ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΙΤΛΟΣ: «Ανάλυση επικινδυνότητας οδικής σήραγγας σε ατύχημα με ύπαρξη πυρκαγιάς μεγάλης ισχύος»

Διπλωματική εργασία: Κωνσταντάρας Γεώργιος

Επιβλέπων καθηγητής: Κωνσταντίνος Κηρυττόπουλος

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Τομέας Βιομηχανικής Διοίκησης & Επιχειρησιακής Έρευνας

ΙΟΥΝΙΟΣ 2013

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον Οδηγό συγγραφής Διπλωματικών εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής εργασίας είναι προϊόν δικής μου δουλειάς και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Γεώργιος Κ. Κωνσταντάρας

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επίκουρο καθηγητή του τομέα Βιομηχανικής Διοίκησης και Επιχειρησιακής Έρευνας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου κύριο Κωνσταντίνο Κηρυττόπουλο, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα, όπως είναι μία ανάλυση επικινδυνότητας που περιλαμβάνει ατύχημα με ύπαρξη πυρκαγιάς. Ακόμα θέλω να ευχαριστήσω και τον υποψήφιο διδάκτορα κύριο Κωνσταντίνο Καζάρα, για την προσοχή και ενασχόληση που έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης αυτής της εργασίας.

Περιεχόμενα

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ. ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ 9

2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ 11

2.1 ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΚΙΝΔΥΝΩΝ ΟΔΙΚΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ 11

2.1.1 Ανάλυση επικινδυνότητας (Risk Analysis) 11

2.1.2 Αξιολόγηση επικινδυνότητας (Risk Evaluation) 11

2.1.3 Μείωση επικινδυνότητας (Risk Reduction) 12

2.1.4 Ποσοτικές και ποιοτικές μέθοδοι αξιολόγησης της επικινδυνότητας 12

2.2 ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΟΔΙΚΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΕΠΙΚΡΑΤΕΙΑ 13

2.2.1 Στάδια ανάλυσης για μη επικίνδυνα 15

2.3 ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ CAMATT 20

2.3.1 Τοποθέτηση των στοιχείων του δικτύου 20

2.3.2 Ορισμός παραμέτρων 25

2.3.3 Προσομοίωση 33

2.3.4 Αποτελέσματα 33

3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ - ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ 40

3.1 ΠΕΔΙΟ ΟΡΙΣΜΟΥ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ 40

3.1.1 Απαιτήσεις επιτελεστικότητας 40

3.1.2 Τεχνική διάρκεια ζωής της σήραγγας 43

3.1.3 Θέση κέντρου ελέγχου 43

3.1.4 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά 43

3.1.5 Κυκλοφοριακός φόρτος 45

3.2 ΕΞΕΤΑΣΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ 46

3.2.1 Εξέταση σεναρίου φωτιάς 100 MW 48

3.2.2 Εξέταση σεναρίου φωτιάς 150 MW 56

3.2.3 Μέτρα μείωσης της επικινδυνότητας 63

4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 67

5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 71

6 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α 72

6.1 ΒΑΣΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ: 500 ΜΕΤΡΑ – 100 MW 72
6.2 ΒΑΣΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ: 1300 ΜΕΤΡΑ – 100 MW 74
6.3 ΒΑΣΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ: 500 ΜΕΤΡΑ – 150 MW 76
6.4 ΒΑΣΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ: 1300 ΜΕΤΡΑ – 150 MW 80

7 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β 84

7.1 ΒΑΣΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ: 500 ΜΕΤΡΑ – 100 MW 85

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της σήραγγας…….44

Πίνακας 2: Πεδίο ορισμού της σήραγγας……...47

Πίνακας 3:Μέγεθος απωλειών για τα βασικά σενάρια και εκείνα όπου λήφθηκαν μέτρα μείωσης της επικινδυνότητας……...68

Πίνακας 4: Ορατότητα των επιβατών που βρίσκονται στο σημείο x=500 μέτρα, τη στιγμή που ξεσπά η φωτιά……....86

Πίνακας 5: Θερμότητα από ακτινοβολία που δέχονται οι επιβάτες του οχήματος που προκαλεί το ατύχημα και οι αντίστοιχοι χρόνοι εξουδετέρωσης…….…87

Πίνακας 6: Θερμότητα από μεταγωγή που δέχονται οι επιβάτες του οχήματος που προκαλεί το ατύχημα και οι αντίστοιχοι χρόνοι εξουδετέρωσης…….……88

Πίνακας 7: Συνολική κλασματική δόση……..……89

Πίνακας 8:Συνολική συγκέντρωση ρύπων που αναπνέουν οι επιβάτες του οχήματος, που προκαλεί το κρίσιμο γεγονός…….…90

Έποψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως σκοπό να μελετήσει το επίπεδο ασφαλείας μίας σήραγγας, διάβασης ορεινού όγκου του συγκοινωνιακού οδικού δικτύου της ελληνικής επικράτειας, σε περίπτωση πυρκαγιάς. Η αποτίμηση της επικινδυνότητας, έννοια η οποία καθορίζεται απόλυτα, συντελείται με γνώμονα την οδηγία που έχει εκδώσει η ελληνική κυβέρνηση μέσω του αντιστοίχου οργάνου της (Διοικητική Αρχή Σηράγγων). Η οδηγία αυτή εμπίπτει στο πεδίο εφαρμογής του προεδρικού διατάγματος 230/2007 και αφορά εκπόνηση ανάλυσης επικινδυνότητας χωρίς την εμπλοκή οχημάτων που μεταφέρουν επικίνδυνα εμπορεύματα.

Η ανάλυση επικινδυνότητας που ακολουθεί, ξεκινά από το στάδιο της επιλογής των σεναρίων θεωρώντας τα προηγούμενα στάδια δεδομένα. Εξετάζονται συνολικά τέσσερα σενάρια πυρκαγιάς μέσα σε σήραγγα και τέσσερα επιπλέον σενάρια που σκοπό έχουν να αποδείξουν ότι το επίπεδο ασφαλείας της σήραγγας μπορεί να βελτιωθεί.

Για τις ανάγκες υπολογισμού των φυσικών ποσοτήτων που ενδιαφέρουν την ανάλυση και για την μοντελοποίηση της σήραγγας, του περιβάλλοντος και του εξοπλισμού της, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό CAMATT 2.20. Στο θεωρητικό κομμάτι της διπλωματικής εργασίας, αναλύεται διεξοδικά ο τρόπος λειτουργίας του λογισμικού. Ακόμα, όπου θεωρήθηκε απαραίτητο κατά τη διάρκεια της εργασίας, αναφέρεται η συμβολή του προγράμματος στην επίλυση προβλημάτων και στην άντληση δεδομένων.

Η ανάλυση επικινδυνότητας καταλήγει σε χρήσιμα συμπεράσματα που αφορούν την ασφάλεια των χρηστών της σήραγγας. Αποδεικνύεται ότι το επίπεδο ασφαλείας μπορεί να βελτιωθεί έως και 80% με καλύτερο σχεδιασμό της σήραγγας, στο κομμάτι της επικοινωνίας του κέντρου ελέγχου και των χρηστών της. Ακόμα αποδεικνύεται ότι σε μία μεγάλου μήκους σήραγγα, ο μηχανικός αερισμός που αποτελείται από ανεμιστήρες τοποθετημένους στην αρχή και στο τέλος της σήραγγας, είναι αποδοτικότερος στο μέσον της σήραγγας και όχι στα σημεία όπου βρίσκονται οι μονάδες αερισμού. Αυτό έχει άμεσο αντίκτυπο στον πιθανό αριθμό απωλειών σε περίπτωση πυρκαγιάς.

Synopsis

This thesis aims to study the security level of a tunnel, crossing the mountainous road transportation network of Greek territory, in case of fire. The valuation of risk, which is fully explained, effectuated with reference to the directive issued by the Greek Government through the respective institution (Administrative Authority for Tunnels). This directive falls within the scope of Presidential Decree 230/2007 and involves an analysis of risk without involving vehicles carrying dangerous goods.

The risk analysis that follows starts from the selection of scenarios, considering the upstream as data. Examined a total of four fire scenarios in the tunnel and four additional scenarios, which are designed to demonstrate that the security level of the tunnel can be improved.

For purposes of calculating the physical quantities of interest for the analysis and modeling of the tunnel environment and equipment, has been used software CAMATT 2.20. In the theoretical part of the thesis, is analyzed in detail how the program works. Furthermore, where it has been necessary during the work, has been specified the program's contribution to problem solving and data mining.

The risk analysis leads to useful conclusions regarding the safety of the users of the tunnel. It turns out that the level of safety can be improved up to 80% with better planning of the tunnel, in the field of the communication between the control center and the users of the tunnel. Also, it is demonstrated that in a long in lenght tunnel, the mechanical ventilation consisting of fans placed at the beginning and the end of the tunnel, is more efficient in the middle of the tunnel and not where the ventilation units are located. This has a direct impact on the potential number of casualties in case of fire.

