

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ, ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΜΣ ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΗ ΘΕΡΜΟΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΠΟΚΑΠΝΙΣΜΟΥ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΣΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΦΩΤΙΑΣ ΜΕ  
ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ  
ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΣΦΑΛΗ  
ΕΚΚΕΝΩΣΗ ΤΟΥ ΠΛΗΘΥΣΜΟΥ

**Ζήσης, Θωμάς, msrtf20X03**

**Επιβλέπων καθηγητής: Δρ. Κωνσταντίνος Βασιλόπουλος**

Αιγάλεω 12/07/2021

## Επιτροπή αξιολόγησης και βαθμολόγησης διπλωματικής

<b>α/α</b>	<b>ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ</b>	<b>ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ</b>	<b>ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ</b>
1	Κωνσταντίνος-Στέφανος Νίκας	Καθηγητής	
2	Ιωάννης Σαρρής	Καθηγητής	
3	Κωνσταντίνος Βασιλόπουλος	Έκτακτο προσωπικό από Πρόγραμμα ΕΣΠΑ	

## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος ΘΩΜΑΣ ΖΗΣΗΣ του ΣΠΥΡΙΔΩΝΟΣ, με αριθμό μητρώου msrtf20x03 φοιτητής του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΗ ΘΕΡΜΟΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ του Τμήματος ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

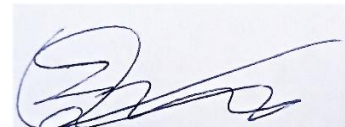
«Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

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

Ο Δηλών

ΘΩΜΑΣ ΖΗΣΗΣ



## Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή.....	6
2	Βιβλιογραφική ανασκόπηση .....	9
2.1	Συστήματα αερισμού .....	10
2.2	Κρίσιμη ταχύτητα και μήκος ανεστραμμένου καπνού.....	11
2.3	Προσδιορισμός των συνθηκών που επικρατούν σε πυρκαγιά εντός σήραγγας .....	14
2.4	Ασφάλεια του πληθυσμού και εκκένωση .....	15
2.4.1	Επίδραση της θερμότητας .....	18
2.4.2	Επίδραση τοξικών ρύπων.....	18
2.4.3	Επίδραση μη τοξικών ρύπων .....	20
2.5	Υπολογιστικές μέθοδοι και μοντελοποίηση.....	20
2.6	Επαλήθευση και επικύρωση των αποτελεσμάτων που εξάγονται από λογισμικά υπολογιστικής ρευστομηχανικής .....	21
2.6.1	Μοντέλα επαλήθευσης για τον κώδικα FDS.....	22
2.6.2	Ανεξαρτησία πλέγματος για τον κώδικα FDS .....	23
3	Σχεδιασμός και υλοποίηση έρευνας.....	26
3.1	Εισαγωγή .....	26
3.2	Προμελέτη .....	27
3.2.1	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της σήραγγας .....	27
3.2.2	Χαρακτηριστικά φωτιάς.....	28
3.2.3	Χαρακτηριστικά συστήματος αερισμού.....	29
3.3	Ο κώδικας FDS.....	32
3.3.1	Δομή του FDS .....	33
3.3.2	Μαθηματικό μοντέλο .....	34
3.3.3	Αλγόριθμος επίλυσης .....	37
3.3.4	Μοντελοποίηση της τύρβης .....	38
3.4	Κατασκευή πλέγματος.....	40

3.5	Ανεξαρτησία πλέγματος .....	41
3.6	Επαλήθευση και επικύρωση αριθμητικών αποτελεσμάτων .....	42
3.7	Δομή και τρόπος λειτουργίας του λογισμικού Pathfinder .....	43
3.7.1	Ταχύτητα κίνησης .....	43
3.7.2	Γεωμετρία.....	45
3.7.3	Συμπεριφορά ατόμων και στόχοι .....	48
3.8	Σενάριο εκκένωσης.....	49
3.8.1	Σχεδιασμός σεναρίου εκκένωσης.....	50
3.8.2	Υπολογισμός δείκτη FED .....	52
4	Αποτελέσματα .....	54
4.1	Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης μέσω του FDS.....	54
4.1.1	Έλεγχος ανεξαρτησίας πλέγματος και επαλήθευση των αποτελεσμάτων μέσω του εμπειρικού μοντέλου .....	57
4.1.2	Κρίσιμη ταχύτητα εξαερισμού .....	62
4.2	Εκκένωση και ασφάλεια του πληθυσμού .....	64
4.2.1	Θερμοκρασία.....	64
4.2.2	Δείκτης FED.....	65
5	Σχόλια και συμπεράσματα .....	68
6	Αναφορές.....	70

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Τυπική διατομή σιδηροδρομικής σήραγγας cut and cover (εικόνα από ΟΣΕ).....	9
Σχήμα 2.2: Αποκαπνισμός με διαμήκη αερισμό (Haukur et al. 2015).....	10
Σχήμα 2.3: Διαμήκης αερισμός με ανεμιστήρες ώσης, συνδυασμό στομίου Saccardo και ανεμιστήρων ώσης, φρέαρ προσαγωγής-απαγωγής και ανεμιστήρων ώσης (Haukur et al. 2015).....	11
Σχήμα 2.4: Απεικόνιση του backlayering στο FDS .....	12
Σχήμα 2.5: Η επίδραση της κρίσιμης ταχύτητας στην φωτιά εντός σήραγγας (Haukur et al. 2015).....	13
Σχήμα 2.6: Παράδειγμα διαφορετικών διεργασιών που συμβαίνουν κατά την διάρκεια πυρκαγιάς (Haukur et al. 2015).....	15
Σχήμα 2.7: Συμπτώματα επίδρασης μονοξειδίου άνθρακα, ανάλογα με την συγκέντρωση στον εισπνεόμενο αέρα, στον ανθρώπινο οργανισμό .....	20
Σχήμα 3.1: Γραφική απεικόνιση της πλάγιας όψης του μοντέλου της σήραγγας, των διαστάσεων κατά μήκος του τρένου και της σήραγγας καθώς και οι θέσεις των ανεμιστήρων ώσης. ....	28
Σχήμα 3.2: Εμπρόσθια όψη της διατομής της σήραγγας, με διαστάσεις αυτής, του τρένου, του κρηπιδώματος και των ανεμιστήρων. ....	28
Σχήμα 3.3: Απεικόνιση των δυο διαφορετικών πλεγμάτων και της εστίας φωτιάς.....	41
Σχήμα 3.4: Τριδιάστατη γεωμετρία στο Pathfinder (εικόνα από το εγχειρίδιο του Pathfinder) .....	45
Σχήμα 3.5: Το διδιάστατο τριγωνικό πλέγμα πάνω στο οποίο κινούνται τα άτομα (εικόνα από το εγχειρίδιο του Pathfinder).....	46
Σχήμα 3.6: Δωμάτια, θύρες, θύρες εξόδου, πληθυσμός και το πλέγμα πλοήγησης (εικόνα από το εγχειρίδιο του Pathfinder).....	47
Σχήμα 3.7: Καθορισμός του κρηπιδώματος ως δωμάτιο, απεικόνιση του πληθυσμού, θύρας εξόδου και πλέγματος πλοήγησης.....	51
Σχήμα 4.1: Σύγκριση του εισηγμένου ρυθμού ανάπτυξης της φωτιάς με τις τιμές που εξήχθησαν από την αριθμητική επίλυση μέσω του κώδικα FDS.....	54
Σχήμα 4.2: Θερμοκρασία στην οροφή της σήραγγας ( $z = 7\text{m}$ ) πάνω από και κατάντη της εστίας φωτιάς για τα τρία διαφορετικά σενάρια, a) Scenario A, b) Scenario B, και c) Scenario C. ....	55

Σχήμα 4.3: Θερμοκρασία στην οροφή της σήραγγας ( $z = 7\text{m}$ ), στο επίπεδο $z$ , για τα τρία διαφορετικά σενάρια, ακριβώς την χρονική στιγμή της ενεργοποίησης των ανεμιστήρων a) Scenario A +180s, b) Scenario B +300s και c) Scenario C +480s μετά την έναρξη της φωτιάς. .....	56
Σχήμα 4.4: Διασπορά και φαινόμενο αναστροφής του καπνού, στο επίπεδο $y$ , για τα τρία διαφορετικά σενάρια, ακριβώς την χρονική στιγμή της ενεργοποίησης των ανεμιστήρων a) Scenario A +180s, b) Scenario B +300s και c) Scenario C +480s μετά την έναρξη της φωτιάς. .....	56
Σχήμα 4.5: Σύγκριση του Grid Convergence Index (GCI) (a) για τη μέση τιμή της ταχύτητας $U$ και (b) για την μέση συγκέντρωση του μονοξειδίου του άνθρακα, για το μεσαίο και πυκνό πλέγμα, στο σημείο ( $x = 1100\text{m}$ , $y = 5.5\text{m}$ και $z = 0$ έως $7\text{m}$ ).....	58
Σχήμα 4.6: Τιμές της θερμοκρασίας στην οροφή της σήραγγας ( $x = 0, 10, 30, 50, 100\text{m}$ και $z = 7\text{m}$ ) πάνω από και κατάντη της πηγής φωτιάς, υπολογισμένες με το εμπειρικό μοντέλο και συγκρινόμενες με τις τιμές από την αριθμητική προσομοίωση. ....	59
Σχήμα 4.7: Θερμοκρασία στην οροφή ( $z = 7\text{m}$ ) ακριβώς πάνω από την πηγή φωτιάς για το σενάριο C, συγκρινόμενη με της καμπύλες φωτιάς HC, HCM και RABT-ZTV .....	61
Σχήμα 4.8: Σύγκριση των θερμοκρασιών των τριών σεναρίων, στην οροφή της σήραγγας ( $z = 7\text{m}$ ) πάνω από την πηγή φωτιάς ( $x = 795\text{m}$ ), με την καμπύλη φωτιάς RABT-ZTV. ....	61
Σχήμα 4.9: Ανάπτυξη της κρίσιμης ταχύτητας των $2.7\text{ m/s}$ (πράσινο χρώμα) στην περιοχή του τρένου για a) +90s, b) +180s and c) +300s μετά την ενεργοποίηση των ανεμιστήρων. Οι ανεμιστήρες φτάνουν την μέγιστη ισχύ τους 90s μετά την ενεργοποίησή τους, ενώ η ροή εξαερισμού έχει διαμορφωθεί μετά από 300s. ....	62
Σχήμα 4.10: Διαμήκης $U$ ταχύτητα στο επίπεδο συμμετρίας ( $y = 5.5\text{m}$ , $z = 3.5\text{m}$ ) της σήραγγας για το σενάριο A, για διαφορετικές χρονικές στιγμές $t = 180\text{s}, 270\text{s}, 600\text{s}, 720\text{s}$ ... ..	63
Σχήμα 4.11: Μέση διαμήκης $U$ ταχύτητα, για το σενάριο A, ανάντη του μετώπου φωτιάς. ..	64
Σχήμα 4.12: Κατανομή της θερμοκρασίας στην οροφή της σήραγγας ( $z = 7\text{m}$ ) ακριβώς πάνω και κατάντη του μετώπου φωτιάς (με το $x = 0$ να δηλώνει τη θέση ακριβώς πάνω από την εστία φωτιάς).....	65
Σχήμα 4.13: Μέγιστες τιμές FED για κάθε σενάριο .....	66
Σχήμα 4.14: Μέσες τιμές FED για κάθε σενάριο.....	67

# 1 Εισαγωγή

---

Οι σήραγγες είναι σύνθετες υποδομές, συνήθως ημικυκλικής ή ορθογώνιας διατομής, που κατασκευάζονται για να καλύψουν τις ανάγκες για τη δημιουργία συνδέσεων μεταξύ διαφορετικών τμημάτων ενός οδικού ή σιδηροδρομικού δικτύου. Οι σήραγγες μπορούν να αποτελούν μια έγκυρη λύση στην περίπτωση προβλημάτων διάταξης δρόμου, δηλαδή μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην διαδικασία βελτιστοποίησης του σχεδιασμού, επειδή καθιστούν δυνατή τη συντόμευση της διαδρομής ή/και τη σύνδεση απρόσιτων περιοχών μεταξύ τους (Ronchi 2012).

Οι αυξανόμενες αναφορές για ατυχήματα πυρκαγιάς σε κλειστούς χώρους με έντονη πληθυσμιακή κινητικότητα, όπως οι σήραγγες, έχει δημιουργήσει την ανάγκη να μπορέσουν να υπολογιστούν οι συνθήκες που επικρατούν σε τέτοιες περιπτώσεις καθώς και ο καλύτερος τρόπος διασφάλισης της ανθρώπινης ζωής. Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας και ειδικότερα των υπολογιστών μπορούμε να δώσουμε λύσεις στα προβλήματα που αντιμετωπίζουμε καθώς μπορούμε να αναλύσουμε φυσικά φαινόμενα, χωρίς την διεξαγωγή πραγματικών πειραμάτων μεγάλης ή μικρής κλίμακας, με την χρήση της υπολογιστικής ρευστομηχανικής.

Η συχνότητα των πυρκαγιών των σηράγγων εξαρτάται από πολλές παραμέτρους όπως το μήκος της σήραγγας, η πυκνότητα της κυκλοφορίας, ο έλεγχος της ταχύτητας και η κλίση του δρόμου (Shields 2005). Κάθε μία από αυτές τις παραμέτρους πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την επιλογή διαφορετικών μέτρων ασφαλείας. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, παρόλο που η πιθανότητα σημαντικού ατυχήματος πυρκαγιάς σε μια σήραγγα είναι χαμηλή, η σημασία της ασφάλειας του σχεδιασμού δεν μπορεί να υποτιμηθεί (Ronchi 2012). Στις σήραγγες, ένας κρίσιμος παράγοντας κινδύνου είναι ότι η πιθανότητα πρόκλησης σοβαρής πυρκαγιάς από ΗGV είναι μεγαλύτερη απ' ό,τι για τα επιβατικά αυτοκίνητα (Maevski 2011). Στην Ευρώπη, περίπου 20 πυρκαγιές οχημάτων συμβαίνουν ανά δεσεκατομμύριο χιλιομέτρων που διανύουν οχήματα σε σήραγγες (Nævestad and Meyer 2014). Περίπου Το 30% όλων των πυρκαγιών προέρχονται από ΗGV (Heavy Goods Vehicle, βαρέα φορτηγά μεταφοράς αγαθών) , παρά το γεγονός ότι αποτελούν μόνο το 15% του συνολικού όγκου της κίνησης (Ingason 2005; Nævestad and Meyer 2014).

Η προσομοίωση και μελέτη των περιπτώσεων φωτιάς σε σήραγγες, γίνεται με λογισμικά υπολογιστικής ρευστομηχανικής (CFD). Τα διάφορα λογισμικά CFD ενώ μπορούν να προσομοιώσουν διάφορα φαινόμενα, δεν μπορούν με ακρίβεια να προσομοιώσουν θερμικά οδηγού-



μενες ροές από φωτιά, με παραγωγή καπνού και αιθάλης. Η μελέτη του φαινομένου αυτού μπορεί να γίνει με εμπορικούς ή κώδικες ανοιχτού λογισμικού. Ένα λογισμικό που εκτεταμένα χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της πυρκαγιάς εντός σήραγγας είναι το FDS (Fire Dynamics Simulation) από το NIST (National Institute of Standards and Technology), το οποίο έχει καθιερωθεί για τους συγκεκριμένους τύπους μελέτης (Haukur et al. 2015).

Οι συνέπειες μιας πυρκαγιάς σε σήραγγα μπορεί να είναι πολύ πιο σοβαρές από μια πυρκαγιά στο ύπαιθρο και σε αυτό συμφωνούν τα δεδομένα που υπάρχουν από πολλά ατυχήματα στο παρελθόν (Amundsen 1994; Amundsen and Raner 2000). Η φωτιά, η υψηλή θερμοκρασία και οι τοξικοί ρύποι και καπνός που παράγονται, έχουν καταστροφικές συνέπειες για την ασφάλεια των επιβαινόντων που είναι παγιδευμένοι εντός της σήραγγας, όπως για παράδειγμα, το 2003, η πυρκαγιά από εμπρησμό στη σήραγγα του μετρό στο Ντάεγκο της Νότιας Κορέας που είχε ως αποτέλεσμα 198 θανάτους, καθώς και η πυρκαγιά των οδικών σηράγγων Jinji στο Shanxi της Κίνας, το 2017, που προκάλεσε 31 θανάτους (Hong 2004). Κατά τη διάρκεια πυρκαγιάς, οι επιβάτες που διαφεύγουν πρέπει να επιλέξουν την κατεύθυνση και τη διαδρομή της εκκένωσης τους. Η λανθασμένη κατεύθυνση ή διαδρομή, μπορεί να οδηγήσει τους ανθρώπους προς τη φωτιά ή τον καπνό, κάτι που θα έχει αρνητικές συνέπειες στην υγεία τους, λόγω της παρουσίας τοξικών αερίων, θερμότητας και ακτινοβολίας (Zhang et al. 2021a; Yan et al. 2018). Για να ελαχιστοποιηθεί η έκθεση στον καπνό κατά την διαφυγή των ανθρώπων από τη σήραγγα, χρησιμοποιούνται διάφορα συστήματα εξαερισμού για την εξαγωγή του καπνού από τη σήραγγα ή για να διατηρηθεί ο καπνός στη σήραγγα πάνω από το ύψος της κεφαλής (Zhang et al. 2019b; Zhang et al. 2021c). Αυτά μπορεί να είναι είτε μηχανικά είτε φυσικά συστήματα αερισμού. Τα συστήματα εξαναγκασμένου εξαερισμού χρησιμοποιούν ανεμιστήρες για να εξαγάγουν ή να ωθήσουν τον καπνό εκτός της σήραγγας και γι' αυτό χρησιμοποιούν αρκετή ενέργεια κατά τη λειτουργία τους. Σε αντίθεση με τον μηχανικό αερισμό, ο φυσικός αερισμός με κάθετα φρεάτια στην οροφή της σήραγγας εκμεταλλεύεται την άνωση του θερμού καπνού, ο οποίος διαφεύγει από αυτά μέσω του φαινομένου του ελκυσμού και του φαινομένου του εμβόλου λόγω της κίνησης των οχημάτων ή των συρμών εντός της σήραγγας. Αυτή η προσέγγιση γενικά δεν χρειάζεται μηχανικούς ανεμιστήρες, με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση χώρου στα άνω μέρη της σήραγγας και είναι κατάλληλη για επιφανειακές σήραγγες σε αστικές περιοχές (Zhang et al. 2021b).

Στις πυρκαγιές σε κλειστά περιβάλλοντα, όπως οι σήραγγες, η θερμότητα και ο καπνός διατηρούνται στο εσωτερικό τους με αποτέλεσμα η διαθεσιμότητα οξυγόνου να γίνεται περιορι-

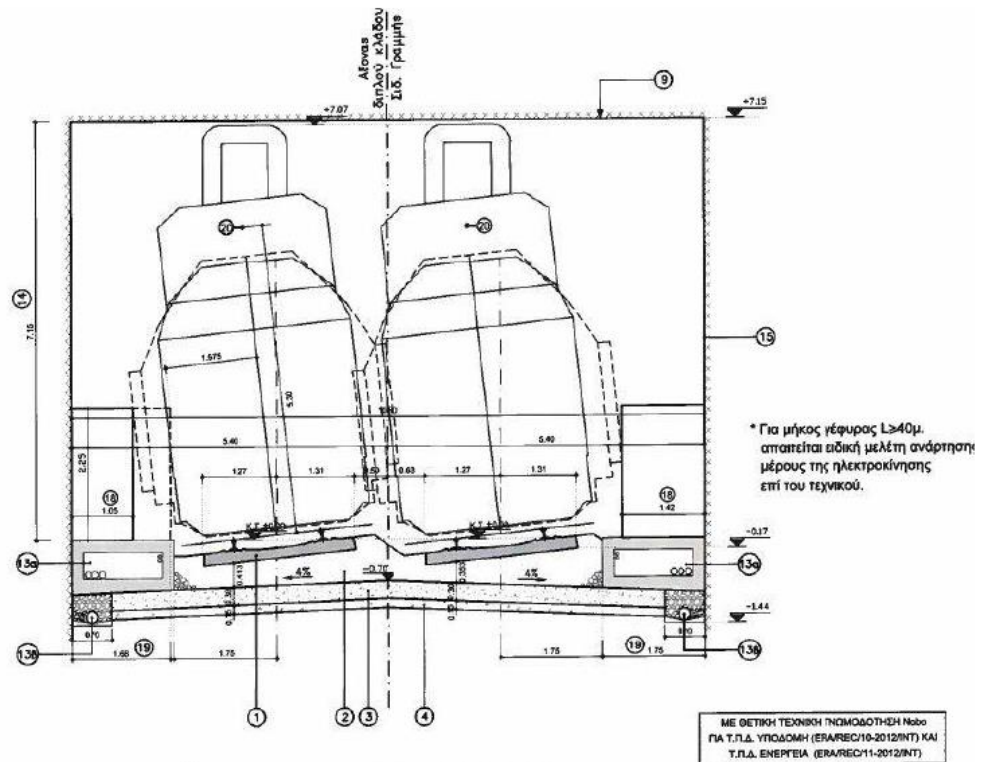
στικός παράγοντας για την ανάπτυξη της πυρκαγιάς. Η γεωμετρία μιας σήραγγας θα καθορίσει το πόσο μεγάλη μπορεί να γίνει η φωτιά προτού γίνει ελεγχόμενη μέσω του αερισμού, δηλαδή ελεγχόμενη από την παροχή οξυγόνου (Karlsson and Quintiere 1999). Σε αυτό το είδος φωτιάς, άκαυστο καύσιμο μπορεί να καεί έξω από τα ανοίγματα της κλειστής δομής καθώς αναμιγνύεται με καθαρό αέρα. Όταν το καύσιμο περιβάλλεται από αέριο μείγμα με λιγότερο από περίπου 13% οξυγόνο, η φωτιά θα σβήσει (Gehandler 2015a).

Στην παρούσα έρευνα θα γίνει προσομοίωση ατυχήματος φωτιάς εντός σιδηροδρομικής σήραγγας, παρουσία τρένου. Θα μελετηθεί η επίδραση του διαμήκη αερισμού, με την χρήση ανεμιστήρων ώσης (jet fans), σε περίπτωση λίμνης φωτιάς πετρελαίου (diesel pool fire) 20 MW στην οροφή της μηχανής έλξης της αμαξοστοιχίας η οποία βρίσκεται ακινητοποιημένη στο μέσο της σήραγγας. Σκοπός είναι να επιτευχθούν, μια μέση ταχύτητα ροής που θα επιτρέπει τον απομάκρυνση του καπνού εκτός της σήραγγας, και συνθήκες (θερμοκρασία, συγκέντρωση τοξικών ρύπων όπως CO και CO<sub>2</sub>) στο μέσο ύψος αναπνοής του ανθρώπου να εξασφαλίζουν της ασφαλή εκκένωση τους. Πρώτος στόχος της εργασίας είναι η αξιολόγηση του συστήματος αερισμού για τον αποκαπνισμό της σήραγγας ώστε να γίνει με ασφάλεια η εκκένωση του πληθυσμού. Δεύτερος στόχος της έρευνας είναι να μελετηθεί ο συσχετισμός του χρόνου ενεργοποίησης του συστήματος αερισμού αλλά και του χρόνου εκκίνησης της διαδικασίας εκκένωσης, στην πρόσληψη τοξικών ρύπων από τους επιβάτες. Για την επίλυση όλων αυτών των ζητημάτων χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας FDS του NIST ενώ με τα προγράμματα της Thunderhead Engineering, Pyrosim και Pathfinder έγινε η μοντελοποίηση των σεναρίων φωτιάς και η προσομοίωση της διαδικασίας εκκένωσης αντίστοιχα.

## 2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Οι σήραγγες, απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή από τον σχεδιαστή κατά τον καθορισμό των γεωμετρικών χαρακτηριστικών τους Σχήμα 2.1. Τα μέτρα ασφαλείας πρέπει να σχεδιαστούν με βάση τα προβλήματα που προκύπτουν, όπως θέματα σχεδιασμού, γεωμετρίας καθώς και καθαρά οικονομικές πτυχές. Αυτό πρέπει να γίνει χωρίς να ξεχνάμε την πιο σημαντική πτυχή της διαδικασίας σχεδιασμού οποιασδήποτε υποδομής, την ασφάλεια των χρηστών. Ο προσδιορισμός των βέλτιστων μεθόδων σχεδιασμού ασφαλείας που πληρούν όλα τα κριτήρια που αναφέρονται παραπάνω είναι ένα θέμα συζήτησης στην επιστημονική κοινότητα και σε όλους τους οργανισμούς/άτομα συμμετέχουν στο στάδιο του σχεδιασμού (Ronchi 2012; Fridolf et al. 2013; Ronchi et al. 2018).

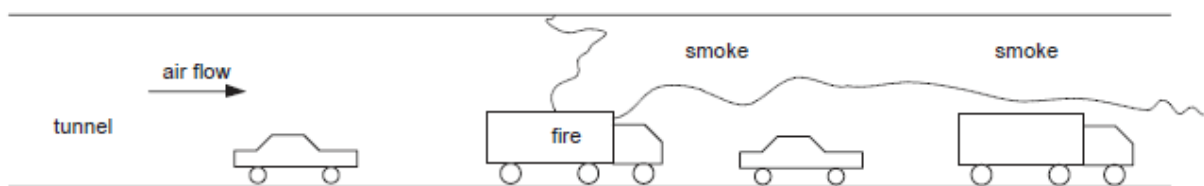
ΟΕ  
Δ.Ι.Σ.Σ.Α.



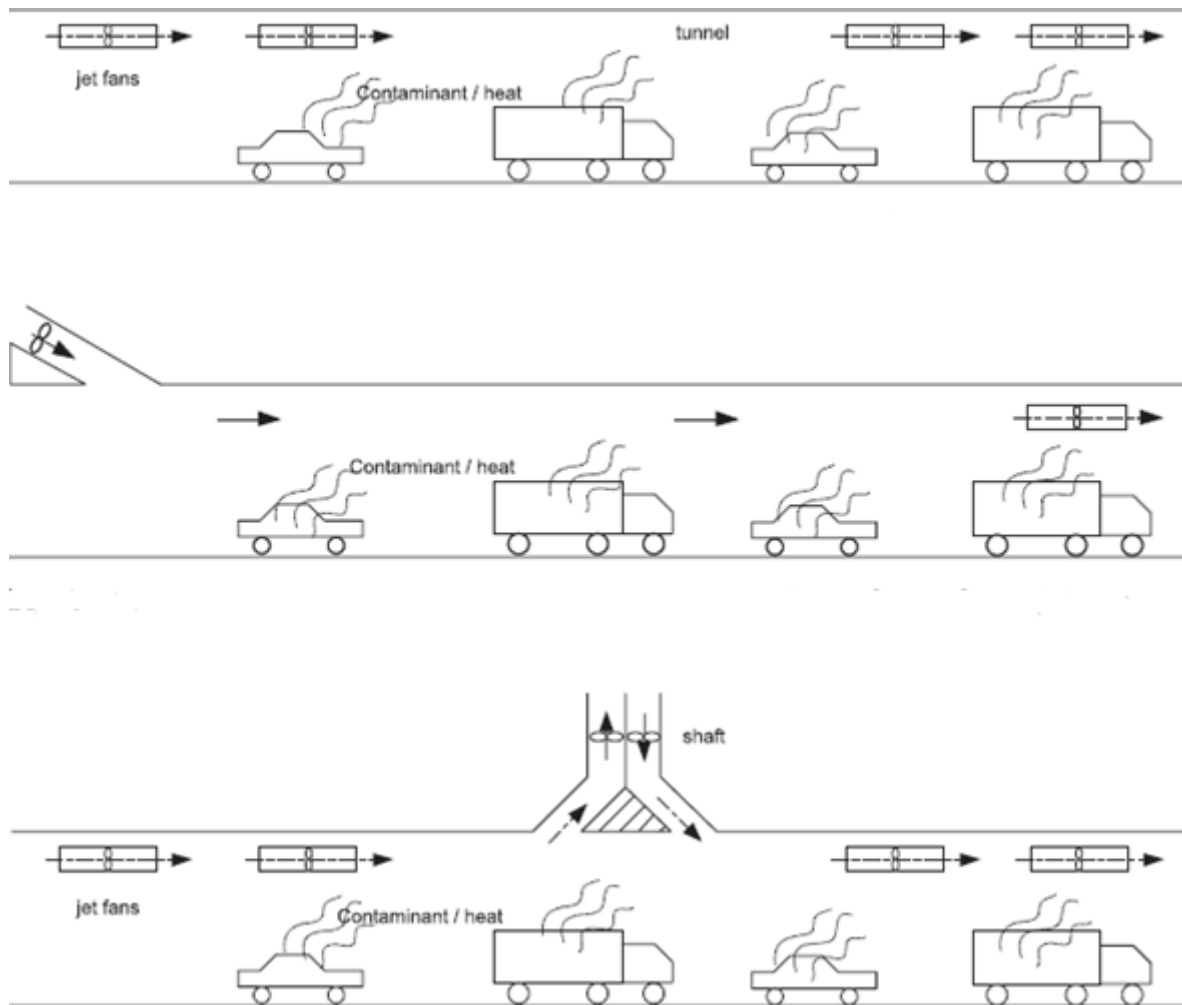
Σχήμα 2.1: Τυπική διατομή σιδηροδρομικής σήραγγας cut and cover (εικόνα από ΟΣΕ)

## 2.1 Συστήματα αερισμού

Τα συστήματα αερισμού των σήραγγων εμπίπτουν σε δύο κατηγορίες, τον μηχανικό και τον φυσικό αερισμό (Buntelius et al. 1996). Ο φυσικός αερισμός επιτυγχάνεται ανάλογα με τις μετεωρολογικές συνθήκες (πίεση, θερμοκρασία, ταχύτητα ανέμου) που επικρατούν εκτός της σήραγγας. Στις σήραγγες όπου χρησιμοποιείται μηχανικός αερισμός όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2 (Haukur et al. 2015), η ποιότητα του αέρα και οι τιμές των ρύπων ρυθμίζονται με τη χρήση αξονικών, φυγοκεντρικών ανεμιστήρων ή αξονικών ανεμιστήρων ώσης (jet fans), και με τη βοήθεια συσκευών επιτήρησης, μετρήσεων και ελέγχου. Ο μηχανικός αερισμός μπορεί να είναι διαμήκης ή ημι-εγκάρσιος. Για να επιτευχθεί ο επαρκής αερισμός σε μια σήραγγα θα πρέπει η ταχύτητα ροής να είναι ίση ή μεγαλύτερη από μια κρίσιμη ταχύτητα (critical velocity). Ως κρίσιμη ταχύτητα ορίζεται η ελάχιστη διαμήκης ταχύτητα αερισμού έτσι ώστε να αποφευχθεί το φαινόμενο αναστροφής του καπνού σε περίπτωση φωτιάς (Haukur et al. 2015). Αυτή η ταχύτητα επιτυγχάνεται από τα συστήματα αερισμού που έχουν επιλέξει οι σχεδιαστές.



