αερισμού	98
5.3.1.2 Επιρροή της κλίσης σε συνδυασμό με την ύπαρξη αερισμού	98
5.4 Επιρροή της κλίσης της σήραγγας στη διαθέσιμη χρονοκαθυστέρηση εκκίνησης της εκκένωσης.....	99
5.4.1 Επιρροή της κλίσης όταν ο καπνός ωθείται προς την κατεύθυνση κίνησης των χρηστών	100
5.4.2 Σημασία της θέσης των χρηστών κατά την έναρξη της φωτιάς	101
5.5 Προτάσεις για κατασκευαστικές λύσεις σε σήραγγα.....	101
5.6 Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση	103
5.6.1 Επιπρόσθετες αναλύσεις.....	103
5.6.1.1 Επιπρόσθετες κλίσεις σήραγγας	103
5.6.1.2 Επιπρόσθετες τιμές αερισμού	104
5.6.1.3 Επιπρόσθετες διατομές σήραγγας	104
5.6.2 Παράμετροι προς πρόσθετη εξέταση	104
5.6.2.1 Αερισμός στη σήραγγα	104
5.6.2.2 Υλικό καύσης.....	104
5.6.2.3 Χρήστες	105
6. Βιβλιογραφία -Πηγές	106

6.1 Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία.....	106
6.2 Ελληνική Βιβλιογραφία.....	107
6.3 Ηλεκτρονική Βιβλιογραφία.....	107
6.4 Λογισμικά Η/Υ.....	107
Παράρτημα	108
Παράρτημα Α: Διαγράμματα κατανομής της αθροιστικής επιβάρυνσης FED (λόγω τοξικότητας) των χρηστών ανά θέση και ανά χρονοκαθυστέρηση εκκίνησης.....	108
Παράρτημα Β: Διαγράμματα κατανομής συγκέντρωσης CO για κάθε Σενάριο φωτιάς	114
Παράρτημα Γ: Διαγράμματα κατανομής συγκέντρωσης CO για κάθε Σενάριο φωτιάς	119

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2-1: Θερμική απελευθέρωση (HRR) από διάφορους τύπους φορτίων πυρκαγιάς σύμφωνα με διάφορες κατευθυντήριες γραμμές (M. K. Cheong, 2008).	16
Ο Πίνακας 2-2 περιέχει δεδομένα για το μέγιστο ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας (peak HRR) διάφορων τύπων οχημάτων και φορτίων κάτω από διάφορες πειραματικές συνθήκες. Πίνακας 2-2: Μέγιστος ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας (peak HRR) διάφορων τύπων οχημάτων και φορτίων κάτω από διάφορες πειραματικές συνθήκες (M. K. Cheong, 2008).	16
Πίνακας 2-3: Προτυποποιημένα σενάρια φωτιάς σχεδιασμού (ΔΑΣ, 2011)	23
Πίνακας 2-4: Αριθμητικές σχέσεις μεταξύ των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν την καμπύλη φωτιάς HRR (ΔΑΣ, 2011).....	23
Πίνακας 2-5: Τιμές παραμέτρων καμπύλης HRR.....	24
Πίνακας 2-6: Διαθέσιμος χρόνος ασφαλούς εκκένωσης (ASET) ανάλογα με το είδος του ατυχήματος .	35
Πίνακας 2-7: Όρια βιωσιμότητας λόγω της θερμότητας από ακτιβολία και συναγωγή (CFPA-E No 19, 2009)	39
Πίνακας 2-8: Τα πιο συχνά καύσιμα αέρια (CFPA E Guideline No19, 2009).....	42
Πίνακας 2-9: Συνηθέστερες τιμές I.D.L.H. προϊόντων καύσης (CFPA E Guideline No19, 2009).....	43
Πίνακας 2-10: Όρια βιωσιμότητας για έκθεση σε τοξικά αέρια κι υποξία	43
Πίνακας 2-11: Μέγιστη έκθεση σε μονοξείδιο του άνθρακα CO (NFPA, 2014).....	44
Πίνακας 2-12: οι επιπτώσεις στον ανθρώπινο οργανισμό ανάλογα με την συγκέντρωση του CO (σε ppm) στην οποία εκτίθεται (Carbon Monoxide and death, 2014).....	45
Πίνακας 2-13: Οριακές τιμές παραμέτρων βιωσιμότητας για πυρκαγιά σε σήραγγα.....	49
Πίνακας 3-1: Χαρακτηριστικά Σεναρίου Φωτιάς υπ' αριθμόν 7 (ΔΑΣ)	57
Πίνακας 3-2: Σενάρια φωτιάς και εκκένωσης	61
Πίνακας 4-1: Σενάρια που αναλύθηκαν συνολικά στην εργασία	86

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2-1: Διάδοση της φωτιάς στο όχημα ανάλογα με την θέση της ανάφλεξης (M. K. Cheong, 2008)	19
Εικόνα 3-1: Εισαγωγή των δεδομένων στο λογισμικό Pathfinder	60
Εικόνα 4-1: Στιγμιότυπο από το 1ο Σενάριο τη χρονική στιγμή $t = 327 \text{ sec}$, όπου φαίνεται το φαινόμενο διαστρωμάτωσης του καπνού	67

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1-1: Αριθμός θανάτων από τροχαία δυσυχήματα ανά περιοχή και επίπεδο εισοδήματος της (ΠΟ, 2021).....	3
Σχήμα 1-2: Ποσοστό θνησιμότητας από τροχαία δυστυχήματα ανά 100.000 κατοίκους ανά περιοχή και επίπεδο εισοδήματος (ΠΟ, 2021)	3
Σχήμα 1-3: Διαγραμματική απεικόνιση της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε.....	9
Σχήμα 2-1: Παράδειγμα δέντρου σφαλμάτων σε φωτιά μέσα σε οδική σήραγγα	13
Σχήμα 2-2: Τυπική καμπύλη ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας (HRR), (CFPA E Guideline No19, 2009).....	15
Σχήμα 2-3: Παραδείγματα ροής αέρα στη σήραγγα ανάλογα με την κατάσταση λειτουργίας των ανεμιστήρων, πρίν την έναρξη της πυρκαγιάς (M. K. Cheong, 2008).....	18
Σχήμα 2-4: Ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας ανάλογα με την θέση της ανάφλεξης στο όχημα (M. K. Cheong, 2008)	19
Σχήμα 2-5: Καμπύλες φωτιάς σχεδιασμού: Γραμμική, Τετραγωνική, Εκθετική Ingason, 2008). 24	
Σχήμα 2-6: Διαγραμματική απεικόνιση των σταδίων εκκένωσης, (Σημειώσεις Μαθήματος, Μ. Μενεγάκη)	33
Σχήμα 2-7: Όρια βιωσιμότητας για έκθεση σε συναγώμενη θερμότητα (Poh W., 2011)	37
Σχήμα 2-8: Όρια βιωσιμότητας για έκθεση σε ακτινοβολούμενη θερμότητα (Poh W., 2011) ...	38
Σχήμα 2-9: Χρόνος ανοχής για έκθεση σε συναγώμενη θερμότητα (SFPE, 2016).....	41
Σχήμα 2-10: Ταχύτητα βαδίσματος σε σχέση με την πυκνότητα του καπνού για την περίπτωση ερεθιστικού ή μη καπνού (Poh W., 2011)	48
Σχήμα 2-11: Διαγραμματική απεικόνιση των επιμέρους χρόνων κατά τη διάρκεια μίας εκκένωσης (CFPA E Guideline No 19, 2009).	50
Σχήμα 3-1: Διαστάσεις σήραγγας στο μέσον φαίνεται η φωτιά και η έξοδος διαφυγής σε απόσταση 300 m από τη φωτιά	54
Σχήμα 3-2: Χωρισμός του μοντέλου σε τμήματα ανάλογα με την πυκνότητα του καννάβου ...	55
Σχήμα 3-3: Εισαγωγή τοιχώματος της σήραγγας στο λογισμικό Pyrsosim ως obstacles (προοπτικό).....	56
Σχήμα 3-4: Εισαγωγή τοιχώματος της σήραγγας στο λογισμικό Pyrsosim ως obstacles (όψη από το στόμιο).....	56
Σχήμα 3-5: Μοντελοποίηση της φωτιάς στο λογισμικό Pyrosim στο κέντρο φαίνεται το φλεγόμενο φορτηγό	58
Σχήμα 3-6: Καμπύλη ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας (HRR)	58

Σχήμα 4-1: <Σενάριο1> Κατανομή της θερμοκρασίας στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8$ m	66
Σχήμα 4-2: Κατανομή της αθροιστικής επιβάρυνσης FED (λόγω θερμοκρασίας) των χρηστών ανά θέση και ανά χρονοκαθυστέρηση εκκίνησης.....	68
Σχήμα 4-3: <Σενάριο2> Κατανομή της θερμοκρασίας στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8$ m	69
Σχήμα 4-4: Κατανομή της αθροιστικής επιβάρυνσης FED (λόγω θερμοκρασίας) των χρηστών ανά θέση και ανά χρονοκαθυστέρηση εκκίνησης.....	71
Σχήμα 4-5: <Σενάριο 3> Κατανομή της θερμοκρασίας στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8$ m	72
Σχήμα 4-6: <Σενάριο 3> Κατανομή της αθροιστικής επιβάρυνσης FED (λόγω θερμοκρασίας) των χρηστών ανά θέση και ανά χρονοκαθυστέρηση εκκίνησης	73
Σχήμα 4-7: <Σενάριο 4> Κατανομή της θερμοκρασίας στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8$ m	74
Σχήμα 4-8: <Σενάριο 4> Κατανομή της αθροιστικής επιβάρυνσης FED (λόγω θερμοκρασίας) των χρηστών ανά θέση και ανά χρονοκαθυστέρηση εκκίνησης	75
Σχήμα 4-9: <Σενάριο 5> Κατανομή της θερμοκρασίας στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8$ m	76
Σχήμα 4-10: <Σενάριο 5> Κατανομή της αθροιστικής επιβάρυνσης FED (λόγω θερμοκρασίας) των χρηστών ανά θέση και ανά χρονοκαθυστέρηση εκκίνησης	76
Σχήμα 4-11: <Σενάριο 6> Κατανομή της θερμοκρασίας στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8$ m	77
Σχήμα 4-12: <Σενάριο 6> Κατανομή της αθροιστικής επιβάρυνσης FED (λόγω θερμοκρασίας) των χρηστών ανά θέση και ανά χρονοκαθυστέρηση εκκίνησης	78
Σχήμα 4-13: <Σενάριο 7> Κατανομή της θερμοκρασίας στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8$ m	78
Σχήμα 4-14: <Σενάριο 7> Κατανομή της αθροιστικής επιβάρυνσης FED (λόγω θερμοκρασίας) των χρηστών ανά θέση και ανά χρονοκαθυστέρηση εκκίνησης	79
Σχήμα 4-15: <Σενάριο 8> Κατανομή της θερμοκρασίας στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8$ m	80
Σχήμα 4-16: <Σενάριο 8> Κατανομή της αθροιστικής επιβάρυνσης FED (λόγω θερμοκρασίας) των χρηστών ανά θέση και ανά χρονοκαθυστέρηση εκκίνησης	81
Σχήμα 4-17: <Σενάριο 9> Κατανομή της θερμοκρασίας στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8$ m	81
Σχήμα 4-18: <Σενάριο 9> Κατανομή της αθροιστικής επιβάρυνσης FED (λόγω θερμοκρασίας) των χρηστών ανά θέση και ανά χρονοκαθυστέρηση εκκίνησης	82

Σχήμα 4-19: <Σενάριο 10> Κατανομή της θερμοκρασίας στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8 \text{ m}$	83
Σχήμα 4-20: <Σενάριο 10> Κατανομή της αθροιστικής επιβάρυνσης FED (λόγω θερμοκρασίας) των χρηστών ανά θέση και ανά χρονοκαθυστέρηση εκκίνησης	84
Σχήμα 4-21: Νέα θέση εξόδου διαφυγής για τα επιπρόσθετα Σενάρια	85
Σχήμα 4-22: <Σενάριο 11> Κατανομή της θερμοκρασίας στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8 \text{ m}$ (φωτιά από Σενάριο 6)	86
Σχήμα 4-23: <Σενάριο 11> Κατανομή της αθροιστικής επιβάρυνσης FED (λόγω θερμοκρασίας) των χρηστών ανά θέση και ανά χρονοκαθυστέρηση εκκίνησης	87
Σχήμα 4-24: <Σενάριο 12> Κατανομή της θερμοκρασίας στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8 \text{ m}$ (φωτιά από Σενάριο 7)	88
Σχήμα 4-25: <Σενάριο 12> Κατανομή της αθροιστικής επιβάρυνσης FED (λόγω θερμοκρασίας) των χρηστών ανά θέση και ανά χρονοκαθυστέρηση εκκίνησης	88
Σχήμα 4-26: <Σενάριο 13> Κατανομή της θερμοκρασίας στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8 \text{ m}$ (φωτιά από Σενάριο 8)	89
Σχήμα 4-27: <Σενάριο 13> Κατανομή της αθροιστικής επιβάρυνσης FED (λόγω θερμοκρασίας) των χρηστών ανά θέση και ανά χρονοκαθυστέρηση εκκίνησης	90
Σχήμα 4-28: <Σενάριο 14> Κατανομή της θερμοκρασίας στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8 \text{ m}$ (φωτιά από Σενάριο 10)	90
Σχήμα 4-29: <Σενάριο 14> Κατανομή της αθροιστικής επιβάρυνσης FED (λόγω θερμοκρασίας) των χρηστών ανά θέση και ανά χρονοκαθυστέρηση εκκίνησης	91
Σχήμα 4-30: Διαθέσιμη χρονοκαθυστέρηση έναρξης εκκένωσης ανά απόσταση από τη φωτιά για κάθε Σενάριο φωτιάς.....	94
Σχήμα Π - 1: <Σενάριο 1> Κατανομή της αθροιστικής επιβάρυνσης FED (λόγω τοξικότητας) των χρηστών ανά θέση και ανά χρονοκαθυστέρηση εκκίνησης	108
Σχήμα Π - 2: <Σενάριο 2> Κατανομή της αθροιστικής επιβάρυνσης FED (λόγω τοξικότητας) των χρηστών ανά θέση και ανά χρονοκαθυστέρηση εκκίνησης	109
Σχήμα Π - 3: <Σενάριο 3> Κατανομή της αθροιστικής επιβάρυνσης FED (λόγω τοξικότητας) των χρηστών ανά θέση και ανά χρονοκαθυστέρηση εκκίνησης	109
Σχήμα Π - 4: <Σενάριο 4> Κατανομή της αθροιστικής επιβάρυνσης FED (λόγω τοξικότητας) των χρηστών ανά θέση και ανά χρονοκαθυστέρηση εκκίνησης	110
Σχήμα Π - 5: <Σενάριο 5> Κατανομή της αθροιστικής επιβάρυνσης FED (λόγω τοξικότητας) των χρηστών ανά θέση και ανά χρονοκαθυστέρηση εκκίνησης	110
Σχήμα Π - 6: <Σενάριο 6> Κατανομή της αθροιστικής επιβάρυνσης FED (λόγω τοξικότητας) των χρηστών ανά θέση και ανά χρονοκαθυστέρηση εκκίνησης	111
Σχήμα Π - 7: <Σενάριο 7> Κατανομή της αθροιστικής επιβάρυνσης FED (λόγω τοξικότητας) των χρηστών ανά θέση και ανά χρονοκαθυστέρηση εκκίνησης	111

Σχήμα Π - 8: <Σενάριο 8> Κατανομή της αθροιστικής επιβάρυνσης FED (λόγω τοξικότητας) των χρηστών ανά θέση και ανά χρονοκαθυστερήση εκκίνησης	112
Σχήμα Π - 9: <Σενάριο 9> Κατανομή της αθροιστικής επιβάρυνσης FED (λόγω τοξικότητας) των χρηστών ανά θέση και ανά χρονοκαθυστερήση εκκίνησης	112
Σχήμα Π - 10: <Σενάριο 10> Κατανομή της αθροιστικής επιβάρυνσης FED (λόγω τοξικότητας) των χρηστών ανά θέση και ανά χρονοκαθυστερήση εκκίνησης	113
Σχήμα Π - 11: : <Σενάριο1> Κατανομή της συγκέντρωσης CO στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8 \text{ m}$	114
Σχήμα Π - 12: <Σενάριο 2> Κατανομή της συγκέντρωσης CO στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8 \text{ m}$	114
Σχήμα Π - 13: <Σενάριο 3> Κατανομή της συγκέντρωσης CO στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8 \text{ m}$	115
Σχήμα Π - 14: <Σενάριο 4> Κατανομή της συγκέντρωσης CO στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8 \text{ m}$	115
Σχήμα Π - 15: <Σενάριο 5> Κατανομή της συγκέντρωσης CO στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8 \text{ m}$	116
Σχήμα Π - 16: <Σενάριο 6> Κατανομή της συγκέντρωσης CO στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8 \text{ m}$	116
Σχήμα Π - 17: <Σενάριο 5> Κατανομή της συγκέντρωσης CO στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8 \text{ m}$	117
Σχήμα Π - 18:<Σενάριο 5> Κατανομή της συγκέντρωσης CO στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8 \text{ m}$	117
Σχήμα Π - 19: <Σενάριο 5> Κατανομή της συγκέντρωσης CO στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8 \text{ m}$	118
Σχήμα Π - 20 <Σενάριο 10> Κατανομή της συγκέντρωσης CO στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8 \text{ m}$	118
Σχήμα Π - 21: <Σενάριο 1> Κατανομή της ορατότητας στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8 \text{ m}$	119
Σχήμα Π - 22: <Σενάριο 2> Κατανομή της ορατότητας στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8 \text{ m}$	119
Σχήμα Π - 23: <Σενάριο 3> Κατανομή της ορατότητας στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8 \text{ m}$	120
Σχήμα Π - 24: <Σενάριο 4> Κατανομή της ορατότητας στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8 \text{ m}$	120
Σχήμα Π - 25: : <Σενάριο 5> Κατανομή της ορατότητας στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8 \text{ m}$	121

Σχήμα Π - 26: <Σενάριο 6> Κατανομή της ορατότητας στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8$ m	121
Σχήμα Π - 27: <Σενάριο 7> Κατανομή της ορατότητας στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8$ m	122
Σχήμα Π - 28: <Σενάριο 8> Κατανομή της ορατότητας στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8$ m	122
Σχήμα Π - 29: <Σενάριο 9> Κατανομή της ορατότητας στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8$ m	123
Σχήμα Π - 30: <Σενάριο 10> Κατανομή της ορατότητας στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8$ m	123

1. Εισαγωγή

1.1 Η σημασία της ασφάλειας των σηράγγων στις οδικές μεταφορές

Οι οδικές μεταφορές έχουν αποτελέσει τον κύριο τρόπο μετακίνησης ανθρώπων και εμπορευμάτων στην Ευρώπη για τα τελευταία 60 χρόνια, και έχουν γνωρίσει σημαντική αύξηση κατά αυτή την περίοδο (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2014). Ωστόσο, αυτό είχε ως αποτέλεσμα και σοβαρά προβλήματα, όπως η κυκλοφορική συμφόρηση, η ρύπανση και ο υψηλός κίνδυνος ατυχημάτων, καθώς στα δίκτυα μεταφορών αυξήθηκε η κινητικότητα, οι δρόμοι χρησιμοποιήθηκαν ανισομερώς και ο αριθμός και η δραστηριότητα των επιβατικών και εμπορικών οχημάτων αυξήθηκε (Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και Συμβούλιο, 2001). Για να λυθούν αυτά τα προβλήματα και να δημιουργηθεί ένα σύστημα μεταφορών που να είναι πιο ασφαλές, πιο βιώσιμο και πιο φιλικό προς το περιβάλλον η Ευρωπαϊκή Ένωση αποφάσισε να ξεκινήσει μια κοινή πολιτική μεταφορών μεταξύ των κρατών μελών. Η Επιτροπή της Ευρωπαϊκής Κοινότητας δημοσίευσε τη Λευκή Βίβλο το Σεπτέμβριο του 2001, η οποία περιέχει προτάσεις για μια κοινή ευρωπαϊκή πολιτική μεταφορών, με σκοπό να επιτευχθεί μέχρι το 2010.

Ο βασικός σκοπός των προτάσεων που παρουσιάζονται είναι να καταστήσουν την οδική ασφάλεια πιο ισχυρή και να ορίσουν νέους κανόνες για να το επιτύχουν. Όπως αναφέρεται στο κείμενο, το οδικό δίκτυο είναι το μεγαλύτερο μέρος του δικτύου μεταφορών, αλλά είναι και το πιο επικίνδυνο και δαπανηρό όσον αφορά τις ανθρώπινες ζωές. «Από το 1970, πάνω από 1.64 εκατομμύρια άνθρωποι έχουν χάσει τη ζωή τους σε οδικά ατυχήματα» (Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και Συμβούλιο, 2001). Οι οδικές σήραγγες αποτελούν επίσης σημαντικό στοιχείο του οδικού

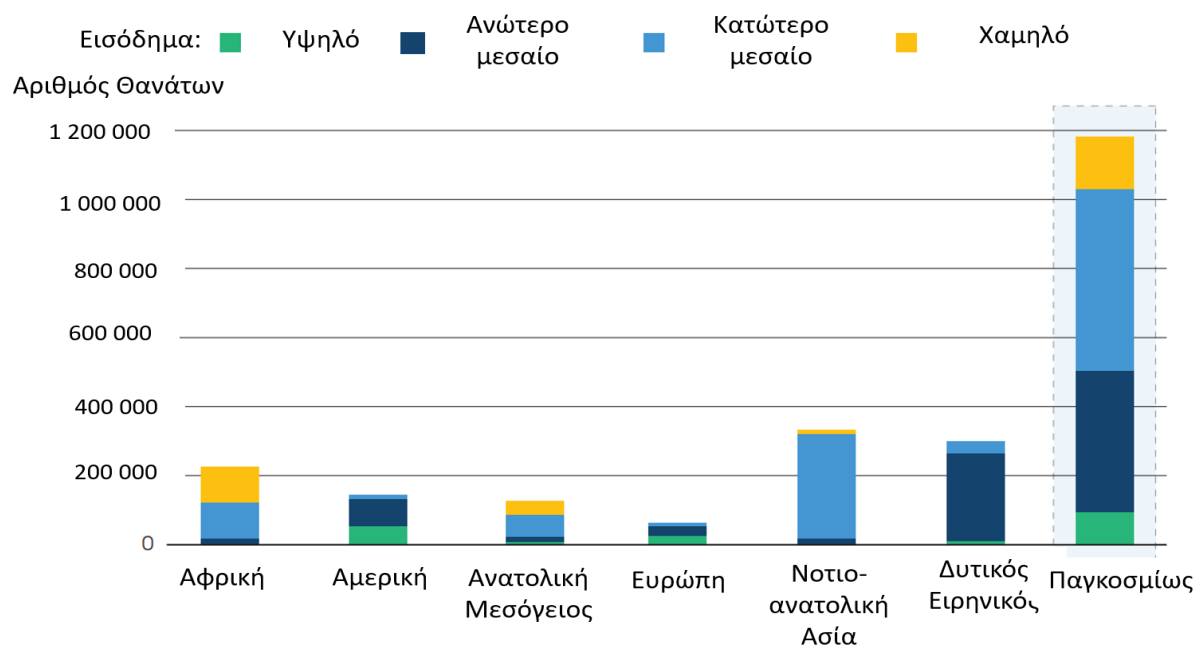
δικτύου και είναι απαραίτητες για να συνδέσουν διάφορες περιοχές της Ευρώπης που διαχωρίζονται από σύνορα (Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και Συμβούλιο, 2001).

Το κείμενο της Λευκής Βίβλου για τις Μεταφορές επισημαίνει τη σπουδαιότητα να τις κάνουμε πιο ασφαλείς μέσω νέων νόμων. Πιο συγκεκριμένα, αναφέρει ότι είναι απαραίτητο να εξεταστεί η δημιουργία ενός ευρωπαϊκού νομικού πλαισίου, πιθανόν με τη μορφή μιας οδηγίας που θα εναρμονίζει τα ελάχιστα κριτήρια ασφάλειας, με σκοπό να διασφαλιστεί ένα υψηλό επίπεδο προστασίας για τους χρήστες οδών και σιδηροδρόμων που αποτελούν κυρίως μέρος του διευρωπαϊκού δικτύου μεταφορών» (Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και Συμβούλιο, 2001).

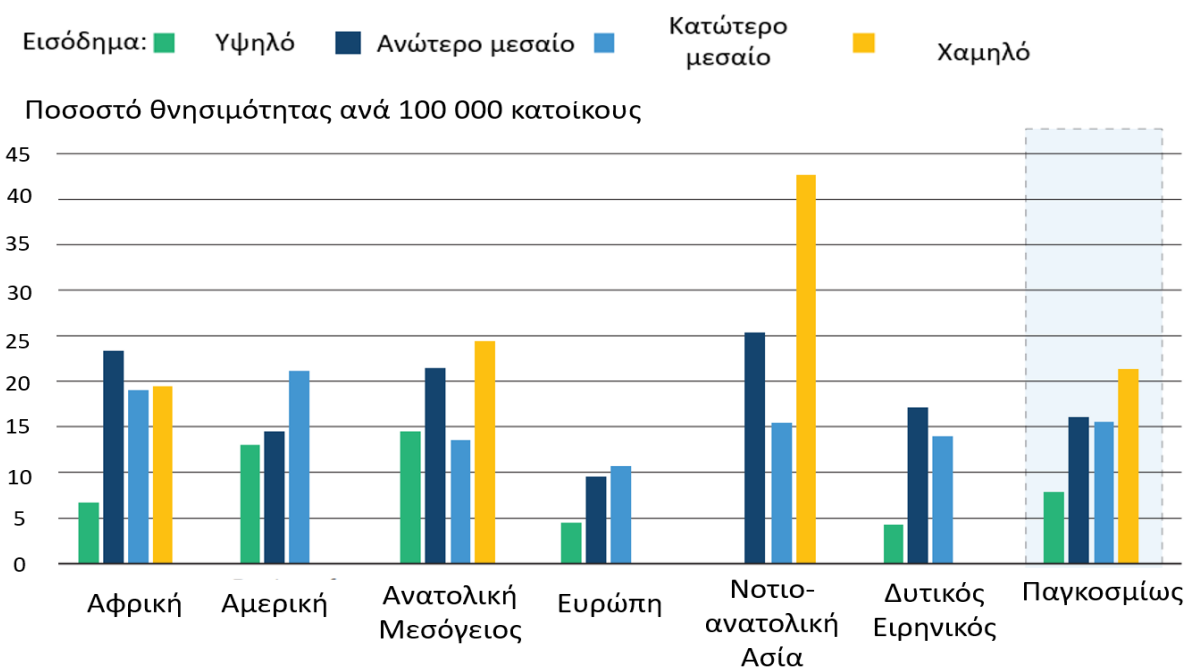
Η ασφάλεια δεν ήταν ένα σημαντικό ζήτημα για τις οδικές σήραγγες μέχρι πριν από μερικές δεκαετίες. Δύο πρόσφατα, πολύ σοβαρά ατυχήματα στην Ευρώπη (Lacroix D., 2007) έκαναν επιτακτική την ανάγκη για ασφάλεια στις σήραγγες και στους υπόγειους χώρους. Στη σήραγγα του Τάουερν στην Αυστρία, κοντά στο Σάλτσμπουργκ, 12 άνθρωποι έχασαν τη ζωή τους στις 29 Μαΐου 1999, όταν φορτηγό και αυτοκίνητο συγκρούστηκαν με αποτέλεσμα να σημειωθούν ισχυρές εκρήξεις. Στη σήραγγα του Μον Μπλάν, που ενώνει τη Γαλλία με την Ιταλία, 39 άνθρωποι έχασαν τη ζωή τους στις 24 Μαρτίου 1999, όταν μια φωτιά ξέσπασε μέσα στη σήραγγα.

Αξίζει να σημειωθούν μερικά ακόμη ατυχήματα όπως ήταν αυτό που συνέβη στις 24 Οκτωβρίου 2001 στην οδική σήραγγα Γκοταρντ, που συνδέει την Ιταλία με την Ελβετία, μετά από μετωπική σύγκρουση φορτηγών όπου 11 άνθρωποι έχασαν τη ζωή τους. Στις 28 Οκτωβρίου 1995 λίγο έξω από τη Μπακού, την πρωτεύουσα του Αζερμπαϊτζάν 300 άνθρωποι έχασαν τη ζωή τους όταν τρένο πήρε φωτιά μέσα σε σήραγγα. Στις 18 Νοεμβρίου 1987 31 άνθρωποι έχασαν τη ζωή τους όταν ξέσπασε φωτιά στις κυλιόμενες σκάλες στο σταθμό Κινγκς Κρος του μετρό του Λονδίνου.

Η οδική ασφάλεια αποτελεί γενικότερα ένα μείζον ζήτημα σε παγκόσμιο επίπεδο. Στο Σχήμα 1-1 που ακολουθεί παρουσιάζεται ο αριθμός των θανάτων που προκλήθηκαν σε τροχαία δυστυχήματα κατά το έτος 2021, ανά περιοχή και ανά ύψος εισοδήματος, σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (ΠΟΥ, 2021). Επιπλέον, στο Σχήμα 1-2 αποτυπώνεται το ποσοστό θνησιμότητας από τροχαία δυστυχήματα ανά 100.000 κατοίκους και ανά περιοχή επίπεδο εισοδήματος (ΠΟΥ, 2021).



Σχήμα 1-1: Αριθμός θανάτων από τροχαία δυστυχήματα ανά περιοχή και επίπεδο εισοδήματος της (ΠΟ, 2021)



Σχήμα 1-2: Ποσοστό θνησιμότητας από τροχαία δυστυχήματα ανά 100.000 κατοίκους ανά περιοχή και επίπεδο εισοδήματος (ΠΟ, 2021)

1.2 Η ευρωπαϊκή οδηγία για την ασφάλεια των οδικών σηράγγων

Τα σοβαρά ατυχήματα που διαδραματίστηκαν υπογράμμισαν ότι η ασφάλεια των σηράγγων είναι ένα βασικό ζήτημα και κατέδειξαν την απουσία ενιαίας νομοθεσίας στις χώρες της Ευρώπης. Η υφιστάμενη νομοθεσία για τις οδικές σήραγγες είχε σημαντικές διακρίσεις μεταξύ των κρατών, καθώς σε μερικές χώρες υπήρχε ενώ σε άλλες ήταν υποτυπώδης έως ανύπαρκτη (Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και Συμβούλιο, 2001). Γι' αυτό βρέθηκε ως λύση να υπάρξουν κοινές και πιο συχνές σχετικές ρυθμίσεις. Στις 29 Απριλίου του 2004 γίνεται το επόμενο βήμα με τη δημοσίευση της οδηγίας 2004/54/EK από το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και Συμβούλιο, που αφορά τις ελάχιστες απαιτήσεις ασφάλειας για τις σήραγγες του διευρωπαϊκού δρόμου. Πολλές οδικές σήραγγες φτάνουν σε μεγάλο μήκος, με κάποιες να είναι αρκετά χιλιόμετρα, πράγμα που κάνει την πιθανότητα να συμβεί ατύχημα μεγαλύτερη (Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και Συμβούλιο, 2001).

Η οδηγία αυτή ισχύει για όλες τις σήραγγες που είναι πάνω από 500 μέτρα και αφορά τόσο αυτές που λειτουργούν, όσο και αυτές που είναι υπό κατασκευή ή υπό μελέτη. Η οδηγία καθορίζει, για αυτές τις σήραγγες:

1. Τα μέτρα ασφαλείας στα οποία θα πρέπει να ανταποκρίνονται: Τα μέτρα αυτά αποσκοπούν στην προστασία των χρηστών της σήραγγας και στη διασφάλιση ότι θα μπορούν να φύγουν με ασφάλεια σε περίπτωση κινδύνου. Αυτό γίνεται έμμεσα, θέτοντας πρότυπα για το πώς θα πρέπει να σχεδιάζονται οι σήραγγες, ώστε να μην γίνονται εύκολα ατυχήματα. Αλλά και άμεσα, με τη θέσπιση ελάχιστων απαιτήσεων για τη σήμανση, ώστε να βοηθούν τους χρήστες να βγουν από τη σήραγγα.
2. Καθορίζει ποιες είναι οι αρχές που είναι υπεύθυνες για την διαχείριση, τον έλεγχο και την εποπτεία των σηράγγων: Στην οδηγία αναφέρονται οι υποχρεώσεις τους σχετικά με την διατήρηση της ασφάλειας των σηράγγων και οι μέθοδοι που ακολουθούν για να το πετύχουν.
3. Ορίζει την εκτέλεση ανάλυσης κινδύνου: Η ανάλυση κινδύνου απαιτείται κυρίως σε περιπτώσεις σηράγγων που δεν πληρούν τις απαιτήσεις και χρειάζεται μία τεχνική διαδικασία, στην οποία θα καθορίζονται άλλες, ισοδύναμες προϋποθέσεις αλλά και σε άλλες ειδικές περιπτώσεις. Η λεπτομερής και ακριβής μεθοδολογία αφήνεται στην υπεύθυνη διοικητική αρχή κάθε χώρας μέλους να ερευνηθεί και να συγγραφεί, ως ξεχωριστή και προσαρμοσμένη στις απαιτήσεις κάθε εθνούς, μέσα σε ένα χρονικό πλαίσιο.

Αυτή η οδηγία ενσωματώθηκε στην ελληνική νομοθεσία στις 23 Νοεμβρίου 2007, με τη δημοσίευση του Προεδρικού Διατάγματος υπ' αριθμόν 230 (Π.Δ.230/2007). Οι οδηγίες για τη μεθοδολογία ανάλυσης κινδύνου, που είναι απαραίτητες στο διάταγμα, εκδόθηκαν από την υπεύθυνη Ελληνική Διοικητική Αρχή Σηράγγων το 2009, μέχρι το 2011 όταν και ολοκληρώθηκαν.

Αυτές κατ'αρχήν αποτελούνται από δύο κείμενα, διαφορετικών τύπων ανάλυσης. Η μία αφορά την ανάλυση κινδύνου σε περίπτωση συμμετοχής οχημάτων που μεταφέρουν επικίνδυνο φορτίο και η άλλη την περίπτωση μη εμπλοκής τέτοιων οχημάτων.

1.3 Αντικείμενο-Σκοπός

Σκοπός της Εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης της κλίσης οδικής σήραγγας στο φαινόμενο της φωτιάς και ακολούθως στον διαθέσιμο χρόνο που έχουν οι χρήστες μέχρι να ξεκινήσουν την εκκένωση.

Η παρούσα Εργασία ασχολείται με την περίπτωση εκκένωσης μιας οδικής σήραγγας μονής κατεύθυνσης και μήκους 800 m, όταν υπάρχει φωτιά στο μέσον της μέγιστου ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας 100 MW αλλά δεν εμπλέκονται οχήματα που μεταφέρουν επικίνδυνα φορτία. Η έξοδος διαφυγής βρίσκεται στα 300 m από τη φωτιά.

Οι παράμετροι που μεταβάλλονται σε κάθε σενάριο που προσομοιώνεται είναι η κλίση της σήραγγας (0%, $\pm 1\%$ και $\pm 3\%$) και η ταχύτητα του αέρα μέσα στη σήραγγα (0 m/s και 1 m/s).

Για την υπολογιστική προσομοίωση της φωτιάς χρησιμοποιείται το πρόγραμμα Pyrosim και στη συνέχεια για την προσομοίωση της εκκένωσης χρησιμοποιείται το πρόγραμμα Pathfinder. Η επιρροή της κλίσης της σήραγγας στη διαδικασία της εκκένωσης ποσοτικοποιείται μέσω της αθροιστικής επιβάρυνσης που έχουν οι χρήστες λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας και της έκθεσης σε τοξικές ουσίες.

Οι κύριοι άξονες της εργασίας εστιάζουν:

- Στον καθορισμό της επιρροής της κλίσης της σήραγγας στην εξέλιξη του φαινομένου της φωτιάς.
- Στην αξιολόγηση της επίδρασης στον απαιτούμενο και στο διαθέσιμο χρόνο για την εκκένωση.
- Στη σύγκριση των αποτελεσμάτων για τις διάφορες γωνίες κλίσης και για κάθε τιμή της ταχύτητας του αέρα

1.4 Περιγραφή του Προβλήματος: Η επιρροή της κλίσης της σήραγγας στην εξέλιξη της πυρκαγιάς

Κατά τη διάρκεια μίας πυρκαγιάς σε σήραγγα το κύριο παράγωγο είναι ο καπνός. Μέσω της κίνησης του καπνού μεταφέρονται στη σήραγγα τα τοξικά προϊόντα της καύσης και ταυτόχρονα αυξάνεται η θερμοκρασία. Αυτό συμβαίνει διότι ο καπνός αποτελεί μία αέρια μάζα η οποία κινείται με κατεύθυνση από τα θερμότερα σημεία (πηγή της φωτιάς) προς τα ψυχρότερα (στέψη της σήραγγας).

Ωστόσο, όταν η κλίση της σήραγγας δεν είναι μηδενική, αυτό που παρατηρείται είναι το φαινόμενο της καμινάδας, δηλαδή ο ζεστός καπνός που είναι ελαφρύτερος κατευθύνεται προς

τα επάνω, ενώ ο ψυχρότερος αέρας μετακινείται πιο χαμηλά. Αυξανόμενης της κλίσης το φαινόμενο αυτό είναι εντονότερο.

Επομένως, στην περίπτωση που ο καπνός διοχετεύεται προς την κατεύθυνση που επιχειρούν να κινηθούν και οι χρήστες (είτε λόγω της κλίσης είτε λόγω του αερισμού της σήραγγας), αναμένεται να επηρεαστεί αρνητικά η διαδικασία της εκκένωσης. Ωστόσο, εάν στη σήραγγα υπάρχει αερισμός που ωθεί τον αέρα προς την αντίθετη κατεύθυνση, αξίζει να μελετηθεί υπό ποιες προϋποθέσεις η δράση του θα υπερκεράσει αυτή της κλίσης.

1.5 Δομή της Εργασίας

Η εργασία διαρθρώνεται ως εξής:

1ο Κεφάλαιο: Παρουσιάζεται η σπουδαιότητα της ασφάλειας των οδικών σηράγγων για τις οδικές μεταφορές, τα προβλήματα που προκύπτουν από την έλλειψη ενιαίων κριτηρίων και η ευρωπαϊκή οδηγία που θεσπίστηκε για να βελτιώσει την κατάσταση. Επιπλέον επισημαίνεται ότι οι οδικές σήραγγες είναι απαραίτητες για να συνδέσουν διάφορες περιοχές της Ευρώπης, αλλά είναι και πολύ επικίνδυνες, όπως φάνηκε από τα σοβαρά ατυχήματα που συνέβησαν στο παρελθόν. Στη συνέχεια γίνεται μία συνοπτική περιγραφή του σκοπού της εργασίας της δομής της καθώς και της μεθοδολογίας που χρησιμοποιήθηκε.

2ο Κεφάλαιο: Γίνεται ανάλυση και σχολιασμός της βιβλιογραφίας και της έρευνας που έχει πραγματοποιηθεί γύρω από το φαινόμενο τη φωτιάς σε οδική σήραγγα και της ακόλουθης εκκένωσης. Αρχικά πραγματοποιείται εκτενής αναφορά στις αρχές σχεδιασμού φωτιάς σε οδική σήραγγα κάνοντας διάκριση ανάμεσα στην πιθανοτική προσέγγιση (με τη χρήση δέντρου σφαλμάτων) και στην ντετερμινιστική προσέγγιση (με τη χρήση της καμπύλης του ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας - HRR). Ακολούθως, παρουσιάζεται η φιλοσοφία πίσω από τα σενάρια φωτιάς καθώς και τα προτυποποιημένα σενάρια πυρκαγιάς που θα χρησιμοποιηθούν στην παρούσα εργασία, όπως αυτά περιγράφονται από την Διοικητική Αρχή Σηράγγων (ΔΑΣ). Επιπλέον, παρουσιάζεται το λογισμικό εργαλείο Pyrosim που θα χρησιμοποιηθεί για τις προσομοιώσεις της φωτιάς.

Στη συνέχεια, γίνεται μετάβαση στο κομμάτι που αφορά στην εκκένωση. Αρχικά, αναλύονται οι αρχές σχεδιασμού μίας ασφαλούς εκκένωσης και η φιλοσοφία που ακολουθείται από τα διεθνή πρότυπα (των οργανισμών: NFPA, CFPA, SFPE και PIARC). Ακολούθως, περιγράφονται τα στάδια εκκένωσης και παρουσιάζεται η ποσοτικοποίηση της εκκένωσης μέσα από τις έννοιες του διαθέσιμου χρόνου ASET και του απαιτούμενου χρόνου RSET. Υπογραμμίζονται τα όρια βιωσιμότητας των παραμέτρων που επηρεάζουν τον ανθρώπινο οργανισμό στην προσπάθειά του να εκκενώσει (θερμότητα, εκπομπή αερίων, υποξία και ορατότητα). Τα όρια αυτά παίζουν καθοριστικό ρόλο στην εκτίμηση του διαθέσιμου χρόνου εκκένωσης. Επιπλέον, παρουσιάζεται το λογισμικό εργαλείο Pathfinder που θα χρησιμοποιηθεί για τις προσομοιώσεις της εκκένωσης.

3^ο Κεφάλαιο: Γίνεται περιγραφή της προσομοίωσης φωτιάς και της εκκένωσης με τη χρήση των λογισμικών Pyrosim και Pathfinder αντίστοιχα.

Στο πρώτο σκέλος του κεφαλαίου, που αφορά στο σχεδιαστικό κομμάτι της προσομοίωσης, μελετάται σήραγγα με διαστάσεις:

- Μήκος: 800 m
- Πλάτος: 11 m
- Ύψος: 8 m

Για τη φωτιά σχεδιασμού επιλέγεται το προτυποποιημένο σενάριο πυρκαγιάς υπ' αριθμόν 7 από τη ΔΑΣ, το οποίο αφορά στην ανάφλεξη ενός βαρέως φορτηγού με μέγιστο ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας στα 100 MW.

Οι παράμετροι που μεταβάλλονται σε κάθε σενάριο που προσομοιώνεται είναι η κλίση της σήραγγας (0%, $\pm 1\%$ και $\pm 3\%$) και η ταχύτητα του αέρα μέσα στη σήραγγα (0 m/s και 1 m/s).

Το δεύτερο σκέλος του κεφαλαίου αναφέρεται στον σχεδιασμό της προσομοίωσης της εκκένωσης. Αρχικά, μεταφέρονται στο Pathfinder τα απαιτούμενα δεδομένα τα οποία έχουν προκύψει από τις προσομοιώσεις στο λογισμικό Pyrosim. Τα δεδομένα αυτά είναι σχετικά με την εξέλιξη στο χώρο και στον χρόνο των παραμέτρων της θερμοκρασίας, της συγκέντρωσης των αερίων και της ορατότητας. Στη συνέχεια ορίζονται οι χρήστες που βρίσκονται μέσα στη σήραγγα η κατηγοριοποίησή τους γίνεται με βάση την απόστασή τους από το μέτωπο της φωτιάς (10, 50, 100, 150 και 200 m). Σε κάθε κατηγορία χρηστών δημιουργούνται χρήστες οι οποίοι έχουν διάφορες τιμές χρονοκαθυστέρησης, έτσι ώστε να διερευνηθεί ποια είναι η μέγιστη χρονοκαθυστέρηση που μπορεί να έχει κάθε κατηγορία.

Η θέση των χρηστών τη στιγμή που ξεσπάει η πυρκαγιά διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην χρονοκαθυστέρηση που παρεμβάλλεται από την έναρξη της φωτιάς έως ότου να ξεκινήσουν τη διαδικασία της εκκένωσης. Οι τιμές για την χρονοκαθυστέρηση κυμαίνονται από 10 sec έως 300 sec. Οι δύο αυτές τιμές είναι ακραίες περιπτώσεις για να καταφανεί είτε ότι η εν λόγω κατηγορία δεν έχει καθόλου διαθέσιμο χρόνο για να εκκενώσει, είτε ότι έχει παρά πολύ χρόνο τουλάχιστον 5 min. Τα 5 min θεωρούνται επαρκές χρονικό διάστημα και δεν μελετάται μεγαλύτερη χρονοκαθυστέρηση.

Η εκκένωση ενός χρήστη λογίζεται επιτυχής όταν αυτός καταφέρει να φτάσει στην έξοδο διαφυγής. Η απόσταση της εξόδου διαφυγής λαμβάνεται στα 300 m από τη φωτιά, που αποτελεί τη μέγιστη τιμή με βάση τον κανονισμό NFPA.

4^ο Κεφάλαιο: Περιγράφονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φωτιάς και της εκκένωσης.

Για κάθε σενάριο αρχικά γίνεται εξαγωγή και σχολιασμός των αποτελεσμάτων της φωτιάς και ακολούθως της εκκένωσης.

Για την ανάλυση της φωτιάς δίνεται έμφαση στις παραμέτρους που έχουν να κάνουν με τη βιωσιμότητα και επηρεάζουν τη διαδικασία της εκκένωσης. Πιο συγκεκριμένα, δημιουργούνται

γραφικές παραστάσεις στο χώρο και στο χρόνο που σχετίζονται με την εξάπλωση του καπνού, την κατανομή της θερμοκρασίας, τη συγκέντρωση του μονοξειδίου του άνθρακα και την διαθέσιμη ορατότητα των επιβατών.

Για τη μελέτη της εκκένωσης εξετάζεται η αθροιστική επιβάρυνση λόγω της φωτιάς που παρακωλύει την κίνηση των χρηστών. Η αθροιστική επιβάρυνση ποσοτικοποιείται μέσω της έκφρασης της κλασματικής δραστικής δόσης FED (Fractional Effective Dose), η οποία αντιστοιχεί στην κρισιμότερη από τις παραμέτρους της θερμοκρασίας και της τοξικότητας των αερίων. Σε κάθε σενάριο η θερμοκρασία είναι κρισιμότερη της τοξικότητας. Με βάση την αθροιστική επιβάρυνση, την απόσταση από την φωτιά και την χρονοκαθυστέρηση προκύπτει ποιος είναι ο απαιτούμενος χρόνος για να εκκενώσουν *οριακά* ολοι χρήστες.

Στο τελικό τμήμα του κεφαλαίου γίνεται σύνοψη των αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα αποτυπώνονται σε διαγράμματα με βασικότερο το νομογράφημα που συνδέει την παράμετρο της κλίσης της σήραγγας με τον διαθέσιμο χρόνο καθυστέρησης έναρξης εκκένωσης για κάθε ταχύτητα αερισμού.

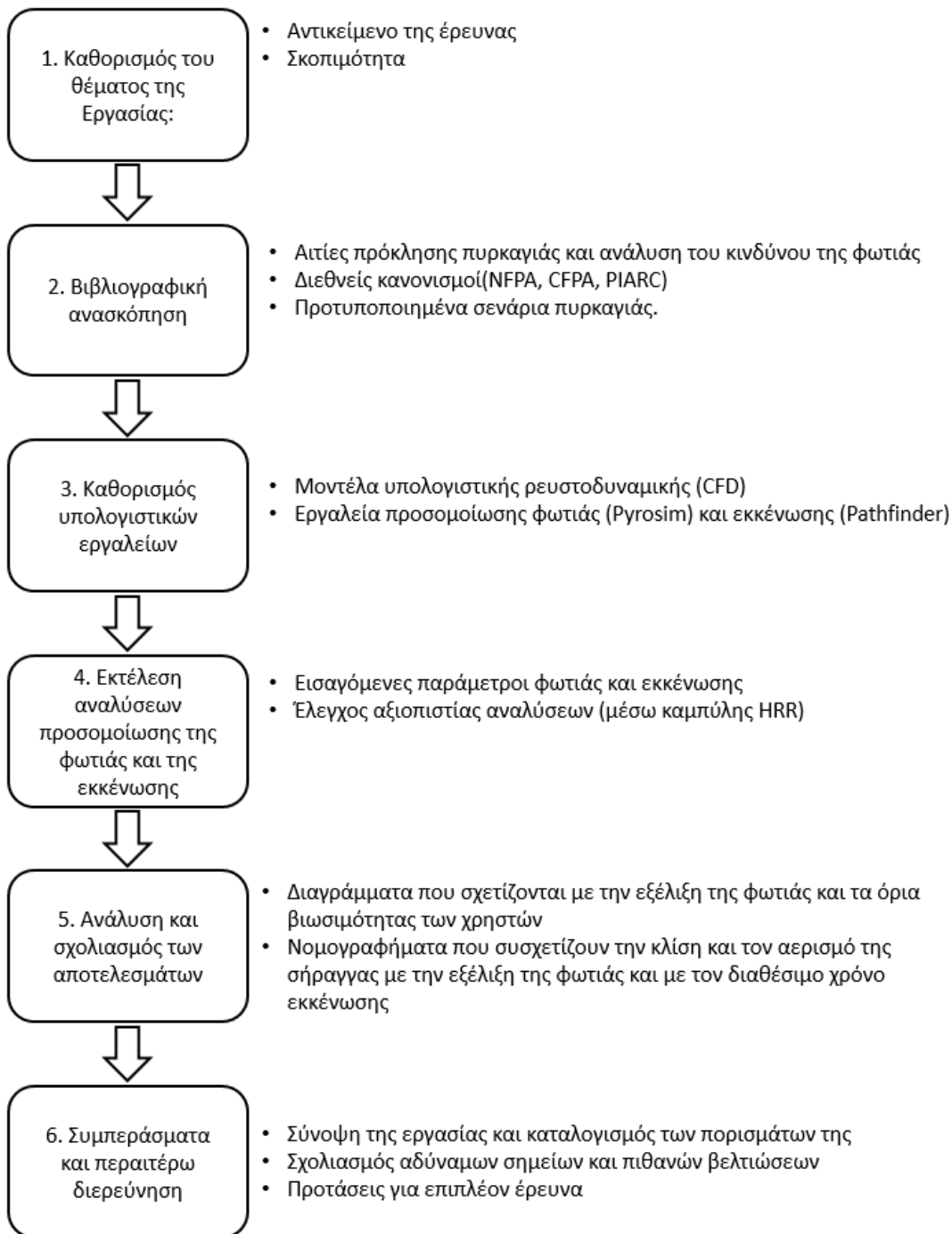
5^ο Κεφάλαιο: Συνοψίζονται τα αποτελέσματα της υπόψη εργασίας και ερμηνεύονται σε συμπεράσματα. Προκύπτει ότι η κλίση της σήραγγας διαδραματίζει ουσιαστικό ρόλο στην κίνηση του καπνού και όταν τον ωθεί προς την έξοδο διαφυγής δυσχεραίνει τη διαδικασία της εκκένωσης. Στην περίπτωση που η κλίση της σήραγγας είναι πιο έντονη τότε ο καπνός έχει την τάση να συσσωρεύεται σε ένα μεμονωμένο τμήμα πράγμα που επιβαρύνει λιγότερο τους χρήστες και άρα έχουν περισσότερο χρόνο στη διάθεσή τους σε σύγκριση με μία πιο ομοιόμορφη αλλά και πιο εκτεταμένη κατανομή του καπνού. Επίσης, στις περιπτώσεις κατά τις οποίες η κλίση είναι πιο έντονη η δράση της είναι πιο σημαντική σε σχέση με αυτή του αερισμού. Επιπλέον σε αυτό το Κεφάλαιο, διατυπώνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα καθώς και πιθανές βελτιώσεις στην ασφάλεια της σήραγγας σε περίπτωση πυρκαγιάς.

6^ο Κεφάλαιο: Παρουσιάζεται η βιβλιογραφία και τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν για την παρούσα εργασία.

Παράρτημα Παρουσιάζονται γραφήματα για την εποπτικότερη παρουσίαση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων. Πιο συγκεκριμένα, από τις αναλύσεις της εκκένωσης παρουσιάζεται η κατανομή της αθροιστικής επιβάρυνσης FED των χρηστών λόγω της τοξικότητας των αερίων της καύσης. Επιπλέον, παρατίθενται τα διαγράμματα κατανομής της συγκέντρωσης του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και της ορατότητας.

1.6 Μεθοδολογία

Στο ακόλουθο Σχήμα παρουσιάζεται επιγραμματικά η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία.



Σχήμα 1-3: Διαγραμματική απεικόνιση της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε

2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση και εργαλεία

2.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται περιγραφή των αρχών σχεδιασμού της φωτιάς και της εκκένωσης. Στο πρώτο σκέλος του κεφαλαίου, περιγράφεται ο τρόπος ανάλυσης του κινδύνου φωτιάς σε μία σήραγγα (με πιθανοτική και ντετερμινιστική προσέγγιση). Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα προτυποποιημένα σενάρια φωτιάς σχεδιασμού (από τη διοικητική αρχή σιδηρόδρομων) και τέλος γίνεται αναφορά στα μοντέλα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής με έμφαση στο λογισμικό Pyrosim που είναι αυτό που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία.

Στο δεύτερο σκέλος του κεφαλαίου αναλύεται η φιλοσοφία σχεδιασμού της εκκένωσης σιδηρόδρομων. Περιγράφονται οι έννοιες του διαθέσιμου και του απαιτούμενου χρόνου εκκένωσης και παρουσιάζονται οι ισχύοντες κανονισμοί και κατευθυντήριες οδηγίες (NFPA, CFPA και PIARC).

2.2 Αρχές σχεδιασμού φωτιάς σε οδική σήραγγα

2.2.1 Γενικά

Η φωτιά σε οδικές σήραγγες είναι ένα ιδιαίτερο πρόβλημα σχεδιασμού που μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρές συνέπειες αν δεν αντιμετωπιστεί κατάλληλα. Παρατηρήσεις από πειράματα φωτιάς σε πραγματικές συνθήκες έχουν δείξει ότι ο ρυθμός εκπομπής θερμότητας εξαρτάται από τις συνθήκες αερισμού, τη γεωμετρία της σήραγγας και την ποσότητα καυσίμου. Αν και αυτά τα πειράματα έχουν προσφέρει χρήσιμες πληροφορίες, είναι γενικά πολύ δαπανηρά να διεξάγονται και τα δεδομένα είναι περιορισμένα. Τα πειράματα βασίζονται συχνά σε μια σταθερή παράμετρο, όπως η ταχύτητα του αέρα, η γεωμετρία ή η κλίση της σήραγγας, η οποία μπορεί να διαφέρει από τις συνθήκες σχεδιασμού που υπάρχουν για ένα πραγματικό έργο σήραγγας (M. K. Cheong, 2008).

2.2.2 Ανάλυση κινδύνου φωτιάς σε σήραγγα (Tunnel Fire Risk Analysis)

2.2.2.1 Πιθανοτική Προσέγγιση (Probabilistic Approach)

Στο πρώτο στάδιο της ανάλυσης, το επίπεδο επικινδυνότητας για την πρόκληση πυρκαγιάς χρησιμοποιείται ως κριτήριο για να προσδιοριστούν τα πιθανά σενάρια φωτιάς που θα μπορούσαν να συμβούν στη σήραγγα. Στην απλούστερη μορφή του, ο κίνδυνος φωτιάς μπορεί να αναπαρασταθεί με τη μορφή εξίσωσης ως:

Κίνδυνος Φωτιάς = Πιθανότητα x Συνέπεια

όπου ο όρος της πιθανότητας είναι η πιθανότητα διάφορων αιτίων φωτιάς και ο όρος των συνεπειών προκύπτει από τα χαρακτηριστικά ανάπτυξης της φωτιάς, όπως το εύφλεκτο υλικό στη σήραγγα (π.χ. συστήματα στη σήραγγα ή οχήματα και τα εμπορεύματά τους). Δεδομένου ότι ο αριθμός των σεναρίων φωτιάς σε μια σήραγγα μπορεί να είναι πολυάριθμος, γίνεται σαφές ότι δεν είναι δυνατό να σχεδιάσουμε ένα σύστημα ελέγχου καπνού για κάθε πιθανό περιστατικό (M. K. Cheong, 2008).

Αιτίες πρόκλησης πυρκαγιάς σε σήραγγα

Από παλαιότερα διεθνή περιστατικά πυρκαγιάς σε σήραγγες, οι αιτίες της πυρκαγιάς σε οδικές σήραγγες προέρχονται γενικά από το ίδιο το όχημα. Οι παράγοντες που συμβάλλουν στην αιτία της πυρκαγιάς του μηχανοκίνητου οχήματος μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις κατηγορίες:

- ελαττωματικό όχημα
- πράξη απροσεξίας
- εμπρησμός
- το επακόλουθο μιας σύγκρουσης .

Ανάλογα με τη χώρα και την τοποθεσία της σήραγγας, η συχνότητα των δεδομένων για το περιστατικό πυρκαγιάς του οχήματος ανά αιτία μπορεί να διαφέρει (M. K. Cheong, 2008).

Δέντρα Σφαλμάτων (Fault Trees)

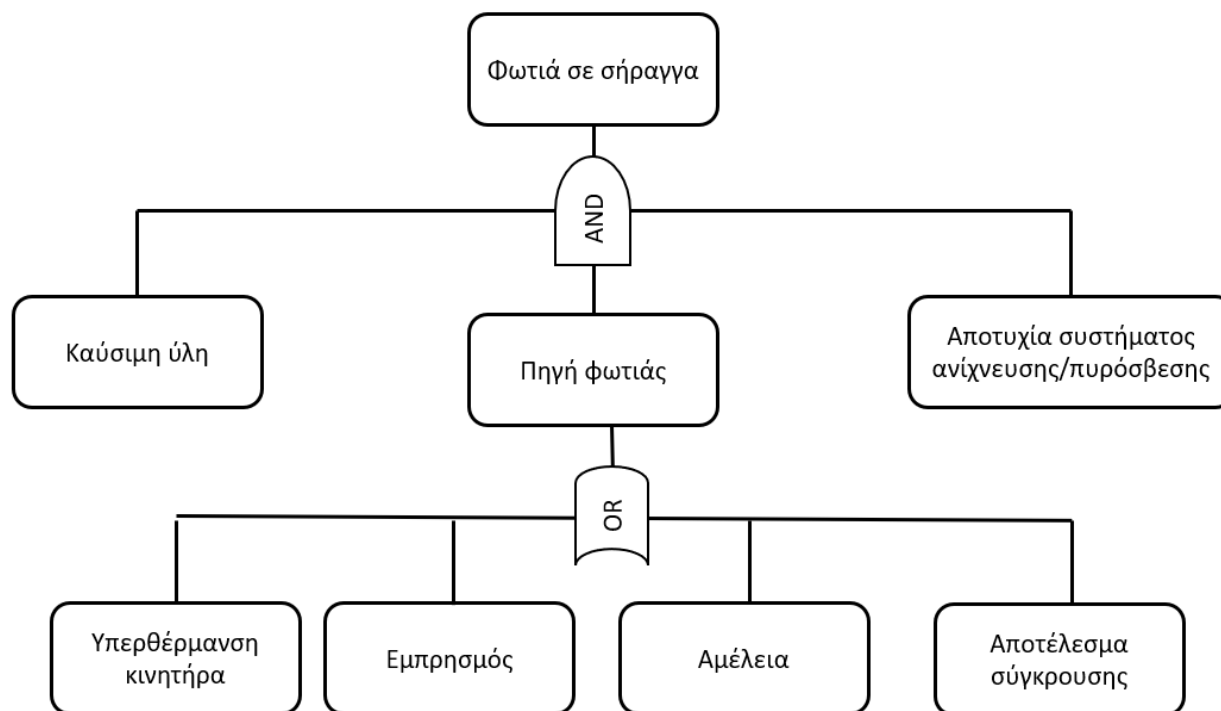
Ένα δέντρο σφαλμάτων είναι ένα γραφικό εργαλείο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αναλύσει τις αιτίες και τις πιθανότητες ενός συμβάντος πυρκαγιάς σε ένα σύστημα ή μια εγκατάσταση. Το δέντρο σφαλμάτων ξεκινά με ένα κορυφαίο συμβάν, που είναι η φωτιά σε σήραγγα. Το κορυφαίο συμβάν συνδέεται στη συνέχεια με χαμηλότερου επιπέδου συμβάντα που μπορούν να συμβάλουν στην εμφάνισή του, χρησιμοποιώντας λογικές συνδέσεις που αντιπροσωπεύουν τις σχέσεις μεταξύ των συμβάντων. Τα χαμηλότερου επιπέδου συμβάντα ονομάζονται βασικά συμβάντα και μπορεί να είναι οι αστοχίες ή οι βλάβες των συστημάτων ή οι ανθρώπινες ενέργειες που μπορούν να προκαλέσουν ή να διαδώσουν τη φωτιά. Ακολουθώντας τις διαδρομές από τα βασικά συμβάντα προς το κορυφαίο συμβάν, ένα δέντρο σφαλμάτων μπορεί να προσδιορίσει τους ελάχιστους συνδυασμούς συμβάντων που μπορούν να προκαλέσουν τη φωτιά, που ονομάζονται ελάχιστες διαδρομές. Ένα δέντρο σφαλμάτων μπορεί επίσης να ποσοτικοποιηθεί αποδίδοντας πιθανότητες ή συχνότητες στα βασικά συμβάντα οι οποίες ακολουθώντας τις λογικές συνδέσεις καθορίζουν την πιθανότητα ή τη συχνότητα του κορυφαίου συμβάντος. Αυτό μπορεί να βοηθήσει στην αξιολόγηση του κινδύνου φωτιάς και στη σύγκριση διαφορετικών σεναρίων φωτιάς καθώς επίσης μπορεί να βοηθήσει στον σχεδιασμό μέτρων για τον περιορισμό της πιθανότητας πυρκαγιάς (M. K. Cheong, 2008).

Μια ανάλυση με τη χρήση δένδρου σφαλμάτων μπορεί να είναι χρήσιμη για την ανάλυση του κινδύνου πυρκαγιάς διότι:

- Παρέχει ένα συστηματικό και λογικό τρόπο για να προσδιορίσει και να οργανώσει τις πιθανές αιτίες και τις συνέπειες μίας πυρκαγιάς σε μία σήραγγα
- Βοηθά στην καλύτερη κατανόηση της αλληλεπίδρασης και της εξάρτησης μεταξύ διαφορετικών παραγόντων που επηρεάζουν τον κίνδυνο πυρκαγιάς.
- Παρέχει μια οπτική αναπαράσταση της επικινδυνότητας δημιουργίας πυρκαγιάς, που μπορεί να διευκολύνει την επικοινωνία και τη συζήτηση μεταξύ των εμπλεκόμενων φορέων.