1 Εισαγωγή

Τις τελευταίες δεκαετίες, ο δυτικός πολιτισμός, ευτύχισε να γνωρίσει μεγάλη ανάπτυξη στον τομέα της οδοποιίας και ιδιαίτερα στον αριθμό και την ποιότητα κατασκευής οδικών σηράγγων. Τα οικονομικά οφέλη που προσφέρουν οι σήραγγες λόγο της ταχύτερης μεταφοράς εμπορευμάτων και της μείωσης του κόστους των καυσίμων λόγω μικρότερων αποστάσεων, όρισε επιβεβλημένη την ανάπτυξη σε αυτόν τον τομέα. Μαζί όμως με την ανάπτυξη αυτού του κλάδου της οδοποιίας, αυξήθηκε και ο αριθμός των κινδύνων που μπορούν να προκύψουν. Μία πιθανή φωτιά σε μία σήραγγα, ανάλογα με το μέγεθός της, μπορεί να προκαλέσει θανάτους, υλικές καταστροφές στην ίδια τη σήραγγα και στο περιβάλλον αυτής, περιβαλλοντικές αλλά και οικονομικές καταστροφές. Το γεγονός αυτό προκάλεσε το πολιτικό ενδιαφέρον ολόκληρης της Ευρώπης, ότι δηλαδή πρέπει να υπάρχει μία κοινή πορεία στον τομέα των μεταφορών και ιδιαίτερα στον τομέα της ασφάλειας. Γι αυτό το σκοπό εκδόθηκε το 2001 η Λευκή Βίβλος των μεταφορών, με ορίζοντα το 2010. Στη συνέχεια, το συμβούλιο της 29^{ης} Απριλίου και το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο εξέδωσε την οδηγία 54/2004/ΕΚ σχετικά με τις ελάχιστες απαιτήσεις ασφαλείας για τις σήραγγες του διευρωπαϊκού οδικού δικτύου. Η οδηγία αυτή υιοθετήθηκε από την ελληνική κυβέρνηση με το προεδρικό διάταγμα υπ' αριθμόν 230 στις 23 Νοεμβρίου 2007, το οποίο ορίστηκε να εφαρμόζεται σε όλες της σήραγγες της Ελληνικής Επικράτειας που ανήκουν στο διευρωπαϊκό οδικό δίκτυο και έχουν μήκος άνω των 500μ, είτε βρίσκονται στο στάδιο μελέτης ή κατασκευής, με σκοπό να παρέχει σε όλους τους χρήστες της σήραγγας στοιχειώδες επίπεδο ασφαλείας, προλαμβάνοντας έτσι κρίσιμα γεγονότα που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε απώλεια ανθρώπινων ζωών, οικονομικές και περιβαλλοντολογικές καταστροφές. Ακόμα με το διάταγμα αυτό, ορίστηκε η ανώτατη διοικητική αρχή ως το όργανο του Ελληνικού κράτους που έχει την ευθύνη:

- Να διασφαλίζει την τήρηση όλων των πτυχών ασφαλείας των σηράγγων που υπάγονται στην ελληνική επικράτεια
- Να λαμβάνει όλα τα μέτρα που απαιτούνται για την εξασφάλιση της συμμόρφωσης στις διατάξεις του εν λόγω διατάγματος

Ακόμα, στο διάταγμα, προβλέπεται η διενέργεια ανάλυσης επικινδυνότητας, εφόσον χρειαστεί, από φορέα λειτουργικώς ανεξάρτητο από το διαχειριστή της σήραγγας και τα αποτελέσματα της ανάλυσης να περιλαμβάνονται στον φάκελο ασφαλείας που υποβάλλεται στη διοικητική αρχή. Για την ανάλυση, λαμβάνονται υπόψη όλοι οι

παράγοντες σχεδιασμού και οι συνθήκες κυκλοφορίας που επηρεάζουν την ασφάλεια όπως:

- Τα χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας
- Το μήκος της σήραγγας
- Ο τύπος κυκλοφορίας
- Η γεωμετρία της σήραγγας
- Ο προβλεπόμενος αριθμός διερχόμενων βαρέων φορτηγών οχημάτων ανά ημέρα

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η εκτέλεση μίας ανάλυσης επικινδυνότητας για μία οδική σήραγγα, που έγκειται στο ελληνικό οδικό δίκτυο και εμπίπτει στο Π.Δ 230/2007. Η ανάλυση δεν περιλαμβάνει τη εμπλοκή οχημάτων που μεταφέρουν επικίνδυνα υλικά και είναι σεναριακή, όπως θα εξηγηθεί στη συνέχεια.

Η διπλωματική ξεκινά με το θεωρητικό μέρος όπου αναλύεται τι σημαίνει ανάλυση επικινδυνότητας, τι είναι η αποτίμηση της επικινδυνότητας και από ποία επιμέρους στάδια αποτελείται. Στη συνέχεια περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί του λογισμικό CAMATT με τη βοήθεια του οποίου διεκπεραιώθηκε αυτή η έρευνα. Έπειτα δίδεται το πεδίο ορισμού της σήραγγας, αναλύεται την μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την υλοποίηση και εξέτασή των σεναρίων που έχουν επιλεγεί και υπολογίζονται οι απώλειες σε ανθρώπινες ζωές που προκύπτουν. Στο τέλος βρίσκονται τα συμπεράσματα που έχουν εξαχθεί, από την έρευνα που πραγματοποιήθηκε.

2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1 Αποτίμηση κινδύνων οδικών σηράγγων

Για να συντελεσθεί η αποτίμηση της επικινδυνότητας σε μία σήραγγα, πρέπει να καθοριστεί το υπό εξέταση σύστημα, τα στοιχεία τα οποία θα το αποτελούν και οι σχέσεις που τα συνδέουν.

Η διαδικασία αποτίμησης της επικινδυνότητας (Risk Assessment), περιλαμβάνει τρία στάδια, τα οποία είναι:

2.1.1 Ανάλυση επικινδυνότητας (Risk Analysis)

Η διαδικασία της ανάλυσης επικινδυνότητας είναι ευρέως διαδεδομένη στην προσπάθεια που κάνουν οι ερευνητές να αποτιμήσουν του κινδύνους που κρύβονται σε ένα υπάρχον σύστημα όπως μία σήραγγα. Η ανάλυση επικινδυνότητας είναι μία μεγάλη οικογένεια από προσεγγίσεις, μεθόδους και πολύπλοκα μοντέλα που συνδυάζει διάφορες μεθοδολογίες για συγκεκριμένους σκοπούς. Βοηθά στη συστημική ανάλυση των επιπτώσεων σε τυχαία ατυχήματα, εντοπίζει αδύνατα σημεία στον υπάρχον σχεδιασμό του συστήματος αλλά και τα μέτρα που πρέπει να ληφθούν ως διορθωτικές κινήσεις.

Οι κύριοι λόγοι για τους οποίους πραγματοποιείται μία ανάλυση τέτοιου είδους είναι:

- Να ελεγχθεί η γενική συνοχή του σχεδιασμού ασφαλείας
- Να γίνει επιλογή μεταξύ εναλλακτικών
- Να επιτευχθεί η επιθυμητή ασφάλεια σε περίπτωση απόκλισης από το απαιτούμενο
- Να επιτευχθεί, μέσω του προγραμματισμού ασφαλείας, η καλύτερη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας

2.1.2 Αξιολόγηση επικινδυνότητας (Risk Evaluation)

Η αξιολόγηση της επικινδυνότητας γίνεται για να αποφανθεί ο μελετητής για το αν οι κίνδυνοι που καθορίστηκαν και υπολογίζονται είναι αποδεκτοί ή όχι. Αυτό προϋποθέτει ότι θα υπάρχει επαρκώς καθορισμένος τρόπος αξιολόγησης των κινδύνων.

2.1.3 Μείωση επικινδυνότητας (Risk Reduction)

Στην περίπτωση που κατά την αξιολόγηση έχουν προκύψει μη ανεκτοί κίνδυνοι, ακολουθεί το βήμα της μείωσης της επικινδυνότητας. Αυτό επιτυγχάνεται με σχεδιασμό προληπτικών και προστατευτικών μέτρων για την, όσο το δυνατόν εφικτή, εξάλειψη του μη ανεκτού κινδύνου.

2.1.4 Ποσοτικές και ποιοτικές μέθοδοι αξιολόγησης της επικινδυνότητας

Για κάθε ένα μέρος της διαδικασίας αποτίμησης επικινδυνότητας (ανάλυση-αξιολόγηση-μείωση επικινδυνότητας), υπάρχει μία πληθώρα μεθόδων οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τον εκάστοτε μελετητή. Έχουν επικρατήσει οι συστημικές αναλύσεις που είναι βασισμένες σε ποσοτικές μεθόδους (quantitative system based approach) και οι σεναριακές αναλύσεις που πραγματοποιούνται με ποιοτικές ή και ημιποσοτικές μεθόδους (qualitative or semiquantitative scenario based approach). Προφανώς, ο διαχωρισμός τους γίνεται με βάση τον τρόπο με τον οποίο προσεγγίζουν τον υπολογισμό της επικινδυνότητας.

Οι ποιοτικές μέθοδοι ανάλυσης της επικινδυνότητας, δεν έχουν ως κύριο στόχο να αποδώσουν με ακρίβεια τους κινδύνους που μπορεί να προκύψουν, ούτε και όλες τις πιθανές συνέπειες που μπορεί να προκαλέσουν. Βασίζονται περισσότερο σε εμπειρικά και αυθαίρετα καθορισμένα πρότυπα, χωρίς κάποια δομημένη και αυστηρή υπολογιστική λογική. Εφαρμόζονται κυρίως σε περισσότερο απλουστευμένα προβλήματα. Το μεγάλο τους προσόν είναι ότι εφαρμόζονται εύκολα σε κάθε περίπτωση, είτε υπάρχουν είτε δεν υπάρχουν ποσοτικά δεδομένα προς εξέταση. Μειονεκτούν στο ότι μπορεί να καταλήξουν σε μερικώς ή εντελώς παραπλανημένα συμπεράσματα, καθώς μπορεί να δοθεί έμφαση σε κινδύνους που είναι απίθανοι να υπάρξουν και να υποτιμηθούν κίνδυνοι πολύ πιθανοί.

Κατά τη σεναριακή ανάλυση, επιλέγονται κάποια αντιπροσωπευτικά σενάρια, υπολογίζεται η πιθανότητα να συμβούν και τα αποτελέσματα που αυτά θα επιφέρουν. Κατά τη διάρκεια αυτής, χρησιμοποιούνται είτε ποιοτικά είτε ποσοτικά δεδομένα. Ακόμα είναι πολύ συνηθισμένο να χρησιμοποιούνται και τα δύο, εκτελώντας έτσι μία ημιποσοτική μέθοδο ανάλυσης επικινδυνότητας. Στη συνέχεια υπολογίζεται η επικινδυνότητα, ως το γινόμενο της πιθανότητας εμφανίσεως του κινδύνου και του κόστους που θα προκαλέσει, για το κάθε σενάριο ξεχωριστά.