Σχήμα 2.2: Αποκαπνισμός με διαμήκη αερισμό (Haukur et al. 2015)

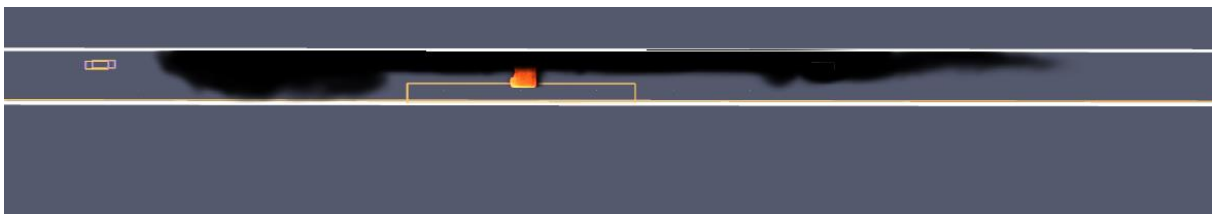


Σχήμα 2.3: Διαμήκης αερισμός με ανεμιστήρες ώσης, συνδυασμό στομίου Saccardo και ανεμιστήρων ώσης, φρέαρ προσαγωγής-απαγωγής και ανεμιστήρων ώσης (Haukur et al. 2015)

## 2.2 Κρίσιμη ταχύτητα και μήκος ανεστραμμένου καπνού

Ο σκοπός ενός συστήματος εξαερισμού σε μια σήραγγα, πέραν του να διατηρεί την ποιότητα του αέρα, είναι να κρατήσει όσο το δυνατόν μεγαλύτερο μέρος της απαλλαγμένο από καπνό για όσο περισσότερη ώρα γίνεται. Το πιθανότερο είναι ότι υπάρχουν ακόμα άνθρωποι στο μέρος της σήραγγας προς το οποίο εξαναγκάζεται η ροή καπνού. Σε μια τέτοια κατάσταση η ενεργοποίηση του συστήματος εξαερισμού πρέπει να καθυστερήσει λίγο ή να λειτουργήσει σε χαμηλή ένταση έτσι ώστε να μην διαταραχθεί η φυσική διαστρωμάτωση των στρώσεων αέρα και καπνού (Barbato et al. 2014; Brandt and Haerter 2014). Αυτή η κατάσταση θα διατηρηθεί εάν η ταχύτητα του αέρα δεν υπερβαίνει την κρίσιμη ταχύτητα (Klote et al. 2012). Όπως φαίνεται το σύστημα εξαερισμού έχει μεγάλο αντίκτυπο στο επίπεδο ασφάλειας, επομένως θα πρέπει να ληφθεί υπόψη όταν αναλύονται θέματα ασφάλειας. Σε περίπτωση φωτιάς

σε μια σήραγγα, ο θερμός καπνός λόγω άνωσης υψώνεται προς την οροφή της σήραγγας και εξαπλώνεται κατά μήκος αυτής. Ανάλογα την ταχύτητα του αέρα, ο θερμός καπνός και ο ψυχρός αέρας αναμειγνύονται και έτσι ο καπνός διασπείρεται κατάντη του μετώπου της φωτιάς σε όλη τη διατομή της σήραγγας (Gehandler 2015b). Θερμός καπνός κινείται επίσης αντίθετα προς την ροή του αέρα, ανάντη του μετώπου και καθώς ψύχεται κατέρχεται προς το έδαφος. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται αναστροφή (backlayering) του καπνού όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4. Η ποσότητα του καπνού που θα αναστραφεί ανάντη του μετώπου φωτιάς και η απόσταση κατάντη του μετώπου όπου θα παραμείνει, εξαρτάται από τις συνθήκες αερισμού (Carvel and Beard 2005; Haukur et al. 2015).



Σχήμα 2.4: Απεικόνιση του backlayering στο FDS

Οι Hu et al. (2008) πρότειναν ότι ο καπνός σταματά να εξαπλώνεται όταν οι οριζόντιες δυνάμεις αδράνειας που προκαλούνται από την άνωση του θερμού καπνού ισούνται με τις δυνάμεις αδράνειας του αέρα εξαερισμού. Με βάση μια σειρά πειραμάτων μικρής κλίμακας και περαιτέρω ανάλυσης για την μελέτη της συσχέτισης της κρίσιμης ταχύτητας και του ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας (HRR – Heat Release Rate), λαμβάνοντας υπόψη τις διαφορετικές γεωμετρίες των πηγών φωτιάς, από τους Oka and Atkinson (1995) και Li et al. (2010), διαπιστώθηκε ότι η αδιάστατη κρίσιμη ταχύτητα είναι ανάλογη με το αδιάστατο  $HRR^{1/3}$  στην περίπτωση μικρής και μεσαίας ισχύος HRR και είναι ανεξάρτητο από το HRR στην περίπτωση μεγάλου HRR. Οι Riess and Bettelini (1999) διαπίστωσαν ότι το φαινόμενο ελκυσμού πρέπει να ληφθεί υπόψη στον σχεδιασμό αερισμού κεκλιμένων σήραγγων με γωνίες κλίσης άνω του 1-2%. Οι Wu and Bakar (2000) παρατήρησαν ότι με το ίδιο καύσιμο και τη διαμήκη ταχύτητα εξαερισμού, το μήκος του στρώματος ανεστραμμένου καπνού αυξάνεται σταδιακά με την αύξηση της διατομής της σήραγγας, όταν η διατομή της σήραγγας φτάνει μια συγκεκριμένη τιμή. Όταν η ταχύτητα ροής γίνει ίση ή μεγαλύτερη από την κρίσιμη ταχύτητα τότε επιτυγχάνεται ο αποκαπνισμός της σήραγγας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5: Η επίδραση της κρίσιμης ταχύτητας στην φωτιά εντός σήραγγας (Haukur et al. 2015)

Ο Lee and Ryou (2005) διερεύνησαν την κρίσιμη ταχύτητα με διάφορες αναλογίες διαστάσεων (ύψος / πλάτος) διατομής της σήραγγας, πραγματοποιώντας μια σειρά πειραμάτων μικρής κλίμακας. Διαπίστωσαν ότι η κρίσιμη ταχύτητα αυξάνεται με την αναλογία διαστάσεων. Αναλύθηκε επίσης η περίπτωση ατυχήματος φωτιάς με οχήματα που αποφράσσουν την σήραγγα (Lee and Tsai 2012; Gannouni and Ben Maad 2016). Βρέθηκε ότι όσο αυξάνεται η απόσταση από την απόφραξη ανάντη της φωτιάς προς την πηγή φωτιάς, τόσο το μήκος του στρώματος ανεστραμμένου καπνού όσο και η κρίσιμη ταχύτητα αρχικά μειώνονται και στη συνέχεια προσεγγίζουν μια συγκεκριμένη τιμή, η οποία είναι ίση με την τιμή που θα είχαν αυτά τα δύο μεγέθη χωρίς την παρουσία εμποδίου. Οι Tsai et al. (2010) μελέτησαν την κρίσιμη ταχύτητα σε περίπτωση πολλαπλών εστιών φωτιάς στη σήραγγα. Διαπιστώθηκε ότι για δύο πανομοιότυπες πυρκαγιές, η κρίσιμη ταχύτητα μειώνεται με το διαχωρισμό έως ότου οι δύο πηγές φωτιάς διαχωριστούν εντελώς και η κρίσιμη ταχύτητα καθορίζεται από μια μόνο εστία φωτιάς. Οι Heidarinejad et al. (2016) διερεύνησαν επίσης την κρίσιμη ταχύτητα σε δύο πηγές πυρκαγιών. Διαπιστώθηκε ότι η κρίσιμη ταχύτητα αλλάζει όταν αυξάνεται η απόσταση μεταξύ δύο πυρκαγιών κατά μήκος της σήραγγας, ενώ στην κατά πλάτος περίπτωση, όταν οι δύο εστίες εφάπτονται στους τοίχους, κρίσιμη ταχύτητα αερισμού αυξάνεται σημαντικά. Μέσω αριθμητικής προσομοίωσης, οι Zhang et al. (2019a) μελέτησαν την επίδραση του μεγάλου υψομέτρου με χαμηλή πίεση και χαμηλό οξυγόνο στην κίνηση του καπνού σε μια σήραγγα. Βασιζόμενοι στην θεωρητική ανάλυση, πρότειναν τη συσχέτιση του μήκους του στρώματος ανεστραμμένου καπνού και της κρίσιμης ταχύτητας. Οι Tanaka et al. (2018) πραγματοποίησαν μια σειρά πειραμάτων μικρής κλίμακας για να μελετήσουν τα χαρακτηριστικά του καπνού λαμβάνοντας υπόψη την κλιμάκωση της αγωγής θερμότητας μέσω των τοιχωμάτων της σήραγγας, και παρουσίασαν κάποιες σχέσεις για την εκτίμηση της κρίσιμης ταχύτητας και του μήκους του στρώματος ανεστραμμένου καπνού.

Σύμφωνα με το (NFPA 2011) η κρίσιμη ταχύτητα είναι «η ελάχιστη ταχύτητα σταθερής κατάστασης της ροής αέρα εξαερισμού που κινείται προς τη φωτιά, μέσα σε σήραγγα ή διάδρομο, που απαιτείται για να αποφευχθεί η αναστροφή του καπνού στο χώρο της φωτιάς». Η κρίσιμη ταχύτητα υπολογίζεται από δύο σχέσεις οι οποίες επιλύονται στην ίδια επανάληψη (Tarada 2010) και είναι οι εξής:

$$V_c = K_1 K_g \left( \frac{gHQ}{\rho C_p A T_f} \right)^{1/3} \quad 2.1$$

Όπου  $V_c$  η κρίσιμη ταχύτητα (m/s),  $K_1$  ο συντελεστής του αριθμού Froude (0.805),  $K_g$  ο συντελεστής κλίσης (grade) (1 για επίπεδα χωρίς κλίση),  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας ( $m/s^2$ ),  $H$  το ύψος της σήραγγας (m),  $Q$  ο ρυθμός εκλυόμενης θερμότητας (kW),  $\rho$  η πυκνότητα του αέρα σε κανονικές συνθήκες ( $kg/m^3$ ),  $C_p$  η θερμοχωρητικότητα του αέρα ( $KJ/Kg K$ ),  $A$  η επιφάνεια της διατομής της σήραγγας ( $m^2$ ) και  $T_f$  η μέση θερμοκρασία των καυσαερίων (K). Η θερμοκρασία καυσαερίων υπολογίζεται από την σχέση:

$$T_f = \frac{Q}{\rho C_p A V_c} + T \quad 2.2$$

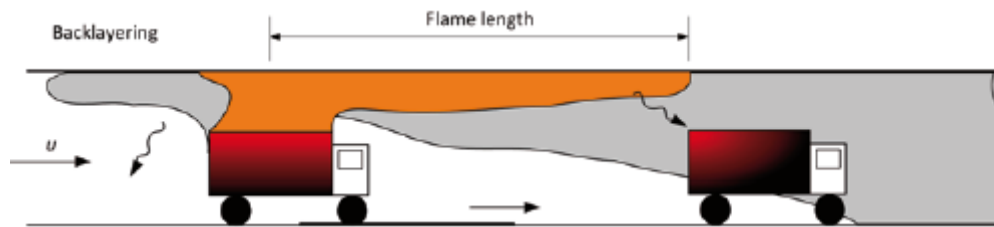
Όπου  $T$  είναι η θερμοκρασία του εισερχόμενου αέρα (K).

### 2.3 Προσδιορισμός των συνθηκών που επικρατούν σε πυρκαγιά εντός σήραγγας

Οι πυρκαγιές σε σήραγγες έχουν πολλούς κινδύνους. Στην πραγματικότητα, το 85% των θανάτων προκλήθηκε από εισπνοή τοξικού καπνού και λίγοι άνθρωποι πέθαναν άμεσα από την φωτιά σε πυρκαγιές σήραγγων (Alarie 2002). Εξαιτίας των χαρακτηριστικών της κατασκευής μιας σήραγγας, η θερμοκρασία της οροφής κοντά στην πηγή φωτιάς θα είναι πολύ υψηλή. Έτσι ενδέχεται να προκληθούν βλάβες στην κατασκευαστική δομή της σήραγγας και μπορεί ακόμη και να προκληθεί την κατάρρευση της επένδυσης της σήραγγας (Leitner 2001; Amouzandeh et al. 2014; Zhang et al. 2020). Επομένως, το να γνωρίζουμε την μέγιστη θερμοκρασία οροφής είναι πολύ σημαντικό για την ανίχνευση πυρκαγιάς, τον έλεγχο του καπνού και την ασφαλή εκκένωση (Tao et al. 2020). Μια πυρκαγιά αναπτύσσεται πολύ γρήγορα σε μια σήραγγα. Υπάρχει ακόμα η πιθανότητα η φωτιά να μεταπηδήσει σε ένα σχετικά μακρινό όχημα (Kile and Gonzalez 1997) όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.6. Σύμφωνα με πραγματικές δοκιμές η ισχύς μιας φωτιάς ενός τυπικού επιβατικού αυτοκινήτου είναι της τάξης 4–6 MW



και περίπου 30 MW για ένα HGV (Klote et al. 2012). Ο χρόνος που χρειάζεται για να αναπτυχθεί πλήρως η φωτιά είναι από λίγα λεπτά μέχρι 15 min (Jannsens 2008), μπορεί όμως αυτός ο χρόνος να είναι σημαντικά μικρότερος (Aralt and Nilsen 2009).



Σχήμα 2.6: Παράδειγμα διαφορετικών διεργασιών που συμβαίνουν κατά την διάρκεια πυρκαγιάς (Haukur et al. 2015)

Ο προσδιορισμός των συνθηκών που επικρατούν σε μια πυρκαγιά εντός σήραγγας είναι δύσκολος λόγω του πλήθους των παραγόντων που επηρεάζουν την ανάπτυξή της. Γι' αυτό έχουν δημιουργηθεί τα αριθμητικά μοντέλα, τα οποία επιτρέπουν αναλύσεις πολλαπλών παραλλαγών. Η κατασκευή ενός αριθμητικού μοντέλου απαιτεί πολλές απλοποιήσεις και παραδοχές συνεπώς, τα αριθμητικά αποτελέσματα θα πρέπει, εάν είναι δυνατόν, να επικυρωθούν με πραγματικές ή σε κλίμακα μετρήσεις (Guo and Zhang 2014; Cascetta et al. 2016). Ο Alpert (1972) από πειράματα εξήγαγε κάποιες ημιεμπειρικές σχέσεις που υπολογίζουν τη μέγιστη θερμοκρασία στην οροφή μιας σήραγγας. Οι Kurioka et al. (2003) πρότειναν ένα μοντέλο για την πρόβλεψη της μέγιστης θερμοκρασίας στην οροφή, βασιζόμενοι σε πειράματα μικρής κλίμακας. Οι Lou et al. (2017) μελέτησαν την κατανομή της θερμοκρασίας σε σήραγγα με ημι-εγκάρσιο σύστημα αερισμού, με διαφορετικούς HRR και ρυθμούς εξαγωγής καπνού, με το FDS και απέκτησαν μερικές χρήσιμες εμπειρικές σχέσεις. Οι μελέτες που έγιναν από τους Tang et al. (2017a), Tang et al. (2017b) και Tang et al. (2017c) είχαν ως σκοπό την πειραματική μελέτη της μέγιστης θερμοκρασίας σε μια σήραγγα με διαφορετικές συνθήκες φωτιάς και μηχανικού διαμήκη αερισμού και απέκτησαν κάποιες εμπειρικές υπολογιστικές σχέσεις σχετικά με την μέγιστη θερμοκρασία.

#### 2.4 Ασφάλεια του πληθυσμού και εκκένωση

Όσον αφορά την ασφάλεια του πληθυσμού που βρίσκεται εντός της σήραγγας, αυτή εξαρτάται από διάφορα κριτήρια όπως το ύψος των στρωμάτων καπνού, πιθανή δηλητηρίαση, θερμική έκθεση κ.α. Ένα από τα βασικά κριτήρια είναι η ποσότητα τοξικών παραγώγων της καύσης που εισπνέει το άτομο κατά τη διάρκεια του συμβάντος και της διαδικασίας εκκένωσης (Ronchi 2012). Αυτό υπολογίζεται μέσω του δείκτη FED (Fractional Effective Doses). Ο

δείκτης FED παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από τον Purser (2008) και έκτοτε υιοθετήθηκε από διάφορους οργανισμούς, όπως για παράδειγμα ο NFPA (NFPA 2011). Η βασική ιδέα είναι ότι το άτομο λαμβάνει μια δόση τοξικών προϊόντων για μια χρονική διάρκεια και θεωρείται λιπόθυμος ή νεκρός αν αναπνεύσει συγκεκριμένη δόση τοξικών αερίων. Για την αξιολόγηση του πόσο απειλείται η ζωή ενός ανθρώπου, ο FED είναι ο κύριος παράγοντας που εξετάζεται (Ronchi 2012) παράλληλα με την θερμική έκθεση και την χαμηλή ορατότητα λόγω καπνού (άρα και την δυσκολία πρόσβασης στις εξόδους κινδύνου).

Η εκκένωση από τα υπόγεια συστήματα μαζικών μεταφορών μπορεί να είναι περίπλοκη και το αποτέλεσμα μιας κατάστασης εκκένωσης εξαρτάται από πολλές διαφορετικές παραμέτρους. Παράμετροι που μπορούν να επηρεάσουν την ταχύτητα βόδισης ή τη δυνατότητα για ασφαλή εκκένωση μπορεί για παράδειγμα να είναι η ορατότητα, ο σχεδιασμός του τρένου και της σήραγγας ή η φυσική κατάσταση των ανθρώπων (Carlson et al. 2019). Για να ελαχιστοποιηθεί η ποσότητα των βράχων που πρέπει να αφαιρεθούν, οι νέες σήραγγες είναι συχνά σχεδιασμένες με κυκλική διατομή και υπερυψωμένα κρηπιδώματα. Ένα υπερυψωμένο κρηπιδώμα είναι μια πλατφόρμα τοποθετημένη στο ίδιο επίπεδο με το δάπεδο του τρένου, ή κάπου μεταξύ του επιπέδου των ραγών και του επιπέδου του δαπέδου του τρένου. Η μειωμένη διαφορά ύψους μεταξύ του επιπέδου του τρένου και του κρηπιδώματος, σε σύγκριση με την εκκένωση αμαξοστοιχίας απευθείας στην περιοχή των ραγών, είναι μια μέθοδος για την αύξηση της ασφάλειας του πληθυσμού. Η δυσκολία εκκένωσης μιας αμαξοστοιχίας προς τις ράγες, ειδικά για άτομα με κινητικές δυσκολίες, έχει αναλυθεί στο METRO-project των Ingason et al. (2012).

Πειράματα δείχνουν ότι ένας μικτός πληθυσμός που περιλαμβάνει άτομα με αναπηρίες ή/και προσωρινές αναπηρίες, κινείται με χαμηλότερη ταχύτητα σε σύγκριση με έναν ομοιογενή πληθυσμό εξαιρουμένων των ατόμων με αναπηρίες (Carlson et al. 2019). Οι Gwynne et al. (2001) εισήγαγαν ένα είδος προσαρμοστικής συμπεριφοράς για το λογισμικό εκκένωσης κτηρίων EXODUS, το οποίο αναπτύχθηκε από το Fire Safety Engineering Group του πανεπιστημίου του Greenwich, δίνοντας τη δυνατότητα στον πληθυσμό να πάρει αποφάσεις σχετικά με την επιλογή της καλύτερης διαθέσιμης οδού διαφυγής, κατά την διάρκεια εκκένωσης σε περίπτωση φωτιάς. Οι Tsukahara et al. (2011) μελέτησαν την εκκένωση από σταθμό του μετρό σε περίπτωση φωτιάς. Ο σταθμός που πρότειναν και μελέτησαν είχε τέσσερα υπόγεια, όπου το τέταρτο είχε καθοδική πορεία εκκένωσης, αντίθετα προς την ροή του καπνού. Η επίδραση του καπνού, της θερμότητας και των τοξικών αερίων στις σκάλες εκκένωσης, υπολογίστηκαν

παρουσία φωτιάς στο τρίτο υπόγειο. Οι υπολογισμοί τους έδειξαν ότι οι σκάλες εκκένωσης είχαν υψηλή πυκνότητα καπνού, θερμοκρασίας και συγκεντρώσεις CO και CO<sub>2</sub>. Αυτοί οι παράγοντες επηρέασαν σε μεγάλο βαθμό όλες τις ανοδικές σκάλες εκκένωσης λόγω της ανοδικής ροής του καπνού και της θέσης των οδών εκκένωσης. Κατέληξαν στο ότι μια καθοδική πορεία εκκένωσης είναι καλύτερη για φωτιές μεγάλης κλίμακας σε υπόγειους σταθμούς, καθώς οι σκάλες από το τρίτο προς το τέταρτο υπόγειο δεν επηρεάστηκαν από την φωτιά. Σε πείραμα που πραγματοποιήθηκε από τους Sørensen and Dederichs (2014), μια ομάδα με μικτό πληθυσμό χρειάστηκε διπλάσιο χρόνο εκκένωσης σε σύγκριση με το χρόνο εκκένωσης ενός ομοιογενούς πληθυσμού. Οι Qin et al. (2020) χρησιμοποίησαν το λογισμικό Pathfinder για την προσομοίωση της εκκένωσης σε σταθμό του μετρό με ειδική διαμόρφωση. Αναλύθηκε η εκκένωση με σενάριο πυρκαγιάς, αλλάζοντας το ρυθμό ροής πληθυσμού στο σταθμό. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι μεγαλύτερες δυσκολίες κατά την εκκένωση αντιμετωπίζονται κυρίως στην είσοδο προς την σκάλα και ότι το πλάτος της εξόδου έχει μικρή επίδραση στην ανακούφιση του συνωστισμού. Διαπίστωσαν επίσης ότι ο αριθμός των ατόμων στην πλατφόρμα πρέπει να περιορίζεται σε 500 όταν το τρένο είναι γεμάτο, όταν ο αριθμός των επιβατών στο τρένο είναι 1542, ο αριθμός των ατόμων στην πλατφόρμα πρέπει να περιορίζεται σε 480 και όταν ο αριθμός των επιβατών στο τρένο είναι 1224, δεν πρέπει να ελέγχονται περισσότερα από 800 άτομα στην πλατφόρμα. Οι Ronchi et al. (2016) δημιούργησαν και δοκίμασαν ένα μοντέλο το οποίο λαμβάνει υπόψη την επίδραση της κόπωσης στην κίνηση του πληθυσμού κατά την εκκένωση από και προς τις σκάλες. Πιο συγκεκριμένα το μοντέλο λαμβάνει υπόψη φυσικούς παράγοντες όπως η σωματική κόπωση και ψυχολογικούς παράγοντες, δηλαδή, κίνητρα που λειτουργούν ως μεταβλητή εξισορρόπησης του αντιληπτού κινδύνου και της αντιληπτής κόπωσης. Σύμφωνα με τους Jin et al. (2020), ένα ατύχημα σε υπόγειο σταθμό μπορεί να προκαλέσει ένα ντόμινο επιπτώσεων που μπορεί να παρουσιάσουν πολλαπλούς κινδύνους. Στην μελέτη τους ανέλυσαν τους χρόνους εκκένωσης και της πυκνότητας των επιβατών. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι εάν οι πεζοί τείνουν να διαφύγουν προς την κοντινότερή τους έξοδο, θα προκληθεί μεγάλος πίεση και συνωστισμός σε κάποια στενή περιοχή. Εάν αυτοί οι κόμβοι αποτύχουν η γενική απόδοση της εκκένωσης θα επηρεαστεί σοβαρά. Ωστόσο, μια υπερβολικά διασκορπισμένη μετακίνηση προς διάφορες εξόδους σπαταλά την ικανότητα κυκλοφορίας και καθυστερεί τη διαδικασία εκκένωσης. Επομένως, είναι απαραίτητο να εξισορροπηθεί ο γενικός χρόνος εκκένωσης και η τοπική πυκνότητα του πληθυσμού στη διαδικασία εκκένωσης.

#### 2.4.1 Επίδραση της θερμότητας

Οι κυριότεροι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η επίπτωση της θερμότητας στον άνθρωπο υπό την μορφή θερμικής ακτινοβολίας και συναγωγής είναι η ένταση της και ο χρόνος έκθεσης σε αυτή. Οι σημαντικότερες συνέπειες είναι η πρόκληση εγκαυμάτων λόγω της μεταφοράς θερμότητας στο δέρμα. Διακρίνονται τρεις τύποι εγκαυμάτων (Assael and Kakosimos 2007):

1ου βαθμού: Προκαλείται ζημιά στην εξωτερική στοιβάδα του δέρματος (επιδερμίδα) υπό την μορφή κοκκινίλας, οιδήματος, πρηξίματος και πόνου

2ου βαθμού: Η ζημιά επεκτείνεται στους ενδιάμεσους ιστούς του δέρματος (χόριο) προκαλώντας περαιτέρω οίδημα, οξύ πόνο και φουσκάλες. Η ανώτερη στοιβάδα της επιδερμίδας καταστρέφεται σε βάθος 0,07 – 0,12mm

3ου βαθμού: Παρατηρείται περαιτέρω επέκταση της ζημιάς στους ιστούς προκαλώντας εκτεταμένη καταστροφή των ιστών και των νευρικών απολήξεων. Ως συνέπεια παρατηρείται μούδιασμένη αίσθηση του δέρματος.

Εγκαύματα κυρίως 2ου και 3ου βαθμού είναι δυνατόν να οδηγήσουν στον θάνατο ανάλογα με την έκταση. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι έγκαυμα σε έκταση 50% της συνολικής επιφάνειας του δέρματος σε παιδί ηλικίας 0 – 9 ετών έχει 80% πιθανότητα επιβίωσης, σε ενήλικα 30 – 35 ετών 50% πιθανότητα επιβίωσης ενώ σε άτομα >60 ετών δεν υπάρχει πιθανότητα επιβίωσης.

Αυξημένη θερμοκρασία στον περιβάλλοντα χώρο μπορεί να δυσκολέψει την κίνηση ή την εργασία ενός ατόμου. Η κρίσιμη θερμοκρασία, σε κλειστούς χώρους όπως μια σήραγγα, πάνω από την οποία εξασθενούν οι δυνάμεις του ανθρώπινου σώματος είναι οι 60° C (M.O et al. 2013).