- Βοηθά στην ποσοτική αξιολόγηση του κινδύνου πυρκαγιάς, χρησιμοποιώντας δεδομένα από ιστορικά στοιχεία, πειράματα, προσομοιώσεις ή εκτιμήσεις εμπειρογνομόνων.
- Βοηθά στην ιεράρχηση των πιο κρίσιμων παραγόντων που συμβάλλουν στον κίνδυνο δημιουργίας πυρκαγιάς και στον εντοπισμό των πιο αποτελεσματικών τρόπων μείωσής του.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα ενός δένδρου σφαλμάτων στην ανάλυση επικινδυνότητας πυρκαγιάς σε σήραγγα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2-1: Παράδειγμα δένδρου σφαλμάτων σε φωτιά μέσα σε οδική σήραγγα

Αυτό το δένδρο σφαλμάτων ξεκινά με το κορυφαίο γεγονός, που είναι η δημιουργία μιας φωτιάς σε μια σήραγγα. Το κορυφαίο γεγονός συνδέεται με τρία ενδιάμεσα γεγονότα, που είναι η παρουσία μιας πηγής φωτιάς, η παρουσία ενός καυσίμου και η αποτυχία του συστήματος ανίχνευσης ή πυρόσβεσης της φωτιάς. Κάθε ενδιάμεσο γεγονός συνδέεται περαιτέρω με γεγονότα χαμηλότερου επιπέδου (υπερθέρμανση κινητήρα, εμπρησμός, αμέλεια, αποτέλεσμα σύγκρουσης) που μπορούν να προκαλέσουν ή να συμβάλλουν σε αυτό, χρησιμοποιώντας λογικές συνδέσεις AND ή OR. Τα γεγονότα χαμηλότερου επιπέδου είναι τα βασικά γεγονότα, τα οποία είναι τα σφάλματα ή οι αστοχίες στα οποία μπορούν να αποδοθούν πιθανότητες ή συχνότητες με βάση δεδομένα ή την κρίση του μηχανικού. Για παράδειγμα, η πιθανότητα υπερθέρμανσης ενός κινητήρα οχήματος μπορεί να εκτιμηθεί από καταγεγραμμένα στατιστικά ή τεχνικές προδιαγραφές.

Το δένδρο σφαλμάτων μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για να προσδιορίσει τις ελάχιστες διαδρομές, οι οποίες είναι οι ελάχιστοι συνδυασμοί βασικών γεγονότων που μπορούν να οδηγήσουν στο κορυφαίο γεγονός. Για παράδειγμα, μία ελάχιστη διαδρομή είναι {υπερθέρμανση κινητήρα οχήματος, διαρροή καυσίμου, αποτυχία του συστήματος πυρόσβεσης}. Το δένδρο σφαλμάτων μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να υπολογίσει την πιθανότητα ή τη συχνότητα του κορυφαίου γεγονότος, μετακυλώντας τις πιθανότητες ή τις συχνότητες των βασικών γεγονότων μέσω των λογικών συνδέσεων. Αυτό όπως αναφέρθηκε παραπάνω βοηθά στην ποσοτική και συγκριτική αξιολόγηση του κινδύνου πυρκαγιάς.

2.2.2.2 Ντετερμινιστική Προσέγγιση (Deterministic Approach)

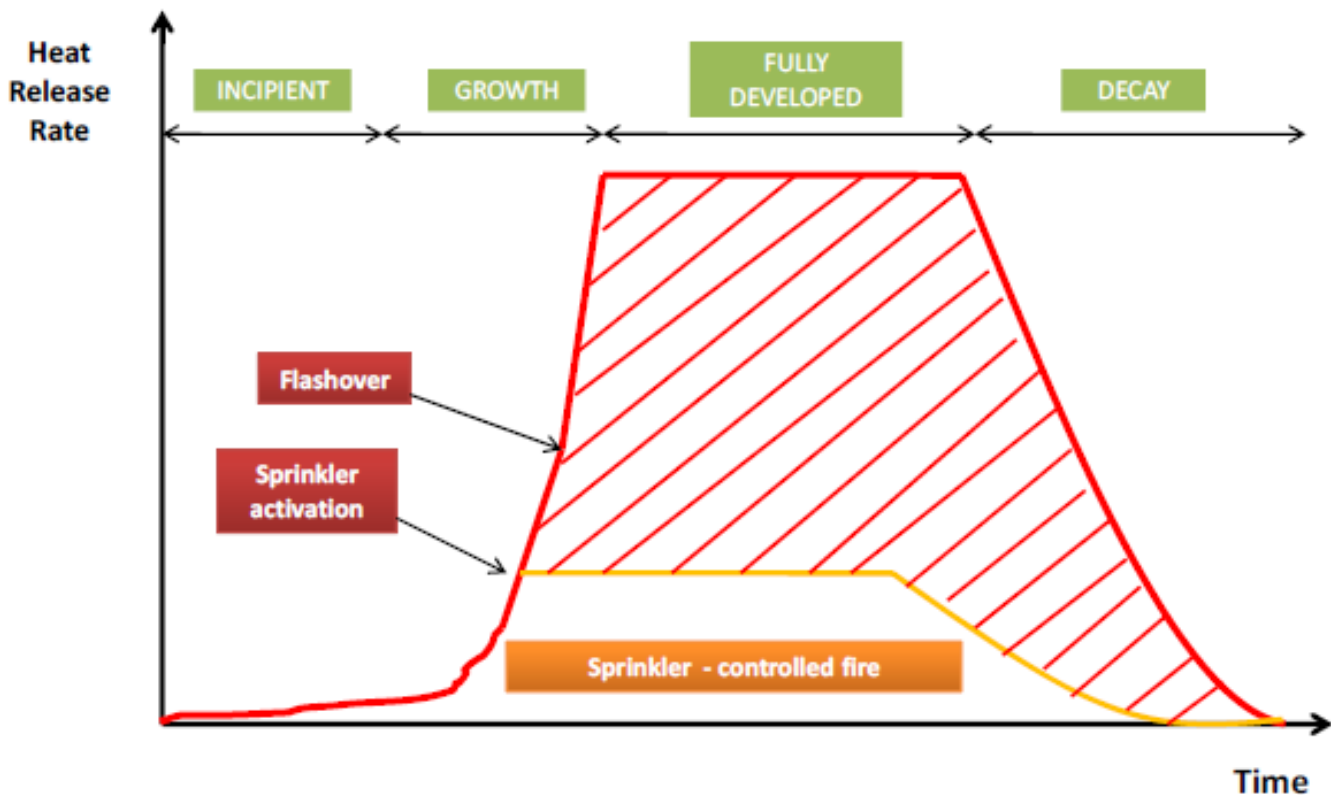
Ρυθμός Απελευθέρωσης Θερμότητας (Heat Release Rate – HRR)

Ο Ρυθμός Απελευθέρωσης Θερμότητας (HRR) είναι μια σημαντική παράμετρος για τη μελέτη της δυναμικής της φωτιάς και του κινδύνου. Ο HRR είναι ο ρυθμός με τον οποίο η φωτιά απελευθερώνει ενέργεια - αυτό είναι επίσης γνωστό ως ισχύς και μετράται σε μονάδες Watt (W), που είναι μια μονάδα Διεθνούς Συστήματος ίση με ένα Joule ανά δευτερόλεπτο. Ανάλογα με το μέγεθος της φωτιάς, ο HRR μετράται συνήθως σε MW.

Στο ακόλουθο διάγραμμα παρουσιάζεται η τυπική καμπύλη του HRR (CFPA E Guideline No19, 2009) η οποία χαρακτηρίζεται από τις εξής φάσεις:

Μια περιεκτική περιγραφή μιας πυρκαγιάς σχεδιασμού με βάση το ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια:

- Αρχική φάση (Incipient Phase): Χαρακτηρίζεται από διάφορες πηγές, οι οποίες θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν σιγοκαίει, φλεγόμενη ή ακτινοβολούμενη θερμότητα.
- Φάση ανάπτυξης (Growth Phase): Περιλαμβάνει την περίοδο εξάπλωσης της πυρκαγιάς μέχρι την αναλαμπή ή την πλήρη εμπλοκή της καύσιμης ύλης.
- Πλήρως ανεπτυγμένη φάση (Fully Developed): Χαρακτηρίζεται από σχετικά σταθερό ρυθμό καύσης, όπως παρατηρείται σε πυρκαγιές εξαερισμού ή ελεγχόμενες από την καύσιμη ύλη.
- Φάση εξασθένησης (Decay Phase): Περιλαμβάνει τη διάρκεια της μείωσης της σοβαρότητας της πυρκαγιάς.
- Κατάσβεση (Extinction): Συμβαίνει όταν δεν παράγεται πλέον ενέργεια.



Σχήμα 2-2: Τυπική καμπύλη ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας (HRR), (CFPA E Guideline No19, 2009)

Κατά τη διάρκεια φωτιάς σε σήραγγα, ο HRR εξαρτάται από παράγοντες όπως η πηγή ανάφλεξης και ο τύπος του οχήματος και το καύσιμό του, η γεωμετρία και το μέγεθός του, ο τύπος υλικού, η γεωμετρία της σήραγγας και οι συνθήκες αερισμού. Επιπλέον, οι αποστάσεις μεταξύ των οχημάτων είναι πολύ σημαντικές σε σχέση με τη διάδοση της φωτιάς.

Ο HRR συσχετίζεται φυσικά με το ρυθμό καύσης μάζας καυσίμου και με την παραγωγή θερμότητας, καπνού και αερίων. Ο HRR είναι μία βασική παράμετρος κατά τον σχεδιασμό των συστημάτων εξαερισμού και εκκένωσης, καθώς και για τη δομική αντοχή μιας σήραγγας. Οι παράμετροι σχεδιασμού συνήθως περιλαμβάνουν τιμές για τον HRR σε MW οι οποίες προέρχονται από πίνακες χαρακτηριστικών τιμών διαφόρων κατευθυντήριων γραμμών. Τέτοιοι πίνακες σχεδιασμού (βλ. Πίνακας 2-1) παρουσιάζονται στην έκθεση της Παγκόσμιας Ένωσης Οδών (PIARC) η οποία συντάχθηκε από την επιτροπή για τις οδικές σήραγγες και αφορά στην πυρκαγιά και στον έλεγχο του καπνού. Επιπλέον, αυτού του είδους πίνακες περιέχονται και στο Αμερικάνικο πρότυπο της Εθνικής Ένωσης Προστασίας από την Πυρκαγιά σε οδικές σήραγγες (NFPA), καθώς και στο πρότυπο BD 78/99 (Bridge Design) το οποίο είναι ένα συγκεκριμένο έγγραφο που καλύπτει το σχεδιασμό των οδικών σηράγγων και από την Highways Agency - γνωστή πλέον ως National Highways (M. K. Cheong, 2008).

Πίνακας 2-1: Θερμική απελευθέρωση (HRR) από διάφορους τύπους φορτίων πυρκαγιάς σύμφωνα με διάφορες κατευθυντήριες γραμμές (M. K. Cheong, 2008).

Τύπος φορτίου πυρκαγιάς	Θερμική απελευθέρωση (MW)		
	PIARC	NFPA 502 (2004)	BD 78/99
Επιβατηγό αυτοκίνητο	2.5-5	5	5
Λεωφορείο	20	20	20
Φορτηγάκι	15	-	15
Βαρέως τύπου όχημα	20 - 30	20 - 30	30 - 100
Δεξαμενόπλοιο βενζίνης	-	100	-

Για παράδειγμα, από τον Πίνακα 2-1 η ταχύτητα απελευθέρωσης θερμότητας μπορεί να κυμαίνεται από 2.5 MW έως 5 MW για ένα επιβατικό αυτοκίνητο και 20 MW έως 30 MW για ένα βαρύ φορτηγό. Ωστόσο, πρόσφατα πειράματα φωτιάς που διεξήχθησαν στη σήραγγα Runehamar δείχνουν ότι μεγαλύτερα οχήματα με εύφλεκτα εμπορεύματα μπορεί να προκαλέσουν υψηλότερη έκκλιση θερμότητας (περίπου 67 MW έως 200 MW κορυφή).

Ο

Πίνακας 2-2 περιέχει δεδομένα για το μέγιστο ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας (peak HRR) διάφορων τύπων οχημάτων και φορτίων κάτω από διάφορες πειραματικές συνθήκες.

Πίνακας 2-2: Μέγιστος ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας (peak HRR) διάφορων τύπων οχημάτων και φορτίων κάτω από διάφορες πειραματικές συνθήκες (M. K. Cheong, 2008).

Τύπος οχήματος	Μέγιστος ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας (MW)	Πειραματικές συνθήκες
Μηχανάκι	1.24	Εργαστήριο
Αυτοκίνητο	1.5, 1.8, 2	Εργαστήριο
Αυτοκίνητο	4.3, 8.5	Σκηνή
Αυτοκίνητο	4.7	Σήραγγα: $u = 6$ m/s
Λεωφορείο επιβατών	6	Σήραγγα: $u = 0.4$ m/s
Λεωφορείο	29.7	Σήραγγα: $u = 0.3$ m/s
Προσομοιωμένο φορτηγό με λάστιχα, ξύλο, πλαστικά κρεβάτια	17	Σήραγγα: $u = 0.7$ m/s
Προσομοιωμένο φορτηγό με ξύλινες παλέτες, ελαστικά, πανί	13, 19, 16	Σήραγγα: $u = 0, 4 - 6$ m/s & 6 m/s
Φορτηγό με 2 τόνους επίπλων	125	Σήραγγα: $u = 3 - 6$ m/s
Ρυμουλκούμενο με διάφορα εμπορεύματα	203, 158, 124.9, 70.5	Σήραγγα: $u = 3$ m/s

Παράγοντες που επηρεάζουν το Ρυθμό Απελευθέρωσης Θερμότητας (HRR)

Ο HRR κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς σε σήραγγα επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως την πηγή της φωτιάς, το είδος όχημα και καύσιμο εμπλέκονται, πόσο μεγάλο και τι υλικό έχει το όχημα, πώς είναι η διατομή της σήραγγας και τι σύστημα αερισμού έχει σχεδιαστεί. Επίσης, ο χώρος μεταξύ των οχημάτων είναι πολύ σημαντικός για το πώς θα εξαπλωθεί η φωτιά (M. K. Cheong, 2008).

Γεωμετρία της διατομής

Το φαινόμενο της ανάκλασης της θερμότητας και της ακτινοβολίας μέσα σε μία σήραγγα επηρεάζει έμμεσα το ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας. Οι σήραγγες με μικρότερες διατομές τείνουν να παράγουν υψηλότερους ρυθμούς απελευθέρωσης θερμότητας σε σύγκριση με τις σήραγγες με μεγαλύτερες διατομές και γενικά μια σήραγγα με ευρύτερη διατομή είναι μια πιο ασφαλής σήραγγα. Ωστόσο, αυτό ενδεχομένως να αντισταφεί όταν δεν υπάρχει πρόβλεψη εξαερισμού στη σήραγγα. Χωρίς την παροχή αέρα, η κατάσταση μπορεί να αλλάξει σε μια κατάσταση ελέγχου εξαερισμού λόγω του μικρότερου χώρου που εμποδίζει την καύση του καυσίμου.

Συνθήκες αερισμού

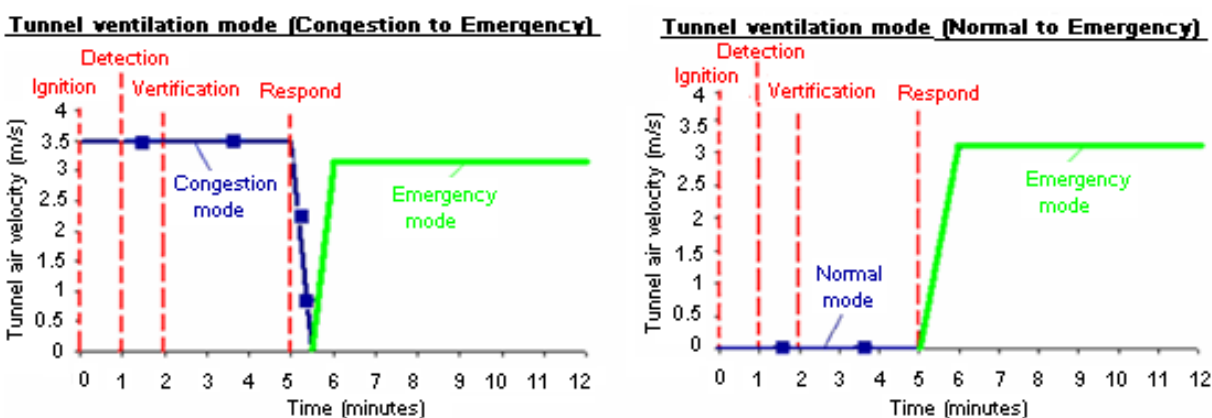
Η κεντρική ιδέα της παροχής αέρα στη σήραγγα είναι να διασφαλίζει έναν διάδρομο χωρίς καπνό για την εκκένωση. Ωστόσο, υπάρχουν ανησυχίες ότι αυτή η ροή αέρα θα ενισχύσει επίσης την πυρκαγιά παράγοντας υψηλότερο ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας ή διαδίδοντας τη φλόγα σε άλλα οχήματα προκαλώντας μεγαλύτερο μέγεθος φωτιάς.

Από πειράματα φωτιάς σε σήραγγες παρατηρήθηκε ότι στις περιπτώσεις με αυξημένη ροή αέρα η φωτιά τείνει να ενισχύεται παράγοντας υψηλότερο ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας. Αυτό οφείλεται στο ότι η παρουσία εξαναγκασμένου αερισμού μπορεί να αυξήσει την ένταση της φωτιάς λόγω της επιπλέον παροχής οξυγόνου. Αντίθετα σε άλλες περιπτώσεις, μπορεί και να μειώσει το μέγεθος της πυρκαγιάς εάν δράσει ως ψυκτικός παράγοντας. Υπάρχουν επίσης και άλλες επιδράσεις, όπως η αντιτιθέμενη ροή του αερισμού και η διάδοση της φλόγας πάνω από στερεά εμπόδια, που μπορούν να αυξήσουν ή να μειώσουν το ρυθμό διάδοσης της φωτιάς.

Η ταχύτητα διάδοσης της φωτιάς στη σήραγγα μπορεί να ποικίλει ανάλογα με την τοποθεσία της σήραγγας και τον τρόπο λειτουργίας του εξαερισμού της. Σε περίπτωση πυρκαγιάς, η κατάσταση εξαερισμού στη σήραγγα τροποποιείται, ιδιαίτερα στο αρχικό στάδιο του συμβάντος (αλλαγή τρόπου εξαερισμού για τη διευκόλυνση της εκκένωσης των χρηστών και της κατάσβεσης της φωτιάς από την πυροσβεστική υπηρεσία). Πριν την έναρξη του φαινομένου της φωτιάς μπορεί να επικρατεί κυκλοφοριακή συμφόρηση (congestion) και επομένως οι ανεμιστήρες να λειτουργούν με την ανάλογη ρύθμιση ενώ εάν η ροή οχημάτων στη σήραγγα είναι κανονική (normal), οι ανεμιστήρες πιθανότατα θα είναι απενεργοποιημένοι.

Ο τρόπος λειτουργίας των ανεμιστήρων στις δύο ανωτέρω περιπτώσεις είναι διαφορετικός με αποτέλεσμα τη διαφορετική ροή αέρα σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Αυτές οι αλλαγές στη ροή του αέρα μπορεί να επηρεάσουν τον ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας στη σήραγγα. Επομένως, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ο χρόνος ανίχνευσης της φωτιάς, ο χρόνος αντίδρασης του χειριστή του ανεμιστήρα και ο χρόνος που απαιτείται για την αλλαγή του τρόπου λειτουργίας του μηχανοποιημένου συστήματος αερισμού.

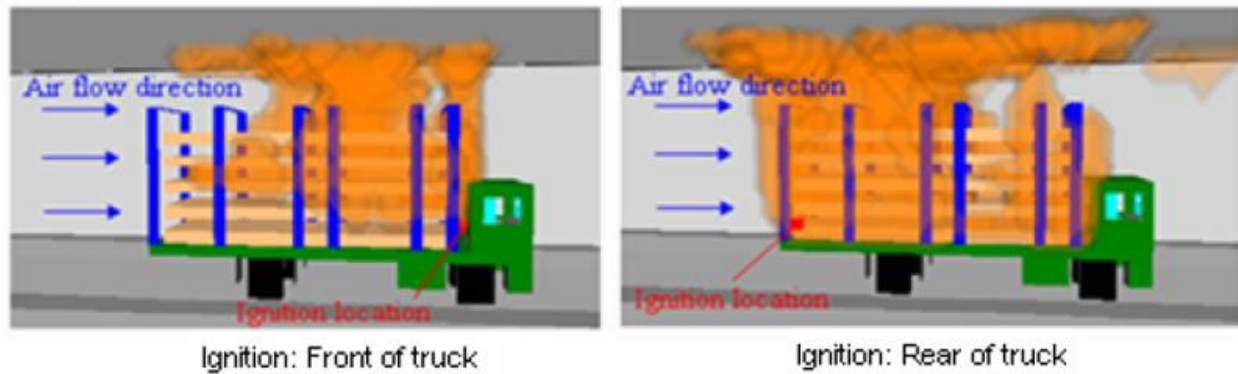
Στα επόμενα γραφήματα (M. K. Cheong, 2008) αποτυπώνεται η διαφορά στη ροή του αέρα συνυπολογίζοντας όλους τους προαναφερθέντες παράγοντες ήτοι την κατάσταση λειτουργίας των ανεμιστήρων πριν την έναρξη της πυρκαγιάς (με κυκλοφοριακή συμφόρηση ή με κανονική ροή), το χρόνο ανίχνευσης της φωτιάς και αντίδρασης του χειριστή των ανεμιστήρων.



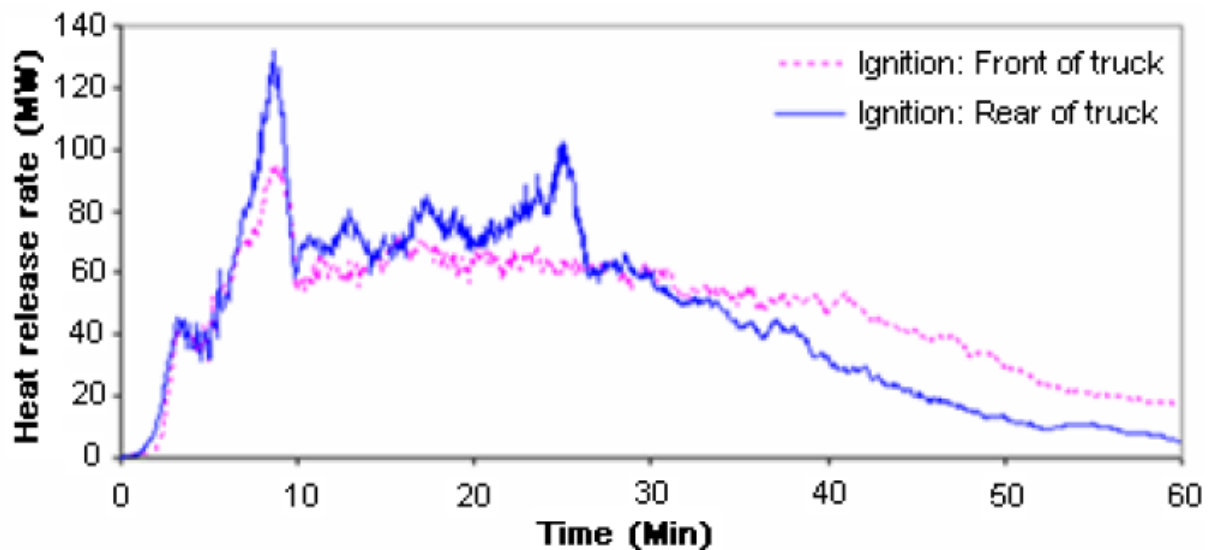
Σχήμα 2-3: Παραδείγματα ροής αέρα στη σήραγγα ανάλογα με την κατάσταση λειτουργίας των ανεμιστήρων, πριν την έναρξη της πυρκαγιάς (M. K. Cheong, 2008)

Θέση ανάφλεξης στο όχημα

Η θέση της ανάφλεξης της φωτιάς στο όχημα μπορεί να επηρεάσει την καμπύλη του ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας. Στην επόμενη εικόνα αναπαρίστανται δύο σενάρια ανάφλεξης στο μπροστινό και στο πίσω μέρος ενός φορτηγού. Στην περίπτωση κατά την οποία η θέση ανάφλεξης είναι στο μπροστινό μέρος του οχήματος, η διάδοση της φωτιάς προς το πίσω μέρος του καθυστερεί λόγω του αερισμού στην κατεύθυνση της οδήγησης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερο ρυθμό εκπομπής θερμότητας στο αρχικό στάδιο της ανάπτυξης της φωτιάς. Το συμπέρασμα αυτό προκύπτει και πειραματικά όπως αποτυπώνεται στο επόμενο γράφημα, όπου φαίνεται πως στην περίπτωση που η θέση ανάφλεξης είναι στο μπροστινό μέρος του οχήματος ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας είναι μικρότερος.



Εικόνα 2-1: Διάδοση της φωτιάς στο όχημα ανάλογα με την θέση της ανάφλεξης (M. K. Cheong, 2008)



Σχήμα 2-4: Ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας ανάλογα με την θέση της ανάφλεξης στο όχημα (M. K. Cheong, 2008)

Διαρροή καυσίμων

Σε περίπτωση σύγκρουσης οχημάτων, υπάρχει πιθανότητα να σπάσει το ρεζερβουάρ καυσίμου, οδηγώντας σε διαρροή υγρού καυσίμου στα εμπλεκόμενα οχήματα και στα παρακείμενα. Ο ρυθμός ροής καυσίμου από τη δεξαμενή που έχει υποστεί ζημιά εξαρτάται από την έκταση του ανοίγματος της δεξαμενής. Εάν το εύφλεκτο υγρό καύσιμο αναφλεγεί τότε ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας (HRR) επηρεάζεται από την ποσότητα του λιμνάζοντος καυσίμου στο κατάστωμα της σήραγγας.

Η επιρροή του πλήθους των παραμέτρων καθορίζουν ένα σενάριο πυρκαγιάς.

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω η επιλογή της φωτιάς σχεδιασμού εξαρτάται από πλήθος παραγόντων. Για αυτό το λόγο στο επόμενο κεφάλαιο γίνεται αναφορά των προτυποποιημένων σεναρίων πυρκαγιάς που χρησιμοποιούνται κατά τον σχεδιασμό της πυρασφάλειας.

Συνήθης πρακτική είναι η εφαρμογή μίας μεθοδολογίας που να συνδυάζει την ανάλυση κινδύνου και την αριθμητική ανάλυση για τη δημιουργία ενός ρεαλιστικού σεναρίου για πυρκαγιές οχημάτων, ειδικά για το σχεδιασμό μέτρων ελέγχου του καπνού στις οδικές σήραγγες. Δεδομένων των μοναδικών χαρακτηριστικών κάθε σήραγγας, που επηρεάζονται από παράγοντες όπως οι ειδικοί κανονισμοί ανά χώρα και η προβλεπόμενη χρήση της σήραγγας, τα αποτελέσματα της ανάλυσης κινδύνου πυρκαγιάς ενδέχεται να διαφέρουν. Επομένως, έχει μεγάλη σημασία να συγκεντρωθούν άφθονα στατιστικά στοιχεία σχετικά με τα συμβάντα πυρκαγιάς, τα πρότυπα κυκλοφορίας και τη σύνθεση του πληθυσμού των οχημάτων για τον εντοπισμό εύλογων σεναρίων χειρότερης περίπτωσης πυρκαγιάς (M. K. Cheong, 2008).

2.2.3 Σενάρια φωτιάς σχεδιασμού

Κατά το σχεδιασμό μίας σήραγγας ένα σενάριο πυρκαγιάς παρέχει δεδομένα εισόδου για οποιοδήποτε είδος υπολογισμού που απαιτείται για τον υπολογισμό της θερμικής και τοξικής απειλής για τους ανθρώπους, καθώς και για την εκτίμηση των βλαβών στα δομικά χαρακτηριστικά της σήραγγας και στον μηχανολογικό εξοπλισμό της (Ingason, 2008). Η φωτιά σχεδιασμού του σεναρίου μπορεί να ληφθεί από ντετερμινιστικές μεθόδους, όπου η καμπύλη σχεδιασμού αντιπροσωπεύει τη χειρότερη δυνατή πυρκαγιά ή μπορεί να βασίζεται σε ανάλυση κινδύνου που αντιπροσωπεύει ένα σενάριο που σχετίζεται με πειραματικά και στατιστικά δεδομένα. Η φωτιά σχεδιασμού μπορεί επίσης να αποτελείται από ένα εύρος διαφορετικών σεναρίων που αντιπροσωπεύουν μια πιθανή πυρκαγιά, όπως για παράδειγμα να βασίζεται σε μεγάλης κλίμακας δοκιμές ή να προκύπτει με τη βοήθεια των εμπειρογνομόνων που συμμετέχουν στο σχεδιασμό του συγκεκριμένου έργου. Ωστόσο, ο πιο συνηθισμένος τρόπος αναπαράστασης ενός σεναρίου φωτιάς σχεδιασμού σε μια οδική σήραγγα είναι επιλέγοντας ένα μέγιστο ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας (HRR) από ένα πίνακα χαρακτηριστικών τιμών (βλ. Πίνακα 1 στην επόμενη ενότητα , M. K. Cheong, 2008).

Ο καθορισμός των σεναρίων πυρκαγιάς γίνεται με βάση τα εξής σημεία:

- Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα δυνατά σενάρια πυρκαγιάς.
- Ορίζοντας σενάρια φωτιάς σχεδιασμού ως τα υποσυστήματα των πιο πιθανών και δυσμενών πιθανών σεναρίων.
- Υπολογίζοντας τα σενάρια φωτιάς σχεδιασμού

Προκύπτει ότι ο αριθμός των δυνατών σεναρίων κατά τον σχεδιασμό είναι αρκετά υψηλός. Για αυτόν τον λόγο, ο αριθμός τους συνήθως μειώνεται χρησιμοποιώντας προτυποποιημένα σενάρια πυρκαγιάς σχεδιασμού (CFPA E Guideline No19, 2009) .

Υπολογισμός σεναρίων φωτιάς σχεδιασμού

Ο υπολογισμός σεναρίων φωτιάς σχεδιασμού περιλαμβάνει την ανάλυση της ανάφλεξης των υλικών που βρίσκονται μέσα στην κατασκευή. Η εξέλιξη της πυρκαγιάς μπορεί να σκιαγραφηθεί εξετάζοντας τον πειραματικά καταγεγραμμένο Ρυθμό Απελευθέρωσης Θερμότητας (HRR) συγκεκριμένων προϊόντων ή χρησιμοποιώντας ένα γενικευμένο HRR για μια κατηγορία προϊόντων, το οποίο επίσης προέρχεται από τη βιβλιογραφική έρευνα. Η παράμετρος HRR χρησιμεύει ως η «ταυτότητα» για την πυρκαγιά, παρέχοντας βασικά δεδομένα για τον υπολογισμό των ποσοστών παραγωγής καπνού και παρέχοντας παραμέτρους εισόδου για λογισμικό προσομοίωσης πυρκαγιάς.

Ο βασικός στόχος της χρήσης ενός μοντέλου προσομοίωσης πυρκαγιάς στους υπολογισμούς των σεναρίων σχεδιασμού πυρκαγιάς είναι η εκτίμηση της εξάπλωσης των υποπροϊόντων καύσης, των επιπέδων συγκέντρωσης τοξικών αερίων και της θερμοκρασίας του καπνού. Αυτές οι μεταβλητές αξιολογούνται στη συνέχεια με βάση τα επιλεγμένα κριτήρια βιωσιμότητας για τον υπολογισμό του διαθέσιμου χρόνου για εκκένωση (ASET), (όπως θα αναλυθεί σε επόμενη ενότητα, CFPA E Guideline No19, 2009).

2.2.3.1 Προτυποποιημένα σενάρια πυρκαγιάς σχεδιασμού με βάση τη ΔΑΣ

Η Διοικητική Αρχή των Σήραγγων (ΔΑΣ, 2011) έχει καθορίσει πρότυπα σενάρια πυρκαγιάς σχεδιασμού. Αυτά τα σενάρια βασίζονται στον ρυθμό έκλυσης θερμότητας (HRR) στις σήραγγες. Συνιστάται η χρήση διαφόρων σεναρίων πυρκαγιάς για την αξιολόγηση του κινδύνου, δεδομένου ότι οι μικρότερες πυρκαγιές αντιμετωπίζουν διαφορετικές προκλήσεις σε σχέση με τις μεγαλύτερες. Επομένως, είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψη όλες οι πιθανές καταστάσεις, χρησιμοποιώντας διάφορα σενάρια πυρκαγιάς που καλύπτουν το πλήρες φάσμα των αντίστοιχων διακυμάνσεων. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, οι καθορισμένοι ρυθμοί έκλυσης θερμότητας (HRR) πρέπει να συμπληρωθούν με προβλέψεις σχετικά με την έκλυση προϊόντων λόγω της καύσης. Η προτυποποίηση πρέπει να καλύπτει όλες τις κατηγορίες οχημάτων όπως ορίζονται στον Κώδικα Οδικής Κυκλοφορίας, με ιδιαίτερη έμφαση σε:

- Επιβατηγά οχήματα
- Φορτηγά διαφόρων μεγεθών, εξαιρουμένων αυτών που μεταφέρουν επικίνδυνα εμπορεύματα
- Λεωφορεία

Αρχές και παραδοχές σχεδιασμού καμπύλων HRR προτυποποιημένων πυρκαγιών

Για την περιγραφή ενός σεναρίου πυρκαγιάς συνδυάζονται τα δεδομένα που αφορούν τη μέγιστη έκλυση θερμότητας (peak HRR) με τον τρόπο που γίνεται η ανάπτυξη της φωτιάς (γραμμική, εκθετική, κ.λπ.). Κάθε σενάριο περιλαμβάνει φάσεις όπως την αρχική φάση, τη φάση ανάπτυξης, τη φάση πλήρους ανάπτυξης, τη φάση ύφεσης, και τη φάση εξάλειψης. Προτείνεται επίσης η συνένωση της αρχικής και της φάσης ανάπτυξης σε ένα στάδιο, όπως αντίστοιχα και της φάσης ύφεσης και της εξάλειψης για υπολογιστική ευκολία (βλ. Σχήμα 2-2).

Οι κύριοι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την πλήρη και μονοσήμαντη περιγραφή ενός σεναρίου πυρκαγιάς περιλαμβάνουν τον ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας, τον ρυθμό παραγωγής τοξικών προϊόντων, τον ρυθμό παραγωγής καπνού, το μέγεθος της φωτιάς, τον χρόνο που απαιτείται για κρίσιμα γεγονότα όπως η γρήγορη εξάπλωση της φωτιάς, τη μεταβολή της θερμοκρασίας, την εκπνεμτικότητα, και τη χωρική θέση της φωτιάς. Υπάρχουν επιπρόσθετοι παράγοντες που καθορίζουν το σενάριο, όπως ο τύπος, το μέγεθος και η θέση της πηγής ανάφλεξης, ο τύπος και η κατανομή του καυσίμου, οι συνθήκες αερισμού στη σήραγγα, οι εξωτερικές περιβαλλοντικές συνθήκες, και οι ενέργειες (ανθρώπινες ή μηχανοποιημένες) με στόχο την κατάσβεση της φωτιάς. Η διαμόρφωση των σεναρίων ανάπτυξης πυρκαγιάς συνήθως ακολουθεί γραμμική καμπύλη HRR, και αυτή η απλοποίηση βοηθά στη διαχείριση υπολογισμών, λαμβάνοντας υπόψη τα διαθέσιμα δεδομένα και την αβεβαιότητα.

Σημειώνεται πως τα προτυποποιημένα σενάρια πυρκαγιάς προσαρμόζονται στις συγκεκριμένες συνθήκες και χαρακτηριστικά του Ελληνικού Χώρου. Κατά βάση χρησιμοποιούνται σενάρια με τυπικό ύψος φλόγας περίπου 5 μέτρα για συνήθεις σήραγγες. Ωστόσο, όταν απαιτείται η εξέταση σηράγγων με πολύ χαμηλότερο ύψος φλόγας, όπως σε περίπτωση διέλευσης μόνο επιβατικών αυτοκινήτων, τότε είναι απαραίτητη η ειδική προσαρμογή των σεναρίων.

Στον Πίνακα 2-3 φαίνονται τα προτυποποιημένα σενάρια σχεδιασμού με βάση τη ΔΑΣ. Στον πίνακα 2 παρουσιάζονται οι σχέσεις που διέπουν τα μεγέθη σχεδιασμού του σεναρίου της φωτιάς.

Οι χρησιμοποιούμενες παράμετροι περιγράφονται ως εξής, με τα αντίστοιχα σύμβολα:

t_{max} : Ο χρόνος όπου ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας (HRR) φτάνει τη μέγιστη τιμή του (σε sec).

t_D : Η χρονική στιγμή κατά την οποία ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμικής ενέργειας (HRR) εισέρχεται στη φάση εξασθένησης (σε sec).

t_d : Η συνολική χρονική διάρκεια της πυρκαγιάς (σε sec).

$a_{g,L}$: Ο γραμμικός συντελεστής αύξησης του HRR (σε MW/sec)

$a_{D,L}$: Ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης του HRR (σε MW/sec).

E_{tot} : Η συνολική ενέργεια που απελευθερώνεται από την πυρκαγιά (σε MJ).

Πίνακας 2-3: Προτυποποιημένα σενάρια φωτιάς σχεδιασμού (ΔΑΣ,2011)

	Εμπλεκόμενα οχήματα στη φωτιά	HRR _{peak} (MW)	t _{max} (sec)	t _D (sec)	t _d (sec)
Σενάριο 1	1-2 επιβατικά οχήματα	5	180	180	2700
Σενάριο 2	2-3 επιβατικά οχήματα ή 1 μικρό ημιφορτηγό	10	180	1380	2700
Σενάριο 3	1 μεγάλο ημιφορτηγό ή 1 λεωφορείο ή πολλαπλά επιβατικά οχήματα	20	180	1980	3000
Σενάριο 4	1 λεωφορείο ή 1 κενό βαρύ φορτηγό	30	300	300	3300
Σενάριο 5	1 φορτηγό με καύσιμο φορτίο	50	300	3900	4800
Σενάριο 6	1 βαρύ φορτηγό με καύσιμο φορτίο (περ. 4 τόννοι)	70	300	3300	4500
Σενάριο 7	1 βαρύ φορτηγό (μέση τιμή)	100	300	3900	5100
Σενάριο 8	1 βαρύ φορτηγό με καύσιμο φορτίο (περ. 10 τόννοι)	150	600	4500	6000
Σενάριο 9	πολλαπλά βαρέα φορτηγά ή 1 βυτιοφόρο με βενζίνη	200	900	4800	6000

Οι σχέσεις που συνδέουν τις ποσότητες που περιγράφονται παραπάνω παρατίθενται στον κάτωθι πίνακα.

Πίνακας 2-4: Αριθμητικές σχέσεις μεταξύ των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν την καμπύλη φωτιάς HRR (ΔΑΣ, 2011)

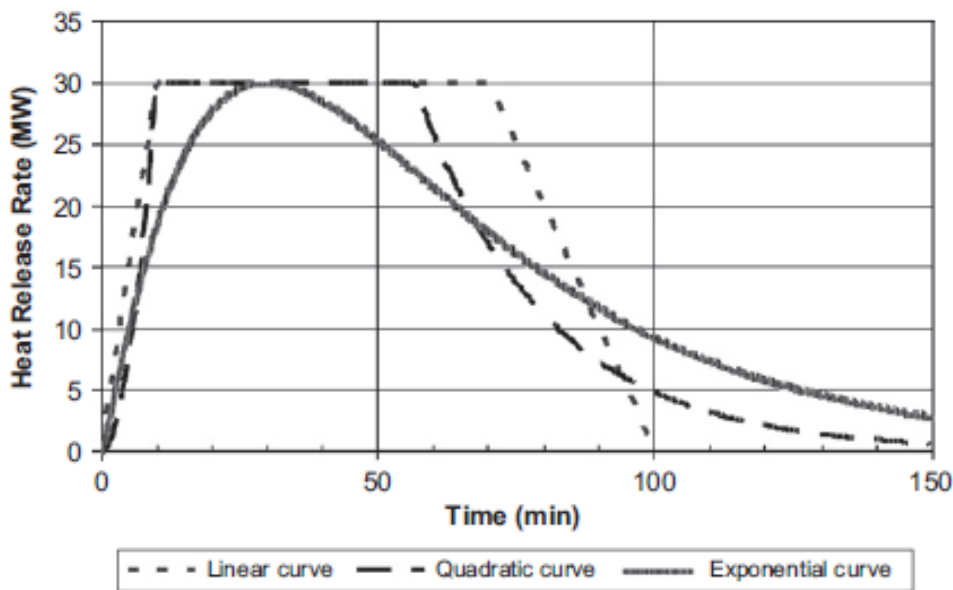
HRR συναρτήσει του χρόνου t	Χρονικά διαστήματα (sec)	Χρόνος για peak HRR (sec)	Χρόνος έναρξης εξασθένησης t _D και διάρκεια της πυρκαγιάς t _d
$HRR = a_{g,L} * t$	$0 < t \leq t_{max}$	$t_{max} = Q_{max} / a_{g,L}$	$t_D = t_d - \{(2/a_{D,L}) * ((a_{g,L}/2) * t_{max}^2 + Q_{max} * (t_d - t_{max}) - E_{tot})\}$
$HRR = a_{g,L} * t_{max} = Q_{max}$	$t_{max} < t < t_d$		
$HRR = Q_{max} - a_{d,L} * (t - t_D)$	$HRR = Q_{max} - a_{d,L} * (t - t_D)$		

Πίνακας 2-5: Τιμές παραμέτρων καμπύλης HRR

α/α Σενάριου	t_{max} (sec)	t_D (sec)	t_d (sec)	$a_{g,L}$ (MW/sec)	$a_{D,L}$ (MW/sec)	Q_{max} (MW)	E_{tot} (GJ)
1	180	180	2700	0.0278	0.0020	5	7
2	180	1380	2700	0.0555	0.0076	10	20
3	180	1980	3000	0.1111	0.0196	20	52
4	300	300	3300	0.1000	0.0100	30	50
5	300	3900	4800	0.1667	0.0555	50	210
6	300	3300	4500	0.2333	0.0583	70	260
7	300	3900	5100	0.3333	0.0833	100	435
8	600	4500	6000	0.2500	0.1000	150	740
9	900	4800	6000	0.2222	0.1677	200	990

Καμπύλη φωτιάς σχεδιασμού (*design fire curve*)

Οι καμπύλες φωτιάς σχεδιασμού μπορούν να χωριστούν σε τρεις βασικούς τύπους: γραμμικές καμπύλες, τετραγωνικές καμπύλες και εκθετικές καμπύλες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-5. Σε κάθε περίπτωση, αυτή η περιγραφή μπορεί να αναφέρεται τόσο στις περιόδους ανάπτυξης και μείωσης όσο και στους διάφορους τρόπους συνδυασμού τους. Τρία χαρακτηριστικά παραδείγματα περιγράφονται με περισσότερες λεπτομέρειες παρακάτω (Ingason, 2008)



Σχήμα 2-5: Καμπύλες φωτιάς σχεδιασμού: Γραμμική, Τετραγωνική, Εκθετική Ingason, 2008)

Γραμμική καμπύλη φωτιάς - γραμμική αύξηση και μείωση με σταθερή μέγιστη περίοδο

Η γραμμική καμπύλη φωτιάς θεωρεί μια χρονική εξάρτηση του HRR με μια γραμμική αύξηση από το μηδέν έως το χρόνο t_{max} , μια σταθερή μέγιστη τιμή HRR έως το χρόνο t_D και τέλος μια γραμμική μείωση από τη μέγιστη τιμή HRR στο μηδέν έως το χρόνο t_d (βλ. Σχήμα 2-5)

Τετραγωνική καμπύλη φωτιάς - τετραγωνική αύξηση και εκθετική μείωση με σταθερή μέγιστη περίοδο

Η τετραγωνική καμπύλη φωτιάς είναι εξαρτώμενη από το χρόνο για διαφορετικούς τύπους οχημάτων με τετραγωνική αύξηση από το μηδέν έως το χρόνο t_{max} , μια σταθερή μέγιστη τιμή HRR έως το χρόνο t_D και τέλος μια εκθετική μείωση από τη μέγιστη τιμή HRR στο μηδέν στο άπειρο (βλ. Σχήμα 2-5).

Εκθετική καμπύλη φωτιάς - εκθετική αύξηση και μείωση περιόδου

Γίνεται εκτίμηση του HRR ως μια ενιαία εκθετικής συνάρτηση του χρόνου αντί για τρεις συναρτήσεις για διαφορετικά χρονικά διαστήματα και εφαρμόζεται μόνο σε πυρκαγιές που ελέγχονται από το καύσιμο και πυρκαγιές με μικρή ή αμελητέα σταθερή περίοδο μέγιστου HRR. Οι παράμετροι σχεδίασης είναι το μέγιστο HRR (Q_{max}), η συνολική θερμοχωρητικότητα. Βάσει αυτών των παραμέτρων, μπορούν να υπολογιστούν το t_{max} και το t_d (βλ. Σχήμα 2-5).

2.2.4 Το λογισμικό Pyrosim: Προσομοίωση φωτιάς με μοντέλα CFD

2.2.4.1 Μοντέλα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD)

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι και εργαλεία για την ανάλυση της επικινδυνότητας εμφάνισης πυρκαγιάς σε σήραγγες, την προσομοίωση της φωτιάς σε οδική σήραγγα και την εκκένωση μετά το περιστατικό πυρκαγιάς. Μία από τις πιο συνηθισμένες μεθόδους είναι η χρήση μοντέλων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (Computational Fluid Dynamics - CFD) για την προσομοίωση της πυρκαγιάς ως δυναμικό φαινόμενο, της διάδοσης του καπνού, των επιδράσεων του αερισμού και των περιβαλλοντικών συνθηκών στη σήραγγα. Τα μοντέλα CFD μπορούν επίσης να συνδυαστούν με μοντέλα εκκένωσης για την προσομοίωση της συμπεριφοράς και της κίνησης των ατόμων στη σήραγγα κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς. Μερικά παραδείγματα μοντέλων και εργαλείων CFD είναι:

FDS (Fire Dynamics Simulator): Πρόκειται για ένα μοντέλο CFD που αποτελείται από ένα υβριδικό σύστημα από έξυπνους αλγόριθμους, όπως ο αλγόριθμος Large Eddy Simulation (LES), για να προσομοιώσει τη φυσική και τη χημεία των φαινομένων που σχετίζονται με τη φωτιά.

FLUENT (Fluent Inc.): Πρόκειται για μοντέλο CFD που βασίζεται στη μέθοδο RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) για να λύσει τους εξισώσεις ρευστών, χωρίζοντάς τους σε χρόνους και χώρους. Το FLUENT δίνει στους χρήστες τη δυνατότητα να επιλέξουν από διάφορα υπό-μοντέλα

για να περιγράψουν μερικούς φυσικούς μηχανισμούς κατά την πυρκαγιά όπως η κίνηση, η απόδοση, η ανάφλεξη, η ακτινοβολία και η ρύπανση.

SMARTFIRE (Fire Safety Engineering Group): Πρόκειται για ένα μοντέλο CFD που χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων για να λύσει τις εξισώσεις ρευστών σε κάρναβο. Το SMARTFIRE είναι ένα ευέλικτο και εύχρηστο εργαλείο που δίνει στους χρήστες τη δυνατότητα να προσομοιάσουν τη γεωμετρία, τη φωτιά, τον εξαερισμό και τις συνοριακές συνθήκες. Το SMARTFIRE μπορεί επίσης να συνδυαστεί με το SMARTFIRE-EXODUS για την προσομοίωση της εκκένωσης.

PYROSIM: Πρόκειται για είναι ένα γραφικό περιβάλλον χρήστη του μοντέλου Fire Dynamics Simulator (FDS), το οποίο όπως αναφέρθηκε παραπάνω είναι ένα μοντέλο υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD). Χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της φωτιάς και της ροής των ρευστών που αυτή επηρεάζει. Το PyroSim δίνει στους χρήστες τη δυνατότητα να δημιουργήσουν μια τρισδιάστατη γεωμετρία στην οποία μπορούν να ορίσουν πηγές φωτιάς και να εισάγουν παραμέτρους όπως τα υλικά που εμπλέκονται στην πυρκαγιά, η ταχύτητα του αέρα κλπ. Το εργαλείο αυτό χρησιμοποιείται σε διάφορες εφαρμογές, όπως η ανάλυση των συστημάτων πυρόσβεσης και ελέγχου της φωτιάς σε μία υποδομή έτσι ώστε να είναι εντός των ορίων βιωσιμότητας από τους χρήστες της κατασκευής, ενώ μπορεί επίσης να συνδυαστεί με το PATHFINDER για την προσομοίωση της εκκένωσης. Στο Κεφάλαιο 2.2.4.2 γίνεται αναλυτικότερη περιγραφή του λογισμικού PYROSIM.

Τα παραπάνω αποτελούν μερικά από τα παραδείγματα των μοντέλων CFD και των εργαλείων για την προσομοίωση της ανάλυσης κινδύνου πυρκαγιάς σε οδική σήραγγα και την εκκένωση μετά το περιστατικό πυρκαγιάς. Υπάρχουν επίσης και άλλες μέθοδοι και εργαλεία που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αυτόν τον σκοπό, όπως εμπειρικά μοντέλα, μοντέλα που χωρίζουν το προσομοίωμα σε ζώνες, μοντέλα με δίκτυα. Πιο συγκεκριμένα, τα πιο συνηθισμένα μοντέλα που χωρίζουν σε ζώνες υποθέτουν ότι ένας χώρος διαιρείται σε δύο ζώνες: ένα ανώτερο στρώμα που αποτελείται από θερμαινόμενα προϊόντα καύσης και ένα κατώτερο στρώμα που αποτελείται από ψυχρότερο αέρα σχετικά ελεύθερο από προϊόντα καύσης. Τα μοντέλα με δίκτυα είναι ένα είδος μοντέλων προσομοίωσης πυρκαγιάς που χρησιμοποιούν ένα δίκτυο από κόμβους και συνδέσεις για να αναπαραστήσουν τη ροή του αέρα και των προϊόντων καύσης σε ένα κτίριο. Κάθε κόμβος αντιπροσωπεύει ένα χώρο ή μια περιοχή, και κάθε σύνδεση αντιπροσωπεύει ένα άνοιγμα. Ωστόσο, τα μοντέλα CFD θεωρούνται γενικά πιο ακριβή και λεπτομερή σε σχέση με τις παραπάνω μεθόδους, όμως είναι επίσης πιο πολύπλοκα και χρονοβόρα για να στηθούν και να τρέξουν. Γι' αυτό, είναι προτιμότερο ένα μοντέλο CFD να χρησιμοποιηθεί μόνο για την περιοχή ενδιαφέροντος όπου συμβαίνει η φωτιά, και στη συνέχεια να γίνει χρήση ενός απλούστερου μοντέλου για το υπόλοιπο της σήραγγας όπου η ροή είναι πλήρως ανεπτυγμένη.

Η επιλογή ενός κατάλληλου μοντέλου για τη σήραγγα εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως:

- Το μήκος και η γεωμετρία της σήραγγας
- Ο τύπος και το μέγεθος της πηγής φωτιάς
- Το σύστημα αερισμού
- Το επίπεδο ακρίβειας και λεπτομέρειας που απαιτείται
- Οι διαθέσιμοι υπολογιστικοί πόροι και χρόνος

Υπολογιστικές παράμετροι για προσομοίωση πυρκαγιάς και εκκένωση σε οδική σήραγγά

Για την προσομοίωση με χρήση μοντέλων CFD για την πυρκαγιά και την εκκένωση σε οδική σήραγγα, απαιτούνται οι ακόλουθες παράμετροι για τους υπολογισμούς:

- Η γεωμετρία και οι διαστάσεις της σήραγγας, συμπεριλαμβανομένων της διατομής, του μήκους, της κλίσης, της καμπυλότητας και οποιωνδήποτε χαρακτηριστικών όπως εξόδους, πόρτες, σήμανση κ.λπ.
- Οι συνοριακές συνθήκες της σήραγγας, όπως η ταχύτητα του αέρα, η διαφορά πίεσης, η θερμοκρασία και οι συγκεντρώσεις του αέρα καθώς και άλλων αερίων στην είσοδο και την έξοδο.
- Οι αρχικές συνθήκες στη σήραγγα, όπως η περιβάλλουσα θερμοκρασία, η υγρασία και η σύνθεση του αέρα.
- Το σενάριο πυρκαγιάς, όπως η τοποθεσία, το μέγεθος, ο σχηματισμός, η διάρκεια και ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας της πηγής φωτιάς, καθώς και ο τύπος και η ποσότητα του καυσίμου που εμπλέκεται.
- Το σύστημα αερισμού, όπως ο τύπος των ανεμιστήρων, ο αριθμός τους, η θέση τους και η κατεύθυνση που παρέχουν καθαρό αέρα ή εξάγουν καπνό από τη σήραγγα.
- Το σενάριο εκκένωσης, όπως ο αριθμός των χρηστών, η θέση, η κατανομή και τα χαρακτηριστικά τους καθώς και η συμπεριφορά και τα μοτίβα κίνησής τους κατά τη διάρκεια της φωτιάς.

2.2.4.2 Το λογισμικό PyroSim

Το PyroSim είναι ένα πρόγραμμα της εταιρείας Thunderhead Engineering για τη δημιουργία και εκτέλεση προσομοιώσεων πυρκαγιάς με χρήση του μοντέλου Fire Dynamics Simulator (FDS) που αναπτύχθηκε στις ΗΠΑ από το Εθνικό Ινστιτούτο Προτύπων και Τεχνολογίας (NIST). Παρέχει γραφικά εργαλεία που δημιουργούν αυτόματα τον κώδικα εισόδου σε κείμενο για το FDS. Επιτρέπει επίσης την εισαγωγή αρχείων CAD, τη διαχείριση πολλαπλών προσομοιώσεων καθώς επίσης παρέχει το SmokeView που είναι ένα γραφικό περιβάλλον για την εξαγωγή και οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων των αναλύσεων (thunderheadeng.com).

Το PyroSim λειτουργεί μεταφράζοντας τις εντολές εισόδου που δίνει με γραφικά εργαλεία ο χρήστης σε εντολές στον κώδικα του FDS, τις οποίες γράφει σε ένα αρχείο εισόδου. Αυτό το αρχείο εισόδου είναι δυνατόν να το επεξεργαστεί ο χρήστης απευθείας χρησιμοποιώντας έναν επεξεργαστή κειμένου. Το PyroSim στη συνέχεια τρέχει το FDS ως ξεχωριστή διαδικασία και παρακολουθεί την πρόοδό του. Δίνεται επιπλέον η δυνατότητα στο χρήστη να σταματήσει, να διακόψει ή να συνεχίσει την προσομοίωση ανά πάσα στιγμή. Το PyroSim επίσης αποθηκεύει τα αρχεία εξόδου που δημιουργήθηκαν από το FDS και τα ανοίγει με το Smokeview, που είναι ένα πρόγραμμα που οπτικοποιεί τα αποτελέσματα της προσομοίωσης πυρκαγιάς.

Για τη χρήση του PyroSim, απαιτείται λήψη από την Thunderhead Engineering, εγκατάσταση στον υπολογιστή και ενεργοποίηση με ένα κλειδί άδειας χρήσης. Το PyroSim είναι συμβατό με τα λειτουργικά συστήματα Windows 7, 8 και 10. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται η έκδοση 2023.1.0524.

Βήματα δημιουργίας προσομοίωσης φωτιάς στο λογισμικό PyroSim

Για τη δημιουργία μίας προσομοίωσης φωτιάς με τη χρήση του λογισμικού PyroSim ακολουθούνται τα ακόλουθα βήματα:

1. Εγκατάσταση του PyroSim στον υπολογιστή και ενεργοποίησή του με ένα κλειδί άδειας χρήσης. Η λήψή του PyroSim γίνεται από την Thunderhead Engineering
2. Άνοιγμα του PyroSim και δημιουργία ενός νέου σεναρίου. Επιπλέον είναι δυνατή η εισαγωγή ενός υπάρχοντος αρχείου CAD ή η χρήση προκαθορισμένου προτύπου (template).
3. Καθορισμός του καννάβου και των παραμέτρων ελέγχου της προσομοίωσης, όπως το μέγεθος των κελιών του καννάβου, το χρονικό βήμα, τη διάρκεια της προσομοίωσης, τη συχνότητα των εξαγόμενων δεδομένων κ.λπ. Ο κάνναβος μπορεί να σχεδιαστεί μέσω του αντίστοιχου εργαλείου στο PyroSim, ενώ επίσης είναι δυνατή η δημιουργία πολλαπλών καννάβων για μεγαλύτερη ακρίβεια στην προσομοίωση.
4. Ορισμός της γεωμετρίας και των διαστάσεων του τομέα (domain) όπου βρίσκεται το μοντέλο, όπως τους τοίχους, τα πατώματα, τις οροφές, τις πόρτες, τα παράθυρα κ.λπ. Επιπλέον στο λογισμικό παρέχονται γραφικά εργαλεία για τη σχεδίαση ή την τροποποίηση των σχήματων και των ιδιοτήτων των αντικειμένων.
5. Ορισμός του σεναρίου της φωτιάς, όπως η θέση, το μέγεθος, η διάρκεια και ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας της πηγής της φωτιάς. Είναι επίσης δυνατός ο καθορισμός του τύπου και της ποσότητας του καυσίμου που εμπλέκεται και των παραμέτρων της αντίδρασης καύσης. Το PyroSim παρέχει επίσης ένα εργαλείο για τον υπολογισμό των στοιχειομετρικών συντελεστών και του ποσοστού κατά βάρος του καυσίμου και των προϊόντων
6. Καθορισμός του συστήματος αερισμού, όπως τον τύπο, τον αριθμό, τη θέση, την κατεύθυνση και τη χωρητικότητα των ανεμιστήρων που παρέχουν καθαρό αέρα ή

απομακρύνουν καπνό από τον τομέα του μοντέλου. Είναι επίσης δυνατός ο καθορισμός των συνοριακών συνθηκών των ανοιγμάτων εισόδου και εξόδου, όπως η ταχύτητα, η πίεση, η θερμοκρασία και η συγκέντρωση αέρα και άλλων αερίων.

7. Καθορισμός του σεναρίου εκκένωσης (με χρήση και του λογισμικού PathFinder), όπως ο αριθμός, η θέση, η διανομή και τα χαρακτηριστικά των ατόμων στον τομέα του μοντέλου. Είναι επίσης δυνατός ο καθορισμός της ανθρώπινης συμπεριφοράς και των μοτίβων κίνησής τους κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς.
8. Εκτέλεση της προσομοίωσης και παρακολούθηση της προόδου της. Παρέχεται η δυνατότητα διακοπής, η προσωρινής διακοπής και συνέχιση της προσομοίωσης ανά πάσα στιγμή. Το PyroSim θα αποθηκεύσει τα αρχεία εξόδου που δημιουργούνται από το FDS (Fire Dynamics Simulator) και θα τα ανοίξει με το Smokeview.
9. Ανάλυση των αποτελεσμάτων και οπτικοποίηση της προσομοίωσης της πυρκαγιάς. Μπορεί να γίνει χρήση του Smokeview για να μελετηθεί η πυρκαγιά ως δυναμικό φαινόμενο οπτικοποιώντας τη διάδοση του καπνού, την κατανομή θερμοκρασίας, τη συγκέντρωση αερίου, τη μεταφορά θερμότητας κ.λπ. Επιπλέον, είναι δυνατή η χρήση του PyroSim για τη διαγραμματική αποτύπωση της μεταβολής διαφόρων ποσοτήτων συναρτήσει του χρόνου ή του χώρου.

2.3 Αρχές σχεδιασμού ασφαλούς εκκένωσης σε οδική σήραγγα

2.3.1 Γενικά

Η ανάπτυξη του αστικού ιστού και η συνεχής αύξηση του πληθυσμού που συμβαίνει στα αστικά κέντρα κατά τα πρόσφατα έτη δημιουργούν ένα πολυπλοκό περιβάλλον για την ανάπτυξη υποδομών. Σε αυτό το πλαίσιο, η ιδέα της συστηματικής χρήσης του υπόγειου χώρου αποκτά ολοένα και μεγαλύτερη σημασία και θεωρείται αποτελεσματική λύση για τα προβλήματα βιωσιμότητας στις σύγχρονες αστικές περιοχές. Την τελευταία δεκαετία, η εκμετάλλευση του υπόγειου χώρου έχει διαδραματίσει καίριο ρόλο στη βοήθεια των σύγχρονων πόλεων στην αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών και κοινωνικών προβλημάτων και στην επίτευξη των στόχων βιωσιμότητάς τους.

Τα ειδικά χαρακτηριστικά του υπόγειου χώρου στις αστικές περιοχές καθιστούν αναγκαία τη σχεδίαση και τον προγραμματισμό της διαδικασίας εκκένωσης. Συγκεκριμένα, η ευημερία των χρηστών κατά τις καταστάσεις έκτακτης ανάγκης αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα του συνολικού σχεδιασμού του υπόγειου χώρου, και η αξιολόγηση των διαθέσιμων επιλογών για την ταχεία εκκένωση αποτελεί ουσιαστική προϋπόθεση, ιδίως σε περιπτώσεις πυρκαγιών.

Ένα από τα κύρια προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν κατά τη σχεδίαση της διαδικασίας εκκένωσης για τον υπόγειο χώρο των αστικών περιοχών αφορά την έλλειψη

ομοιομορφίας στις κατευθυντήριες οδηγίες. Σε πολλές περιπτώσεις, οι προδιαγραφές μπορεί να διαφέρουν ακόμη και εντός ενός κράτους από έργο σε έργο. Παρόλο που οι απαιτήσεις για κάθε συγκεκριμένο έργο μπορεί να διαφέρουν, η διεθνής εναρμόνιση των κατευθυντήριων οδηγιών σχετικά με τους κύριους παράγοντες που επηρεάζουν τον σχεδιασμό της πυρασφάλειας θα μπορούσε να οδηγήσει στην καθιέρωση και εφαρμογή πιο αποτελεσματικών σχεδίων (Parakonstantinou et al., 2016).

2.3.2 Η φιλοσοφία των κανονισμών ασφαλείας των υπογείων χώρων

Οι κανονισμοί και τα πρότυπα που χρησιμοποιούνται διεθνώς για τον σχεδιασμό υπογείων κατασκευών είναι αρκετοί και, γενικά, ανήκουν στους ευρύτερους κανόνες που ισχύουν για τις κτιριακές κατασκευές. Ωστόσο, από τις αρχές του 21^{ου} αιώνα παρατηρείται σημαντική προσπάθεια για τη δημιουργία νέων προτύπων που στοχεύουν στους υπόγειους χώρους. Αυτό έγινε ως απάντηση σε μεγάλα ατυχήματα, κυρίως σε υπόγειους σιδηρόδρομους, με σκοπό να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα ασφαλείας.

Αυτά τα ζητήματα μπορεί να διαφέρουν αρκετά σε σχέση με αυτά των συμβατικών επίγειων κατασκευών, λόγω των ειδικών χαρακτηριστικών των υπόγειων υποδομών και των οχημάτων, καθώς και των κανόνων λειτουργίας. Συγκεκριμένα, όσον αφορά στις σήραγγες, οι κανονισμοί ασφαλείας έχουν επιτύχει υψηλό βαθμό λεπτομερούς ρύθμισης και διεθνούς εναρμόνισης. Αντίθετα, οι απαιτήσεις ασφαλείας για γενικότερες υπόγειες υποδομές περιορίζονται σε βασικές και λιγότερο ομοιόμορφες απαιτήσεις.