Σε αντίθεση με τις ποιοτικές μεθόδους, οι ποσοτικές έχουν ως στόχο την ρεαλιστική και όσο το δυνατό πιο ακριβή ανίχνευση όλων των κινδύνων που είναι πιθανό να προκύψουν και τις συνέπειες αυτών. Στην περίπτωση αυτή μελετάται το συνολικό σύστημα με μία ολοκληρωμένη και πλήρη διαδικασία που συνήθως περιλαμβάνει λογικά δέντρα. Στη μέθοδο αυτή εισάγονται πληροφορίες που επηρεάζουν την εξέλιξη του σεναρίου όπως το μήκος της σήραγγας, ο κυκλοφοριακός φόρτος, το ποσοστό των βαρέων οχημάτων, η διάταξη των ανεμιστήρων, συνθήκες περιβάλλοντος κλπ.

Στη συνέχεια υπολογίζονται οι συνέπειες που μπορεί να προκαλέσει ο κάθε κίνδυνος που έχει θεωρηθεί, και η εξέλιξη αυτών των συνεπειών στο χρόνο και στο χώρο. Σε κάθε βήμα της διαδικασίας αυτής, υπολογίζεται η πιθανότητα εμφανίσεως του κινδύνου, το πιθανό κόστος αυτού του κινδύνου και από τον πολλαπλασιασμό των δύο προκύπτει η επικινδυνότητα.

Επικινδυνότητα = Πιθανότητα x Συνέπειες

Για τις ποσοτικές μεθόδους, υπάρχει αυξημένος βαθμός δυσκολίας στην υλοποίηση και τον σχεδιασμό και την διαχείριση του συστήματος καθώς διακρίνεται από μεγάλη πολυπλοκότητα. Οι μέθοδοι αυτοί για να λειτουργήσουν απαιτούν μεγάλο φάσμα ποσοτικού χαρακτήρα πληροφορίας, η οποία δεν είναι πάντα εύκολο να βρεθεί ή να υπολογιστεί. Μετά από την υλοποίηση της μεθόδου αυτής όμως, και υπό την προϋπόθεση ότι έχει επιτελεστεί με ορθότητα, το αποτέλεσμα της επικινδυνότητας είναι πολύ πιο εύστοχο και ακριβές από το αντίστοιχο των ποιοτικών μεθόδων.

Σε μία συστημική ανάλυση λοιπόν, υπολογίζονται οι τιμές της επικινδυνότητας για όλο στο σύστημα. Έτσι ο μελετητής έχει στη διάθεση του τις τιμές επικινδυνότητας για κάθε παράμετρο του συστήματος και κάθε πιθανή εξέλιξη του σεναρίου. Με αυτόν τον τρόπο τα καλύπτεται όλο το φάσμα των σεναρίων που μπορούν να μελετηθούν με τρόπο ολοκληρωτικό.

2.2 Αποτίμηση επικινδυνότητας οδικών σηράγγων στην ελληνική επικράτεια

Η οικονομική ανάπτυξη και εξέλιξη που είχαμε γνωρίσει ως χώρα τα τελευταία χρόνια, αντικατοπτρίστηκε στην απότομη ανάπτυξη του εθνικού οδικού δικτύου μας και κατ' επέκταση είχε ως συνέπεια να αυξηθεί πολύ ο κυκλοφοριακός φόρτος των βαρέων οχημάτων, μέρος των οποίων είναι και εκείνα που μεταφέρουν επικίνδυνα υλικά (υγρά καύσιμα, αέρια, εκρηκτικές ύλες, εύφλεκτα υλικά). Στον ελλαδικό χώρο,

έχουν γίνει μοντέλα αναλύσεως επικινδυνότητας για την ανοικτή οδοποιία αλλά δεν έχει δοθεί το ίδιο βάρος σε θέματα που αφορούν ατυχήματα σε κομμάτια του οδικού άξονα με ιδιαιτερότητες, όπως είναι οι σήραγγες. Τα ατυχήματα στις οδικές σήραγγες διαφέρουν λίγο ή πολύ από τα ατυχήματα στην ανοικτή οδοποιία. Αυτό οφείλεται αποκλειστικά στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που έχουν από τη φύση τους οι σήραγγες. Παραδείγματος χάρη:

- Στις σήραγγες συνήθως απαγορεύεται η παρουσία πεζών, αγροτικών οχημάτων, μοτοποδηλάτων
- Δεν υπάρχουν έντονες μεταβολές στις κλιματικές συνθήκες
- Το οδόστρωμα είναι λιγότερο ολισθηρό σε περιπτώσεις βροχής
- Η φωτεινότητα είναι σταθερή όλο το εικοσιτετράωρο αλλά κατά την είσοδο και κατά την έξοδο από τη σήραγγα, οι οδηγοί νιώθουν έντονες μεταβολές
- Είναι δυσκολότερη η πρόσβαση σε περίπτωση ατυχήματος για τα σωστικά συνεργεία

Ιδιαίτερα η περίπτωση πυρκαγιάς μέσα σε σήραγγα είναι πολύ πιο επικίνδυνη για τις ζωές των οδηγών. Ένα πιθανό ατύχημα σε κλειστό χώρο όπως μία οδική σήραγγα, μπορεί να προκαλέσει σοβαρότατες συνέπειες σε ανθρώπινες ζωές, υλικές καταστροφές στον χώρο της σήραγγας και στο περιβάλλον της, περιβαλλοντολογικές καταστροφές, αλλά και οικονομικές συνέπειες λόγο τις διακοπής των εφοδιαστικών αλυσίδων.

Ο κύριος λόγος που είχαν υιοθετηθεί αναλύσεις επικινδυνότητας για μη επικίνδυνα υλικά είναι στατιστικός. Από το 1949-1999, δηλαδή σε διάστημα 50 ετών, από τα 33 ατυχήματα που προκάλεσαν πυρκαγιά μεγάλης ισχύος μέσα σε οδική σήραγγα, μόνο τα 4 περιελάμβαναν φορτηγό που μετέφερε επικίνδυνα υλικά.

Οι καιροί όμως αλλάζουν και έτσι έγινε αντιληπτό ότι πρέπει να δοθεί η απαιτούμενη προσοχή και στα επικίνδυνα υλικά. Έτσι λοιπόν διεξήχθη από τον ΟΟΣΑ (OECD’s Road Transport and Intermodal Linkages Research Program) και την PIARC (C5-Committee on Road Tunnels) συστηματική μελέτη πάνω σε αυτόν τον τομέα, αποτέλεσμα της οποίας ήταν η ανάπτυξη μίας μεθοδολογίας και ενός λογισμικού για την εκτίμηση της επικινδυνότητας μεταφοράς επικίνδυνων υλικών μέσα σε οδικές σήραγγες (Quantitative Risk Assessment Model-QRAM).

Η παρούσα ανάλυση είναι βασισμένη στην οδηγία της ΔΑΣ για την εκπόνηση ανάλυσης επικινδυνότητας, χωρίς εμπλοκή οχημάτων που μεταφέρουν επικίνδυνα εμπορεύματα, μέσα από οδική σήραγγα που εμπίπτει στο πεδίο εφαρμογής του Π.Δ. 230/07, με σεναριακή προσέγγιση.

2.2.1 Στάδια ανάλυσης για μη επικίνδυνα

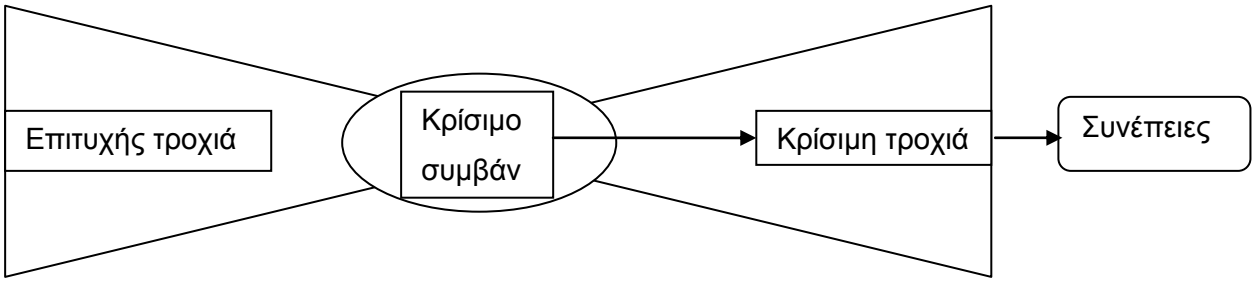
Μία ανάλυση επικινδυνότητας για μία υπό εξέταση σήραγγα, πρέπει περιλαμβάνει τα εξής σύμφωνα με την ΔΑΣ:

- Το πεδίο ορισμού στο οποίο νοείται η ασφάλεια της σήραγγας
- Τις αποκλίσεις από τις ελάχιστες απαιτήσεις ασφαλείας και τον καθορισμό της σήραγγας αναφοράς
- Τον καθορισμό κινδύνων και την επιλογή σεναρίων
- Την εξέταση των σεναρίων
- Περίληψη-Συμπεράσματα-Προτάσεις

Το πεδίο ορισμού της ασφάλειας της σήραγγας, επιγραμματικά περιλαμβάνει τις απαιτήσεις επιτελεστικότητας της σήραγγας, την τεχνική διάρκεια ζωής της σήραγγας, την τεχνική διάρκεια ζωής των επί μέρους στοιχείων και υποσυστημάτων της σήραγγας, την χρονική διάρκεια αναφοράς της διενεργηθείσας μελέτης που δεν πρέπει να ξεπερνά τα 6 χρόνια, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, την θέση του κέντρου ελέγχου, την θέση των υπηρεσιών έκτακτης ανάγκης, τις περιβαλλοντικές συνθήκες, τις συνθήκες του οδικού δικτύου που προσεγγίζει τη σήραγγα, τον κυκλοφοριακό φόρτο του οδικού τμήματος και το ποσοστό σε βαρέα οχήματα, τις λειτουργικές και οργανωτικές διαρρυθμίσεις, τις κυκλοφοριακές διαρρυθμίσεις, καταστάσεις και κανονισμούς και τέλος τον ηλεκτρομηχανικό εξοπλισμό και τον μηχανισμό εκτάκτων καταστάσεων.