#### 2.4.2 Επίδραση τοξικών ρύπων

Η διασπορά επικίνδυνων τοξικών ρύπων όπως μονοξείδιο του άνθρακα (CO), οξείδια του αζώτου (NO<sub>x</sub>) και οξείδια του θείου (SO<sub>x</sub>) κατά τη χρονική εξέλιξη της φωτιάς στο εσωτερικό της σήραγγας δυσχεραίνει τη διαδικασία εκκένωσης και αυτοδιάσωσης των χρηστών. Οι επιδράσεις των τοξικών ρύπων – που θεωρούνται ως χημικοί παράγοντες – εξαρτώνται από την ένταση και τον χρόνο έκθεσης των ατόμων σε αυτούς. Για το σκοπό αυτό δίδονται στη συνέχεια οι ορισμοί εκφράσεων των Οριακών Τιμών εκφρασμένες σε [mg/m<sup>3</sup>] είτε σε [ppm]

σε κανονικές συνθήκες, σύμφωνα με την Αμερικάνικη Εταιρεία Κυβερνητικών Υγιεινολόγων Βιομηχανίας (American Conference of Governmental Industrial Hygienists – ACGIH):

*Οριακή Τιμή – Χρονικά Σταθμισμένη Μέση Τιμή (TLV – TWA)*, είναι η χρονικά σταθμισμένη μέση τιμή της συγκέντρωσης ουσίας για μια συνηθισμένη έκθεση του ατόμου στον χημικό παράγοντα μετρημένη στη ζώνη αναπνοής κατά τη διάρκεια τυπικής 8ωρης ημερήσιας και 40ωρης εβδομαδιαίας εργασίας

*Οριακή Τιμή – Οριακή Τιμή Έκθεσης Μικρής Διάρκειας (TLV – STEL)*, είναι η συγκέντρωση στην οποία τα άτομα μπορούν να εκτίθενται συνεχώς στον χημικό παράγοντα για μικρό χρονικό διάστημα χωρίς να υποφέρουν από ερεθισμό, χρόνια ή μη αναστρέψιμη καταστροφή των ιστών, νάρκωση σε τέτοιο βαθμό ώστε να αυξάνεται η πιθανότητα τραυματισμού από ατύχημα, να εμποδίζεται η αυτοπροστασία ή εν γένει να μειώνεται η απόδοση (υπό την προϋπόθεση ότι δεν υπερβαίνονται οι τιμές της ημερήσιας TLV – TWA)

Παράλληλα με την Οριακή Τιμή έχει καθιερωθεί και η Ανώτατη Οριακή Τιμή Έκθεσης, που ορίζεται ως η τιμή την οποία δεν επιτρέπεται να ξεπερνά η μέση χρονικά σταθμισμένη έκθεση του ατόμου στον χημικό παράγοντα, μετρημένη στη ζώνη του αέρα αναπνοής του, κατά τη διάρκεια οποιαδήποτε δεκαπεντάλεπτης περιόδου στο τυπικό ημερήσιο χρόνο έκθεσης του ακόμα και αν τηρείται η οριακή τιμή έκθεσης. Ο βασικός τοξικός ρύπος που μετρείται στις περισσότερες πειραματικές διατάξεις είναι το μονοξείδιο του άνθρακα (CO). Η συγκέντρωση αναφοράς στον άνθρωπο εξαρτάται από τις συνθήκες του. Για παράδειγμα βρέθηκε ότι σε καπνιστές και σε ανθρώπους που ζουν σε μεγάλες πόλεις (εξαιτίας της ατμοσφαιρικής ρύπανσης) η συγκέντρωση στο αίμα είναι αυξημένη. Στο Σχήμα 2.7 (Μιχαήλ Λαζαρίδης 2007) δίδονται περιληπτικά τα παρατηρούμενα συμπτώματα ανάλογα με τα επίπεδα του εισπνεόμενου CO και της συγκέντρωσης του COHb στο αίμα.

<b>Συγκέντρωση CO στον εισπνεόμενο αέρα</b>	<b>Επίπεδα COHb</b>	<b>Συμπτώματα</b>
35 ppm	< 10%	Πονοκέφαλος και ζαλάδες μετά από 6-8 ώρες συνεχόμενης έκθεσης
100 ppm	> 10%	Ελαφρύς πονοκέφαλος μέσα σε 2-3 h
200 ppm	20%	Ελαφρύς πονοκέφαλος μέσα σε 2-3 h και απώλεια συνείδησης

400 ppm	25%	Μετωπιαία κεφαλαλγία σε 60 – 120 min
800 ppm	30%	Ζαλάδες -ναυτία στα πρώτα 45min. Αναισθησία σε 120 min
1600 ppm	40%	Πονοκέφαλος και ζαλάδες -ναυτία στα πρώτα 20min. Θάνατος μέσα σε 120 min
3200 ppm	50%	Πονοκέφαλος και ζαλάδες -ναυτία στα πρώτα 5-10min. Θάνατος μέσα σε 30 min
6400 ppm	60%	Πονοκέφαλος και ζαλάδες στα πρώτα 1-2min. Σπασμοί, διακοπή αναπνοής και θάνατος σε λιγότερο από 20 min
12800 ppm	> 70%	Θάνατος εντός 3 min

Σχήμα 2.7: Συμπτώματα επίδρασης μονοξειδίου άνθρακα, ανάλογα με την συγκέντρωση στον εισπνεόμενο αέρα, στον ανθρώπινο οργανισμό

#### 2.4.3 Επίδραση μη τοξικών ρύπων

Οι αυξημένες συγκεντρώσεις του CO<sub>2</sub> που γενικά δεν θεωρείται τοξικός ρύπος, επιταχύνει την συχνότητα της αναπνευστικής λειτουργίας και ως αποτέλεσμα παρατηρείται αυξημένη πρόσληψη των υπόλοιπων τοξικών ρύπων (CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>) που αναφέρθηκαν παραπάνω. Αντίθετα η μειωμένη συγκέντρωση του οξυγόνου (O<sub>2</sub>) συνέπεια των καταναλισκόμενων ποσοτήτων κατά την καύση έχει ως συνέπεια την ανεπαρκή οξυγόνωση των ιστών και του αίματος και την μειωμένη αντανακλαστική ικανότητα του ανθρώπου να συνεχίσει την διαδικασία αυτοδιάσωσης κατά την εκκένωση της σήραγγας.

#### 2.5 Υπολογιστικές μέθοδοι και μοντελοποίηση

Η επίλυση προβλημάτων με τύρβη, όπως είναι μια περίπτωση φωτιάς, γίνεται με τη χρήση των μεθόδων RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes), LES (Large Eddy Simulation) και DNS (Direct Numerical Simulation). Η προσομοίωση τυρβωδών ροών με υψηλούς αριθμούς Reynolds, με την μέθοδο DNS έχει απαγορευτικό κόστος, λόγω του ότι είναι πολύ απαιτητική σε υπολογιστική ισχύ (Pope 2001; Spalart 2000). Η ανάγκη για μείωση του υπολογιστικού κόστους των προσομοιώσεων οδήγησαν στο σχεδιασμό της RANS και της LES (Hanjalić 1994; Wilcox 1998; Pope 2001; Sagaut 2006; Heinz 2020). Οι Van Maele and Merci (2008) έκαναν σύγκριση των μεθόδων RANS και LES για τον υπολογισμό της κρίσιμης ταχύτητας σε φωτιά σε σήραγγα με διαμήκη αερισμό. Τόσο τα αποτελέσματα από τη RANS όσο και από

την LES δείχνουν ότι η κρίσιμη ταχύτητα αερισμού εξαρτάται από το HRR (Heat Release Rate). Με τη RANS και το LES, η προβλεπόμενη κρίσιμη ταχύτητα αερισμού είναι χαμηλότερη για μικρό HRR σε σύγκριση με την προβλεπόμενη τιμή για μεγάλο HRR. Παρατηρήθηκε επίσης ότι με την LES, η κρίσιμη ταχύτητα αερισμού έχει υπερεκτιμηθεί και για τα δύο HRR, ενώ με την RANS η τιμή της κρίσιμης ταχύτητας έχει υποεκτιμηθεί και στις δυο περιπτώσεις. Οι περισσότερες προσομοιώσεις για φωτιά σε εσωτερικούς χώρους γίνονται με τον κώδικα FDS και κατά συνέπεια με την μέθοδο LES. Οι Gannouni and Ben Maad (2016) μελέτησαν το μήκος ανεστραμμένου καπνού μέσω του FDS και επαλήθευσαν τα αποτελέσματα με το μοντέλο των Hu et al. (2008), ενώ τα αποτελέσματα της μέγιστης θερμοκρασίας επικυρώθηκαν με το μοντέλο των Kurioka et al. (2003). Οι Cheng et al. (2021) μελέτησαν μέσω προσομοίωσης, την επίδραση της φωτιάς από εμπρησμό στους επιβάτες ενός τρένου, ενώ αυτό βρίσκεται εντός σήραγγας, για μεγέθη φωτιάς 6-16 MW. Συνέκριναν επίσης τα αποτελέσματα του διαμήκη αερισμού σε σχέση με την μη ύπαρξη συστήματος αερισμού. Οι Weng et al. (2020) εξέτασαν μέσω προσομοίωσης την βέλτιστη απόσταση μεταξύ των jet fans σε σήραγγες 500, 550 και 600 m με φωτιά 5 MW, ενώ στη συνέχεια επαλήθευσαν και επικύρωσαν τα αποτελέσματα μέσω πειράματος σε σήραγγα κλίμακας 1:15. Οι Hua et al. (2021) εξέτασαν την ζημιά που προκαλείται από φωτιά στην επένδυση σιδηροδρομικής σήραγγας, μέσω προσομοίωσης στο FDS. Οι Guo et al. (2020) εξέτασαν την επίδραση της ταχύτητας του διαμήκη αερισμού στην διαστρωμάτωση του καπνού και την συσχέτιση της ταχύτητας και της διαστρωμάτωσης έτσι ώστε να βρεθεί το εύρος ταχύτητας για την οποία δεν διαταράσσεται η διαστρωμάτωση του καπνού κατάντη του μετώπου φωτιάς.

## **2.6 Επαλήθευση και επικύρωση των αποτελεσμάτων που εξάγονται από λογισμικά υπολογιστικής ρευστομηχανικής**

Σύμφωνα με τους Versteeg and Malalasekera (2007), κατά την μοντελοποίηση με CFD τα σφάλματα και η αβεβαιότητα είναι αναπόφευκτα. Γι' αυτό τον λόγο είναι αναγκαία η ανάπτυξη μεθόδων για την ποσοτικοποίηση του επιπέδου εμπιστοσύνης στα αποτελέσματά της. Οι δυο μέθοδοι που είναι ευρέως αποδεκτές είναι η επαλήθευση και η επικύρωση. Η επαλήθευση είναι η διαδικασία με την οποία διαπιστώνεται αν η εφαρμογή ενός μοντέλου αναπαριστά με ακρίβεια την εννοιολογική περιγραφή του μοντέλου και της λύσης του, από τον κατασκευαστή του μοντέλου. Έτσι ποσοτικοποιούνται τα σφάλματα. Η επικύρωση είναι η διαδικασία με την οποία διαπιστώνεται ο βαθμός στον οποίο ένα μοντέλο αποτελεί ακριβή αναπαράσταση του πραγματικού κόσμου. Με αυτή τη διαδικασία ποσοτικοποιείται η αβεβαιότητα.

Κατά την επαλήθευση, αφού αγνοηθούν τα σφάλματα του χρήστη και του υπολογιστή, εκτιμάται το σφάλμα στρογγυλοποίησης, η επαναληπτική σύγκλιση και το σφάλμα διακριτοποίησης. Το σφάλμα επαναληπτικής σύγκλισης μπορεί να ποσοτικοποιηθεί διερευνώντας τις επιδράσεις της συστηματικής μεταβολής των κριτηρίων τερματισμού για όλα τα υπόλοιπα, στις ποσότητες-στόχους όπως η πτώση πίεσης, η ταχύτητα σε διάφορες θέσεις κλπ. Οι διαφορές των τιμών μιας ποσότητας σε διάφορα επίπεδα των κριτηρίων τερματισμού παρέχουν ένα ποσοτικό μέτρο της εγγύτητας σε μια πλήρως συγκλίνουσα λύση. Το σφάλμα διακριτοποίησης ποσοτικοποιείται με δυο ή τρεις διαδοχικές πυκνώσεις του πλέγματος. Με αυτόν τον τρόπο επιζητάται η μονότονη μείωση του σφάλματος διακριτοποίησης (Oberkampf and Trucano 2002). Η διαδικασία της επικύρωσης περιλαμβάνει την ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας εισόδου και της αβεβαιότητας του φυσικού μοντέλου. Η αβεβαιότητα εισόδου μπορεί να εκτιμηθεί μέσω πολλαπλών εκτελέσεων του μοντέλου του CFD με διαφορετικού τύπου δεδομένα εισόδου από κατανομές πιθανότητας που βασίζονται στη μέση τιμή τους και στις αναμενόμενες μεταβολές. Η ποσοτική εκτίμηση της αβεβαιότητας της φυσικής μοντελοποίησης γίνεται μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων του CFD με πειραματικά αποτελέσματα (Oberkampf and Trucano 2002).

#### 2.6.1 Μοντέλα επαλήθευσης για τον κώδικα FDS

Οι Kurioka et al. (2003) πραγματοποίησαν πειράματα με τη χρήση τριών ειδών σήραγγων σε κλίμακα 1:10, 1:2 και πλήρη κλίμακα, με ορθογώνιο και πεταλοειδή διατομή. Οι πηγές φωτιάς, που χρησιμοποιήθηκαν ως πρότυπες, ήταν τετραγωνικής διατομής. Ο λόγος των διαστάσεων της διατομής της σήραγγας, του HRR και της διαμήκους ταχύτητας εξαναγκασμένου αερισμού ήταν μεταβλητός. Από τα πειράματα στο μοντέλο κλίμακας 1/10, αναπτύχθηκαν εμπειρικοί τύποι για τον υπολογισμό της κλίσης της φλόγας, το ύψος φλόγας και τη μέγιστη θερμοκρασία του στρώματος καπνού και τη θέση του. Η επίδραση των διαστάσεων της διατομής της σήραγγας ενσωματώθηκε σε αυτά τα μοντέλα. Διαπιστώθηκε ότι ο λόγος  $H^{3/2}/b^{1/2}$ , όπου H το ύψος του μοντέλου της σήραγγας και b το πλάτος της, είναι αντιπροσωπευτικός για τη διερεύνηση φαινομένων πυρκαγιάς σε σήραγγες. Επιβεβαίωσαν επίσης ότι αυτοί οι εμπειρικοί τύποι είναι επαρκώς εφαρμόσιμοι για την πρόβλεψη των φαινομένων που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς, κοντά στο πεδίο της πηγής τετραγωνικής διατομής από τη σύγκριση με τα αποτελέσματα των πειραμάτων στις σήραγγες κλίμακας 1:2 και πλήρους κλίμακας. Οι Hu et al. (2006) μελέτησαν πειραματικά και υπολογιστικά την μέγιστη θερμοκρασία στην οροφή σήραγγας. Αρχικά συνέκριναν τα αποτελέσματα του FDS με τις πειραματικές μετρήσεις και εν συνεχεία με τις τιμές που υπολογίσθηκαν με το μοντέλο των



Kurioka et al. (2003). Διαπιστώθηκε ότι η θερμοκρασία που προβλέφθηκε από το CFD συγκλίνει αρκετά καλά τόσο με τις πειραματικές μετρήσεις, όσο και με τα αποτελέσματα του εμπειρικού μοντέλου.

Η μελέτη των Li et al. (2011) παρέχει μια θεωρητική ανάλυση της μέγιστης θερμοκρασίας στην οροφή σήραγγας βασισμένη στην θεωρία αξονοσυμμετρικού πλουμίου πυρκαγιάς, λαμβάνοντας υπόψη τον ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας, τη διαμήκη ταχύτητα αερισμού και τη γεωμετρία της σήραγγας. Διεξήγαγαν επίσης δοκιμές κλίμακας για τη διερεύνηση της μέγιστης θερμοκρασίας στην οροφή σήραγγας σε περίπτωση πυρκαγιάς. Οι Li and Ingason (2012) ανέλυσαν τις επιπτώσεις διαφόρων συστημάτων εξαερισμού, ταχυτήτων εξαερισμού, ρυθμών απελευθέρωσης θερμότητας, γεωμετριών των σηράγγων και πηγών φωτιάς στη μέγιστη θερμοκρασία κάτω από την οροφή σήραγγας για μεγάλες πυρκαγιές. Χρησιμοποίησαν δεδομένα από πολλές δοκιμές κλίμακας μοντέλου και από πειράματα περιπτώσεων μεγάλης πυρκαγιάς σε σήραγγες, που έχουν πραγματοποιηθεί σε όλο τον κόσμο. Πρότειναν κάποιες εμπειρικές σχέσεις για τη μέγιστη θερμοκρασία στην οροφή κοντά στην πηγή φωτιάς για χαμηλές και υψηλές ταχύτητες αερισμού. Οι Rosignuolo et al. (2017) συγχώνευσαν τις εμπειρικές σχέσεις από της δύο ανωτέρω μελέτες και κατέληξαν στη δημιουργία μιας σχέσης που παρουσιάζει μη γραμμική παλινδρόμηση και υπολογίζει τις τιμές θερμοκρασίας συναρτήσει της απόστασης από την πηγή φωτιάς. Έκαναν επίσης διάκριση μεταξύ μικρών και μεγάλων πυρκαγιών διότι σε περίπτωση πολύ μεγάλης φωτιάς η φλόγα αγγίζει στην οροφή με αποτέλεσμα η μέγιστη θερμοκρασία να αντιστοιχεί στη θερμοκρασία της φλόγας και είναι δύσκολο να εκτιμηθεί ο ρυθμός ροής μάζας. Εάν ένα μέρος του όγκου της φλόγας, που περιέχει τη ζώνη καύσης, φτάσει στην οροφή της σήραγγας, η μέγιστη θερμοκρασία στην οροφή πλησιάζει μια σταθερή τιμή. Ως εκ τούτου, η μέγιστη θερμοκρασία του αερίου στην οροφή περιορίζεται με μέγιστο τους 1350 ° C.

### 2.6.2 Ανεξαρτησία πλέγματος για τον κώδικα FDS

Για να προβλεφθούν τα πραγματικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρο σε ένα σενάριο ρευστομηχανικής, χρησιμοποιώντας κώδικες ή λογισμικά CFD, είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός του πλέγματος, που χωρίζει το χώρο σε έναν πεπερασμένο αριθμό κελιών και πλεγμάτων (Lee et al. 2020). Δεδομένου ότι το CFD λαμβάνει την κατά προσέγγιση λύση της εξίσωσης Navier – Stokes με βάση τα διαιρεμένα πλέγματα, η ακρίβεια της κατά προσέγγιση λύσης εξαρτάται από την ποιότητα του πλέγματος. Επιπλέον, αυτό επιδρά στην ακρίβεια ολόκληρης της προσομοίωσης επειδή τα αποτελέσματα επηρεάζονται από την προσεγγιστική λύση του κάθε

πλέγματος (Shepherd and Johnson 2008). Επομένως ο βέλτιστος σχεδιασμός πλέγματος είναι απαραίτητος για τη βελτίωση της ακρίβειας μιας προσομοίωσης σε CFD. Ο βέλτιστος σχεδιασμός πλέγματος απαιτεί την εξέταση του σχήματος, της ποιότητας και του αριθμού των πλεγμάτων. Ειδικότερα, ο αριθμός των πλεγμάτων είναι ένας καθοριστικός παράγοντας που επηρεάζει το συνολικό υπολογιστικό κόστος και την ακρίβεια των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Τα αραιά πλέγματα δημιουργούν ένα σημαντικό σφάλμα χωρικής διακριτοποίησης, μειώνοντας έτσι την ακρίβεια των αποτελεσμάτων της ανάλυσης. Σε αντίθεση, πολύ πυκνά πλέγματα μπορεί να αυξήσουν απότομα το σφάλμα στρογγυλοποίησης πέρα από το σφάλμα περικοπής, μειώνοντας έτσι την ακρίβεια αποτελεσμάτων ανάλυσης (Tu et al. 2007). Επομένως, είναι σημαντικό να επιλεγεί ένας βέλτιστος αριθμός και πυκνότητα πλεγμάτων (Duan et al. 2015). Για να βρεθεί το βέλτιστο πλέγμα, οι περισσότερες μελέτες με CFD διεξάγουν δοκιμές ανεξαρτησίας πλέγματος. Η δοκιμή ανεξαρτησίας πλέγματος είναι μια διαδικασία που χρησιμοποιείται για την εύρεση του βέλτιστου πλέγματος που έχει τον μικρότερο αριθμό κελιών χωρίς να παρουσιάζεται διαφορά στα αριθμητικά αποτελέσματα σε σχέση με πυκνότερα πλέγματα (Lee et al. 2020). Ωστόσο, δεν υπάρχει τυποποιημένη μέθοδος ή διαδικασία για την διεξαγωγή της δοκιμής ανεξαρτησίας πλέγματος (Stern et al. 2006). Οι περισσότερες μελέτες βασίζονται στο υποκειμενική κρίση του ερευνητή για την επιλογή του βέλτιστου πλέγματος. Ως αποτέλεσμα, η αντικειμενικότητα του σχεδιασμού του πλέγματος επιδεινώνεται και οδηγεί σε μείωση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων του CFD. Για την διασφάλιση της αντικειμενικότητας της ανεξαρτησίας του πλέγματος, ο Roache (1997) προσπάθησε να ποσοτικοποιήσει το σφάλμα αριθμητικής ανάλυσης για πλέγματα που χρησιμοποιούν τον δείκτη σύγκλισης πλέγματος (Grid Convergence Index ή GCI). Ωστόσο, Η μέθοδος του Roache απαιτούσε μια πιο περίπλοκη διαδικασία υπολογισμών από τη συμβατική δοκιμή ανεξαρτησίας πλέγματος (Wang et al. 2010a). Αν και υπάρχουν κατευθυντήριες γραμμές για την αναλογία του πλέγματος για τον υπολογισμό του GCI, έχει περιορισμούς που απαιτούν την κρίση του ερευνητή για να επιλεγεί το πλέγμα αναφοράς (Lee et al. 2020). Όσον αφορά τον βέλτιστο σχεδιασμό πλέγματος, η ανάλυση πλέγματος έχει υιοθετηθεί στον κώδικα FDS. Η ανάλυση πλέγματος είναι μια έννοια που σχετίζεται με την πυκνότητα του πλέγματος της προσομοίωσης και οι τιμές του καθορίζονται διαιρώντας το χαρακτηριστικό μήκος για εξάπλωση πυρκαγιάς σε εσωτερικό χώρο με το μέγεθος του πλέγματος. Στην οδηγία NUREG-1824 που δημοσιεύθηκε από τη Ρυθμιστική Επιτροπή Πυρηνικής Ενέργειας των Ηνωμένων Πολιτειών (U.S.NRC) και το Ερευνητικό Ινστιτούτο Ηλεκτρικής Ενέργειας (EPRI), τιμές μεταξύ 4-16 θεωρούνται ως το βέλτιστο εύρος ανάλυσης πλέγματος το οποίο είναι κατάλληλο για τον κώδικα FDS (U.S.NRC and EPRI 2007). Σε αντίθεση με τον αριθμό των κελιών, η

ανάλυση πλέγματος δεν εξαρτάται από την όγκο του κτιρίου, επομένως το αντίστοιχο πρότυπο έχει το πλεονέκτημα της καθολικής εφαρμογής ανεξάρτητα από το μέγεθος του κτιρίου.

### 3 Σχεδιασμός και υλοποίηση έρευνας

---

#### 3.1 Εισαγωγή

Υπάρχουν διαφορετικά λογισμικά που ασχολούνται με τον τομέα της μελέτης περιπτώσεων φωτιάς και εκκένωσης. Τα κυριότερα είναι ο κώδικας FDS ( Fire Dynamics Simulator ) του NIST (National Institute of Standards and Technology) (Carvel and Marlair 2005), το Pyrosim για την μελέτη περιπτώσεων πυρκαγιάς και το Pathfinder για το κομμάτι της εκκένωσης χώρων (evacuation) τα οποία έχουν αναπτυχθεί από την Thunderhead Engineering (Dolan and Daniel 2011). Το λογισμικό PyroSim παρέχει ένα γραφικό περιβάλλον για τον χρήστη (Graphical User Interface), μέσω του οποίου παράγεται και τρέχει ο κώδικας FDS (Hostikka et al. 2007). Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να προβλεφθούν οι συγκεντρώσεις του καπνού, του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και άλλων παράγωγων καύσης, όπως επίσης και τα προφίλ θερμοκρασιών για έναν χώρο, κατά την διάρκεια μιας πυρκαγιάς (Liu et al. 2019).

Ο κώδικας FDS επιλύει αριθμητικά τις εξισώσεις Navier-Stokes, με έμφαση σε θερμικές ροές χαμηλών ταχυτήτων με παραγωγή καπνού και μεταφορά μάζας και θερμότητας (Roh et al. 2009). Οι εφαρμογές του εστιάζονται στα ακόλουθα :

- μεταφορά θερμότητας και προϊόντων καύσης και καπνού λόγω φωτιάς υπό χαμηλή ταχύτητα
- Μεταφορά θερμότητας σε διαφασικές ροές αερίου / υγρού και αερίου / στερεού
- Πυρόλυση
- Ανάπτυξη και διάδοση φλόγας σε ανοικτές πυρκαγιές
- Ενεργοποίηση καταιονιστήρων και ανιχνευτών καπνού / θερμότητας σε περιπτώσεις πυρκαγιών σε κλειστούς χώρους (καταστήματα, υπόγειους χώρους στάθμευσης, εμπορικά κέντρα, κ.ά).

### 3.2 Προμελέτη

Τα σενάρια που μελετήθηκαν, εξετάζουν μια σιδηροδρομική σήραγγα μήκους 1500 m. Η παροχή φρέσκου αέρα γίνεται μέσω ανεμιστήρων ώσης (jet fans) ενώ η φωτιά είναι της τάξης των 20 MW και αντιπροσωπεύει την περίπτωση φωτιάς σε μια μηχανή έλξης. Μελετήθηκαν τρεις περιπτώσεις για διαφορετικούς χρόνους ενεργοποίησης των ανεμιστήρων. Τα τρία σενάρια ονομάστηκαν A, B, και C με χρόνους ενεργοποίησης των ανεμιστήρων τα +180s, +300s και +480s, μετά τη φωτιά, αντίστοιχα. Οι ανεμιστήρες ενεργοποιήθηκαν ταυτόχρονα σε κάθε ένα από τα τρία σενάρια.

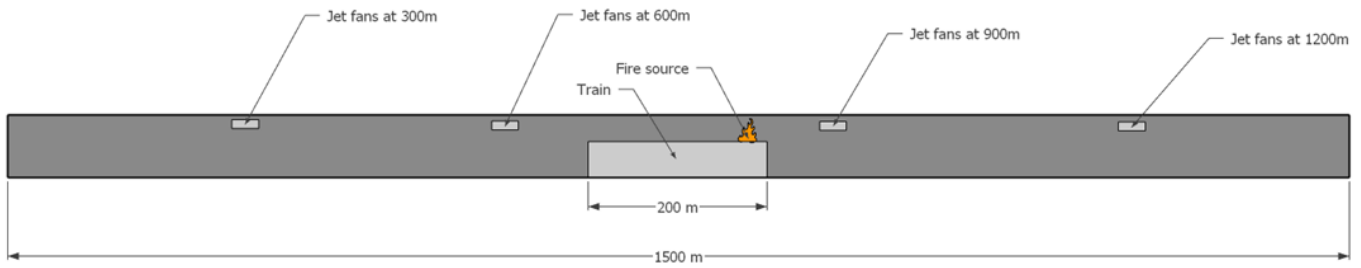
Στο κάθε σενάριο εξετάζεται η αύξηση της θερμοκρασίας τόσο στο επίπεδο κίνησης των επιβατών, όσο και στην οροφή της σήραγγας, καθώς και η ταχύτητα ροής εντός της σήραγγας.

#### 3.2.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της σήραγγας

Η σήραγγα είναι ορθογωνικής διατομής και αποτελεί σήραγγα σιδηροδρομικού δικτύου (βλ. Σχήμα 2.1) με τα εξής γεωμετρικά χαρακτηριστικά όπως φαίνονται στο Σχήμα 3.1 :

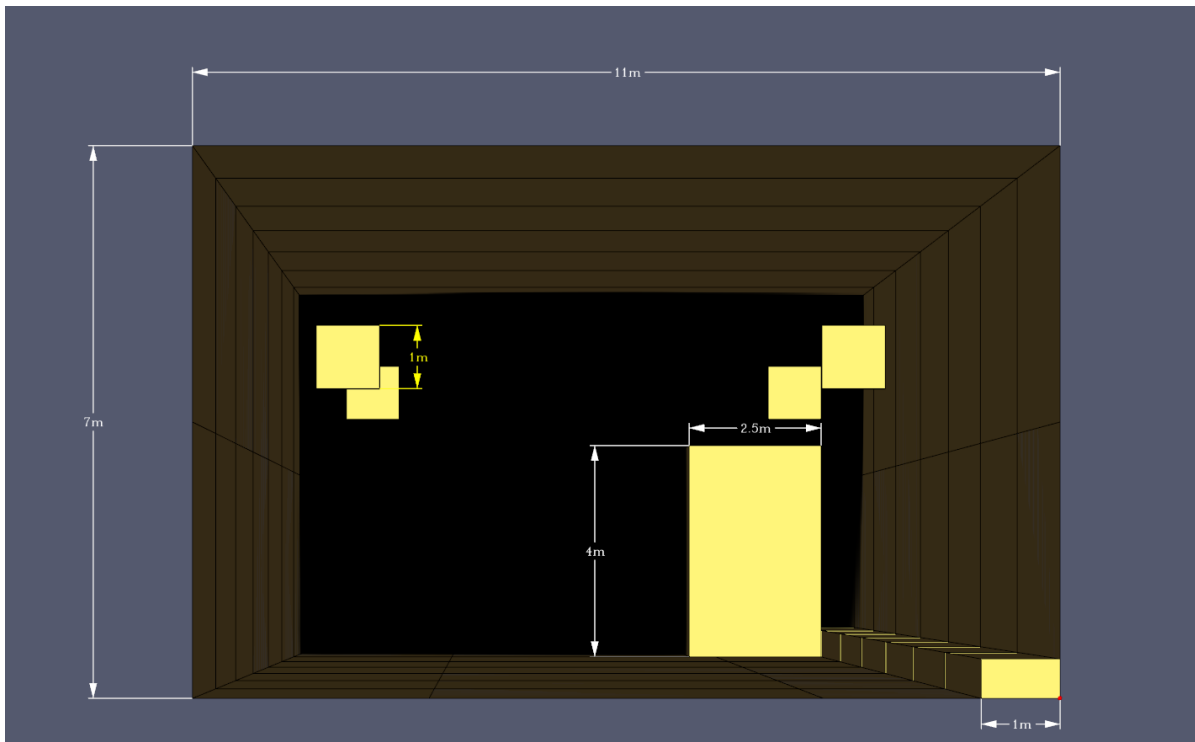
- Μήκος ( L ) : 1500 m
- Ύψος ( H ) : 7 m
- Πλάτος ( Z ) : 11 m
- Μέση κλίση : 0%
- Επιφάνεια διατομής σήραγγας ( A ) : 77 m<sup>2</sup>
- Περίμετρος διατομής σήραγγας ( Π ) : 36 m
- Υδραυλική διάμετρος σήραγγας ( D<sub>h</sub> ) : 8,55 m

Οι ανεμιστήρες απέχουν 1m από τα πλαϊνά τοιχώματα και 1.5m από την οροφή της σήραγγας. Καθώς το λογισμικό Pyrosim δεν υποστηρίζει κυκλικές διατομές, το εμβαδό του κάθε ανεμιστήρα είναι 1m<sup>2</sup> και το μήκος του 3m. Οι ανεμιστήρες τοποθετήθηκαν ανά ζεύγη στα 300m, 600m, 900m και 1200m.