Σε γενικές γραμμές, οι κανονισμοί έχουν στόχο να ορίσουν ένα ενιαίο σύνολο μέτρων για τον σχεδιασμό και τη λειτουργία των υπόγειων υποδομών, προσφέροντας έτσι το βέλτιστο επίπεδο ασφαλείας με τον πιο οικονομικό τρόπο. Τα ζητήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν από τους μηχανικούς στο πλαίσιο της πυρασφάλειας είναι κυρίως ο καθορισμός του μεγέθους της φωτιάς και των ορίων βιωσιμότητας, ο σχεδιασμός του συστήματος αντιμετώπισης του καπνού, η αξιολόγηση του χρόνου και του τρόπου εκκένωσης των ατόμων κ.λπ. Τα μέσα απομάκρυνσης και οι διαδικασίες εκκένωσης αποτελούν μέρος του συνολικού σχεδιασμού και προτείνονται ως ένα σύνολο μέτρων που πρέπει να εφαρμόζονται. Ανάλογα με τον χαρακτήρα του υπογείου χώρου, υπάρχουν κατευθυντήριες γραμμές για οδικές και σιδηροδρομικές σήραγγες, για σιδηροδρομικούς σταθμούς και γενικότερα για υπόγειους χώρους. Παρόλο που η προσέγγιση κάθε κατευθυντήριας γραμμής/κανονισμού διαφέρει ανάλογα με τις ανάγκες, τη φιλοσοφία ή ακόμη και την κοινωνικοοικονομική κατάσταση, συχνά αλληλοσυμπληρώνονται και δεν πρέπει να λαμβάνονται χωριστά. Όσον αφορά την απομάκρυνση/εκκένωση, οι περισσότεροι κανονισμοί και κατευθυντήριες γραμμές παρέχουν μια τυποποιημένη μεθοδολογία για τον σχεδιασμό της ασφαλείας από πυρασφάλεια και την επικύρωση του σχεδιασμού των υπογείων συστημάτων (Parakonstantinou et al., 2016).

2.3.2.1 Οι κανονισμοί και τα πρότυπα για την πυροπροστασία των υποδομών

Κατά την αξιολόγηση των προτύπων, πρέπει να ληφθεί υπόψη η διαφορετική προσέγγιση των αμερικανικών και ευρωπαϊκών πλαισίων στον σχεδιασμό της υπόγειας υποδομής. Οι Ηνωμένες Πολιτείες επικεντρώνονται σε κανονισμούς και πρότυπα (NFPA Codes & Standards) που αφορούν τον σχεδιασμό και τη λειτουργία των υπογείων χώρων, καθώς και στις περιπτώσεις που σχετίζονται με τους υπόγειους σταθμούς μετρό και σιδηρόδρομων. Οι ευρωπαϊκοί κώδικες (CFPA E-Guidelines) εστιάζουν περισσότερο σε θέματα που σχετίζονται με τους κανονισμούς ασφάλειας και τις απαιτήσεις για σήραγγες μεταφορών (οδικών και σιδηροδρόμων, Parakonstantinou et al., 2016).

Ο κανονισμός πυροπροστασίας των ΗΠΑ (NFPA)

Η NFPA είναι η συντομογραφία της Εθνικής Ένωσης Πυροπροστασίας (National Fire Protection Association). Πρόκειται για έναν διεθνή μη κερδοσκοπικό οργανισμό που ασχολείται με την πρόληψη και την αντιμετώπιση των πυρκαγιών και άλλων κινδύνων. Η NFPA έχει δημιουργήσει πολλούς κώδικες και πρότυπα για την ταξινόμηση, την επισήμανση και τη συσκευασία των επικίνδυνων υλικών, καθώς και για τη πυροπροστασία των υποδομών

Αναφορικά με την πυροπροστασία στους υπόγειους χώρους και στις σήραγγες έχει ως σκοπό τη διασφάλιση της ασφάλειας και της προστασίας από πυρκαγιές. Αυτός ο κανονισμός προσδιορίζει πρότυπα και απαιτήσεις για την εγκατάσταση και τη συντήρηση συστημάτων πυρόσβεσης, ανιχνευτών πυρκαγιάς και αερισμού, καθώς και τη διαχείριση εκτάκτων πυρκαγιών σε αυτούς τους χώρους. Τέλος, ο κανονισμός της NFPA επιδιώκει να εξασφαλίσει ότι οι υπόγειοι χώροι και οι σήραγγες είναι εξοπλισμένοι με τα κατάλληλα μέσα για την αντιμετώπιση του κινδύνου πυρκαγιάς και τη διασφάλιση της ασφάλειας των ανθρώπων που βρίσκονται σε αυτούς τους χώρους.

Ο κανονισμός πυροπροστασίας της ΕΕ (CFPA)

Ο ευρωπαϊκός κανονισμός CFPA (Confederation of Fire Protection Associations Europe) αποτελεί ένα σημαντικό νομοθετικό πλαίσιο για την πυροπροστασία των υποδομών στην ΕΕ. Αυτός ο κανονισμός προσδιορίζει απαιτήσεις και πρότυπα για την ασφαλή σχεδίαση, εγκατάσταση, και συντήρηση των συστημάτων πυροπροστασίας σε διάφορους τομείς, όπως κτίρια, βιομηχανικές εγκαταστάσεις και μεταφορικά μέσα. Μέσω του CFPA διασφαλίζονται η πυροπροστασία και η ασφάλεια των πολιτών και των περιουσιακών τους στοιχείων, ενώ ταυτόχρονα προάγονται η τήρηση υψηλών προτύπων και η αποτελεσματική αντιμετώπιση του κινδύνου πυρκαγιάς.

Ο κανονισμός CFPA διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην πυροπροστασία των υπόγειων χώρων και των σηράγγων στην Ευρώπη, θεσπίζοντας αυστηρά πρότυπα και απαιτήσεις για την ασφάλεια αυτών των χώρων. Αυτό το νομοθετικό πλαίσιο καλύπτει θέματα όπως η εγκατάσταση ανιχνευτών πυρκαγιάς, αυτόματων συστημάτων κατάσβεσης, εξαερισμού και απομόνωσης, προσφέροντας οδηγίες για την αποτελεσματική διαχείριση κινδύνων πυρκαγιάς σε αυτούς τους περίπλοκους χώρους. Μέσω του CFPA, η Ευρώπη διασφαλίζει ότι οι υπόγειοι

χώροι και οι σήραγγες είναι εξοπλισμένοι με τα απαραίτητα μέσα για την προστασία των ανθρώπων και την πρόληψη των πυρκαγιών.

Οι κατευθυντήρες οδηγίες της PIARC για την ασφάλεια των σηράγγων

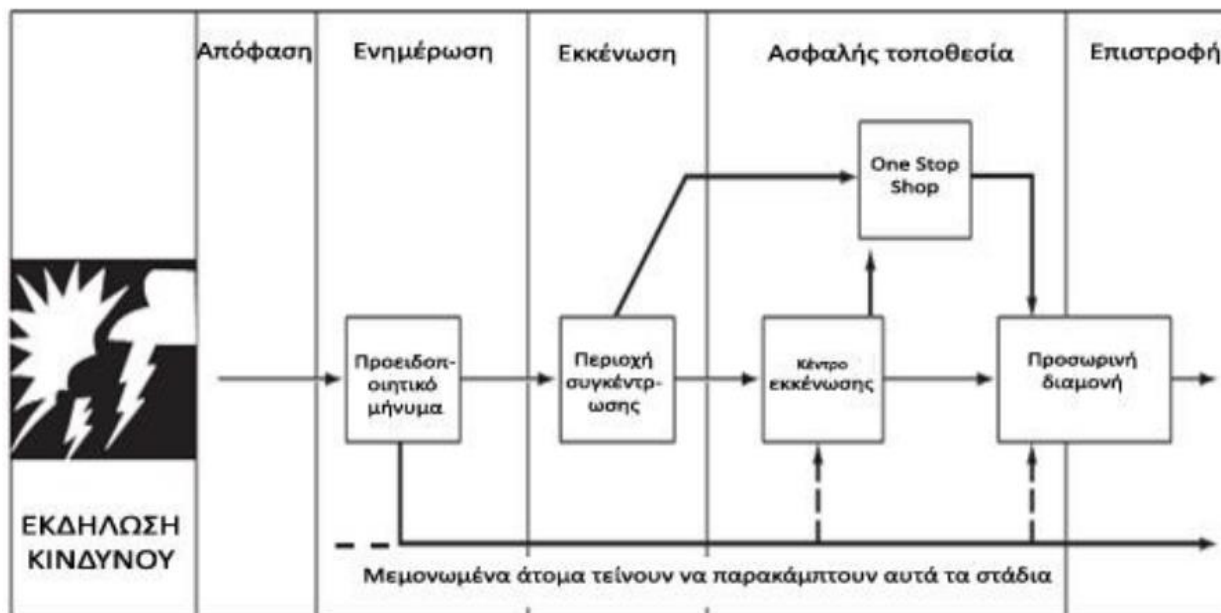
Η PIARC είναι η Παγκόσμια Ένωση Οδικών Μεταφορών (παλαιότερα γνωστή ως Permanent International Association of Road Congresses). Ως οργανισμός στοχεύει στην προώθηση της ανάπτυξης και συντήρησης των οδικών υποδομών παγκοσμίως. Ιδρύθηκε το 1909, χρησιμεύει ως κοινό σημείο συνάντησης για κυβερνήσεις, επαγγελματίες του κλάδου και εμπειρογνώμονες με σκοπό να συνεργαστούν στην έρευνα, την ανταλλαγή γνώσεων και τις βέλτιστες πρακτικές στον τομέα των μεταφορών και της οδοποιίας. Στόχος της PIARC είναι η προάσπιση της οδικής ασφάλειας, της αποδοτικότητας και της βιωσιμότητας, με την παροχή πολύτιμων γνώσεων και πόρων για τη βελτίωση της ποιότητας των οδικών δικτύων και των συστημάτων μεταφορών σε παγκόσμια κλίμακα.

Η PIARC τονίζει επίσης την κρίσιμη σημασία της πυροπροστασίας στις σήραγγες, αναγνωρίζοντας ότι οι σήραγγες παρουσιάζουν μοναδικές προκλήσεις όσον αφορά την ασφάλεια. Προωθούν ολοκληρωμένα μέτρα πρόληψης πυρκαγιών, συμπεριλαμβανομένων αποτελεσματικών συστημάτων εξαερισμού, πυράντοχων επενδύσεων σηράγγων και τακτικών επιθεωρήσεων, όλα με στόχο την ελαχιστοποίηση του κινδύνου πυρκαγιών στις σήραγγες. Η PIARC συμβάλει επίσης στη δημιουργία αποτελεσματικών στρατηγικών αντιμετώπισης καταστάσεων έκτακτης ανάγκης, τονίζοντας την ανάγκη εκπαίδευσης του προσωπικού της σήραγγας και των ομάδων πυρόσβεσης καθώς επίσης και την ανάγκη ύπαρξη ειδικού εξοπλισμού, όλα με γνώμονα τη διασφάλιση της ασφάλειας των χρηστών της σήραγγας σε περίπτωση πυρκαγιάς. Οι κατευθυντήριες γραμμές και οι συστάσεις της PIARC επισημαίνουν τη σημασία της συνεχούς έρευνας και της διεθνούς συνεργασίας για την ενίσχυση της πυροπροστασίας στις σήραγγες και τον αποτελεσματικό μετριασμό των πιθανών κινδύνων.

2.3.3 Στάδια Εκκένωσης

Η ανάπτυξη περίπλοκων υπόγειων υποδομών στις πόλεις απαιτεί μια αποτελεσματική μέθοδο εκκένωσης για να αντιμετωπίσει τις προκλήσεις του περιβάλλοντος. Οι υπόγειοι χώροι έχουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και πολυπλοκότητα, που καθιστούν την εκκένωση δύσκολη και κρίσιμη σε περίπτωση ατυχήματος. Η έρευνα έχει αναδείξει διάφορες προσεγγίσεις εκκένωσης σε αστικά περιβάλλοντα, με σκοπό να βελτιώσει την αποτελεσματικότητα της εκκένωσης σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης και να μειώσει τις επιπτώσεις στην ανθρώπινη ζωή σε πιθανά ατυχήματα, ειδικά σε περίπτωση πυρκαγιάς.

Η εκκένωση ενός υπόγειου χώρου ακολουθεί συνήθως πολλά στάδια και διαδικασίες για τη διασφάλιση της ασφαλούς εκκένωσης των ατόμων σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης, όπως η πυρκαγιά ή οι φυσικές καταστροφές. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται εποπτικά τα κύρια στάδια της εκκένωσης ενός υπόγειου χώρου και στη συνέχεια περιγράφεται κάθε επιμέρους στάδιο (CFPA E Guideline No19, 2009)



Σχήμα 2-6: Διαγραμματική απεικόνιση των σταδίων εκκένωσης, (Σημειώσεις Μαθήματος, Μ. Μενεγάκη)

Απόφαση

Η απόφαση για την εκκένωση ενός χώρου σε περίπτωση κινδύνου αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της ασφάλειας των ενοίκων και της αντιμετώπισης των δυνητικών επιπτώσεών του. Κατά συνέπεια, η λήψη αυτής της απόφασης πρέπει να γίνεται με βάση τη σωστή αξιολόγηση όλων των διαθέσιμων πληροφοριών, ενώ παράλληλα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι ειδικές νομοθεσίες και κανονισμοί που ισχύουν. Ένα αξιόπιστο σχέδιο εκκένωσης είναι επίσης απαραίτητο, καθώς προσδίδει αυξημένη εμπιστοσύνη στους υπεύθυνους, και η πληροφόρηση πρέπει να παρέχεται σωστά και έγκαιρα σε όλους τους ενδιαφερομένους. Είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψη όλοι αυτοί οι παράγοντες κατά την λήψη αποφάσεων σχετικά με την εκκένωση, προκειμένου να εξασφαλιστεί η ασφάλεια των ατόμων σε περίπτωση επείγουσας ανάγκης.

Ενημέρωση

Η διαδικασία ενημέρωσης σε περίπτωση εκκένωσης προϋποθέτει την αποτελεσματική διανομή συμβουλών και οδηγιών στους ενοίκους. Η προειδοποίηση για εκκένωση πρέπει να δομηθεί με τρόπο που παρέχει έγκαιρη και αποτελεσματική ενημέρωση, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως ο χρόνος, η απόσταση, η οπτική επαφή με το σήμα προειδοποίησης, τα χαρακτηριστικά της κατάστασης έκτακτης ανάγκης και ο τρόπος διαβίβασης της ενημέρωσης από εξειδικευμένο προσωπικό. Είναι σημαντικό το σχέδιο ασφαλείας να μην εξαρτάται αποκλειστικά από έναν τύπο ενημέρωσης και εκκίνησης της εκκένωσης, όπως ήχους ή φωτεινά σήματα.

Εκκένωση

Κατά τη διαδικασία σχεδιασμού για την απομάκρυνση ενοίκων, υπάρχουν αρκετά βασικά θέματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Αυτά περιλαμβάνουν τον έλεγχο και τον συντονισμό

των ενεργειών, τον καθορισμό των προτεραιοτήτων εκκένωσης, τον σχεδιασμό ασφαλών διαδρομών διαφυγής, τη διαχείριση της εκκένωσης σε στάδια, την καθορισμό των τοποθεσιών αναφοράς, την ειδική μεριμνά για ατομικές ανάγκες, την καταγραφή των ονομάτων των ενοίκων, την ασφάλιση της περιοχής μετά την εκκένωση, τη δημιουργία ενός κεντρικού σημείου ελέγχου για την εκκένωση, και τη συνεχή ενημέρωση όλων των εμπλεκόμενων φορέων και ομάδων διαχείρισης.

Ασφαλής Τοποθεσία

Η επιλογή της τοποθεσίας συγκέντρωσης είναι ουσιώδης για την προστασία των ενοίκων και την ικανοποίηση των βασικών τους αναγκών μετά από κίνδυνους. Κατά την επιλογή, πρέπει να λάβουμε υπόψη την ασφάλεια, τη διαθεσιμότητα, και τη χωρητικότητα του χώρου. Σημαντικά στοιχεία περιλαμβάνουν την άδεια χρήσης της περιοχής, την προσβασιμότητα, τη διαθεσιμότητα ιατρικής βοήθειας, την καταχώρηση των ενοίκων, και την επιβεβαίωση εκκένωσης. Η επιβεβαίωση εκκένωσης μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους, όπως με την ονομαστική μέθοδο ή τη μέθοδο αναζήτησης.

Επιστροφή

Είναι αναγκαίο να αξιολογηθούν οι συνθήκες στην πληγείσα περιοχή προκειμένου να κριθεί εάν η επιστροφή των ενοίκων εκεί είναι ασφαλής. Αυτή η αξιολόγηση περιλαμβάνει την τρέχουσα κατάσταση του κινδύνου, την πιθανότητα μελλοντικών αναταράξεων, την αξιοπιστία των εγκαταστάσεων, και τη διαθεσιμότητα των απαραίτητων πόρων. Επιπρόσθετα, πρέπει να ληφθούν υπόψη κριτήρια όπως η κατάσταση της σωματικής και ψυχολογικής κατάστασης των ενοίκων καθώς και οι οικονομικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη διαδικασία επιστροφής στην περιοχή μετά από κίνδυνο. Πρόσθετοι παράγοντες περιλαμβάνουν τη διαχείριση επικίνδυνων κατασκευών, την ανακατασκευή των κανονικών υπηρεσιών όπως ηλεκτρικό ρεύμα και νερό, και τη δημιουργία ενός μηχανισμού συνεχούς επικοινωνίας.

2.3.4 Ποσοτική αξιολόγηση των συνθηκών ασφαλείας εκκένωσης με βάση τις Ευρωπαϊκές οδηγίες

Η προσέγγιση των Ευρωπαϊκών οδηγιών για την αξιολόγηση των συνθηκών ασφαλούς εκκένωσης βασίζεται στον καθορισμό και τη σύγκριση μεταξύ του χρόνου που διατίθεται στους χρήστες για να φτάσουν σε έναν ασφαλή χώρο, γνωστός ως ASET (Διαθέσιμος Χρόνος Ασφαλούς Εκκένωσης) και τον χρόνο που χρειάζονται οι χρήστες για να φτάσουν σε έναν ασφαλή χώρο, γνωστός ως RSET (Απαιτούμενος Χρόνος Ασφαλούς Εκκένωσης - είναι ο χρόνος εκκένωσης). Η προσέγγιση αυτή στοχεύει στον καθορισμό ενός περιθωρίου ασφαλείας, το οποίο προκύπτει από τη διαφορά μεταξύ των χρόνων ASET και RSET. Αυτό το περιθώριο ασφαλείας μπορεί να αποδειχθεί χρήσιμο λόγω της αβεβαιότητας που υπάρχει κατά τον προσδιορισμό αυτών των δύο χρόνων (CFPA E Guideline No19, 2009).

2.3.4.1 Ποσοτική εκτίμηση του διαθέσιμου χρόνου για ασφαλή εκκένωση (ASET) – Όρια Βιωσιμότητας

Ο ASET (Διαθέσιμος Χρόνος Ασφαλούς Εκκένωσης) αναφέρεται στον χρόνο μεταξύ της έναρξης ενός κρίσιμου συμβάντος (π.χ. πυρκαγιά) και της στιγμής όπου οι περιβαλλοντικές συνθήκες φτάνουν στα όρια βιωσιμότητας, ήτοι θα καθιστούν το άτομο ανίκανο ώστε να μπορεί να εκκενώσει τον χώρο. Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζεται ο διαθέσιμος χρόνος ASET ανάλογα με το είδος του ατυχήματος σε υπόγειους χώρους (CFPA E Guideline No19, 2009).

Πίνακας 2-6: Διαθέσιμος χρόνος ασφαλούς εκκένωσης (ASET) ανάλογα με το είδος τους ατυχήματος

Είδος ατυχήματος		ASET - Διαθέσιμος χρόνος t_d (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

Ειδικότερα, για την περίπτωση της πυρκαγιάς, που αποτελεί και το αντικείμενο της παρούσας εργασίας, τα όρια βιωσιμότητας καθορίζονται από κριτήρια που αφορούν τον κίνδυνο από τον καπνό, τις τοξικές εκπομπές και την έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες και σε ακτινοβολία. Το τελικό χρονικό σημείο του υπολογισμού του ASET είναι η στιγμή κατά την οποία οι συνθήκες σε κάθε χώρο της κατασκευής καθιστούν αδύνατη την παραμονή των χρηστών. Πιο συγκεκριμένα, αδύνατες συνθήκες σημαίνουν ότι κάποιος ο οποίος βρίσκεται εντός ενός τέτοιου χώρου ή που εισέρχεται σε αυτόν είναι πολύ πιθανό να μην μπορέσει να αντέξει λόγω του καπνού, των υψηλών θερμοκρασιών ή των τοξικών εκπομπών. Επομένως, για την ακριβέστερη πρόβλεψη του ASET, χρειάζεται να εκτιμηθούν ο χρόνος και το επίπεδο του καπνού, των τοξικών ουσιών και της θερμότητας κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς.

Κλασματική Δραστική Δόση- Fractional Effective Dose (FED)

Για την αξιολόγηση του κινδύνου που προκύπτει από τα τοξικά προϊόντα που παράγονται κατά τη διάρκεια φωτιάς, ήταν απαραίτητο να καθοριστεί η ποσότητα της τοξικής δόσης που εκτίθεται ο άνθρωπος. Σε αυτό το πλαίσιο, αναπτύχθηκε η Κλασματική Δραστική Δόση (FED) σύμφωνα με το εγχειρίδιο SFPE (SFPE, 2016). Σύμφωνα με αυτό, η τιμή FED = 1.0 υποδηλώνει συνθήκες που μπορεί να οδηγήσουν σε απώλεια συνείδησης ή θάνατο. Επιπλέον, βάσει του πρότυπου κανονισμού NFPA, ορίζεται μια οριακή τιμή FED = 0.3, που περιλαμβάνει ακόμη και

τους πιο ευαίσθητους πληθυσμούς. Η καθορισμένη αυτή μέθοδος ανάλυσης αποτελεί βασικό εργαλείο για την αντιμετώπιση των κινδύνων που σχετίζονται με την έκρηξη τοξικών ουσιών κατά τη διάρκεια πυρκαγιάς. Στα επόμενα περιγράφεται ο τρόπος υπολογισμού της τιμής FED λόγω της επίδρασης της θερμότητας και λόγω των τοξικών αερίων (Poh W., 2011).

Επίδραση της θερμότητας

Ο χρόνος που μπορεί κανείς να αντέξει σε ένα περιβάλλον πυρκαγιάς εξαρτάται από τις επιπτώσεις στην υγεία του. Οι πιο συνηθισμένες επιπτώσεις είναι η υπερθερμία, τα εγκαύματα στην επιφάνεια του σώματος που προκαλούνται από θερμική ακτινοβολία και τον καπνό, καθώς και εγκαύματα στην αναπνευστική οδό λόγω των ζεστών αερίων και του καπνού. Η υψηλή θερμοκρασία είναι επικίνδυνη για τους ανθρώπους, καθώς μπορεί να προκαλέσει αφυδάτωση, δυσκολίες στην αναπνοή, ασφυξία και εγκαύματα. Η αποδεκτή οριακή θερμοκρασία του αέρα είναι περίπου 150°C, αλλά για πολύ σύντομη έκθεση σε ξηρό αέρα είναι λιγότερη. Η θερμοκρασία είναι χαμηλότερη αν ο αέρας είναι υγρός. Κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς, η υγρασία του αέρα είναι αρκετά υψηλή. Η αποδεκτή οριακή θερμοκρασία για πολύ σύντομο χρονικό διάστημα είναι περίπου 60°C.

Πιο αναλυτικά, η υπερθερμία μπορεί να προκύψει όταν κάποιος εκτίθεται σε υψηλές θερμοκρασίες για παρατεταμένο χρονικό διάστημα, ακόμη και σε περιβάλλον που δεν προκαλεί άμεσα εγκαύματα. Σε θερμοκρασίες άνω των 80°C και για κορεσμένο αέρα, η θερμοκρασία του σώματος είναι ανησυχητικά αυξημένη, προκαλώντας πόνο και πιθανά εγκαύματα. Θερμικά εγκαύματα στην αναπνευστική οδό μπορούν να προκληθούν από εισπνοή θερμού αέρα άνω των 60°C. Επίσης, τα όρια βιωσιμότητας είναι χαμηλότερα για τα εγκαύματα στο δέρμα από ό,τι για εκείνα στην αναπνευστική οδό. Σημαντικός πόνος και εγκαύματα μπορούν να προκληθούν όταν η θερμοκρασία υπερβαίνει σημαντικά αυτά τα όρια.

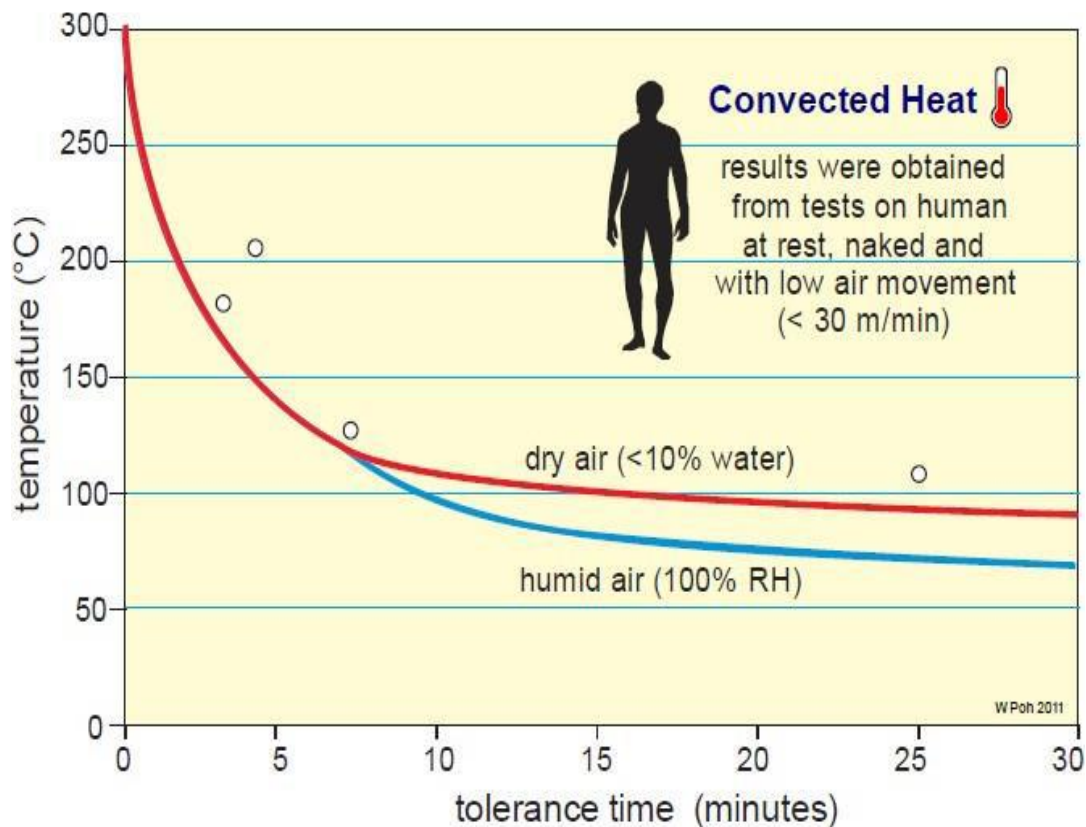
Πληροφορίες σχετικά με τις επιπτώσεις στον ανθρώπινο οργανισμό εξαιτίας της έκθεσης στην φωτιά παρέχονται στα επόμενα (Poh W., 2011).

Συναγώμενη θερμότητα

Παρατεταμένη έκθεση που υπερβαίνει τα 15 λεπτά σε υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να οδηγήσει σε θερμοπληξία (υπερθερμία). Ωστόσο, ακόμη και σύντομη έκθεση σε καυτό καπνό σε υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να οδηγήσει σε πόνο στο δέρμα, καθώς και εγκαύματα στο δέρμα και την αναπνευστική οδό. Μεταξύ της δεκαετίας του 1960 και του 1980, ερευνητές διεξήγαγαν δοκιμές εκθέτοντας άτομα σε ξηρά, θερμαινόμενα περιβάλλοντα με θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 110°C έως 180°C για να καθορίσουν χρόνους ανοχής στη συναγώμενη θερμότητα. Τα αποτελέσματα αυτά αποτυπώθηκαν σε διάγραμμα (βλ. Σχήμα 2-7) και στη συνέχεια προσαρμόστηκε μια καμπύλη για τον καθορισμό των ορίων βιωσιμότητας.

Το Σχήμα 2-7 απεικονίζει τα αποτελέσματα των δοκιμών ως κουκκίδες μαζί με την προσαρμοσμένη καμπύλη που αντιπροσωπεύεται από μια κόκκινη γραμμή. Η ανθρώπινη ικανότητα να ανέχεται την ξηρή θερμότητα αποδίδεται σε μεγάλο βαθμό στην ικανότητα του σώματος να ψύχεται μέσω του θερμορυθμιστικού συστήματος, όπως είναι η εφίδρωση. Η

αυξημένη υγρασία στον αέρα μπορεί να εμποδίσει την εξάτμιση, μειώνοντας έτσι τους χρόνους ανοχής. Αν και υπάρχουν περιορισμένα δεδομένα δοκιμών σχετικά με την ανθρώπινη ανοχή σε υγρά περιβάλλοντα σε θερμοκρασίες άνω των 45°C, μια σχέση για την εκτίμηση του χρόνου ανοχής σε περιβάλλοντα κορεσμένα με νερό που προτείνεται απεικονίζεται στο Σχήμα 2-7 με μπλε γραμμή (Poh W., 2011).



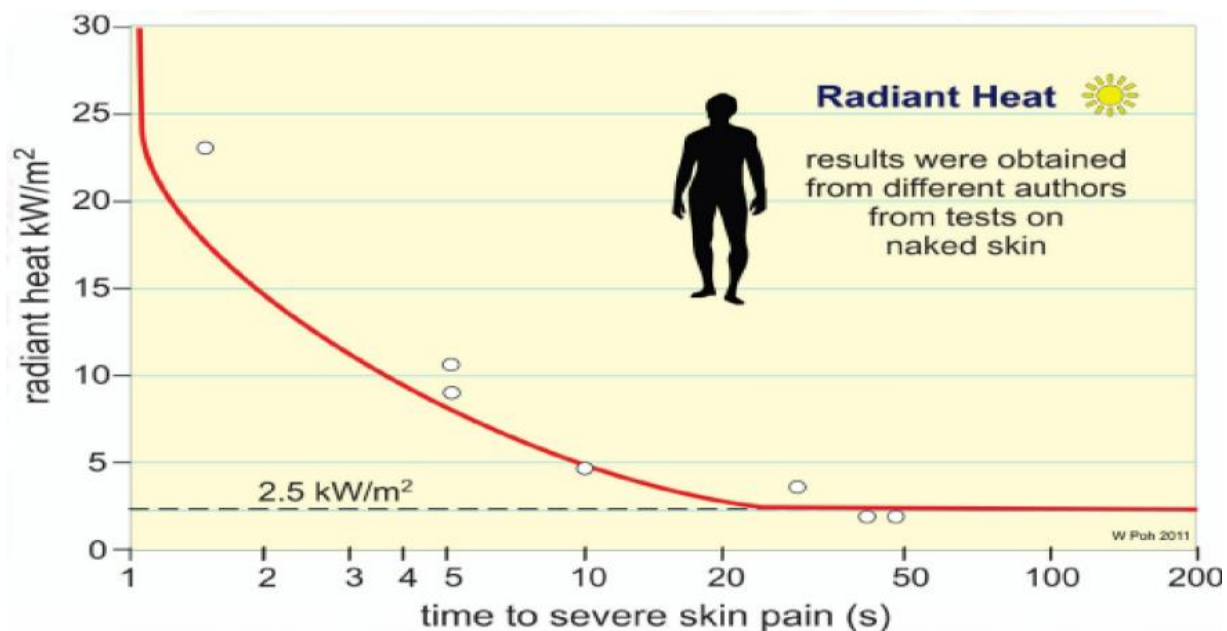
Σχήμα 2-7: Όρια βιωσιμότητας για έκθεση σε συναγώμενη θερμότητα (Poh W., 2011)

Σε πολλά σενάρια πυρκαγιάς, το περιβάλλον του αέρα είναι γενικά ξηρό και απίθανο να είναι πλήρως κορεσμένο με νερό. Για την αντιμετώπιση συνθηκών μέτριας υγρασίας, προτείνεται επίσης μια εμπειρική σχέση, τοποθετημένη περίπου μεταξύ των γραμμών για ξηρές και υγρές συνθήκες.

Ακτινοβολούμενη θερμότητα

Ακόμη και αν δεν υπάρχει άμεση επαφή με τον καυτό καπνό, η έκθεση σε αυξημένα επίπεδα ακτινοβολούμενης θερμότητας από τη φωτιά ή τον καπνό μπορεί να οδηγήσει σε πόνο στο δέρμα ή εγκαύματα. Μεταξύ της δεκαετίας του 1950 και των αρχών της δεκαετίας του 1980, πραγματοποιήθηκαν διάφορα πειράματα για να καθοριστεί το χρονικό όριο βιωσιμότητας για την έκθεση σε ακτινοβολούμενη θερμότητα, που κυμαίνεται από 2,4 kW / m² έως 23,5 kW / m². Στη συνέχεια, συγκεντρώθηκαν τα όρια ανοχής και προσαρμόστηκε μια καμπύλη με βάση τα

αποτελέσματα των δοκιμών. Το Σχήμα 2-8 απεικονίζει τα αποτελέσματα των δοκιμών ως κουκκίδες μαζί με την προσαρμοσμένη καμπύλη (Poh W., 2011).



Σχήμα 2-8: Όρια βιωσιμότητας για έκθεση σε ακτινοβολούμενη θερμότητα (Poh W., 2011)

Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι οι χρόνοι ανοχής που παρουσιάζονται στο Σχήμα 2-8 καθορίστηκαν από την έκθεση σε ακτινοβολούμενη θερμότητα στο εκτεθειμένο δέρμα. Είναι λογικό να αναμένουμε ότι αυτά τα όρια θα είναι υψηλότερα όταν τα ρούχα παρέχουν προστασία. Για παράδειγμα, σε δοκιμές πεδίου, ένας άνθρωπος, φορώντας ελαφριά ρούχα, υποβλήθηκε σε ακτινοβολούμενη ροή θερμότητας 5,0 kW / m² για 30 δευτερόλεπτα χωρίς να βιώσει πόνο στο δέρμα ή εγκαύματα.

Μία συνοπτική παρουσίαση των ορίων βιωσιμότητας λόγω της μεταφερόμενης θερμότητας προτείνεται από τον κανονισμό CFPA (2009), όπως φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί. Στον πίνακα αυτό γίνεται διάκριση ανάλογα με το ποσοστό υγρασίας (για τη συναγώμενη θερμότητα) ή την ένταση της φωτιάς (για την ακτινοβολούμενη θερμότητα) και καθορίζονται τα αντίστοιχα όρια βιωσιμότητας σε σχέση με τη χρονική έκθεση στο φαινόμενο.

Πίνακας 2-7: Όρια βιωσιμότητας λόγω της θερμότητας από ακτινοβολία και συναγωγή (CFPA-E No 19, 2009)

Τρόπος Μεταφοράς Θερμότητας	Ένταση Φωτιάς	Όριο Βιωσιμότητας
Συναγωγή	<60 °C 100% κορεσμός	> 30 min
Συναγωγή	100 °C < 10% H ₂ O	8 min
Συναγωγή	110 °C < 10% H ₂ O	6 min
Συναγωγή	120 °C < 10% H ₂ O	4 min
Συναγωγή	130 °C < 10% H ₂ O	3 min
Συναγωγή	150 °C < 10% H ₂ O	2 min
Συναγωγή	180 °C < 10% H ₂ O	1 min
Ακτινοβολία	< 2,5 KW/m ²	> 5 min
Ακτινοβολία	2,5 KW/m ²	30 s
Ακτινοβολία	10 KW/m ²	4 s

Για την αξιολόγηση των επιπτώσεων της έκθεσης στη θερμότητα λόγω πυρκαγιάς, χρησιμοποιείται μια έννοια ανάλογη με το μοντέλο κλασματικής δραστικής δόσης- FED (SFPE, 2016) που χρησιμοποιείται για τα τοξικά αέρια. Θεωρείται ότι στο ανθρώπινο σώμα συσσωρεύεται μια «δόση» θερμότητας με την πάροδο του χρόνου κατά την έκθεση στη φωτιά. Η σύντομη έκθεση σε υψηλή ποσότητα ακτινοβολίας ή θερμοκρασία θεωρείται λιγότερο επιβλαβής σε σχέση με την παρατεταμένη έκθεση σε χαμηλότερα επίπεδα.

Η παρακάτω χρησιμεύει για τον προσδιορισμό της κλασματικής δραστικής δόσης θερμότητας (FED_{HEAT}) που λαμβάνεται ανά λεπτό. Σε σενάρια όπου ένα άτομο εκτίθεται τόσο σε ακτινοβολούμενη θερμότητα όσο και σε μεταφερόμενη θερμότητα από θερμό αέρα, η συνολική δόση θερμότητας εκτιμάται συναθροίζοντας την επίδραση από κάθε τρόπο μεταφοράς θερμότητας.

$$FED_{HEAT} = \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{1}{t_{I\text{conv}}} + \frac{1}{t_{I\text{rad}}} \right)$$

Η δόση που αποκτάται σε κάθε χρονικό διάστημα προκύπτει μετά από ολοκλήρωση. Στην παρούσα εργασία το όριο βιωσιμότητας προβλέπεται όταν $FED_{HEAT} = 0.3$

Όπου:

$t_{I\text{conv}}$: ο χρόνος (σε λεπτά) μέχρι την ανικανότητα (incapaciation) λόγω συναγόμενης θερμότητας

$t_{I\text{rad}}$: ο χρόνος (σε λεπτά) μέχρι την ανικανότητα (incapaciation) λόγω ακτινοβολούμενης θερμότητας

Για τον υπολογισμό του χρονικού ορίου t_{conv} λόγω της έκθεσης σε συναγόμενη ακτινοβολία θα πρέπει να γίνει διάκριση ανάμεσα σε άτομα πλήρως και σε ελαφρώς ντυμένα. Πιο συγκεκριμένα:

$$\text{Για πλήρως ντυμένα άτομα: } t_{conv} = (4.1 \times 10^8) T^{-3.61}$$

$$\text{Για ελαφρώς ή μη ντυμένα άτομα: } t_{conv} = (5 \times 10^7) T^{-3.4}$$

Όπου:

T: θερμοκρασία (°C)

Το όριο για την ανοχή του δέρματος στην έκθεση στην ακτινοβολούμενη θερμότητα είναι περίπου 2,5 kW / m², αυτό σημαίνει ότι ένας άνθρωπος μπορεί να υπομείνει για αρκετά λεπτά την έκθεση κάτω από αυτό το επίπεδο. Πιο συγκεκριμένα, η ακτινοβολούμενη θερμότητα σε αυτή την ένταση οδηγεί σε πόνο στο δέρμα ακολουθούμενο από εγκαύματα μέσα σε δευτερόλεπτα, ενώ οι χαμηλότερη ροή θερμότητας μπορούν να γίνει ανεκτή για περισσότερο από 5 λεπτά. Σε σενάρια όπου τα άτομα πρέπει να περάσουν κάτω από ένα ζεστό στρώμα καπνού για διαφυγή, αυτή η ακτινοβολούμενη ροή αντιστοιχεί περίπου σε θερμοκρασία θερμού στρώματος καπνού 200 °C. Πέρα από αυτό το όριο, ο χρόνος (σε λεπτά) μέχρι την ανικανότητα (incapacitation) λόγω ακτινοβολούμενης θερμότητας, που συμβολίζεται ως t_{rad} σε ροή ακτινοβολίας q (kW/m²), προσδιορίζεται και προσδιορίζεται μέσω της ακόλουθης εξίσωσης:

$$t_{rad} = \frac{1.33}{q^{1.33}}$$

Όπου:

$q^{1.33}$: η ροή θερμότητας λόγω ακτινοβολίας (kW/m²)

Επιπλέον, ο κανονισμός NFPA 130 (2016) παρέχει κριτήρια βιωσιμότητας για τη θερμοκρασία χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση:

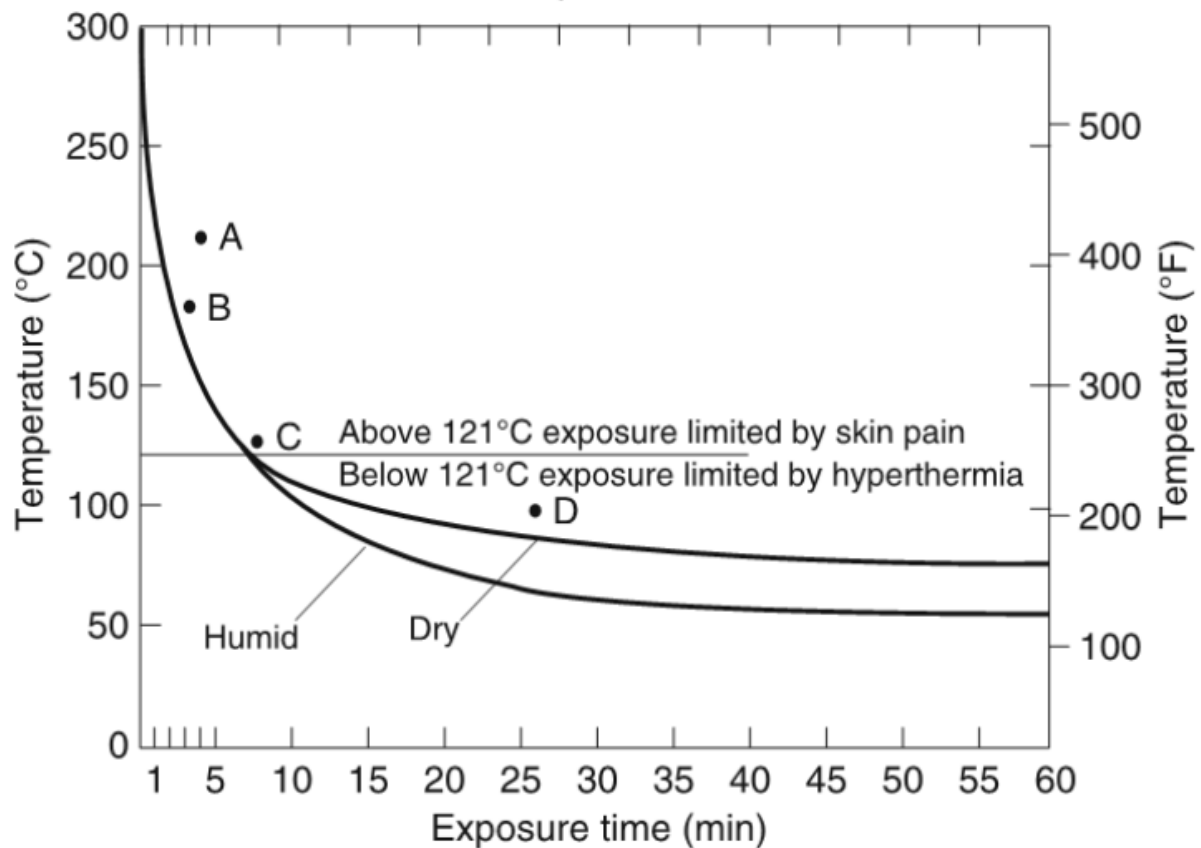
$$t_{exp} = (1.12510^7) T^{-3.4}$$

Όπου:

- t_{exp} : ο χρόνος έκθεσης (min) για FED = 0.3
- T: η θερμοκρασία (°C)

Ο NFPA 130 περιγράφει συγκεκριμένα κριτήρια για τη βιωσιμότητα σε ένα καθορισμένο πλαίσιο, προσφέροντας ποσοτικοποιημένα πρότυπα. Ωστόσο, για ποικίλες εφαρμογές, εναλλακτικές αναφορές όπως το SFPE Handbook of Fire Protection Engineering χρησιμοποιούνται συνήθως για τον καθορισμό σχετικών κριτηρίων βιωσιμότητας. Στο εγχειρίδιο SFPE διατίθενται πληροφορίες σχετικά με τον χρόνο ανοχής των επιβατών στην

έκθεση στη θερμότητα με μεταφορά, όπως απεικονίζεται στο σχήμα που παρέχεται από τους Purser και McAllister.



Σχήμα 2-9: Χρόνος ανοχής για έκθεση σε συναγώμενη θερμότητα (SFPE, 2016)

Επίδραση της παραγωγής τοξικών αερίων και της μείωσης του οξυγόνου

Επίδραση της παραγωγής αέριων προϊόντων καύσης

Η παραγωγή αερίων κατά τη διάρκεια της καύσης μπορεί να έχει σημαντικές επιπτώσεις στην ασφάλεια των σπράγγων (CFPA E Guideline No19, 2009). Πρώτον, μειώνει την ορατότητα, καθιστώντας δύσκολη τη διαφυγή. Δεύτερον, μπορεί να ερεθίσει τα μάτια και το αναπνευστικό σύστημα, επηρεάζοντας την ικανότητα πλοήγησης σε χώρους κτιρίων και κατ' επέκταση τον εντοπισμό οδών και εξόδων διαφυγής. Η απόσταση "ορατότητας" είναι ένας κρίσιμος παράγοντας και η μείωση αυτής της απόστασης μειώνει τις πιθανότητες εύρεσης ασφαλούς τοποθεσίας. Εάν η ορατότητα είναι μικρότερη από περίπου 3 μέτρα, οι χρήστες είναι απίθανο να χρησιμοποιήσουν έξοδο. Ο ερεθιστικός καπνός εμποδίζει επίσης την ορατότητα και επιβραδύνει την εκκένωση. Οι ερεθιστικές ουσίες στα προϊόντα καύσης περιλαμβάνουν διάφορες οργανικές ενώσεις, όπως η ακρολεΐνη και η φορμαλδεΐδη, οι οποίες βρίσκονται σε

συγκεντρώσεις που καθορίζονται από τη χημική σύνθεση του καυσίμου και τις συνθήκες πυρκαγιάς.

Πίνακας 2-8: Τα πιο συχνά καύσιμα αέρια (CFPA E Guideline No19, 2009)

Καύσιμο αέριο	Χημικός Τύπος
Μονοξείδιο του άνθρακα	CO
Διοξείδιο του άνθρακα	CO ₂
Υδροκυανικό οξύ	HCN
Υδροχλωρικό οξύ	HCl
Υδρόθειο	H ₂ S
Περιοξείδιο του αζώτου	NO ₂
Θειικό ανυδρίτιο	SO ₂
Ακρυλική αλδεΐδη	CH ₂ CHCHO
Αμμωνία	NH ₃
Φωσγίνη	COCl ₂

- Μονοξείδιο του άνθρακα

Το μονοξείδιο του άνθρακα προκύπτει από πυρκαγιές που συμβαίνουν σε κλειστούς χώρους με περιορισμένο οξυγόνο. Είναι εξαιρετικά επικίνδυνο κατά τη διάρκεια πυρκαγιών, καθώς είναι εξαιρετικά τοξικό και συχνά παράγεται σε σημαντικές ποσότητες. Αυτό το αέριο είναι άχρωμο, άοσμο και δεν προκαλεί ερεθισμό.

- Διοξείδιο του άνθρακα

Το διοξείδιο του άνθρακα δεν είναι τοξικό, αλλά δρα ως ασφυξιογόνο. Σε μια πυρκαγιά, εκτοπίζει το οξυγόνο και όταν τα επίπεδα οξυγόνου πέφτουν κάτω από το 17% κατ'όγκο, οδηγεί σε ασφυξία.

- Υδροκυανικό οξύ

Το υδροκυανικό οξύ παράγεται σε μικρές ποσότητες κατά τη διάρκεια κοινών πυρκαγιών όταν υλικά όπως οι ρητίνες από μαλλί, μετάξι, ακρυλικό, πολυαμίδιο και ουρεθάνη υφίστανται ατελή καύση λόγω έλλειψης οξυγόνου. Είναι αναγνωρίσιμο από την πικρή μυρωδιά αμυγδάλου. Το υδροκυανικό οξύ δρα διαταράσσοντας την αναπνευστική αλυσίδα, επηρεάζοντας ιδιαίτερα τους ιστούς που εξαρτώνται από το οξυγόνο όπως η καρδιά και το νευρικό σύστημα.

- Φωσγένιο

Το φωσγένιο είναι ένα τοξικό αέριο που σχηματίζεται όταν καίγονται υλικά που περιέχουν χλώριο, όπως πλαστικά υλικά. Αποτελεί σημαντική απειλή σε περιορισμένους χώρους. Όταν εκτίθεται σε νερό ή υγρασία, το φωσγένιο διασπάται σε διοξείδιο του άνθρακα και υδροχλωρικό οξύ. Το υδροκυανικό οξύ και το φωσγένιο, είναι δυνητικά θανατηφόρα υποπροϊόντα των πυρκαγιών, το καθένα με ξεχωριστά χαρακτηριστικά και μηχανισμούς δράσης.

Η τιμή αναφοράς «Άμεσα επικίνδυνο για τη ζωή και την Υγεία» (IDLH) αντιπροσωπεύει τη συγκέντρωση τοξικών ουσιών που μπορεί να αντέξει ένα υγιές άτομο για έως και 30 λεπτά χωρίς να του προκαλέσει σοβαρή βλάβη.

Πίνακας 2-9: Συνηθέστερες τιμές I.D.L.H. προϊόντων καύσης (CFPA E Guideline No19, 2009)

Ουσία	Τύπος	IDLH (ppm)
Μονοξείδιο του άνθρακα	CO	1200
Διοξείδιο του άνθρακα	CO ₂	40000
Υδροκυάνιο οξύ	HCN	50
Αμμωνία	NH ₃	300
Υδροχλωρικό οξύ	HCL	50

Επίδραση της μείωσης της συγκέντρωσης οξυγόνου

Κατά την καύση, τα επίπεδα οξυγόνου πέφτουν και παράγονται αέρια καύσιμα. Αυτή η μείωση του οξυγόνου είναι εξαιρετικά επικίνδυνη (CFPA E Guideline No19, 2009). Όταν βρίσκονται σε ηρεμία, τα άτομα χρειάζονται περίπου 10 λίτρα οξυγόνου ανά λεπτό, που λαμβάνονται μέσω περίπου 20 αναπνοών των 0.5 λίτρων η καθεμία, με κάθε αναπνοή να περιέχει συγκέντρωση οξυγόνου 16%. Εάν η συγκέντρωση οξυγόνου πέσει κάτω από 14%, τα άτομα μπορεί να εμφανίσουν σοβαρά συμπτώματα υποξίας.

Στον ακόλουθο πίνακα παρατίθενται τα όρια βιωσιμότητας για την έκθεση σε βλαβερά αέρια ή σε μειωμένη ποσότητα οξυγόνου (SFPE, 2016). Γίνεται χρονική διάκριση της έκθεσης σε 5 min και 30 min. Επίσης, γίνεται διάκριση ανάμεσα στην ανικανότητα ενός ατόμου να διασωθεί χωρίς τη βοήθεια τρίτου και στον θάνατο.

Πίνακας 2-10: Όρια βιωσιμότητας για έκθεση σε τοξικά αέρια κι υποξία

	5 min		30 min	
	Ανικανότητα	Θάνατος	Ανικανότητα	Θάνατος
HCN	150 - 200 ppm	250 - 400 ppm	90 -120 ppm	170 -230 ppm
CO	6000 - 8000 ppm	12000 - 16000 ppm	1400 - 1700 ppm	2500 - 4000 ppm
CO₂	7 -8%	> 10%	6 - 7%	>9%
Χαμηλό O₂ (υποξία)	10 -13%	< 5%	< 12%	6 - 7%

Δείκτης Κλασματικής Δραστικής Δόσης Αερίων (FED_{IN})

Για τον ποσοτικό προσδιορισμό των ορίων βιωσιμότητας λόγω της αυξημένης συγκέντρωσης σε τοξικά αέρια (μονοξείδιο και διοξείδιο του άνθρακα) και ταυτόχρονα λόγω της μειωμένης συγκέντρωσης σε οξυγόνο γίνεται με τη χρήση του δείκτη FED_{IN}, ο οποίος περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση (SFPE, 2016):

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

Όπου:

- FED_{CO} : Κλασματική δραστική δόση μονοξειδίου του άνθρακα
- V_{CO_2} : Συντελεστής συχνότητας CO_2
- FED_{O_2} : Κλασματική δραστική δόση λόγω έλλειψης οξυγόνου

Στα επόμενα γίνεται περαιτέρω εξήγηση των επιμέρους όρων.

FED_{CO} : Κλασματική δραστική δόση μονοξειδίου του άνθρακα

Ο δείκτης FED_{CO} προσδιορίζεται ως εξής (NFPA, 2014):

$$FED_{CO} = \sum_{t_1}^{t_2} \frac{[CO]}{35000} \times \Delta t$$

Όπου:

- Δt : το χρονικό διάστημα (σε min)
- $[CO]$: η συγκέντρωση του μονοξειδίου του άνθρακα για το χρονικό διάστημα Δt (σε ppm)

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα όρια βιωσιμότητας για έκθεση σε μονοξείδιο του άνθρακα (NFPA, 2014). Ένα κατώτατο όριο στην τιμή 0.5 για το δείκτη FED εφαρμόζεται συνήθως σε υγιείς ενήλικες, ενώ συνιστάται χαμηλότερη τιμή 0.3 για να διασφαλιστεί η ασφάλεια των πιο ευαίσθητων πληθυσμών. Τα όρια AEGL 2 καθορίζονται για την προστασία του γενικού πληθυσμού, συμπεριλαμβανομένων των ευάλωτων ατόμων, από διαρκείς σοβαρές και μη αναστρέψιμες επιπτώσεις στην υγεία. Η επιλογή του ορίου FED θα πρέπει να ευθυγραμμίζεται με τους ειδικούς στόχους του σχεδιασμού πυρασφάλειας, με την τυπική τιμή να είναι 0.3. Για τις ιδιαίτερα ευαίσθητες ομάδες, μπορούν να εξεταστούν πιο αυστηρά κριτήρια.

Πίνακας 2-11: Μέγιστη έκθεση σε μονοξείδιο του άνθρακα CO (NFPA, 2014)

Χρόνος (min)	Όριο βιωσιμότητας		
	AEGL 2	0.3	0.5
4	–	1706	2844
6	–	1138	1896
10	420	683	1138
15	–	455	758
30	150	228	379
60	83	114	190
240	33	28	47

Επιπλέον στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται οι επιπτώσεις στον ανθρώπινο οργανισμό ανάλογα με την συγκέντρωση του CO (σε ppm) στην οποία εκτίθεται (Carbon Monoxide and death, 2014).

Πίνακας 2-12: οι επιπτώσεις στον ανθρώπινο οργανισμό ανάλογα με την συγκέντρωση του CO (σε ppm) στην οποία εκτίθεται (Carbon Monoxide and death, 2014)

Συγκέντρωση CO (ppm)	Επιπτώσεις στον ανθρώπινο οργανισμό
35	Κεφαλαλγία και ίλιγγος μετά από σταθερή έκθεση 6 έως 8 ωρών.
100	Ελαφριά κεφαλαλγία μετά από 2 έως 3 ώρες.
200	Ελαφριά κεφαλαλγία μετά από 2 έως 3 ώρες.
400	Μετωπική κεφαλαλγία μετά από 1 έως 2 ώρες.
800	Ίλιγγος, ναυτία, σπασμοί μέσα σε 45 λεπτά. Λιποθυμία μέσα σε 2 ώρες.
1600	Κεφαλαλγία, ταχυκαρδία, ίλιγγος και ναυτία μέσα σε 20 λεπτά. Θάνατος σε λιγότερο από 2 ώρες.
3200	Κεφαλαλγία, ίλιγγος και ναυτία μέσα σε 5 έως 10 λεπτά. Θάνατος μέσα σε 30 λεπτά.
6400	Κεφαλαλγία και ίλιγγος σε 1 έως 2 λεπτά. Σπασμοί και αναπνευστική ανακοπή, θάνατος σε λιγότερο από 20 λεπτά.
12800	Λιποθυμία μετά από 2-3 εισπνοές. Θάνατος.

V_{CO2} : Συντελεστής συχνότητας CO₂

Ο Συντελεστής συχνότητας CO₂ δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$V_{CO2} = \frac{\exp(0.1903 \times \%CO2 + 2.0004)}{7.1}$$

Όπου:

CO₂ (%): είναι η αναλογία κατόγκο του διοξειδίου του άνθρακα στον υπό μελέτη χώρο.

FED_{O2} : Κλασματική δραστική δόση λόγω έλλειψης οξυγόνου

Η κλασματική δραστική δόση λόγω έλλειψης οξυγόνου δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$FED_{O2} = \sum_{t1}^{t2} \frac{1}{\exp[8.13 - 0.54(20.9\% - \%O2)]}$$

Όπου

Ο όρος (20.9% - %O₂) εκφράζει την αναλογική μείωση του O₂ κατά το υπό εξέταση χρονικό διάστημα. Σημειώνεται ότι η τιμή 20.9% αντιστοιχεί στα κανονικά επίπεδα οξυγόνου που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα.

Ορατότητα

Η ορατότητα διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην πυρασφάλεια, δεδομένου ότι μειώνει την ταχύτητα κίνησης των χρηστών και επομένως έμμεσα καθυστερεί την εκκένωση. Ενώ η θερμοκρασία και τα τοξικά αέρια είναι άμεσες αιτίες θανάτου σε πυρκαγιές. Κατά τη διάρκεια μίας πυρκαγιάς σε σήραγγα τα άτομα αντιμετωπίζουν δυσκολίες στον εντοπισμό ασφαλών εξόδων λόγω του καπνού εμποδίζει την ορατότητα όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα. Πολλαπλές πηγές, συμπεριλαμβανομένων συνεντεύξεων, ερωτηματολογίων και πειραματικής έρευνας, εξέτασαν το όριο πυκνότητας και ορατότητας του καπνού της φωτιάς που είναι ζωτικής σημασίας για την ασφαλή εκκένωση. Η παρουσία καπνού σε έναν κατειλημμένο χώρο όχι μόνο μειώνει τον φωτισμό αλλά ταυτόχρονα μειώνει άμεσα την ικανότητα θέασης μέσα από αυτόν, δημιουργώντας συνθήκες χαμηλού φωτισμού και εμποδίζοντας την ορατότητα των αντικειμένων και της σήμανσης (Nilsson D., Fridolf K., 2020).

Τα πρότυπα ορατότητας σχεδιασμού είναι ζωτικής σημασίας για τους επιβάτες ώστε να πλοηγούνται και να εξέρχονται κατά τη διάρκεια ενός σεναρίου πυρκαγιάς. Ο NFPA 130 καθορίζει ποσοτικοποιημένα κριτήρια βιωσιμότητας, όπως η διατήρηση των επιπέδων χαμηλού φωτισμού λόγω του καπνού κάτω από το σημείο όπου διακρίνονται εσωτερικά φωτιζόμενες πινακίδες στα 30 μέτρα και πόρτες και τοίχοι στα 10 μέτρα. Το εγχειρίδιο SFPE προσφέρει πρόσθετα δεδομένα ορατότητας, συμπεριλαμβανομένων πληροφοριών από πειράματα που αξιολογούν τις συναισθηματικές καταστάσεις των επιβατών κατά την έκθεση στον καπνό της φωτιάς. Αυτά τα δεδομένα δείχνουν ότι η εξοικείωση με ένα κτίριο, η γεωμετρία του και το επίπεδο πυκνότητας καπνού επηρεάζουν σημαντικά τις απαιτήσεις ορατότητας για ασφαλή εκκένωση.

Εκτός από την εξοικείωση, άλλοι παράγοντες, συμπεριλαμβανομένης της γεωμετρίας του χώρου (μικρά έναντι μεγάλων κελυφών), επηρεάζουν την ορατότητα. Μελέτες από τις Ηνωμένες Πολιτείες και το Ηνωμένο Βασίλειο αποκαλύπτουν τη συμπεριφορά των επιβατών όσον αφορά την απόσταση που διανύεται μέσω του καπνού και τις επιπτώσεις των ποικίλων πυκνοτήτων καπνού. Τα ευρήματα υποδεικνύουν τον καθορισμό ορίων βιωσιμότητας για την πυκνότητα του καπνού με βάση τις φυσιολογικές και ψυχολογικές επιπτώσεις στους επιβάτες. Τα κριτήρια ορατότητας ενδέχεται να διαφέρουν για μικρά και μεγάλα κελύφοι, υπογραμμίζοντας τη σημασία της συνεκτίμησης παραγόντων όπως η γεωμετρία του κτιρίου και η εξοικείωση των ενοίκων κατά τη θέσπιση προτύπων βιωσιμότητας για την ορατότητα σε σενάρια πυρκαγιάς.

Με βάση το Ιαπωνικό Ινστιτούτο Πυροσβεστικών Ερευνών Η σχέση μεταξύ ορατότητας και συσκότισης λόγω καπνού διατυπώνεται ως εξής:

$$S = \frac{K}{e}$$

Όπου:

S = η ορατότητα

K = σταθερά αναλογικότητας

e = συντελεστής απόσβεσης (m^{-1})

Η σταθερά αναλογίας K λαμβάνει την τιμή 8 για φωτεινά σήματα και 3 για ανακλαστικά σήματα ή δομικά στοιχεία σε περιβάλλον ανακλώμενου φωτός. Η διάκριση του πότε απαιτούνται φωτεινές πινακίδες έναντι ανακλαστικών σημάτων για έναν συγκεκριμένο χώρο αποτελεί σημαντική πτυχή για την καθορισμό της ορατότητας που είναι διαθέσιμη κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς.

Κλασματική Δραστική Συγκέντρωση- Fractional Effective Concentration (FEC)

Οι έρευνες έχουν αναδείξει τη δυνατότητα καθορισμού ορίων βιωσιμότητας για την πυκνότητα καπνού, λαμβάνοντας υπόψιν τις φυσιολογικές επιπτώσεις στην ορατότητα και τη συμπεριφορά των ανθρώπων κατά τη διάρκεια εκκένωσης σε πυρκαγιά. Αξίζει να σημειωθεί ότι η καθοριστική αυτή παράμετρος επηρεάζεται από ποικίλους παράγοντες, περιλαμβανομένης της εξοικείωσης του ανθρώπου με το περιβάλλον, τη γεωμετρία του χώρου καθώς και τις διαστάσεις του. Η ποσοτικοποίηση της ορατότητας αποτυπώνεται στα εξής κριτήρια εξαρτώμενα από τον χώρο και τη γεωμετρία του περιβάλλοντος (SFPE, 2016).