Το επόμενο βήμα είναι η καταγραφή των αποκλίσεων των χαρακτηριστικών της σήραγγας από τις ελάχιστες απαιτήσεις που ορίζονται από το προεδρικό διάταγμα 230/2007 και την Οδηγία 54/2004/ΕΚ. Ακόμα πρέπει να οριστεί η σήραγγα αναφοράς. Ως σήραγγα αναφοράς ορίζεται εκείνη που ικανοποιεί το σύνολο των απαιτήσεων ασφαλείας του Π.Δ. 230/2007 και της Οδηγίας.

Στη συνέχεια πρέπει να καθοριστούν οι κίνδυνοι και να γίνει επιλογή των σεναρίων. Για μία ανάλυση επικινδυνότητας, βασικό στοιχείο είναι η ύπαρξη του κρίσιμου γεγονότος. Για να συμβεί όμως το κρίσιμο συμβάν, πρέπει να υπάρχει το κατάλληλο υπόβαθρο. Αυτοί είναι οι κίνδυνοι, που σε συνδυασμό με την ύπαρξη και την αποτελεσματικότητα των μέτρων ασφαλείας, μπορούν να εξελιχθούν, να αναπτυχθούν και να οδηγήσουν στο κρίσιμο συμβάν. Το διάγραμμα πεταλούδας του **Σχήματος 1**, όπως αναφέρεται από την ΔΑΣ, επεξηγεί τη ιδέα αυτή.



Σχήμα 1: Διάγραμμα πεταλούδας

Πηγή: Διοικητική Αρχή Σηράγγων, Αθήνα Αύγουστος 2011

Η ύπαρξη ενός κρίσιμου γεγονότος είναι η πεμπτουσία μίας ανάλυσης επικινδυνότητας. Ο κίνδυνος που θα παρουσιαστεί ξεκινά από ένα ανεπιθύμητο γεγονός που μπορεί να είναι μία δυσλειτουργία του συστήματος ή ένα ατύχημα. Στη συνέχεια το ανεπιθύμητο γεγονός εξελίσσεται με ρυθμό που εξαρτάται από την ύπαρξη μέτρων ασφαλείας, την ταχύτητα με την οποία θα επέμβουν οι υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης και τη συμπεριφορά των ατόμων που εμπλέκονται στο συμβάν. Είναι κατανοητό ότι προκειμένου να ληφθούν υπόψη όλοι ή οι περισσότεροι κίνδυνοι που είναι πιθανό να παρουσιαστούν πρέπει να εφαρμόζονται κάποιες αποδεδειγμένοι μέθοδοι. Κάποιες από αυτές είναι η αρχή ‘‘τέσσερα μάτια είναι καλύτερα από δύο’’, δηλαδή η ευθύνη για ανεύρεση των κινδύνων πρέπει να είναι αποτέλεσμα ομαδικής δουλειάς, να γίνεται χρήση εμπειρογνωμόνων , να μελετούνται παρόμοια έργα που έχουν καταγραφεί στο παρελθόν και πολλοί ακόμα κανόνες που αναφέρονται στην ΔΑΣ, στο αντίστοιχο κεφάλαιο.

Από το σύνολο των πιθανών κινδύνων που θα έχουν συγκεντρωθεί, ο μελετητής σε μία σεναριακή προσέγγιση, πρέπει να επιλέξει κάποιους από αυτούς, ενδεικτικούς με βάση το τι θέλει να μελετήσει. Οι κίνδυνοι αυτοί οφείλουν να είναι αντιπροσωπευτικοί και να έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά. Αυτά τα συμβάντα προωθούνται για περαιτέρω ανάλυση.

Μετά την τελική επιλογή των κρίσιμων γεγονότων, ακολουθεί η επιλογή των σεναρίων για κάθε ένα από αυτά. «*Το σενάριο είναι μία χρονική αλληλουχία γεγονότων που θα αρχίζει από τη διαταραχή της κανονικής λειτουργίας, θα έχει ως κεντρικό σημείο αναφοράς την εμφάνιση του κρίσιμου γεγονότος και θα εξελίσσεται μέχρι τη λήξη της έκτακτης κατάστασης*» (ΔΑΣ).

Οι πιθανές αιτίες που θα δημιουργούν το κρίσιμο συμβάν θα αναπαριστώνται στο δέντρο σφαλμάτων. Με τον τρόπο αυτό γίνεται και ο έλεγχος για την αποτελεσματικότητα των μέτρων πρόληψης που έχουν ληφθεί. Το δέντρο γεγονότων

θα έχει ως αρχή το κρίσιμο συμβάν που έχει επιλεχθεί σε προηγούμενο βήμα και κάθε κλάδος του θα αποτελεί ένα διαφορετικό σενάριο προς εξέταση.

Η επιλογή του κατάλληλου/ων κλάδων-σεναρίων θα γίνεται με τα εξής κριτήρια:

- Να είναι ρεαλιστικά και υλοποιήσιμα. Δηλαδή να είναι πιθανά και εφικτά. Ακραία σενάρια με μικρή πιθανότητα εμφάνισης και εκτενών καταστροφικών συνεπειών πρέπει να αποφεύγονται. Βασικός στόχος μίας ανάλυσης επικινδυνότητας είναι να διορθωθούν αδυναμίες του συστήματος. Ένα ακραίο συμβάν δεν έχει λοιπόν νόημα να μελετάται καθώς δεν θα επιστρέψει χρήσιμα συμπεράσματα μετά την μελέτη του
- Να δοκιμάζονται τα χαρακτηριστικά της σήραγγας σε οριακές συνθήκες. Παραδείγματος χάρη, οριακή συνθήκη είναι η ύπαρξη πυρκαγιάς στη θέση μίας εξόδου κινδύνου
- Τα σενάρια να είναι αναπαράξιμα με όσο το δυνατόν περισσότερα ποσοτικά στοιχεία για την αποφυγή αυθαίρετων συμπερασμάτων

Το τέλος του σεναρίου ορίζεται ως η χρονική στιγμή που το σύνολο των επιζώντων έχει μετακινηθεί σε ασφαλή θέση.

Μετά την επιλογή των σεναρίων ακολουθεί η εξέταση τους. Η εξέταση του δέντρου σφαλμάτων γίνεται με ποιοτική θεώρηση και ακολουθεί αντίστροφη πορεία. Ξεκινά από το κρίσιμο γεγονός και στη συνέχεια γίνεται εξέταση του κάθε πιθανού αίτιου το οποίο μπορεί να συντέλεσε στο κρίσιμο γεγονός. Έτσι καταρτίζεται ένας κατάλογος αστοχιών του εξοπλισμού και των ανθρώπινων λαθών που μπορούν να προκαλέσουν ατύχημα.

Η εξέταση του δέντρου γεγονότων γίνεται με προσέγγιση «*αναδυόμενης σκέψης*» (ΔΑΣ Αύγουστος 2011). Ξεκινά με το κρίσιμο γεγονός, συνεχίζει με τις πιθανές εξελίξεις του γεγονότος, ενσωματώνοντας τόσο τις καταστάσεις αστοχίας όσο και τελεσφόρησης των λειτουργιών ασφάλειας. Η εξέταση του κάθε κλάδου γίνεται με τη χρήση ποσοτικής μεθόδου. Η εξέταση των σεναρίων πρέπει να λαμβάνει υπόψη:

- Τις ιδιαίτερες συνθήκες του περιβάλλοντος της σήραγγας οι οποίες παίζουν σημαντικό ρόλο στην έκταση των συνεπειών σε ανθρώπινες ζωές. Συγκεκριμένα ο περιορισμένος χώρος της σήραγγας παίζει πρωταγωνιστικό ρόλο στην εξάπλωση των πυρκαγιών αλλά και άλλων φυσικών μεγεθών που προέρχονται από αυτές, όπως:

- ✓ Εξάπλωση και διασκόρπιση του καπνού, ο οποίος μειώνει την ορατότητα των ατόμων
- ✓ Αύξηση της θερμοκρασίας
- ✓ Ύπαρξη υγρών και αερίων, όπως το μονοξείδιο του άνθρακα, επικίνδυνα για την υγεία όσων τα εισπνέουν

- Τη συμβολή που έχει η ενεργοποίηση των συστημάτων της σήραγγας (SCADA, ενεργοποίηση έκτακτου αερισμού, σύστημα διακοπής κυκλοφορίας) στην εξέλιξη του δέντρου γεγονότων
- Τις συνθήκες που μπορεί να δημιουργήσει η κίνηση των οχημάτων, όπως είναι το φαινόμενο του εμβόλου (piston effect)
- Την προσομοίωση του πληθυσμού και της συμπεριφοράς των χρηστών της σήραγγας από το κρίσιμο γεγονός έως και την λήξη του σεναρίου
- Την τιμή της αδιαφάνειας του αέρα, με την οποία υπολογίζεται η διαδρομή που πρόκειται να εκτελέσει ένα άτομο στην προσπάθεια του για αυτό-διάσωση
- Την οριακή τιμή της θερμότητας από ακτινοβολία ή/και μεταγωγή, της τοξικότητας και του θορύβου, πάνω από τις οποίες καθίσταται δύσκολη μέχρι ακατόρθωτη η προσπάθεια της εκκένωσης μέσω της προσέγγισης κάποιας εξόδου κινδύνου. Η αρχή της αυτό-διάσωσης βρίσκεται στον πυρήνα της ανάλυσης καθώς ο σχεδιασμός των σηράγγων έχει γίνει με άξονα την αρχή αυτή. Η διάσωση από τις υπηρεσίες εκτάκτων αναγκών έχει επικουρικό χαρακτήρα.