Σχήμα 3.1: Γραφική απεικόνιση της πλάγιας όψης του μοντέλου της σήραγγας, των διαστάσεων κατά μήκος του τρένου και της σήραγγας καθώς και οι θέσεις των ανεμιστήρων ώσης.

Το τρένο έχει μήκος 200m, ύψος 4m και πλάτος 2,5m. Το κρηπίδωμα έχει ύψος 0.5m, πλάτος 1m και μήκος 1500m. Οι ανεμιστήρες απέχουν 1m από τα πλαϊνά τοιχώματα και 1.5m από την οροφή της σήραγγας Σχήμα 3.2. Καθώς το λογισμικό Pyrosim δεν υποστηρίζει κυκλικές διατομές, το εμβαδό του κάθε ανεμιστήρα είναι  $1\text{m}^2$  και το μήκος του 3m. Οι ανεμιστήρες τοποθετήθηκαν ανά ζεύγη στα 300m, 600m, 900m και 1200m.



Σχήμα 3.2: Εμπρόσθια όψη της διατομής της σήραγγας, με διαστάσεις αυτής, του τρένου, του κρηπιδώματος και των ανεμιστήρων.

### 3.2.2 Χαρακτηριστικά φωτιάς

Στις περιπτώσεις που θα εξεταστούν, θα μελετηθεί η εξάπλωση πυρκαγιάς και διασποράς καπνού εντός σήραγγας με τη χρήση του προγράμματος Pyrosim. Σε όλες τις περιπτώσεις η φω-

τιά θα βρίσκεται στο κέντρο της σήραγγας (δυσμενέστερο σενάριο) και θα είναι της τάξης των 20 MW το οποίο αντιστοιχεί σε φωτιά στην μηχανή έλξης. Για την δημιουργία της εστίας φωτιάς στο Pyrosim σχηματίστηκε, στην οροφή του εμποδίου ένας αγωγός (vent) του οποίου η επιφάνεια (surface) ορίστηκε να είναι τύπου καυστήρα (burner) με ισχύ 20 MW και επιφάνεια 1m<sup>2</sup>. Η εστία βρίσκεται σχεδόν στο μέσον της σήραγγας (x= 795.5m, y= 2.25m, z= 4m). Για την αντίδραση καυσίμου-αέρα, έχει ορισθεί καύσιμο με τύπο C<sub>12</sub>H<sub>23</sub>, που είναι η τυπική σύσταση του Diesel, με απόδοση προϊόντων καύσης CO 0,1 και καπνού (soot) 0,09. Ως απόδοση παραγώγων καύσης ορίζεται η ποσότητα που παράγεται ανά γραμμάριο καυσίμου που διαχέεται κατά μήκος της ροής, σε σύγκριση με την διάχυση της φωτιάς στο περιβάλλον. Η καμπύλη της φωτιάς ακολουθεί τον εκθετικό κανόνα  $at^2$  όπου ο ρυθμός ανάπτυξης  $a$  είναι 0.1876 kW/s<sup>2</sup> και το μέγιστο HRR επιτυγχάνεται σε 327 s.

### 3.2.3 Χαρακτηριστικά συστήματος αερισμού

Όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως, το σύστημα αερισμού θα είναι με ανεμιστήρες ώσης (jet fans). Για την επιλογή του κατάλληλου ανεμιστήρα έγινε υπολογισμός της πτώσης πίεσης εντός της σήραγγας με βάση την προσέγγιση από την Mosen Ltd. Ο υπολογισμός της συνολικής ώσης που απαιτείται για τον αποκαπνισμό της σήραγγας, παρουσία συρμού και φωτιάς, γίνεται χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$Thrust = \sum \Delta p \cdot A = (\Delta p_{\tau\rho\epsilon\nu\omicron\upsilon} + \Delta p_{\tau\rho\rho\rho\beta\omega\nu} + \Delta p_{\epsilon\lambda\kappa\upsilon\sigma\mu\omicron\upsilon} + \Delta p_{\alpha\nu\epsilon\mu\omicron\pi\epsilon\iota\sigma\eta\varsigma} + \Delta p_{\phi\omega\tau\iota\acute{\alpha}\varsigma})A \quad 3.1$$

Όπου

$$\Delta p_{\tau\rho\epsilon\nu\omicron\upsilon} = C_{br} C_D N \frac{A_{\tau\rho\epsilon\nu\omicron\upsilon}}{A_{\tau\upsilon\mu\eta\eta\epsilon\iota}} \rho_{air} \frac{V_{\phi\chi}^2}{2} \quad 3.2$$

Όπου

N: Αριθμός συρμών εντός της σήραγγας. Στην συγκεκριμένη περίπτωση N=1

C<sub>br</sub>: Συντελεστής Μείωσης Οπισθέλκουσας τρένου

C<sub>D</sub>: Συντελεστής Οπισθέλκουσας τρένου

A<sub>τρένου</sub>: Επιφάνεια Πρόσπτωσης τρένου (5,2m<sup>2</sup>)

$A_{\text{tunnel}}$  :επιφάνειας τομής σήραγγας ( $77\text{m}^2$ )

$\rho_{\text{air}}$  :πυκνότητα αέρα στη σήραγγα ( $1.2 \text{ Kg/m}^3$ )

$V_{o\chi}$  :Σχετική ταχύτητα οχημάτων ως προς την ταχύτητα κίνησης του αέρα στη σήραγγα. Επειδή ο συρμός είναι ακίνητος η τιμή της ταχύτητας ορίζεται στα  $3\text{m/s}$

$$\Delta p_{\text{τριβων}} = \left( \zeta_1 + \zeta_2 + \lambda \cdot \frac{L}{D} \right) \cdot \rho_{\text{air}} \cdot \frac{u_u^2}{2} \quad 3.3$$

$\zeta_1$  συντελεστής απώλειας εισόδου (0.6)

$\zeta_2$  συντελεστής απώλειας εξόδου (1)

$\lambda$  συντελεστής απωλειών τριβών

$L$  μήκος σήραγγας (m)

$D$  υδραυλική διάμετρος σήραγγας (8.55m)

$u_u$  η ταχύτητα αέρα στη σήραγγα ανάλογα την περίπτωση ανάντη ή κατάντη της φωτιάς

$\rho_{\text{air}}$  πυκνότητα αέρα στη σήραγγα

$$\Delta p_{\text{ελκυσμου}} = \Delta H \cdot \rho_{\text{air}} \cdot g \cdot \frac{(T_t - T_0)}{(T_t + 273)} \quad 3.4$$

$\Delta H$  υψομετρική διαφορά στομίων εισόδου – εξόδου σήραγγας (0)

$\rho_{\text{air}}$  πυκνότητα αέρα στη σήραγγα

$g$  επιτάχυνση βαρύτητας

$T_t$  μέση θερμοκρασία στο εσωτερικό της σήραγγας (C)

$T_0$  Εξωτερική θερμοκρασία (C)

$$\Delta p_{\text{ανεμοπιεσης}} = \frac{v_{\text{air}}^2}{2} \rho_{\text{air}} \quad 3.5$$

$v_{\text{air}}$  η ταχύτητα του ανέμου ( $4\text{m/s}$ )



$$\Delta p_{\text{φωτιάς}} = \frac{0,00009 \cdot Q \cdot 1000000}{u \cdot D^2} \quad 3.6$$

Q Θερμική ισχύς πυρκαγιάς (20 MW)

u ταχύτητα αέρα αμέσως πριν τη φωτιά

D υδραυλική διάμετρος σήραγγας

Τέλος, η ώση των ανεμιστήρων υπολογίζεται από τη σχέση:

$$S = \rho_{\text{air}} Q_{\text{fun}} (u_{\text{fun}} - u_{\text{tunnel}}) n \quad 3.7$$

S Ένεργος ώση ανεμιστηρών

$\rho_{\text{air}}$  πυκνότητα αέρα στην σήραγγα

$Q_{\text{fun}}$  παροχή ανεμιστήρα

$u_{\text{fun}}$  ταχύτητα στην έξοδο του ανεμιστήρα

$u_{\text{tunnel}}$  ταχύτητα αέρα στη σήραγγα

n συντελεστής απόδοσης ανεμιστήρα

Σύμφωνα λοιπόν με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της σήραγγας και τις οριακές συνθήκες, η απαιτούμενη ώση για την σήραγγα είναι 2072 N. Η διατομή των ανεμιστήρων είναι 1m και η δύναμη ώσης τους ανέρχεται στα 350 N. Επομένως χρησιμοποιήθηκαν 8 ανεμιστήρες ανά ζεύγη και σε απόσταση 300m το ένα ζεύγος από το άλλο ώστε να μπορεί να επιτευχθεί ο αερισμός της σήραγγας. Η μέγιστη παροχή των ανεμιστήρων είναι 17m<sup>3</sup>/s και επιτυγχάνεται σε 90s από την έναρξη λειτουργίας τους. Για την προσομοίωση του αέρα που φυσά στα στόμια της σήραγγας, ορίστηκε διαφορά πίεσης στην είσοδο και στην έξοδο της σήραγγας της τάξης των 5 Pa.

### 3.3 Ο κώδικας FDS

Ο κώδικας FDS έχει αναπτυχθεί από το NIST σε συνεργασία με το κέντρο τεχνολογίας και έρευνας της Φινλανδίας (VTT). Είναι ένα μοντέλο υπολογιστικής ρευστομηχανικής που επιλύει αριθμητικά τις εξισώσεις Navier-Stokes για θερμικά οδηγούμενες ροές χαμηλών ταχυτήτων ( $<0,3 \text{ Ma}$ ) παρουσία φωτιάς, με παραγωγή καπνού, αιθάλης, μεταφορά μάζας και μετάδοση θερμότητας (McGrattan and Forney 2004). Πιο συγκεκριμένα, για την φωτιά χρησιμοποιείται ένα απλό μοντέλο καύσης, ενώ για την επίλυση των εξισώσεων διατήρησης ορμής μάζας και ενέργειας, χρησιμοποιείται η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών. Για τις χωρικές και χρονικές παραγωγούς χρησιμοποιείται η μέθοδος επίλυσης τύπου πρόβλεψης-διόρθωσης (predictor-corrector). Το επόμενο σημείο της λύσης υπολογίζεται με βάση τα προηγούμενα σημεία και στη συνέχεια οι προβλεπόμενες τιμές διορθώνονται. Στην αρχή γίνεται μια πρόβλεψη για τα βαθμωτά μεγέθη (θερμοκρασία, πυκνότητα, πίεση) με βάση τις οριακές συνθήκες. Στη συνέχεια, με την επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes, επιλύεται το πεδίο των ταχυτήτων, με χρήση του πεδίου των πιέσεων, όπου και προκύπτουν οι νέες τιμές του πεδίου ταχυτήτων. Έπειτα, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις διατήρησης υπολογίζονται οι διορθωμένες τιμές της πίεσης και έτσι λαμβάνονται νέες τιμές για την πίεση και την ταχύτητα. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να επιτευχθεί η σύγκλιση των τιμών των ταχυτήτων. Τα τυρβώδη μεγέθη του πεδίου υπολογίζονται με το μοντέλο προσομοίωσης μεγάλων δινών (LES: Large Eddy Simulation). Οι δίνες μεγάλης κλίμακας, οι οποίες είναι υπεύθυνες και για τη τυρβώδη κινητική ενέργεια και επιδρούν στην ανάπτυξη του πεδίου ροής, επιλύονται με τη χρήση του μοντέλου Smagorinsky. Οι μικρότερες δίνες, που είναι υπεύθυνες για την απορρόφηση και καταστροφή της τυρβώδους κινητικής ενέργειας, μοντελοποιούνται και οι μέσες τιμές τους υπολογίζονται, εφαρμόζοντας χωρικό φίλτρο ανάλογα με τη διάστασή τους.

#### Παράλληλη έκδοση του FDS

Εκτός από τη συνήθη σειριακή έκδοση του λογισμικού, είναι διαθέσιμη και η παράλληλη έκδοση για συστοιχίες (cluster) επεξεργαστών ιδίως σε κέντρα Η/Υ πανεπιστημίων και ερευνητικών ιδρυμάτων. Η διασύνδεση των επεξεργαστών (CPU) γίνεται με την προσθήκη του λογισμικού επικοινωνίας MPI (Message Passage Interface). Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται σημαντική μείωση υπολογιστικού χρόνου αλλά επιπρόσθετα μπορούν να εκτελεστούν υπολογιστικά πειράματα με πολλαπλάσιο αριθμό κελιών μιας και η προσομοίωση με τη μέθοδο LES απαιτεί πολύ μικρό μέγεθος υπολογιστικού κελιού.

### 3.3.1 Δομή του FDS

Ο κώδικας Fire Dynamics Simulator (FDS) αποτελείται από έναν κύριο κώδικα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής γραμμένο σε FORTRAN 90. Ο κώδικας είναι ελεύθερης πρόσβασης μέσω διαδικτύου σε απευθείας εκτελέσιμη μορφή (αρχείο .exe) είτε ως πηγαίος κώδικας. Η πρώτη έκδοση διατέθηκε περί τα μέσα του 2000. Έκτοτε έχουν αναπτυχθεί έξι κύριες εκδόσεις, επιπλέον αναβαθμίσεις και συντηρήσεις λογισμικού βάσει και των αυξανόμενων απαιτήσεων και αλληλεπίδρασης μεταξύ των χρηστών. Υπεύθυνη για την ανάπτυξη του κώδικα είναι η Εθνική Επιτροπή Προτύπων των ΗΠΑ (National Institute for Standard and Technology – NIST) σε συνεργασία με επαγγελματικούς φορείς στο εσωτερικό (Society of Fire Protection Engineers (SFPE), NFPA) και στο εξωτερικό (VTT Technical Research Centre of Finland) καθώς και με αναγνωρισμένα εργαστήρια Πανεπιστημίων και ερευνητικών κέντρων.

Η κύρια χρήση του λογισμικού είναι η επίλυση ρευστομηχανικών πεδίων ροής υπό την παρουσία φωτιάς με έμφαση στη μεταφορά καπνού και θερμότητας σε χαμηλούς αριθμούς Mach ( $Ma < 0.30$ ). Οι εφαρμογές του εστιάζονται στα ακόλουθα :

- μεταφορά θερμότητας και προϊόντων καύσης και καπνού λόγω φωτιάς υπό χαμηλή ταχύτητα
- Μεταφορά θερμότητας σε διασπαστικές ροές αερίου / υγρού και αερίου / στερεού
- Πυρόλυση
- Ανάπτυξη και διάδοση φλόγας σε ανοικτές πυρκαγιές
- Ενεργοποίηση καταιονιστήρων και ανιχνευτών καπνού / θερμότητας σε περιπτώσεις πυρκαγιών σε κλειστούς χώρους (καταστήματα, υπόγειους χώρους στάθμευσης, εμπορικά κέντρα, κ.ά).

Μετά την εκτέλεση της προσομοίωσης παράγονται αρχεία εξόδου που περιέχουν πληροφορίες για τα δεδομένα που μας ενδιαφέρουν. Τα δεδομένα εισάγονται σε μετεπεξεργαστή δεδομένων (το FDS έχει δικό του μετεπεξεργαστή το Smokeview) προκειμένου να εξαχθούν καμπύλες θερμοκρασίας, συγκέντρωσης, διανυσμάτων ταχυτήτων, τροχιές σωματιδίων με τη μέθοδο Lagrange, τιμές πίεσης, πυκνότητας, ρυθμού έκλυσης θερμότητας, μεταφορά θερμότητας μεταξύ τοιχωμάτων ή διακριτών φάσεων, επιμέρους συγκέντρωσης συστατικών συναρ-

τήσει του χρόνου. Για περαιτέρω πληροφορίες, ο ενδιαφερόμενος χρήστης μπορεί να ανατρέξει στο τεχνικό εγχειρίδιο χρήσης.

### 3.3.2 Μαθηματικό μοντέλο

Το βασικό μοντέλο αποτελείται από το ρευστομηχανικό μοντέλο των εξισώσεων Navier – Stokes, του μοντέλου καύσης και του μοντέλου ακτινοβολίας. Αναλυτικότερα:

#### Ρευστοδυναμικό μοντέλο

Ο κώδικας επιλύει μία ξεχωριστή μορφή των εξισώσεων Navier – Stokes κατάλληλη για χαμηλούς αριθμούς Ma, υπό την παρουσία φωτιάς με βάση τον αλγόριθμο πρόβλεψης – διόρθωσης (Predictor – Corrector) με διακριτοποίηση μέσω πεπερασμένων διαφορών με ακρίβεια δεύτερης τάξης στον χώρο και το χρόνο. Σημειώνεται ότι το πλέγμα που χρησιμοποιείται παντού είναι ορθογώνιο καρτεσιανό. Οι εξισώσεις επίλυσης δίδονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

#### Διατήρηση μάζας

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{u} = \dot{m}_b''' \quad 3.8$$

#### Διατήρηση ορμής

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{u}) + \nabla \cdot \rho \vec{u} \vec{u} + \nabla \cdot \vec{p} = \rho \vec{g} + \vec{f}_b + \nabla \cdot \tau_{ij} \quad 3.9$$

Όπου:

$\tau_{ij} = \mu \left( 2S_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} (\nabla u) \right)$ , ο δυαδικός τανυστής τάσης

$\delta_{ij} = \begin{cases} 0 & i = j \\ 1 & i \neq j \end{cases}$ , το δέλτα του Kronecker

$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ , το συμμετρικό τμήμα του τανυστή παραμόρφωσης

$\mu$ , δυναμικός συντελεστής ιξώδους

### Διατήρηση ενέργειας

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h_s) + \nabla \rho h_s u = \frac{Dp}{Dt} + q''' - \dot{q}_b''' - \nabla q'' + \varepsilon \quad 3.10$$

Όπου:

$h_s = \sum_a Y_a h_{s,a}$ , η αισθητή ενθαλπία ως συνάρτηση της θερμοκρασίας

$\dot{q}_b'''$ , η ενέργεια που μεταφέρεται στα σωματίδια κατά τη διεργασία της εξάτμισης (αλλαγής φάσης)

$q'' = -k\nabla T - \sum_a h_{s,a} \rho D_a \nabla Y_a + q_r''$ , ροή θερμότητας μέσω συναγωγής και ακτινοβολίας

$p = \frac{\rho RT}{W}$ , η καταστατική εξίσωση

### Διατήρηση συστατικών

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_a) + \nabla \cdot \rho Y_a \vec{u} = \nabla \rho D_a \nabla Y_a + \dot{m}_a''' + \dot{m}_b''' \quad 3.11$$

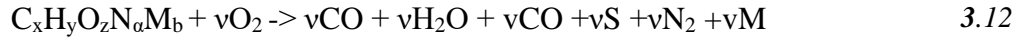
Όπου:

$\dot{m}_b''' = \sum_a \dot{m}_{b,a}'''$ , ο ρυθμός παραγωγής των συστατικών υπό τη μορφή σωματιδίων ή σταγονιδίων

Παράλληλα ισχύει για το σύνολο  $\sum Y_a = 1$ ,  $\sum \dot{m}_a''' = 0$ ,  $\sum \dot{m}_{b,a}''' = \dot{m}_b'''$

### Μοντέλο καύσης

Βασίζεται στο απλό μοντέλο μιας εξίσωσης πλήρους αντίδρασης όπου καύσιμο και οξειδωτικό μέσο έρχονται σε επαφή κατά τη διάρκεια της ανάμειξης. Η παραπάνω παραδοχή μπορεί να θεωρηθεί καλή προσέγγιση για την μοντελοποίηση φωτιάς σε πλήρη κλίμακα και γενικά μπορεί να γραφεί σύμφωνα με τη σχέση :



Τα προϊόντα θεωρείται ότι δεν καταναλώνουν ποσότητες οξυγόνου κατά τον σχηματισμό τους. Αντίστοιχα, η παραγόμενη αιθάλη θεωρείται ως μίγμα άνθρακα και υδρογόνου με τον στοιχειομετρικό συντελεστή να δίδεται από την σχέση:

$$\nu_s = \frac{W_F}{W_S} y_s, \quad W_S = X_H W_H + (1 - X_H) W_C \quad 3.13$$

Αντίστοιχα ο στοιχειομετρικός συντελεστής για το μονοξείδιο του άνθρακα δίδεται από την σχέση:

$$\nu_{CO} = \frac{W_F}{W_{CO}} y_{CO} \quad 3.14$$

Η έκφραση του γραμμομοριακού κλάσματος,  $Z$ , μπορεί να δοθεί ως γραμμικός συνδυασμός των κλασμάτων μάζας καυσίμου και οξειδωτικού, σύμφωνα με τη σχέση:

$$Z = \frac{sY_F + (Y_{O_2} - Y_{O_2}^\infty)}{sY_F + Y_{O_2}^\infty}; \quad s = \frac{\nu_{O_2} W_{O_2}}{\nu_F W_F}; \quad \nu_F = 1 \quad 3.15$$

όπου το  $Y_F^I$  είναι το κλάσμα μάζας του καυσίμου στο ρεύμα των αντιδρώντων. Επίσης το γραμμομοριακό ποσοστό μίγματος μπορεί να οριστεί και με βάση το κλάσμα μάζας του καυσίμου και των προϊόντων καύσης σύμφωνα με τη σχέση:

$$Z = \frac{1}{Y_F^I} \left( Y_F + \frac{W_F}{xW_{CO_2}} Y_{CO_2} + \frac{W_F}{xW_{CO}} Y_{CO} + \frac{W_F}{xW_S} Y_S \right) \quad 3.16$$

όπου  $x$ , ο αριθμός των ατόμων άνθρακα στο μόριο καυσίμου.

## Μοντέλο ακτινοβολίας

Η ένταση ακτινοβολίας επιλύεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων ελέγχου (Finite Control Volume – FVM) μέσω της σχέσης:

$$\vec{\nabla}\Omega I + \kappa I = \kappa \frac{\sigma T^4}{\pi} \quad 3.17$$

Ο όρος πηγής στην εξίσωση διατήρησης ενέργειας υπολογίζεται μέσω διακριτής έκφρασης της απόκλισης της ακτινοβολούμενης ισχύος (radiative flux) σύμφωνα με τη σχέση:

$$-\nabla \cdot q_r = - \int_{4\pi} \nabla \Omega I d\Omega \approx \left( \sum_{l=1}^L w^l I^l - 4\sigma T^4 \right) \quad 3.18$$

Όπου  $w^l$ , συντελεστής βαρύτητας και  $\sigma$ , η σταθερά Stefan – Boltzmann.

Για τις περιπτώσεις όπου το καύσιμο είναι μία επιφάνεια με κύρια χαρακτηριστικά ανάκλασης και εκπομπής, η οριακή συνθήκη ακτινοβολίας δίδεται από τη σχέση:

$$I(r, w) = \frac{\epsilon_w \sigma T_w^4}{\pi} + \frac{1 - \epsilon_w}{\pi} \int_{n\Omega} |n\Omega| I(r_w, \Omega') d\Omega' \quad 3.19$$

Θεωρώντας τα σωματίδια αιθάλης σχεδόν σφαιρικά με ομοιόμορφη διάμετρο της τάξης  $d_p > 0.1 \mu m$ , η θερμοκρασία του σωματιδίου είναι σχεδόν πανομοιότυπη με την θερμοκρασία των καυσαερίων γεγονός που οδηγεί στη εκπομπή ακτινοβολίας χωρίς σκέδαση.

### 3.3.3 Αλγόριθμος επίλυσης

Το υπολογιστικό χωρίο χωρίζεται σε ένα πεπερασμένο αριθμό κελιών μέσω κατάλληλης διακριτοποίησης μετατοπισμένου πλέγματος. Οι βαθμωτές ποσότητες αποθηκεύονται στα κέντρα των κελιών ενώ οι διανυσματικές (π.χ ταχύτητες) στα μέτωπα των κελιών. Οι δεύτερες παράγωγοι των μερικών διαφορικών εξισώσεων προσεγγίζονται μέσω κεντρικών διαφορών με ακρίβεια δεύτερης τάξης. Ο αλγόριθμος επίλυσης βασίζεται στη μέθοδο πρόβλεψης – διόρθωσης. Αναλυτικότερα τα βήματα πρόβλεψης είναι τα κάτωθι :

- 1) Υπολογισμός του «μέσου πεδίου» ταχύτητας  $\bar{u}^n$
- 2) Εκτίμηση των παραμέτρων  $\rho$ ,  $Y_\alpha$ ,  $\overline{p_m}$  για το επόμενο χρονικό βήμα χρησιμοποιώντας ρητό σχήμα Euler. Έτσι π.χ για τον υπολογισμό της πυκνότητας, χρησιμοποιείται η σχέση:

$$\frac{\rho^* - \rho''}{\delta t} + \nabla \rho^n \bar{u}^n = 0 \quad 3.20$$

- 3) Ανανέωση των τιμών  $\rho$ ,  $Y_\alpha$  στα όρια του πλέγματος
- 4) εφαρμογή των οριακών συνθηκών για τις τιμές των  $\rho$ ,  $Y_\alpha$
- 5) Υπολογισμός της απόκλισης του πεδίου ταχύτητας  $\nabla \bar{u}^n$
- 6) Επίλυση για την διαταραχή του πεδίου πίεσης μέσω της εξίσωσης Poisson σε κάθε επιμέρους κελί

$$\nabla^2 H^m = - \left[ \frac{\nabla u^* - \nabla \bar{u}^n}{\delta t} \right] - \nabla \bar{F}^n \quad 3.21$$

- 7) Επίλυση της ταχύτητας στο επόμενο χρονικό βήμα σύμφωνα με τη σχέση:

$$\frac{u^* - \bar{u}^n}{\delta t} + \nabla \bar{F}^n + \nabla H^m = 0 \quad 3.22$$

- 8) Έλεγχος του χρονικού βήματος σε κάθε κόμβο ώστε να διασφαλίζεται η συνθήκη CFL:

$$\delta t_{max} \left( \frac{|u|}{\delta x}, \frac{|v|}{\delta y}, \frac{|w|}{\delta z} \right) < 1, \quad 2\delta t \nu \left( \frac{1}{\delta x^2} + \frac{1}{\delta y^2} + \frac{1}{\delta z^2} \right) < 1 \quad 3.23$$

### 3.3.4 Μοντελοποίηση της τύρβης

Η μοντελοποίηση της τύρβης βασίζεται στο μοντέλο προσομοίωσης μεγάλων δινών (LES) – αν και υπάρχει επιπρόσθετη δυνατότητα να γίνει επίλυση μέσω της μεθόδου άμεσης αριθμητικής προσομοίωσης ( Direct Numerical Simulation – DNS) εφόσον το πλέγμα διακριτοποίησης είναι αρκετά πυκνό.

Ο χρόνος επίλυσης μέσω της τεχνικής DNS, όπου το πεδίο ροής επιλύεται για όλες τις κλίμακες μήκους και χρόνου είναι πολύ υψηλός και εξαρτάται από τον τοπικό (πλεγματοτικό) αριθμό Reynolds. Έχει βρει εφαρμογή σε εσωτερικές ροές ιδιαίτερα περιορισμένου μήκους ή σε σωλήνες μικρής διαμέτρου με χαμηλή ταχύτητα, όπου ακόμα και σε αυτές τις περιπτώσεις ο



χρόνος κυμαίνεται από πολλές ώρες μέχρι μερικές ημέρες σε συστοιχίες H/Y (Weisenpacher et al. 2011). Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται χρησιμοποιούνται για την πιστότητα και τις παραδοχές των μοντέλων τύρβης για την εκάστοτε εφαρμογή καθώς και της ακρίβειας των τυχόν πειραματικών μετρήσεων.