Για έως 5 μέτρα ορατότητας σε μικρούς χώρους: $FEC_{SMOKE} = \frac{OD}{0.2}$

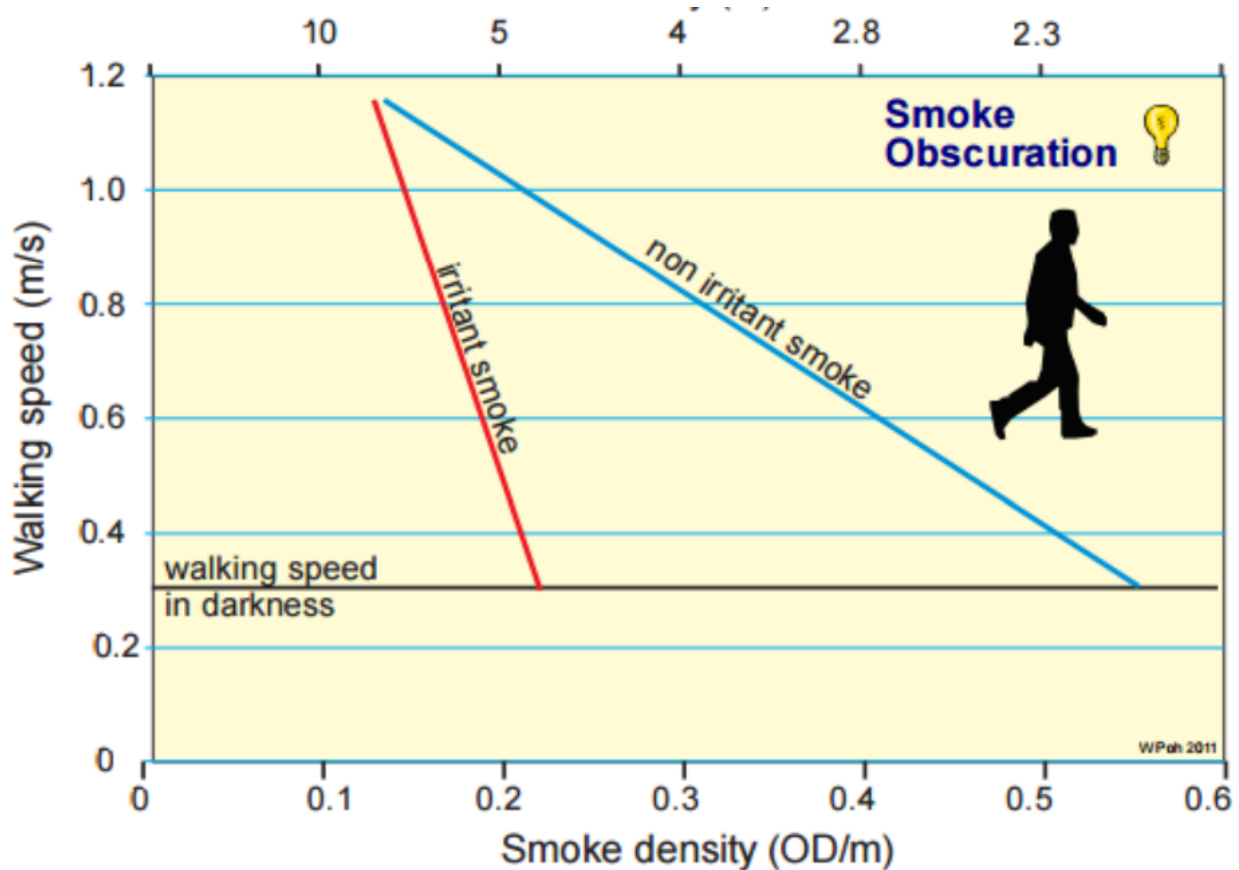
Για έως 10 μέτρα ορατότητας σε μεγάλους χώρους: $FEC_{SMOKE} = \frac{OD}{0.8}$

Τα άτομα τείνουν να επιβραδύνουν το ρυθμό τους εξαιτίας της αύξησης της πυκνότητας και της ερεθιστικότητας λόγω του καπνού που προέρχεται από μια πυρκαγιά. Η επίδραση του καπνού στην κινητικότητα, που οδηγεί σε μείωση της ταχύτητάς του, συχνά παραβλέπεται κατά την ανάπτυξη μέτρων πυρασφάλειας για συμβατικές κατασκευές. Αυτή η εκτίμηση περιορίζεται συνήθως σε συγκεκριμένους τύπους κατασκευών, όπως οδικές ή σιδηροδρομικές σήραγγες, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως.

Ο καπνός από τη φωτιά επηρεάζει την κίνηση των ανθρώπων, επιβραδύνοντάς τους εξαιτίας της παρεμπόδισης της ορατότητας και εξαιτίας της ερεθιστικότητας. Ωστόσο, αυτή η παράμετρος συχνά αγνοείται στον σχεδιασμό πυρασφάλειας κτιρίων. Σε χώρες όπως η Νέα Ζηλανδία και η Σουηδία, η ορατότητα χρησιμοποιείται ως δείκτης βιωσιμότητας στους κανονισμούς. Πιο συγκεκριμένα, έχουν ορίσει το όριο ορατότητας στα 10 m για μεγάλους χώρους (άνω των 100 m^2) και τα 5 m μικρούς χώρους (κάτω των 100 m^2). Η μειωμένη ορατότητα λόγω πυκνού καπνού είναι κρίσιμη για τον σχεδιασμό ασφαλούς εκκένωσης λόγω αδυναμίας εντοπισμού διαφυγής η οποία συνεπάγεται τη μεγαλύτερη διάρκεια παραμονής στον επικίνδυνο χώρο, έχοντας δηλαδή μία έμμεση επίπτωση στη μείωση της βιωσιμότητας.

Τα ακόλουθα πειραματικά διαγράμματα δείχνουν ότι η ταχύτητα βαδίσματος μειώνεται με την αυξανόμενη πυκνότητα καπνού, επηρεάζοντας την ασφάλεια. Ειδικότερα, φαίνεται η επίδραση δύο ειδών καπνού:

- Μη ερεθιστικός καπνός λόγω καύσης κηροζίνης (μπλε γραμμή)
- Ερεθιστικός καπνός από καύση ξύλου (κόκκινη γραμμή)



Σχήμα 2-10: Ταχύτητα βαδίσματος σε σχέση με την πυκνότητα του καπνού για την περίπτωση ερεθιστικού ή μη καπνού (Poh W., 2011)

Από το ανωτέρω διάγραμμα προκύπτει ότι αυξανόμενης της πυκνότητας του καπνού μειώνεται η ταχύτητα βαδίσματος λόγω της μειωμένης ορατότητας. Ενώ, επιπλέον φαίνεται ότι στην περίπτωση που ο καπνός είναι και ερεθιστικό η ταχύτητα βαδίσματος μειώνεται σημαντικά παραπάνω.

Οριακές τιμές βιωσιμότητας ανά παράμετρο

Στις προηγούμενες παραγράφους παρουσιάστηκαν οι κανονισμοί που αναφέρονται στον καθορισμό των ορίων βιωσιμότητας των χρηστών μέσα σε μία σήραγγα όπου έχει ξεσπάσει φωτιά. Στον ακόλουθο πίνακα συνοψίζονται οι τιμές που θα χρησιμοποιηθούν στην παρούσα εργασία. Σημειώνεται ότι η τιμή της θερμοκρασίας στους 250 °C αναφέρεται σε ακαριαία έκθεση στη θερμοκρασία αυτή, λόγω της συναγόμενης θερμότητας. Στην εργασία θα

χρησιμοποιηθεί η αθροιστική επιβάρυνση (μέσω της οριακής τιμής $FED = 0.3$) ενώ, η ακτινοβολούμενη θερμότητα θεωρείται αμελητέα.

Υπενθυμίζεται ότι η επιρροή της ορατότητας είναι έμμεση. Αυτό συμβαίνει διότι η μείωσή της συνεπάγεται την επιβράδυνση του βαδίσματος των χρηστών και άρα την παραμονή τους για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα μέσα στις δυσμενείς συνθήκες της σήραγγας.

Πίνακας 2-13: Οριακές τιμές παραμέτρων βιωσιμότητας για πυρκαγιά σε σήραγγα

Παράμετρος Βιωσιμότητας	Οριακή Τιμή
Θερμοκρασία	250 °C
Συγκέντρωση CO	12000 ppm

2.3.4.2 Ποσοτική εκτίμηση του απαιτούμενου χρόνου για ασφαλή εκκένωση (RSET)

Ο χρόνος που απαιτείται για την ασφαλή εκκένωση (RSET) σε ευνοϊκές συνθήκες καθορίζεται από τέσσερις διακριτούς «χρόνους» οι οποίοι επηρεάζονται από τα φυσικά και συμπεριφορικά χαρακτηριστικά των επιβατών (CFPA E Guideline No 19, 2009). Αυτοί οι τέσσερις αυτοί χρόνοι είναι οι εξής:

Χρόνος ανίχνευσης (Detection Time): Η διάρκεια από την έναρξη της ανάφλεξης έως την αναγνώρισή της είτε με χειροκίνητο είτε με αυτόματο σύστημα. Αυτός ο χρόνος μπορεί να διαφέρει ανάλογα με το σενάριο πυρκαγιάς, την αποτελεσματικότητα του συστήματος πυρανίχνευσης και την ικανότητα των ενοίκων να αντιληφθούν τη φωτιά.

Χρόνος συναγερμού (Alarm Time): Το χρονικό διάστημα από την ανίχνευση έως την έναρξη ενός γενικού συναγερμού.

Χρόνος πριν από την απομάκρυνση (Pre – Movement Time): Ο χρόνος από την ανίχνευση έως τη στιγμή που ο πρώτος επιβάτης αρχίζει να κινείται.

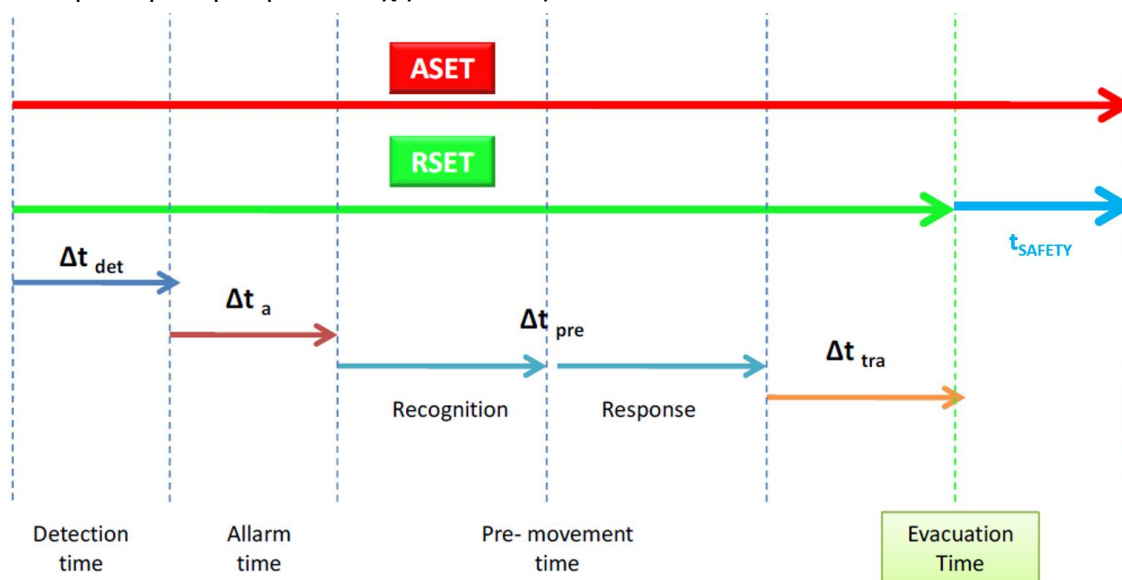
Χρόνος απομάκρυνσης (Travel Time): Η διάρκεια που χρειάζονται οι επιβάτες για να μετακινηθούν από την τρέχουσα θέση τους σε ασφαλέστερη τοποθεσία. Αυτό περιλαμβάνει δύο επιμέρους συνιστώσες:

- **Χρόνος βαδίσματος (Walking Time):** Ο χρόνος που πρέπει να περπατήσουν οι ένοικοι μέχρι την έξοδο, επηρεάζεται από τις ατομικές ταχύτητες βαδίσματος, την απόσταση από την έξοδο, τις φυσικές διαστάσεις του κτιρίου και την κατανομή των ενοίκων. Μπορεί να εκφραστεί ως κατανομή μεμονωμένων χρόνων ή ως μέσος χρόνος που απαιτείται για το περπάτημα στην έξοδο.
- **Χρόνος ροής (Flow Time):** Ο χρόνος που χρειάζονται οι επιβάτες για να ρέουν μέσω εξόδων και οδών διαφυγής, που καθορίζεται από την ικανότητα ροής της εξόδου.

Με βάση τα παραπάνω ο απαιτούμενος χρόνος για την εκκένωση t_{RSET} δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$t_{RSET} = \Delta t_{det} + \Delta t_a + (\Delta t_{pre} + \Delta t_{trav})$$

Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνονται εποπτικά οι επιμέρους χρόνοι κατά τη διάρκεια μίας εκκένωσης. ((CFPA E Guideline No 19, 2009). Αξίζει να σημειωθεί ότι η διαφορά μεταξύ του διαθέσιμου χρόνου ASET και του απαιτούμενου χρόνου RSET αποτελεί τον χρονικό περιθώριο ασφαλείας t_{SAFETY} . Κατά τον σχεδιασμό ενός προγράμματος εκκένωσης αυτό που επιδιώκεται είναι ο χρόνος ασφαλείας t_{SAFETY} να είναι κατά το δυνατόν μεγαλύτερος, έτσι ώστε να υπάρχουν μεγαλύτερα περιθώρια για επιτυχή εκκένωση.



Σχήμα 2-11: Διαγραμματική απεικόνιση των επιμέρους χρόνων κατά τη διάρκεια μίας εκκένωσης (CFPA E Guideline No 19, 2009).

2.3.5 Το λογισμικό Pathfinder: Προσομοίωση εκκένωσης CFD

Το λογισμικό Pathfinder της εταιρείας ThunderHead Engineering είναι ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο εργαλείο λογισμικού για την προσομοίωση της κίνησης των πεζών και της δυναμικής εκκένωσης εντός των κτιρίων (thunderheadeng.com). Χρησιμοποιείται συνήθως από αρχιτέκτονες, μηχανικούς πυροπροστασίας και ερευνητές για την ανάλυση και βελτιστοποίηση των σχεδίων κτιρίων για την ασφάλεια των ενόικων κατά τη διάρκεια καταστάσεων έκτακτης ανάγκης. Ακολουθεί μια γενική επισκόπηση του τρόπου λειτουργίας του Pathfinder και των εισαγόμενων παραμέτρων που συνήθως απαιτεί μία ανάλυση. Εργαλεία λογισμικού όπως το Pathfinder έχουν ενημερώσεις και νέες δυνατότητες. Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιείται η έκδοση: 2023.2.0816 x64

2.3.5.1 Αρχή λειτουργίας του Pathfinder και απαιτούμενες παράμετροι που πρέπει να εισαχθούν (input data)

Εισαγωγή γεωμετρίας

Οι χρήστες πρέπει να εισάγουν τις γεωμετρικές λεπτομέρειες του κτιρίου, συμπεριλαμβανομένων των κατόψεων, των τοίχων, των θυρών, των κλιμακοστασίων και άλλων δομικών στοιχείων στις τρεις διαστάσεις. Επιπλέον, πρέπει να προσομοιωθεί και αλληλεπίδραση μεταξύ των ανθρώπων και της δομής της σήραγγας, όπως το πλάτος, το ύψος, η κλίση, η καμπυλότητα, τα εμπόδια κ.λπ. Αυτές οι πληροφορίες βοηθούν το Pathfinder να δημιουργήσει μια εικονική αναπαράσταση του κτιρίου.

Χαρακτηριστικά επιβατών

Το Pathfinder επιτρέπει στους χρήστες να καθορίζουν τα χαρακτηριστικά των επιβατών, όπως ταχύτητες βαδίσματος, πυκνότητα και η κατανομή τους στο χώρο καθώς και άλλα χαρακτηριστικά συμπεριφοράς. Αυτά τα δεδομένα μπορεί να παρουσιάζουν διακυμάνσεις όπως για παράδειγμα στις ταχύτητες περπατήματος με βάση την ηλικία ή τη φυσική κατάσταση. Επιπλέον, πρέπει να ληφθεί υπόψη και αλληλεπίδραση μεταξύ των ανθρώπων και του περιβάλλοντος της σήραγγας, όπως ο καπνός, η θερμότητα, τα τοξικά αέρια, ο θόρυβος, το φως κ.λπ. Συνολικά, όλες αυτές οι πληροφορίες είναι ζωτικής σημασίας για την ρεαλιστική προσομοίωση της κίνησης των πεζών.

Δεδομένα εμποδίων

Πληροφορίες σχετικά με τυχόν εμπόδια ή εμπόδια που ενδέχεται να συναντήσουν οι επιβάτες κατά την εκκένωση.

Πληροφορίες των εξόδων διαφυγής

Θέσεις και προδιαγραφές εξόδων διαφυγής, συμπεριλαμβανομένης της χωρητικότητας και των χαρακτηριστικών. Σημαντικές πληροφορίες είναι επίσης η ορατότητα και ο αριθμός των εξόδων κινδύνου και των πινακίδων στη σήραγγα.

Επιπλέον χαρακτηριστικά

Ανάλογα με τις συγκεκριμένες απαιτήσεις, οι χρήστες μπορούν να εισάγουν πρόσθετες λεπτομέρειες, όπως ο αντίκτυπος της φωτιάς και του καπνού στη συμπεριφορά των επιβατών, η αποτελεσματικότητα των συστημάτων πυροπροστασίας κ.λπ.

Ρυθμίσεις προσομοίωσης

Οι χρήστες ορίζουν ρυθμίσεις προσομοίωσης, συμπεριλαμβανομένου του σεναρίου (π.χ. πυρκαγιά ή άλλη κατάσταση έκτακτης ανάγκης), της τοποθεσίας του συμβάντος και της ώρας κατά την οποία συμβαίνει. Οι ρυθμίσεις προσομοίωσης περιλαμβάνουν επίσης τη διάρκεια και το χρονικό βήμα της προσομοίωσης.

Λογική πλοήγησης

Το Pathfinder ενσωματώνει αλγόριθμους για την προσομοίωση του τρόπου πλοήγησης των ενοίκων στο κτίριο. Αυτό περιλαμβάνει αποφάσεις σχετικά με την εύρεση μονοπατιών, την αποφυγή εμποδίων και την αλληλεπίδραση μεταξύ τους.

Ανάλυση αποτελεσμάτων

Μετά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης, οι χρήστες μπορούν να αναλύσουν τα αποτελέσματα. Το Pathfinder παρέχει δεδομένα σχετικά με τους χρόνους εκκένωσης, την πυκνότητα του πλήθους και τα πιθανά σημεία συμφόρησης. Αυτές οι πληροφορίες είναι πολύτιμες για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των στρατηγικών εκκένωσης και για τη βελτίωση του σχεδιασμού.

3. Προσομοίωση της φωτιάς και της εκκένωσης

3.1 Εισαγωγή

Η πυρκαγιά σε μία οδική σήραγγα αποτελεί ένα πολυπαραμετρικό υπολογιστικό πρόβλημα. Στόχος της προσομοίωσης είναι να υπολογιστεί η εξέλιξη του φαινομένου της φωτιάς και να προσδιοριστούν οι περιβαλλοντικές συνθήκες που παίζουν ρόλο στη βιωσιμότητα των χρηστών σε κάθε θέση και για κάθε χρονική στιγμή μέχρι να ολοκληρωθεί η εκκένωση. Οι περιβαλλοντικές συνθήκες που ενδιαφέρουν είναι η θερμοκρασία, η συγκέντρωση μονοξειδίου του άνθρακα και αντίστοιχα η μείωση του οξυγόνου. Επιπλέον ενδιαφέρει η μείωση της ορατότητας, η οποία επιβραδύνει τους χρήστες και άρα έμμεσα παρακωλύει τη διαδικασία της εκκένωσης.

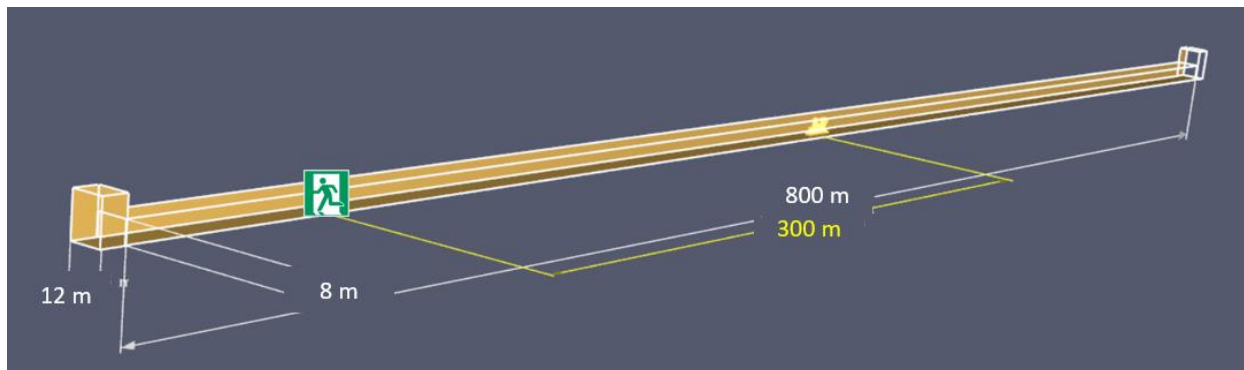
Στα επόμενα περιγράφεται η διαδικασία της προσομοίωσης. Αρχικά, παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της σήραγγας και της φωτιάς σχεδιασμού. Στη συνέχεια, αναλύονται οι παράμετροι εισαγωγής στο λογισμικό Pyrosim για τη μελέτη της φωτιάς και στο λογισμικό Pathfinder για τη μελέτη της εκκένωσης.

3.1.1 Χαρακτηριστικά της σήραγγας

Γεωμετρία

Η εξεταζόμενη σήραγγα είναι μονής κατεύθυνσης και διαθέτει την γεωμετρία που φαίνεται στα ακόλουθα σχήματα. Το μήκος (L) της ανέρχεται στα 800 m, το πλάτος (B) της είναι 11 m

εσωτερικά από παρειά σε παρειά, ενώ το ύψος (H) της είναι 8 m από το ανώτερο σημείο του οδοστρώματος έως εσωτερικά την στέψη της σήραγγας. Οι διαστάσεις της διατομής έχουν επιλεγεί ως τυπικές τιμές, επιπλέον το μήκος των 800 m θεωρείται επαρκές για τη διερεύνηση συνήθων περιπτώσεων. Στο προσομοίωμα τυχόν εμπόδια για τη διάδοση της φωτιάς και του καπνού (ανεμιστήρες, οχήματα) δεν έχουν ληφθεί υπόψη. Η κατά μήκος κλίση της σήραγγας είναι σταθερή για κάθε σενάριο και λαμβάνει τις εξής τιμές: 0, ± 1%, ± 3%. Οι τιμές για την κλίση έχουν επιλεγεί ως οι συνηθέστερες, ωστόσο προτείνεται να μελετηθούν και οι τιμές 2% και 5% για την κάλυψη του μεγαλύτερου εύρους των συνήθων περιπτώσεων.



Σχήμα 3-1: Διαστάσεις σήραγγας στο μέσον φαίνεται η φωτιά και η έξοδος διαφυγής σε απόσταση 300 m από τη φωτιά

Αερισμός

Ο αερισμός της σήραγγας είναι σταθερός ανά σενάριο με τιμές 0 m/s και 1 m/s.

3.1.2 Χαρακτηριστικά της φωτιάς

3.1.2.1 Μέγεθος φωτιάς – τυπικές τιμές καμπύλης HRR

Για τη φωτιά σχεδιασμού έχει επιλεγεί το Σενάριο 7 από τη ΔΑΣ (βλ. Πίνακας 2-3) όπου το εμπλεκόμενο όχημα είναι ένα βαρύ φορτηγό. Η φωτιά χαρακτηρίζεται από τις εξής τυπικές τιμές:

- Μέγιστος ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας: $HRR_{peak} = 100 \text{ MW}$
- Χρονικό διάστημα όπου ο HRR φτάνει στην αιχμή του: $t_{max} = 300 \text{ sec}$
- Χρονικό διάστημα όπου η HRR εισέρχεται στη φάση εξασθένησης: $t_D = 3900 \text{ sec}$
- Χρονικό διάστημα διάρκειας πυρκαγιάς: $t_d = 5100 \text{ sec}$

3.1.2.2 Θέση φωτιάς και έξοδος διαφυγής

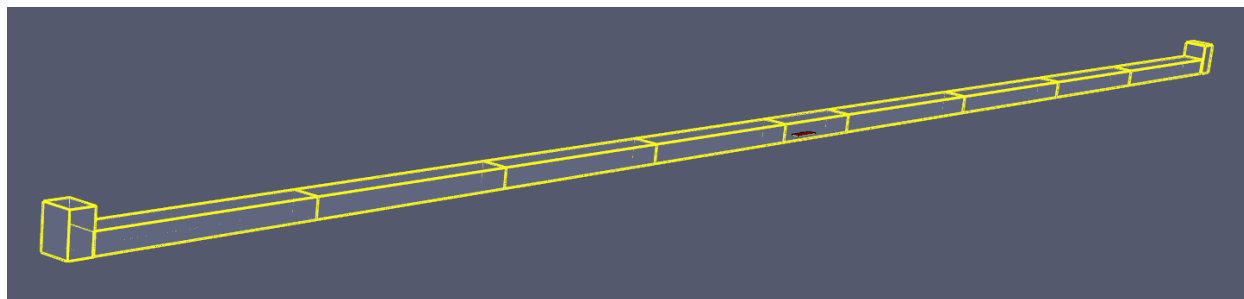
Η φωτιά ξεκινάει στο μέσον της σήραγγας, ήτοι σε απόσταση 400 m από τα στόμια όπως φαίνεται το στο Σχήμα 3-1. Με βάση τον κανονισμό NFPA η μέγιστη απόσταση μεταξύ των εξόδων διαφυγής ανέρχεται στα 300 m. Επομένως, ως δυσμενέστερη περίπτωση τοποθετείται μία έξοδος διαφυγής σε απόσταση 300 m από τη φωτιά και 100 m από το στόμιο εισόδου. Δεν τοποθετείται επιπλέον έξοδος διαφυγής διότι οι χρήστες θεωρείται ότι κινούνται με κατεύθυνση τέτοια ώστε να απομακρυνθούν από τη φωτιά.

3.2 Παράμετροι εισαγωγής στο λογισμικό Pyrosim

Για τις αναλύσεις της φωτιάς της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Pyrosim της εταιρείας ThunderHead Engineering v.2023.3.1312. Το λογισμικό αυτό αποτελεί έναν προεπεξεργαστή (preprocessor) του προσομοιωτή FDS (Fire Dynamics Simulator) για την έκδοση v.6.8.0. Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζεται ο τρόπος που σχεδιάστηκε το μοντέλο.

3.2.1 Κάνναβος πεπερασμένων στοιχείων (Mesh)

Για την κατασκευή του μοντέλου της σήραγγας δημιουργήθηκε κάνναβος (Mesh) ο οποίος είναι πυκνότερος στην περιοχή ενδιαφέροντος, ήτοι γύρω από τη φωτιά. Αυτό γίνεται για να μειωθεί ο υπολογιστικός φόρτος στα σημεία όπου χρειάζεται λιγότερη λεπτομέρεια. Επιπλέον, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-2 στα στόμια έχουν δημιουργηθεί 2 επιπλέον τμήματα τα οποία προσομοιάζουν τις συνθήκες του ανοιχτού χώρου, για να μην επηρεάζεται η ροή του καπνού στα στόμια από τις συνοριακές συνθήκες. Στην περιοχή όπου ο κάνναβος είναι πιο πυκνός οι διαστάσεις του κάθε κελιού είναι μήκος: 0.4, πλάτος: 0.4 και ύψος: 0.2 m, ενώ στην περιοχή όπου ο κάνναβος είναι πιο αραιός οι διαστάσεις είναι μήκος: 0.8, πλάτος: 0.4 και ύψος: 0.2 m. Όπως φαίνεται και από τις διαστάσεις του καννάβου ενδιαφέρει κυρίως η κίνηση του καπνού καθ' ύψος για αυτό και είναι πιο μικρή η αντίστοιχη διάσταση του κελιού.



Σχήμα 3-2: Χωρισμός του μοντέλου σε τμήματα ανάλογα με την πυκνότητα του καννάβου

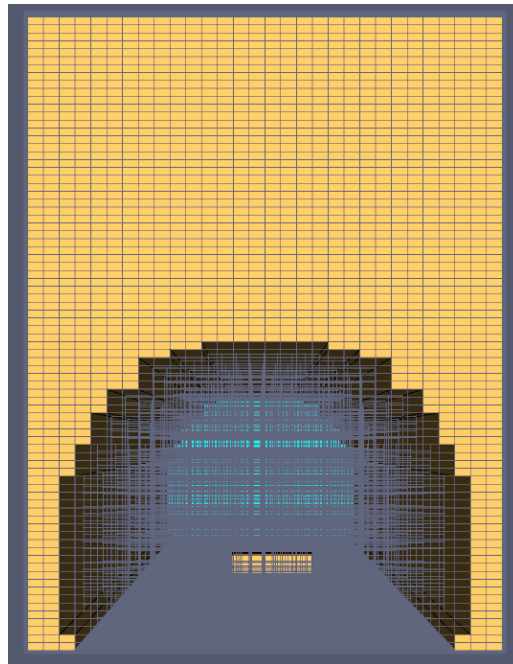
3.2.2 Εισαγωγή της γεωμετρίας της σήραγγας

Η γεωμετρία της διατομής σήραγγας εισάγεται στο λογισμικό Pyrosim ως αρχείο τύπου .dxf το οποίο έχει σχεδιαστεί στο πρόγραμμα AutoCad 2023 (v. T.53.0.0). Στη συνέχεια για να οριστεί η

σήραγγα ως τρισδιάστατο στοιχείο δημιουργούνται αντικείμενα (obstacles) τα οποία έχουν βάθος όσο το μήκος της σήραγγας ($L = 800$ m) όπως φαίνεται και στα ακόλουθα σχήματα. Σημειώνεται ότι οι διαστάσεις των obstacles συνάδουν με αυτές του καννάβου (βλ. Σχήμα 3-4)



Σχήμα 3-3: Εισαγωγή τοιχώματος της σήραγγας στο λογισμικό Pyrosim ως obstacles (προοπτικό)



Σχήμα 3-4: Εισαγωγή τοιχώματος της σήραγγας στο λογισμικό Pyrosim ως obstacles (όψη από το στόμιο)

3.2.3 Επιφάνειες περιβαλλοντικών συνθηκών (Vents)

Στο PyroSim, οι επιφάνειες (Vents) είναι δισδιάστατα ορθογωνικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση ανοιγμάτων εμποδίων και εν γένει των αντικειμένων μέσα σε μια προσομοίωση πυρκαγιάς. Κάθε στοιχείο του μοντέλου (κέλυφος σήραγγας,

εμπόδια, οχήματα, φωτιά) αποτυπώνεται γεωμετρικά και στις επιφάνειες του ορίζεται η ιδιότητά του μέσω του εργαλείου Vent (Pyrosim User Manual, 2020)

Οι επιφάνειες Vents επιτρέπουν τη ροή αερίων, καπνού και θερμότητας εντός του προσομοιωμένου περιβάλλοντος. Μπορούν να αντιπροσωπεύουν οτιδήποτε, από απλά ανοίγματα όπως παράθυρα ή πόρτες έως πιο σύνθετα συστήματα εξαερισμού. Καθορίζοντας τις ιδιότητες των Vents, όπως το μέγεθος, το σχήμα, τη θέση τους και εάν είναι σταθερά ή λειτουργικά, οι χρήστες μπορούν να προσομοιώσουν με ακρίβεια τη συμπεριφορά της φωτιάς και του καπνού σε διάφορα σενάρια. Με αυτό τον τρόπο μελετάται η δυναμική της πυρκαγιάς. Στην παρούσα εργασία έχουν χρησιμοποιηθεί τρία είδη Vent

Inert: Αδιαβατικό υλικό χρησιμοποιείται για τα τοιχώματα της σήραγγας και των οχημάτων

Open: Χρησιμοποιείται για τα ανοίγματα στα στόμια

Fire: Σχεδιάστηκε ειδικά για τους σκοπούς της εργασίας και προσομοιάζει τη φωτιά, ορίζεται ως καύσιμο υλικό (Burner) και η καθορισμένη χημική αντίδραση είναι η καύση πολυουρεθάνης. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε το προτυποποιημένο υλικό πολυουρεθάνης που προβλέπεται στον κανονισμό SFPE και χρησιμοποιήθηκε από τη βιβλιοθήκη του λογισμικού Pyrosim (SFPE POLYURETHANE_GM27).

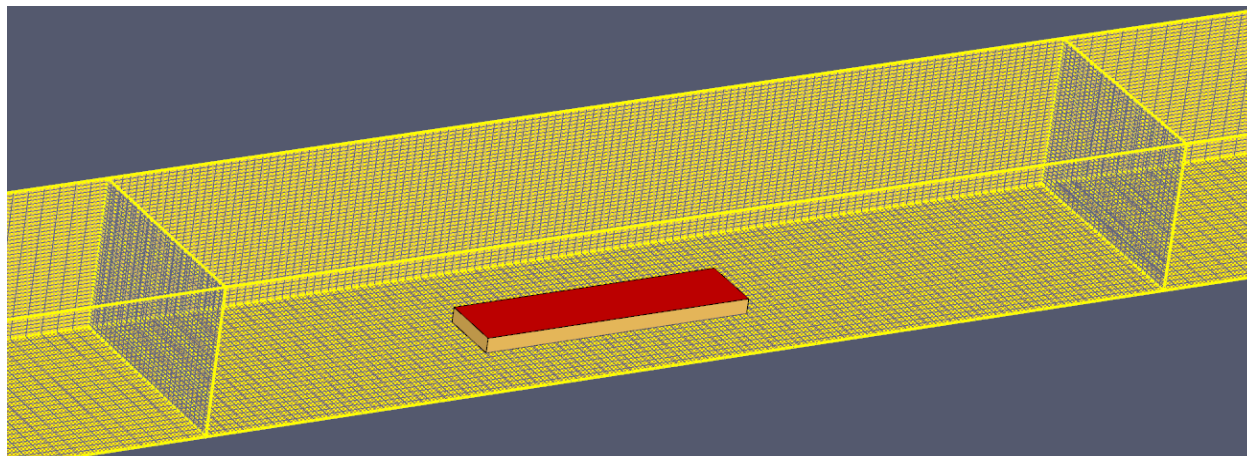
3.2.4 Μοντελοποίηση της φωτιάς

Το Σενάριο Φωτιάς Σχεδιασμού υπ' αριθμόν 7 από την ΔΑΣ (βλ. Πίνακας 2-3), το οποίο έχει επιλεγεί για την προσομοίωση έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

Πίνακας 3-1: Χαρακτηριστικά Σεναρίου Φωτιάς υπ' αριθμόν 7 (ΔΑΣ)

	Εμπλεκόμενα οχήματα στη φωτιά	HRR _{peak} (MW)	t _{max} (sec)	t ₀ (sec)	t _d (sec)
Σενάριο 7	1 βαρύ φορτηγό (μέση τιμή)	100	300	3900	5100

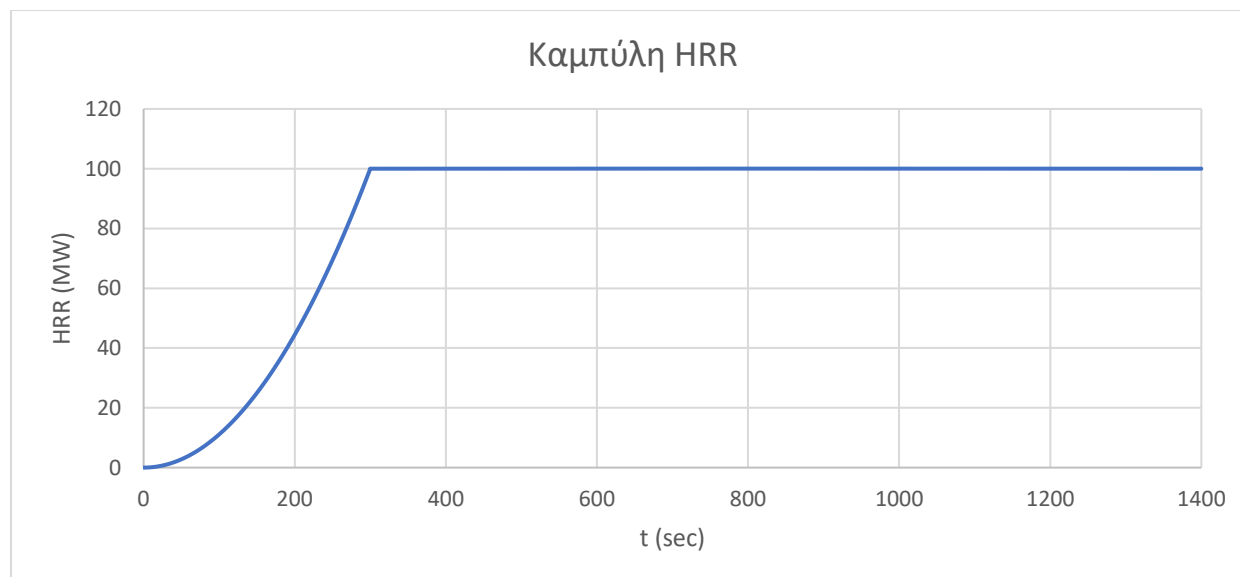
Για την μοντελοποίηση της φωτιάς έχει δημιουργηθεί ένα συμπαγές εμπόδιο στο μέσον της σήραγγας με τις διαστάσεις κάτοψης ενός τυπικού βαρέως φορτηγού (μήκος: 15.6 m, πλάτος: 3.2 m). Το ύψος του εμποδίου καθορίζεται σε 0.4 m και στην οροφή του τοποθετείται κατάλληλο Vent το οποίο προσομοιάζει τη φωτιά. Το συγκεκριμένο ύψος έχει επιλεγεί διότι θεωρείται ότι το όχημα αναφλέγεται στο ύψος της μηχανής.



Σχήμα 3-5: Μοντελοποίηση της φωτιάς στο λογισμικό Pyrosim στο κέντρο φαίνεται το φλεγόμενο φορτηγό

3.2.4.1 Καμπύλη ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας (HRR)

Η καμπύλη HRR σχεδιάζεται με βάση τις χαρακτηριστικές τιμές που περιγράφουν την εξέλιξη της φωτιάς (βλ. Πίνακας 3-1). Για την εισαγωγή στο λογισμικό Pyrosim χρησιμοποιείται η τιμή $t^2 = 300$. Η καμπύλη HRR είναι ίδια σε όλα τα Σενάρια και έχει τη μορφή που φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα. Η καμπύλη χωρίζεται σε δύο μέρη, το πρώτο τμήμα είναι μία παραβολή η οποία ξεκινάει από την αρχή των αξόνων και μεγιστοποιείται τη χρονική στιγμή 300 sec με τιμή 100 MW (που είναι η μέγιστη απελευθέρωση θερμότητας του Σεναρίου της φωτιάς). Το δεύτερο τμήμα μέχρι τα 1400 sec, που είναι η χρονική διάρκεια της προσομοίωσης, η τιμή της απελευθέρωσης θερμότητας παραμένει σταθερή στα 100 MW.



Σχήμα 3-6: Καμπύλη ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας (HRR)

3.2.5 Μοντελοποίηση λοιπών περιβαλλοντικών συνθηκών

3.2.5.1 Αερισμός

Για την προσομοίωση του αερισμού σε μία σήραγγα συνήθως σχεδιάζεται κατάλληλο Vent. Ωστόσο, στα σενάρια που μελετάει η παρούσα εργασία ο αερισμός είναι σταθερός (είτε μηδενικός είτε 1 m/s). Επομένως, επιλέγεται να οριστεί πιο γενικευμένα μέσα από τις περιβαλλοντικές συνθήκες (Analysis > Simulation Parameters > Environment > Configure Wind > Edit > Initial Wind Velocity > Speed: 1 m/s , Direction: 270°. Έτσι, ήδη από το πρώτο δευτερόλεπτο της προσομοίωσης ο αερισμός στη σήραγγα είναι σταθεροποιημένος.

3.2.5.2 Κλίση σήραγγας

Η κλίση της σήραγγας δεν γίνεται να οριστεί γεωμετρικά μέσω του μοντέλου που εισάγεται από το αρχείο .dxf που σχεδιάστηκε στο λογισμικό AutoCad. Αυτό συμβαίνει διότι ο κάνναβος δε θα ακολουθεί την κλίση σήραγγας και έτσι θα προκύπτουν υπολογιστικά κωλύματα. Για να παρακαμφθεί αυτό το εμπόδιο επιλέγεται η κλίση εισάγεται εικονικά ορίζοντας διανυσματικά την βαρύτητα. Έτσι, για κλίση $\alpha\%$ η βαρύτητα θα έχει δύο συνιστώσες:

- $g_z = -9.81 \cdot \cos(\text{atan}(\alpha/100))$ [m/s²]
- $g_x = -9.81 \cdot \sin(\text{atan}(\alpha/100))$ [m/s²]

Η παραπάνω εντολή καθορίζεται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες (Analysis > Simulation Parameters > Environment > Specify Gravity

3.2.5.3 Στόμια

Στα στόμια έχουν δημιουργηθεί δύο επιπλέον χώροι στους οποίους έχει καθοριστεί Vent Open ή Inert ανάλογα με το εάν είναι ανοιχτά στο περιβάλλον ή βρίσκεται το πέτρωμα της σήραγγας. Αυτό γίνεται έτσι ώστε να αποφευχθούν προβλήματα λόγω συνοριακών συνθηκών (βλ. Σχήμα 3-3 και Σχήμα 3-4).

3.2.6 Προσθήκη εικονικών συσκευών (Devices)

Στο λογισμικό PyroSim, οι συσκευές είναι αντικείμενα που χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση διαφόρων στοιχείων ενός συστήματος πυροπροστασίας ή άλλου εξειδικευμένου εξοπλισμού σε μια προσομοίωση πυρκαγιάς. Αυτές οι συσκευές μπορούν να περιλαμβάνουν ανιχνευτές καπνού, ψεκαστήρες, ανιχνευτές θερμότητας, ανεμιστήρες, πυροσβεστήρες και άλλα (Pyrosim User Manual, 2020).

Με την ενσωμάτωση συσκευών σε ένα μοντέλο PyroSim, οι χρήστες μπορούν να προσομοιώσουν την ενεργοποίηση και τη συμπεριφορά αυτών των στοιχείων καθώς αποκρίνονται στις συνθήκες της πυρκαγιάς. Για παράδειγμα, οι ανιχνευτές καπνού μπορεί να ενεργοποιήσουν συναγερμούς ή να ενεργοποιήσουν συστήματα εξαερισμού, οι αποσβεστήρες μπορεί να απελευθερώσουν νερό για να καταστείλουν τη φωτιά.

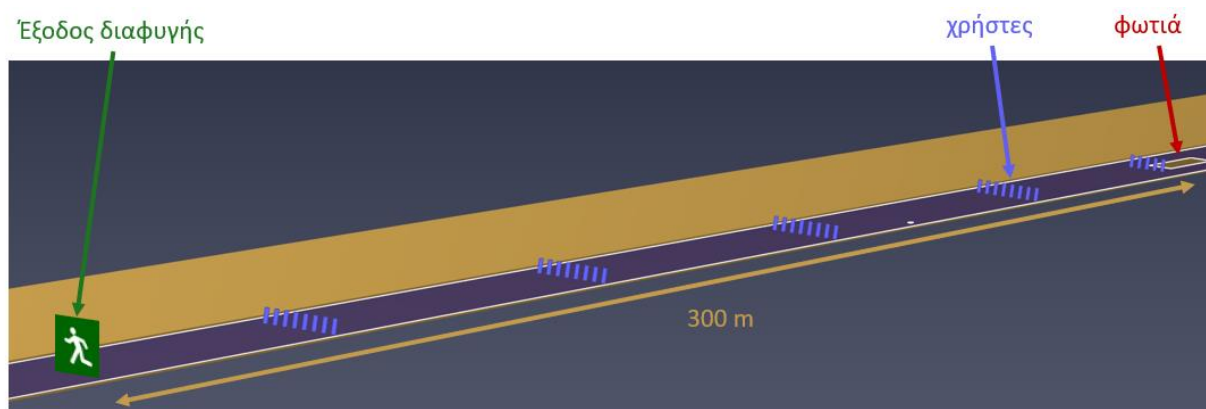
Οι συσκευές στο PyroSim επιτρέπουν στους χρήστες να αναλύουν την αποτελεσματικότητα των συστημάτων πυροπροστασίας, να αξιολογούν τις στρατηγικές εκκένωσης και να βελτιστοποιούν τα σχέδια κτιρίων για πυρασφάλεια. Διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη δημιουργία ρεαλιστικών και ακριβών προσομοιώσεων πυρκαγιάς για σκοπούς μηχανικής ανάλυσης και σχεδιασμού.

Στην παρούσα εργασία έχουν χρησιμοποιηθεί συσκευές ως εικονικοί μετρητές της θερμοκρασίας, της συγκέντρωσης σε CO, της ορατότητας κάθε 50 m και στο ύψος του ανθρώπου $z = 1.80$ m. Οι συσκευές αυτές λαμβάνουν μετρήσεις ανά 10 sec. Στη συνέχεια, κατά τη διαχείριση αυτών των αποτελεσμάτων γίνεται γραμμική παρεμβολή και δημιουργούνται διαγράμματα τα οποία δείχνουν την τιμή της εκάστοτε παραμέτρου για κάθε θέση και για κάθε χρονική στιγμή (βλ. Κεφάλαιο 4.4).

3.2.7 Χρονική διάρκεια της προσομοίωσης της φωτιάς

Η προσομοίωση της φωτιάς διαρκεί 1400 sec. Το χρονικό διάστημα αυτό επιλέχθηκε διότι είναι επαρκές για την μετέπειτα ανάλυση της εκκένωσης.

3.3 Παράμετροι εισαγωγής στο λογισμικό Pathfinder



Εικόνα 3-1: Εισαγωγή των δεδομένων στο λογισμικό Pathfinder

3.3.1 Δεδομένα που εισάγονται από το λογισμικό Pyrosim

Η γεωμετρία της σήραγγας καθώς και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της φωτιάς εισάγονται από το λογισμικό Pyrosim μέσω της εντολής (Simulation > Simulation Parameters > FDS Data).

3.3.2 Παραμετροποίηση χρηστών

3.3.2.1 Χρήστες (Occupants)

Μέσω της εντολής Occupants δημιουργούνται 5 κατηγορίες χρηστών (Α έως Ε). Το χαρακτηριστικό κάθε κατηγορίας είναι η απόστασή της από το σημείο της φωτιάς την στιγμή που ξέσπασε. Έτσι, έχουμε 5 αποστάσεις (10, 50, 100, 150 και 200 m).

3.3.2.2 Συμπεριφορές (Behaviors)

Σε κάθε χρήστη ορίζεται μία συμπεριφορά. Το χαρακτηριστικό κάθε συμπεριφοράς είναι η χρονοκαθυστέρηση προτού ξεκινήσει να απομακρύνεται. Σκοπός της παρούσας Εργασίας είναι να βρει για κάθε κατηγορία χρηστών το μέγιστο χρόνο που δύναται να καθυστερήσει έτσι ώστε να φτάσει οριακά στην έξοδο διαφυγής.

3.4 Σενάρια φωτιάς και εκκένωσης

Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται τα Σενάρια που μελετήθηκαν κατά την εκπόνηση της παρούσας Εργασίας. Σημειώνεται ότι το πρόσημο του αερισμού αναφέρεται ως προς την κατεύθυνση που επιχειρούν να κινηθούν οι χρήστες. Έτσι, θετικό πρόσημο για την ταχύτητα του αέρα συνεπάγεται ότι κινείται αντίθετα σε σχέση με τους χρήστες, ενώ αρνητικό σημαίνει ότι η κίνηση του αέρα είναι προς τα εκεί που κατευθύνονται και οι χρήστες. Για αυτό το λόγο τα Σενάρια 11 έως 14 έχουν την ίδια ανάλυση για τη φωτιά με προηγούμενα Σενάρια, αλλά στην εκκένωση η έξοδος διαφυγής και οι χρήστες βρίσκονται από τη συμμετρικά αντίθετη πλευρά ως προς το κέντρο της σήραγγας.

Πίνακας 3-2: Σενάρια φωτιάς και εκκένωσης

α/α Σεναρίου	κλίση σήραγγας	ταχύτητα αέρα (m/s)
1	0	0
2	1%	0
3	-1%	0
4	3%	0
5	-3%	0
6	0%	1
7	1%	1
8	-1%	1
9	3%	1
10	-3%	1
11	0%	-1
12	-1%	-1
13	1%	-1
14	3%	-1

Ανάλυση φωτιάς ίδια με το Σενάριο 6

Ανάλυση φωτιάς ίδια με το Σενάριο 7

Ανάλυση φωτιάς ίδια με το Σενάριο 8

Ανάλυση φωτιάς ίδια με το Σενάριο 10

4. Ανάλυση αποτελεσμάτων προσομοίωσης φωτιάς και εκκένωσης

4.1 Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν. Στο εισαγωγικό μέρος περιγράφεται ο τρόπος διαχείρισης των εξαγόμενων αποτελεσμάτων από την προσομοίωση της φωτιάς και της εκκένωσης. Στη συνέχεια αναλύονται τα αποτελέσματα κάθε σεναρίου. Υπογραμμίζεται ότι το βασικό σενάριο αναφοράς είναι το 1ο Σενάριο, όπου η κατά μήκος κλίση της σήραγγας και η ταχύτητα του αέρα είναι μηδενικές. Με βάση το εν λόγω σενάριο γίνονται οι συγκρίσεις μεταξύ των υπολοίπων σεναρίων

4.2 Μεθοδολογία ανάλυσης αποτελεσμάτων προσομοίωσης φωτιάς με το λογισμικό Pyrosim

Στα επόμενα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για την προσομοίωση της φωτιάς μέσω του λογισμικού PyroSim. Στο προσομοίωμα έχουν τοποθετηθεί εικονικοί μετρητές “Devices” ανά 50 m στο μέσον της διατομής της σήραγγας στο ύψος του ανθρώπου ($z = 1.80$ m). Οι μετρητές αυτοί με χρονικό βήμα 10 sec καταγράφουν την τιμή της θερμοκρασίας, του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και της ορατότητας.

Στην συνέχεια χρησιμοποιώντας τον κώδικα Matlab για κάθε μεταβλητή (θερμοκρασία, CO, ορατότητα) κατασκευάστηκαν με γραμμική παρεμβολή συνολικά διαγράμματα που απεικονίζουν την τιμή της εκάστοτε μεταβλητής σε κάθε θέση και για κάθε χρονική στιγμή έως

τα πρώτα 1400 sec. Το διάστημα των 1400 sec είναι ικανό έτσι ώστε να περιλαμβάνει όλη τη χρονική διάρκεια και της εκκένωσης.

4.2.1 Ειδικές επισημάνσεις για τη διαγραμματική απεικόνιση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης της φωτιάς

Θερμοκρασία

Αναφορικά με τη θερμοκρασία στα διαγράμματα όπου παρουσιάζεται η χωρική και χρονική μεταβολή της χρησιμοποιήθηκε ως ανώτατο όριο η τιμή των 250°C, ήτοι κάθε θερμοκρασία μεγαλύτερη αυτής απεικονίζεται με μαύρο χρώμα. Η εν λόγω τιμή επιλέχθηκε διότι με βάση τον κανονισμό NFPA αντιστοιχεί στο όριο βιωσιμότητας σε περίπτωση που εκτεθεί κάποιος άνθρωπος στιγμιαία στη θερμοκρασία αυτή (βλ. Κεφάλαιο 2.3.4.1).

Συγκέντρωση μονοξειδίου του άνθρακα (CO)

Με αντίστοιχο σκεπτικό όπως και στην περίπτωση της θερμοκρασίας για τη διαγραμματική απεικόνιση της μεταβολής της συγκέντρωσης του CO χρησιμοποιήθηκε ως ανώτατο όριο η τιμή των 6000 ppm. Όπως περιγράφεται και στο Κεφάλαιο 2.3.4.1 η μέγιστη συγκέντρωση που δύναται να αντέξει ο ανθρώπινος οργανισμός είναι τα 12000 ppm. Ωστόσο, τα προϊόντα της καύσης των σεναρίων που εξετάζει η παρούσα εργασία δεν προκαλούν τόσο μεγάλες συγκεντρώσεις. Επομένως, για την ευκρινέστερη απεικόνιση χρησιμοποιήθηκε η τιμή των 6000 ppm.

Ορατότητα

Για τη διαγραμματική απεικόνιση της ορατότητας χρησιμοποιείται ως κατώτατη η τιμή 0 m και απεικονίζεται με βαθύ ερυθρό χρώμα, ενώ κάθε τιμή από 15 m απεικονίζεται με βαθύ κυανό χρώμα. Όπως έχει αναλυθεί και στο Κεφάλαιο 2.3.4.1 η τιμή των 15 m δεν αποτελεί όριο βιωσιμότητας, ωστόσο για μειωμένες τιμές ορατότητας μειώνεται σημαντικά και η ταχύτητα βαδίσματος των χρηστών πράγμα που κατ' επέκταση καθυστερεί την εκκένωση.

4.3 Μεθοδολογία ανάλυσης αποτελεσμάτων προσομοίωσης εκκένωσης με το λογισμικό PathFinder

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων της εκκένωσης μέσω του λογισμικού PathFinder βασίστηκε στο δείκτη της κλασματικής δραστικής δόσης FED, λόγω της έκθεσης σε υψηλές θερμοκρασίες και σε τοξικά αέρια. Πιο συγκεκριμένα, με βάση τις εξισώσεις υπολογισμού του FED που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2.3.4.1 υπολογίστηκε για κάθε χρήστη η χρονική στιγμή κατά την οποία έφτασε στο αντίστοιχο όριο βιωσιμότητας, λόγω της αθροιστικής επιβάρυνσης.

Όπως περιγράφηκε και στο Κεφάλαιο 3.3 οι χρήστες έχουν ομαδοποιηθεί σε 5 κατηγορίες ανάλογα με τη θέση στην οποία βρισκόντουσαν τη στιγμή που ξέσπασε η φωτιά (10 m, 50 m, 100 m, 150 m και 250 m). Για να θεωρηθεί επιτυχής η εκκένωση ενός χρήστη θα πρέπει τη στιγμή που φτάνει στην έξοδο διαφυγής οι αντίστοιχοι 2 δείκτες FED (λόγω θερμοκρασίας και τοξικών αερίων) να μην ξεπερνούν τις καθορισμένες οριακές τιμές (0.3 και 1 αντίστοιχα)

Εάν ένας χρήστης καθυστερήσει πολύ να ξεκινήσει την εκκένωση δε θα διαθέτει αρκετό χρόνο για να φτάσει στην έξοδο, διότι το FED του θα ξεπεράσει τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή. Επομένως, με δοκιμές μπορεί να βρεθεί για κάθε κατηγορία χρήστη η αρχική χρονοκαθυστέρηση εκκίνησης της εκκένωσης έτσι ώστε να φτάνει στην έξοδο *οριακά*. Πιο συγκεκριμένα σε κάθε αρχική θέση από τη φωτιά ορίζονται χρήστες με χρονοκαθυστέρηση εκκίνησης ανά 5 sec. Συνεπώς, μπορεί να βρεθεί από ποια χρονοκαθυστέρηση και μετά οι χρήστες της εν λόγω κατηγορίας δεν προλαβαίνουν να εκκενώσουν. Αυτή η χρονοκαθυστέρηση είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη με ακρίβεια 5 sec.

4.3.1.1 Ειδικές επισημάνσεις για τον υπολογισμό της κλασματικής δραστικής δόσης FED

Θερμοκρασία

Με βάση τις σχέσεις που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 2.3.4.1 για την αθροιστική επιβάρυνση λόγω της θερμοκρασίας λαμβάνεται υπόψη μόνο η συναγόμενη θερμότητα, ενώ η επιρροή της ακτινοβολούμενης θερμότητας θεωρείται αμελητέα. Το όριο βιωσιμότητας λαμβάνεται σε FED = 0.3.

Τοξικά αέρια-υποξία

Η επιρροή των τοξικών αερίων και η μείωση του οξυγόνου συνδυαστικά περιγράφονται μέσω μιας ενιαίας εξίσωσης (βλ. κεφάλαιο 2.3.4.1) και έτσι καθορίζεται το όριο για τα αέρια συνολικά σε FED = 1.

4.4 Αποτελέσματα προσομοιώσεων για κάθε σενάριο

Στα επόμενα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κάθε σεναρίου. Αρχικά, περιγράφεται η εξέλιξη του φαινομένου της φωτιάς και εν συνεχεία της εκκένωσης.

Μεθοδολογία ανάλυσης αποτελεσμάτων της φωτιάς

Για τη μελέτη της φωτιάς κατασκευάστηκαν με τον κώδικα Matlab τρία διαγράμματα όπου απεικονίζεται η θερμοκρασία, η συγκέντρωση του CO και η ορατότητα σε κάθε θέση για κάθε χρονική στιγμή έως τα πρώτα 1400 sec. Τα διαγράμματα αυτά έχουν παρόμοια μορφή που συνάδει με την κίνηση του ζεστού καπνού μέσα στη σήραγγα. Εκ των τριών το διάγραμμα που ενδιαφέρει πιο πολύ είναι αυτό της θερμοκρασίας, διότι όπως αποδεικνύεται αποτελεί την κρισιμότερη παράμετρο για την εκκένωση. Σημειώνεται ότι η συγκέντρωση του μονοξειδίου του άνθρακα παραμένει σε αποδεκτά και πολύ χαμηλά επίπεδα, ενώ η ορατότητα, όπως έχει ήδη αναφερθεί, αποτελεί έμμεσο παράγοντα που δυσχεραίνει την εκκένωση. Για αυτό το λόγο τα δύο αυτά διαγράμματα παρουσιάζονται στο Παράρτημα για την πληρότητα της Εργασίας.

Μεθοδολογία ανάλυσης αποτελεσμάτων της εκκένωσης

Στη συνέχεια για την ανάλυση της εκκένωσης δημιουργήθηκαν δύο ραβδογράμματα όπου αποτυπώνουν για κάθε χρήστη την αθροιστική επιβάρυνση μέσω του δείκτη FED τη στιγμή που φτάνει στην έξοδο διαφυγής. Το ένα ραβδόγραμμα αφορά στην έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες και το άλλο στην έκθεση σε τοξικά αέρια σε συνδυασμό με τη μείωση του οξυγόνου. Ωστόσο, όπως έχει ήδη επισημανθεί, επειδή η επίδραση των τοξικών αερίων και της υποξίας είναι πολύ χαμηλή το αντίστοιχο ραβδόγραμμα κάθε σεναρίου παρατίθεται στο Παράρτημα της εργασίας.

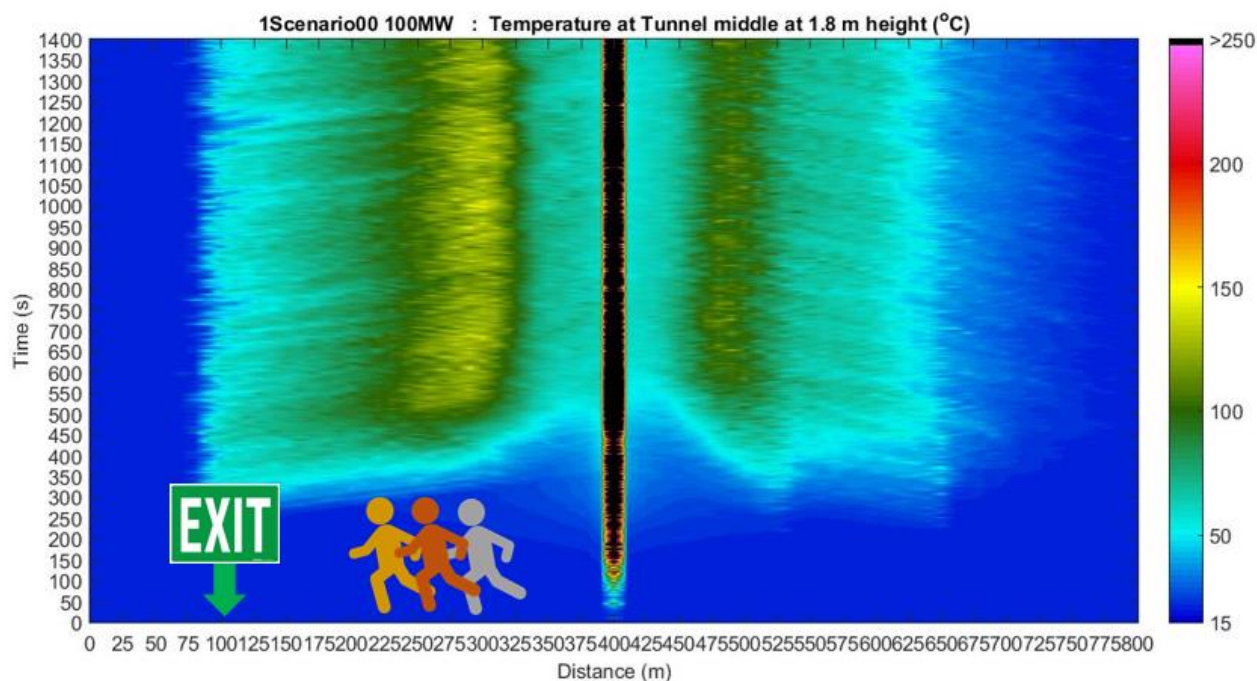
Αναλυτικότερα, για την κατασκευή των ραβδογραμμάτων οι χρήστες έχουν χωριστεί σε 5 κατηγορίες (Α έως Ε) που αντιστοιχίζονται στη θέση που είχαν τη στιγμή που ξέσπασε η φωτιά (10 m, 50 m, 100 m, 150 m και 200 m). Πέρα από τη θέση του, κάθε χρήστη τον χαρακτηρίζει και η χρονοκαθυστέρησή του για να ξεκινήσει την εκκένωση. Οι τιμές χρονοκαθυστέρησης είναι μεταξύ 10 με 300 sec. Η τιμή των 10 sec έχει επιλεγεί για να καταφανούν οι περιπτώσεις όπου ο χρήστης δεν έχει καθόλου διαθέσιμο χρόνο ώστε να καταφέρει να εκκενώσει. Ενώ, δεν επιλέχθηκαν τιμές χρονοκαθυστέρησης άνω των 300 sec, δεδομένου ότι δεν είναι εύλογο να καθυστερήσει κανείς πέραν των 5 λεπτών για να ξεκινήσει την εκκένωση.

Για λόγους εποπτείας στο ραβδόγραμμα κάθε σεναρίου παρουσιάζονται μόνο οι χρήστες που αφορούν την έρευνα της εργασίας. Αυτό σημαίνει, ότι φαίνονται οι χρήστες κάθε κατηγορίας που είχαν τέτοια χρονοκαθυστέρηση ώστε να φτάσουν στην έξοδο οριακά, δηλαδή με FED θερμοκρασίας ίσο με 0.3. Για αυτούς τους χρήστες στο Παράρτημα παρουσιάζεται και το αντίστοιχο ραβδόγραμμα του FED αερίων, όπου φαίνεται η χαμηλή επιρροή των τοξικών αερίων, αφού οι τιμές είναι πολύ μικρότερες από το αντίστοιχο όριο $FED = 1$.