Μετά την εξέταση των σεναρίων πρέπει να έχει αποκαλυφθεί:

1. Η λειτουργία του κάθε συστήματος της σήραγγας και ο τρόπος που αυτό συμβάλει στην επίτευξη του ισοδύναμου επιπέδου ασφαλείας
2. Η λειτουργία της κάθε διαδικασίας της οργανωτικής δομής της σήραγγας και ο τρόπος που αυτή συμβάλει στην επίτευξη του ισοδύναμου επιπέδου ασφαλείας
3. Ο τρόπος που αλληλεπιδρούν και εξαρτώνται τα διάφορα συστήματα και οι διαδικασίες μεταξύ τους
4. Τον προσδιορισμό των ασθενών σημείων κάθε ανεξάρτητου συστήματος και του συνόλου της σήραγγας. Δηλαδή της υποδομής, του εξοπλισμού και των οργανωτικών διαδικασιών
5. Η τιμή της επικινδυνότητας, δηλαδή το μέγεθος των συνεπειών που είναι πιθανό να υπάρξουν

Για να τελειώσει η ανάλυση ευαισθησίας ακολουθούν συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης του επιπέδου ασφαλείας της σήραγγας. Στο τέλος δηλαδή παρουσιάζονται περιληπτικά τα εξής:

- Περίληψη των σεναρίων που εξετάστηκαν
- Περιληπτική αναφορά στο δομικό μέρος της σήραγγας, τον εξοπλισμό και τις οργανωτικές ρυθμίσεις της
- Ανακεφαλαίωση των συμπερασμάτων που έχουν προκύψει από την ανάλυση του δέντρου σφαλμάτων και προτάσεις για την πρόληψη ή τη μείωση πιθανότητας να εμφανιστεί το κρίσιμο γεγονός
- Τα ποσοτικά αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας πρέπει να συγκρίνονται με αυτά της αντίστοιχης ανάλυσης ευαισθησίας, για την σήραγγα αναφοράς. Αν τα αποτελέσματα σε κάποιον τομέα, όπως στον αριθμό ανθρώπινων ζωών που κινδυνεύουν, είναι καλύτερα ή ίσα με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση στην σήραγγα αναφοράς, τότε μπορούμε να πούμε πως έχουμε επίπεδο ασφαλείας ίδιο με την σήραγγας αναφοράς. Αν όμως τα αποτελέσματα της ανάλυσης στην σήραγγα υπό εξέταση είναι δυσμενέστερα από αυτά της σήραγγας αναφοράς για κάποιο σενάριο, πρέπει να διατυπωθούν προτάσεις που θα τροποποιούν στοιχεία του πεδίου ορισμού της πρώτης, με προσθήκη κατάλληλων μέτρων ασφαλείας και θα επαναλαμβάνεται η ανάλυση
- Ανεξάρτητη ανασκόπηση της αποτελεσματικότητας των προταθέντων μέτρων όπως έχουν αυτά οριστεί στο πεδίο ορισμού και πρόταση για τυχόν τροποποίηση τους αν αυτό κριθεί αναγκαίο από τα αποτελέσματα της ανάλυσης
- Για κάποιες μεμονωμένες μεταβλητές συνίσταται να γίνεται ανάλυση ευαισθησίας για το μέγεθος της επιρροής τους στο σύστημα και να παρουσιάζονται σε ξεχωριστή παράγραφο. Τέτοια μεταβλητή μπορεί να είναι η ύπαρξη μεγαφωνικής στη σήραγγα, κατά πόσο μειώνει τους χρόνους αντίδρασης
- Ανάλυση των συνεπειών της λειτουργικής απώλειας τμήματος του εξοπλισμού. Παραδείγματος χάρη αν η φωτιά ξεσπάσει κάτω από ανεμιστήρα και τον βγάλει εκτός λειτουργίας

Η ανάλυση που ακολουθεί αφορά πυρκαγιά σε οδική σήραγγα η οποία έχει προκληθεί από ατύχημα με φορτηγό το οποίο δεν μεταφέρει επικίνδυνα

εμπορεύματα. Η ανάλυση είναι σεναριακή και για την ολοκλήρωση της χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα CAMATT, το οποίο περιγράφεται διεξοδικά στη συνέχεια. Αναλυτικά τα στάδια της μεθόδου που έχουν υιοθετηθεί περιγράφονται στο **Κεφάλαιο 3**.

2.3 Το λογισμικό CAMATT

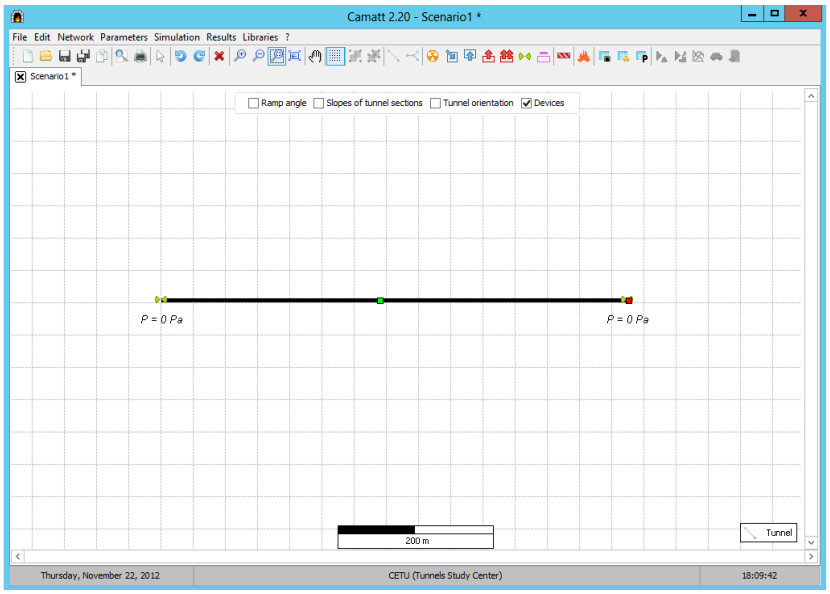
Το γαλλικό πρόγραμμα CAMATT (CAlcul Mono-dimensionnel Anisotherme Transitoire en Tunnel), κατασκευάστηκε με σκοπό να γίνει δυνατή η περιγραφή ενός ατυχήματος σε σήραγγα. Ο χρήστης δίνει στοιχεία στο πρόγραμμα που αφορούν το περιβάλλον της σήραγγας, τα τεχνικά χαρακτηριστικά της και το μέγεθος του ατυχήματος. Το πρόγραμμα στη συνέχεια αναπαράγει το ατύχημα και παρέχει στον χρήστη διαγράμματα που τον βοηθούν να αναλύσει τις συνέπειες του ατυχήματος τόσο σε ανθρώπινες απώλειες, όσο και υλικές ζημιές.

2.3.1 Τοποθέτηση των στοιχείων του δικτύου

Η πρώτη εικόνα που έχει ο χρήστης με το πρόγραμμα είναι μία οθόνη με πλέγμα όπου θα απεικονίσει στη συνέχεια τη σήραγγα και τους μηχανισμούς που τη συνοδεύουν.

2.3.1.1 Σήραγγα (tunnel)

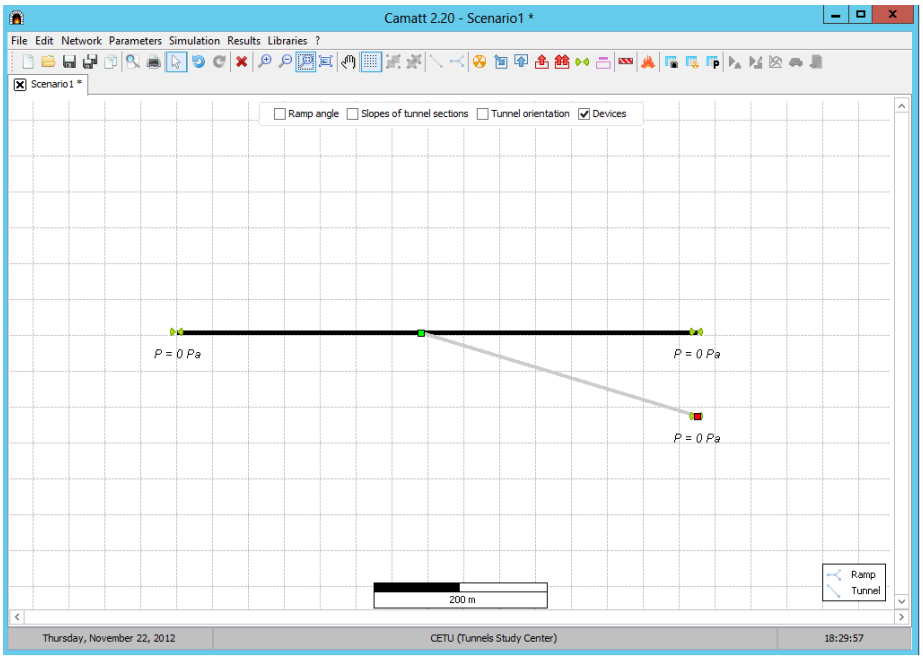
Η επιθυμητή σήραγγα δημιουργείται με την εντολή «tunnel» που βρίσκεται στο menu «Network». Με αριστερό «κλικ» του ποντικιού ορίζεται η αρχή της σήραγγας και με δεξί «κλίκ» οριοθετείται το τέλος αυτής. Το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας σήραγγας με πολλά τμήματα σε σειρά πατώντας αριστερό «κλικ» αντί για δεξί. Με τον ορισμό της αρχής και του τέλους της σήραγγάς, το πρόγραμμα θέτει αυτόματα την πίεση σε κάθε στόμιο ίση με 0 Pascal, **Σχήμα 2**. Το πρόγραμμα εμφανίζει κάτω από τη σχεδιαζόμενη σήραγγα, το μήκος αυτής, το οποίο μπορεί να αλλάξει από τις παραμέτρους του.