Αντίθετα με τη μέθοδο LES επιλύεται το πεδίο ροής για τις μεγάλες δίνες ενώ οι μικρές δίνες (μικρότερες από την υποπλεγματική κλίμακα) μοντελοποιούνται. Έτσι τα στιγμιαία μεγέθη όπως η ταχύτητα αναλύονται μέσω διαδικασίας φιλτραρίσματος σε άθροισμα μίας φιλτραρισμένης ταχύτητας όπου αναπαριστά την κίνηση των μεγάλων δινών και μίας υπολειπόμενης υποπλεγματικής (subgrid) συνιστώσας.

Ο ρυθμός καταστροφής (eddy dissipation) της τύρβης κατά τη μετατροπή της σε θερμότητα, προσεγγίζεται μέσω της σχέσης (Wang et al. 2010b; Se et al. 2012):

$$\varepsilon = \tau_{ij} \nabla u = \mu \left( 2S_{ij}S_{ij} - \frac{2}{3} (\nabla u)^2 \right) \quad 3.24$$

Ο συντελεστής τυρβώδους συνεκτικότητας κατά την ανάλυση του Smagorinsky δίδεται από τη σχέση:

$$\mu_{LES} = \rho (C_s \Delta) \left( 2\bar{S}_{ij} : \bar{S}_{ij} - \frac{2}{3} (\nabla \bar{u})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad 3.25$$

Όπου

$\Delta = (\delta x \delta y \delta z)^{\frac{1}{3}}$ , η διάσταση του χωρικού φίλτρου ανάλογη της διάστασης του πλέγματος

$k_{LES} = \frac{\mu_{LES} C_p}{Pr_t}$ , η θερμική αγωγιμότητα

$(\rho D)_{LES} = \frac{\mu_{LES}}{Sc_t}$ , η υλική διαχυτότητα που σχετίζεται με την τυρβώδη συνεκτικότητα

$C_s$ , εμπειρική σταθερά Smagorinsky

Κατά την διαδικασία της επίλυσης οι αριθμοί  $Pr_t$  και  $Sc_t$  διατηρούνται σταθεροί.

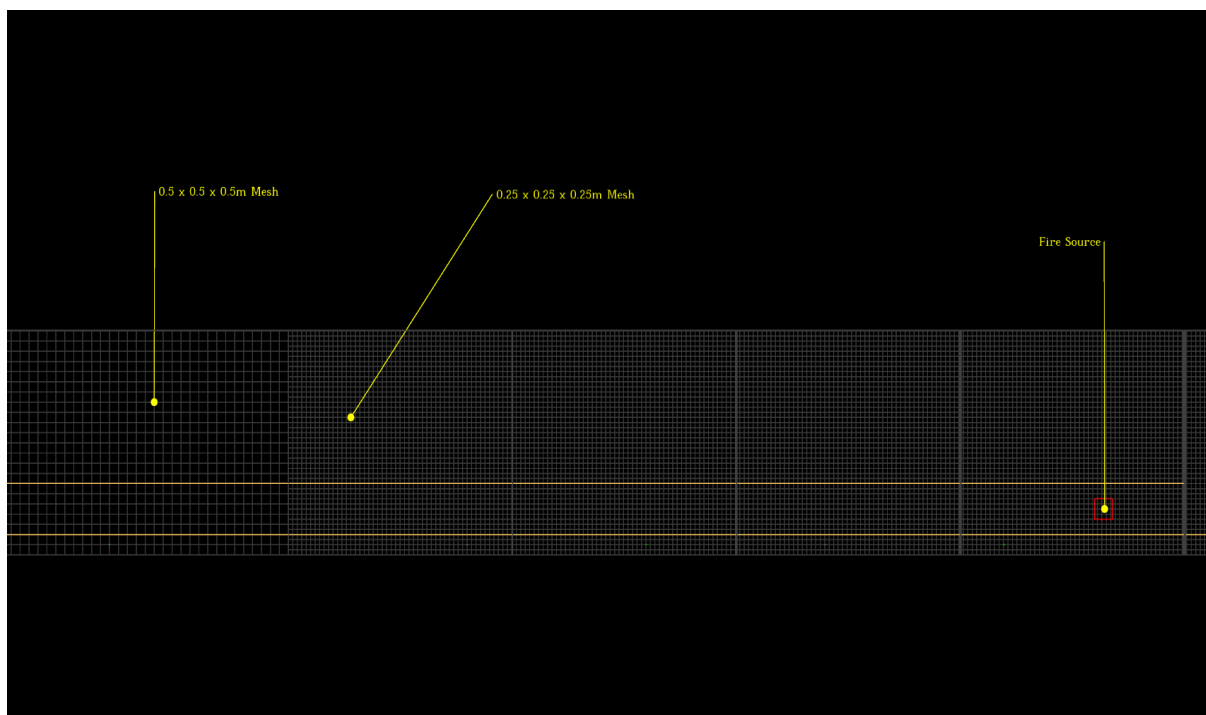
### 3.4 Κατασκευή πλέγματος

Προκειμένου να εξαχθούν αρκετά ακριβή αποτελέσματα στην προσομοίωση, είναι απαραίτητη η προσεχτική επιλογή του μεγέθους των κελιών, αλλά και ο αριθμός αυτών. Στην μέθοδο LES, το μέγεθος πλέγματος για προσομοίωση πυρκαγιάς πρέπει να είναι αρκετά πυκνό για να συμπεριλάβει τις κλίμακες τύρβης που σχετίζονται με τις μεγαλύτερες δύνες. Ένα πυκνό πλέγμα θα αποφέρει επίσης πιο ακριβή αποτελέσματα. Από την άλλη πλευρά, το μέγεθος των κελιών δεν πρέπει να είναι πολύ μικρό, καθώς θα απαιτούσε πολύ μεγάλο υπολογιστικό κόστος. Έτσι, το μέγεθος των κελιών θα πρέπει να επιλέγεται συμβιβαστικά μεταξύ της ακρίβειας και του υπολογιστικού κόστους.

Για την προσομοίωση της φωτιάς χρησιμοποιείται ως μέτρο διακριτοποίησης η αδιάστατη έκφραση  $D^*/\delta_x$ . Όπου  $D^*$  είναι η χαρακτηριστική διάμετρος φωτιάς και  $\delta_x$  το χαρακτηριστικό μέγεθος του κελιού.

$$D^* = \left( \frac{\dot{Q}}{C_p T_\infty \rho_\infty \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad 3.26$$

Όπως αναφέρεται και στο κεφάλαιο 2.6.2, ο λόγος  $D^*/\delta_x$  για την βέλτιστη ανάλυση πλέγματος είναι 4-16. Επομένως για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της σήραγγας και τις ιδιότητες της φωτιάς που αναφέρονται στο κεφάλαιο 3.2, για  $D^*/\delta_x = 4$  (αραιό πλέγμα) το μέσο μέγεθος του κελιού είναι 79.46cm και πιο συγκεκριμένα στις διαστάσεις x,y,z είναι 0.781m, 0.733m και 0.875m αντίστοιχα. Για  $D^*/\delta_x = 10$  (πυκνό πλέγμα) το μέσο μέγεθος κελιού είναι 31.78cm, οι διαστάσεις κατά x,y,z είναι 0.313m, 0.306m και 0.292m αντίστοιχα. Για  $D^*/\delta_x = 16$  (πυκνότερο πλέγμα) το μέσο μέγεθος κελιού είναι 19.87cm, στις διαστάσεις x,y,z είναι 0.195m, 0.183m και 0.194m αντίστοιχα. Για λόγους ευκολίας, το πλέγμα που επιλέχθηκε για το γενικό όγκο της σήραγγας είναι κυβικού σχήματος με διαστάσεις 0.5x0.5x0.5m, ενώ για την περιοχή 50m ανάντη και κατόντη του μετώπου φωτιάς επιλέχθηκε πυκνότερο πλέγμα με διαστάσεις 0.25x0.25x0.25m. Ο συνολικός αριθμός των κελιών ανέρχεται στο 1.355.200 κελιά.



Σχήμα 3.3: Απεικόνιση των δυο διαφορετικών πλεγμάτων και της εστίας φωτιάς.

### 3.5 Ανεξαρτησία πλέγματος

Σκοπός της ανεξαρτησίας πλέγματος ή ανάλυση ευαισθησίας πλέγματος, είναι να μειωθεί ο υπολογιστικός χρόνος αλλά να μην χαθεί η ακρίβεια. Όταν το μέγεθος του πλέγματος μειώνεται, ο αριθμός των κελιών αυξάνεται. Όσο μικρότερα είναι τα κελιά, τόσο πιο ακριβή πρέπει να είναι τα αποτελέσματα. Σε ένα συγκεκριμένο μέγεθος κελιών τα αποτελέσματα πρέπει να συγκλίνουν προς μια συγκεκριμένη τιμή. Όταν συγκλίνουν τα αποτελέσματα, το μικρότερο μέγεθος πλέγματος δεν αυξάνει την ακρίβεια αλλά αυξάνει τον υπολογιστικό χρόνο. Επομένως, η ανάλυση ευαισθησίας πλέγματος θα συμβάλει στον βέλτιστο υπολογιστικό χρόνο με αποδεκτή ακρίβεια. Ο έλεγχος ανεξαρτησίας πλέγματος έγινε για τρία διαφορετικά πλέγματα: αραιό πλέγμα με μέγεθος κελιού 0.75m, μεσαίο πλέγμα με μέγεθος κελιού 0.5m και πυκνό πλέγμα με μέγεθος κελιού 0.25m. Ο συνολικός αριθμός των κελιών είναι 69,865, 924,000, και 4,254,149 αντίστοιχα. Η εξίσωση που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση είναι η εξής (Versteeg and Malalasekera 2007):

$$GCI = \frac{f_2 - f_1}{1 - r^p} \quad 3.27$$

Όπου,  $f_2$  είναι η λύση του αραιότερου πλέγματος,  $f_1$  η λύση του πυκνότερου πλέγματος,  $r$  ο συντελεστής πυκνώσης και  $p$  η ακρίβεια του αλγορίθμου η οποία ισούται με 3. Οι τιμές που συγκρίνονται είναι για την ταχύτητα  $U$  και την συγκέντρωση του μονοξειδίου του άνθρακα. Οι τιμές εξάγονται από μια γραμμή στο επίπεδο συμμετρίας του υπολογιστικού πεδίου στο σημείο ( $x = 1100\text{m}$ ,  $y = 5.5\text{m}$  και  $z = 0$  έως  $7\text{m}$ ) με 28 σημεία δειγματοληψίας καθ' ύψος.

### 3.6 Επαλήθευση και επικύρωση αριθμητικών αποτελεσμάτων

Για την επαλήθευση και επικύρωση των αποτελεσμάτων του FDS θα χρησιμοποιηθεί η ημ εμπειρική σχέση από την εργασία των Rosignuolo et al. (2017). Η σχέση αυτή προέκυψε συγχωνεύοντας τις σχέσεις από την θεωρητική μελέτη της μέγιστης θερμοκρασίας αερίου των Li et al. (2011) και τις εμπειρικές σχέσεις που πρότειναν αργότερα οι Li and Ingason (2012), οι οποίες προέκυψαν από πειράματα κλίμακας και από δεδομένα πειραμάτων περιπτώσεων μεγάλης φωτιάς σε σήραγγα που έχουν πραγματοποιηθεί σε όλο τον κόσμο. Η σχέση που προέκυψε δίνει τις τιμές της θερμοκρασίας συναρτήσει της απόστασης από την εστία φωτιάς και εκφράζεται ως εξής:

$$\frac{\Delta T(x)}{\Delta T_{max}} = 0.55 \exp\left(-0.143 \frac{x-x_v}{H}\right) + 0.45 \exp\left(-0.024 \frac{x-x_v}{H}\right) \quad 3.28$$

όπου  $x$  είναι η απόσταση από την πηγή φωτιάς,  $H$  είναι το ύψος της σήραγγας και  $x_v$  είναι η εικονική προέλευση της φωτιάς, η οποία υπολογίζεται ως

$$x_v = \begin{cases} L_f - 10H, & L_f > 10H \\ 0, & L_f \leq 10H \end{cases} \quad 3.29$$

Όπου  $L_f$  είναι το ύψος της φλόγας (m). Η μέγιστη θερμοκρασία του αερίου εξαρτάται από τη μέγιστη τιμή της στην οροφή ( $\Delta T_{max}$ ), η οποία με τη σειρά της υπολογίστηκε καθορίζοντας δύο διαφορετικές περιοχές, ανάλογα με την αδιάστατη ταχύτητα εξαερισμού  $V'$  :

$$\Delta T_{max} = \begin{cases} 17.5 \frac{\dot{Q}^{2/3}}{H_{ef}^{5/3}}, & V' \leq 0.19 \\ \frac{\dot{Q}}{u_0 b_{f0}^{1/3} H_{ef}^{5/3}}, & V' > 0.19 \end{cases} \quad 3.30$$

όπου  $\dot{Q}$  είναι ο συνολικός ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας (kW),  $H_{ef}$  είναι το πραγματικό ύψος της σήραγγας (πόσο απέχει η εστία φωτιάς από τη οροφή της σήραγγας) (m),  $u_0$  είναι η ταχύτητα εξαερισμού,  $b_{f0}$  είναι η ακτίνα της εστίας φωτιάς (m) και η  $V'$  ορίζεται ως :

$$V' = \frac{u_0}{w^*} \quad 3.31$$

όπου  $w^*$  είναι η χαρακτηριστική ταχύτητα του πλουμίου, και εκφράζεται από την σχέση :

$$w^* = \left( \frac{g\dot{Q}}{b_{f0}\rho_0 C_p T_0} \right)^{1/3} \quad 3.32$$

Όπου  $g$  είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας ( $m/s^2$ ),  $b_{f0}$  είναι η ακτίνα της εστίας φωτιάς (m),  $\rho_0$  είναι η πυκνότητα του αέρα ( $kg/m^3$ ),  $C_p$  είναι η θερμοχωρητικότητα ( $kJ/kgK$ ) και  $T_0$  είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος (K).

Λύνοντας την σχέση 3.28 ως προς  $\Delta T(x)$  μπορούμε να υπολογίσουμε θεωρητικά την μέγιστη θερμοκρασία στην οροφή της σήραγγας για διαφορετικές θέσεις. Έτσι μπορεί να γίνει η επαλήθευση των αποτελεσμάτων συγκρίνοντας τις θεωρητικές τιμές με τις τιμές θερμοκρασίας που προκύπτουν από τους αισθητήρες.

### 3.7 Δομή και τρόπος λειτουργίας του λογισμικού Pathfinder

Το λογισμικό Pathfinder είναι ένας εξομοιωτής εκκένωσης που χρησιμοποιεί συμπεριφορές διεύθυνσης για να μοντελοποιήσει την κίνηση του κάθε ατόμου του πληθυσμού.

Το λογισμικό περιλαμβάνεται στο εγχειρίδιο του NIST με τίτλο Review of Evacuation Models (Kuligowski et al. 2010) και παρέχει δύο βασικές επιλογές για την κίνηση των ατόμων. Το μοντέλο SFPE και το μοντέλο διεύθυνσης. Για περισσότερες πληροφορίες ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στο τεχνικό εγχειρίδιο του λογισμικού (McGrattan 2019). Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο κίνησης SFPE.

#### 3.7.1 Ταχύτητα κίνησης

Στο μοντέλο κίνησης SFPE η ταχύτητα κίνησης του ατόμου εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένης της μέγιστης ταχύτητας που ορίζεται σαν οριακή συνθήκη και τον τύπο της επιφάνειας . Η ταχύτητα κίνησης ορίζεται ως:

$$v_b = v_{max} * v_f(D) * v_{ft} \quad 3.33$$

όπου  $v_{max}$  η μέγιστη ταχύτητα που έχει ορισθεί σαν οριακή συνθήκη,  $v_f(D)$  το κλάσμα της ταχύτητας σαν συνάρτηση με την πυκνότητα ενός δωματίου και ορίζεται ως:

$$v_f(D) = \begin{cases} 1, & D < 0.55 \text{pers/m}^2 \\ \max \left[ v_{fmin} \frac{1}{0.85} (1 - 0.266D) \right], & D \geq 0.55 \text{pers/m}^2 \end{cases} \quad 3.34$$

όπου  $v_{fmin}$  είναι ένα ελάχιστο κλάσμα της ταχύτητας το οποίο ορίζεται σαν οριακή συνθήκη (προκαθορισμένη τιμή=0,15) και  $D$  είναι η πυκνότητα του πληθυσμού στο εκάστοτε δωμάτιο.

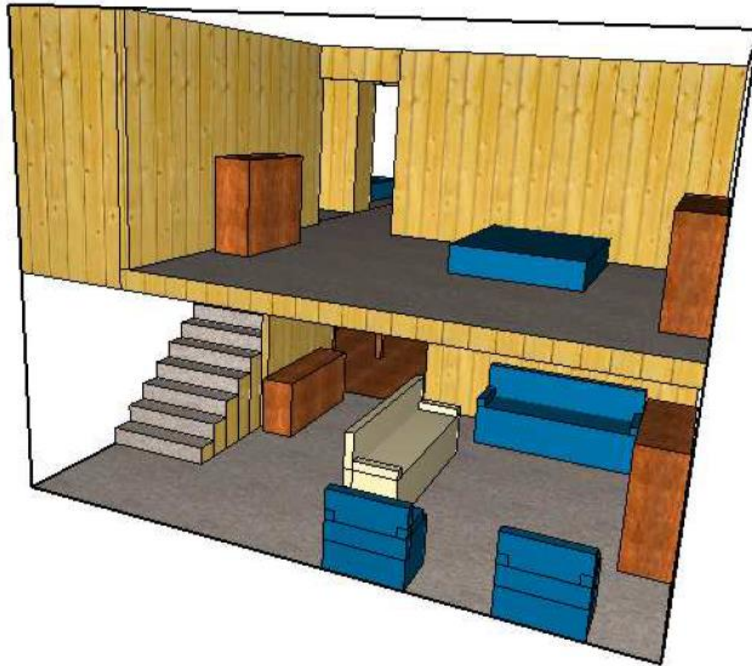
$v_{ft}$  είναι το κλάσμα της ταχύτητας που εξαρτάται από τον τύπο της επιφάνειας και ορίζεται ως:

$$v_{ft} = \frac{k}{1,4} \quad 3.35$$

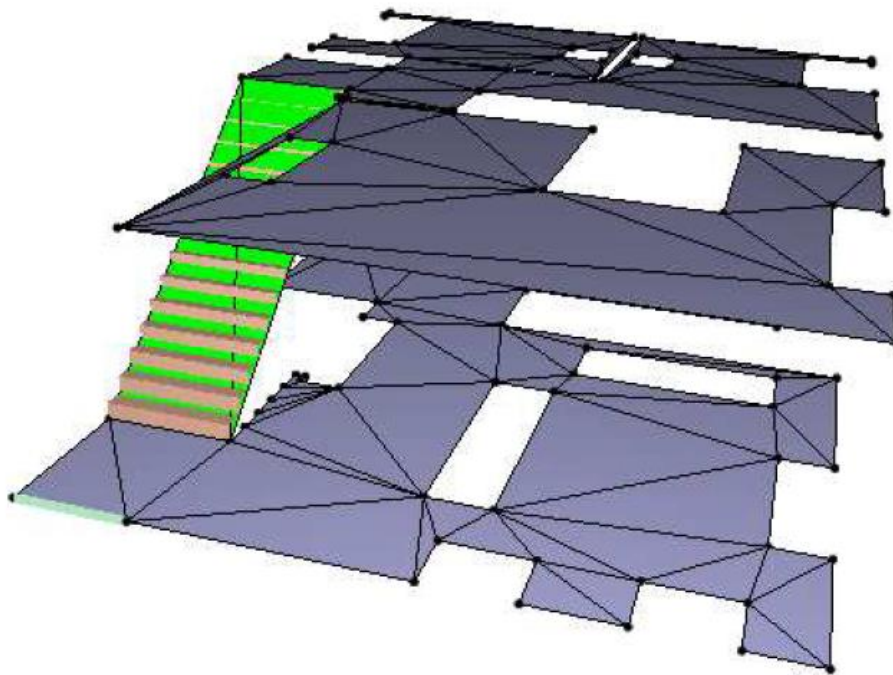
Για επίπεδες επιφάνειες και ράμπες,  $k=1,40$  m/s

### 3.7.2 Γεωμετρία

Το Pathfinder χρησιμοποιεί ένα μοντέλο γεωμετρίας 3D όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4. Σε αυτό το γεωμετρικό μοντέλο υπάρχει ένα πλέγμα πλοήγησης που ορίζεται ως συνεχής τριγωνική επιφάνεια 2D και αναφέρεται ως "πλέγμα πλοήγησης". Το πλέγμα πλοήγησης είναι μια ακανόνιστη μονόπλευρη επιφάνεια που αντιπροσωπεύεται από παρακαείμενα τρίγωνα. Η κίνηση των ατόμων πραγματοποιείται εντός των ορίων αυτού του πλέγματος πλοήγησης.



Σχήμα 3.4: Τριδιάστατη γεωμετρία στο Pathfinder (εικόνα από το εγχειρίδιο του Pathfinder)



Σχήμα 3.5: Το διδιάστατο τριγωνικό πλέγμα πάνω στο οποίο κινούνται τα άτομα (εικόνα από το εγχειρίδιο του Pathfinder)

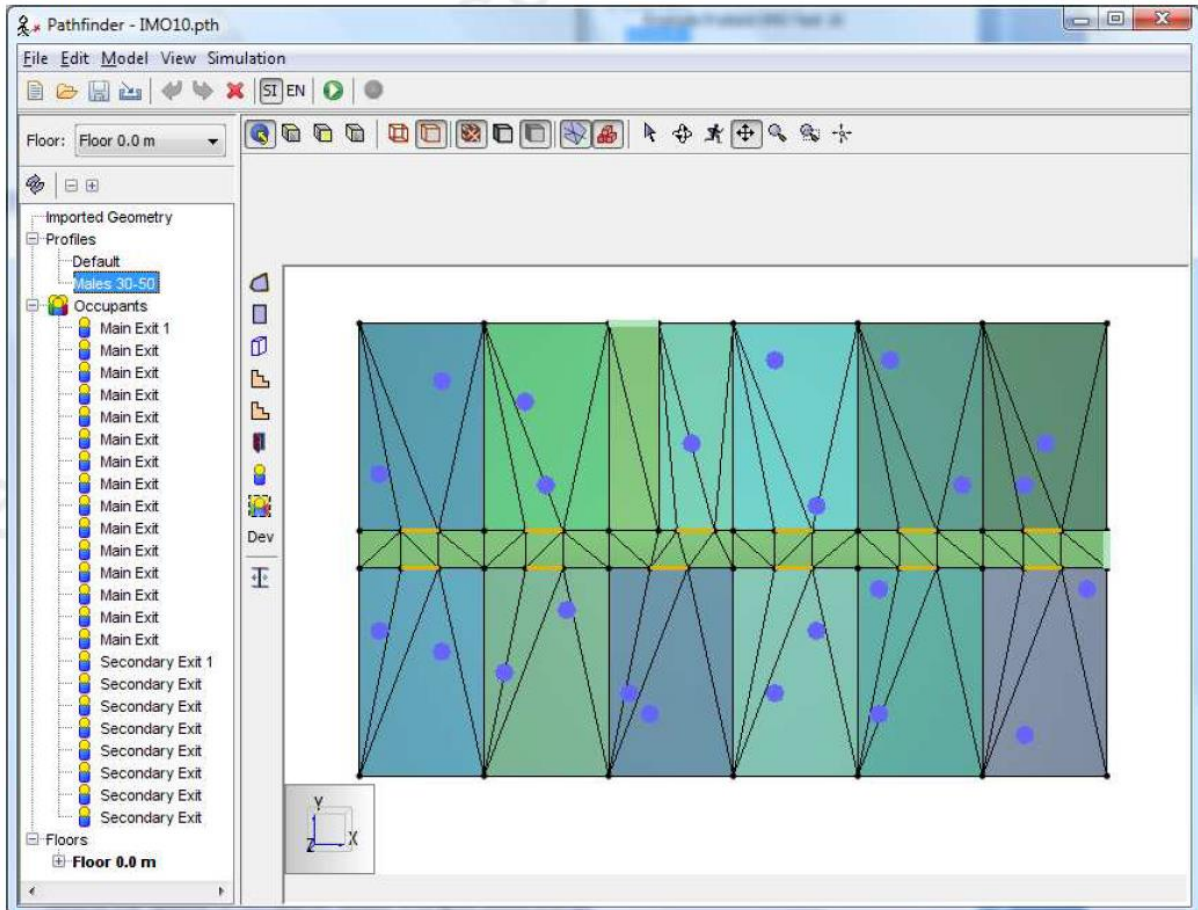
Όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 3.5**, τα εμπόδια εμφανίζονται σαν κενά στο πλέγμα πλοήγησης. Με αυτόν τον τρόπο, καθώς τα άτομα μπορούν να κινηθούν μόνο πάνω στο πλέγμα, αποφεύγεται η περίπτωση ένα στερεό σώμα να επιδράσει με την προσομοίωση. Κατά την δημιουργία του πλέγματος, οποιοδήποτε αντικείμενο μπλοκάρει την περιοχή του πλέγματος, αφαιρείται αυτομάτως. Σαν εμπόδιο αναγνωρίζεται οποιοδήποτε αντικείμενο μέχρι 1.8m από το έδαφος.

#### 3.7.2.1 Υποδιαιρέσεις γεωμετρίας

Η γεωμετρία πλοήγησης οργανώνεται σε επιφάνειες ακανόνιστου σχήματος. Κάθε δωμάτιο έχει εσωτερικά (προαιρετικά) και εξωτερικά όρια που δεν μπορεί να διασχίσει ένα άτομο. Η κίνηση μεταξύ δύο γειτονικών δωματίων γίνεται μέσω θυρών. Μια θύρα που δεν συνδέει δύο δωμάτια και ορίζεται στο εξωτερικό όριο ενός δωματίου, ορίζεται ως θύρα εξόδου. Μπορεί να υπάρχουν πολλαπλές θύρες εξόδου σε ένα μοντέλο. Όταν άτομα εισέρχονται σε μια πόρτα εξόδου στην λειτουργία SFPE, τοποθετούνται σε ουρά πίσω από την θύρα και εξέρχονται με ρυθμό ροής που ορίζεται από το SFPE. Τα άτομα που εισέρχονται σε μια θύρα εξόδου στην λειτουργία διεύθυνσης, αφαιρούνται αμέσως από την προσομοίωση.



Το Σχήμα 3.6 απεικονίζει αυτές τις έννοιες. Τα δωμάτια (και οι διάδρομοι) είναι σκιασμένα με διαφορετικά χρώματα. Θύρες από μεμονωμένα δωμάτια στο διάδρομο (δωμάτιο στο μοντέλο) υποδεικνύονται με μια παχιά πορτοκαλί γραμμή. Οι θύρες εξόδου υποδεικνύονται με μια παχιά ανοιχτή πράσινη γραμμή. Τα άτομα εμφανίζονται με τις μπλε κουκκίδες. Στην γεωμετρία τοποθετείται το πλέγμα πλοήγησης.



Σχήμα 3.6: Δωμάτια, θύρες, θύρες εξόδου, πληθυσμός και το πλέγμα πλοήγησης (εικόνα από το εγχειρίδιο του Pathfinder)

Οποιαδήποτε τοποθεσία στο πλέγμα πλοήγησης μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ως ένας από τους τέσσερις τύπους εδάφους: ανοιχτός χώρος, σκάλες, θύρες και έξοδος. Οι ράμπες και τα δωμάτια ταξινομούνται και τα δύο ως ανοιχτός χώρος. Κάθε τύπος εδάφους έχει επίδραση στη συμπεριφορά των ατόμων σε αυτό το τμήμα του πλέγματος.

### 3.7.3 Συμπεριφορά ατόμων και στόχοι

Κάθε άτομο έχει μια συμπεριφορά που του έχει ανατεθεί στο περιβάλλον χρήστη. Μια συμπεριφορά υπαγορεύει μια ακολουθία στόχων που πρέπει να επιτύχει το άτομο στην προσομοίωση. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι στόχων στο Pathfinder.

#### Στόχοι αδράνειας

Είναι στόχοι στους οποίους ένας επιβάτης πρέπει να περιμένει σε μια τοποθεσία έως ότου συμβεί ένα συμβάν, όπως το να παρέλθει ένα χρονικό διάστημα ή ένας ανεγκυστήρας να φτάσει στο επίπεδο της εκκένωσης.

Όταν τα άτομα είναι αδρανή, περιμένουν μέχρι να συμβεί ένα συμβάν. Στο μοντέλο SFPE το άτομο παραμένει ακίνητο μέχρι να συμβεί ένα συμβάν που θα ενεργοποιήσει τον στόχο. Στο μοντέλο διεύθυνσης, καθώς το άτομο περιμένει, προσπαθεί να κρατάει απόσταση από τα υπόλοιπα άτομα. Αυτό αναφέρεται ως "διαχωρισμός".

Επειδή το άτομο μπορεί να κινηθεί στο μοντέλο διεύθυνσης, τους έχει εκχωρηθεί μια περιοχή περιορισμού που εξαρτάται από τον προηγούμενο στόχο αναζήτησης στη συμπεριφορά του. Εάν ο επιβάτης εγκαταλείψει αυτήν την περιοχή λόγω του "διαχωρισμού", δημιουργούν και χρησιμοποιούν έναν προσωρινό στόχο αναζήτησης για να επιστρέψουν στην περιοχή.