4.4.1 Σενάριο 1: Κλίση 0 %, Αέρας: 0 m/s

Το 1^ο σενάριο αποτελεί τη βάση αναφοράς της εργασίας. Στο σενάριο αυτό η κλίση της σήραγγας και η ταχύτητα του αέρα είναι μηδενικές, έτσι ώστε να γίνουν συγκρίσεις με τα υπόλοιπα σενάρια.

Ανάλυση φωτιάς



Σχήμα 4-1: <Σενάριο1> Κατανομή της θερμοκρασίας στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8$ m

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-1 στο 1^ο Σενάριο η κίνηση του καπνού και κατ' επέκταση η κατανομή της θερμοκρασίας είναι συμμετρική. Αυτό ήταν αναμενόμενο δεδομένου ότι το μοντέλο είναι συμμετρικά διαμορφωμένο. Για τη μελέτη της φωτιάς το γράφημα μπορεί να χωριστεί σε τέσσερις περιοχές.

Η πρώτη περιοχή αναφέρεται στα 25 m περίξ της θέσης της φωτιάς (375-425 m) όπου μέχρι τα πρώτα 100 sec η θερμοκρασία είναι σε ανεκτά επίπεδα (15-50°C), ενώ στη συνέχεια αυξάνεται απότομα σε τιμές μη βιώσιμες από 250° C και πάνω.

Η δεύτερη περιοχή αποτελείται από 2 τμήματα συμμετρικά ως προς τη θέση της φωτιάς (225-325 m και 450-525 m) όπου για τα πρώτα 250 sec η θερμοκρασία είναι χαμηλή και δεν ξεπερνά τους 15°C, ενώ στη συνέχεια και μέχρι τα 1400 sec λαμβάνει αρκετά αυξημένες τιμές (100-150 °C).

Η τρίτη περιοχή μελέτης συνίσταται σε 4 τμήματα (75-225 m, 325-375 m, 425-450 m και 525-675 m), όπου όπως και στην δεύτερη περιοχή κατά τα πρώτα 250 sec η θερμοκρασία φτάνει μέχρι τους 15°C, ενώ ακολούθως έως τα 1400 sec κυμαίνεται σε ανεκτές τιμές περί των 50°C.

Η **τέταρτη περιοχή** αποτελείται από δύο τμήματα (0-75 m και 675-800 m). Η περιοχή αυτή δεν επηρεάζεται από τη φωτιά διότι ο καπνός δεν φτάνει μέχρι εκεί για το χρονικό διάστημα της προσομοίωσης και η θερμοκρασία παραμένει σταθερά στους 15°C.

Φαινόμενο διαστρωμάτωσης του καπνού

Αυτό το «παράδοξο» φαινόμενο όπου η θερμοκρασία στην τρίτη περιοχή που είναι εγγύτερα στη φωτιά είναι πιο χαμηλή συγκριτικά με την δεύτερη περιοχή σχετίζεται με την κίνηση του καπνού. Πιο συγκεκριμένα, η ζεστή αέρια μάζα κινείται με κατεύθυνση από τα θερμότερα προς τα ψυχρότερα σημεία. Επομένως, κοντά στη φωτιά ανεβαίνει στην στέψη της σήραγγας που έχει ακόμη χαμηλότερη θερμοκρασία, ενώ όσο απομακρύνεται από τη φωτιά ο καπνός πέφτει. Το φαινόμενο της διαστρωμάτωσης του καπνού αναπαρίσταται και στο στιγμιότυπο της προσομοίωσης του σεναρίου 1 στην ακόλουθη εικόνα τη χρονική στιγμή $t = 327 \text{ sec}$.



Εικόνα 4-1: Στιγμιότυπο από το 1ο Σενάριο τη χρονική στιγμή $t = 327 \text{ sec}$, όπου φαίνεται το φαινόμενο διαστρωμάτωσης του καπνού

Η διαστρωμάτωση του καπνού κατά τη φωτιά σε σήραγγα συμβαίνει λόγω συνδυασμού παραγόντων που σχετίζονται με τη δυναμική της πυρκαγιάς, τη ροή του αέρα και τη γεωμετρία της σήραγγας. Στα επόμενα αναλύονται περαιτέρω αυτοί οι παράγοντες.

Περιορισμένος αερισμός: Οι σήραγγες είναι κλειστοί χώροι με περιορισμένο αερισμό σε σύγκριση με τους ανοιχτούς χώρους. Όταν εκδηλώνεται πυρκαγιά, ο καπνός και τα θερμά αέρια που παράγονται από τη διαδικασία της καύσης δεν μπορούν να διαλυθούν εύκολα, οδηγώντας στο σχηματισμό ενός στρώματος καπνού μέσα στη σήραγγα.

Φαινόμενο άνωσης: Ο καπνός που δημιουργείται από τη φωτιά είναι καυτός και λιγότερο πυκνός από τον περιβάλλοντα αέρα. Αυτό ωθεί τον καπνό προς τα πάνω με αποτέλεσμα να συσσωρεύεται κοντά στην οροφή του τούνελ, σχηματίζοντας ένα στρώμα καπνού. Το φαινόμενο άνωσης είναι μια θεμελιώδης αρχή στη δυναμική της πυρκαγιάς και παίζει σημαντικό ρόλο στη διαστρωμάτωση του καπνού.

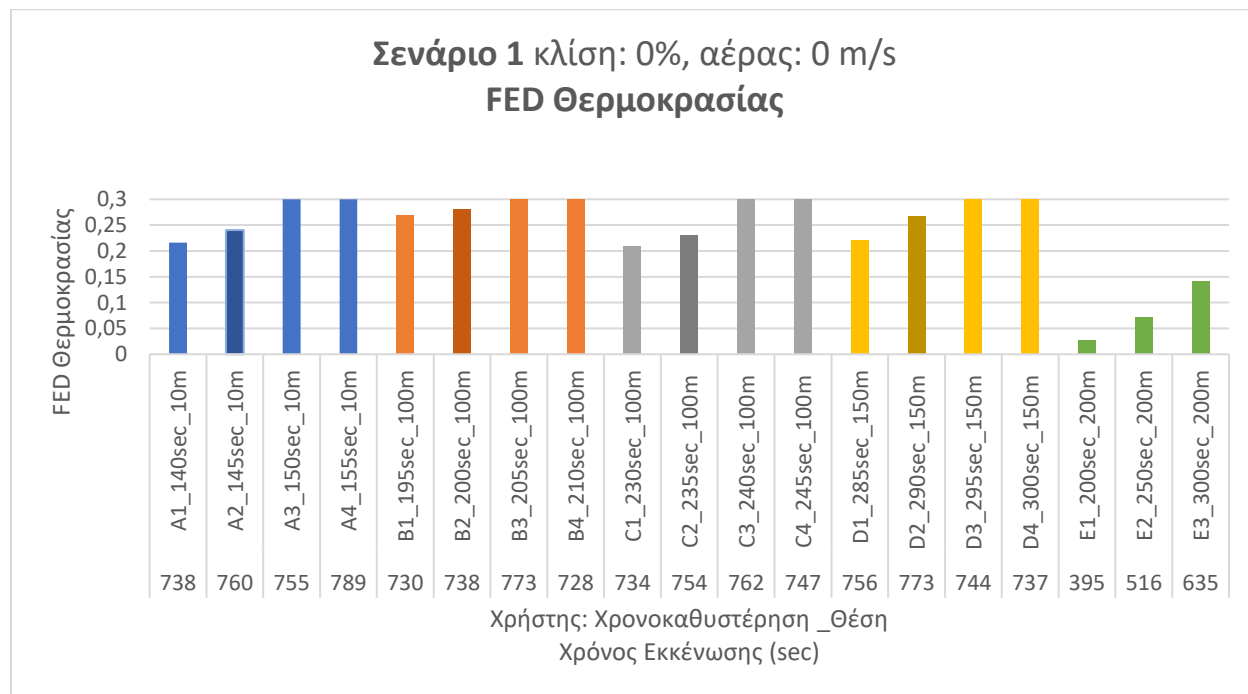
Πυκνότητα αερίων και βαρύτητα: Καθώς ο ζεστός καπνός ανεβαίνει και εξαπλώνεται οριζόντια, τελικά κρυνώνει και γίνεται πιο πυκνός. Αυτό το ψυχρό στρώμα καπνού στη συνέχεια κατεβαίνει λόγω της βαρύτητας, δημιουργώντας μία στρώση.

Γεωμετρία της σήραγγας: Το σχήμα, το μέγεθος και η κλίση της σήραγγας επηρεάζουν τη διαστρωμάτωση του καπνού. Οι σήραγγες με χαμηλές οροφές ή στενές διατομές παρέχουν λιγότερο χώρο για τη διασπορά του καπνού κατακόρυφα, οδηγώντας σε πιο έντονη διαστρωμάτωση. Επιπλέον, οι σήραγγες με σημαντικές κλίσεις μπορεί να έχουν διαφορετική ροή των αέριων μαζών επηρεάζοντας την κατανομή του καπνού μέσα στη σήραγγα.

Εμπόδια: Η παρουσία εμποδίων, όπως οχήματα ή συντρίμια, μπορεί να διαταράξει τη ροή του καπνού μέσα στη σήραγγα, οδηγώντας σε τοπικές συσσωρεύσεις καπνού και σχηματισμό στρωμάτων καπνού γύρω από αυτά τα εμπόδια.

Συστήματα εξαερισμού: Ο σχεδιασμός και η λειτουργία των συστημάτων εξαερισμού σε σήραγγες μπορεί επίσης να επηρεάσει στην διαστρωμάτωση του καπνού. Αυτό συμβαίνει διότι ο ανεπαρκής εξαερισμός ή τα δυσλειτουργικά συστήματα εξαερισμού ενδέχεται να μην καταφέρουν να αφαιρέσουν αποτελεσματικά τον καπνό από τη σήραγγα.

Ανάλυση εκκένωσης



Σχήμα 4-2: Κατανομή της αθροιστικής επιβάρυνσης FED (λόγω θερμοκρασίας) των χρηστών ανά θέση και ανά χρονοκαθυστέρηση εκκίνησης

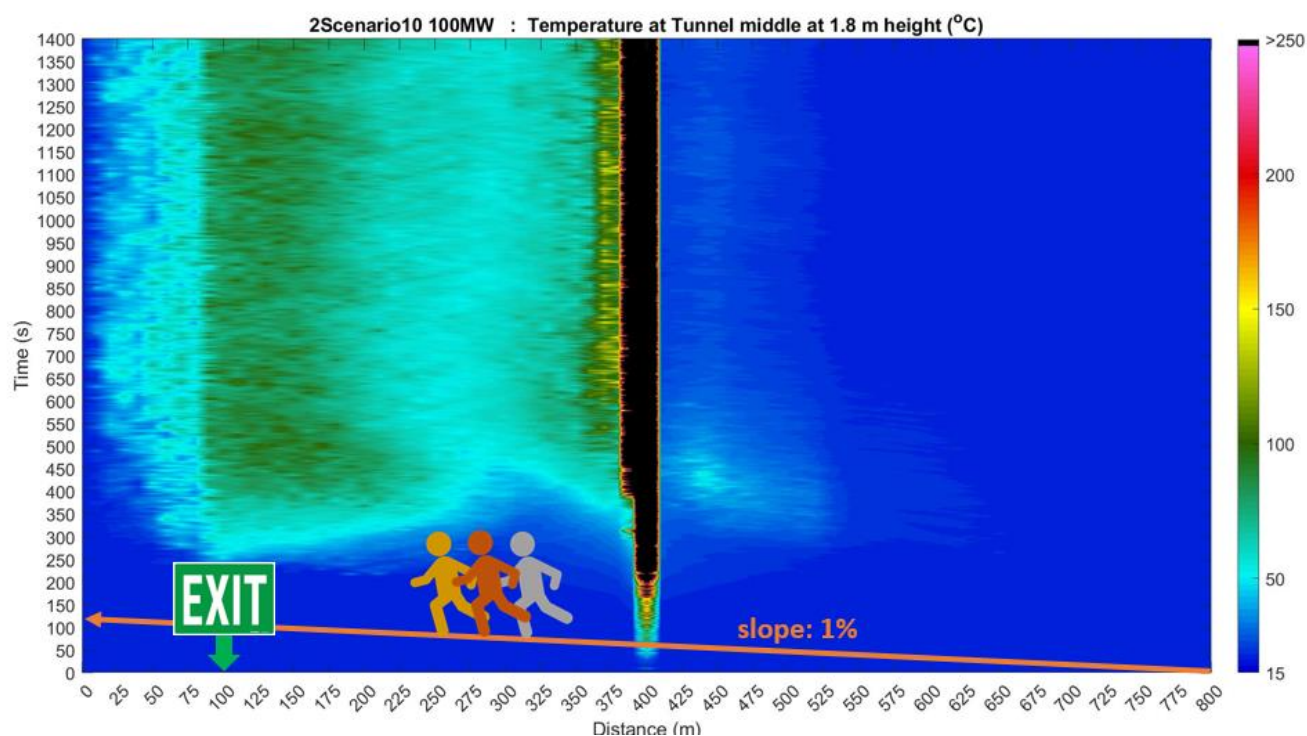
Όπως προέκυψε και από την ανάλυση της φωτιάς το χρονικό περιθώριο από την έναρξη της πυρκαγιάς έως ότου η θερμοκρασία αρχίσει να ανεβαίνει σε υψηλά επίπεδα χωρίζεται σε 2 κατηγορίες. Για τις θέσεις που βρίσκονται σε απόσταση 25 m από τη φωτιά περί τα 100 sec και για τις υπόλοιπες θέσεις που βρίσκονται πιο μακριά περί τα 250 sec.

Αυτό αποτυπώνεται και στην προσομοίωση της εκκένωσης. Έτσι, η κατηγορία χρηστών A που απέχει 10 m από τη φωτιά μπορεί να καθυστερήσει να ξεκινήσει την εκκένωση κατά 145 sec. Αντίστοιχα, οι κατηγορίες B, C και D με αρχική απόσταση 50, 100 και 150 m από τη φωτιά μπορούν να καθυστερήσουν κατά 200, 235 και 290 sec.

Η κατηγορία χρηστών E που απέχει απόσταση 200 m από τη φωτιά επηρεάζεται σημαντικά λιγότερο από τη φωτιά με FED της τάξης του 0.14, επομένως μπορεί να καθυστερήσει κατά 5 λεπτά χωρίς να αντιμετωπίσει κάποιο πρόβλημα. Υπενθυμίζεται, ότι στην παρούσα εργασία θεωρήθηκε εύλογη μία καθυστέρηση εκκένωσης μέχρι 5 min και δεν εξετάστηκαν μεγαλύτερες τιμές.

4.4.2 Σενάριο 2: Κλίση 1 %, Αέρας: 0 m/s

Ανάλυση φωτιάς



Σχήμα 4-3: <Σενάριο2> Κατανομή της θερμοκρασίας στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8$ m

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-3 η επιρροή της κλίσης της σήραγγας είναι καθοριστική για την κίνηση του καπνού. Αυτό που παρατηρείται είναι το φαινόμενο της καμινάδας, ο ζεστός καπνός έχει την τάση να ανεβαίνει επειδή είναι ελαφρύτερος, επομένως ωθείται προς τα ανηφορικά. Έτσι, ο καπνός κατανέμεται μόνο από τη μία πλευρά της φωτιάς, η οποία είναι προς την έξοδο διαφυγής πράγμα που επηρεάζει αρνητικά την εκκένωση. Πιο αναλυτικά, για τη μελέτη της φωτιάς το γράφημα μπορεί να χωριστεί σε τέσσερις περιοχές.

Η πρώτη περιοχή βρίσκεται γύρω από τη θέση της φωτιάς (375-410 m) όπου μέχρι τα πρώτα 100 sec η θερμοκρασία είναι σε ανεκτά επίπεδα (15-50°C), στη συνέχεια για το χρονικό διάστημα 100-150 sec αυξάνεται απότομα στους 100-150 °C, ενώ για όλη την υπόλοιπη προσομοίωση λαμβάνει τιμές μη βιώσιμες από 250°C και πάνω.

Η δεύτερη περιοχή αποτελείται από 2 τμήματα (75-175 m και 350-375 m) όπου για τα πρώτα 250 sec η θερμοκρασία είναι χαμηλή και δεν ξεπερνά τους 15 °C, στη συνέχεια για το χρονικό διάστημα 250-400 sec λαμβάνει ανεκτές τιμές έως 50°C, ενώ μέχρι τα 1400 sec φτάνει στους 100°C.

Η τρίτη περιοχή μελέτης συνίσταται σε 2 τμήματα (0-75 m και 175-350 m), όπου όπως και στην δεύτερη περιοχή κατά τα πρώτα 250 sec η θερμοκρασία φτάνει μέχρι τους 15°C, ενώ ακολούθως έως τα 1400 sec κυμαίνεται σε ανεκτές τιμές περί των 50°C. Συγκρίνοντας την δεύτερη και την τρίτη περιοχή παρατηρείται το φαινόμενο διαστρωμάτωσης του καπνού, όπως περιγράφηκε και στο Σενάριο 1.

Η τέταρτη περιοχή αποτελείται από 1 τμήμα (410-800 m). Η περιοχή αυτή δεν επηρεάζεται από τη φωτιά διότι όλος ο καπνός κινείται προς την αντίθετη κατεύθυνση. Έτσι, η θερμοκρασία παραμένει σταθερά στους 15°C.

Φαινόμενο αναστροφής του καπνού (*back layering*)

Λόγω της κλίσης της σήραγγας ο καπνός κατά κύριο λόγο διοχετεύεται προς τη μία κατεύθυνση. Ωστόσο, παρατηρείται ότι ένα τμήμα του καπνού πηγαίνει και προς την άλλη μεριά έως μία μικρή απόσταση. Αυτό φαίνεται εποπτικά στο Σχήμα 4-3 στο τμήμα 400 -500 m όπου η θερμοκρασία είναι αυξημένη σε σχέση με τους 15°C. Επιπλέον, μπορεί να παρατηρήσει κανείς το εν λόγω φαινόμενο και στο Σχήμα Π - 22 του Παραρτήματος όπου παρουσιάζεται η κατανομή της ορατότητας του εν λόγω Σεναρίου.

Το φαινόμενο της αναστροφής του καπνού (*back layering*) κατά τη φωτιά σε σήραγγα οφείλεται σε διάφορους παράγοντες που σχετίζονται με τη δυναμική της πυρκαγιάς και το συγκεκριμένο περιβάλλον της σήραγγας.

Περιορισμένος αερισμός: Οι σήραγγες έχουν συνήθως περιορισμένο αερισμό σε σύγκριση με τους ανοιχτούς χώρους. Αυτός ο περιορισμός μπορεί να προκαλέσει τη συσσώρευση καπνού και θερμών αερίων που παράγονται από τη φωτιά κοντά στην οροφή, δημιουργώντας ένα στρώμα θερμών, τοξικών αερίων. Καθώς η φωτιά καταναλώνει οξυγόνο και δημιουργεί καπνό

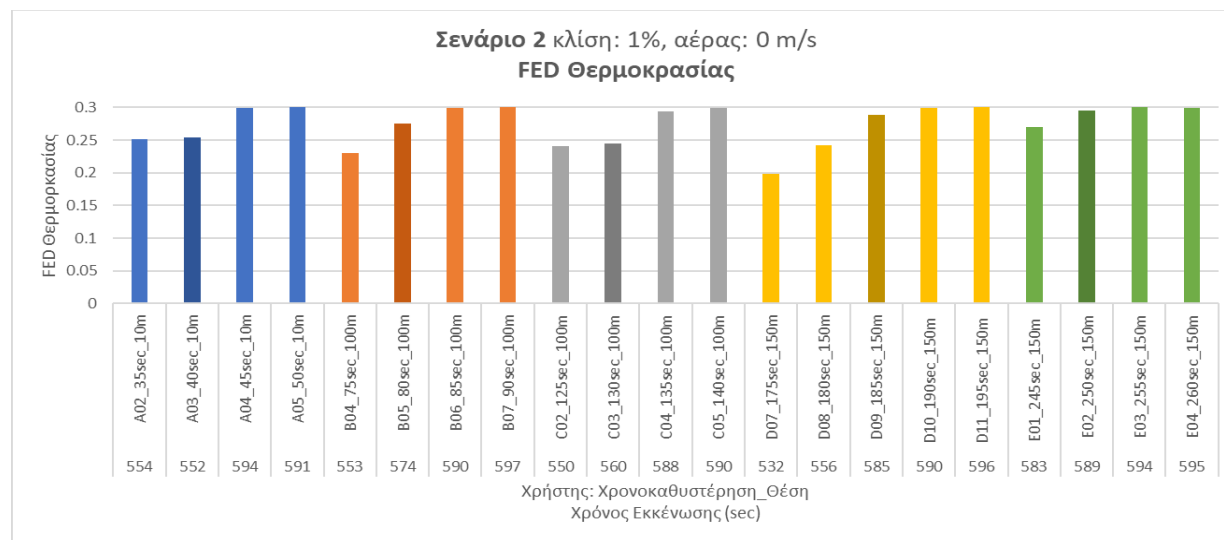
και άλλα υποπροϊόντα, αυτές οι ουσίες μπορούν να παγιδευτούν στα ανώτερα επίπεδα της σήραγγας, ωθώντας τον καπνό και προς τα πίσω.

Φαινόμενο άνωσης: Τα θερμά αέρια που παράγονται από τη φωτιά έχουν χαμηλότερη πυκνότητα σε σύγκριση με τον ψυχρότερο αέρα, με αποτέλεσμα να ανυψώνονται. Σε μια σήραγγα με περιορισμένο κατακόρυφο χώρο, αυτή η προσομοίωση άνωσης μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα τα θερμά αέρια να συσσωρεύονται κοντά στην οροφή, προκαλώντας το φαινόμενο της αναστροφής του καπνού

Γεωμετρία της σήραγγας: Το σχήμα και οι διαστάσεις της σήραγγας παίζουν σημαντικό ρόλο στο φαινόμενο αναστροφής του καπνού. Οι στενές σήραγγες με χαμηλά ταβάνια είναι πιο επιρρεπείς σε αυτό το φαινόμενο επειδή υπάρχει λιγότερος χώρος για τα θερμά αέρια να διασκορπιστούν κατακόρυφα.

Θέση πυρκαγιάς: Η θέση της πυρκαγιάς μέσα στη σήραγγα μπορεί να επηρεάσει τον σχηματισμό οπίσθιας στρώσης. Εάν η φωτιά συμβεί πιο κοντά στο ένα άκρο της σήραγγας, τα θερμά αέρια που δημιουργούνται από τη φωτιά μπορεί να συσσωρευτούν σε αυτήν την περιοχή, οδηγώντας στο σχηματισμό ενός πίσω στρώματος που εκτείνεται προς την είσοδο της σήραγγας.

Ανάλυση Εκκένωσης



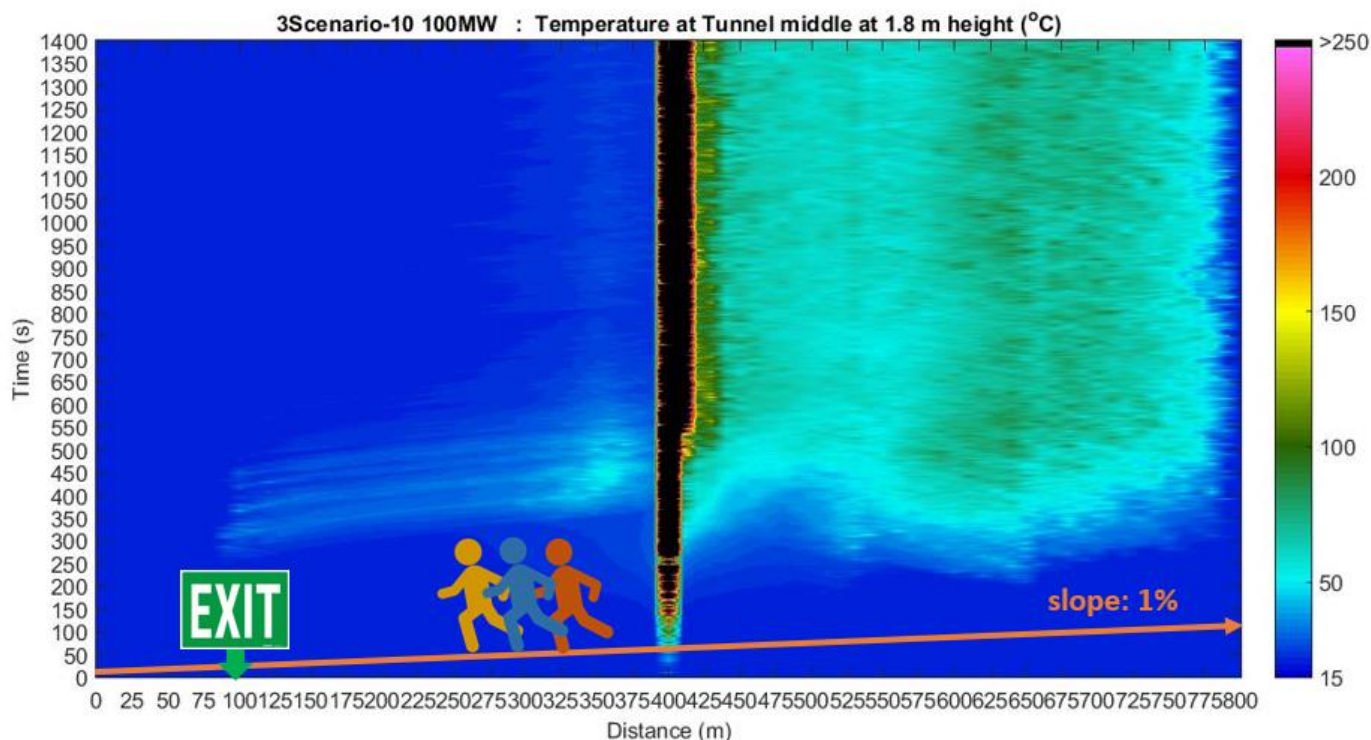
Σχήμα 4-4: Κατανομή της αθροιστικής επιβάρυνσης FED (λόγω θερμοκρασίας) των χρηστών ανά θέση και ανά χρονοκαθυστέρηση εκκίνησης

Όπως προέκυψε από την ανάλυση της φωτιάς, όλος ο καπνός διοχετεύτηκε προς την κατεύθυνση που θέλουν να κινηθούν και οι χρήστες, δηλαδή προς την έξοδο διαφυγής. Συνεπώς, κατά την εκκένωση ο χρόνος που οι χρήστες δύνανται να καθυστερήσουν να

απομακρύνονται είναι αισθητά περιορισμένος σε σύγκριση με το Σενάριο 1. Αυτό αποτυπώνεται στα αποτελέσματα της προσομοίωσης της εκκένωσης, όπου οι χρήστες που βρίσκονται κοντά στη φωτιά έχουν στη διάθεσή τους περί το 1 min για να καθυστερήσουν. Πιο συγκεκριμένα, η κατηγορία χρηστών A, η οποία απέχει 10 m από τη θέση της φωτιάς, μπορεί να καθυστερήσει έως 40 sec και η κατηγορία B σε απόσταση 50 m από την φωτιά μπορεί να καθυστερήσει μέχρι 80 sec. Η κατηγορία χρηστών C σε απόσταση 100 m από τη φωτιά, ευνοείται σχετικά από το φαινόμενο της διαστρωμάτωσης του καπνού πράγμα που της δίνει σχεδόν διπλάσιο περιθώριο για χρονοκαθυστέρηση στα 130 sec. Η κατηγορία χρηστών D σε απόσταση 150 m από τη φωτιά διαθέτει 185 sec διότι για ένα σημαντικό τμήμα θα πρέπει να κινηθεί εντός της δεύτερης περιοχής της φωτιάς όπου είναι πυκνότερος ο καπνός. Τέλος, η κατηγορία E παρόλο που είναι αρκετά απομακρυσμένη στα 200 m, επηρεάζεται και εκείνη ελαφρώς από τη φωτιά και διαθέτει 250 sec για να καθυστερήσει τη διαδικασία της εκκένωσης.

4.4.3 Σενάριο 3: Κλίση -1 %, Αέρας: 0 m/s

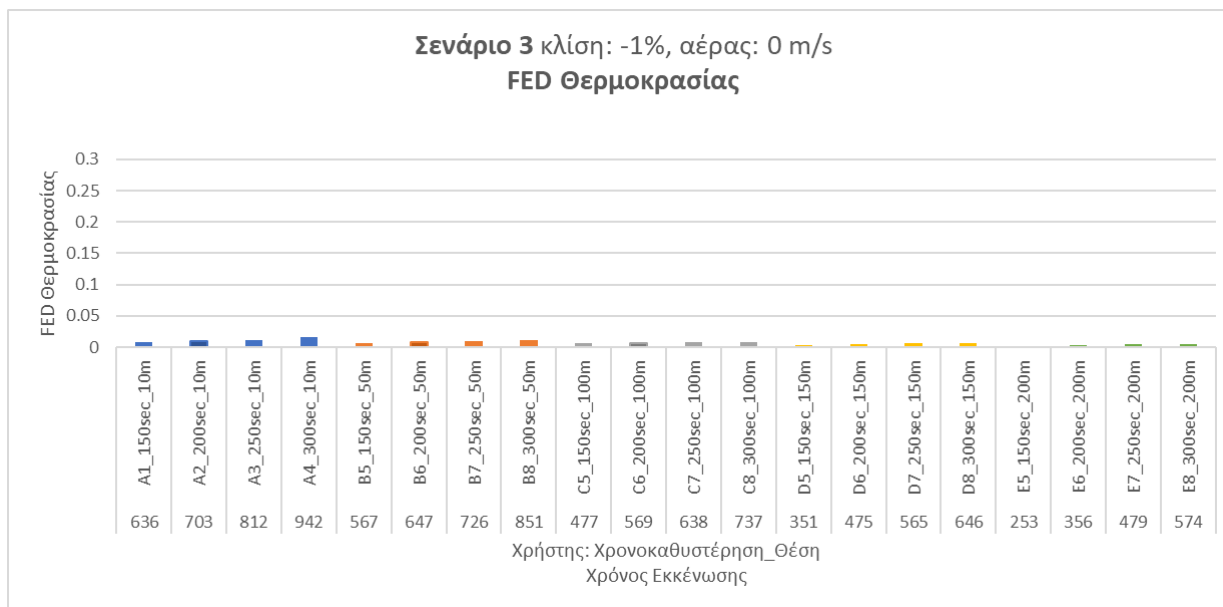
Ανάλυση φωτιάς



Σχήμα 4-5: <Σενάριο 3> Κατανομή της θερμοκρασίας στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8$ m

Το Σενάριο 3, είναι όπως το Σενάριο 2 αλλά με αντίθετη κλίση. Επομένως, η κίνηση της φωτιάς όπως αναμένεται είναι συμμετρικά αντίθετη. Ο καπνός κινείται προς την ανηφορική μεριά επαληθεύοντας το φαινόμενο της καμινάδας.

Ανάλυση της εκκένωσης

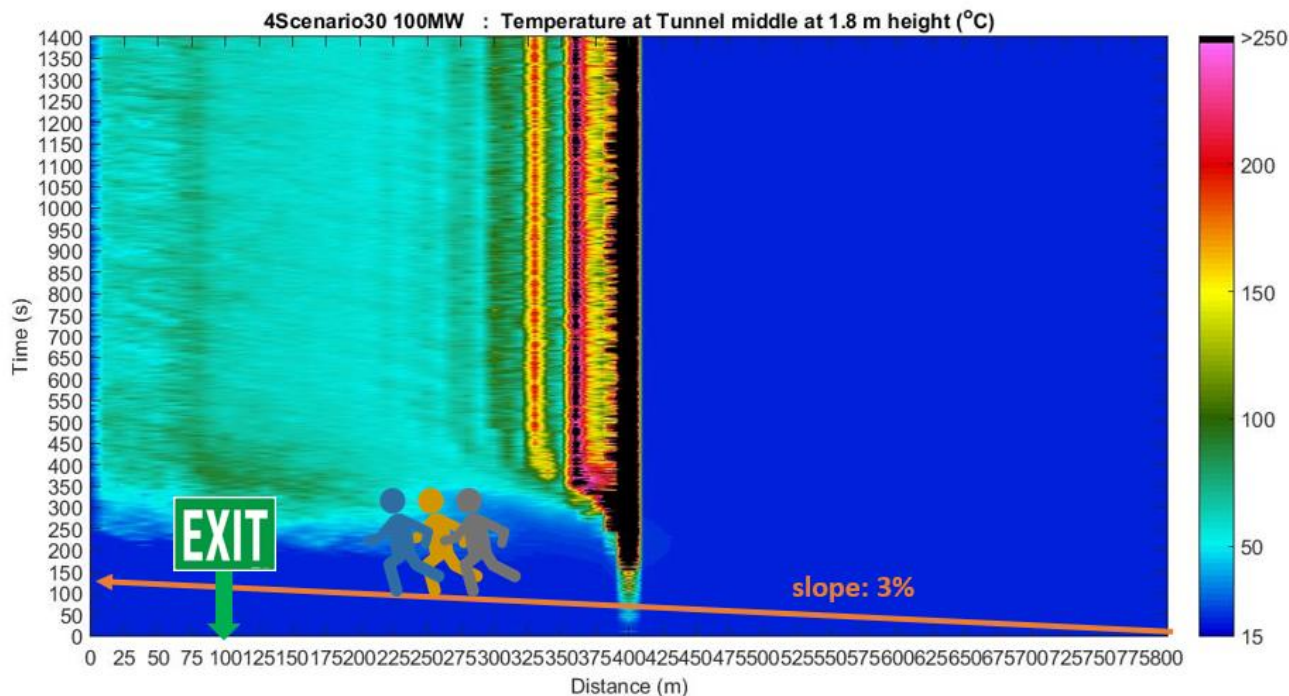


Σχήμα 4-6: <Σενάριο 3> Κατανομή της αθροιστικής επιβάρυνσης FED (λόγω θερμοκρασίας) των χρηστών ανά θέση και ανά χρονοκαθυστέρηση εκκίνησης

Δεδομένου ότι ο καπνός κινείται προς την αντίθετη κατεύθυνση από αυτή που πρέπει να κινηθούν οι χρήστες, όπως ήταν αναμενόμενο τα χρονικά περιθώρια για την εκκένωση είναι σημαντικά αυξημένα. Πιο συγκεκριμένα, όλοι οι χρήστες διαθέτουν τουλάχιστον 5 min πριν ξεκινήσουν να απομακρύνονται.

4.4.4 Σενάριο 4: Κλίση 3 %, Αέρας: 0 m/s

Ανάλυση φωτιάς



Σχήμα 4-7: <Σενάριο 4> Κατανομή της θερμοκρασίας στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8$ m

Το Σενάριο 4 είναι παρόμοιο με το Σενάριο 2, με τη διαφορά ότι έχει πιο έντονη κλίση. Επομένως, η κίνηση του καπνού στα δύο αυτά σενάρια γίνεται κατά παρεμφερή τρόπο, επαληθεύοντας το φαινόμενο της καμινάδας, το οποίο στο Σενάριο 4 είναι πιο εμφανές. Για την αναλυτικότερη μελέτη το παραπάνω γράφημα μπορεί να χωριστεί σε 4 περιοχές.

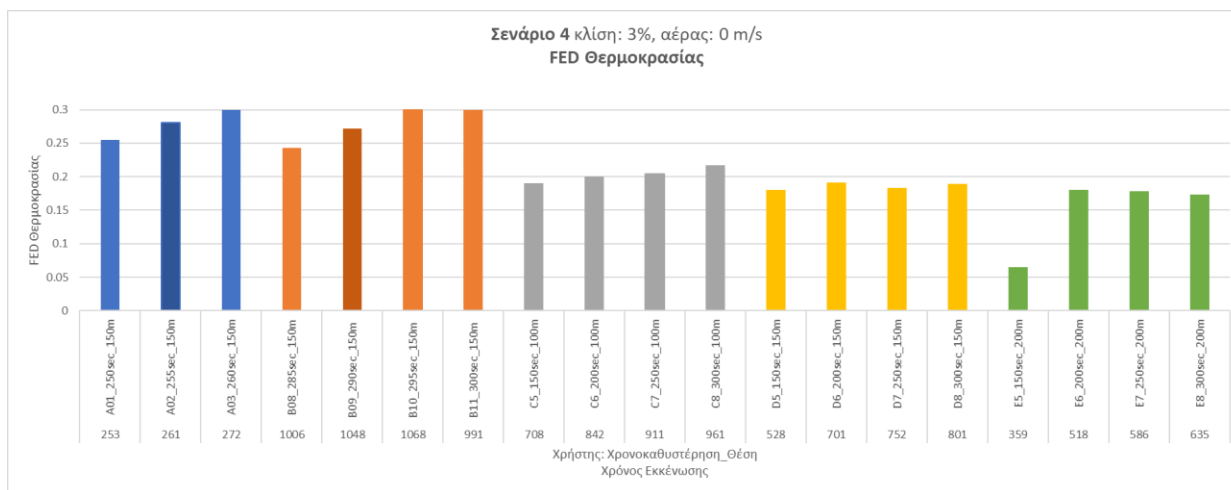
Η πρώτη περιοχή βρίσκεται γύρω από τη θέση της φωτιάς (390-410 m) όπου μέχρι τα πρώτα 50 sec η θερμοκρασία είναι σε ανεκτά επίπεδα (15-50°C), στη συνέχεια για το χρονικό διάστημα 50-100 sec αυξάνεται στους 100-150 °C, ενώ για όλη την υπόλοιπη προσομοίωση λαμβάνει τιμές μη βιώσιμες από 250° C και πάνω.

Η δεύτερη περιοχή αποτελείται από 1 τμήμα (300-390 m) όπου για τα πρώτα 250 sec η θερμοκρασία είναι χαμηλή και δεν ξεπερνά τους 15 °C, ενώ μέχρι τα 1400 sec φτάνει στους 150°C και κατά θέσεις τους 200°C.

Η τρίτη περιοχή μελέτης συνίσταται σε 1 τμήμα (0-300 m), όπου όπως και στην δεύτερη περιοχή κατά τα πρώτα 250 sec η θερμοκρασία φτάνει μέχρι τους 15 °C, ενώ ακολούθως έως τα 1400 sec κυμαίνεται σε ανεκτές τιμές περί των 50 °C. Συγκρίνοντας την δεύτερη και την τρίτη περιοχή προκύπτει ότι στο Σενάριο 4 δεν πραγματοποιείται το φαινόμενο διαστρωμάτωσης του καπνού.

Η τέταρτη περιοχή αφορά στο τμήμα τη σήραγγας όπου δεν πηγαίνει ο καπνός (410 – 800 m). Στο τμήμα αυτό, η θερμοκρασία είναι σταθερά στους 15°C.

Ανάλυση εκκένωσης



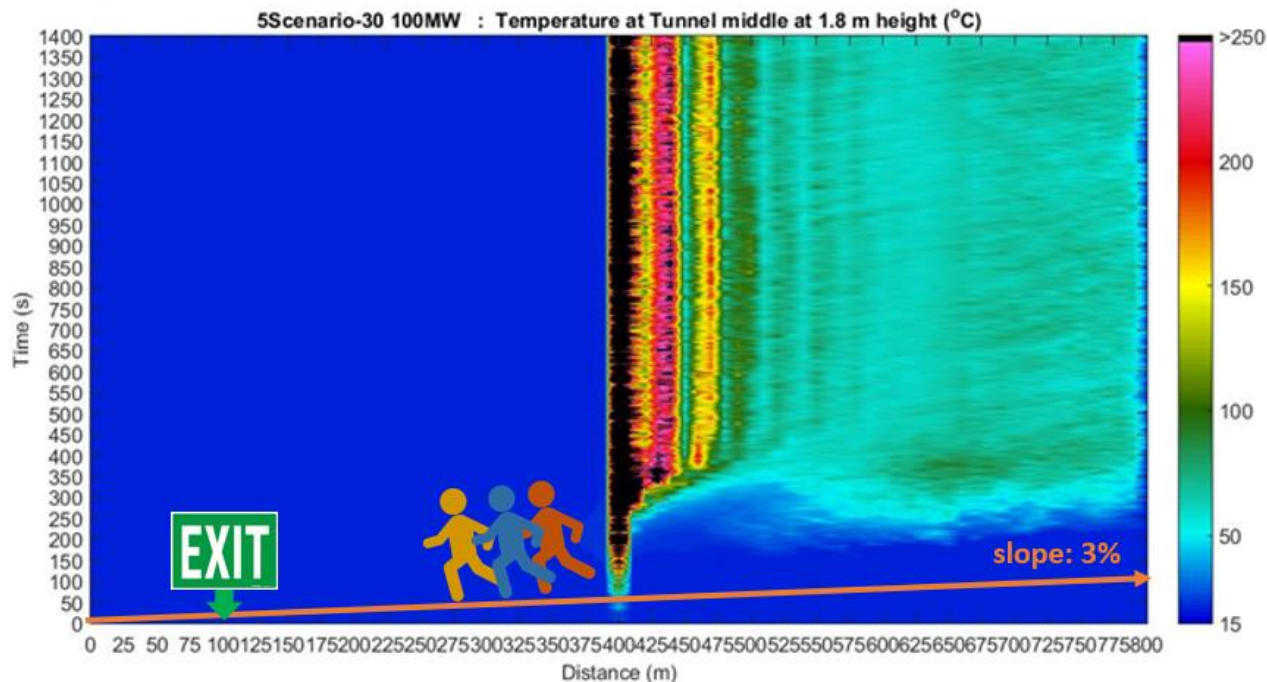
Σχήμα 4-8: <Σενάριο 4> Κατανομή της αθροιστικής επιβάρυνσης FED (λόγω θερμοκρασίας) των χρηστών ανά θέση και ανά χρονοκαθυστερήση εκκίνησης

Από την ανάλυση της φωτιάς προέκυψε ότι παρόλο που ο καπνός διοχετεύεται προς τη μία μεριά, εντούτοις οι θερμοκρασίες είναι πολύ υψηλές μόνο σε ένα περιορισμένο τμήμα (300 - 390 m). Ο υπόλοιπος διάδρομος μέχρι την έξοδο διαφυγής στη θέση 100 m έχει βιώσιμες τιμές θερμοκρασίας στους 50°C πράγμα που δίνει αυξημένα χρονικά περιθώρια στους χρήστες για να ξεκινήσουν την εκκένωση τουλάχιστον 4 min. Πιο συγκεκριμένα, η κατηγορία χρηστών A, που απέχει 10 m από τη φωτιά, διαθέτει 255 sec. Η κατηγορία B στα 50 m διαθέτει σχεδόν 5 min και πιο συγκεκριμένα 290 sec, ενώ όλες οι υπόλοιπες κατηγορίες διαθέτουν τουλάχιστον 5 min αρχίσουν να απομακρύνονται.

Συγκρίνοντας τα Σενάρια 2 και 4 όπου ο καπνός κινείται προς τη μεριά της εξόδου διαφυγής προκύπτει ότι η ηπιότερη κλίση του Σεναρίου 2 ήταν δυσμενέστερη σε σχέση με του Σεναρίου 4. Αυτό συνέβη διότι στο Σενάριο 2 ο καπνός συσσωρεύτηκε σε μεγαλύτερο μέρος (βλ. Σχήμα 4-3) και για ένα μεγάλο τμήμα πριν την έξοδο διαφυγής (75-175 m) η θερμοκρασία έφτασε στους 100°C.

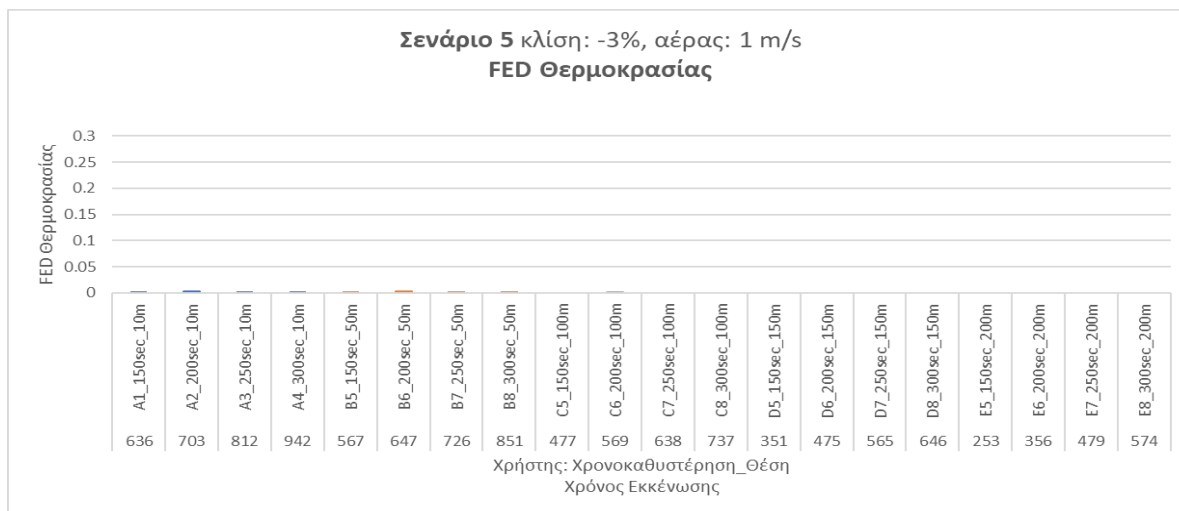
4.4.5 Σενάριο 5: Κλίση -3%, Αέρας: 0 m/s

Ανάλυση φωτιάς



Σχήμα 4-9: <Σενάριο 5> Κατανομή της θερμοκρασίας στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8\text{ m}$
 Το Σενάριο 5, είναι όπως το Σενάριο 4 αλλά με αντίθετη κλίση. Επομένως, η κίνηση της φωτιάς όπως αναμένεται είναι συμμετρικά αντίθετη.

Αναλυση εκκένωσης

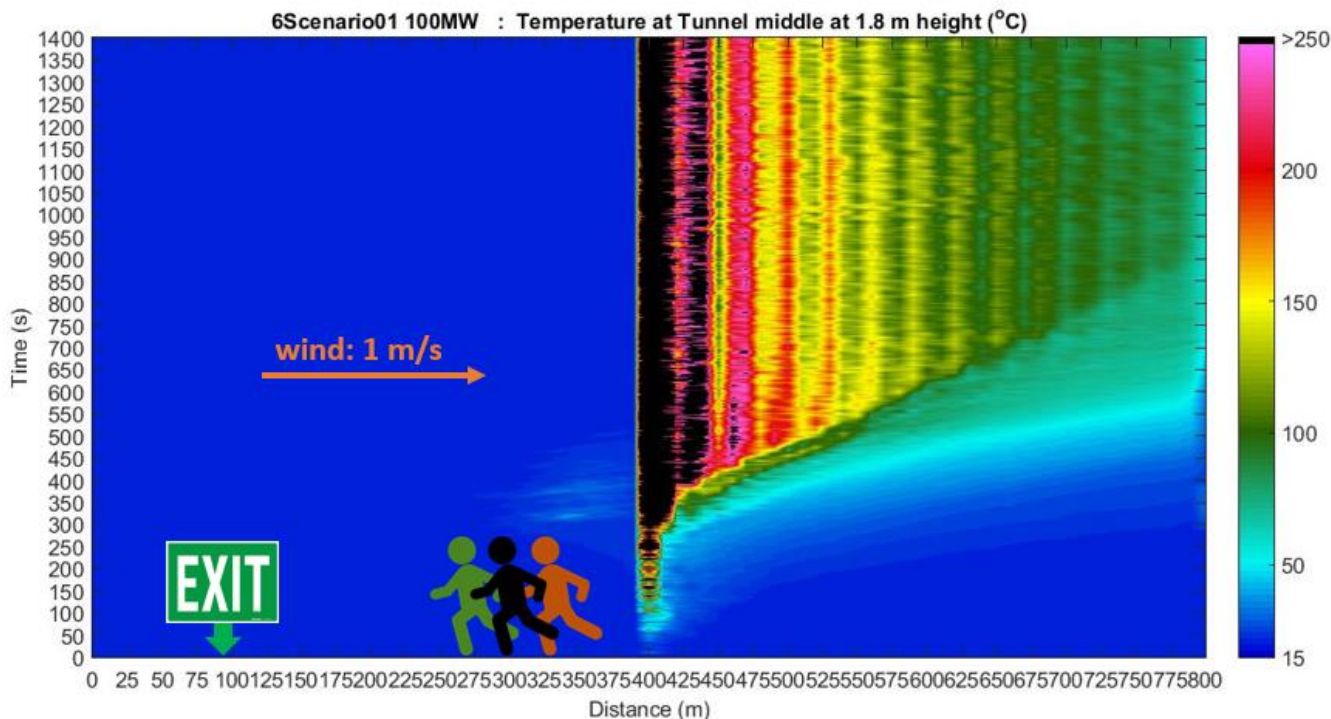


Σχήμα 4-10: <Σενάριο 5> Κατανομή της αθροιστικής επιβάρυνσης FED (λόγω θερμοκρασίας) των χρηστών ανά θέση και ανά χρονοκαθυστερήση εκκίνησης

Όπως ήταν αναμενόμενο από την ανάλυση της φωτιάς, δεδομένου ότι δεν πηγαίνει καθόλου καπνός προς την έξοδο διαφυγής, οι χρήστες έχουν πολύ μεγάλο χρονικό περιθώριο για να ξεκινήσουν την εκκένωση, που ξεπερνά τα 5 min.

4.4.6 Σενάριο 6: Κλίση 0%, Αέρας 1 m/s

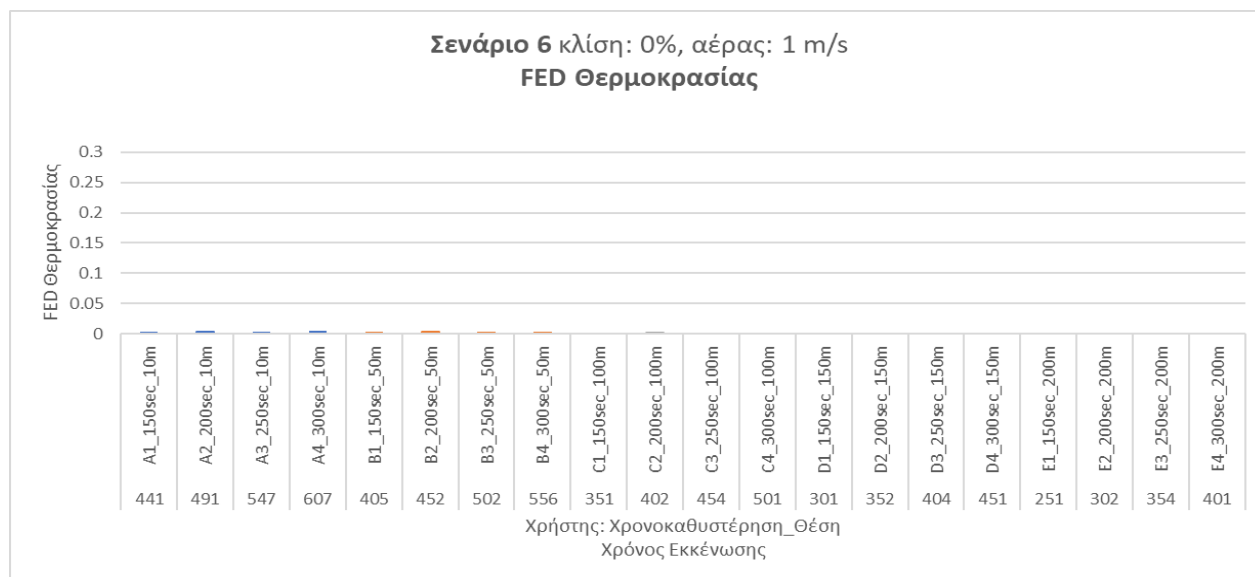
Ανάλυση της φωτιάς



Σχήμα 4-11: <Σενάριο 6> Κατανομή της θερμοκρασίας στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8$ m

Το Σενάριο 6 έχει μηδενική κλίση όπως το Σενάριο 1 αλλά με αέρα που κατευθύνεται προς την αντίθετη πλευρά από αυτή της εξόδου διαφυγής, πράγμα που διοχετεύει όλο τον καπνό προς τα εκεί. Η περιοχή που βρίσκεται γύρω από τη φωτιά (390-425 m) από τα 150 sec και έπειτα λαμβάνει τιμές μη αποδεκτές από 250°C και πάνω. Στην υπόλοιπη σήραγγα για τα πρώτα 300 sec σε κάθε θέση η θερμοκρασία είναι αμετάβλητη στους 15°C. Ακολούθως στο τμήμα όπου πηγαίνει ο καπνός (400-800 m) παρατηρείται απότομη αύξηση της θερμοκρασίας. Η αύξηση αυτή είναι εντονότερη στα σημεία που είναι πιο κοντά στη φωτιά (425-475 m) με τιμές από 200-250°C και άνω. Έπειτα, όσο εξελίσσεται το φαινόμενο προοδευτικά αυξάνεται και στα υπόλοιπα σημεία (475-800 m) όπου η θερμοκρασία φτάνει τους 100°C.

Ανάλυση εκκένωσης

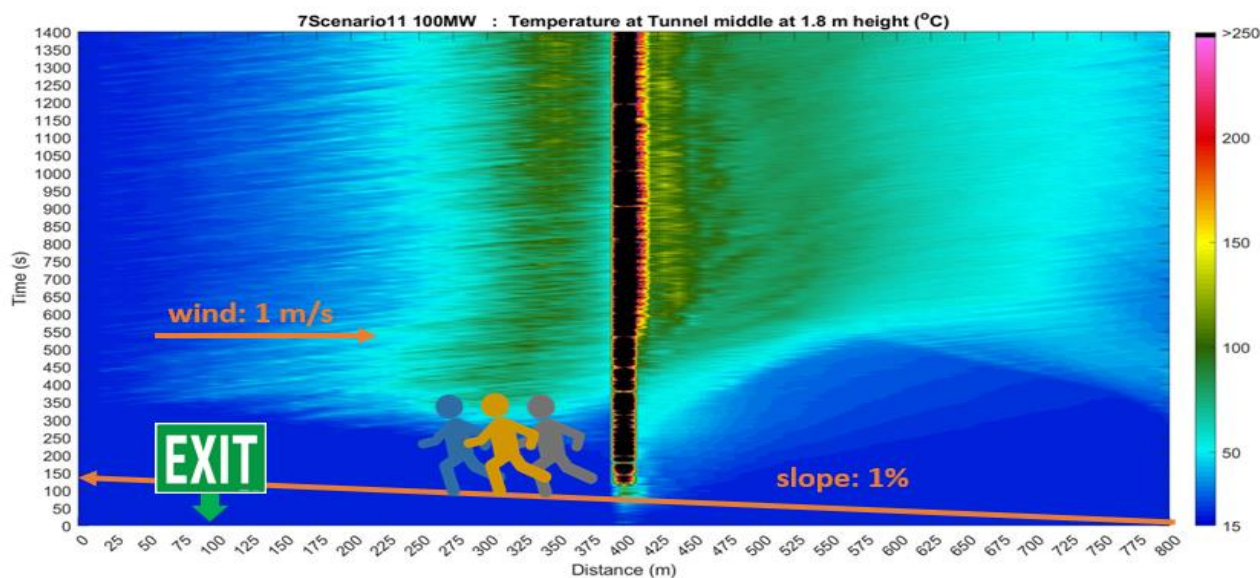


Σχήμα 4-12: <Σενάριο 6> Κατανομή της αθροιστικής επιβάρυνσης FED (λόγω θερμοκρασίας) των χρηστών ανά θέση και ανά χρονοκαθυστέρηση εκκίνησης

Όπως είναι αναμενόμενο από την εξέλιξη της φωτιάς, εφόσον ο καπνός διοχετεύεται προς την αντίθετη κατεύθυνση από αυτή της εξόδου διαφυγής, όλοι οι χρήστες διαθέτουν τουλάχιστον 5 min πριν ξεκινήσουν την απομάκρυνση.

4.4.7 Σενάριο 7: Κλίση 1%, Αέρας 1 m/s

Ανάλυση φωτιάς



Σχήμα 4-13: <Σενάριο 7> Κατανομή της θερμοκρασίας στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8$ m

Το σενάριο αυτό είναι όπως το Σενάριο 2 με ανηφορική κατεύθυνση από τη φωτιά προς την έξοδο διαφυγής, όπου συνέβη το φαινόμενο της καμινάδας. Η διαφορά τους έγκειται ότι στο εν λόγω σενάριο υπάρχει αερισμός προς την κατηφορική μεριά. Έτσι, όπως παρατηρήθηκε και στο Σενάριο 6, η δράση του αέρα προς την αντίθετη κατεύθυνση, ωθεί τον καπνό προς την κατηφορική μεριά. Έτσι, οι δύο αυτές αντικρουόμενες δράσεις έχουν ως αποτέλεσμα ο καπνός να συσσωρευτεί κυρίως στο κέντρο της σήραγγας. Πιο συγκεκριμένα το γράφημα μπορεί να χωριστεί σε τέσσερις περιοχές.

Η πρώτη περιοχή βρίσκεται γύρω από τη θέση της φωτιάς (380-425 m) όπου μέχρι τα πρώτα 100 sec η θερμοκρασία είναι σε ανεκτά επίπεδα (15-50°C), ενώ για όλη την υπόλοιπη προσομοίωση λαμβάνει τιμές μη βιώσιμες από 250° C και πάνω.

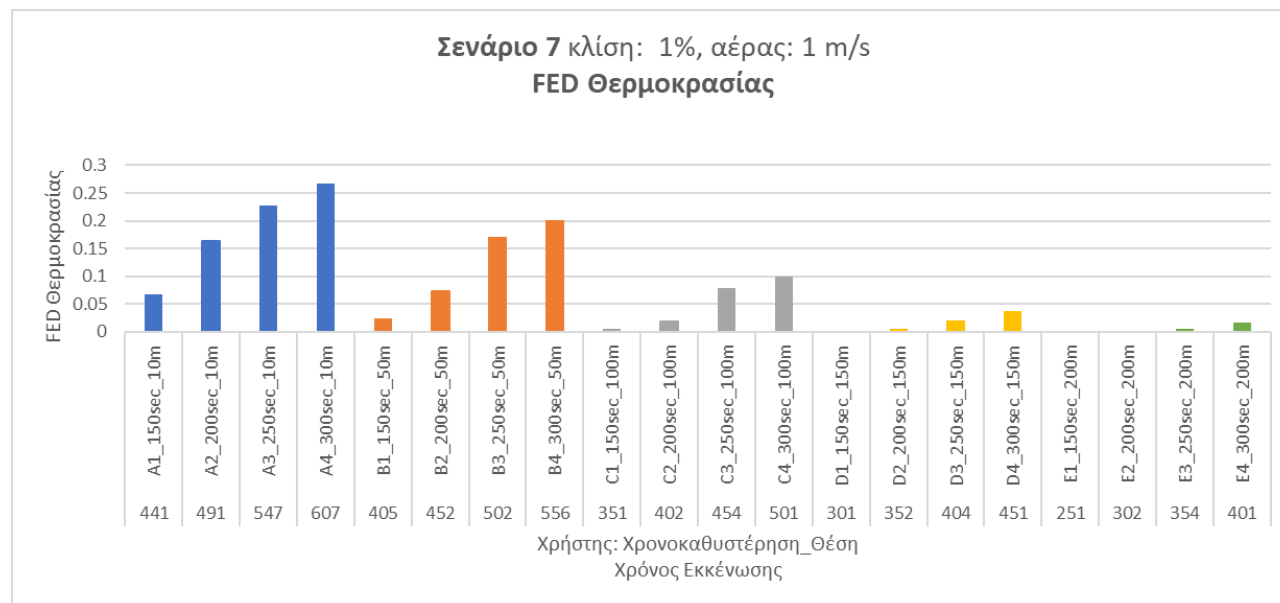
Η δεύτερη περιοχή αποτελείται από 2 τμήματα (275-380 m και 425-475 m) όπου για τα πρώτα 250 sec η θερμοκρασία είναι χαμηλή και δεν ξεπερνά τους 15°C, στη συνέχεια για το χρονικό διάστημα 250-300 sec λαμβάνει ανεκτές τιμές έως 50°C, ενώ μέχρι τα 1400 sec φτάνει στους 100°C.

Η τρίτη περιοχή βρίσκεται μεταξύ 550-800 m, όπου κατά τα πρώτα 300 sec η θερμοκρασία φτάνει μέχρι τους 15°C, ενώ ακολούθως έως τα 1400 sec κυμαίνεται σε ανεκτές τιμές περί των 50°C. Το φαινόμενο διαστρωμάτωσης του καπνού, είναι λιγότερο έντονο σε αυτό το σενάριο.

Η τέταρτη περιοχή αποτελείται από ένα τμήμα (0-275 m). Η περιοχή αυτή λαμβάνει χαμηλές θερμοκρασίες, οι οποίες δεν ξεπερνούν τους 50°C συνολικά.

Από την παραπάνω ανάλυση, η επίδραση του αέρα φαίνεται λίγο μεγαλύτερη σε σχέση με την επιρροή της κλίσης για τις συγκεκριμένες τιμές.