Σχήμα 2: Η σχεδιαζόμενη σήραγγα

2.3.1.2 Ράμπα (ramp)

Ο σχεδιασμός διακλαδώσεων στη ροή της υπάρχουσας σήραγγας είναι εφικτός επιλέγοντας τη εντολή «ramp» στο μενού «Network». Επιλέγοντας και πατώντας πάνω με το ποντίκι το διακριτό σημείο στο οποίο θέλει ο χρήστης να τοποθετήσει την ράμπα και στη συνέχεια κρατώντας πατημένο το αριστερό «κλικ» του ποντικού, χαράζεται η ράμπα στην επιφάνεια σχεδίασης. Μία σχεδιασμένη ράμπα φαίνεται στο **Σχήμα 3** και είναι το κομμάτι της σήραγγας με το γκρίζο χρώμα. Είναι σημαντικό να παρατηρηθεί, ότι και στο στόμιο της ράμπας το πρόγραμμα θέτει τιμή πίεσης 0 Pascal.



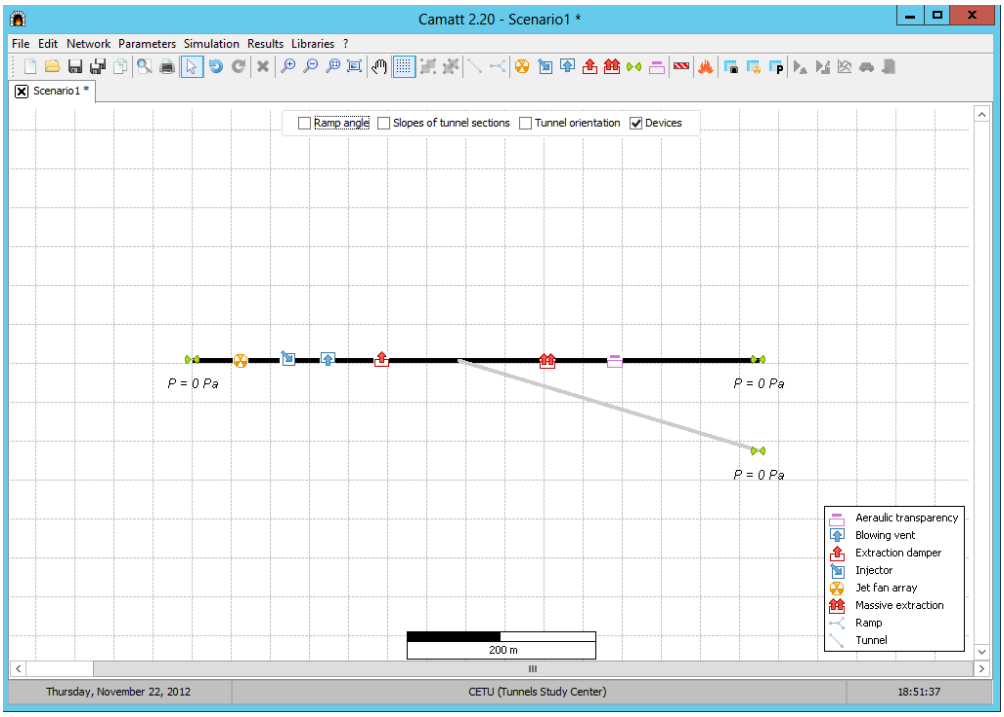
Σχήμα 3: Η ράμπα είναι ο κλάδος με το γκρίζο χρώμα

2.3.1.3 Εξοπλισμός αερισμού

Ο εξοπλισμός αερισμού που χρειάζεται μία σήραγγα περιγράφεται από τις επόμενες εντολές του «Network» και είναι οι:

- Jet fan array
- Injector
- Blowing vent
- Extraction damper
- Massive extraction
- Local head loss
- Aeraulic transparency

Αυτό τον εξοπλισμό τον τοποθετεί ο χρήστης πάνω στην σήραγγα, επιλέγοντας κάθε φορά από το menu «Network» την αντίστοιχη συσκευή και στη συνέχεια επιλέγοντας πάνω στη σήραγγα το σημείο που αυτός επιθυμεί. Ο χρήστης μπορεί να τοποθετήσει όσες συσκευές θέλει από το κάθε είδος, να διαγράψει κάποια συσκευή επιλέγοντάς την και πατώντας «delete», να ομαδοποιήσει συσκευές το ίδιου είδους μεταξύ τους ώστε να μπορεί να τις ελέγξει ταυτόχρονα και να παραμετροποιήσει τη θέση τους και τα χαρακτηριστικά τους. Στο **Σχήμα 4** φαίνεται ο όλος εξοπλισμός που έχει αναφερθεί παραπάνω, δεν έχει όμως ακόμα παραμετροποιηθεί.

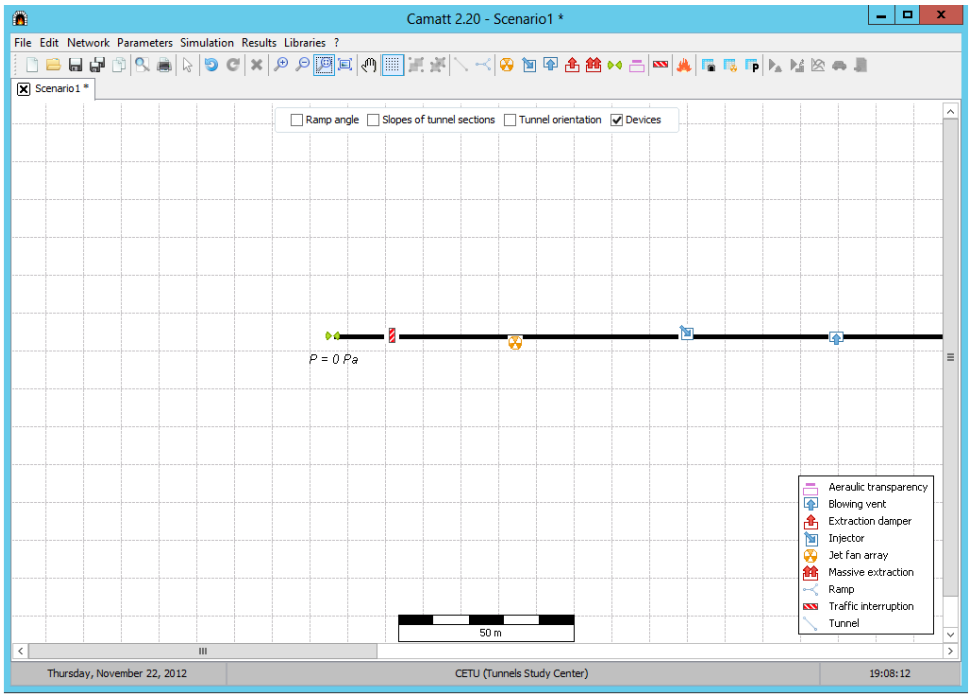


Σχήμα 4: Εξοπλισμός εξαερισμού

2.3.1.4 Σύστημα διακοπής κυκλοφορίας

Το σύστημα αυτό αποτελείται από μπάρα διακοπής της κυκλοφορίας, ειδικό φωτισμό και οποιοδήποτε άλλο μέσο χρησιμοποιείται για να διακοπεί η κυκλοφορία των εισερχόμενων οχημάτων στη σήραγγα, όταν παραστεί ανάγκη.

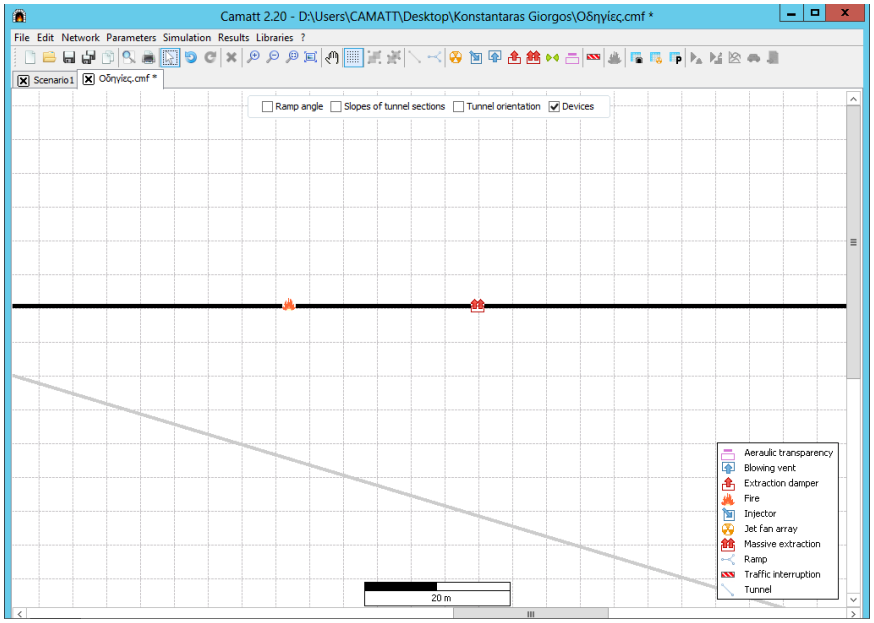
Όπως και για το σύστημα του εξαερισμού, έτσι και εδώ, ο χρήστης πρέπει να επιλέξει από το menu «Network» την εντολή «Traffic interruption» και να τοποθετήσει το σύστημα στο σημείο της σήραγγας που πιστεύει ότι χρειάζεται, **Σχήμα 5**.



Σχήμα 5: Διακοπή κυκλοφορίας-είναι το δεύτερο εικονίδιο με το ερυθρόλευκο χρώμα

2.3.1.5 Φωτιά

Η φωτιά αποτελεί το κρίσιμο γεγονός της μελέτης και τοποθετείται πάνω στη σήραγγα όμοια με τον εξοπλισμό εξαερισμού και τα συστήματα διακοπής κυκλοφορίας επιλέγοντας το menu «Network» και στη συνέχεια την εντολή «Fire». Στη συνέχεια μπορεί να την τοποθετήσει οπουδήποτε πάνω στη γραμμή της σήραγγας, **Σχήμα 6**.



Σχήμα 6: Η φωτιά έχει τοποθετηθεί μερικά μέτρα μετά τη ράμπα

2.3.2 Ορισμός παραμέτρων

Αφού έχουν τοποθετηθεί όλα τα στοιχεία του δικτύου που χρειάζονται, επιλέγοντας το menu «Parameters» ορίζονται τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά των παραπάνω στοιχείων.