Οι περιοχές ορίζονται ως εξής:

- Εάν ο προηγούμενος στόχος αναζήτησης ήταν ένα σημείο προορισμού, το άτομο προσπαθεί να παραμείνει στην ακτίνα αυτού.
- Εάν ο προηγούμενος στόχος αναζήτησης ήταν δωμάτιο (συμπεριλαμβανομένου ανεγκυστήρα), το άτομο προσπαθεί να μείνει στο δωμάτιο, μακριά από τις πόρτες, επιτρέποντας σε άλλους επιβάτες να εισέλθουν.
- Εάν δεν υπήρχε προηγούμενος στόχος αναζήτησης, το άτομο μπορεί να κινηθεί οπουδήποτε κατά μήκος του πλέγματος.

#### Στόχοι αναζήτησης

Στόχοι στους οποίους ένας επιβάτης κινείται προς έναν προορισμό, όπως ένα σημείο, δωμάτιο, ασανσέρ ή έξοδο. Κατά την αναζήτηση, τα άτομα προσπαθούν να βρουν μια διαδρομή

μέσα στο πλέγμα πλοήγησης και χρησιμοποιούν τον σχεδιασμό διαδρομής, την δημιουργία διαδρομής και την ακολούθηση διαδρομής για να φτάσουν στον προορισμό τους.

### Στιγμαίοι στόχοι

Στόχοι που εμφανίζονται σε ένα χρονικό βήμα.

### **3.8 Σενάριο εκκένωσης**

Για την εξέταση των σεναρίων εκκένωσης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Pathfinder. Το λογισμικό αυτό ενσωματώνει τα αποτελέσματα του κώδικα FDS και πιο συγκεκριμένα τις συγκεντρώσεις των ρύπων και την θερμοκρασία και στη συνέχεια με τον κώδικα EVAC αναλύει και προσομοιώνει την διαδικασία εκκένωσης.

Η επίπτωση της φωτιάς στα άτομα που βρίσκονται στο εσωτερικό της σήραγγας κατά τη στιγμή της εκδήλωσης ενός κρίσιμου συμβάντος και η εξέλιξη του μέχρι το πέρας του σεναρίου εξαρτάται από πλήθος παράγοντες, όπως ο αριθμός και το είδος των εμπλεκόμενων οχημάτων, το μέγεθος της ισχύος της πυρκαγιάς, της εισροής και εκροής ατόμων με βάση τους επιβαίνοντες στα οχήματα καθώς και παραμέτρων που σχετίζονται με τους ίδιους τους χρήστες (ηλικία, φύλο, σωματική και ψυχική υγεία, τυχόν χρόνια νοσήματα, κινητική κατάσταση).

Η αρχή της αυτοδιάσωσης αναφέρεται στους εμπλεκόμενους χρήστες (οδηγούς – επιβάτες) οι οποίοι αμέσως μετά το κρίσιμο συμβάν απομακρύνονται με ίδια μέσα απουσία βοήθειας από τις Υπηρεσίες Εκτάκτων Καταστάσεων (ΕΚΑΒ, Πυροσβεστική, Αστυνομία) και το προσωπικό της σήραγγας. Ο χρόνος αυτοδιάσωσης αναφέρεται στον συνολικό χρόνο που απαιτείται από το άτομο για να προσεγγίσει μια ασφαλή θέση (Papaioannou and Georgiou 2003), και αποτελείται από δυο βασικές περιόδους :

- **Την περίοδο συνειδητοποίησης του γεγονότος**, που εξαρτάται από την αντίδραση των χρηστών να αντιληφθούν τη σοβαρότητα της κατάστασης και την ανάγκη ανάληψης συγκεκριμένων πρωτοβουλιών. Ιδιαίτερα στα πρώτα λεπτά της πυρκαγιάς, όπου ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας είναι ακόμα χαμηλός και παρατηρούνται χαμηλές εκπομπές καπνού και η ορατότητα δεν είναι περιορισμένη, οι χρήστες παρουσιάζουν εσφαλμένη αντίληψη και δυσπιστούν αναφορικά με τη σοβαρότητα της κατάστασης.

- **Την περίοδο απομάκρυνσης**, δηλαδή τον απαιτούμενο χρόνο για να διανυθεί η απόσταση μέχρι την ασφαλή θέση. Ο χρόνος αυτός εξαρτάται από την ορατότητα της διαδρομής, την

ύπαρξη φωτεινών ανακλαστικών ευδιάκριτων σημάτων οδεύσεων διαφυγής, τον λοιπό Η/Μ εξοπλισμό (σύστημα αναγγελίας, μεγαφωνική εγκατάσταση), φυσιολογικούς παράγοντες όπως η ταχύτητα που δύναται να αναπτύξει ο εμπλεκόμενος χρήστης, η ηλικία, η ύπαρξη εμποδίων, αλλά και ψυχολογικούς όπως η ύπαρξη συγγενικών προσώπων που επίσης εμπλέκονται, τραυματισμοί, διαταραχές άγχους, χρόνια καρδιοαναπνευστικά προβλήματα.

Κατά την διάρκεια της εκκένωσης λαμβάνονται υπόψη ο χρόνος αντίδρασης του κάθε ατόμου. Πιο συγκεκριμένα εξετάζεται ο χρόνος αντίληψης του συμβάντος, ο χρόνος απόφασης για εκκένωση και ο χρόνος μέχρι την εκκένωση. Καθ' όλη τη διάρκεια εξετάζεται η έκθεση του ατόμου σε τοξικά αέρια και θερμότητα μέχρι την ασφαλή διαφυγή του.

### 3.8.1 Σχεδιασμός σεναρίου εκκένωσης

Η γεωμετρία εισάγεται στο Pathfinder και εκεί ορίζεται ο χώρος στον οποίο θα κινηθεί ο πληθυσμός. Στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι το κρηπίδωμα και για να μπορεί να κινηθεί ο πληθυσμός πρέπει να ορισθεί σαν δωμάτιο (room) όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.7. Έπειτα στην είσοδο της σήραγγας η οποία στη συγκεκριμένη περίπτωση θα χρησιμοποιηθεί ως έξοδος, πρέπει να ορισθεί η έξοδος του «δωματίου» του κρηπιδώματος. Τέλος εισάγεται ο πληθυσμός στο δωμάτιο μέσω κάποιας πηγής πληθυσμού (occupant source) ή σαν ομάδες πληθυσμού. Εφόσον εξαχθούν τα αποτελέσματα επίλυσης του ροϊκού πεδίου από το FDS, εισάγονται στο Pathfinder έτσι ώστε να υπάρχει εικόνα της κίνησης του πληθυσμού και των φαινομένων που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς.

Οι πληθυσμοί που εισάγονται για να γίνει η εκάστοτε μελέτη, μπορεί να είναι ομοιογενείς, δηλαδή να έχουν τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά, ταχύτητα κίνησης και προφίλ συμπεριφοράς. Σαν προφίλ συμπεριφοράς μπορεί να ορισθεί ο στόχος που έχει το κάθε άτομο του πληθυσμού. Για παράδειγμα, να έχει σαν στόχο να κινηθεί απευθείας προς την κοντινότερη έξοδο, να συνδράμει στην εκκένωση των υπόλοιπων ατόμων ή να περιμένει για κάποιο χρονικό διάστημα και να κινηθεί αργότερα προς την έξοδο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μπορεί να δημιουργηθεί ένα σύνολο πληθυσμού το οποίο δεν είναι ομοιογενές και να κλίνει περισσότερο σε μια πραγματική κατάσταση όπου ο πληθυσμός είναι μικτός (άτομα με κινητικά προβλήματα, ηλικιωμένοι κλπ).



Σχήμα 3.7: Καθορισμός του κρηπιδώματος ως δωμάτιο, απεικόνιση του πληθυσμού, θύρας εξόδου και πλέγματος πλοήγησης

Στο **Σχήμα 3.7** φαίνεται ο ορισμός του κρηπιδώματος ως χώρος κίνησης του πληθυσμού τα άτομα του οποίου μπορεί να αναπαρασταθούν και ως σφαίρες, κύλινδροι και σαν άνθρωποι χωρίς βέβαια να επηρεάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Φαίνεται επίσης η θύρα εξόδου στα αριστερά ως παχιά πράσινη γραμμή, ενώ το πλέγμα πλοήγησης στην ουσία είναι ο χώρος κίνησης χωρισμένος στα δύο με μια διαγώνιο η οποία δεν είναι εμφανής λόγω του μεγάλου μήκους (>800m) του χωρίου κίνησης.

Για τα τρία διαφορετικά σενάρια φωτιάς (A, B, και C), εξετάστηκαν τρεις διαφορετικοί χρόνοι έναρξης της διαδικασίας εκκένωσης. Πιο συγκεκριμένα οι χρόνοι έναρξης της εκκένωσης είναι +60s, +120s και +300s μετά την έναρξη της φωτιάς. Ο συνολικός αριθμός των ατόμων που εκκενώνουν το τρένο προς την πλατφόρμα είναι 524 και ανταποκρίνεται σε πληρότητα 80% για μια υπεραστική αμαξοστοιχία με 8 βαγόνια, όπου κάθε βαγόνι μπορεί να μεταφέρει 80 επιβάτες. Για τα τρία διαφορετικά σενάρια εκκένωσης, δημιουργήθηκαν 8 πηγές πληθυσμού με κάθε μία εξ αυτών να αποτελεί την θύρα κάθε βαγονιού. Το προφίλ με τα χαρακτηριστικά του πληθυσμού είναι το προκαθορισμένο προφίλ στο Pathfinder με ύψος του κάθε ατόμου στα 1.8m και ταχύτητα κίνησης 1.19m/s.

### 3.8.2 Υπολογισμός δείκτη FED

Ο υπολογισμός του δείκτη FED μέσω του Pathfinder, γίνεται μέσω των εξισώσεων που περιγράφονται στο SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 5th Edition (Hurley et al. 2016). Μόνο οι συγκεντρώσεις των ναρκωτικών αερίων όπως το CO και CO<sub>2</sub>, και του O<sub>2</sub> υπολογίζονται.

$$FED_{tot} = FED_{CO} \cdot V_{CO_2} + FED_{O_2} \quad 3.36$$

Στο ανωτέρω υπολογισμό δεν περιλαμβάνεται η επίδραση του υδροκυανίου (HCN), ενώ η επίδραση του CO<sub>2</sub> οφείλεται μόνο στην αύξηση του ρυθμού αναπνοής. Το διοξείδιο του άνθρακα δεν έχει τοξικές επιδράσεις σε συγκεντρώσεις μέχρι 5%.

$$FED_{CO} = 3.317 \cdot 10^{-5} \cdot CO^{1.036} \cdot V \cdot t/D \quad 3.37$$

Όπου **CO** η συγκέντρωση του μονοξειδίου του άνθρακα (ppm v/v 20° C), **V** ο όγκος του εισπνεόμενου αέρα ανά λεπτό (L/min) με την τιμή του να είναι 25 L/min για ελαφριά άσκηση, όπως είναι και μια τυπική διαδικασία εκκένωσης, **t** ο χρόνος σε min και **D** η δόση έκθεσης (%COHb) με την τιμή της να είναι 30% για ελαφριά άσκηση.

$$V_{CO_2} = \exp(0.1903 \cdot \%CO_2 + 2.0004) / 7.1 \quad 3.38$$

Όπου **%CO<sub>2</sub>** το κλάσμα όγκου του CO<sub>2</sub> (v/v). Το κλάσμα για αναισθητοποίηση λόγω χαμηλής συγκέντρωσης O<sub>2</sub> υπολογίζεται από την σχέση:

$$FED_{O_2} = \frac{t}{\exp[8.13 - 0.54 \cdot (20.9 - \%O_2)]} \quad 3.39$$

Όπου, **t** ο χρόνος σε min και **%O<sub>2</sub>** το κλάσμα όγκου του O<sub>2</sub> (v/v). Η περιοχή μέτρησης για τον δείκτη FED είναι το 90% του ύψους του ατόμου. Για παράδειγμα, για τον υπολογισμό

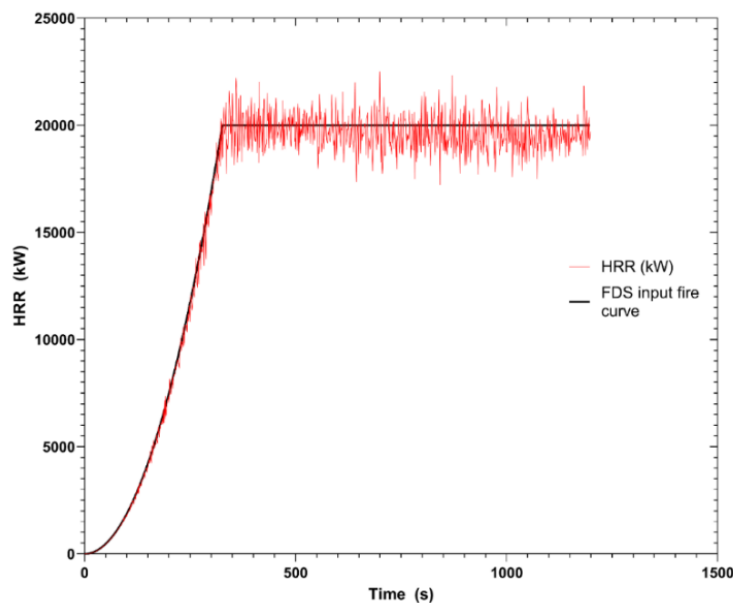
του δείκτη FED για ένα άτομο ύψους 1.8 μέτρων, η μέτρηση γίνεται στο ύψος των 1.62 μέτρων. Όταν ο επιβάτης βρίσκεται εκτός του πλέγματος του FDS, σταματάει ο υπολογισμός του FED μέχρι ο επιβάτης να εισέλθει σε κάποιο πλέγμα (McGrattan 2019).

## 4 Αποτελέσματα

### 4.1 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης μέσω του FDS.

Στα τρία διαφορετικά σενάρια έναρξης λειτουργίας του συστήματος εξαερισμού, οι αριθμητικές τιμές που εξήχθησαν είναι για την θερμοκρασία, την ταχύτητα ροής, το κλάσμα όγκου των αερίων και ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας (HRR).

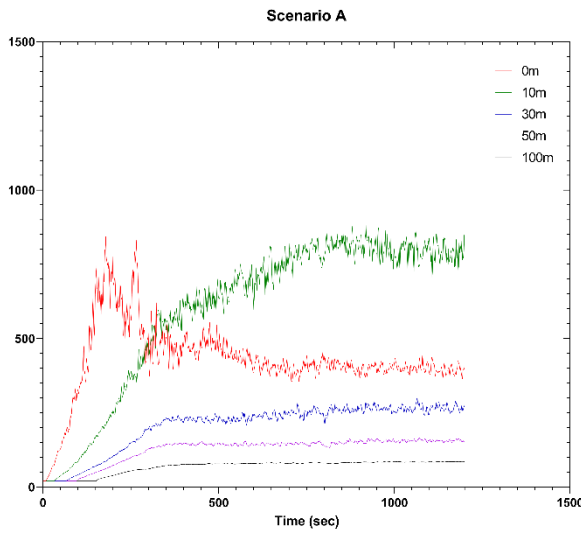
Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.1 οι τιμές του HRR συμφωνούν με τα αριθμητικά αποτελέσματα από την έναρξη της πυρκαγιάς μέχρι το τέλος της προσομοίωσης.



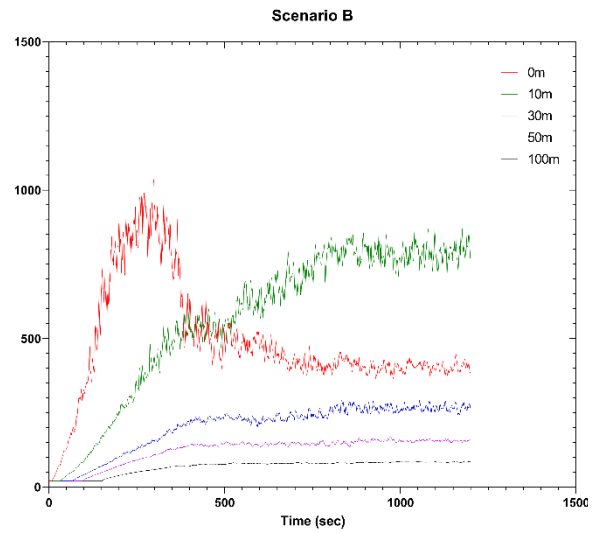
Σχήμα 4.1: Σύγκριση του εισηγμένου ρυθμού ανάπτυξης της φωτιάς με τις τιμές που εξήχθησαν από την αριθμητική επίλυση μέσω του κώδικα FDS.

Στο Σχήμα 4.2 φαίνεται ότι όσο περισσότερο καθυστερεί η ενεργοποίηση του συστήματος εξαερισμού, τόσο υψηλότερες είναι οι θερμοκρασίες στην οροφή της σήραγγας, ενώ < όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.3, η έκταση της περιοχής υψηλής θερμοκρασίας είναι μεγαλύτερη. Αυτή η ταχεία άνοδος της θερμοκρασίας μπορεί να οδηγήσει σε αποκόλληση δομικού υλικού, όπως το σκυρόδεμα, που συχνά συμβαίνει με εκρηκτικό τρόπο και αποτελεί μεγάλη απειλή για τον πληθυσμό στη σήραγγα.

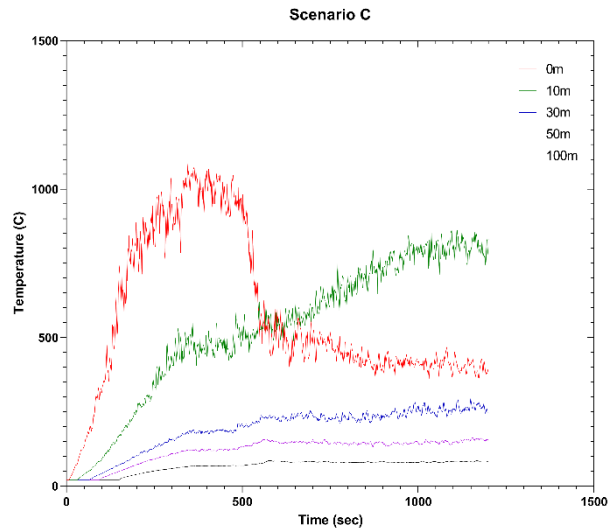




(a)

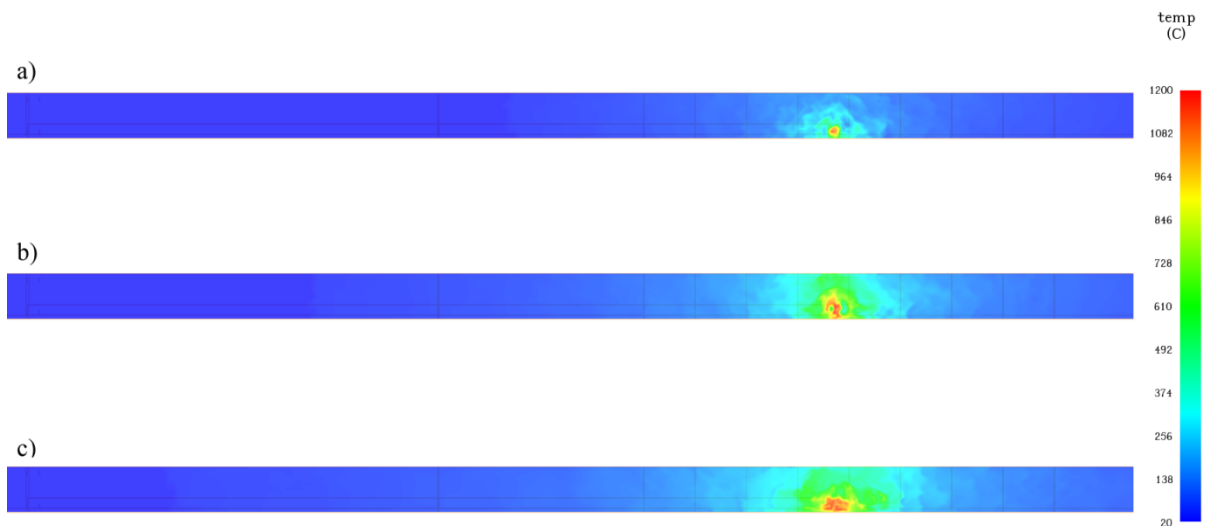


(b)



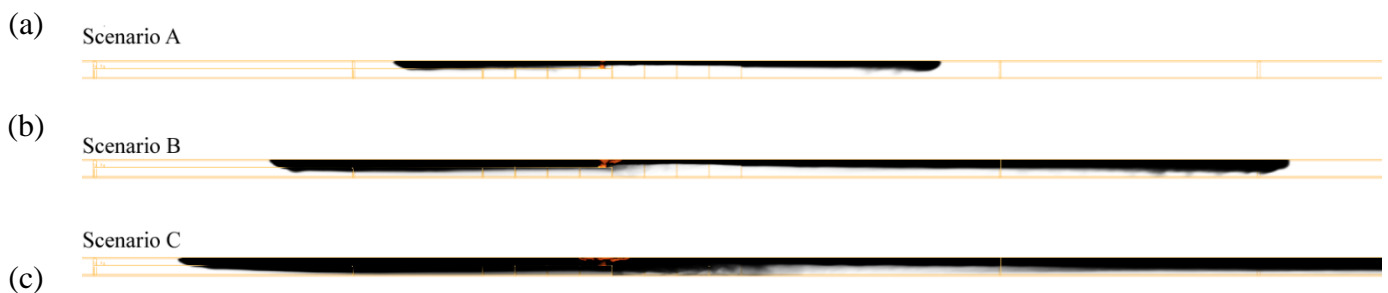
(c)

Σχήμα 4.2: Θερμοκρασία στην οροφή της σήραγγας ( $z = 7\text{m}$ ) πάνω από και κατόντη της εστίας φωτιάς για τα τρία διαφορετικά σενάρια, a) Scenario A, b) Scenario B, και c) Scenario C.



Σχήμα 4.3: Θερμοκρασία στην οροφή της σήραγγας ( $z = 7\text{m}$ ), στο επίπεδο  $z$ , για τα τρία διαφορετικά σενάρια, ακριβώς την χρονική στιγμή της ενεργοποίησης των ανεμιστήρων a) Scenario A +180s, b) Scenario B +300s και c) Scenario C +480s μετά την έναρξη της φωτιάς.

Παράλληλα, η καθυστέρηση της ενεργοποίησης του συστήματος αερισμού, επιτρέπει μεγαλύτερη διασπορά του καπνού (άρα και τοξικών ρύπων) εντός της σήραγγας, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.4. Αυτό επηρεάζει την διαδικασία εκκένωσης λόγω χαμηλής ορατότητας και εισπνοής αιθάλης και τοξικών αερίων.

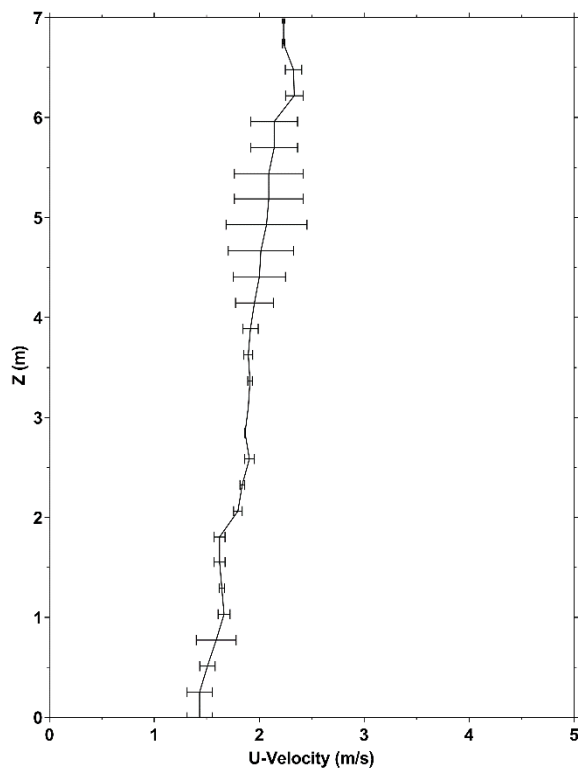


Σχήμα 4.4: Διασπορά και φαινόμενο αναστροφής του καπνού, στο επίπεδο  $y$ , για τα τρία διαφορετικά σενάρια, ακριβώς την χρονική στιγμή της ενεργοποίησης των ανεμιστήρων a) Scenario A +180s, b) Scenario B +300s και c) Scenario C +480s μετά την έναρξη της φωτιάς.

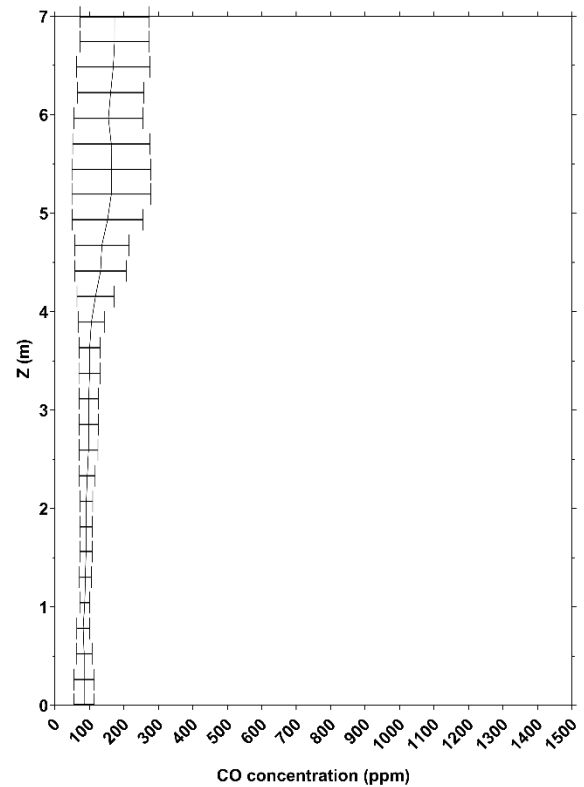
#### 4.1.1 Έλεγχος ανεξαρτησίας πλέγματος και επαλήθευση των αποτελεσμάτων μέσω πειρικού μοντέλου

Ο έλεγχος της ανεξαρτησίας του πλέγματος έγινε με την χρήση της εξίσωσης 3.27 όπως περιγράφεται στο κεφάλαιο 3.5. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.5, τα αποτελέσματα δεν εμφανίζουν μεγάλη απόκλιση μεταξύ τους. Έτσι χρησιμοποιήθηκε ο συνδυασμός του πυκνού και του μεσαίου πλέγματος σαν το τελικό πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση των τριών σεναρίων. Για την περιοχή κοντά στο πεδίο της φωτιάς (50m ανάντη και κατάντη του μετώπου φωτιάς) χρησιμοποιήθηκε το πυκνό πλέγμα με μέγεθος 0.25m ενώ για το υπόλοιπο τμήμα της σήραγγας χρησιμοποιήθηκε το μεσαίο πλέγμα με μέγεθος 0.5m. Με αυτή τη διάταξη, ο συνολικός αριθμός των κελιών ανέρχεται στο 1,355,200 κελιά.

Η μέση τιμή των σφαλμάτων της ταχύτητας  $U$  μεταξύ αραιού και πυκνού πλέγματος είναι περίπου 14% ενώ για το μεσαίο και το πυκνό περίπου 5%, ενώ για το μεσαίο και το τελικό πλέγμα 4%. Για την συγκέντρωση του μονοξειδίου του άνθρακα μέση τιμή των σφαλμάτων μεταξύ αραιού και πυκνού πλέγματος είναι περίπου 16% ενώ για το μεσαίο και το πυκνό περίπου 8%, ενώ για το μεσαίο και το τελικό πλέγμα 6%. Τα μεγέθη πλέγματος που χρησιμοποιήθηκαν είναι σύμφωνα με τις οδηγίες του UNSRC και του EPRI και χρησιμοποιούνται και σε άλλες αναλύσεις όπως των (Liu et al. 2019; Król and Król 2021; Cheng et al. 2021).