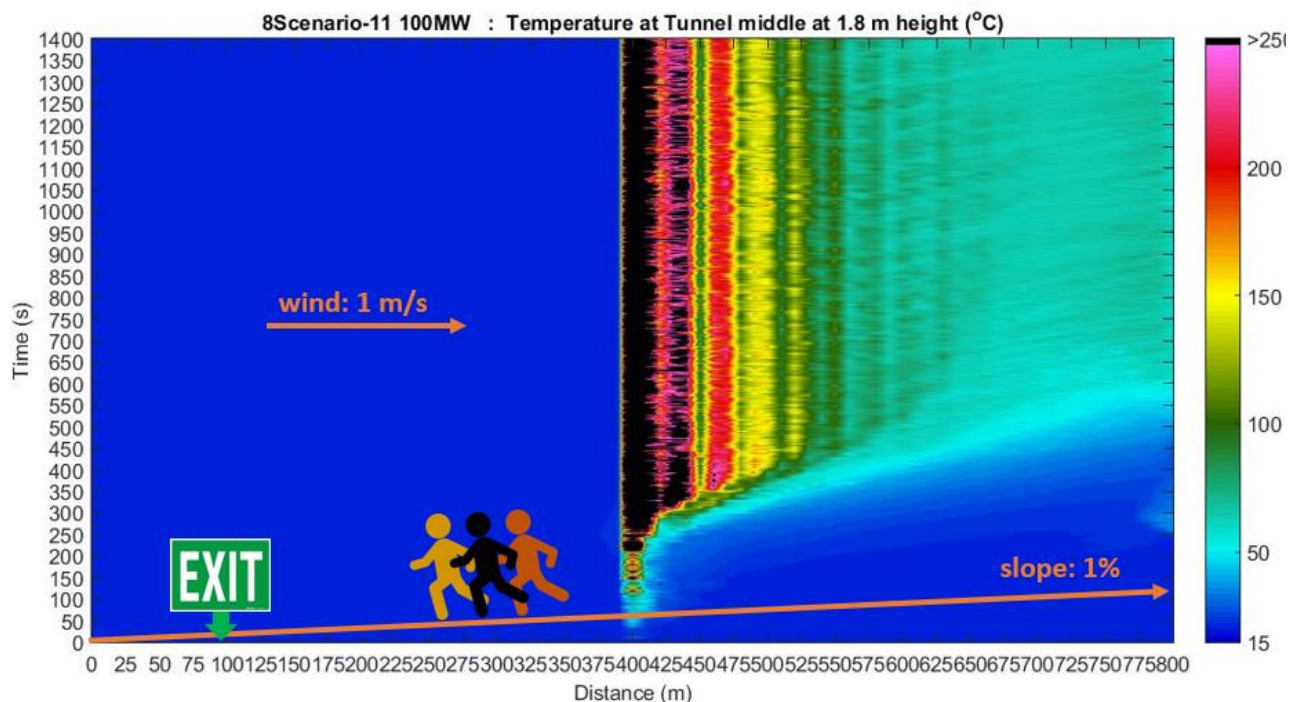
Ανάλυση εκκένωσης



Σχήμα 4-14: <Σενάριο 7> Κατανομή της αθροιστικής επιβάρυνσης FED (λόγω θερμοκρασίας) των χρηστών ανά θέση και ανά χρονοκαθυστερήση εκκίνησης

Όπως αποδείχθηκε και από την ανάλυση της φωτιάς, σε σύγκριση με το Σενάριο 2, η επιρροή του αέρα έχει μια ευνοϊκή δράση για τη διαδικασία της εκκένωσης. Έτσι, όλοι οι χρήστες μπορούν να καθυστερήσουν τουλάχιστον 5 min για να ξεκινήσουν την εκκένωση. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι οι χρήστες που βρίσκονται πιο κοντά στη φωτιά (10 και 50 m) εάν καθυστερήσουν κατά 5 min θα φτάσουν σε FED λόγω θερμοκρασίας περί την τιμή 0.25, η οποία είναι μικρότερη από το όριο 0.3, αλλά είναι σχετικά σημαντική.

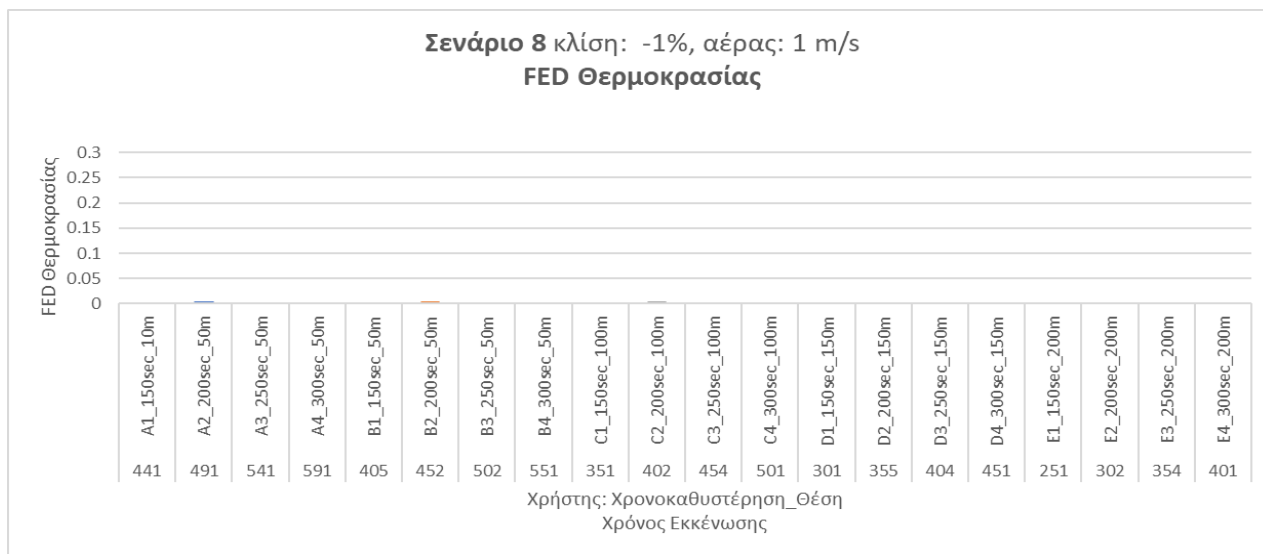
4.4.8 Σενάριο 8: Κλίση -1%, Αέρας 1 m/s



Σχήμα 4-15: <Σενάριο 8> Κατανομή της θερμοκρασίας στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8$ m

Στο Σενάριο 8 η δράση της κλίσης και του αέρα ωθούν τον καπνό προς την αντίθετη κατεύθυνση από αυτή της εξόδου διαφυγής. Η κίνηση του καπνού σε αυτό το Σενάριο προσομοιάζει αυτή του Σεναρίου 6 όπου επικρατούσαν οι ίδιες συνθήκες αερισμού αλλά η κλίση ήταν μηδενική. Η περιοχή που βρίσκεται γύρω από τη φωτιά (390-440 m) αρχικά έχει χαμηλές θερμοκρασίες έως 50°C , ενώ από τα 150 sec και έπειτα λαμβάνει τιμές μη αποδεκτές από 250°C και πάνω. Στην υπόλοιπη σήραγγα για τα πρώτα 300 sec σε κάθε θέση η θερμοκρασία είναι αμετάβλητη στους 15°C . Ακολούθως, στο τμήμα όπου πηγαίνει ο καπνός (400-800 m) παρατηρείται απότομη αύξηση της θερμοκρασίας. Η αύξηση αυτή είναι εντονότερη στα σημεία που είναι πιο κοντά στη φωτιά (440-500 m) με τιμές από 200 - 250°C και άνω. Έπειτα, όσο εξελίσσεται το φαινόμενο προοδευτικά αυξάνεται και στα επόμενα σημεία (500-550 m) όπου η θερμοκρασία φτάνει τους 100°C . Ενώ από τα 450 sec η θερμοκρασία έως το τέλος της σήραγγας (550-800 m) λαμβάνει τιμές έως 50°C .

Ανάλυση εκκένωσης

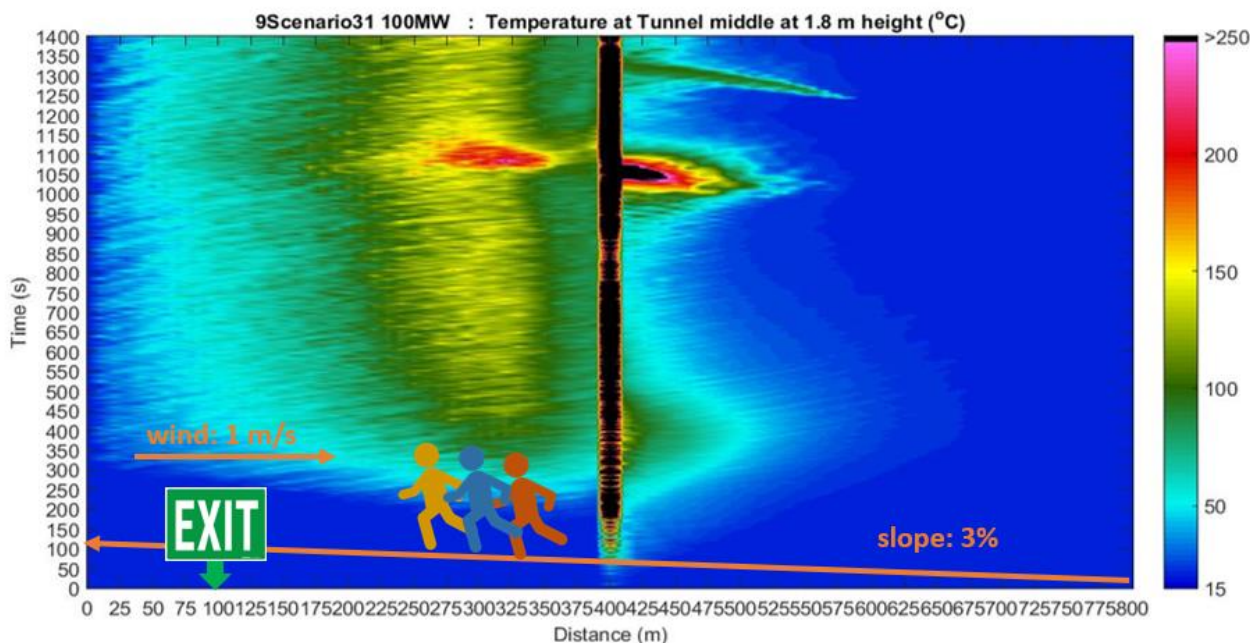


Σχήμα 4-16: <Σενάριο 8> Κατανομή της αθροιστικής επιβάρυνσης FED (λόγω θερμοκρασίας) των χρηστών ανά θέση και ανά χρονοκαθυστέρηση εκκίνησης

Όπως ήταν αναμενόμενο και από την ανάλυση της φωτιάς, δεδομένου ότι ο καπνός διοχετεύεται όλος προς την αντίθετη φορά από αυτή της εξόδου διαφυγής οι χρήστες έχουν πολύ χρόνο διαθέσιμο χρόνο για να ξεκινήσουν να εκκινήσουν περισσότερο των 5 min.

4.4.9 Σενάριο 9: Κλίση 3%, Αέρας 1 m/s

Ανάλυση φωτιάς



Σχήμα 4-17: <Σενάριο 9> Κατανομή της θερμοκρασίας στο μέσον της σήραγγας στο ύψος z = 1.8 m

Το Σενάριο 9 έχει παρόμοια χαρακτηριστικά με το Σενάριο 7 με κλίση ανηφορική προς την έξοδο διαφυγής που ωθεί τον καπνό προς τα εκεί και αερισμό προς την αντίθετη κατεύθυνση. Σε σύγκριση με το Σενάριο 7 από τις δύο αντικρουόμενες δράσεις (κλίση, αερα) η κλίση υπερισχύει αφού σε γενικές γραμμές ο καπνός διοχετεύεται προς τα ανηφορικά. Πιο αναλυτικά το Σενάριο 9 μπορεί να μελετηθεί σε 4 περιοχές.

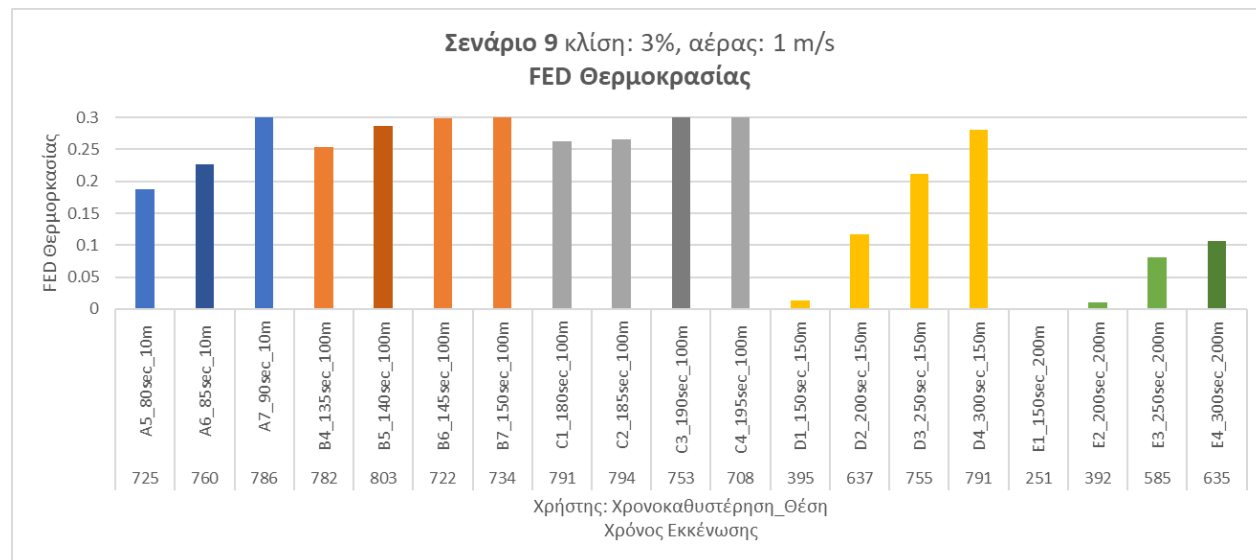
Η πρώτη περιοχή βρίσκεται γύρω από τη θέση της φωτιάς (380-410 m) όπου μέχρι τα πρώτα 100 sec η θερμοκρασία είναι σε ανεκτά επίπεδα (15-50°C), στη συνέχεια για το χρονικό διάστημα 100-150 sec αυξάνεται απότομα στους 100-150 °C, ενώ για όλη την υπόλοιπη προσομοίωση λαμβάνει τιμές μη βιώσιμες από 250°C και πάνω.

Η δεύτερη περιοχή αποτελείται από 1 τμήμα (200-380 m) όπου για τα πρώτα 250 sec η θερμοκρασία είναι χαμηλή και δεν ξεπερνά τους 15 °C, στη συνέχεια για το χρονικό διάστημα 250-350 sec λαμβάνει ανεκτές τιμές έως 50°C, ενώ μέχρι τα 1400 sec φτάνει στους 100°C.

Η τρίτη περιοχή μελέτης συνίσταται σε 1 τμήματα (0-200 m και), όπου όπως και στην δεύτερη περιοχή κατά τα πρώτα 250 sec η θερμοκρασία φτάνει μέχρι τους 15°C, ενώ ακολούθως έως τα 1400 sec κυμαίνεται σε ανεκτές τιμές περί των 50°C. Συγκρίνοντας την δεύτερη και την τρίτη περιοχή δεν παρατηρείται το φαινόμενο διαστρωμάτωσης του καπνού.

Η τέταρτη περιοχή αποτελείται από 1 τμήμα (410-800 m). Η περιοχή αυτή δεν επηρεάζεται από τη φωτιά διότι όλος ο καπνός κινείται προς την αντίθετη κατεύθυνση. Έτσι, η θερμοκρασία παραμένει σταθερά στους 15°C. Σημειώνεται ότι για ένα μικρό χρονικό διάστημα μεταξύ 1000-1100 sec στο τμήμα 400-450 m η θερμοκρασία φτάνει σε υψηλές θερμοκρασίες ανώ των 250°C.

Ανάλυση εκκένωσης

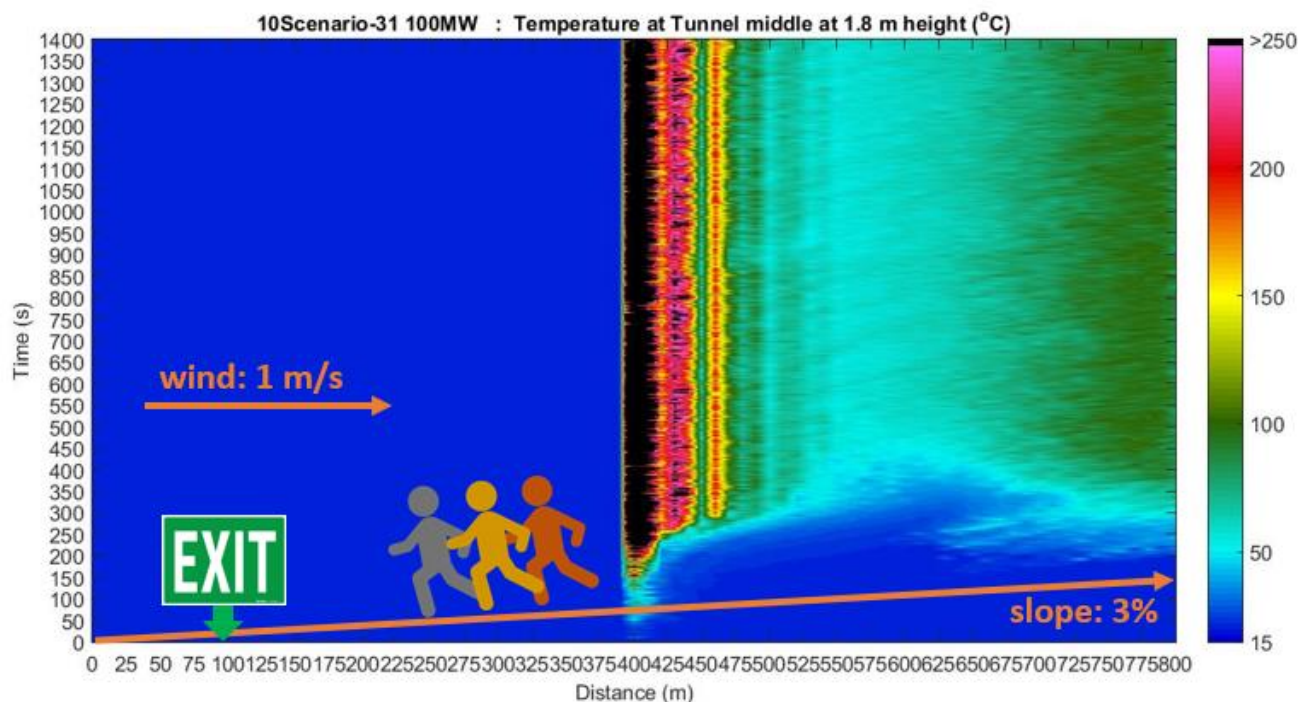


Σχήμα 4-18: <Σενάριο 9> Κατανομή της αθροιστικής επιβάρυνσης FED (λόγω θερμοκρασίας) των χρηστών ανά θέση και ανά χρονοκαθυστέρηση εκκίνησης

Όπως αναμένεται και από την ανάλυση της φωτιάς, εφόσον ο καπνός διοχετεύεται προς την έξοδο διαφυγής, οι χρήστες περιορίζονται περισσότερο ως προς το πόσο θα καθυστερήσουν να εκκινήσουν. Πιο συγκεκριμένα, η κατηγορία χρηστών A που απέχει 10 m από τη φωτιά μπορεί να καθυστερήσει έως 90 sec, η κατηγορία B στα 50 m έως 140 sec και η κατηγορία C στα 100 m έως 185 sec. Η κατηγορίες D και E στα 150 m και 200 m, έχουν επαρκή περιθώρια τουλάχιστον 5 min.

4.4.10 Σενάριο 10: Κλίση -3%, Αέρας 1 m/s

Ανάλυση φωτιάς



Σχήμα 4-19: <Σενάριο 10> Κατανομή της θερμοκρασίας στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8$ m

Το Σενάριο 10 είναι όπως και το Σενάριο 8 με κλίση και αέρα που ωθούν τον καπνό προς την αντίθετη κατεύθυνση από αυτή της εξόδου διαφυγής. Για την αναλυτικότερη περιγραφή της εξέλιξης της φωτιάς το παραπάνω γράφημα μπορεί να χωριστεί σε 4 περιοχές.

Το Σενάριο 4 είναι παρόμοιο με το Σενάριο 2, με τη διαφορά ότι έχει πιο έντονη κλίση. Επομένως, η κίνηση του καπνού στα δύο αυτά σενάρια γίνεται κατά παρεμφερή τρόπο, επαληθεύοντας το φαινόμενο της καμινάδας, το οποίο στο Σενάριο 4 είναι πιο εμφανές. Για την αναλυτικότερη μελέτη το παραπάνω γράφημα μπορεί να χωριστεί σε 4 περιοχές.

Η πρώτη περιοχή βρίσκεται γύρω από τη θέση της φωτιάς (390-410 m) όπου μέχρι τα πρώτα 50 sec η θερμοκρασία είναι σε ανεκτά επίπεδα (15-50°C), στη συνέχεια για το χρονικό διάστημα

50-100 sec αυξάνεται στους 100-150°C, ενώ για όλη την υπόλοιπη προσομοίωση λαμβάνει τιμές μη βιώσιμες από 250°C και πάνω.

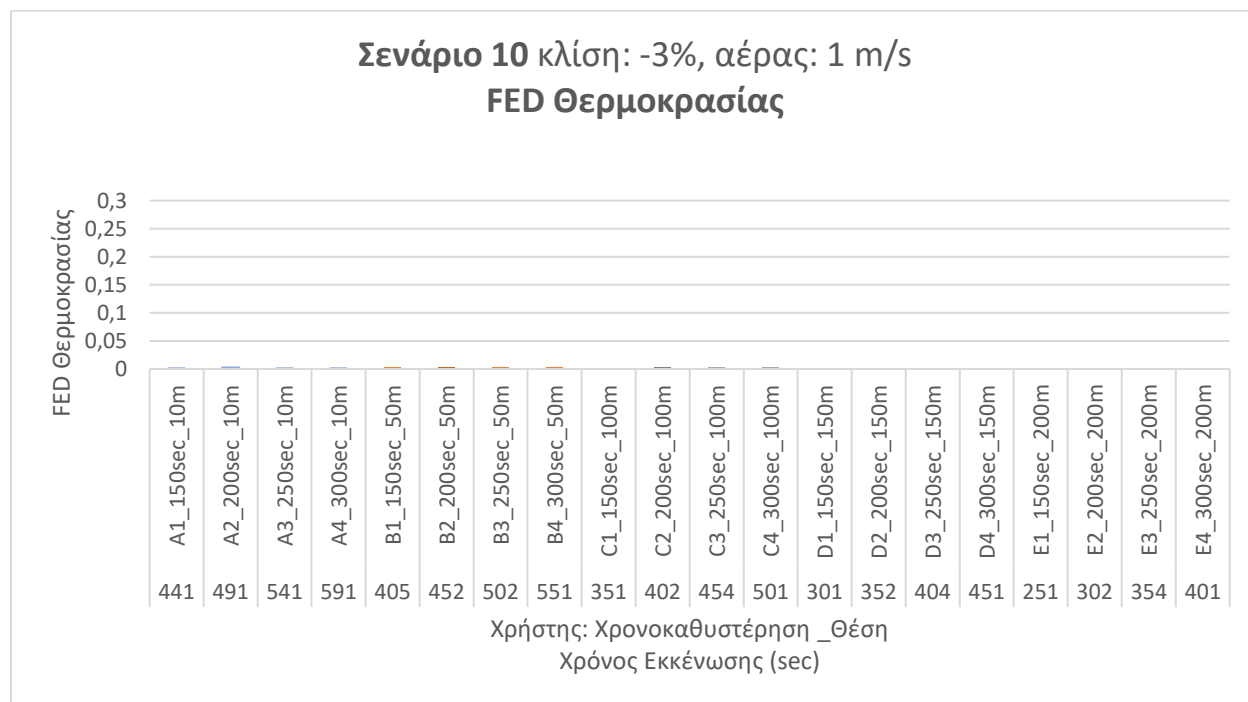
Η δεύτερη περιοχή αποτελείται από 1 τμήμα (410-450 m) όπου για τα πρώτα 250 sec η θερμοκρασία είναι χαμηλή και δεν ξεπερνά τους 15 °C, ενώ μέχρι τα 1400 sec φτάνει στους 200-250°C.

Η τρίτη περιοχή μελέτης συνίσταται σε 1 τμήμα (450-675 m), όπου όπως και στην δεύτερη περιοχή κατά τα πρώτα 250 sec η θερμοκρασία φτάνει μέχρι τους 15 °C, ενώ ακολούθως έως τα 1400 sec κυμαίνεται σε ανεκτές τιμές περί των 50 °C.

Η τέταρτη περιοχή βρίσκεται στο τμήμα 675-800 m όπου για τα πρώτα 350 sec η θερμοκρασία είναι στους 15°C και για την υπόλοιπη προσομοίωση είναι σταθερή στους 50°C. Συγκρίνοντας την τρίτη και την τέταρτη περιοχή προκύπτει ότι στο Σενάριο 10 πραγματοποιείται το φαινόμενο διαστρωμάτωσης του καπνού, όπου στα πιο απομακρυσμένα σημεία συσσωρεύεται περισσότερος καπνός.

Η πέμπτη περιοχή αφορά στο τμήμα τη σήραγγας όπου δεν πηγαίνει ο καπνός (410 – 800 m). Στο τμήμα αυτό, η θερμοκρασία είναι σταθερά στους 15°C.

Ανάλυση εκκένωσης



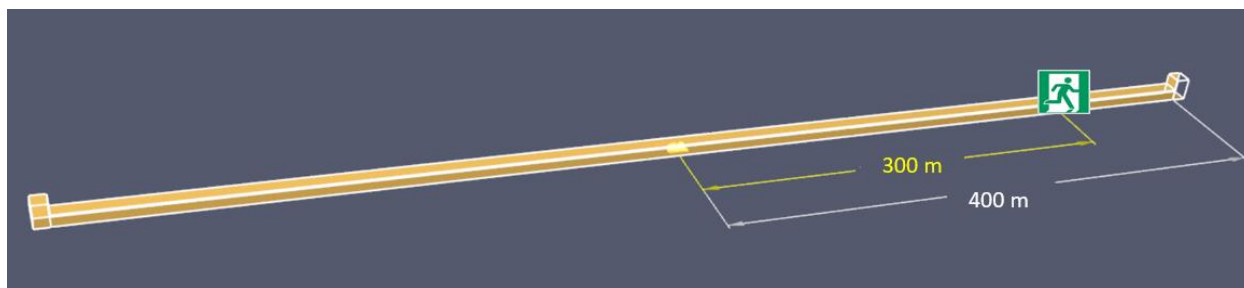
Σχήμα 4-20: <Σενάριο 10> Κατανομή της αθροιστικής επιβάρυνσης FED (λόγω θερμοκρασίας) των χρηστών ανά θέση και ανά χρονοκαθυστέρηση εκκίνησης

Δεδομένου ότι ο καπνός διοχετεύεται προς την αντίθετη κατεύθυνση από αυτή της εξόδου διαφυγής, όλοι οι χρήστες διαθέτουν παραπάνω από 5 min για να ξεκινήσουν την εκκένωση.

4.5 Επιπρόσθετα Σενάρια και ανάλυση αποτελεσμάτων

Κατά την ανάλυση των αποτελεσμάτων των Σεναρίων που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4.4, προέκυψε -όπως ήταν αναμενόμενο- ότι για τα Σενάρια όπου όλος ο καπνός διοχετεύτηκε προς την αντίθετη κατεύθυνση σε σχέση με την έξοδο διαφυγής οι χρήστες είχαν υπεραρκετό χρόνο για να απομακρυνθούν.

Για αυτά τα Σενάρια κρίθηκε σκόπιμο στο πλαίσιο της Εργασίας να μελετηθεί τι θα γινόταν εάν οι χρήστες έπρεπε να κινηθούν προς την κατεύθυνση του καπνού. Αναλυτικότερα, χρησιμοποιήθηκε κάθε φορά το ίδιο Σενάριο για τη φωτιά αλλά στην προσομοίωση της εκκένωσης οι χρήστες καθώς και η έξοδος διαφυγής τοποθετήθηκαν συμμετρικά από την άλλη μεριά ως προς το κέντρο της σήραγγας (βλ. Σχήμα 4-21). Δηλαδή, η φωτιά είναι σταθερά στο μέσον της σήραγγας στην θέση $x = 400$ m, αλλά η έξοδος διαφυγής είναι στη θέση $x = 700$ m (αντί για $x = 100$ m που ήταν πριν). Οι κατηγορίες χρηστών Α έως Ε είναι ανάμεσα στη φωτιά και στην έξοδο διαφυγής. Σε αυτά τα νέα Σενάρια η κλίση της σήραγγας και ο αέρας λογίζονται αντίθετα σε σχέση με το αντίστοιχο αρχικό σενάριο.



Σχήμα 4-21: Νέα θέση εξόδου διαφυγής για τα επιπρόσθετα Σενάρια

Σενάρια κατά τα οποία ο καπνός διοχετεύτηκε προς την αντίθετη κατεύθυνση σε σχέση με την έξοδο διαφυγής

Τα Σενάρια του Κεφαλαίου 4.4 στα οποία παρατηρήθηκε ότι ο καπνός πήγε προς την αντίθετη πλευρά ως προς την έξοδο είναι τα υπ' αριθμόν: 3,5,6,7,8 και 10 των οποίων τα χαρακτηριστικά παρουσιάζονται ακολούθως στον Πίνακα 4-1. Στον πίνακα αυτό παρουσιάζονται συνολικά τα Σενάρια της εργασίας.

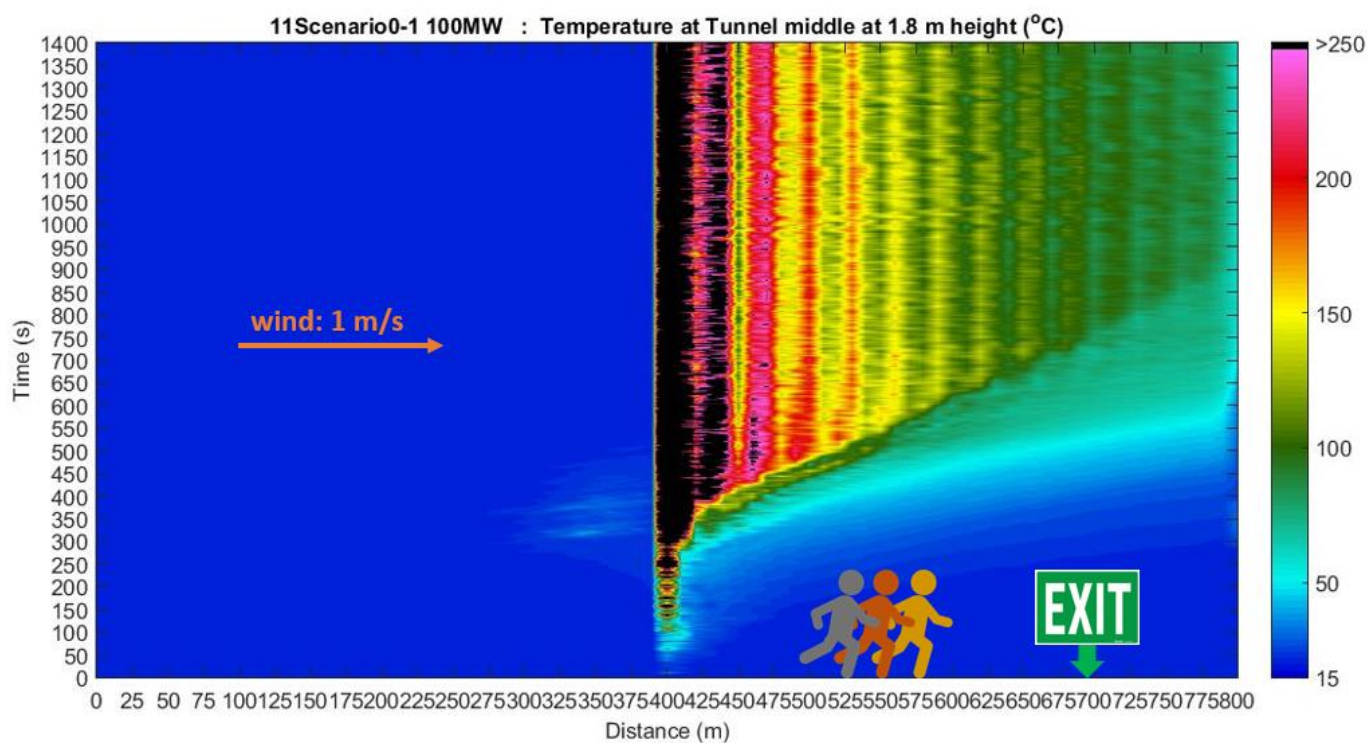
Ωστόσο, επισημαίνεται ότι για τα Σενάρια 3 και 5 όπου η ταχύτητα του αέρα είναι μηδενική δε χρειάζεται να γίνει εκ νέου ανάλυση εκκένωσης διότι θα ταυτίζεται με αυτή των Σεναρίων 2 και 4 αντίστοιχα. Επίσης, όπως παρουσιάστηκε και κατά την ανάλυση του Σεναρίου 7 (βλ. Κεφάλαιο 4.4.7) ο αέρας διοχετεύτηκε κατά κύριο λόγο στο κεντρικό τμήμα τη σήραγγας, διότι οι δράσεις της κλίσης και του αέρα ήταν περίπου ίσες και αντίθετες. Παρόλα αυτά θα δημιουργηθεί επιπρόσθετη ανάλυση εκκένωσης και για το εν λόγω σενάριο, έτσι ώστε να καταφανεί από ποια μεριά είναι ευνοϊκότερες οι συνθήκες (βλ. παρακάτω Κεφάλαιο 4.5.2)

Πίνακας 4-1: Σενάρια που αναλύθηκαν συνολικά στην εργασία

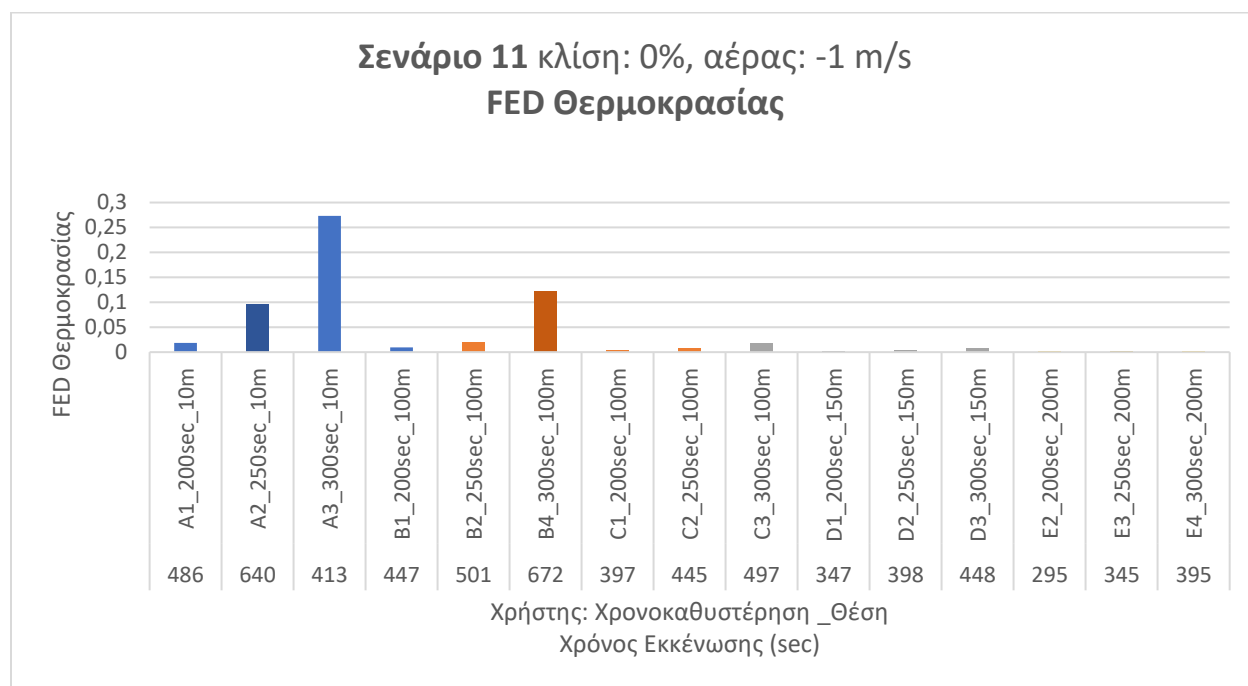
	α/α Σεναρίου	κλίση σήραγγας	ταχύτητα αέρα (m/s)
Αρχικά Σενάρια	1	0	0
	2	1%	0
	3	-1%	0
	4	3%	0
	5	-3%	0
	6	0%	1
	7	1%	1
	8	-1%	1
	9	3%	1
	10	-3%	1
Επιπρόσθετα Σενάρια	11	0%	-1
	12	-1%	-1
	13	1%	-1
	14	3%	-1

φωτιά από Σενάριο 6
φωτιά από Σενάριο 7
φωτιά από Σενάριο 8
φωτιά από Σενάριο 10

4.5.1 Σενάριο 11: Κλίση 0%, Αέρας: -1 m/s (φωτιά από Σενάριο 6)



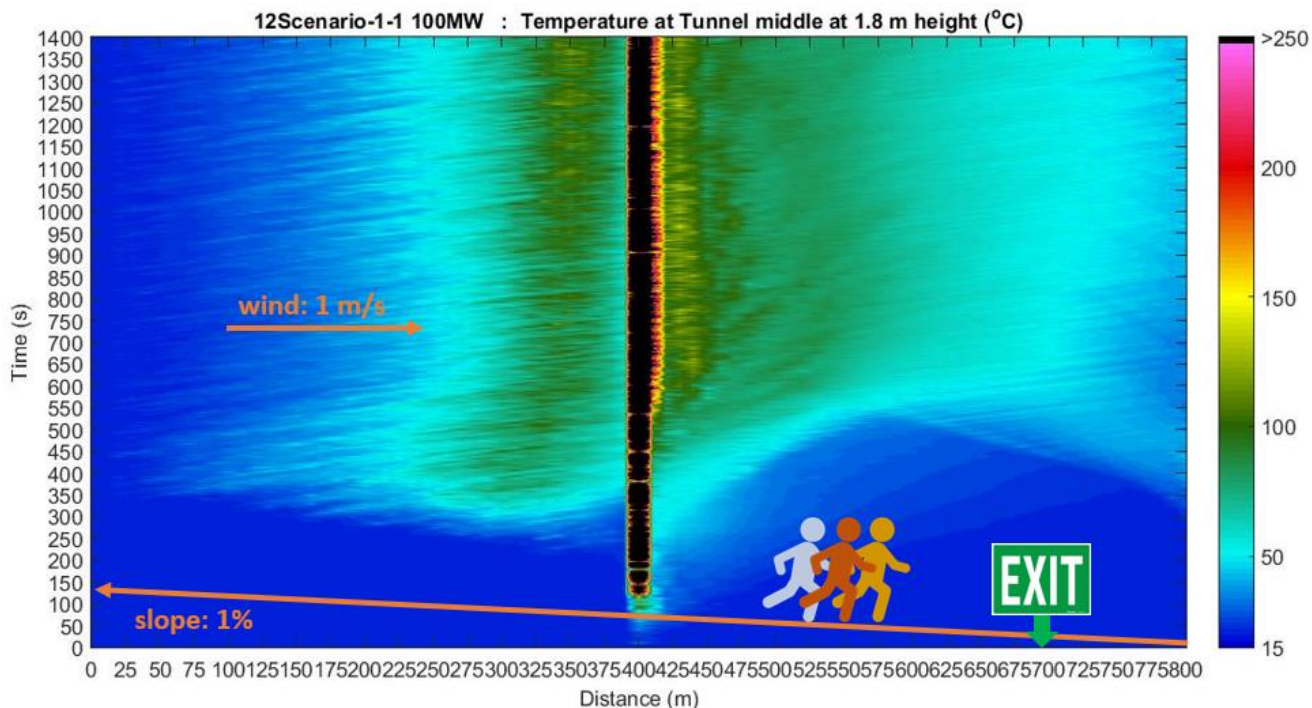
Σχήμα 4-22: <Σενάριο 11>: Κατανομή της θερμοκρασίας στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8$ m (φωτιά από Σενάριο 6)



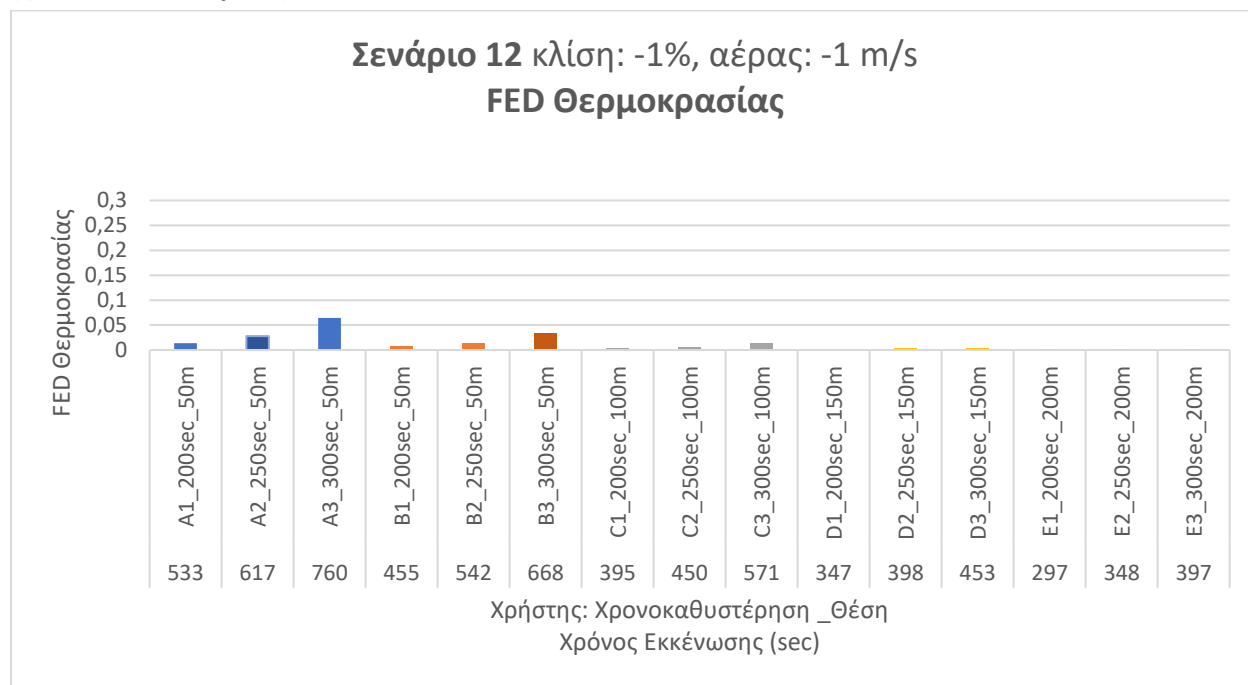
Σχήμα 4-23: <Σενάριο 11> Κατανομή της αθροιστικής επιβάρυνσης FED (λόγω θερμοκρασίας) των χρηστών ανά θέση και ανά χρονοκαθυστέρηση εκκίνησης

Το Σενάριο 11 έχει την ίδια προσομοίωση φωτιάς με το Σενάριο 6 (βλ. Παρ. 4.4.6) από την ανάλυση της εκκένωσης προκύπτει ότι όλες οι κατηγορίες χρηστών έχουν στη διάθεσή τους τουλάχιστον 300 sec προτού ξεκινήσουν να απομακρύνονται. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι η Κατηγορία χρηστών A, η οποία απέχει 10 m από τη θέση της φωτιάς εάν αργήσει να ξεκινήσει 300 sec θα φτάσει σε FED = 0.27 λόγω θερμοκρασίας, η οποία είναι σημαντική επιβάρυνση. Οι υπόλοιπες κατηγορίες και ειδικά αυτές που βρίσκονται από 100 m απόσταση και πάνω επηρεάζονται ελάχιστα. Αυτό είναι λογικό διότι όπως φαίνεται και στην ανάλυση της φωτιάς (βλ. Σχήμα 4-22) υπάρχει ένας καθαρός διάδρομος με θερμοκρασία που δεν ξεπερνά τους 15°C για τουλάχιστον 270 sec για όλες τις κατηγορίες.

4.5.2 Σενάριο 12: Κλίση -1%, Αέρας: -1 m/s (φωτιά από Σενάριο 7)



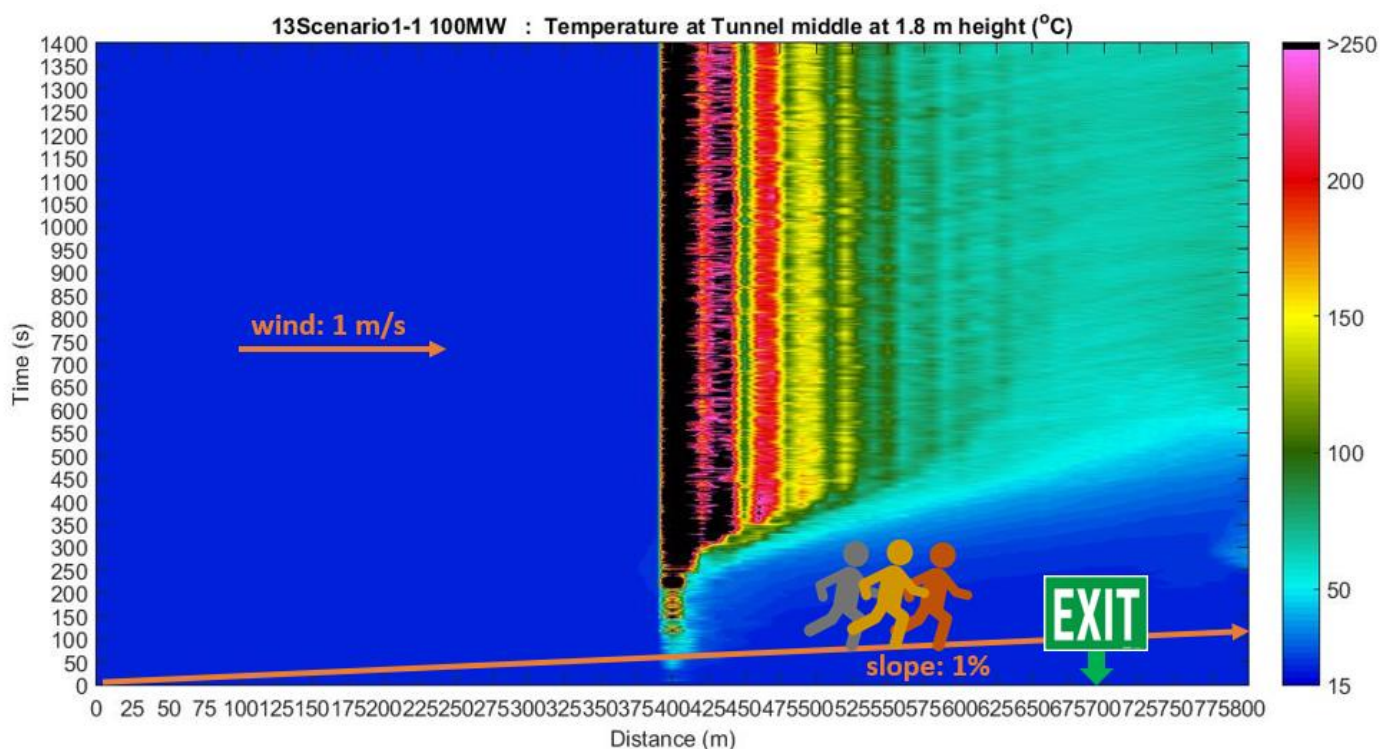
Σχήμα 4-24: <Σενάριο 12> Κατανομή της θερμοκρασίας στο μέσον της σήραγγας στο ύψος z = 1.8 m (φωτιά από Σενάριο 7)



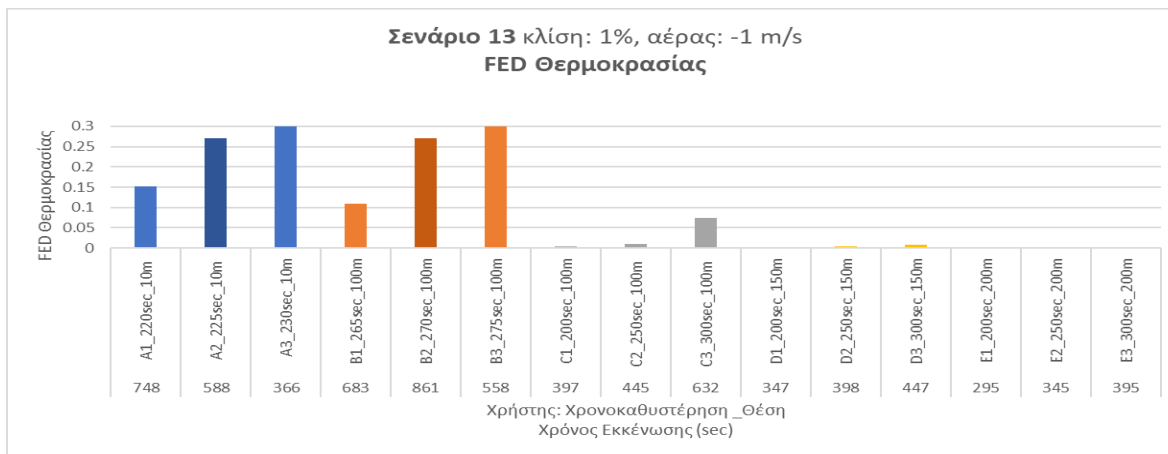
Σχήμα 4-25: <Σενάριο 12> Κατανομή της αθροιστικής επιβάρυνσης FED (λόγω θερμοκρασίας) των χρηστών ανά θέση και ανά χρονοκαθυστέρηση εκκίνησης

Το Σενάριο 12 έχει την ίδια προσομοίωση φωτιάς με το Σενάριο 7 (βλ. Παρ. 4.4.7). Από την ανάλυση της φωτιάς προέκυψε ότι ο καπνός συγκεντρώνεται στο κεντρικό τμήμα της σήραγγας (275-525 m), όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4-24. Στο εν λόγω τμήμα η θερμοκρασία δεν ξεπερνά τους 100°C, ενώ στην υπόλοιπη σήραγγα δεν ξεπερνά τους 15°C. Επομένως, εν γένει η θερμοκρασία είναι ανεκτή και από τις 2 μεριές της φωτιάς και οι χρήστες έχουν σε κάθε περίπτωση τουλάχιστον 300 sec στη διάθεσή τους πριν ξεκινήσουν την απομάκρυνση. Ωστόσο, κρίθηκε σκόπιμη η εκτέλεση του Σεναρίου 12 για να συγκριθεί με το Σενάριο 7 και να φανεί από ποια μεριά είναι ευνοϊκότερο να βρίσκεται ένας χρήστης. Έτσι, από τα Σχήμα 4-14 Σχήμα 4-25 όπου φαίνεται το FED λόγω θερμοκρασίας σε κάθε περίπτωση, προκύπτει ότι στο Σενάριο 7 η επιβάρυνση είναι σημαντικότερη, όπου ειδικά για τις δύο κατηγορίες χρηστών που είναι εγγύτερα στη φωτιά φτάνει σε τιμές $FED = 0.2 - 0.27$.

4.5.3 Σενάριο 13: Κλίση 1%, Αέρας: -1 m/s (φωτιά από Σενάριο 8)



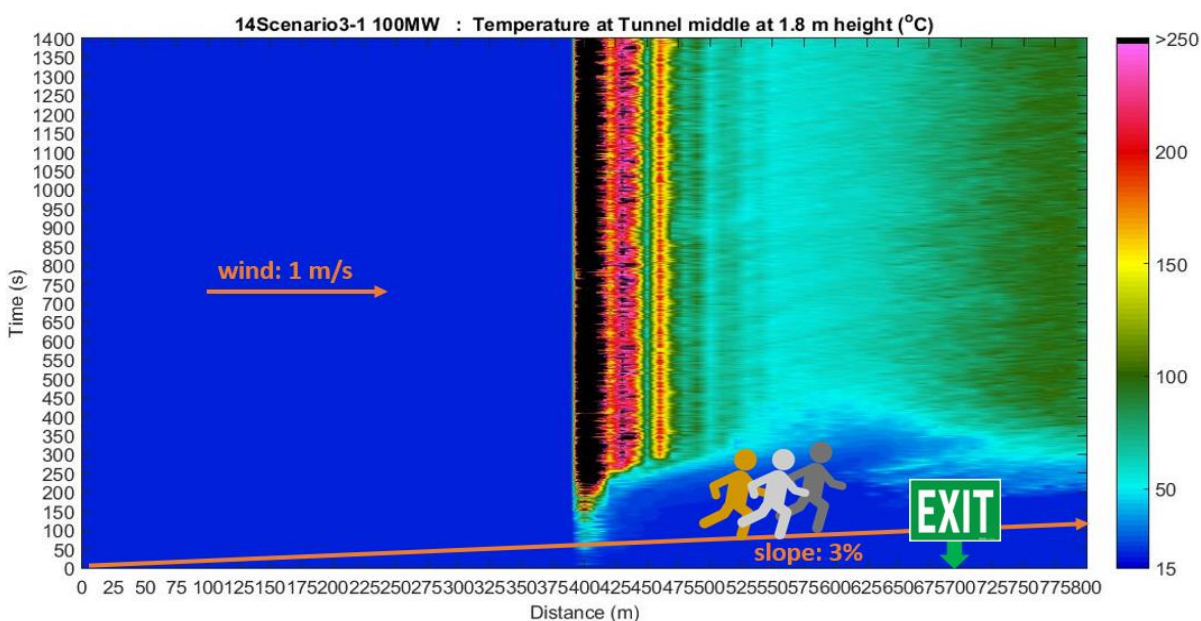
Σχήμα 4-26: <Σενάριο 13>: Κατανομή της θερμοκρασίας στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8$ m (φωτιά από Σενάριο 8)



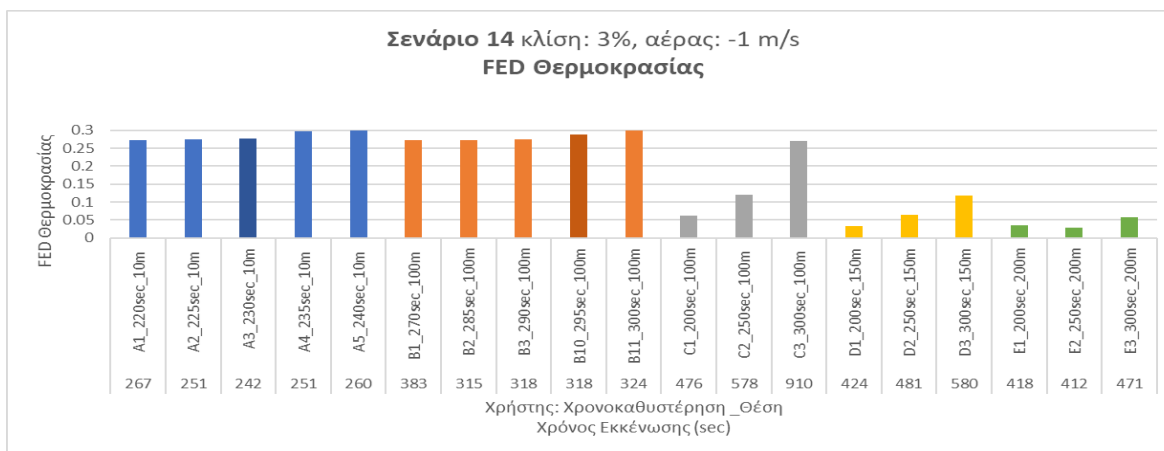
Σχήμα 4-27: <Σενάριο 13> Κατανομή της αθροιστικής επιβάρυνσης FED (λόγω θερμοκρασίας) των χρηστών ανά θέση και ανά χρονοκαυστήρηση εκκίνησης

Το Σενάριο 13 έχει την ίδια ανάλυση φωτιάς με το Σενάριο 8 (βλ. Παρ. 4.4.8). Από την ανάλυση φωτιάς προέκυψε ότι προς την κατεύθυνση που κινούνται οι χρήστες κατευθύνεται και ο καπνός (βλ. Σχήμα 4-15 του Σεναρίου 8). Ωστόσο η κίνηση του καπνού είναι τέτοια ώστε να αφήσει έναν ανοιχτό διάδρομο για μεγάλο χρονικό διάστημα έως 200 sec, μετά από το οποίο προοδευτικά εξαπλώνεται. Έτσι, οι χρήστες που επηρεάζονται είναι αυτοί που βρίσκονται πιο κοντά στη φωτιά σε απόσταση 10 m και 50 m, όπου ο διαθέσιμος χρόνος τους είναι 225 sec και 270 sec αντίστοιχα. Οι υπόλοιποι χρήστες έχουν τουλάχιστον 300 sec προτού ξεκινήσουν την εκκένωση και δεν επιβαρύνονται αισθητά από τη θερμοκρασία.

4.5.4 Σενάριο 14: Κλίση 3%, Αέρας: -1 m/s (φωτιά από Σενάριο 10)



Σχήμα 4-28: <Σενάριο 14>: Κατανομή της θερμοκρασίας στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8$ m (φωτιά από Σενάριο 10)



Σχήμα 4-29: <Σενάριο 14> Κατανομή της αθροιστικής επιβάρυνσης FED (λόγω θερμοκρασίας) των χρηστών ανά θέση και ανά χρονοκαθυστερήση εκκίνησης

Το Σενάριο 14 έχει την ίδια ανάλυση φωτιάς με αυτή του Σεναρίου 10 (βλ. Παρ. 4.4.10). Από την ανάλυση της φωτιάς (βλ. Σχήμα 4-19 του Σεναρίου 10) προκύπτει ότι οι χρήστες πρέπει να κινηθούν προς την κατεύθυνση του καπνού στο τμήμα 400-800 m. Αυτό που παρατηρείται έντονα είναι το φαινόμενο διαστρωμάτωσης του καπνού. Πιο συγκεκριμένα, ο καπνός συσσωρεύεται σε δύο τμήματα το ένα κοντά στη φωτιά 390-500 m και 700-800 m. Έτσι, οι χρήστες που επηρεάζονται είναι αυτοί που βρίσκονται πιο κοντά στη φωτιά σε αποστάσεις 10 m και 50 m και ο διαθέσιμος χρόνος που έχουν πριν ξεκινήσουν να απομακρύνονται είναι 235 sec και 295 sec αντίστοιχα. Οι υπόλοιποι χρήστες έχουν άνω των 300 sec διαθέσιμο χρόνο. Επισημαίνεται, ωστόσο, ότι η κατηγορία χρηστών C σε απόσταση 100 m από το μέτωπο της φωτιάς εάν καθυστερήσει 300 sec για να ξεκινήσει θα φτάσει σε αθροιστική επιβάρυνση FED = 0.26 λόγω θερμοκρασίας που είναι σημαντική.

4.6 Σύνοψη αποτελεσμάτων

Στα επόμενα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα και οι παρατηρήσεις που προέκυψαν από τις αναλύσεις τη φωτιάς και της εκκένωσης κάθε σεναρίου.

4.6.1 Γενικές παρατηρήσεις για την ανάλυση της φωτιάς

4.6.1.1 Φαινόμενο της καμινάδας

Βασικός στόχος της παρούσας Εργασίας είναι να εξεταστεί η επιρροή του φαινομένου της καμινάδας κατά την εξέλιξη της φωτιάς σε σήραγγα όταν έχει κλίση. Προκύπτει ότι η επίδραση της κλίσης είναι σημαντική. Αυτό διαπιστώνεται συγκρίνοντας τα Σενάρια 1,2 και 4 με κλίσεις 0%, 1% και 3% αντίστοιχα και χωρίς επιρροή από τον αέρα.

Η ζεστή αέρια μάζα του καπνού είναι ελαφρύτερη από αυτή του αέρα για αυτό έχει την τάση να κινείται προς τα επάνω. Όπως φαίνεται και στα Σχήμα 4-1 Σχήμα 4-3 και Σχήμα 4-5 όπου αναπαρίσταται η κίνηση του καπνού κατά μήκος της σήραγγας των εν λόγω σεναρίων στην περίπτωση της μηδενικής κλίσης ο καπνός, όπως ήταν αναμενόμενο, κινείται και προς τις δύο κατευθύνσεις εκατέρωθεν της φωτιάς. Στις άλλες δύο περιπτώσεις όπου η σήραγγα έχει κλίση ο καπνός κινείται προς τα ανηφορικά. Στο Σενάριο 2 αυτό το φαινόμενο είναι πιο ήπιο ενώ στο Σενάριο 4 η επίδραση της κλίσης είναι ιδιαίτερα έντονη για τα πρώτα 100 m από τη φωτιά όπου συσσωρεύεται ο καπνός, ενώ για τα υπόλοιπα μέτρα η κίνηση του καπνού είναι παρόμοια με αυτή του Σεναρίου 2.

4.6.1.2 Αντικρουόμενες δράσεις κλίσης και αερισμού

Στις περιπτώσεις κατά τις οποίες η δράση της κλίσης και αυτή του αερισμού ωθούν τον καπνό κάθε μία προς αντίθετες κατευθύνσεις διαπιστώθηκε ότι για τις τιμές κλίσης και αερισμού που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη η κλίση έχει σημαντικότερη επιρροή. Τα Σενάρια όπου παρατηρήθηκε αυτό το φαινόμενο είναι τα υπ' αριθμόν 7 και 9 με κλίσεις 1% και 3% αντίστοιχα και αερισμό 1 m/s (βλ. Σχήμα 4-13 Σχήμα 4-17). Αυτό που σημειώνεται στο Σενάριο 7 είναι ότι η κλίση και ο αερισμός έχουν περίπου ίσες δράσεις, ωστόσο όταν η κλίση αυξηθεί (βλ. Σενάριο 9) η επιρροή της είναι μεγαλύτερη όπως ήταν αναμενόμενο και ο καπνός κινείται προς την κατεύθυνση που τον ωθεί η επιρροή της κλίσης.

4.6.1.3 Φαινόμενο διαστρωμάτωσης καπνού

Ο καπνός αποτελεί μία ζεστή αέρια μάζα η οποία κινείται από τα θερμότερα προς τα ψυχρότερα σημεία. Όντας ελαφρύτερος από τον υφιστάμενο αέρα στο εσωτερικό της σήραγγας κινείται προς την στέψη της. Ωστόσο, όσο απομακρύνεται από τη φωτιά πέφτει πιο χαμηλά. Επομένως, ο καπνός συσσωρεύεται σε μία στρώση. Αυτό το φαινόμενο έχει ως αποτέλεσμα, θέσεις που βρίσκονται εγγύτερα στη φωτιά να έχουν καθαρότερο διάδρομο διαφυγής σε σχέση με πιο απομακρυσμένες (βλ. Εικόνα 4-1: Στιγμιότυπο από το 1ο Σενάριο τη χρονική στιγμή $t = 327 \text{ sec}$, όπου φαίνεται το φαινόμενο διαστρωμάτωσης του καπνού)

4.6.1.4 Φαινόμενο αναστροφής καπνού (back layering)

Λόγω της κλίσης ή του αερισμού της σήραγγας ο καπνός τείνει προς μία κατεύθυνση. Ωστόσο, παρατηρήθηκε σε μερικές περιπτώσεις ότι ένα μέρος του καπνού κινήθηκε και προς την άλλη μεριά για ένα μικρό τμήμα. Το φαινόμενο αυτό της αναστροφής του καπνού οφείλεται στη δυναμική της φωτιάς, στη γεωμετρία της διατομής και στη γενικότερη ανοδική κίνηση του καπνού μέσα στο κλειστό περιβάλλον της σήραγγας. Η αναστροφή κίνηση του καπνού φαίνεται εντονότερα στο διάγραμμα κατανομής της ορατότητας (βλ. Παράρτημα), αλλά και στο διάγραμμα κατανομής της θερμοκρασίας μπορεί να παρατηρηθεί. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι

τα παραπάνω διαγράμματα αναφέρονται σε ύψος $z = 1.80$ m από το δάπεδο τη σήραγγας. Σε μεγαλύτερα ύψη φαινόμενο της αναστροφής του καπνού φαίνεται πιο έντονα.