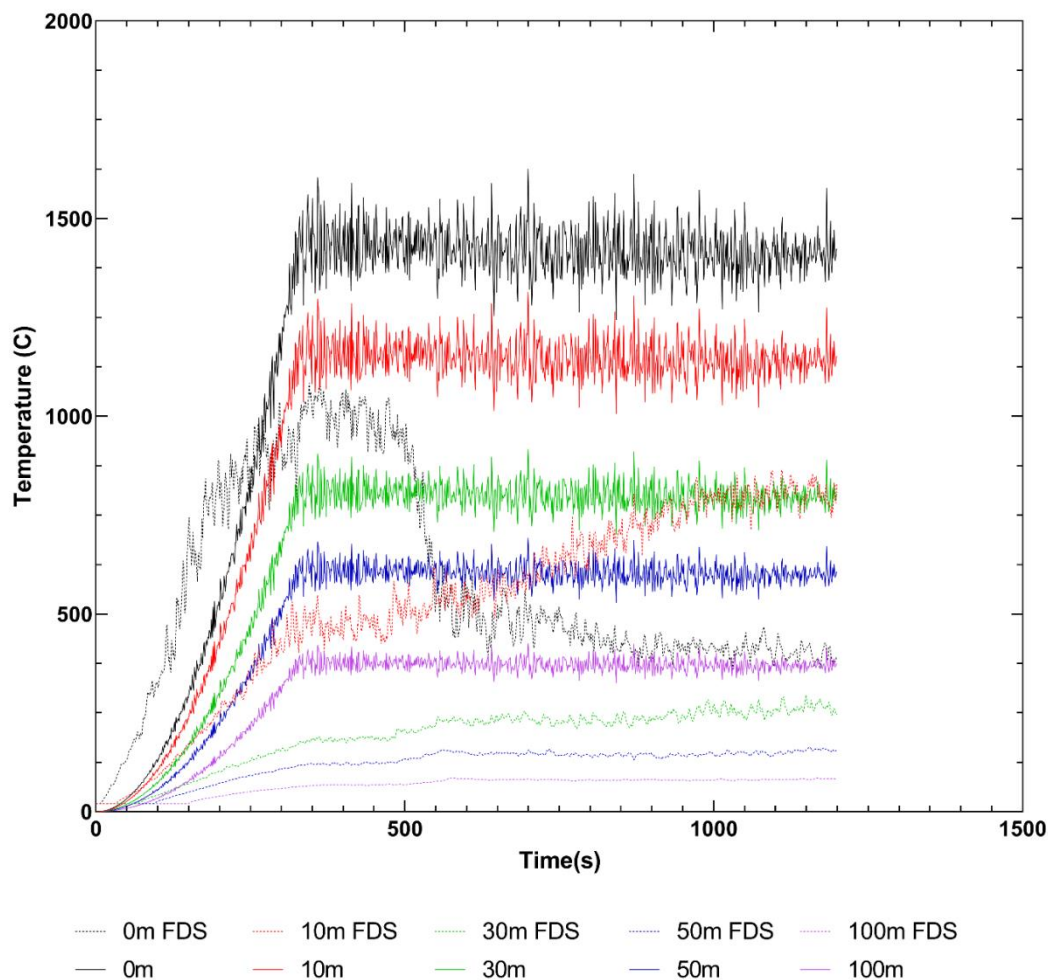
(a)



(b)

Σχήμα 4.5: Σύγκριση του Grid Convergence Index (GCI) (a) για τη μέση τιμή της ταχύτητας  $U$  και (b) για την μέση συγκέντρωση του μονοξειδίου του άνθρακα, για το μεσαίο και πυκνό πλέγμα, στο σημείο ( $x = 1100\text{m}$ ,  $y = 5.5\text{m}$  και  $z = 0$  έως  $7\text{m}$ ).

Οι τιμές της θερμοκρασίας που υπολογίστηκαν με το εμπειρικό μοντέλο συγκρίθηκαν με τα αριθμητικά αποτελέσματα για το σενάριο C, στην οροφή της σήραγγας ( $z=7\text{m}$ ) πάνω και κατάντη της πηγής φωτιάς (όπου  $x=0$  είναι ακριβώς πάνω από την εστία φωτιάς). Μεγάλη διαφορά στις τιμές θερμοκρασίας φαίνεται στο Σχήμα 4.6. Το σχήμα δείχνει την καλή συμφωνία των καμπυλών στα  $0\text{m}$  κατά τα αρχικά στάδια της πυρκαγιάς. Από αυτό το σημείο και μετά η θερμοκρασία μειώνεται και ακολουθεί μια τάση διασποράς. Υπάρχει μια σταθερή διαφορά περίπου  $400\text{ }^\circ\text{C}$  μεταξύ των εμπειρικών και των υπολογισμένων τιμών θερμοκρασίας για κάθε τοποθεσία εκτός από πάνω από την εστία φωτιάς. Αυτή η διαφορά οδηγεί στην υπόθεση ότι εφόσον το μήκος της φλόγας αυξάνεται μέχρι το σημείο που είναι ίσο και μεγαλύτερο από το πραγματικό ύψος της σήραγγας και αρχίζει να κινείται οριζόντια προς την οροφή, το στρώμα καπνού περιβάλλει την πηγή της φωτιάς. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι δεν υπάρχει αρκετό οξυγόνο για να αναπτυχθεί περαιτέρω η φωτιά, επομένως η φωτιά γίνεται ελεγχόμενη από τον εξαερισμό. Άλλοι πιθανοί λόγοι για αυτές τις διαφορές μπορεί να είναι ότι υπάρχουν περιορισμοί στην εγκυρότητα παραμέτρων όπως η γεωμετρία της σήραγγας και η περιοχή πυρκαγιάς (η πηγή πυρκαγιάς FDS έχει διαφορετικές διαστάσεις από αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα από τα οποία προκύπτει το εμπειρικό μοντέλο).



Σχήμα 4.6: Τιμές της θερμοκρασίας στην οροφή της σήραγγας ( $x = 0, 10, 30, 50, 100\text{m}$  και  $z=7\text{m}$ ) πάνω από και κατάντη της πηγής φωτιάς, υπολογισμένες με το εμπειρικό μοντέλο και συγκρινόμενες με τις τιμές από την αριθμητική προσομοίωση.

Επιπλέον, για την επικύρωση της θερμοκρασίας τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με την καμπύλη πυρκαγιάς υδρογονανθράκων (HC) και την τροποποιημένη καμπύλη πυρκαγιάς υδρογονανθράκων (HCM) που χρησιμοποιούνται για δοκιμές αντοχής σε φωτιά δομικών σχεδίων και την καμπύλη πυρκαγιάς αμαξοστοιχίας RABT-ZTV. Η καμπύλη πυρκαγιάς HC χρησιμοποιείται όταν υπάρχει κίνδυνος πυρκαγιών υγρών καυσίμων, π.χ. σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις (χημικά), σε πλοία, πλατφόρμες πετρελαίου, οδικές και σιδηροδρομικές σήραγγες καθώς και για πυρκαγιές «λίμνης» βενζίνης και ντίζελ. Η καμπύλη πυρκαγιάς HCM προέρχεται από την καμπύλη HC και προσαρμόζεται για τις ανάγκες των γαλλικών κανονισμών. Και οι δύο καμπύλες HC και HCM παρουσιάζουν έντονη διαβάθμιση θερμοκρασίας στα πρώτα λεπτά και η διαφορά τους είναι η μέγιστη θερμοκρασία 1100 και 1300 °C αντίστοιχα. Η Κα-

τευθυντήρια γραμμή για τον εξοπλισμό και τη λειτουργία οδικών σιράγγων (Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln) (RABT) ορίζει τη λεγόμενη πυρκαγιά της σήραγγας RABT. Αυτή χρησιμοποιείται συχνά για τον σχεδιασμό πυροπροστασίας στην κατασκευή μιας σήραγγας. Η καμπύλη φωτιάς σε σήραγγα, RABT, είναι μια καμπύλη τεχνητής πυρκαγιάς και προορίζεται να καλύψει τις μέγιστες θερμοκρασίες που προκύπτουν από πυρκαγιές σε σήραγγες (Haukur et al. 2015). Η καμπύλη μπορεί π.χ. να χρησιμοποιηθεί στο σχεδιασμό και τη δοκιμή σήραγγας. Οι εξισώσεις καμπύλης πυρκαγιάς HC και HCM φαίνονται παρακάτω στις εξισώσεις 4.1 και 4.2 αντίστοιχα.

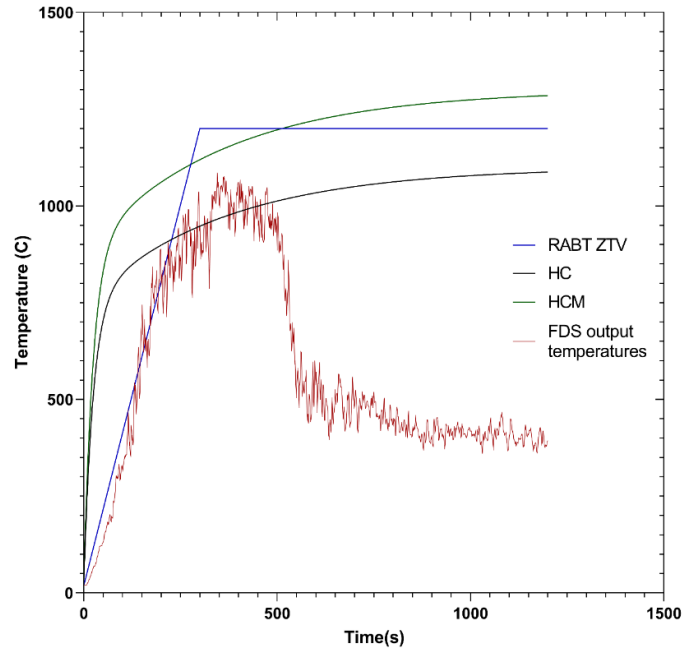
$$T = 20 + 1080 \cdot (1 - 0,325 \cdot e^{-0,167 \cdot t} - 0,675 \cdot e^{-2,5 \cdot t}) \quad 4.1$$

$$T = 20 + 1280 \cdot (1 - 0,325 \cdot e^{-0,167 \cdot t} - 0,675 \cdot e^{-2,5 \cdot t}) \quad 4.2$$

Όπου  $t$  είναι ο χρόνος σε min.

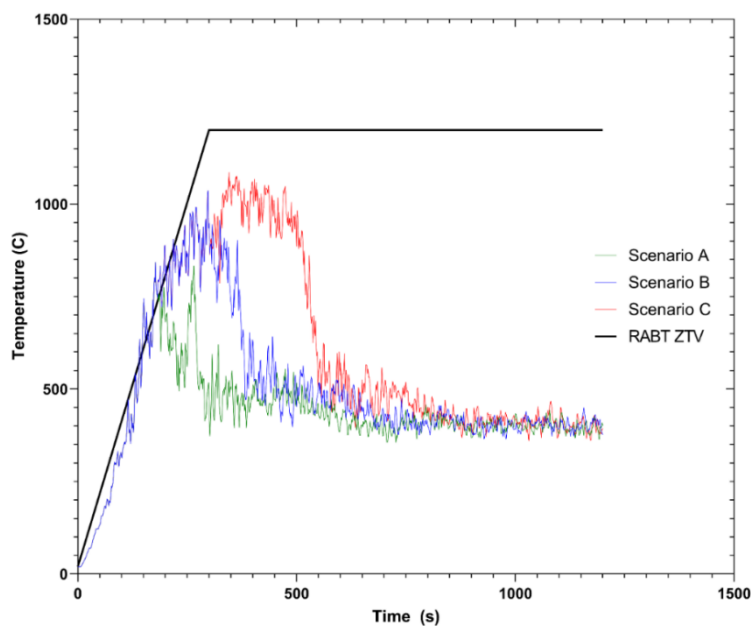
Η καμπύλη πυρκαγιάς αμαξοστοιχίας RABT-ZTV ακολουθεί γραμμική ανάπτυξη για τα πρώτα 5 λεπτά, όπου φτάνει σε μέγιστη θερμοκρασία 1200 οC.

Η σύγκριση των τιμών θερμοκρασίας στην οροφή της σήραγγας που εξήχθησαν από το FDS για το σενάριο C και τις καμπύλες HC, HCM και RABT - ZTV φαίνεται στο Σχήμα 4.7. Τα αποτελέσματα του FDS είναι σε συμφωνούν αρκετά με την καμπύλη πυρκαγιάς RABT-ZTV για τα πρώτα λεπτά έως ότου ενεργοποιηθεί το σύστημα εξαερισμού στα 480s. Το σενάριο C επιλέχθηκε λόγω της καθυστέρησης στην ενεργοποίηση των ανεμιστήρων έτσι ώστε η άνοδος της θερμοκρασίας να είναι περισσότερο σύμφωνη με τις καμπύλες πυρκαγιάς.



Σχήμα 4.7: Θερμοκρασία στην οροφή ( $z = 7\text{m}$ ) ακριβώς πάνω από την πηγή φωτιάς για το σενάριο C, συγκρινόμενη με της καμπύλες φωτιάς HC, HCM και RABT-ZTV

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.8, οι θερμοκρασίες στην οροφή της σήραγγας για τα τρία διαφορετικά σενάρια συμφωνούν αρκετά με την καμπύλη RABT-ZTV για τα πρώτα λεπτά της προσομοίωσης. Έπειτα, μετά την ενεργοποίηση του συστήματος αερισμού η θερμοκρασία πέφτει και διατηρείται σταθερή περίπου στους  $450\text{ }^\circ\text{C}$ .

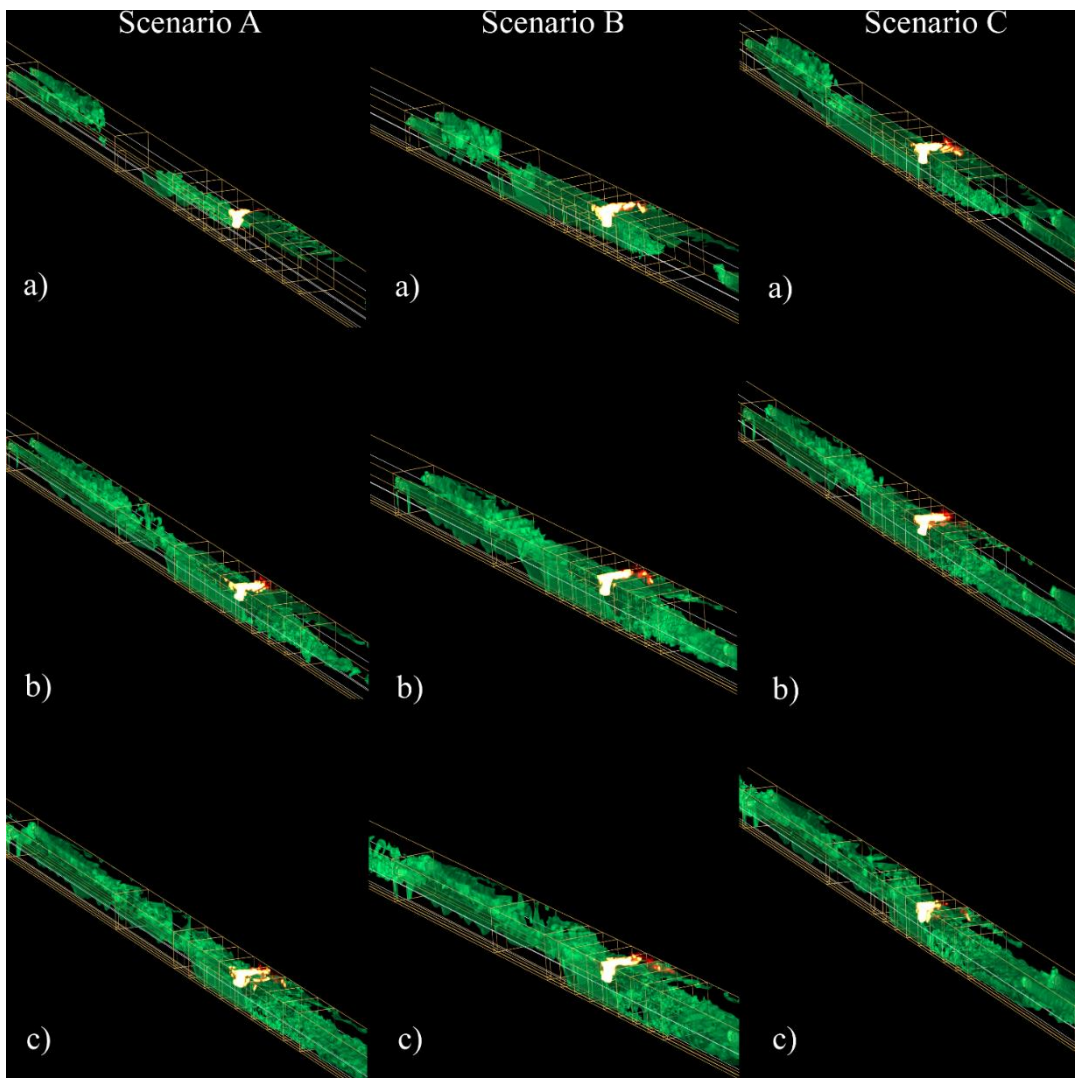


Σχήμα 4.8: Σύγκριση των θερμοκρασιών των τριών σεναρίων, στην οροφή της σήραγγας ( $z = 7\text{m}$ ) πάνω από την πηγή φωτιάς ( $x = 795\text{m}$ ), με την καμπύλη φωτιάς RABT-ZTV.

#### 4.1.2 Κρίσιμη ταχύτητα εξαερισμού

Η κρίσιμη ταχύτητα για τον εξαερισμό της σήραγγας, σύμφωνα με τις εξισώσεις 2.1 και 2.2 υπολογίζεται στα 2.7 m/s.

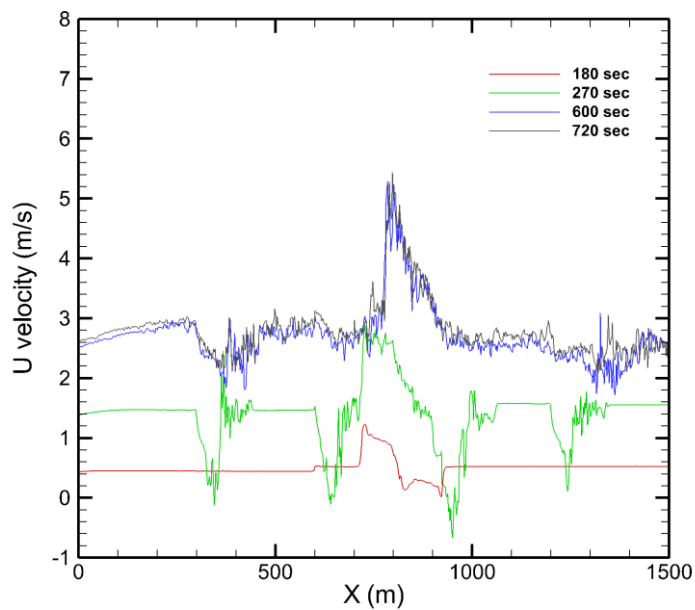
Το Σχήμα 4.9 δείχνει ότι η ταχύτητα ροής εξαερισμού αρχίζει να αυξάνεται αμέσως μετά την ενεργοποίηση του συστήματος αερισμού. Για να επιτευχθεί η κρίσιμη ταχύτητα ροής χρειάζονται περίπου 300 sec από την στιγμή που οι ανεμιστήρες θα φτάσουν την ονομαστική τους ισχύ. Παρ' όλα αυτά, η ισχυρή ώση των ανεμιστήρων μπορεί να διώξει τον καπνό αρκετά πριν φτάσουν στη μέγιστη δύναμη λειτουργίας τους.



Σχήμα 4.9: Ανάπτυξη της κρίσιμης ταχύτητας των 2.7 m/s (πράσινο χρώμα) στην περιοχή του τρένου για a) +90s, b) +180s and c) +300s μετά την ενεργοποίηση των ανεμιστήρων. Οι ανεμιστήρες φτάνουν την μέγιστη ισχύ τους 90s μετά την ενεργοποίησή τους, ενώ η ροή εξαερισμού έχει διαμορφωθεί μετά από 300s.

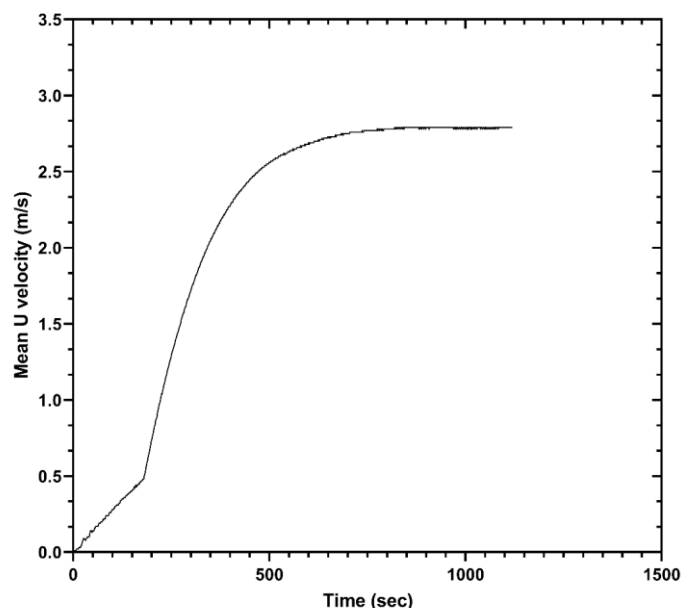


Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.10 πριν την έναρξη λειτουργίας των ανεμιστήρων υπάρχει ένα ελαφρύ ρεύμα αέρα με ταχύτητα περίπου 0.5 m/s ( $t = 180\text{s}$ ) που οφείλεται στη διαφορά πίεσης στα στόμια της σήραγγας. Η διακύμανση που φαίνεται στη θέση  $x = 750\text{m}$  οφείλεται στην παρουσία του τρένου, η οποία προκαλεί στένωση της διατομής της σήραγγας σε εκείνη την περιοχή με αποτέλεσμα την αύξηση της ταχύτητας ροής. Επίσης φαίνεται ότι μετά τα 300s η ταχύτητα ροής είναι ίση και μεγαλύτερη από την κρίσιμη ταχύτητα.



Σχήμα 4.10: Διαμήκης  $U$  ταχύτητα στο επίπεδο συμμετρίας ( $y = 5.5\text{m}$ ,  $z = 3.5\text{m}$ ) της σήραγγας για το σενάριο A, για διαφορετικές χρονικές στιγμές  $t = 180\text{s}$ ,  $270\text{s}$ ,  $600\text{s}$ ,  $720\text{s}$ .

Στο Σχήμα 4.11 φαίνεται η χρονική ανάπτυξη της μέσης  $U$  ταχύτητας ανάντη του μετώπου φωτιάς. Όπως παρατηρείται, η μέση τιμή της ταχύτητας φτάνει την τιμή της κρίσιμης ταχύτητας (2.7 m/s) περίπου 600s μετά την ενεργοποίηση του συστήματος εξαερισμού. Οι συνθήκες εξαερισμού επιτυγχάνονται από την στιγμή που οι ανεμιστήρες λειτουργούν στη μέγιστη ισχύ τους, αυτό όμως δεν συνεπάγεται ότι η ταχύτητα ροής εντός της σήραγγας έχει φτάσει την κρίσιμη τιμή.



Σχήμα 4.11: Μέση διαμήκης U ταχύτητα, για το σενάριο A, ανάντη του μετώπου φωτιάς.

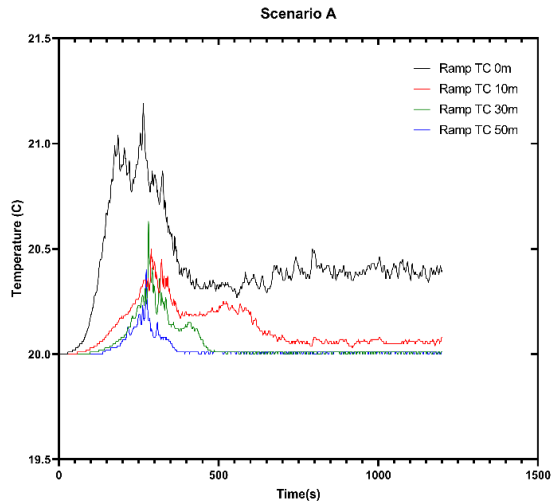
## 4.2 Εκκένωση και ασφάλεια του πληθυσμού

Για κάθε σενάριο (A, B και Γ) εξετάστηκαν τρεις διαφορετικοί χρόνοι εκκένωσης +60 sec, +120 sec και +300 sec μετά την έναρξη της πυρκαγιάς. Η εκκένωση των επιβατών πραγματοποιήθηκε κατά μήκος της πλατφόρμας κίνησης του πληθυσμού. Ο συνολικός αριθμός επιβατών είναι 524 που αντιστοιχεί στο 80% της χωρητικότητας ενός υπεραστικού τρένου με 8 βαγόνια, το καθένα από τα οποία μπορεί να φιλοξενήσει 80 επιβάτες. Η προσομοίωση εκκένωσης και ο υπολογισμός του δείκτη FED έγιναν με το Pathfinder που είναι μια διεπαφή για τον κώδικα FDS + EVAC που αναπτύχθηκε από το NIST.

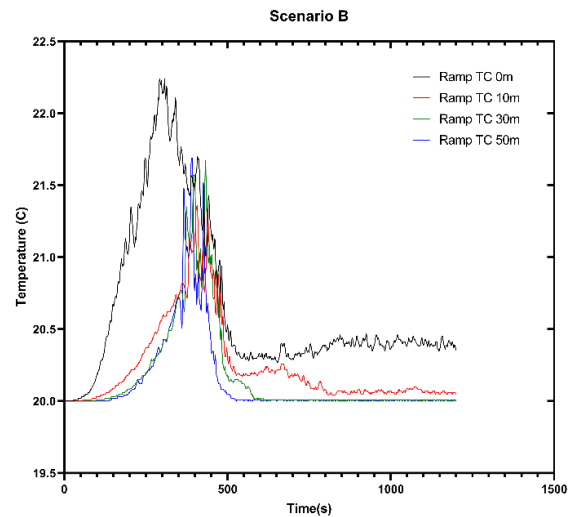
Για τα τρία σενάρια εκκένωσης, δημιουργήθηκαν οκτώ πηγές επιβατών, καθεμία από τις οποίες προσομοιώνει την πόρτα ενός βαγονιού. Το προφίλ των επιβατών ορίστηκε ως το προεπιλεγμένο προφίλ που παρέχεται, με ύψος 1,8 m και ταχύτητα βάρδισης 1,19 m/s. Για λόγους διευκόλυνσης, μόνο η είσοδος της σήραγγας επισημάνθηκε ως το σημείο εξόδου προς την κατεύθυνση των επιβατών.

### 4.2.1 Θερμοκρασία

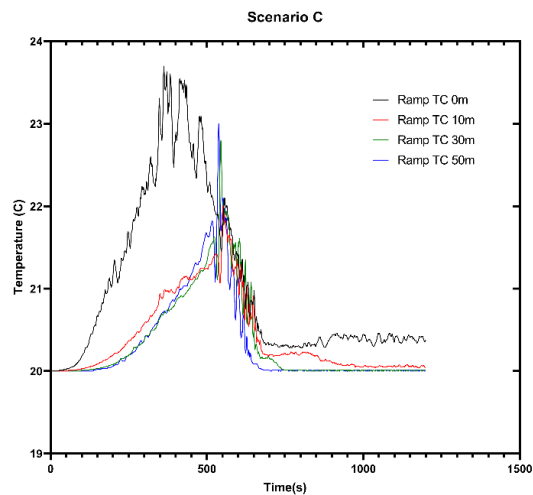
Το σχήμα δείχνει ότι η για κάθε σενάριο, η θερμοκρασία σε ύψος 2m πάνω από το κρηπίδωμα δεν ξεπερνάει τους 24° C. Υπό αυτές τις θερμοκρασιακές συνθήκες η εκκένωση μπορεί να διεξαχθεί κανονικά.



(a)



(b)



(c)

Σχήμα 4.12: Κατανομή της θερμοκρασίας στην οροφή της σήραγγας ( $z = 7\text{m}$ ) ακριβώς πάνω και κατόντη του μετώπου φωτιάς (με το  $x = 0$  να δηλώνει τη θέση ακριβώς πάνω από την εστία φωτιάς)

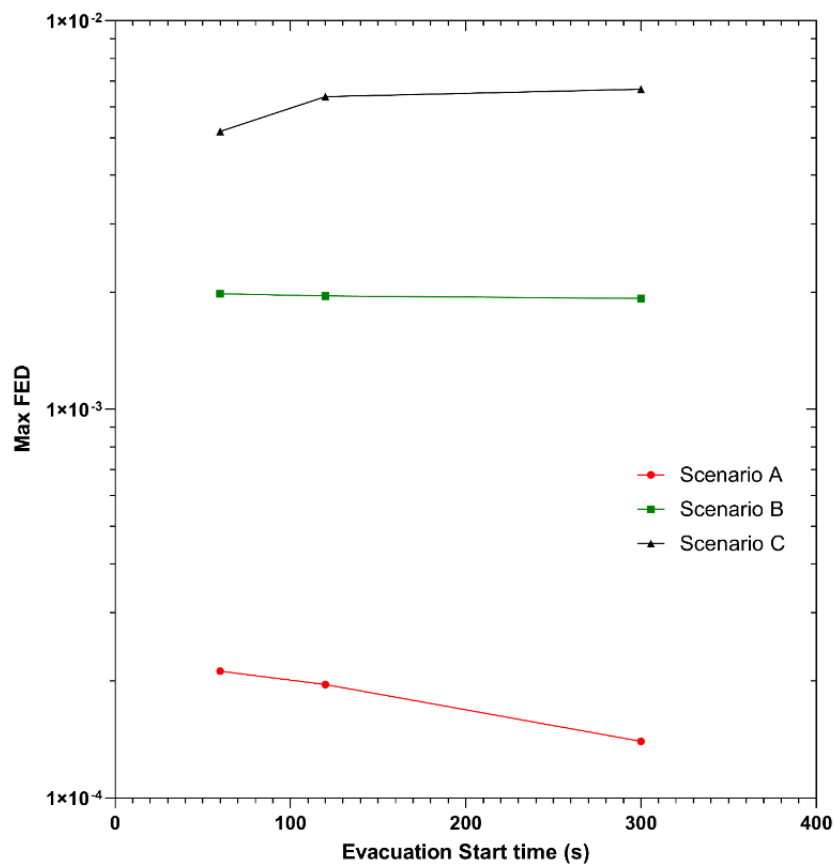
#### 4.2.2 Δείκτης FED

Σε καμία περίπτωση ο δείκτης FED έφτασε την κρίσιμη τιμή 1 όπου και θεωρείται ότι ο άνθρωπος αναισθητοποιείται ή και πεθαίνει. Παρουσιάζεται ενδιαφέρον στις διακυμάνσεις των τιμών αναλόγως τη χρονική στιγμή της έναρξης λειτουργίας του συστήματος εξαερισμού και της έναρξης της διαδικασίας εκκένωσης. Τα αποτελέσματα για τη μέγιστη τιμή FED παρου-

σιάζονται στον Πίνακα 1 και συγκρίνονται στο Σχήμα 4.13. Όπως φαίνεται, όσο περισσότερο καθυστερεί η ενεργοποίηση του συστήματος εξαερισμού, τόσο περισσότερο αυξάνεται η πρόσληψη προϊόντων καύσης και τοξικών αερίων. Αυτό φαίνεται επίσης στον Πίνακα 2 και στο Σχήμα 4.14, όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις μέσες τιμές FED για κάθε περίπτωση. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι, ενώ οι μέγιστες τιμές FED για το σενάριο A είναι περίπου 6 φορές χαμηλότερες από τις τιμές για το σενάριο C, οι μέσες τιμές FED για το σενάριο A είναι μια τάξη μεγέθους χαμηλότερες από το σενάριο C.