4.6.2 Συγκριτικά αποτελέσματα από τις αναλύσεις εκκένωσης

Ο κύριος στόχος της παρούσας Εργασίας είναι να εκτιμηθεί σε κάθε σενάριο ο χρόνος που έχουν στη διάθεσή τους οι χρήστες να καθυστερήσουν πριν ξεκινήσουν να απομακρύνονται, ανάλογα με τη θέση που βρισκόντουσαν τη στιγμή που ξέσπασε η φωτιά. Κριτήριο για να καθοριστεί αυτός ο χρόνος είναι η αθροιστική επιβάρυνση FED λόγω θερμοκρασίας που αποτελεί κρίσιμη παράμετρο βιωσιμότητας. Αυτός ο χρόνος καθορίζεται με δοκιμές για διάφορες τιμές χρονοκαθυστέρησης έως ότου ο χρήστης φτάσει οριακά στην έξοδο διαφυγής με τιμή $FED = 0.3$. Επισημαίνεται ότι η επιβάρυνση λόγω της τοξικότητας των αερίων είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με αυτή της θερμοκρασίας για αυτό δε λαμβάνεται υπόψη και παρουσιάζεται μόνο στο Παράρτημα της παρούσας Εργασίας.

Στα Σενάρια φωτιάς όπου ο καπνός διοχετεύεται από την αντίθετη μεριά σε σχέση με την έξοδο διαφυγής οι χρήστες έχουν υπεραρκετό χρόνο για να εκκινήσουν την εκκένωση και η επιβάρυνσή τους λόγω θερμοκρασίας είναι πολύ μικρή έως αμελητέα.

4.6.2.1 Σενάρια κατά τα οποία οι χρήστες επηρεάζονται από τη φωτιά

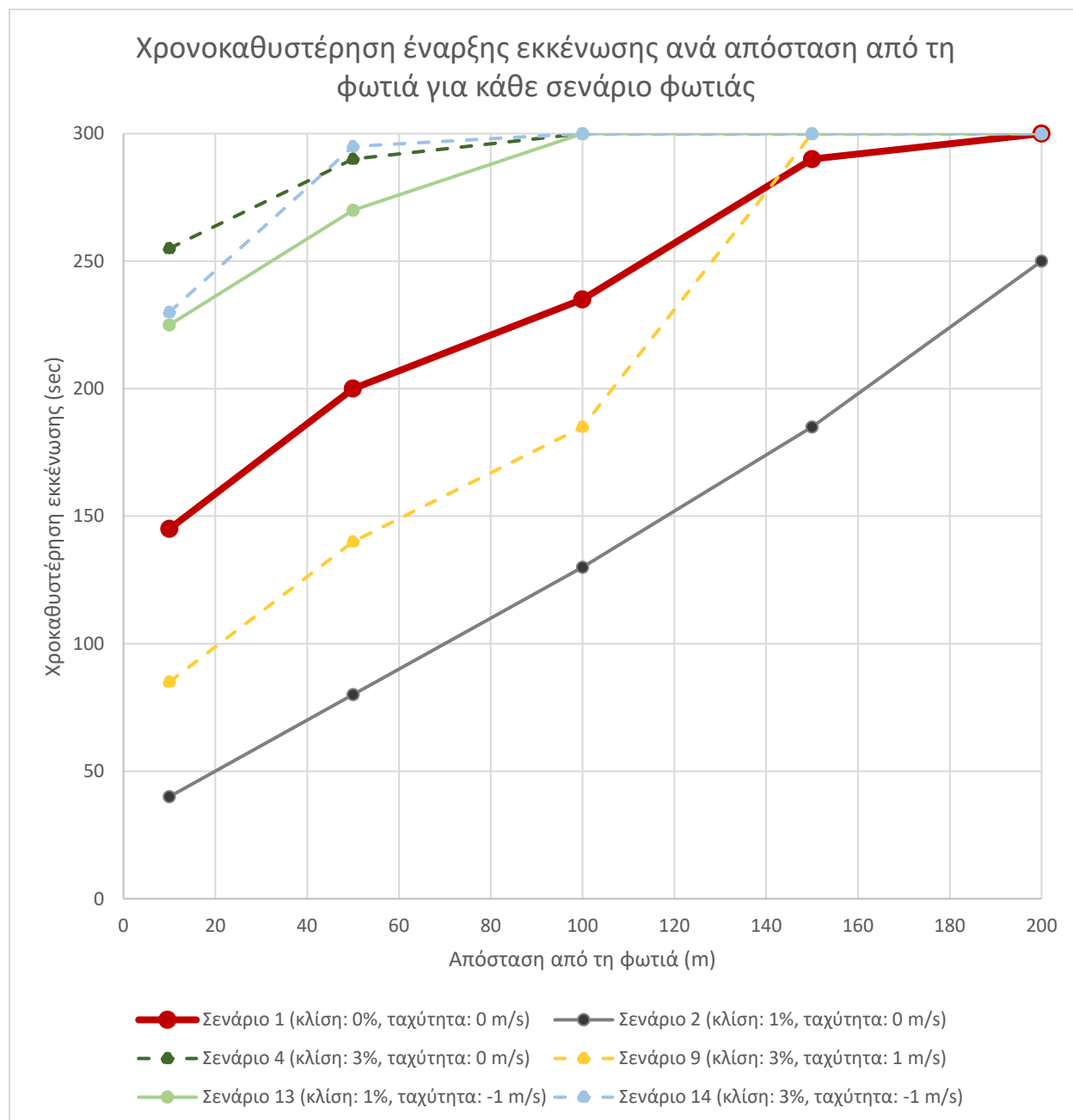
Τα υπόλοιπα Σενάρια κατά τα οποία οι χρήστες επηρεάζονται από τη φωτιά φαίνονται στο Σχήμα 4-30 που ακολουθεί. Στο εν λόγω Σχήμα το Σενάριο αναφοράς είναι το υπ' αριθμόν 1 (με βαθιά ερυθρά γραμμή) κατά το οποίο τόσο η κλίση όσο και ο αερισμός έχουν μηδενικές τιμές. Στο Σενάριο αυτό παρατηρείται μία γραμμική αύξηση της διαθέσιμης χρονοκαθυστέρησης αυξανομένης της απόστασης.

Σενάρια κατά τα οποία οι χρήστες διαθέτουν αρκετό χρόνο

Στα Σενάρια υπ' αριθμόν 4, 13 και 14 σε γενικές γραμμές όλοι οι χρήστες έχουν αρκετή διαθέσιμη χρονοκαθυστέρηση άνω των 200 sec. Αυτό συμβαίνει διότι όπως φαίνεται από τις αντίστοιχες αναλύσεις της φωτιάς (βλ. Σχήμα 4-7, Σχήμα 4-15 και Σχήμα 4-19) παρόλο που ο καπνός κινείται προς την έξοδο διαφυγής εν τούτοις η μεγαλύτερη συγκέντρωσή του είναι κυρίως κοντά στη φωτιά και έτσι ο υπόλοιπος διάδρομος μέχρι την έξοδο είναι καθαρός.

Σενάρια κατά τα οποία οι χρήστες έχουν περιορισμένο χρόνο

Τα Σενάρια κατά τα οποία ο χρόνος που έχουν στη διάθεσή τους οι χρήστες είναι περιορισμένος είναι τα υπ' αριθμόν 2 και 9. Αυτό συμβαίνει διότι στα εν λόγω Σενάρια ο καπνός διαχέεται σε μεγάλο τμήμα του διαδρόμου στον οποίο πρέπει να κινηθούν οι χρήστες (βλ. Σχήμα 4-3, Σχήμα 4-19 και Σχήμα 4-17).



Σχήμα 4-30: Διαθέσιμη χρονοκαθυστέρηση έναρξης εκκένωσης ανά απόσταση από τη φωτιά για κάθε Σενάριο φωτιάς

Κοινά χαρακτηριστικά Σεναρίων

Από το παραπάνω διάγραμμα γίνεται εμφανές ότι οι καμπύλες κάθε Σεναρίου έχουν παρόμοια κλίση. Αυτό σημαίνει ότι όλα τα Σενάρια έχουν την ίδια ευαισθησία στην αλλαγή των παραμέτρων του αερισμού και της κλίσης της σήραγγας. Ταυτόχρονα, η σταθερή κλίση σε κάθε

Σενάριο συνεπάγεται ότι αυξανόμενη της απόστασης από την φωτιά αυξάνεται αναλόγως και ο διαθέσιμος χρόνος που έχουν οι χρήστες μέχρι να ξεκινήσουν την εκκένωση.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η τιμή της εφαιπτομένης που περιγράφει όλα τα Σενάρια έχει την τιμή 1, δηλαδή με κάθε επιπλέον μέτρο απόστασης από τη φωτιά οι χρήστες κερδίζουν επιπλέον ένα δευτερόλεπτο.

5. Συμπεράσματα

5.1 Γενικά

Στόχος της παρούσας Εργασίας είναι να μελετήσει την επίδραση της κλίσης της σήραγγας στην εξέλιξη του φαινομένου της φωτιάς και κατ' επέκταση στο διαθέσιμο χρόνο που έχουν οι χρήστες προτού ξεκινήσουν να απομακρύνονται. Κάθε στάδιο της εργασίας χωρίζεται σε δύο σκέλη, το ένα αφορά στην ανάλυση της φωτιάς και το άλλο στην εκκένωση. Στα επόμενα παρουσιάζονται τα συμπεράσματα στα οποία καταλήγει η παρούσα.

5.2 Κανονιστικό πλαίσιο

Στον τομέα των υπογείων κατασκευών, οι απαιτήσεις ασφαλείας είναι συνήθως λιγότερο ομοιόμορφες σε σχέση με αυτές των επίγειων κατασκευών. Συνήθως, οι κανονισμοί στοχεύουν στο να ορίσουν ένα ενιαίο σύνολο μέτρων για τον σχεδιασμό και τη λειτουργία των υπογείων υποδομών, εξασφαλίζοντας τη βέλτιστη ασφάλεια με τον πιο οικονομικό τρόπο.

Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των υπόγειων υποδομών απαιτούν την ανάπτυξη και τον σχεδιασμό μιας διαδικασίας εκκένωσης προσαρμοσμένη σε αυτά τα χαρακτηριστικά. Ειδικότερα, η ευημερία των ατόμων κατά τις καταστάσεις έκτακτης ανάγκης είναι αναπόσπαστο μέρος του συνολικού σχεδιασμού του υπόγειου χώρου, ενώ η αξιολόγηση των διαθέσιμων επιλογών για τη γρήγορη εκκένωση αποτελεί ουσιαστική προϋπόθεση, ειδικά σε περιπτώσεις φωτιάς.

Τα ζητήματα που προκύπτουν κατά τον σχεδιασμό των εν λόγω έργων σχετίζονται κυρίως με την πυρασφάλεια, όπως ο καθορισμός του μεγέθους της φωτιάς, ο σχεδιασμός συστημάτων αντιμετώπισης του καπνού και η ανάπτυξη των διαδικασιών εκκένωσης. Οι διαφορετικές κατευθυντήριες γραμμές και κανονισμοί, σε μερικά σημεία διαφέρουν ανάλογα με τον τύπο και τη χρήση της κατασκευής, ωστόσο συχνά συμπληρώνονται μεταξύ τους και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη συνολικά. Όσον αφορά στη διαδικασία της εκκένωσης, οι περισσότεροι κανονισμοί παρέχουν τυποποιημένες μεθοδολογίες για τη σχεδίαση των υπογείων συστημάτων ασφαλείας.

Οι κανονισμοί για την πυρασφάλεια των υπογείων έργων σε ΗΠΑ και ΕΕ

Κατά την αξιολόγηση των προτύπων, είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψη οι διαφορετικές προσεγγίσεις των αμερικανικών και ευρωπαϊκών θεσμικών πλαισίων για το σχεδιασμό υπόγειων υποδομών. Οι ΗΠΑ δίνουν έμφαση κυρίως στους κανονισμούς και τα πρότυπα (NFPA Codes & Standards) που διέπουν το σχεδιασμό και τη λειτουργικότητα των υπόγειων χώρων, συμπεριλαμβανομένων των σταθμών του μετρό και των σιδηροδρομικών σταθμών. Αντίθετα, οι ευρωπαϊκοί κώδικες (CFPA E-Guidelines) δίνουν μεγαλύτερη έμφαση στις προδιαγραφές ασφαλείας για τις σήραγγες, τόσο οδικές όσο και σιδηροδρομικές.

Η Παγκόσμια Ένωση Οδικών Μεταφορών (PIARC) υπογραμμίζει τη σημασία της πυρασφάλειας στις σήραγγες, αναγνωρίζοντας τις ιδιαίτερες δυσκολίες που παρουσιάζουν. Υποστηρίζει την εφαρμογή λεπτομερών τακτικών πρόληψης πυρκαγιάς, συμπεριλαμβανομένων αποτελεσματικών μεθόδων εξαερισμού και πυρίμαχων υλικών σήραγγας, για τη μείωση του κινδύνου εμφάνισης πυρκαγιάς. Επιπλέον, δίνει προτεραιότητα στην ανάπτυξη ισχυρών σχεδίων αντιμετώπισης καταστάσεων έκτακτης ανάγκης, με έμφαση στην εκπαίδευση του προσωπικού και των πυροσβεστών μαζί με την παροχή εξειδικευμένου εξοπλισμού. Οι κατευθυντήριες γραμμές της PIARC τονίζουν την ανάγκη για συνεχή έρευνα και παγκόσμια συνεργασία για την ενίσχυση της πυροπροστασίας σε σήραγγες και τον αποτελεσματικό μετριασμό των κινδύνων.

5.3 Επιρροή της κλίσης της σήραγγας στο φαινόμενο της φωτιάς

Για τις ανάγκες της εργασίας πραγματοποιήθηκαν 10 προσομοιώσεις φωτιάς με χρήση του λογισμικού Pyrosim της εταιρείας ThunderHead Engineering. Σε κάθε προσομοίωση φωτιάς οι παράμετροι που μεταβάλλονταν ήταν η κλίση της σήραγγας (0%, $\pm 1\%$ και $\pm 3\%$) και η ταχύτητα του αερισμού στη σήραγγα (0 και 1 m/s). Σε όλες τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε η φωτιά σχεδιασμού που περιγράφεται από τη Διοικητική Αρχή Σηράγγων (ΔΑΣ) με κωδικό αριθμό 7 (βλ. Πίνακας 2-3, ΔΑΣ 2011). Η υπόψη φωτιά σχεδιασμού έχει μέγιστο ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας ίσο με 100 MW και αποτυπώνεται μαθηματικά από την παραβολική τιμή καμπύλη t^2 όπου φτάνει στη μέγιστη τιμή τη χρονική στιγμή των 300 sec και στη συνέχεια παραμένει σταθερά στη μέγιστη τιμή των 100 MW. Οι προσομοιώσεις που αναλύθηκαν στην εργασία έχουν

διάρκεια 1400 sec (χρόνος επαρκής για την μετέπειτα μελέτη της εκκένωσης) και η θέση της φωτιάς επιλέχθηκε στο κέντρο της σήραγγας. Σημειώνεται ότι κατά την ανάλυση της φωτιάς όλων των Σεναρίων αυτό που παρατηρήθηκε είναι ότι επειδή ο καπνός διαχέεται από την πηγή της φωτιάς προς την υπόλοιπη σήραγγα, οι περιβαλλοντικές συνθήκες μεταβάλλονται σταδιακά

5.3.1.1 Επίδραση της κλίσης χωρίς την ύπαρξη αερισμού

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η κλίση διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην κίνηση του καπνού και κατ' επέκταση στην εξέλιξη της φωτιάς. Πιο συγκεκριμένα, λόγω του φαινομένου της καμινάδας, ο καπνός έχει την τάση να διοχετεύεται προς τα ανηφορικά. Αυτό παρατηρείται και για μικρές κλίσεις, όπως ισχύει για την τιμή κλίσης ίση με 1%, ενώ όσο αυξάνεται η κλίση γίνεται πιο έντονη. Πιο συγκεκριμένα, τα σενάρια όπου μελετήθηκε αμιγώς η επιρροή της κλίσης χωρίς την ύπαρξη αερισμού ήταν τα υπ' αριθμόν 2 και 4, με κλίσεις 1% και 3% αντίστοιχα.

Προέκυψε ότι στο Σενάριο 2 ο καπνός διαχύθηκε προς τα ανηφορικά με πιο ομοιόμορφο τρόπο σε όλο το τμήμα της σήραγγας από τη θέση της φωτιάς έως το στόμιο (βλ. Σχήμα 4-3) και η θερμοκρασία δεν ξεπέρασε τους 100°C. Αντίθετα, στο Σενάριο 4 αυτό που σημειώθηκε ήταν η συσσώρευση του καπνού στα πρώτα 100 m από τη φωτιά με θερμοκρασίες πολύ υψηλές άνω των 150°C (βλ. Σχήμα 4-7) και σε σημεία άνω των 200°C, ενώ στο υπόλοιπο τμήμα μέχρι την έξοδο οι θερμοκρασίες διατηρήθηκαν χαμηλές κάτω των 50°C. Αυτό συνέβη επειδή το φαινόμενο της καμινάδας είναι εντονότερο αυξανόμενης της κλίσης, με αποτέλεσμα η κίνηση του καπνού να γίνεται πιο γρήγορα προς τα ανάντη και έτσι να μην εξαπλώνεται ο καπνός ομοιόμορφα σε όλη τη σήραγγα και να παρατηρείται σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας στην εγγύτερη περιοχή της φωτιάς.

Επιπλέον, στο Σενάριο 4, με την εντονότερη κλίση, παρατηρήθηκε μείωση του φαινομένου της αναστροφής του καπνού (back layering), λόγω της αυξημένης δράσης του φαινομένου της καμινάδας.

5.3.1.2 Επιρροή της κλίσης σε συνδυασμό με την ύπαρξη αερισμού

Οι δράσεις της κλίσης και του αερισμού μπορεί να ωθούν και οι δύο τον καπνό προς την ίδια κατεύθυνση ή να είναι αλληλοσυγκρουόμενες.

Συνεργαζόμενες δράσεις αερισμού και κλίσης σήραγγας

Στην περίπτωση που η κλίση και ο αερισμός ωθούν τον καπνό προς την ίδια κατεύθυνση, όπως συνέβη στα Σενάρια υπ' αριθμόν 8 και 10 με κλίσεις 1% και 3% και ομόφορο αερισμό με τιμή 1 m/s (βλ. Σχήμα 4-15 και Σχήμα 4-19), παρατηρήθηκε ότι ο καπνός συσσωρεύτηκε στο πρώτο ήμισυ από τη φωτιά έως το στόμιο με ιδιαίτερα αυξημένες θερμοκρασίες (άνω των 150°C).

Αλληλοσυγκρουόμενες δράσεις αερισμού και κλίσης σήραγγας

Στα Σενάρια υπ' αριθμόν 7 και 9 όπου οι δράσεις της κλίσης και του αερισμού ήταν αντίθετες (βλ. Σχήμα 4-13 και Σχήμα 4-17), παρατηρήθηκε ότι στο Σενάριο 7 με κλίση 1% και αντίθετο αερισμό 1 m/s οι δύο αντικρουόμενες δράσεις είχαν περίπου ίδια επίδραση με αποτέλεσμα ο καπνός να συσσωρευτεί στο κεντρικό τμήμα της σήραγγας εκατέρωθεν της φωτιάς. Στο Σενάριο 9 με κλίση 3% και αντίθετο αερισμό 1 m/s η επιρροή της κλίσης είναι κατά πολύ εντονότερη ωθώντας τον καπνό προς τη μία μεριά με υψηλές θερμοκρασίες (περί τους 150°C).

5.4 Επιρροή της κλίσης της σήραγγας στη διαθέσιμη χρονοκαθυστέρηση εκκίνησης της εκκένωσης

Στο πλαίσιο της παρούσας Εργασίας πραγματοποιήθηκαν 14 προσομοιώσεις εκκένωσης, οι οποίες είχαν τα ανάλογα δεδομένα για την εξέλιξη της φωτιάς από τις αντίστοιχες προσομοιώσεις φωτιάς. Η έξοδος διαφυγής τοποθετήθηκε στα 300 m από τη φωτιά, που είναι και η μέγιστη επιτρεπόμενη απόσταση. Σε κάθε προσομοίωση υπήρχαν 5 κατηγορίες χρηστών ανάλογα με την απόστασή τους από τη φωτιά τη στιγμή που ξέσπασε (10 m, 50 m, 100 m, 150 m και 200 m).

Η μελέτη της εκκένωσης συνδέεται άρρηκτα με την εξέλιξη του φαινομένου της φωτιάς. Έτσι, ανάλογα με την κίνηση του καπνού και την κατανομή της θερμοκρασίας στη σήραγγα, προστίθεται στους χρήστες μία επιβάρυνση λόγω των περιβαλλοντικών συνθηκών, η οποία δυσχεραίνει τη διαδικασία της εκκένωσης. Αυτή η επιβάρυνση ποσοτικοποιείται μέσω της κλασματικής δραστηκής δόσης (FED) που υπολογίζεται ξεχωριστά λόγω της θερμοκρασίας και λόγω της τοξικότητας των αερίων. Από τη διερεύνηση της Εργασίας προέκυψε ότι η επιβάρυνση λόγω της θερμοκρασίας είναι κρισιμότερη παράμετρος σε σχέση με την τοξικότητα. Επιπλέον, έμμεσο ρόλο παρεμπόδισης της διαδικασίας της εκκένωσης παίζει και η ορατότητα, η οποία επιβραδύνει τους χρήστες, με αποτέλεσμα να παραμένουν για περισσότερη ώρα μέσα σε δυσχερείς περιβαλλοντικές συνθήκες.

Μέσα από τις προσομοιώσεις της εκκένωσης η Εργασία υπολογίζει πόσος είναι ο διαθέσιμος χρόνος που έχουν οι χρήστες, προτού ξεκινήσουν να απομακρύνονται. Αυτό έγινε μέσω δοκιμών για διάφορες τιμές χρονοκαθυστέρησης έως ότου ο χρήστης να φτάνει στην έξοδο διαφυγής οριακά, ήτοι η αθροιστική επιβάρυνση λόγω θερμοκρασίας να λάβει την τιμή FED = 0.3.

Η επίδραση της κλίσης της σήραγγας καθορίζει την κίνηση του καπνού η οποία μπορεί να είναι είτε προς την κατεύθυνση που επιχειρούν να κινηθούν οι χρήστες κατά την εκκένωση, είτε προς την αντίθετη κατεύθυνση. Στη δεύτερη περίπτωση όπως είναι προφανές οι χρήστες έχουν υπεραρκετό χρόνο έως ότου ξεκινήσουν να απομακρύνονται.

5.4.1 Επιρροή της κλίσης όταν ο καπνός ωθείται προς την κατεύθυνση κίνησης των χρηστών

Όταν ο καπνός κινείται προς την κατεύθυνση που επιχειρούν να εκκενώσουν και οι χρήστες όπως είναι αναμενόμενο δυσχεραίνεται η διαδικασία της εκκένωσης.

Σενάρια κατά τα οποία η κίνηση του καπνού αφήνει καθαρό διάδρομο διαφυγής

Αυτό που παρατηρήθηκε κατά τη διερεύνηση της Εργασίας είναι ότι στις περιπτώσεις κατά τις οποίες η κίνηση του καπνού ήταν τέτοια ώστε να αφήνει έναν καθαρό διάδρομο μέχρι την έξοδο διαφυγής για αρκετό χρονικό διάστημα από την έναρξη της φωτιάς, τότε οι χρήστες είχαν αρκετό χρόνο μέχρι να ξεκινήσουν να απομακρύνονται. Αυτό συνέβη διότι ο καπνός συσσωρεύτηκε κοντά στη φωτιά και προοδευτικά μετά από αρκετή ώρα εξαπλώθηκε. Το φαινόμενο αυτό παρατηρήθηκε στην περίπτωση του Σεναρίου 4 (βλ. Σχήμα 4-7), κατά το οποίο δεν υπήρχε αερισμός στη σήραγγα και η κλίση ήταν πιο έντονη με τιμή 3%. Συνεπώς, σε αυτό το Σενάριο οι χρήστες είχαν αρκετό χρόνο στη διάθεση τους πριν ξεκινήσουν να απομακρύνονται (άνω των 250 sec).

Στα Σενάρια 13 και 14 (βλ. Σχήμα 4-15 και Σχήμα 4-19) με κλίσεις 1% και 3% αντίστοιχα, παρόλο που λόγω της κλίσης ο καπνός προωθούνταν προς την κατεύθυνση της εξόδου διαφυγής, εντούτοις επειδή ο αερισμός είχε αντίθετη δράση από αυτή της κλίσης τελικά η κίνηση του καπνού ήταν παρόμοια με του Σεναρίου 4. Έτσι, και σε αυτά τα σενάρια οι χρήστες είχαν για αρκετό χρονικό διάστημα καθαρό διάδρομο μέχρι την έξοδο διαφυγής και η διαθέσιμη χρονοκαθυστέρηση που είχαν όλοι οι χρήστες ήταν αρκετά αυξημένη (άνω των 220 sec).

Σενάρια κατά τα οποία η θερμοκρασία είναι σημαντικά αυξημένη για μεγάλο μήκος της σήραγγας

Τα Σενάρια κατά τα οποία η επιρροή της κλίσης της σήραγγας ήταν καθοριστική ώστε να είναι ιδιαίτερα περιορισμένος ο διαθέσιμος χρόνος των χρηστών ήταν το Σενάριο 2 και το Σενάριο 9. Κατά το Σενάριο 2 (βλ. Σχήμα 4-3) με κλίση 1% και χωρίς αερισμό, αυτό που παρατηρήθηκε από την ανάλυση της φωτιάς ήταν η εξάπλωση του καπνού σε όλο το τμήμα της σήραγγας μέχρι την έξοδο διαφυγής, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει καθαρός διάδρομος κίνησης. Ειδικά κοντά στην έξοδο, λόγω του φαινομένου της διαστρωμάτωσης του καπνού οι θερμοκρασίες για μεγάλο μήκος ήταν αρκετά αυξημένες στους 100°C. Αυτή η εκτεταμένη εξάπλωση συνέβη διότι η κλίση ήταν λιγότερο έντονη (σε αντίθεση με το Σενάριο 4 που περιγράφηκε παραπάνω) και αυτό είχε ως αποτέλεσμα την γενικότερη επιβάρυνση των χρηστών λόγω της θερμοκρασίας. Κατά συνέπεια όλοι οι χρήστες είχαν πολύ περιορισμένο χρόνο με την ελάχιστη διαθέσιμη χρονοκαθυστέρηση να μην ξεπερνά τα 40 sec (για τους χρήστες που βρίσκονταν σε απόσταση 10 m από τη φωτιά) και τη μέγιστη χρονοκαθυστέρηση να φτάνει στα 250 sec (για τους χρήστες σε απόσταση 200 m από τη φωτιά)

Στο Σενάριο 9 (βλ. Σχήμα 4-17) με κλίση 3% και αερισμό 1 m/s, οι δράσεις του αερισμού και της κλίσης ωθούσαν και οι δύο τον καπνό προς την έξοδο διαφυγής. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα για μεγάλο μήκος (άνω των 200 m) η θερμοκρασία να είναι ιδιαίτερα αυξημένη (άνω των 150°C). Παρόλα αυτά σε σύγκριση με το Σενάριο 2 οι χρήστες έχουν λίγο περισσότερο διαθέσιμο χρόνο με την ελάχιστη χρονοκαθυστέρηση να αφορά τους χρήστες σε απόσταση 10 m από τη φωτιά και να παίρνει τιμή 85 sec, ενώ η μέγιστη χρονοκαθυστέρηση για τους πιο απομακρυσμένους χρήστες στα 200 m ήταν τουλάχιστον 300 sec.

Επομένως, από τα παραπάνω γίνεται σαφές ότι η κίνηση του καπνού εξαρτάται κατά περίπτωση και διαμορφώνεται βάσει και των δύο συνιστωσών του αερισμού και της κλίσης. Αυτό συνακόλουθα επηρεάζει και την κίνηση των χρηστών.

5.4.2 Σημασία της θέσης των χρηστών κατά την έναρξη της φωτιάς

Κατά τις προσομοιώσεις της εκκένωσης δημιουργήθηκαν 5 κατηγορίες χρηστών ανάλογα με την απόστασή τους από τη φωτιά (10 m, 50 m, 100 m, 150 m και 200 m). Όπως ήταν αναμενόμενο, αυτό που παρατηρείται είναι ότι οι κατηγορίες χρηστών που βρίσκονται πιο κοντά στη φωτιά είναι εκείνες που επηρεάζονται περισσότερο όσον αφορά στη διαθέσιμη χρονοκαθυστέρηση που έχουν προτού ξεκινήσουν. Αυτό φαίνεται ευκρινέστερα στο συγκεντρωτικό γράφημα (βλ. Σχήμα 4-30), όπου αποτυπώνεται η διαθέσιμη χρονοκαθυστέρηση έναρξης εκκένωσης ανά απόσταση από τη φωτιά για κάθε Σενάριο φωτιάς.

Μία βασική παρατήρηση είναι ότι η κλίση όλων των διαγραμμάτων είναι περίπου ίση με τη μονάδα, πράγμα που σημαίνει ότι για κάθε επιπλέον μέτρο που απέχει ένας χρήστης από τη φωτιά κερδίζει ένα επιπλέον δευτερόλεπτο.

Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι ειδικά στα Σενάρια κατά τα οποία η επιρροή της κίνησης του καπνού είναι σημαντική (βλ. Σενάρια 1, 2 και 9 χωρίς αερισμό και κλίσεις 0%, 1% και 3% αντίστοιχα) ο διαθέσιμος χρόνος των χρηστών που είναι εγγύτερα στη φωτιά είναι της τάξης των 40 sec για το Σενάριο 2, διπλασιάζεται στα 85 sec για το Σενάριο 9, ενώ στο βασικό Σενάριο 1 τριπλασιάζεται στα 145 sec.

5.5 Προτάσεις για κατασκευαστικές λύσεις σε σήραγγα

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω συγκριτικά αποτελέσματα, διερευνάται εάν μία σήραγγα είναι προτιμότερο να κατασκευαστεί σκοπίμως με κλίση ή/και με χρήση αερισμού, έτσι ώστε οι χρήστες να έχουν περισσότερο χρόνο στη διάθεσή του για την εκκένωση.

Σήραγγα με κλίση χωρίς αερισμό

Συγκρίνοντας τα Σενάρια 1, 2 και 4 (χωρίς αερισμό και με κλίση σήραγγας 0%, 1% και 3% αντίστοιχα), προκύπτει ότι είναι προτιμότερο η σήραγγα να έχει κλίση τουλάχιστον 3%. Λόγω του φαινομένου της καμινάδας ο καπνός κινείται προς την ανηφορική κατεύθυνση, η οποία επί τω δυσμενέστερω στα εν λόγω Σενάρια συμπίπτει με αυτή της κίνησης των χρηστών προς την

έξοδο διαφυγής. Αυτό που παρατηρείται είναι ότι όταν η κλίση είναι πιο ήπια με τιμή 1% ο καπνός εξαπλώνεται σε μεγαλύτερο τμήμα της σήραγγας δυσχεραίνοντας την απομάκρυνση των χρηστών. Αντίθετα, με αύξηση της κλίσης στο 3% το φαινόμενο της καμινάδας είναι πιο έντονο, ο καπνός κινείται πιο γρήγορα προς τα ανάντη και δεν προλαβαίνει να μείνει στάσιμος για μεγάλη έκταση. Επομένως, συγκρίνοντας αυτά τα τρία Σενάρια, η έντονη κλίση είναι προτιμότερη από τη μηδενική κλίση, ενώ η ήπια κλίση είναι δυσμενέστερη από τη μηδενική κλίση και θα πρέπει να αποφεύγεται.

Σημειώνεται ότι στην περίπτωση κατά την οποία οι χρήστες επιχειρούν να κινηθούν προς την αντίθετη κατεύθυνση σε σχέση με τον καπνό (βλ. Σενάρια 3 και 5 χωρίς αερισμό και με αντίθετη κλίση 1% και 3 % αντίστοιχα) είναι σαφέστατα ευνοϊκότερη η επιρροή της κλίσης.

Σήραγγα με κλίση και αερισμό

Τα Σενάρια κατά τα οποία η διαθέσιμη χρονοκαθυστέρηση εκκίνησης των χρηστών επηρεάστηκε ήταν το Σενάριο 9 (με κλίση 3% και αερισμό 1 m/s αντίθετο από προς τη δράση του φαινομένου της καμινάδας) και στα Σενάρια 13 και 14 (με κλίσεις 1 % και 3 % αντίστοιχα και αερισμό 1 m/s με δράση ομόφορη με αυτή του φαινομένου της καμινάδας).

Αυτό που παρατηρήθηκε είναι ότι στην περίπτωση αλληλοσυγκρουόμενης δράσης αερισμού και φαινομένου καμινάδας (κατά το Σενάριο 9) ο καπνός εξαπλώνεται σε μεγαλύτερο τμήμα της σήραγγας προς τη μεριά που τον ωθεί το φαινόμενο της καμινάδας, με αποτέλεσμα οι χρήστες να έχουν ιδιαίτερα περιορισμένο χρόνο πριν ξεκινήσουν να απομακρύνονται (85 sec για αυτούς που βρίσκονται σε απόσταση 10 m από τη φωτιά). Σε αυτή την περίπτωση είναι προτιμότερο να μην υπάρχει ούτε κλίση ούτε αερισμός στη σήραγγα (συγκρίνοντας με το Σενάριο 1).

Κατά τα Σενάρια 7 και 8 όπου η κλίση είχε την τιμή 1% και ο αερισμός είχε αντίθετη δράση με τιμή 1 m/s αυτό που παρατηρήθηκε είναι ότι οι χρήστες είχαν αρκετό διαθέσιμο χρόνο στη διάθεσή τους (άνω των 300 sec), ανεξάρτητα προς τα ποια κατεύθυνση θα επιχειρούσαν να κινηθούν.

Στην περίπτωση ομόφορης δράσης της κλίσης και του αερισμού (βλ. Σενάρια 13 και 14) ο καπνός κινείται πιο γρήγορα και δεν παραμένει στάσιμος σε μεγάλη έκταση. Στην περίπτωση αυτή οι χρήστες έχουν ιδιαίτερα αυξημένη διαθέσιμη χρονοκαθυστέρηση εκκίνησης (άνω των 230 sec ακόμη και για τους πιο κοντινούς χρήστες στη φωτιά). Ωστόσο, συγκρίνοντας τα Σενάρια αυτά με το Σενάριο 4 (κλίση 3%, χωρίς αερισμό), τα αποτελέσματα είναι περίπου τα ίδια, με το Σενάριο 4 να υπερτερεί για πολύ λίγο.

Συνεπώς, είναι προτιμότερη η κατασκευή σήραγγας με έντονη κλίση χωρίς αερισμό σε σχέση με τη συνδυαστική δράση της κλίσης και του αερισμού. Ωστόσο, ακόμη πιο αποδοτική είναι η επιλογή κατασκευής σήραγγας ήπιας κλίσης και ήπιου αερισμού, ο οποίος να δρα αντίθετα σε σχέση με το φαινόμενο της καμινάδας.

Σήραγγα χωρίς κλίση με αερισμό

Με βάση το Σενάριο 6 κατά το οποίο μελετήθηκε σήραγγα χωρίς κλίση και με αερισμό 1 m/s, προέκυψε ότι οι χρήστες είχαν στη διάθεσή τους υπεραρκετό χρόνο πριν ξεκινήσουν να απομακρύνονται (άνω των 300 sec). Επομένως, η λύση σήραγγας χωρίς κλίση αλλά με ήπιο αερισμό είναι η πιο αποδοτική όλων.

Λύσεις που προκρίνονται

Κατόπιν της εξέτασης των διαφόρων Σεναρίων, η Μελέτη καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η καλύτερη κατασκευαστική προσέγγιση αφορά σε σήραγγα χωρίς κλίση και με χαμηλό αερισμό στο 1 m/s. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, τα άτομα έχουν ένα σημαντικό χρονικό διάστημα πριν χρειαστεί να ξεκινήσουν την εκκένωση, το οποίο υπερβαίνει τα 300 sec. Ακόμη και σε περιπτώσεις όπου είναι απαραίτητη μια μικρή κλίση έως και 1%, η ύπαρξη αερισμού στο 1 m/s εξακολουθεί να παρέχει στους χρήστες τουλάχιστον 225 sec πριν χρειαστεί να απομακρυνθούν. Ωστόσο, εάν η κλίση της σήραγγας πρέπει να είναι πιο απότομη στο 3%, κρίνεται προτιμότερο να μην υπάρχει αερισμός. Σε αυτή την περίπτωση οι χρήστες εξακολουθούν να έχουν διαθέσιμο ένα σημαντικό διάστημα τουλάχιστον 255 δευτερολέπτων πριν από την έναρξη των διαδικασιών εκκένωσης.

5.6 Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση

5.6.1 Επιπρόσθετες αναλύσεις

Στην παρούσα Εργασία πραγματοποιήθηκαν 10 προσομοιώσεις φωτιάς και 14 προσομοιώσεις εκκένωσης. Συνολικά εξετάστηκαν 14 Σενάρια φωτιάς στα οποία οι χρήστες έπρεπε να εκκενώσουν. Στις αναλύσεις της φωτιάς μεταβλήθηκαν δύο παράμετροι η κλίση της σήραγγας και ο αερισμός. Στις αναλύσεις της εκκένωσης μεταβλήθηκαν επίσης δύο παράμετροι η απόσταση από τη θέση της φωτιάς τη στιγμή που ξέσπασε η πυρκαγιά και η χρονοκαθυστερήση πριν την έναρξη της εκκένωσης. Σημειώνεται ωστόσο ότι οι αναλύσεις της Εργασίας ήταν περιορισμένες σε αριθμό, διότι με την προσθήκη νέων παραμέτρων ή με την εξέταση περισσότερων τιμών σε μία παράμετρο θα πολλαπλασιάζοταν γεωμετρικά ο αριθμός των εξεταζόμενων σεναρίων φωτιάς. Επομένως, μέσα από την Εργασία παρουσιάζεται η μεθοδολογία προσέγγισης του θέματος και προτείνεται περαιτέρω διερεύνηση με επιπρόσθετες αναλύσεις.

5.6.1.1 Επιπρόσθετες κλίσεις σήραγγας

Οι τιμές κλίσης της σήραγγας που εξετάστηκαν στην υπόψη εργασία είναι οι εξής: 0%, $\pm 1\%$ και $\pm 3\%$. Οι τιμές αυτές επιλέχθηκαν ως οι πιο συνήθεις. Ωστόσο, θα μπορούσαν να διερευνηθούν επιπλέον τιμές για την κλίση $\pm 2\%$ και $\pm 4\%$, με στόχο να καλυφθεί το μεγαλύτερο φάσμα των περιπτώσεων που μπορεί να συναντηθούν στην πράξη.

5.6.1.2 Επιπρόσθετες τιμές αερισμού

Οι τιμές για τον αερισμό που εξετάστηκαν είναι 0 και ± 1 m/s. Οι τιμές αυτές θεωρούνται οι συνηθέστερες. Ωστόσο, θα μπορούσαν να μελετηθούν και περιπτώσεις αερισμού ± 2 και ± 3 m/s, οι οποίες επίσης είναι πιθανόν να συναντηθούν σε μία σήραγγα.

5.6.1.3 Επιπρόσθετες διατομές σήραγγας

Στην υπόψη Εργασία εξετάστηκε μία διατομή για τη σήραγγα με πλάτος 11 m και ύψος 8 m (βλ. Σχήμα 3-1). Η διαστάσεις αυτές είναι τυπικές για λωρίδα μονής κατεύθυνσης. Ωστόσο, για λόγους σύγκρισης θα μπορούσε να εξεταστεί και σήραγγα μεγαλύτερης διατομής με πλάτος 12 m και ύψος 10 m.

5.6.2 Παράμετροι προς πρόσθετη εξέταση

5.6.2.1 Αερισμός στη σήραγγα

Στην παρούσα Εργασία οι συνθήκες αερισμού στη σήραγγα λαμβάνονται σταθερές σε κάθε σενάριο. Αυτό καθορίστηκε γενικευμένα μέσω της αντίστοιχης εντολής του λογισμικού Pyrosim για τις συνθήκες περιβάλλοντος του μοντέλου. Διαφορετικά, η προσομοίωση του αερισμού μπορεί να γίνει πιο ρεαλιστικά με χρήση κατάλληλης διάταξης ανεμιστήρων.

Επίσης, όπως προέκυψε, ανάλογα με την κίνηση του καπνού οι ανεμιστήρες μπορούν να είναι τέτοιοι ώστε να τον προωθούν προς την κατάλληλη κατεύθυνση για να διευκολύνουν την διαδικασία της εκκένωσης. Αυτό όμως συνεπάγεται την εισαγωγή επιπλέον μεταβλητών στο υπό μελέτη φαινόμενο.

Γενικότερα ο μηχανικός αερισμός εμπεριέχει πολλές συνιστώσες το οποίο σημαίνει ότι θα χρειαστούν περισσότερα σενάρια για κάθε συνδυασμό αυτών. Μερικές σημαντικές συνιστώσες είναι το είδος του ανεμιστήρα (φυσητικός ή μωζητικός), η παροχή και η ισχύς του, η θέση και το μέγεθός του καθώς και ο χρόνος που χρειάζεται από την ενεργοποίησή του έως να φτάσει στα απαιτούμενα επίπεδα απόδοσης. Επομένως, η χρήση ανεμιστήρων αυτούσια μία ξεχωριστή μελέτη.

5.6.2.2 Υλικό καύσης

Στην υπόψη εργασία το υλικό που χρησιμοποιήθηκε κατά τις αναλύσεις ως καύσιμη ύλη ήταν το προτυποποιημένο υλικό πολουρεθάνης που προβλέπεται από τον κανονισμό SFPE και εισήχθη από τη βιβλιοθήκη του λογισμικού Pyrosim (SFPE POLYURETHANE_GM27). Θα μπορούσαν να μελετηθούν περισσότερα εύφλεκτα υλικά, τα οποία απαντώνται στα συνήθη οχήματα (όπως για παράδειγμα στα ελαστικά). Επιπλέον, θα μπορούσε να εξεταστεί η

περίπτωση εμπλοκής οχήματος που μεταφέρει επικίνδυνα και εύφλεκτα φορτία (όπως ένα βυτιοφόρο).

5.6.2.3 Χρήστες

Οι χρήστες της σήραγγας έχουν την τυπική συμπεριφορά που προτείνεται αυτόματα από το λογισμικό Pathfinder. Αυτό σημαίνει ότι γνωρίζουν a priori προς τα που είναι η έξοδος διαφυγής και σπεύδουν προς τα εκεί. Ωστόσο, σε κάποιο αληθινό περιστατικό ένα ποσοστό των χρηστών αφενός μεν μπορεί να ακολουθήσει λάθος κατεύθυνση και να χρειαστεί να ξαναγυρίσει πίσω και αφετέρου μπορεί να υπόκειται σε κινητικούς περιορισμούς πράγμα που δεν εξετάστηκε στην παρούσα Εργασία. Αυτό θα μπορούσε να μελετηθεί πειραματικά μέσω συνθηκών εικονικής πραγματικότητας.

6. Βιβλιογραφία -Πηγές

6.1 Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

Arthur H., Dominguez G.,2015. Tenability criteria in unique situations and atypical buildings.

CFPA, 2009. CFPA-E No 19:2009, Fire safety engineering concerning evacuation from buildings

Cheong M. K., 2008. Design Fires for Vehicles in Road Tunnels

Ingason H., Zhen Li Y., Lönnemark A., 2015. Tunnel Fire Dynamics

Ingason H., 2008. Design firecurvesfortunnels

NFPA 502, 2011. NFPA 502 , Standard for Road Tunnels, Bridges and Other Limited Access Highways.

NFPA, 2014. NFPA 130, Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems.

Nilsson D.,Fridolf K., 2020. A questionnaire study about fire safety in underground rail transportation systems

Papakonstantinou D.,et al., 2016. Analysis of the crowd evacuation modeling approaches for the case of urban underground spaces

PIARC., 2004. Fire And Smoke Control In Road Tunnels.

Poh W., 2011. Tenability criteria for desing of smoke hazard management systems.

SFPE, 2016. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 5th Edition. Society of Fire Protection Engineers. 7315 Wisconsin Avenue, Suite 620E Bethesda Maryland USA 1-301-718-2910.

World Health Organization (WHO), 2023. Global status report on road safety 2023

6.2 Ελληνική Βιβλιογραφία

- Διοικητική Αρχή Σηράγγων, 2011. Οδηγίες για την εκπόνηση ανάλυσης επικινδυνότητας χωρίς εμπλοκή οχημάτων που μεταφέρουν επικίνδυνα εμπορεύματα μέσα από οδικές σήραγγες που εμπίπτουν στο πεδίο εφαρμογής του Π.Δ. 230/07 (σεναριακή προσέγγιση). Αθήνα.
- Καλλιανιώτης Α. (2015). Βελτιστοποίηση συνθηκών εκκένωσης υπογείων χώρων: αξιολόγηση και βελτιστοποίηση θέσεων εξόδων διαφυγής. Αθήνα.
- Καραμαλέγκου Σ., 2023. Προσομοίωση και ανάλυση οδικής σήραγγας κατά τη διάρκεια πυρκαγιάς για τον προσδιορισμό των ορίων βιωσιμότητας και των πιθανών θέσεων των οδεύσεων διαφυγής, ΔΠΜΣ Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων ΕΜΠ
- Μενεγάκη Μ., 2022. Σχέδια ασφάλειας και εκκένωσης, ιδιαιτερότητες υπογείων χώρων, Σημειώσεις Μαθήματος Διαχείριση Κινδύνου σε Θέματα Ασφάλειας και Υγείας Υπογείων Έργων, ΔΠΜΣ Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων ΕΜΠ
- Οδηγία 2004/54/ΕΚ. (2004). Οδηγία 2004/54/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου. Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης.
- Πρόταση Οδηγίας του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου, 2001. Πρόταση οδηγίας του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου σχετικά με τις ελάχιστες απαιτήσεις για τις σήραγγες του Διευρωπαϊκού Οδικού Δικτύου.
- Φίλιου Γ., 2017. Προσομοίωση Εκκένωσης Χρηστών Οδικής Σήραγγας σε Περίπτωση Ατυχήματος με ύπαρξη Πυρκαγιάς, Χωρίς Εμπλοκή Οχημάτων που μεταφέρουν Επικίνδυνα Εμπορεύματα, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ

6.3 Ηλεκτρονική Βιβλιογραφία

- ThunderHead Engineering, 2023. Pathfinder User Manual Version: 2023-3
https://files.thunderheadeng.com/support/documents/pathfinder-user-manual-2023-3.pdf?_gl=1*th2cmi*_ga*MjAyMDU3MTQ2MC4xNjgwMDMzNTUy*_ga_RZ4CWRR0SF*MTcxMjMwMjQ1NS4xMjY4xLjE3MTIzMDI0NzYuMC4wLjA, (ανάκτηση στις 05-04-2024)
- ThunderHead Engineering, 2023. Pyrosim User Manual Version: 2023-3
https://files.thunderheadeng.com/support/documents/pyrosim-user-manual-2023-3.pdf?_gl=1*qi8ah*_ga*MjAyMDU3MTQ2MC4xNjgwMDMzNTUy*_ga_RZ4CWRR0SF*MTcxMjMwMjQ1NS4xMjY4xLjE3MTIzMDI0NjluMC4wLjA, (ανάκτηση στις 05-04-2024)

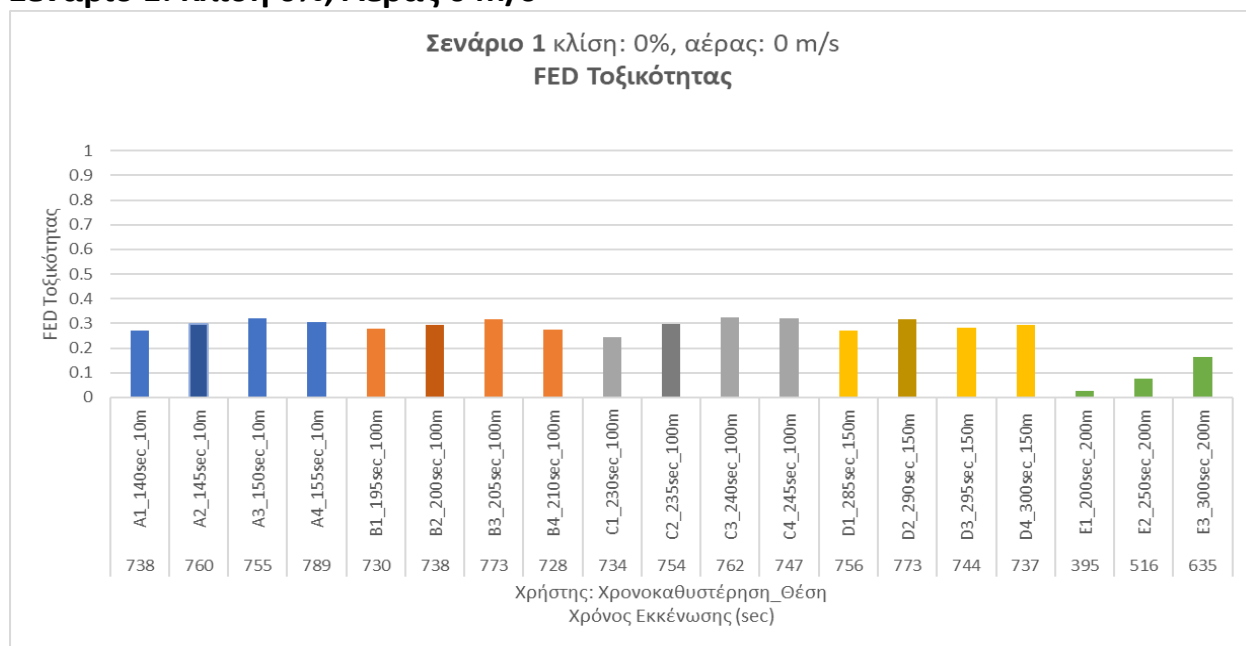
6.4 Λογισμικά Η/Υ

- ThunderHead Engineering, Pathfinder Revision 2023.3.1206
ThunderHead Engineering, Pyrosim Revision 2023.3.1312

Παράρτημα

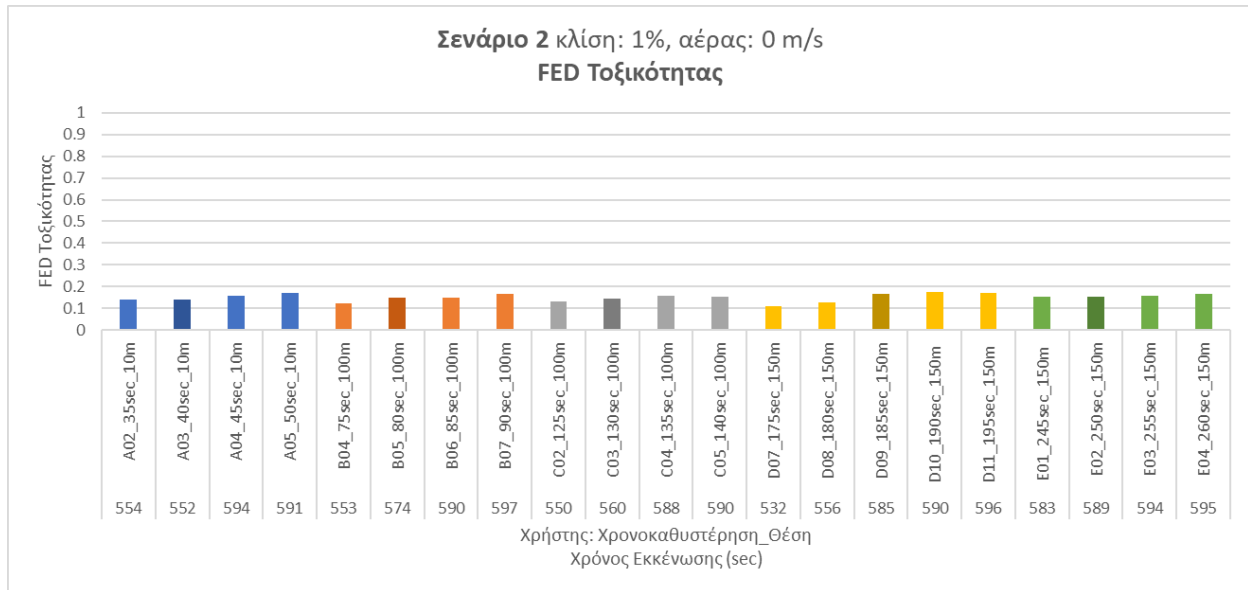
Παράρτημα Α: Διαγράμματα κατανομής της αθροιστικής επιβάρυνσης FED (λόγω τοξικότητας) των χρηστών ανά θέση και ανά χρονοκαθυστέρηση εκκίνησης

Σενάριο 1: Κλίση 0%, Αέρας 0 m/s



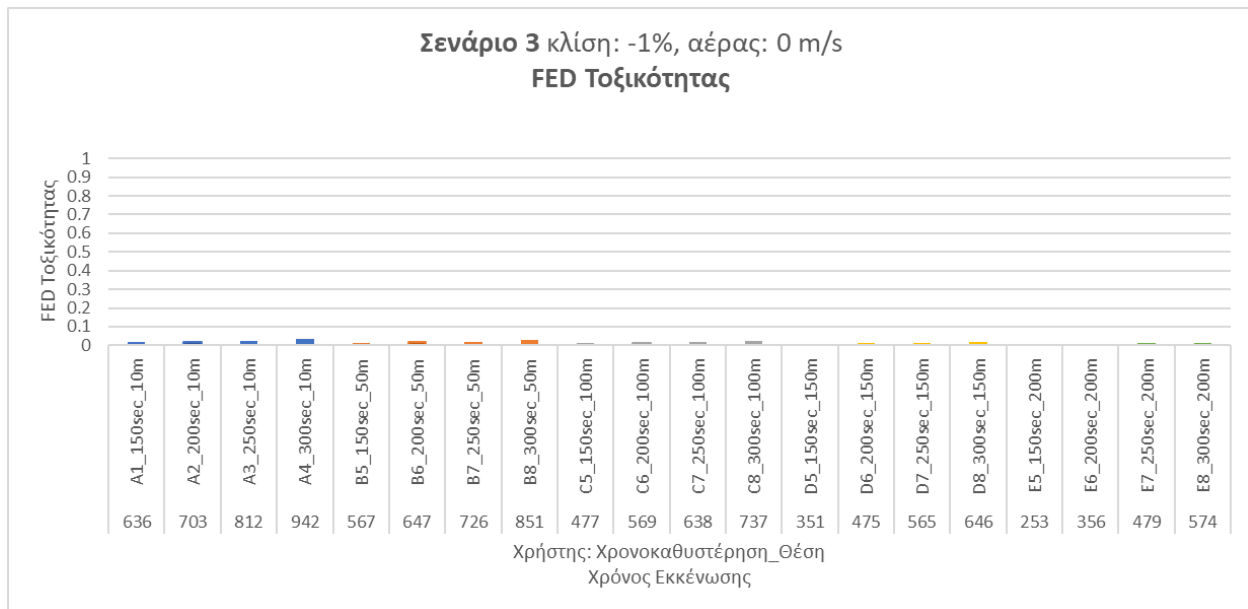
Σχήμα Π - 1: <Σενάριο 1> Κατανομή της αθροιστικής επιβάρυνσης FED (λόγω τοξικότητας) των χρηστών ανά θέση και ανά χρονοκαθυστέρηση εκκίνησης

Σενάριο 2: Κλίση 1%, Αέρας 0 m/s



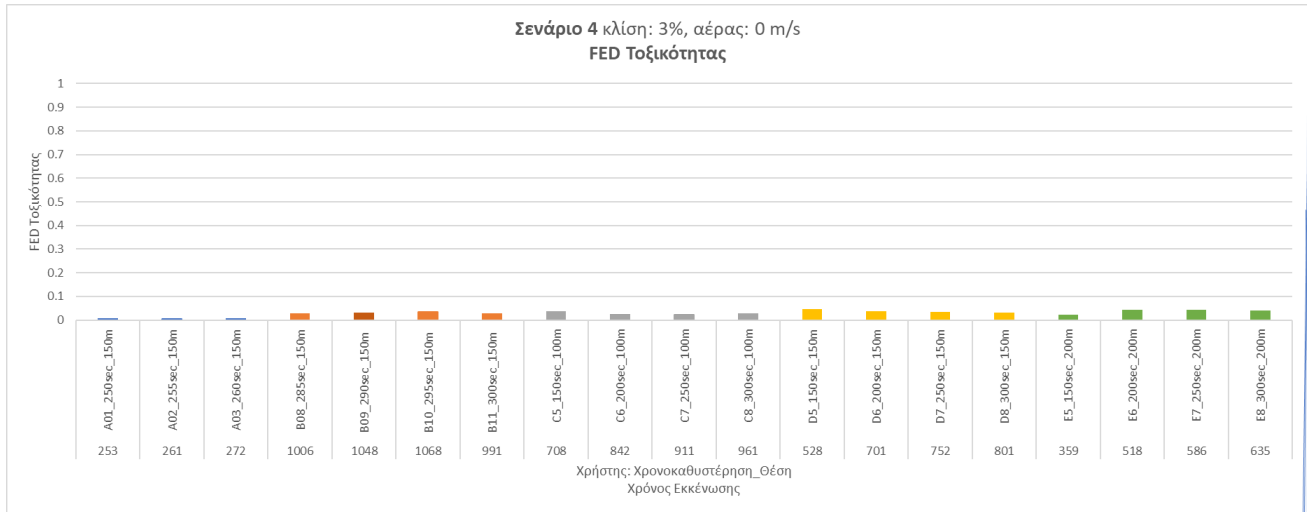
Σχήμα Π - 2: <Σενάριο 2> Κατανομή της αθροιστικής επιβάρυνσης FED (λόγω τοξικότητας) των χρηστών ανά θέση και ανά χρονοκαθυστερήση εκκίνησης

Σενάριο 3: Κλίση -1%, Αέρας 0 m/s



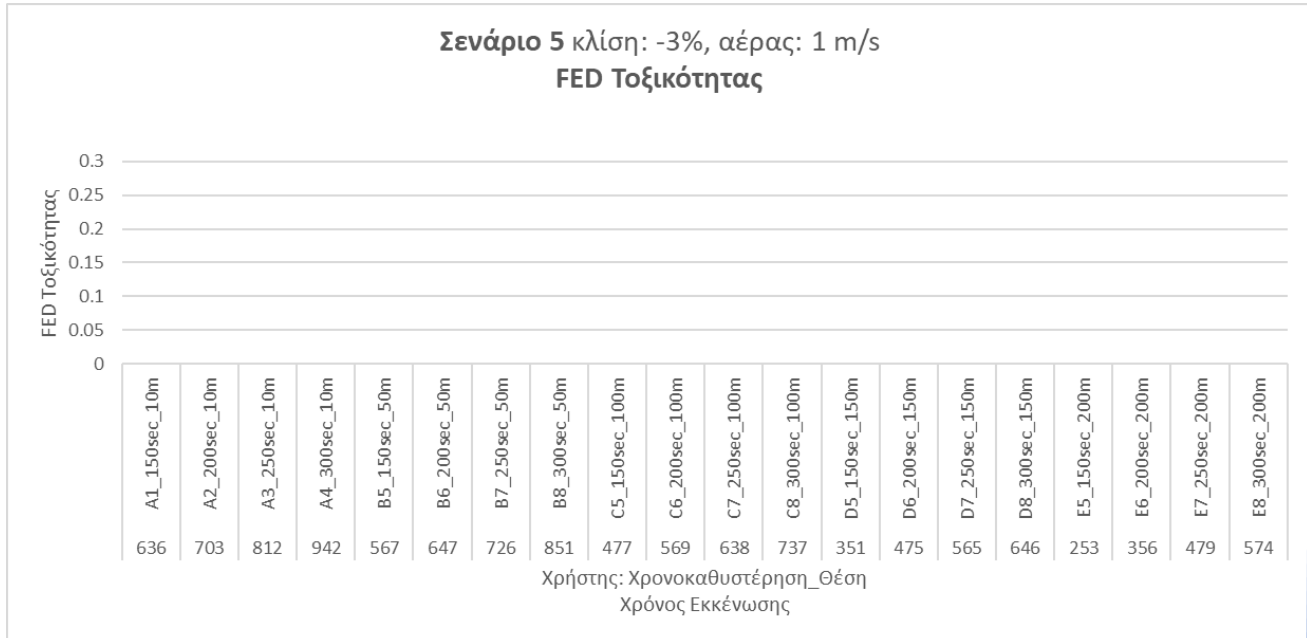
Σχήμα Π - 3: <Σενάριο 3> Κατανομή της αθροιστικής επιβάρυνσης FED (λόγω τοξικότητας) των χρηστών ανά θέση και ανά χρονοκαθυστερήση εκκίνησης

Σενάριο 4: Κλίση 3%, Αέρας 0 m/s



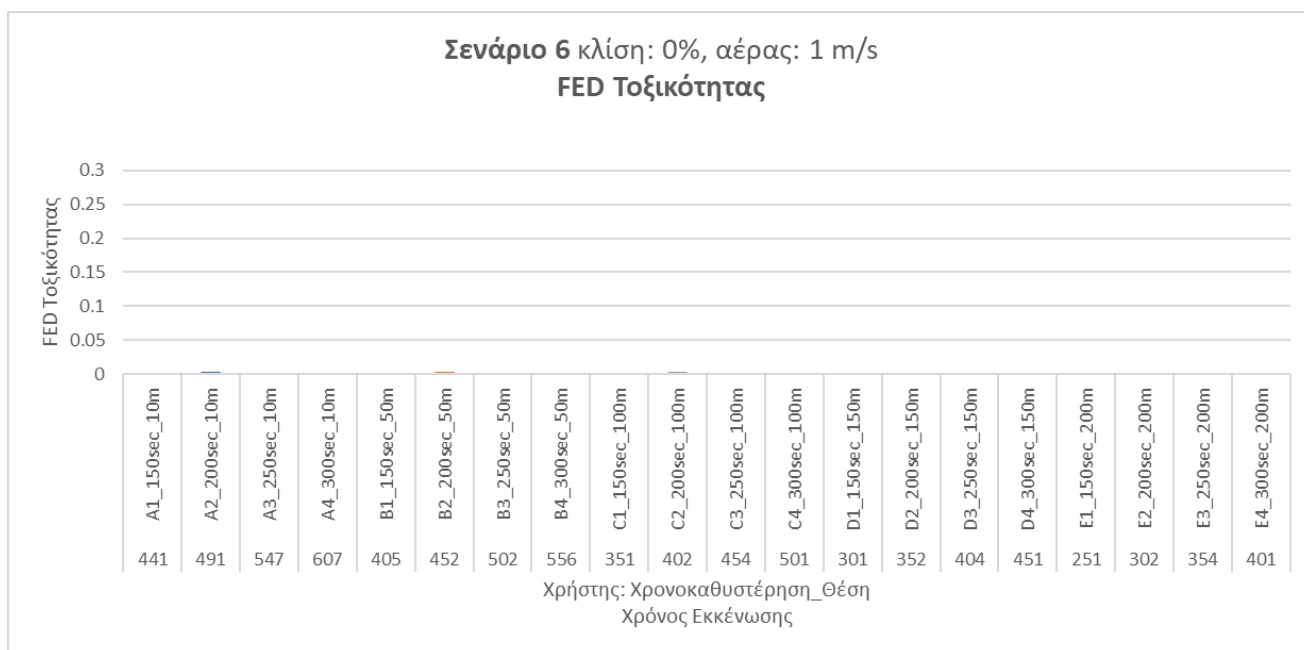
Σχήμα Π - 4: <Σενάριο 4> Κατανομή της αθροιστικής επιβάρυνσης FED (λόγω τοξικότητας) των χρηστών ανά θέση και ανά χρονοκαθυστερήση εκκίνησης