Max FED			
Evacuation start time (s)	scenario A	scenario B	scenario C
60	$2,12 \times 10^{-4}$	$1,98 \times 10^{-3}$	$5,20 \times 10^{-3}$
120	$1,96 \times 10^{-4}$	$1,96 \times 10^{-3}$	$6,38 \times 10^{-3}$
300	$1,40 \times 10^{-4}$	$1,93 \times 10^{-3}$	$6,67 \times 10^{-3}$

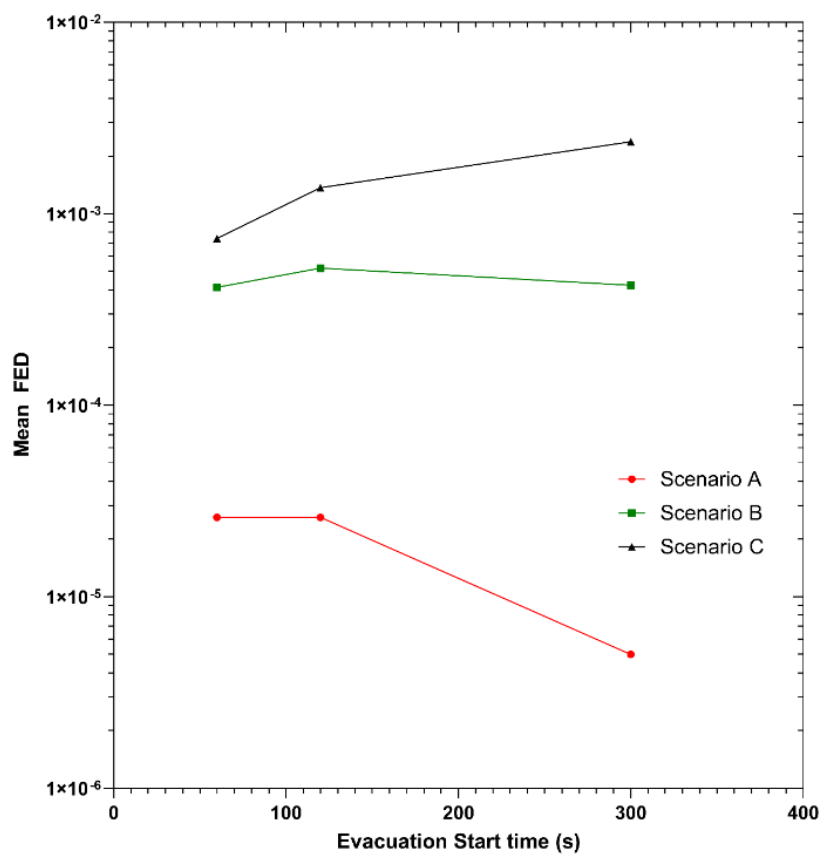
Πίνακας 1: Οι τιμές του μέγιστου FED για κάθε σενάριο φωτιάς και περίπτωση εκκένωσης



Σχήμα 4.13: Μέγιστες τιμές FED για κάθε σενάριο

Mean FED			
Evacuation start time (s)	scenario A	scenario B	scenario C
60	$2,60 \times 10^{-5}$	$4,14 \times 10^{-4}$	$7,43 \times 10^{-4}$
120	$2,60 \times 10^{-5}$	$5,21 \times 10^{-4}$	$1,37 \times 10^{-3}$
300	$5,00 \times 10^{-6}$	$4,23 \times 10^{-4}$	$2,38 \times 10^{-3}$

Πίνακας 2: Μέσες τιμές FED για κάθε σενάριο φωτιάς και περίπτωση εκκένωσης



Σχήμα 4.14: Μέσες τιμές FED για κάθε σενάριο

## 5 Σχόλια και συμπεράσματα

---

Έγιναν τρεις αναλύσεις για χρόνους ενεργοποίησης του συστήματος εξαερισμού, που συνδυάστηκαν με τρεις αναλύσεις για διαφορετικούς χρόνους εκκίνησης της διαδικασίας εκκένωσης. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε επικύρωση της θερμοκρασίας και της κρίσιμης ταχύτητας. Τα αποτελέσματα έδειξαν καλή συμφωνία των θεωρητικών τιμών και των τιμών προσομοίωσης, επομένως το σύστημα εξαερισμού είναι ικανό να παρέχει επαρκή ποσότητα αέρα για την εξαγωγή του καπνού.

Η διαδικασία εκκένωσης, η οποία προσομοιώθηκε με το λογισμικό Pathfinder, σχετικά με τις τιμές FED, δεν έδειξε ότι οι επιβάτες κινδύνευαν, αλλά έδειξε ενδιαφέροντα αποτελέσματα σχετικά με τους χρόνους ενεργοποίησης του συστήματος εξαερισμού και τους χρόνους εκκίνησης της διαδικασίας εκκένωσης. Από τις τιμές FED που υπολογίστηκαν για 9 συνολικά περιπτώσεις, συμπεραίνεται ότι η πιο σημαντική ενέργεια σε μια πυρκαγιά σε σήραγγα είναι ο χρόνος, μετά την έναρξη της πυρκαγιάς, που ενεργοποιείται το σύστημα εξαερισμού. Εάν το σύστημα εξαερισμού καθυστερήσει για οποιονδήποτε λόγο και οι επιβάτες έχουν αρχίσει να εκκενώνουν το τρένο, είναι ασφαλέστερο να καθυστερήσει η ενεργοποίηση του συστήματος εξαερισμού μέχρι να διανύσει ο πληθυσμός κάποια απόσταση, πιθανώς πολύ μετά το τρένο. Εάν το σύστημα εξαερισμού ενεργοποιηθεί εγκαίρως, φαίνεται ασφαλέστερο να καθυστερήσει η εκκίνηση της διαδικασίας εκκένωσης έως ότου οι ανεμιστήρες ώσης φτάσουν την ονομαστική τους ισχύ.

Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι δεν υπήρχε ποικιλομορφία στον πληθυσμό. Κάθε άτομο είχε τα ίδια χαρακτηριστικά με τα υπόλοιπα, όπως η ταχύτητα κίνησης, οι διαστάσεις και η απόσταση άνεσης μεταξύ τους. Τα χαρακτηριστικά αυτά παίζουν σημαντικό ρόλο στην διαδικασία εκκένωσης. Αυτό επηρεάζει τα αποτελέσματα αφού σε πραγματικά σενάρια ο πληθυσμός είναι μεικτός (ηλικιωμένοι, άτομα που χρειάζονται βοήθεια για να μετακινηθούν, άτομα με αποσκευές και οικογένειες).

Η παρούσα εργασία δημοσιεύθηκε στο επιστημονικό περιοδικό MDPI με τίτλο “Numerical Simulation of a Fire Accident in a Longitudinally Ventilated Railway Tunnel and Tenability Analysis”, ενώ παρουσιάστηκε και στο 10<sup>th</sup> International Conference from Scientific Computing to Computational Engineering που διεξήχθη 6-9 Ιουλίου στην Αθήνα.

## Μελλοντική Εργασία

Σαν συνέχεια τις παρούσας εργασίας στόχος είναι να μελετηθούν σενάρια με πιο ρεαλιστικές συνθήκες, με ανομοιογένεια στον πληθυσμό, πιο σύνθετες γεωμετρίες και διαφορετικές συνθήκες εντός της σήραγγας. Πιθανοί στόχοι είναι, το πώς τα χαρακτηριστικά του κάθε ατόμου επηρεάζουν την κίνησή του κατά την εκκένωση, άρα και την πρόσληψη τοξικών ρύπων, και το πώς τα χαρακτηριστικά του κάθε ατόμου επηρεάζουν την κίνηση των ατόμων γύρω τους.

## 6 Αναφορές

---

- Alarie Y (2002) Toxicity of Fire Smoke. *Critical Reviews in Toxicology* 32 (4):259-289. doi:10.1080/20024091064246
- Alpert RL (1972) Calculation of response time of ceiling-mounted fire detectors. *Fire Technology* 8 (3):181-195. doi:10.1007/BF02590543
- Amouzandeh A, Zeiml M, Lackner R (2014) Real-scale CFD simulations of fire in single- and double-track railway tunnels of arched and rectangular shape under different ventilation conditions. *Engineering Structures* 77:193-206. doi:https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.05.027
- Amundsen FH (1994) Studies of driver behaviour in Norwegian road tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology* 9 (1):9-15. doi:https://doi.org/10.1016/0886-7798(94)90004-3
- Amundsen FH, Ranæs G (2000) Studies on traffic accidents in Norwegian road tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology* 15 (1):3-11. doi:https://doi.org/10.1016/S0886-7798(00)00024-9
- Aralt TT, Nilsen AR (2009) Automatic fire detection in road traffic tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology* 24 (1):75-83. doi:https://doi.org/10.1016/j.tust.2008.04.001
- Assael MI, Kakosimos KE (2007) Ανάλυση Επικινδυνότητας
- Εγχειρίδιο υπολογισμών των επιπτώσεων φωτιάς. Τζιόλα,
- Barbato L, Cascetta F, Musto M, Rotondo G (2014) Fire safety investigation for road tunnel ventilation systems – An overview. *Tunnelling and Underground Space Technology* 43:253-265. doi:https://doi.org/10.1016/j.tust.2014.05.012
- Brandt R, Haerter H On the four elements of tunnel safety: Fire, air, water and earth. In: *Proceedings of the 7th International Conference ‘Tunnel Safety and Ventilation’, Graz, Austria, 2014.* pp 12-13
- Buntelius AG, Brickel JO, Kuesel TR, King EW (1996) *Tunnel Engineering Handbook – 2nd Edition*, . Chapman & Hall,
- Carlson E-S, Kumm M, Zakirov A, Dederichs A (2019) Evacuation tests with elevated platforms in railway tunnels. *Fire Safety Journal* 108:102840. doi:https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.102840
- Carvel R, Beard A (2005) *The handbook of tunnel fire safety*. Thomas Telford, London
- Carvel R, Marlair G (2005) A history of fire incidents in tunnels. doi:10.1680/hotfs.31685.0001
- Cascetta F, Musto M, Rotondo G (2016) Innovative experimental reduced scale model of road tunnel equipped with realistic longitudinal ventilation system. *Tunnelling and Underground Space Technology* 52:85-98. doi:https://doi.org/10.1016/j.tust.2015.11.025
- Cheng CH, Chow CL, Chow WK (2021) A simulation study of tenability for passengers in a railway tunnel with arson fire. *Tunnelling and Underground Space Technology* 108:103679. doi:https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103679
- Dolan D, Daniel H (2011) Pyrometry simulator (pyrosim) for diagnostic design. doi:10.2172/1038205
- Duan R, Liu W, Xu L, Huang Y, Shen X, Lin C-H, Liu J, Chen Q, Sasanapuri B (2015) Mesh Type and Number for the CFD Simulations of Air Distribution in an Aircraft Cabin.



- Numerical Heat Transfer Part B: Fundamentals 67.  
doi:10.1080/10407790.2014.985991
- Fridolf K, Ronchi E, Nilsson D, Frantzich H (2013) Movement speed and exit choice in smoke-filled rail tunnels. *Fire Safety Journal* 59:8-21.  
doi:https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2013.03.007
- Gannouni S, Ben Maad R (2016) Numerical analysis of smoke dispersion against the wind in a tunnel fire. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 158:61-68.  
doi:https://doi.org/10.1016/j.jweia.2016.09.009
- Gehandler J (2015a) Road tunnel fire safety and risk: a review. *Fire Science Reviews* 4.  
doi:10.1186/s40038-015-0006-6
- Gehandler J (2015b) Road tunnel fire safety and risk: a review. *Fire Science Reviews*:2-4.  
doi:10.1186/s40038-015-0006-6
- Guo X, Zhang Q (2014) Analytical solution, experimental data and CFD simulation for longitudinal tunnel fire ventilation. *Tunnelling and Underground Space Technology* 42:307-313. doi:https://doi.org/10.1016/j.tust.2014.03.011
- Guo Y, Yuan Z, Yuan Y, Cao X, Zhao P (2020) Numerical simulation of smoke stratification in tunnel fires under longitudinal velocities. *Underground Space*.  
doi:https://doi.org/10.1016/j.undsp.2019.11.001
- Gwynne S, Galea ER, Lawrence PJ, Filippidis L (2001) Modelling occupant interaction with fire conditions using the buildingEXODUS evacuation model. *Fire Safety Journal* 36 (4):327-357. doi:https://doi.org/10.1016/S0379-7112(00)00060-6
- Hanjalić K (1994) Advanced turbulence closure models: a view of current status and future prospects. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 15 (3):178-203.  
doi:https://doi.org/10.1016/0142-727X(94)90038-8
- Haukur I, li YZ, Lönnermark A (2015) *Tunnel Fire Dynamics*. Springer-Verlag, New York
- Heidarinejad G, Mapar M, Pasharshahi H (2016) A comprehensive study of two fire sources in a road tunnel: Considering different arrangement of obstacles. *Tunnelling and Underground Space Technology* 59:91-99.  
doi:https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.06.016
- Heinz S (2020) A review of hybrid RANS-LES methods for turbulent flows: Concepts and applications. *Progress in Aerospace Sciences* 114:100597.  
doi:https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2019.100597
- Hong W-H (2004) The progress and controlling situation of Daegu Subway fire disaster. *Fire Safety Science* 6:s-5--1
- Hostikka S, Korhonen T, Paloposki T, Rinne T, Matikainen K, Heliövaara S (2007) Development and validation of FDS+Evac for evacuation simulations. Project summary report.1-64
- Hu LH, Huo R, Chow WK (2008) Studies on buoyancy-driven back-layering flow in tunnel fires. *Experimental Thermal and Fluid Science* 32 (8):1468-1483.  
doi:https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2008.03.005
- Hu LH, Huo R, Peng W, Chow WK, Yang RX (2006) On the maximum smoke temperature under the ceiling in tunnel fires. *Tunnelling and Underground Space Technology* 21 (6):650-655. doi:https://doi.org/10.1016/j.tust.2005.10.003
- Hua N, Tessari A, Elhami Khorasani N (2021) Characterizing damage to a concrete liner during a tunnel fire. *Tunnelling and Underground Space Technology* 109:103761.  
doi:https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103761
- Hurley MJ, Gottuk D, Jr H, Harada K, Kuligowski E, Puchovsky M, Torero J, Jr W, Wieczorek C (2016) *SFPE handbook of fire protection engineering*, fifth edition.  
doi:10.1007/978-1-4939-2565-0
- Ingason H (2005) Model scale tunnel fire tests.

- Ingason H, Kumm M, Nilsson D, Lönnemark A, Claesson A, Li YZ, Fridolf K, Åkerstedt R, Nyman H, Dittmer T (2012) The METRO project-Final report.
- Jannsens M (2008) Development of a database of full-scale calorimeter tests of motor vehicle burns. Southwest Research Institute, San Antonio
- Jin B, Wang J, Wang Y, Gu Y, Wang Z (2020) Temporal and spatial distribution of pedestrians in subway evacuation under node failure by multi-hazards. *Safety Science* 127:104695. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104695>
- Karlsson B, Quintiere J (1999) Enclosure fire dynamics. CRC press,
- Kile GW, Gonzalez JA (1997) The Memorial tunnel fire ventilation test program: the longitudinal and natural tests. *Ashrae Transactions* 103:701
- Klote JH, Ferreira MJ, Kashef A, Turnbull PG, Milke JA (2012) Handbook of smoke control engineering. American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers,
- Król A, Król M (2021) Numerical investigation on fire accident and evacuation in a urban tunnel for different traffic conditions. *Tunnelling and Underground Space Technology* 109:103751. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103751>
- Kuligowski E, Peacock R, Hoskins B (2010) A Review of Building Evacuation Models, 2nd Edition. Technical Note (NIST TN), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD
- Kurioka H, Oka Y, Satoh H, Sugawa O (2003) Fire properties in near field of square fire source with longitudinal ventilation in tunnels. *Fire Safety Journal* 38 (4):319-340. doi:10.1016/S0379-7112(02)00089-9
- Lee M, Park G, Park C, Kim C (2020) Improvement of Grid Independence Test for Computational Fluid Dynamics Model of Building Based on Grid Resolution. *Advances in Civil Engineering* 2020:8827936. doi:10.1155/2020/8827936
- Lee SR, Ryou HS (2005) An Experimental Study of the Effect of the Aspect Ratio on the Critical Velocity in Longitudinal Ventilation Tunnel Fires. *Journal of Fire Sciences* 23 (2):119-138. doi:10.1177/0734904105044630
- Lee Y-P, Tsai K-C (2012) Effect of vehicular blockage on critical ventilation velocity and tunnel fire behavior in longitudinally ventilated tunnels. *Fire Safety Journal* 53:35-42. doi:<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2012.06.013>
- Leitner A (2001) The fire catastrophe in the Tauern Tunnel: Experience and conclusions for the Austrian guidelines. *Tunnelling and Underground Space Technology* 16:217-223. doi:10.1016/S0886-7798(01)00042-6
- Li Y, Lei B, Ingason H (2011) The maximum temperature of buoyancy-driven smoke flow beneath the ceiling in tunnel fires. *Fire Safety Journal* 46:204-210. doi:10.1016/j.firesaf.2011.02.002
- Li YZ, Ingason H (2012) The maximum ceiling gas temperature in a large tunnel fire. *Fire Safety Journal* 48:38-48. doi:<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2011.12.011>
- Li YZ, Lei B, Ingason H (2010) Study of critical velocity and backlayering length in longitudinally ventilated tunnel fires. *Fire Safety Journal* 45 (6):361-370. doi:<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2010.07.003>
- Liu C, Zhong M, Tian X, Zhang P, Li S (2019) Study on emergency ventilation for train fire environment in metro interchange tunnel. *Building and environment* 147:267-283
- Lou B, Qiu Y, Long X (2017) Maximum smoke temperature in non-smoke model evacuation region for semi-transverse tunnel fire. *Journal of Applied Fluid Mechanics* 10 (4):1139-1151. doi:10.18869/acadpub.jafm.73.241.26529
- M.O S-j, Li Z-r, Liang D, Li J-x, Zhou N-j (2013) Analysis of Smoke Hazard in Train Compartment Fire Accidents Base on FDS. *Procedia Engineering* 52:284-289. doi:<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.02.141>

- Maevski IY (2011) Design Fires in Road Tunnels, A Synthesis of Highway Practice. Transportation Research Board National Cooperative Highway Research Program NCHRP Synthesis 415, Washington, D.C. doi:10.17226/14562
- McGrattan K, Simo Hostikka, Randall McDermott, Jason Floyd, and Marcos Vanella (2019) Fire Dynamics Simulator User's Guide, NIST Special Publication 1019. Sixth Edition.
- Nævestad T-O, Meyer S (2014) A survey of vehicle fires in Norwegian road tunnels 2008–2011. *Tunnelling and Underground Space Technology* 41:104-112. doi:https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.12.001
- NFPA (2011) NFPA 502 Standard for road tunnels, bridges and other limited access highways
- Oberkampf WL, Trucano TG (2002) Verification and validation in computational fluid dynamics. *Progress in Aerospace Sciences* 38 (3):209-272. doi:https://doi.org/10.1016/S0376-0421(02)00005-2
- Oka Y, Atkinson GT (1995) Control of smoke flow in tunnel fires. *Fire Safety Journal* 25 (4):305-322. doi:https://doi.org/10.1016/0379-7112(96)00007-0
- Papaioannou P, Georgiou G (2003) Human behaviour in tunnel accidents and incidents: end-users, operators and response teams. Report of European Project UPTUN.
- Pope SB (2001) Turbulent flows. IOP Publishing,
- Qin J, Liu C, Huang Q (2020) Simulation on fire emergency evacuation in special subway station based on Pathfinder. *Case Studies in Thermal Engineering* 21:100677. doi:https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100677
- Riess I, Bettelini M The prediction of smoke propagation due to tunnel fires. In: ITC Conference Tunnel Fires and Escape from Tunnels, Lyon, 1999. p 999
- Roache P (1997) QUANTIFICATION OF UNCERTAINTY IN COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS. *Annual Review of Fluid Mechanics* 29:123-160
- Roh J, Ryou H, Park W-H, Jang Y (2009) CFD simulation and assessment of life safety in a subway train fire. *Tunnelling and Underground Space Technology* 24:447-453. doi:10.1016/j.tust.2008.12.003
- Ronchi E (2012) Evacuation modelling in road tunnel fires. Ph.D. Thesis, Polytechnic University of Bari, Bari
- Ronchi E, Fridolf K, Frantzich H, Nilsson D, Walter AL, Modig H (2018) A tunnel evacuation experiment on movement speed and exit choice in smoke. *Fire Safety Journal* 97:126-136. doi:https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.06.002
- Ronchi E, Reneke PA, Peacock RD (2016) A conceptual fatigue-motivation model to represent pedestrian movement during stair evacuation. *Applied Mathematical Modelling* 40 (7):4380-4396. doi:https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.11.040
- Rosignuolo F, Souza R, Knaust C, Andreini M (2017) A comparison between empirical models and FDS simulation to predict the ceiling gas temperature distribution in a tunnel fire.
- Sagaut P (2006) Large eddy simulation for incompressible flows: an introduction. Springer Science & Business Media,
- Se CMK, Lee EWM, Lai ACK (2012) Impact of location of jet fan on airflow structure in tunnel fire. *Tunnelling and Underground Space Technology* 27 (1):30-40. doi:https://doi.org/10.1016/j.tust.2011.06.005
- Shepherd J, Johnson C (2008) Hexahedral Mesh Generation Constraints. *Eng Comput (Lond)* 24:195-213. doi:10.1007/s00366-008-0091-4
- Shields T (2005) Shields T.J., Human Behaviour In Tunnel Fires, Handbook of Tunnel Fire Safety, ISBN 0-7277-3168-8. In. p pp 323

- Sørensen JG, Dederichs AS (2014) Evacuation from a Complex Structure – The Effect of Neglecting Heterogeneous Populations. *Transportation Research Procedia* 2:792-800. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2014.09.089>
- Spalart PR (2000) Strategies for turbulence modelling and simulations. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 21 (3):252-263. doi:[https://doi.org/10.1016/S0142-727X\(00\)00007-2](https://doi.org/10.1016/S0142-727X(00)00007-2)
- Stern F, Wilson R, Shao J (2006) Quantitative V&V of CFD simulations and certification of CFD codes. *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 50:1335-1355. doi:10.1002/flid.1090
- Tanaka F, Takezawa K, Hashimoto Y, Moinuddin KAM (2018) Critical velocity and backlayering distance in tunnel fires with longitudinal ventilation taking thermal properties of wall materials into consideration. *Tunnelling and Underground Space Technology* 75:36-42. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.12.020>
- Tang F, Cao ZL, Chen Q, Meng N, Wang Q, Fan CG (2017a) Effect of blockage-heat source distance on maximum temperature of buoyancy-induced smoke flow beneath ceiling in a longitudinal ventilated tunnel. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 109:683-688. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.02.021>
- Tang F, Li L, Chen W, Tao C, Zhan Z (2017b) Studies on ceiling maximum thermal smoke temperature and longitudinal decay in a tunnel fire with different transverse gas burner locations. *Applied Thermal Engineering* 110:1674-1681. doi:<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.09.054>
- Tang F, Mei FZ, Wang Q, He Z, Fan CG, Tao CF (2017c) Maximum temperature beneath the ceiling in tunnel fires with combination of ceiling mechanical smoke extraction and longitudinal ventilation. *Tunnelling and Underground Space Technology* 68:231-237. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.05.029>
- Tao L, Zhang Y, Hou K, Bai Y, Zeng Y, Fang Y (2020) Experimental study on temperature distribution and smoke control in emergency rescue stations of a slope railway tunnel with semi-transverse ventilation. *Tunnelling and Underground Space Technology* 106:103616. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103616>
- Tarada F (2010) New Perspectives on the Critical Velocity for Smoke Control.
- Tsai K-C, Chen H-H, Lee S-K (2010) Critical ventilation velocity for multi-source tunnel fires. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 98 (10):650-660. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2010.06.006>
- Tsukahara M, Koshiba Y, Ohtani H (2011) Effectiveness of downward evacuation in a large-scale subway fire using Fire Dynamics Simulator. *Tunnelling and Underground Space Technology* 26 (4):573-581. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tust.2011.02.002>
- Tu J, Yeoh G, Liu C *Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach*. In, 2007.
- U.S.NRC, EPRI (2007) *Verification and Validation of Selected FireModels for Nuclear Power Plant Applications: Fire Dynamics Simulator (FDS)*.
- Van Maele K, Merci B (2008) Application of RANS and LES field simulations to predict the critical ventilation velocity in longitudinally ventilated horizontal tunnels. *Fire Safety Journal* 43 (8):598-609. doi:<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2008.02.002>
- Versteeg HK, Malalasekera W (2007) *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. Pearson education,
- Wang B, Zhao B, Chen C (2010a) A simplified methodology for the prediction of mean air velocity and particle concentration in isolation rooms with downward ventilation systems. *Building and Environment* 45:1847-1853. doi:10.1016/j.buildenv.2010.02.015

- Wang F, Wang M, He S, Zhang J, Deng Y (2010b) Computational study of effects of jet fans on the ventilation of a highway curved tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology* 25 (4):382-390. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tust.2010.02.001>
- Weisenpacher P, Halada L, Glasa J COMPUTER SIMULATION OF FIRE IN A TUNNEL USING PARALLEL VERSION OF FDS. In, 2011.
- Weng M, Obadi I, Wang F, Liu F, Liao C (2020) Optimal distance between jet fans used to extinguish metropolitan tunnel fires: A case study using fire dynamic simulator modeling. *Tunnelling and Underground Space Technology* 95:103116. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.103116>
- Wilcox DC (1998) Turbulence modeling for CFD, vol 2. DCW industries La Canada, CA,
- Wu Y, Bakar MZA (2000) Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems – a study of the critical velocity. *Fire Safety Journal* 35 (4):363-390. doi:[https://doi.org/10.1016/S0379-7112\(00\)00031-X](https://doi.org/10.1016/S0379-7112(00)00031-X)
- Yan Z, Zhang Y, Guo Q, Zhu H, Shen Y, Guo Q (2018) Numerical study on the smoke control using point extraction strategy in a large cross-section tunnel in fire. *Tunnelling and Underground Space Technology* 82:455-467. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.08.019>
- Zhang S, Wang J, He K, Yao Y, Peng M (2019a) Study on the smoke back-layering and critical ventilation in the road tunnel fire at high altitude. *Fire and Materials* 43 (4):422-429. doi:<https://doi.org/10.1002/fam.2714>
- Zhang T, Zhang Y, Xiao Z, Yang Z, Zhu H, Ju JW, Yan Z (2019b) Development of a novel bio-inspired cement-based composite material to improve the fire resistance of engineering structures. *Construction and Building Materials* 225:99-111. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.121>
- Zhang T, Zhang Y, Zhu H, Yan Z (2021a) Experimental investigation and multi-level modeling of the effective thermal conductivity of hybrid micro-fiber reinforced cementitious composites at elevated temperatures. *Composite Structures* 256:112988. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112988>
- Zhang X, Zhang Z, Zhang Z, Xu W, Luo Q, Tao H, Li X (2020) Experimental investigation of compartment fires with circular opening: From the aspects of internal temperature and facade flame. *Combustion and Flame* 213:107-116. doi:<https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2019.11.027>
- Zhang Y, Shen Y, Carvel R, Zhu H, Zhang Y, Yan Z (2021b) Experimental investigation on the evacuation performance of pedestrians in a three-lane urban tunnel with natural ventilation in a fire scenario. *Tunnelling and Underground Space Technology* 108:103634. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103634>
- Zhang Y, Zhu H, Guo Q, Carvel R, Yan Z (2021c) The effect of technical installations on evacuation performance in urban road tunnel fires. *Tunnelling and Underground Space Technology* 107:103608
- Μιχαήλ Λαζαρίδης (2007) Ποιότητα αέρα σε εσωτερικούς χώρους. Τζιόλα, Αθήνα