Σενάριο 5: Κλίση -3%, Αέρας 0 m/s



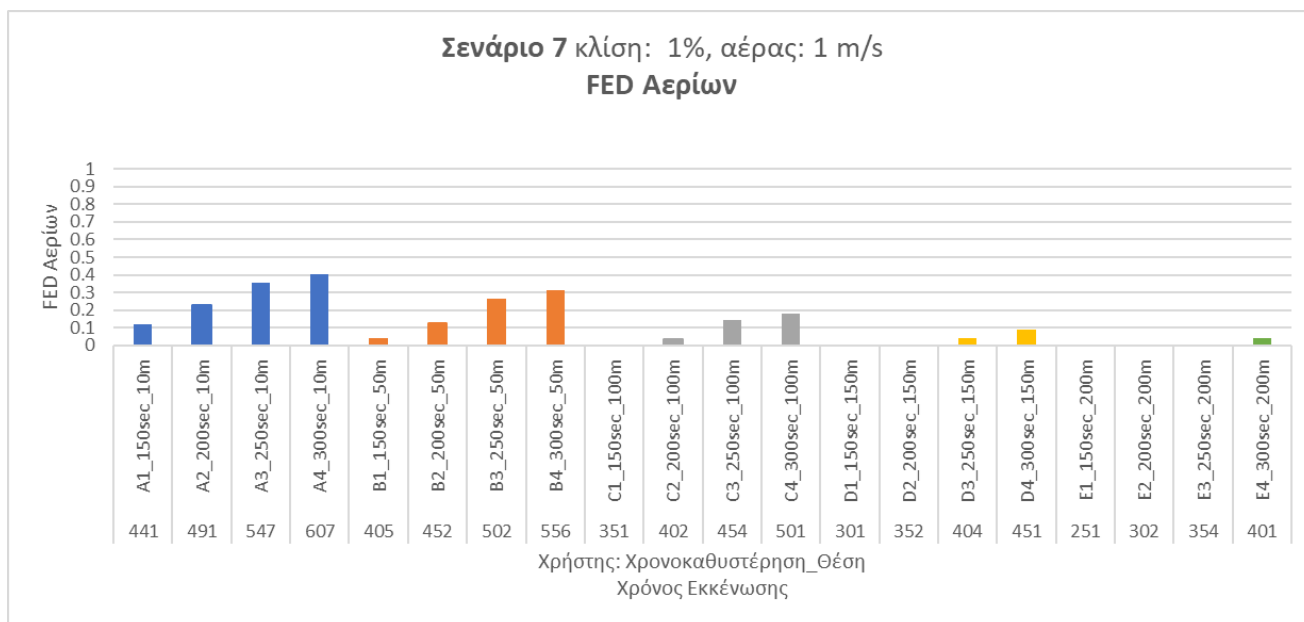
Σχήμα Π - 5: <Σενάριο 5> Κατανομή της αθροιστικής επιβάρυνσης FED (λόγω τοξικότητας) των χρηστών ανά θέση και ανά χρονοκαθυστερήση εκκίνησης

Σενάριο 6: Κλίση 0%, Αέρας 1 m/s



Σχήμα Π - 6: <Σενάριο 6> Κατανομή της αθροιστικής επιβάρυνσης FED (λόγω τοξικότητας) των χρηστών ανά θέση και ανά χρονοκαθυστερήση εκκίνησης

Σενάριο 7: Κλίση 1%, Αέρας 1 m/s



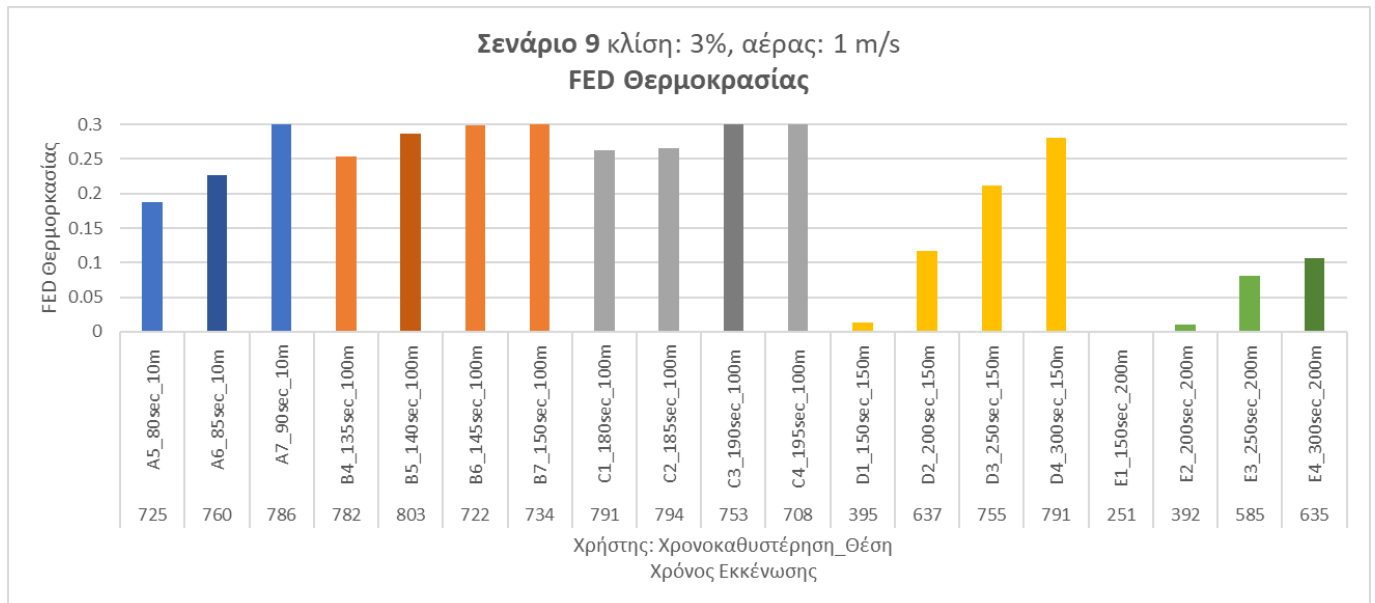
Σχήμα Π - 7: <Σενάριο 7> Κατανομή της αθροιστικής επιβάρυνσης FED (λόγω τοξικότητας) των χρηστών ανά θέση και ανά χρονοκαθυστερήση εκκίνησης

Σενάριο 8: Κλίση -1%, Αέρας 1 m/s



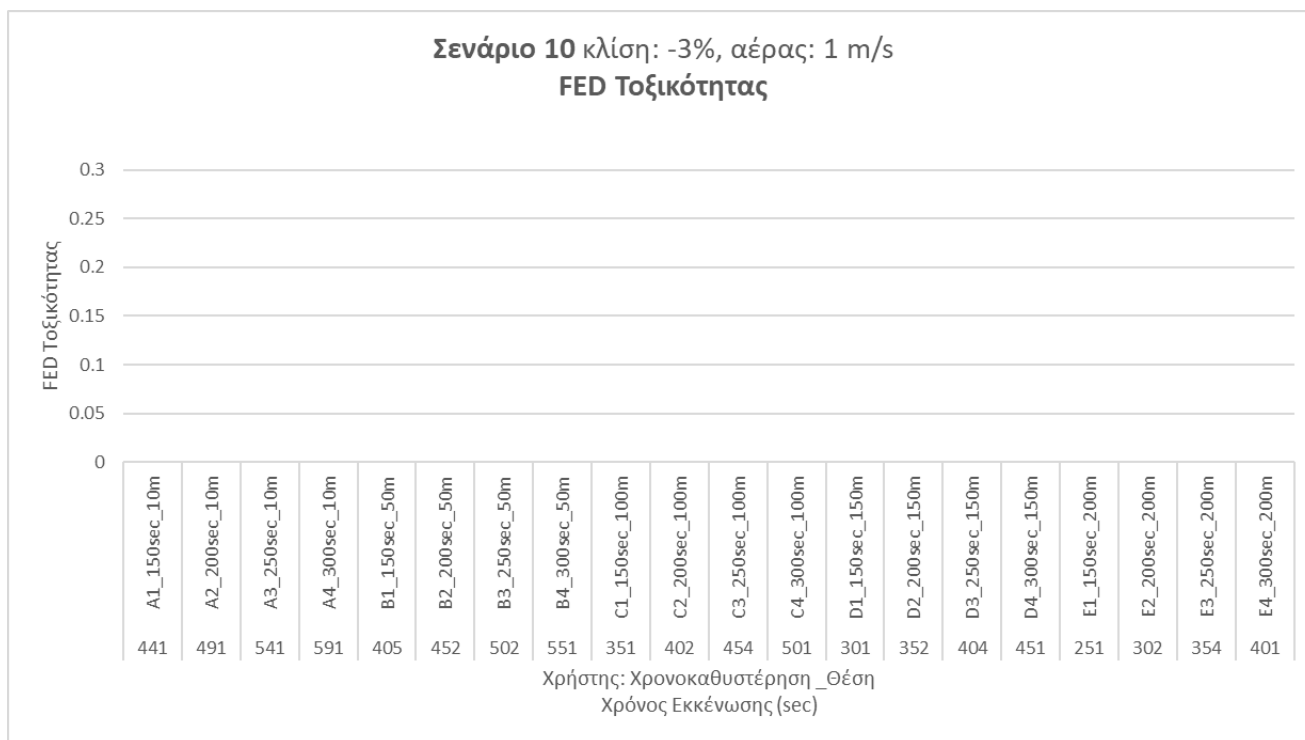
Σχήμα Π - 8: <Σενάριο 8> Κατανομή της αθροιστικής επιβάρυνσης FED (λόγω τοξικότητας) των χρηστών ανά θέση και ανά χρονοκαθυστερήση εκκίνησης

Σενάριο 9: Κλίση 3%, Αέρας 1 m/s



Σχήμα Π - 9: <Σενάριο 9> Κατανομή της αθροιστικής επιβάρυνσης FED (λόγω τοξικότητας) των χρηστών ανά θέση και ανά χρονοκαθυστερήση εκκίνησης

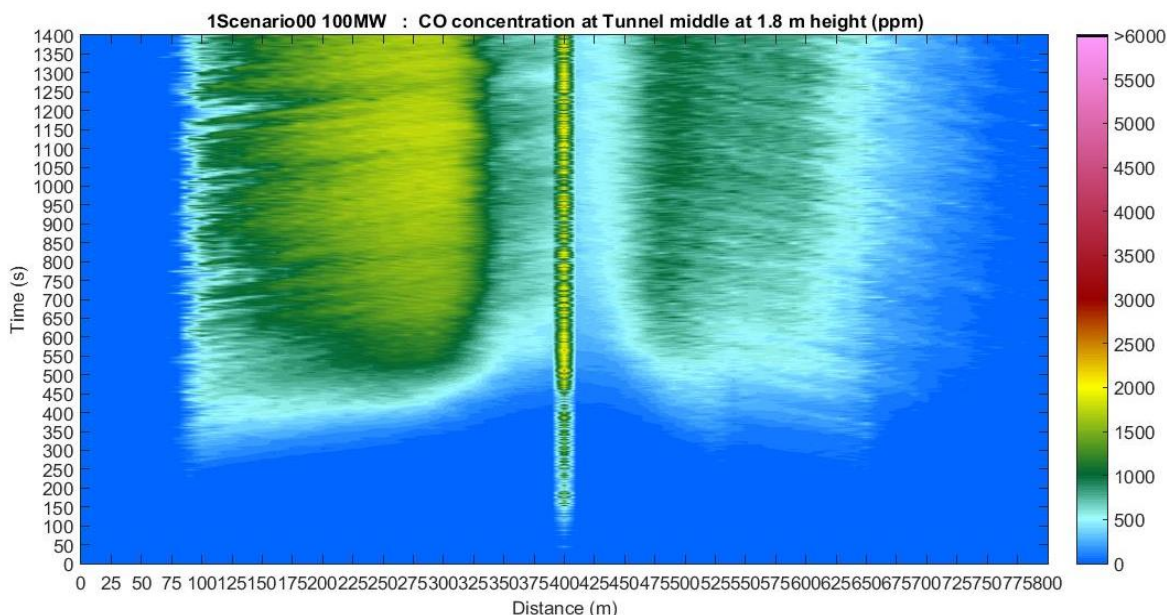
Σενάριο 10: Κλίση -3%, Αέρας 1 m/s



Σχήμα Π - 10: <Σενάριο 10> Κατανομή της αθροιστικής επιβάρυνσης FED (λόγω τοξικότητας) των χρηστών ανά θέση και ανά χρονοκαθυστέρηση εκκίνησης

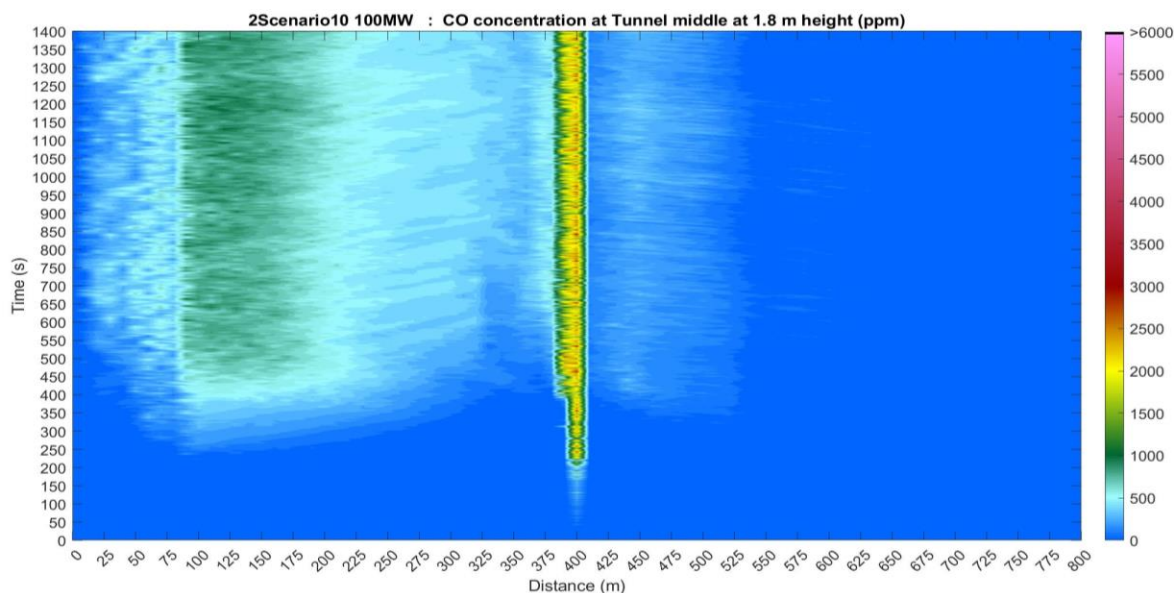
Παράρτημα Β: Διαγράμματα κατανομής συγκέντρωσης CO για κάθε Σενάριο φωτιάς

Σενάριο 1: Κλίση 0%, Αέρας 0 m/s



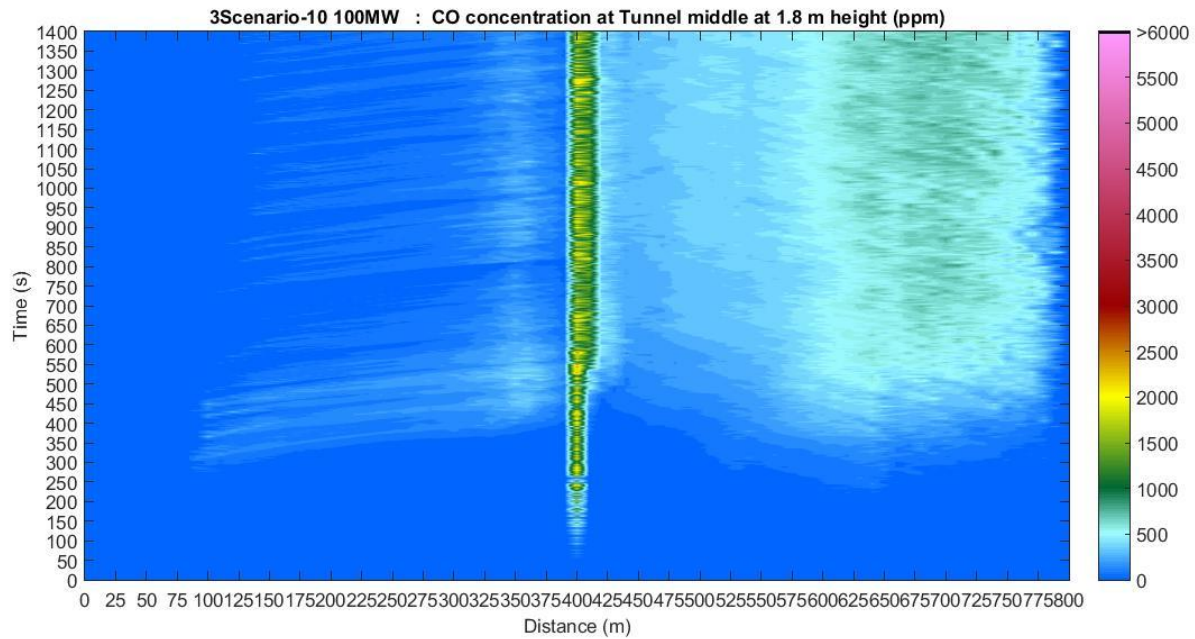
Σχήμα Π - 11: <Σενάριο1> Κατανομή της συγκέντρωσης CO στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8$ m

Σενάριο 2: Κλίση 1%, Αέρας 0 m/s



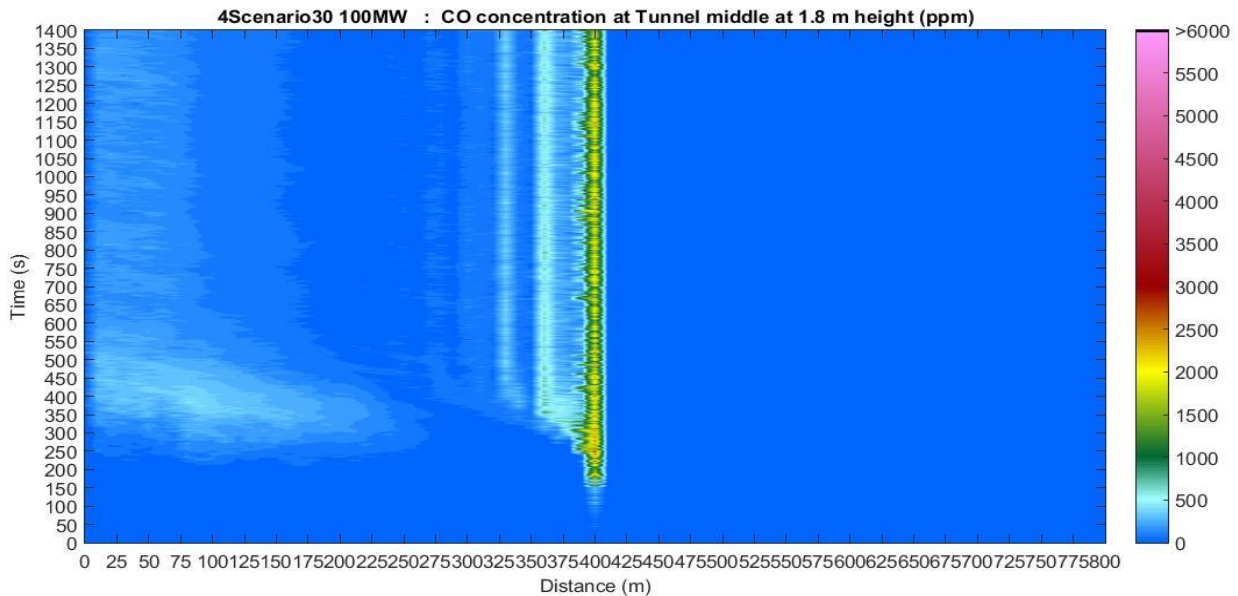
Σχήμα Π - 12: <Σενάριο 2> Κατανομή της συγκέντρωσης CO στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8$ m

Σενάριο 3: Κλίση -1%, Αέρας 0 m/s



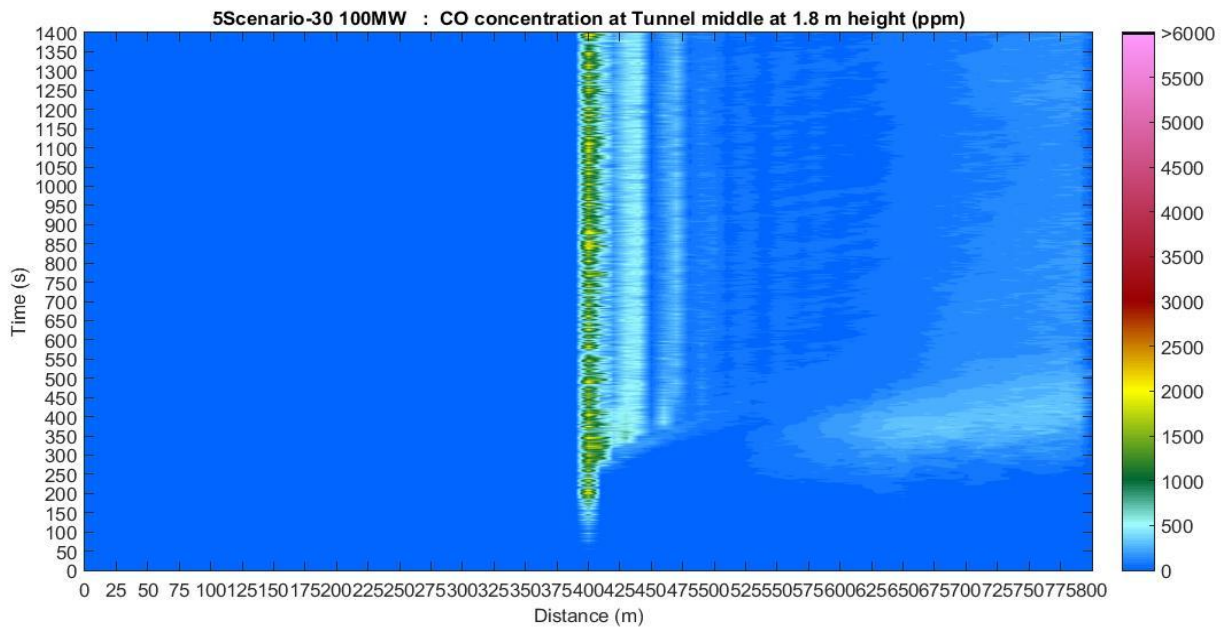
Σχήμα Π - 13: <Σενάριο 3> Κατανομή της συγκέντρωσης CO στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8$ m

Σενάριο 4: Κλίση 3%, Αέρας 0 m/s



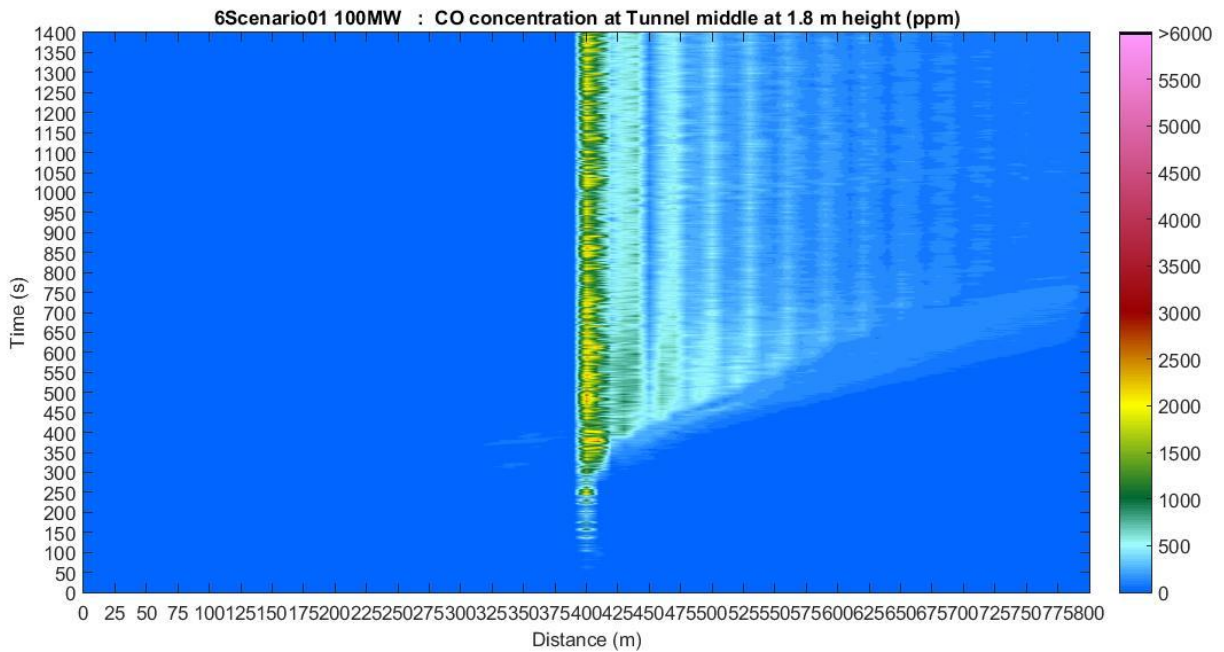
Σχήμα Π - 14: <Σενάριο 4> Κατανομή της συγκέντρωσης CO στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8$ m

Σενάριο 5: Κλίση -3%, Αέρας 0 m/s



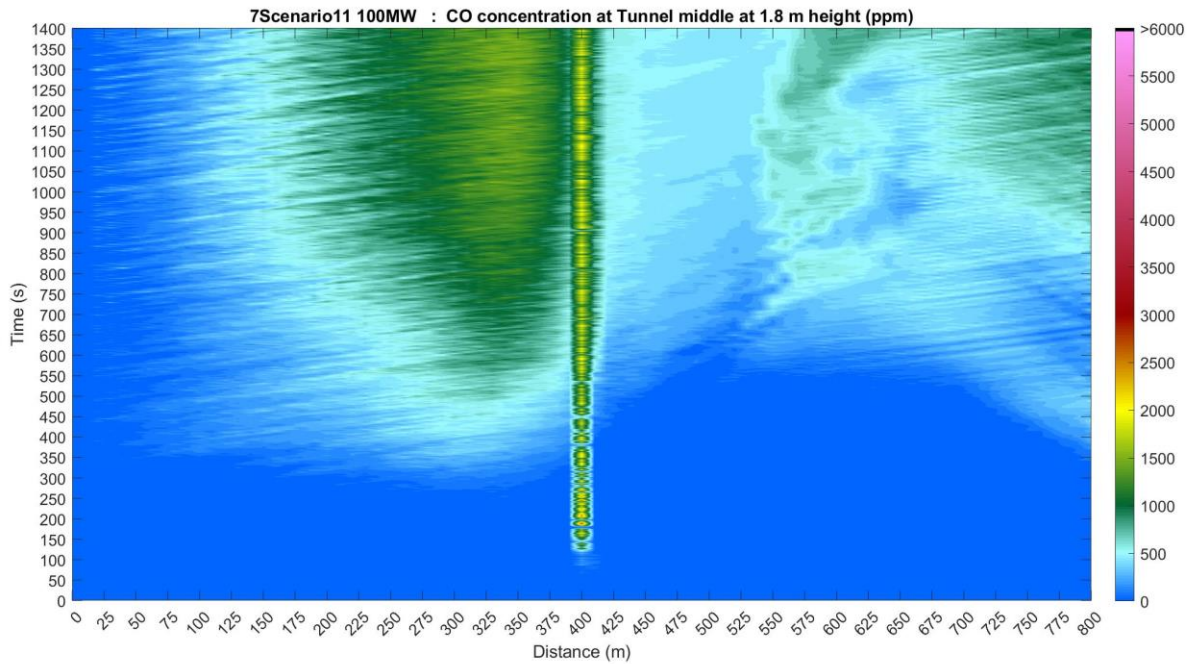
Σχήμα Π - 15: <Σενάριο 5> Κατανομή της συγκέντρωσης CO στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8$ m

Σενάριο 6: Κλίση 0%, Αέρας 1 m/s



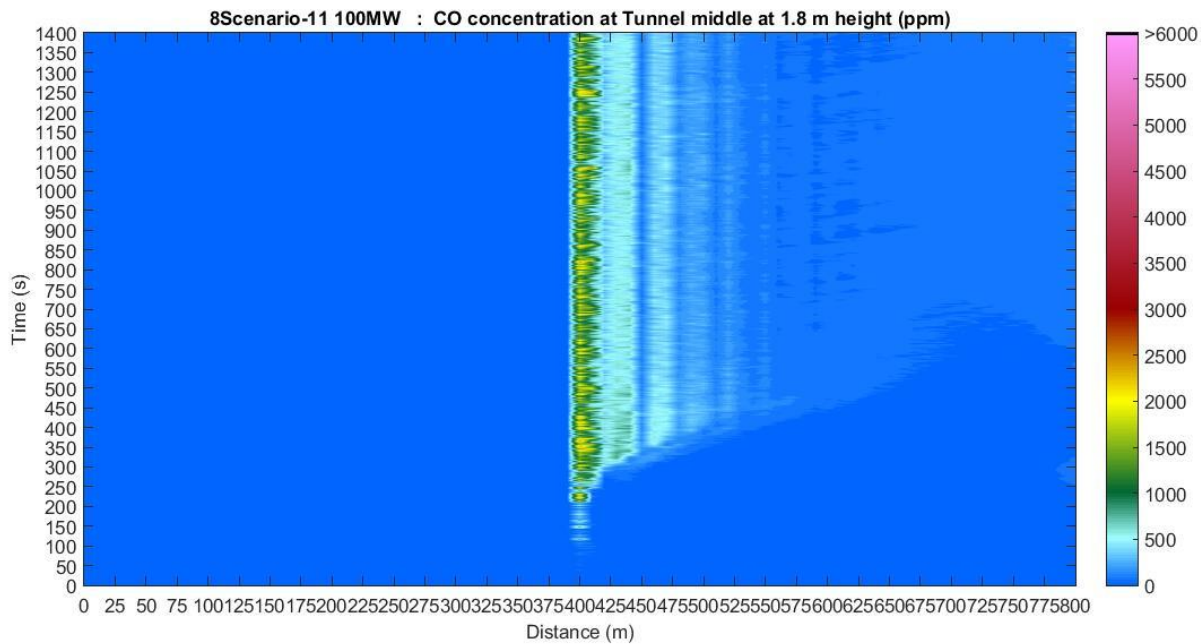
Σχήμα Π - 16: <Σενάριο 6> Κατανομή της συγκέντρωσης CO στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8$ m

Σενάριο 7: Κλίση 1%, Αέρας 1 m/s



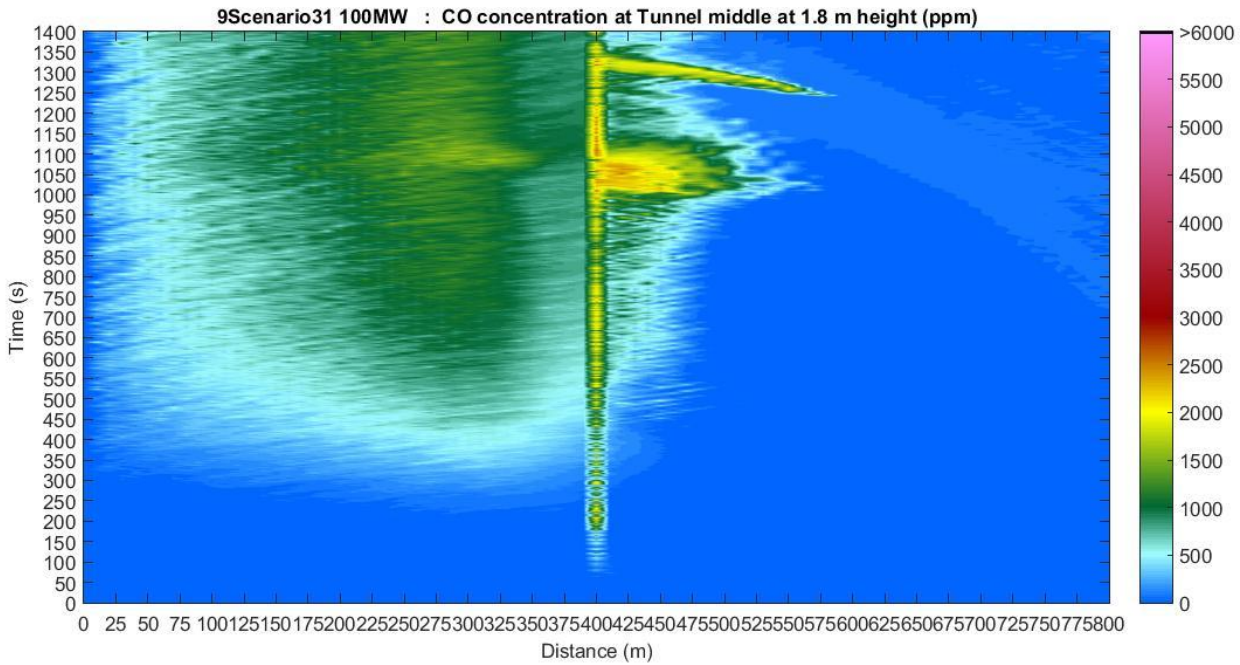
Σχήμα Π - 17: <Σενάριο 5> Κατανομή της συγκέντρωσης CO στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8$ m

Σενάριο 8: Κλίση -1%, Αέρας 1 m/s



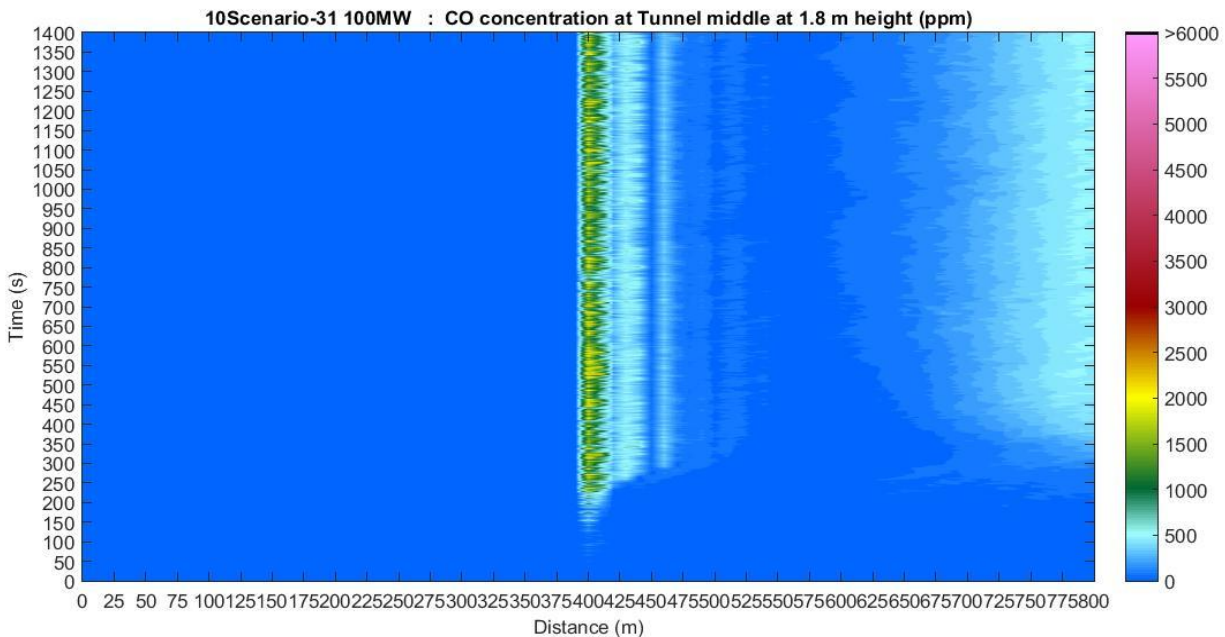
Σχήμα Π - 18:<Σενάριο 5> Κατανομή της συγκέντρωσης CO στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8$ m

Σενάριο 9: Κλίση 3%, Αέρας 1 m/s



Σχήμα Π - 19: <Σενάριο 5> Κατανομή της συγκέντρωσης CO στο μέσον της σήραγγας στο ύψος z = 1.8 m

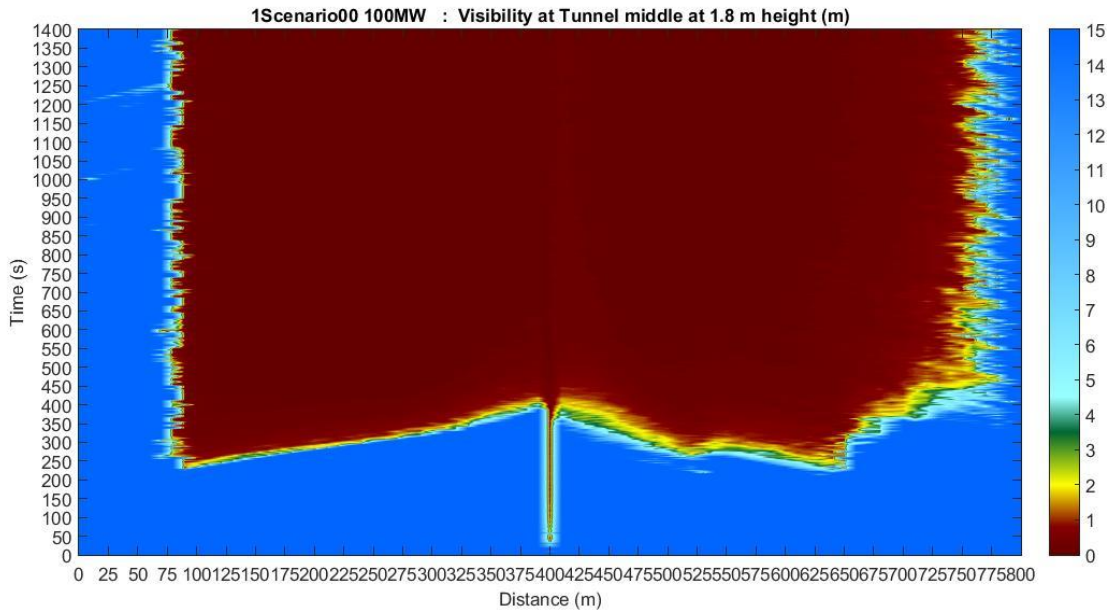
Σενάριο 10: Κλίση -3%, Αέρας 1 m/s



Σχήμα Π - 20 <Σενάριο 10> Κατανομή της συγκέντρωσης CO στο μέσον της σήραγγας στο ύψος z = 1.8 m

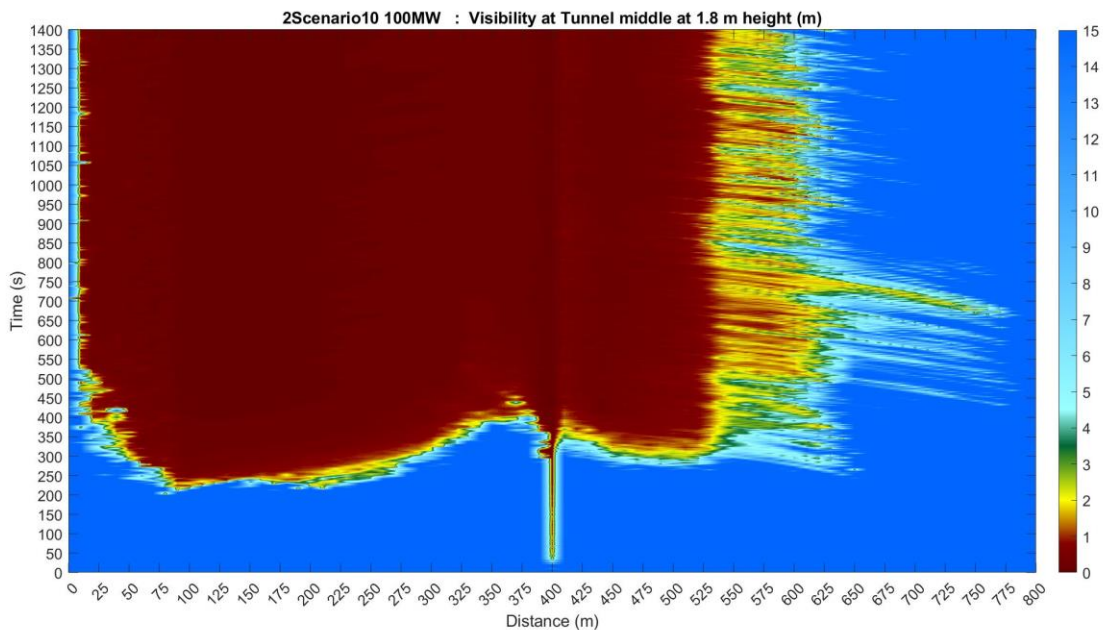
Παράρτημα Γ: Διαγράμματα κατανομής συγκέντρωσης CO για κάθε Σενάριο φωτιάς

Σενάριο 1: Κλίση 0%, Αέρας 0 m/s



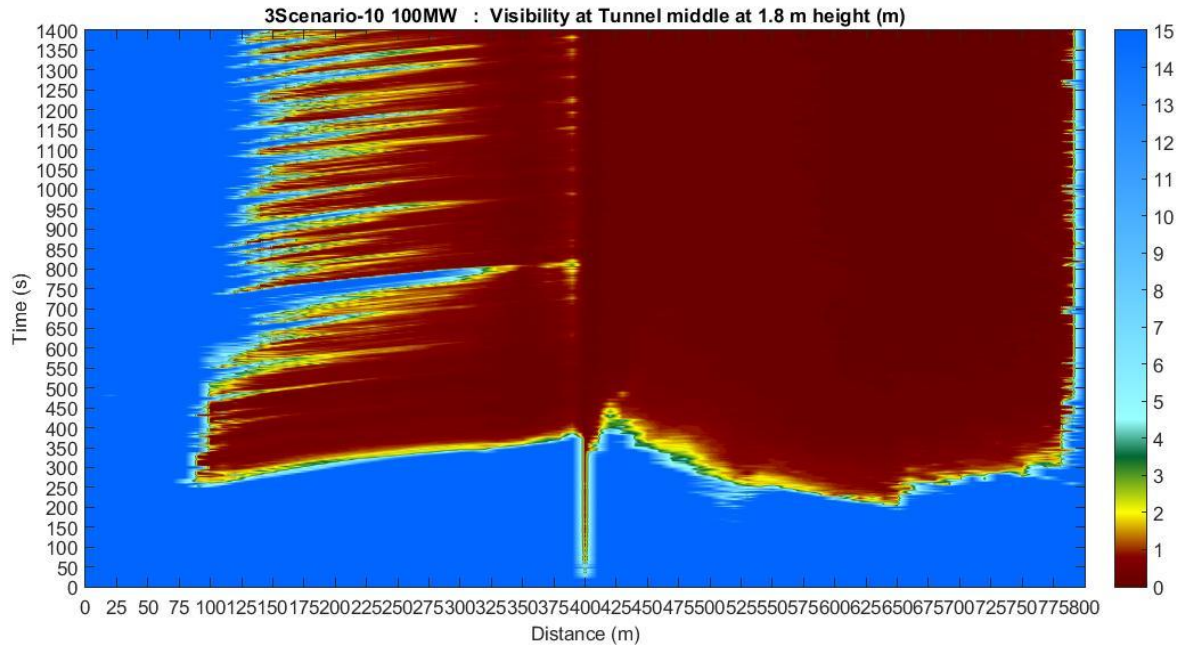
Σχήμα Π - 21: <Σενάριο 1> Κατανομή της ορατότητας στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8$ m

Σενάριο 2: Κλίση 1%, Αέρας 0 m/s



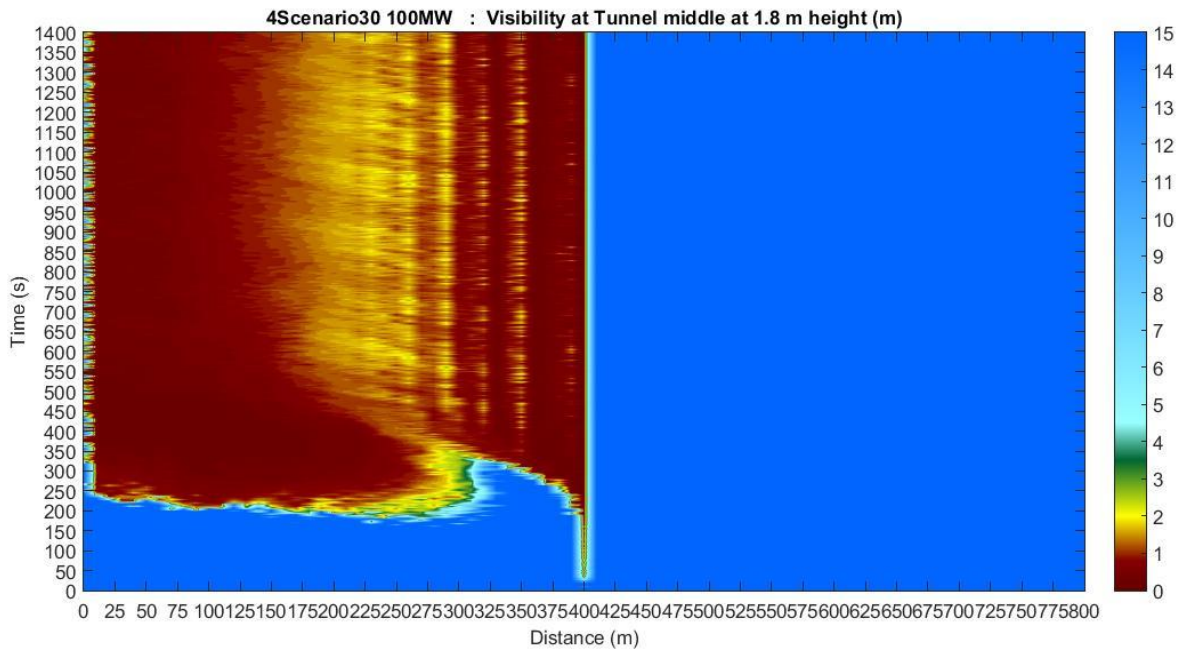
Σχήμα Π - 22: <Σενάριο 2> Κατανομή της ορατότητας στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8$ m

Σενάριο 3: Κλίση -1%, Αέρας 0 m/s



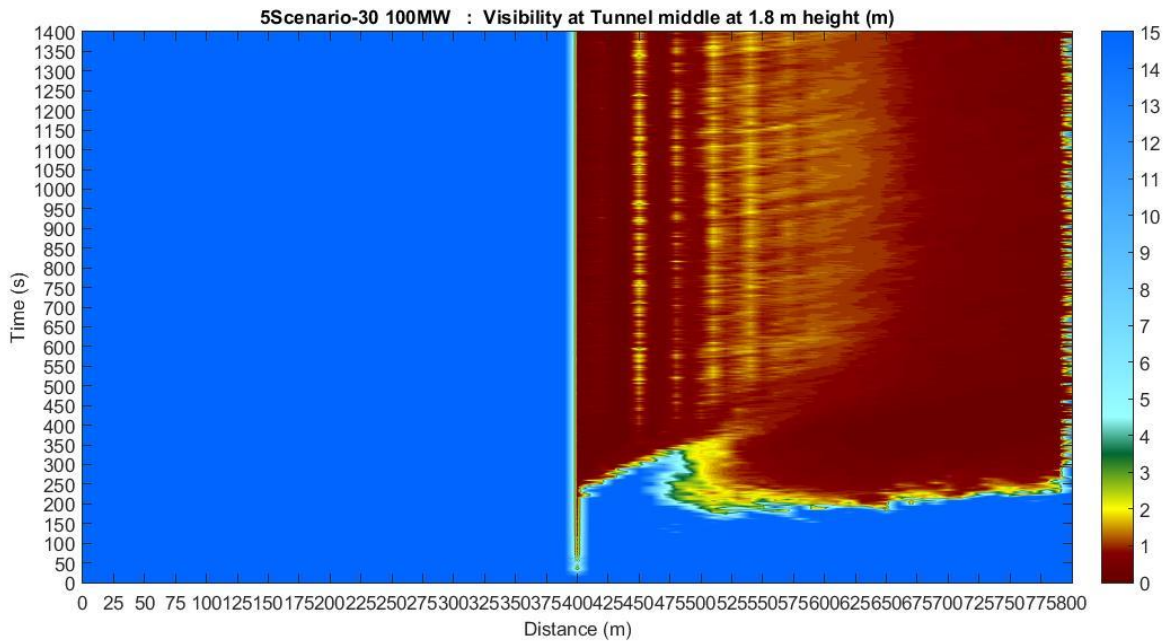
Σχήμα Π - 23: <Σενάριο 3> Κατανομή της ορατότητας στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8$ m

Σενάριο 4: Κλίση 3%, Αέρας 0 m/s



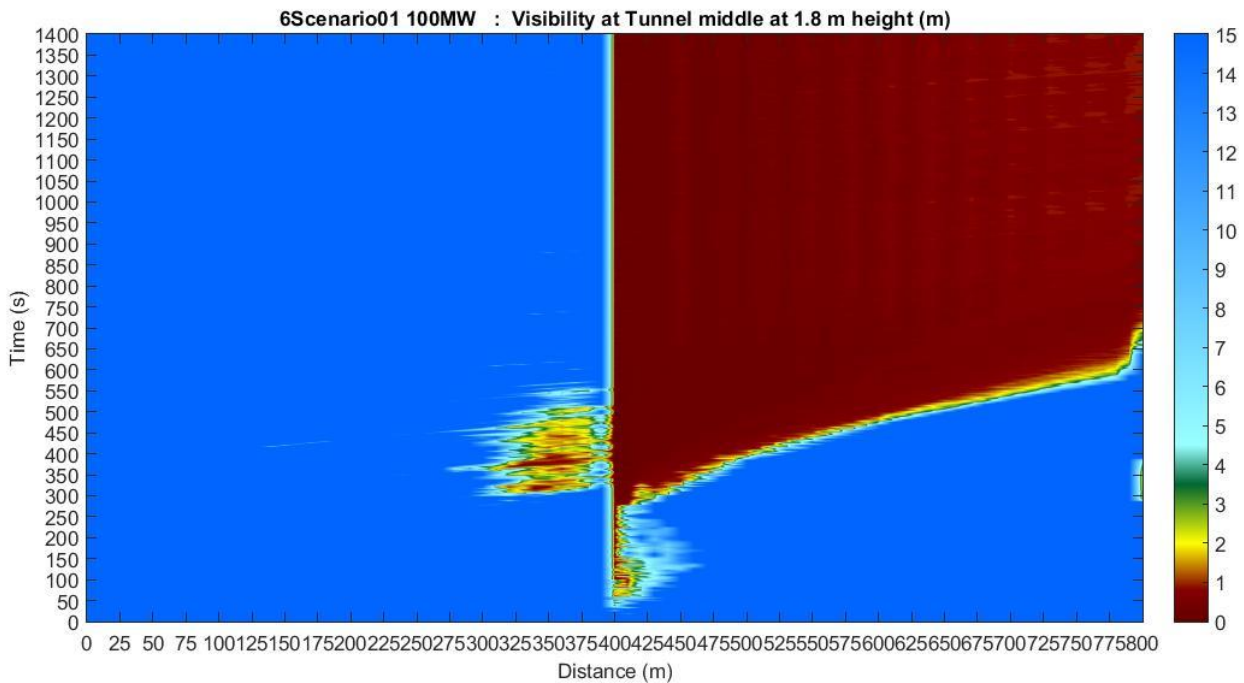
Σχήμα Π - 24: <Σενάριο 4> Κατανομή της ορατότητας στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8$ m

Σενάριο 5: Κλίση -3%, Αέρας 0 m/s



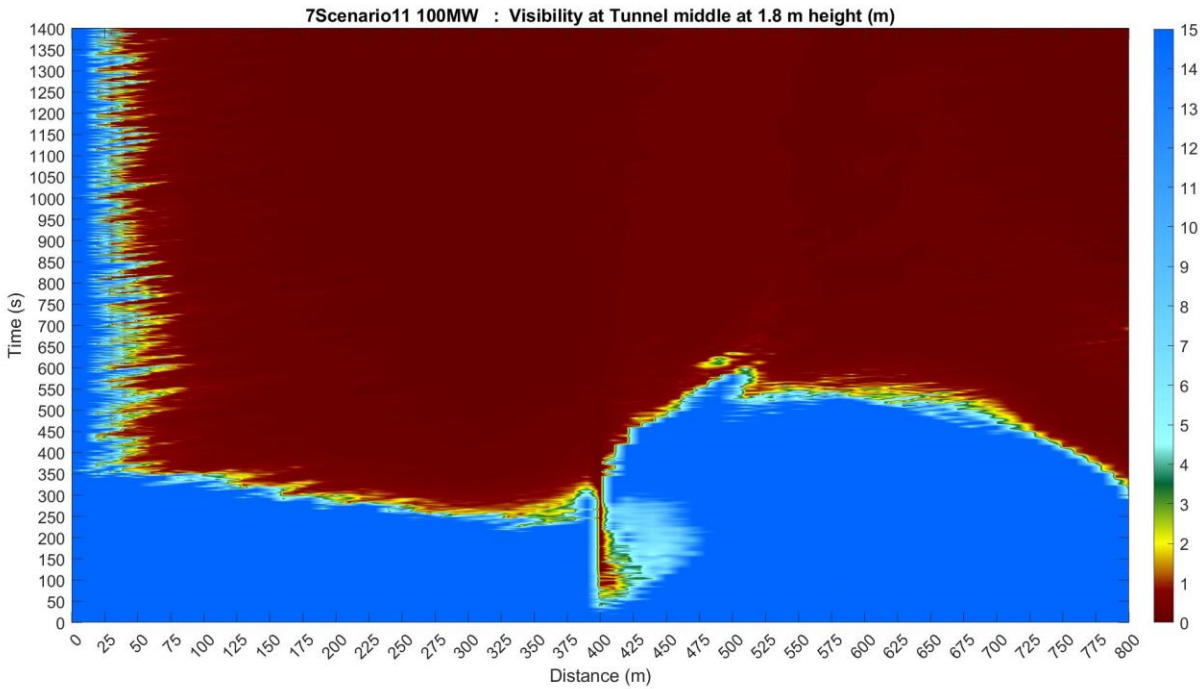
Σχήμα Π - 25: : <Σενάριο 5> Κατανομή της ορατότητας στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8$ m

Σενάριο 6: Κλίση 0%, Αέρας 1 m/s



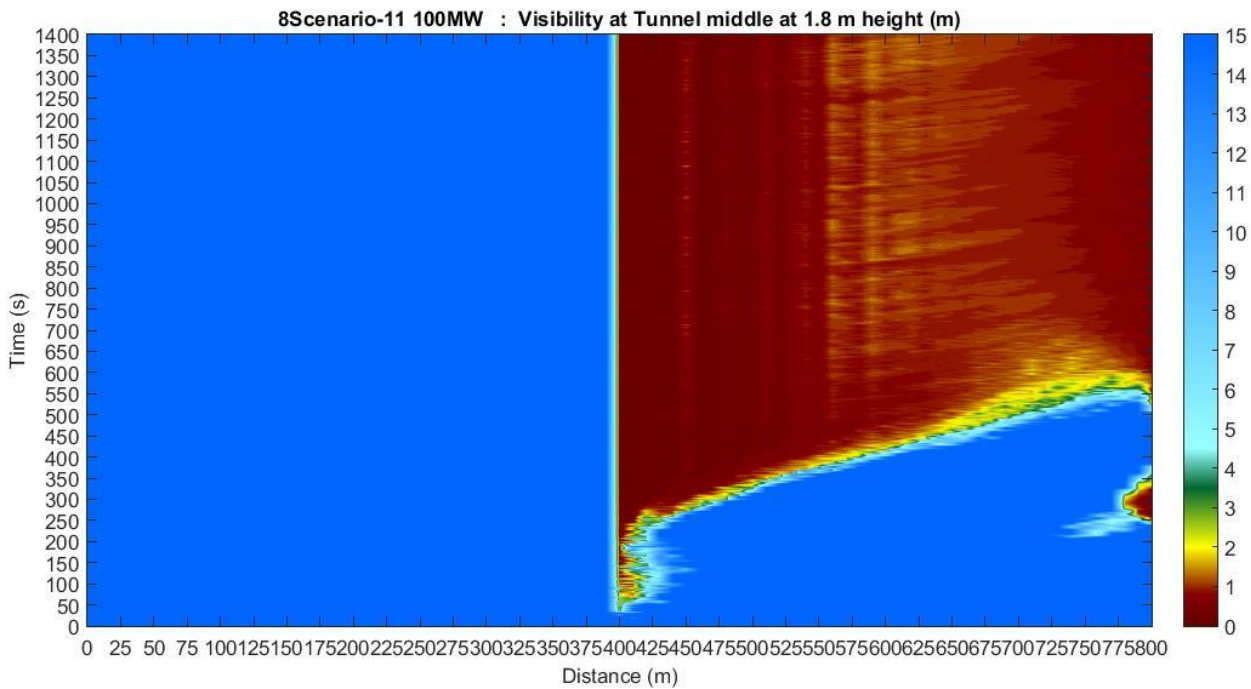
Σχήμα Π - 26: <Σενάριο 6> Κατανομή της ορατότητας στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8$ m

Σενάριο 7: Κλίση 1%, Αέρας 1 m/s



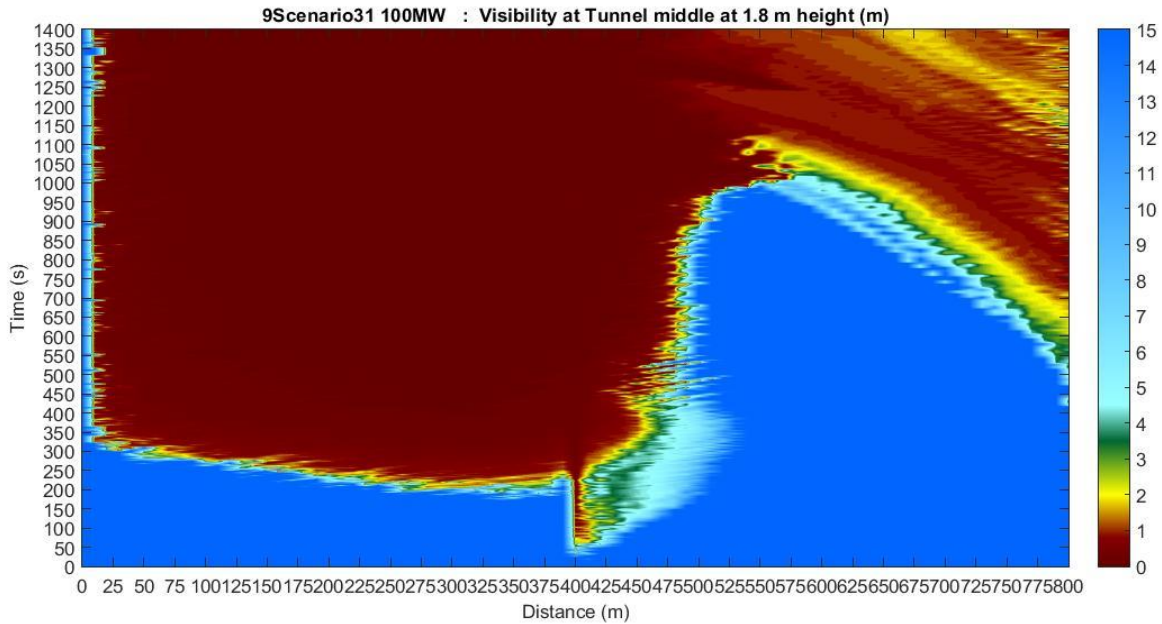
Σχήμα Π - 27: <Σενάριο 7> Κατανομή της ορατότητας στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8$ m

Σενάριο 8: Κλίση -1%, Αέρας 1 m/s



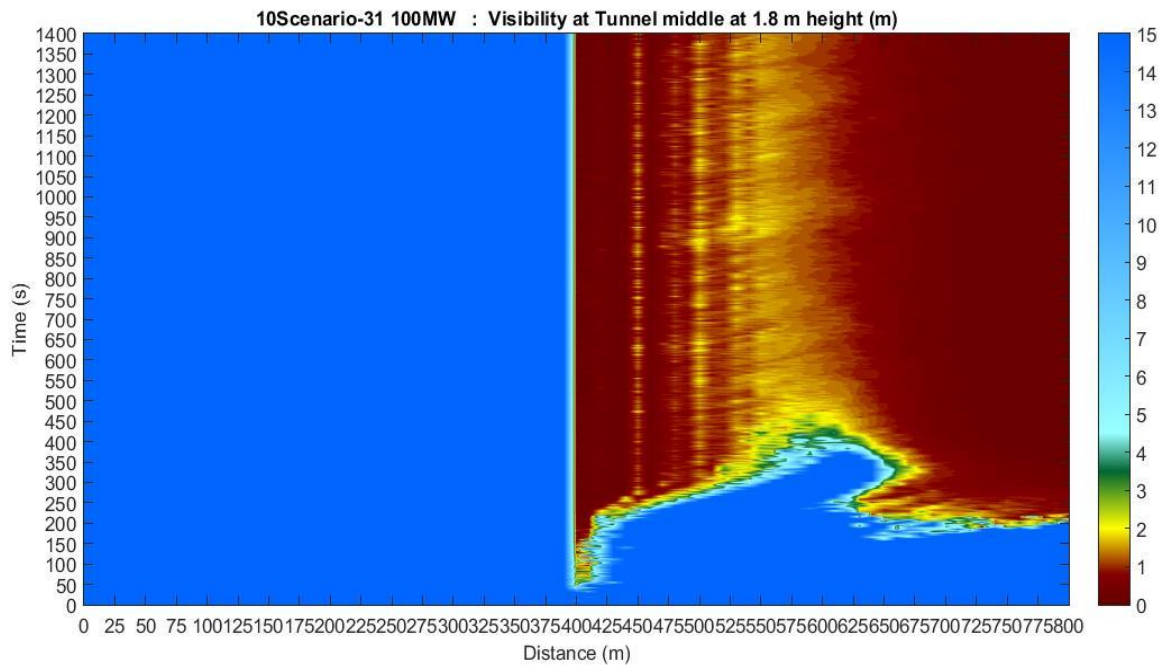
Σχήμα Π - 28: <Σενάριο 8> Κατανομή της ορατότητας στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8$ m

Σενάριο 9: Κλίση 3%, Αέρας 1 m/s



Σχήμα Π - 29: <Σενάριο 9> Κατανομή της ορατότητας στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8$ m

Σενάριο 10: Κλίση -3%, Αέρας 1 m/s



Σχήμα Π - 30: <Σενάριο 10> Κατανομή της ορατότητας στο μέσον της σήραγγας στο ύψος $z = 1.8$ m