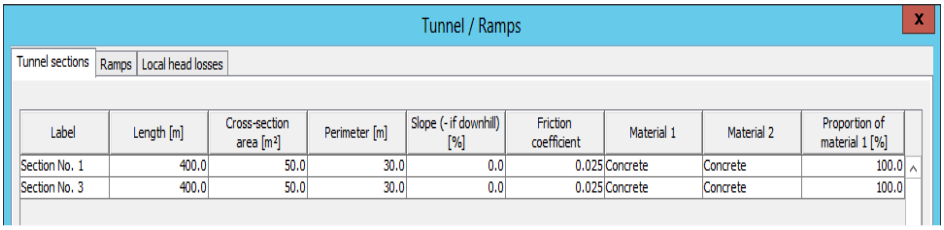
2.3.2.1 Σήραγγες και ράμπες

Η πρώτη εντολή του menu «Parameters» αναφέρεται ως «Tunnel/Ramps». Επιλέγοντας την εντολή αυτή, ο χρήστης κατευθύνεται σε ένα παράθυρο διαλόγου (**Σχήμα 7**) στο οποίο μπορεί να καταχωρήσει στοιχεία της σήραγγας όπως:

- Μήκος [m], (Length)
- Διατομή [m²], (Cross-section area)
- Περίμετρος της διατομής [m],(Perimeter)
- Κλίση [%] (Slope)
- Τον συντελεστή τριβής (Friction coefficient)
- Το υλικό της κατασκευής (Material)

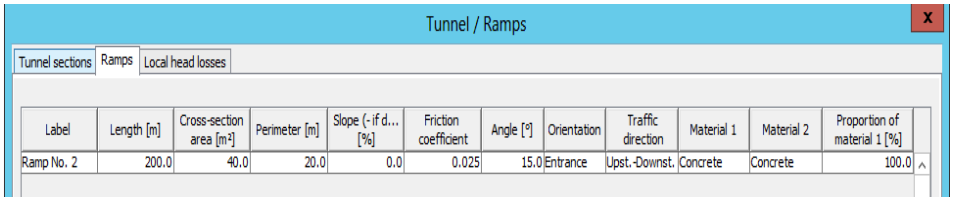
Και συμπληρωματικά για την ράμπα (**Σχήμα 8**) :

- Τη γωνία που σχηματίζει με τη σήραγγα (Angle)
- Τον προσανατολισμό της
- Τη κατεύθυνση της κίνησης των οχημάτων



Label	Length [m]	Cross-section area [m²]	Perimeter [m]	Slope (- if downhill) [%]	Friction coefficient	Material 1	Material 2	Proportion of material 1 [%]
Section No. 1	400.0	50.0	30.0	0.0	0.025	Concrete	Concrete	100.0
Section No. 3	400.0	50.0	30.0	0.0	0.025	Concrete	Concrete	100.0

Σχήμα 7: Παράμετροι για τη σήραγγα



Label	Length [m]	Cross-section area [m²]	Perimeter [m]	Slope (- if d... [%]	Friction coefficient	Angle [°]	Orientation	Traffic direction	Material 1	Material 2	Proportion of material 1 [%]
Ramp No. 2	200.0	40.0	20.0	0.0	0.025	15.0	Entrance	Upst.-Downst.	Concrete	Concrete	100.0

Σχήμα 8: Παράμετροι για ράμπα

2.3.2.2 Εξοπλισμός σήραγγας

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο εξοπλισμός της σήραγγας και οι παράμετροί της, που μπορούν να ρυθμιστούν, από τις αντίστοιχες εντολές για την κάθε μία συσκευή, από το menu «Parameters» και την εντολή «Devices».

Ανεμιστήρες (Jet fan arrays), (**Σχήμα 9**):

- Αριθμός των ανεμιστήρων (Number of jet fan)
- Ώθηση κάθε ενός ανεμιστήρα [N], (Unit free-field thrust)
- Ταχύτητα ροής αέρα [m/s], (Jet velocity)
- Βαθμός απόδοσης (Efficiency)
- Μέγιστη θερμοκρασία [ºC] λειτουργίας, (Max. working temperature)
- Πυκνότητα αναφοράς [kg/m³], (Reference density)
- Διατομή της σήραγγας στο κομμάτι που είναι τοποθετημένη η διάταξη [m²]
- Διατομή της σήραγγας στο σημείο μίας μονάδας αερισμού [m²]
- Απόσταση από την αρχή [m], (Dist. From upstream)

Distributed ventilation | Jet fans | Injectors | Blowing vents | Extraction dampers | Massive extractions | Aeraulic transparencies | Traffic interruptions

Label	Number of jet fans	Unit free-field thrust [N]	Jet velocity [m/s]	Efficiency (0 to 1)	Max. working temperature [ºC]	Reference density [kg/m3]	Tunnel Cross-sect. area [m²]	Cross-sect. area at jet fans [m²]	Dist. from upstream [m]	Control
Array No. 1	2	1000.0	30.0	0.85	200.0	1.205	50.0	50.0	100.0	

Σχήμα 9: Παράμετροι για ανεμιστήρες (jet fans)

Εγχυτήρες (Injectors), (**Σχήμα 10**):

- Μέγεθος ροής έγχυσης αέρα [m³/s], (Injection flow rate)
- Ταχύτητα ροής αέρα [m/s], (Jet velocity)
- Σχηματιζόμενη γωνία με τον άξονα της σήραγγας [º]
- Βαθμός απόδοσης (Efficiency)
- Διατομή της σήραγγας στο κομμάτι που είναι τοποθετημένη η διάταξη [m²]
- Διατομή της σήραγγας στο σημείο ενός εγχυτήρα [m²]
- Απόσταση από την αρχή [m], (Dist. From upstream)

Distributed ventilation | Jet fans | Injectors | Blowing vents | Extraction dampers | Massive extractions | Aeraulic transparencies | Traffic interruptions

Label	Injection flow rate [m3/s]	Jet velocity [m/s]	Angle with tunnel axis [°]	Efficiency (0 to 1)	Tunnel Cross-sect. area [m²]	Cross-sect. area at injector [m²]	Dist. from upstream [m]	Pollution	Control
Injector No. 1	30.0	30.0	15.0	0.85	50.0	50.0	200.0		

Σχήμα 10: Παράμετροι για εγχυτήρες (injectors)

Φυσητήρες (Blowing vents), (**Σχήμα 11**):

- Παροχή εισαγόμενου αέρα [m³/s], (Blown flow rate)
- Απόσταση από την αρχή [m]

Distributed ventilation | Jet fans | Injectors | Blowing vents | Extraction dampers | Massive extractions | Aeraulic transparencies | Traffic interruptions

Label	Blown flow rate [m3/s]	Distance from upstream [m]	Pollution	Control
Blowing vent No. 1	10.0	300.0		

Σχήμα 11: Παράμετροι για φυσητήρες

Εξαγωγείς αέρα (Extraction dumpers), (**Σχήμα 12**):

- Παροχή εξαγόμενου αέρα [m³/s], (Extracted flow rate)
- Απόσταση από την αρχή [m]

Distributed ventilation | Jet fans | Injectors | Blowing vents | Extraction dampers | Massive extractions | Aeraulic transparencies | Traffic interruptions

Label	Extracted flow rate [m3/s]	Distance from upstream [m]	Control
Extraction damper No. 1	20.0	400.0	

Σχήμα 12: Παράμετροι για εξαγωγείς αέρα

Μαζικοί εξαγωγείς (Massive extractions), (**Σχήμα 13**):

- Παροχή εξαγόμενου αέρα [m³/s], (Extracted flow rate)
- Απόσταση από την αρχή [m]

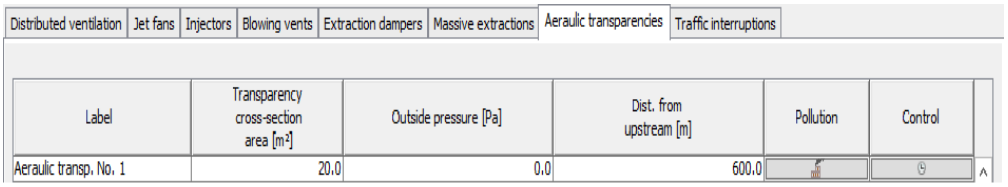
Distributed ventilation | Jet fans | Injectors | Blowing vents | Extraction dampers | Massive extractions | Aeraulic transparencies | Traffic interruptions

Label	Extracted flow rate [m3/s]	Distance from upstream [m]	Control
Massive extraction No. 1	200.0	500.0	

Σχήμα 13: Παράμετροι μαζικών εξαγωγέων

Αεραυλική διαφάνεια (aeraulic transparency) (**Σχήμα 14**):

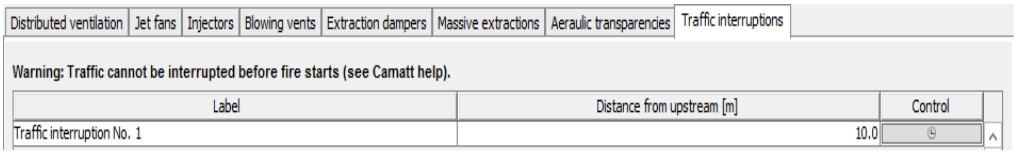
- Διατομή της διαφάνειας, (Transparency cross-section area) [m²]
- Εξωτερική πίεση, (Outside pressure) [Pa]
- Απόσταση από την αρχή [m]



Σχήμα 14: Παράμετροι για αεραυλική διαφάνεια (aeraulic transparency)

Σύστημα διακοπής κυκλοφορίας (Traffic interruptions), (**Σχήμα 15**):

- Απόσταση από την αρχή [m]



Σχήμα 15: Παράμετροι για συσκευές που διακόπτουν την κυκλοφορία

2.3.2.3 Το κουμπί *(Pollution)*

Το κουμπί αυτό βρίσκεται στο menu παραμέτρων όλων των συσκευών που εισάγουν αέρα στη σήραγγα. Οι συσκευές αυτές είναι:

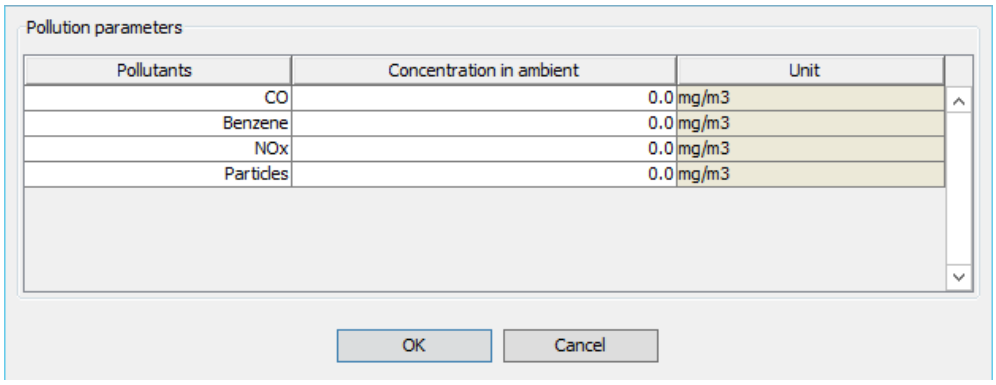
- Εγχυτήρες
- Φυσητήρες
- Αεραυλικές διαφάνειες (aeraulic transparencies)

Πατώντας το, δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να εισάγει, για την κάθε συσκευή ξεχωριστά, τις συγκεντρώσεις ρύπων, (**Σχήμα 16**). Οι ρύποι αυτοί είναι:

- CO [mg/m³]
- Benzene [mg/m³]
- NOx [mg/m³]
- Particles [mg/m³]

Οι συγκεντρώσεις ρύπων μπορούν να εισαχθούν και επιλέγοντας την εντολή «Pollution» από το menu «Parameters». Η διαφορά είναι ότι στη δεύτερη περίπτωση

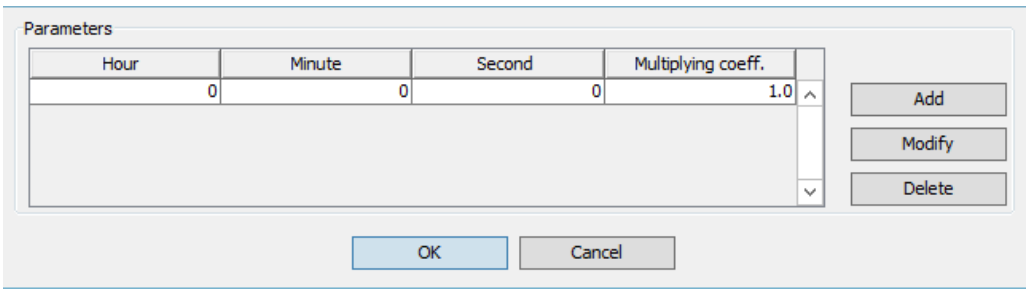
οι συγκεντρώσεις ρύπων τίθενται ίδιοι για όλες τις συσκευές που εισάγουν αέρα μέσα στη σήραγγα.



Σχήμα 16: Παράθυρό εισαγωγής συγκεντρώσεων ρύπων που εισάγονται από το περιβάλλον

2.3.2.4 Τα κουμπιά [ ] και [ ] (Control)

Τα κουμπιά αυτά βρίσκονται δίπλα από κάθε συσκευή που έχουμε εισάγει και χρησιμοποιούνται για να προγραμματίσει ο χρήστης του προγράμματος την λειτουργία της συσκευής, (**Σχήμα 17**). Αν πολλές συσκευές έχουν ομαδοποιηθεί, το εικονίδιο [ ] αντικαθιστά το [ ].

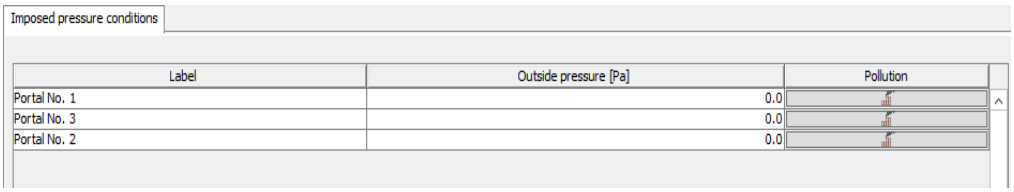


Σχήμα 17: Παράθυρο διαλόγου για τον προγραμματισμό της λειτουργίας των συσκευών

Ο χρήστης μπορεί να καθορίσει τη χρονική στιγμή που επιθυμεί να ξεκινήσει τη λειτουργία της η συσκευή και να ορίσει και τον βαθμό στον οποίο εκείνη θα λειτουργεί από τον συντελεστή «Multiplying coefficient». Αυτό σημαίνει ότι αν παραδείγματος χάρη, ένας ανεμιστήρας λειτουργεί με παροχή 60 m^3/s, σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά που του έχουν προσδοθεί κατά την εισαγωγή των παραμέτρων του, για να λειτουργήσει με παροχή 240 m^3/s πρέπει να οριστεί το κελί Multiplying coefficient ίσο με τρία (3).

2.3.2.5 *Πίεση στις πύλες*

Από το menu «Parameters» και την εντολή «Pressure at portals» ο χρήστης μπορεί να θέσει την πίεση σε Pascal που επικρατεί στις πύλες των σηράγγων και των ραμπών, (**Σχήμα 18**). Σε αυτό το παράθυρο διαλόγου φαίνεται πάλι το εικονίδιο από το οποίο εισάγει ο χρήστης συγκεντρώσεις ρύπων.

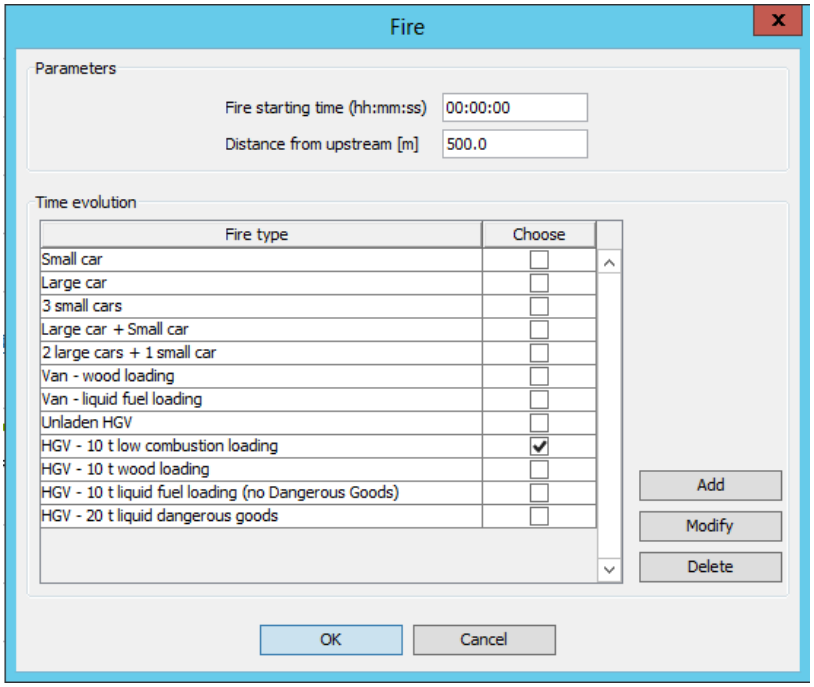


Σχήμα 18: Εισαγωγή πιέσεων έξω από τις πύλες των σηράγγων και των ραμπών

2.3.2.6 *Φωτιά*

Από το menu «Parameters» και την εντολή «Fire» γίνεται η παραμετροποίηση της φωτιάς που έχει τοποθετήσει σε προηγούμενο βήμα ο χρήστης. Στο παράθυρο διαλόγου (**Σχήμα 19**) που εμφανίζεται, ζητείται:

- Ο χρόνος έναρξης της φωτιάς
- Η απόσταση της φωτιάς από την αρχή της σήραγγας
- Ο τύπος της φωτιάς

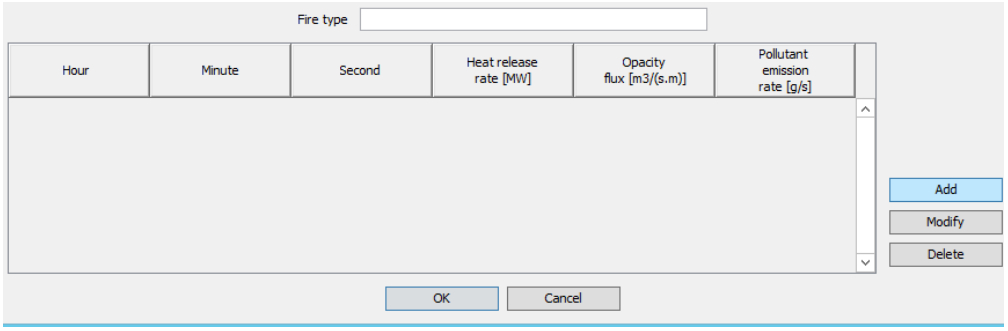


Σχήμα 19: Παράμετροι φωτιάς

Ο τύπος της φωτιάς μπορεί να προέλθει από 12 κατηγορίες φωτιών αναφοράς που είναι έτοιμες και παραμετροποιημένες από το πρόγραμμα. Η παραμετροποίηση που έχουν αφορά, (**Σχήμα 20**):

- Την ώρα έναρξης της φωτιάς (ώρα-λεπτό-δευτερόλεπτο)
- Την ισχύ της θερμότητας που εκλύεται [MW] (Heat release rate)
- Τη ροή της αδιαφάνειας [m³/(s*m)] (Opacity flux)
- Τιμή ρυπογόνων εκπομπών [g/s] (Pollutant emission rate)

Ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει δική του φωτιά επιλέγοντας το κουμπί «add» στο παραπάνω παράθυρο διαλόγου και στη συνέχεια να εισάγει τις παραπάνω παραμέτρους, (**Σχήμα 20**).

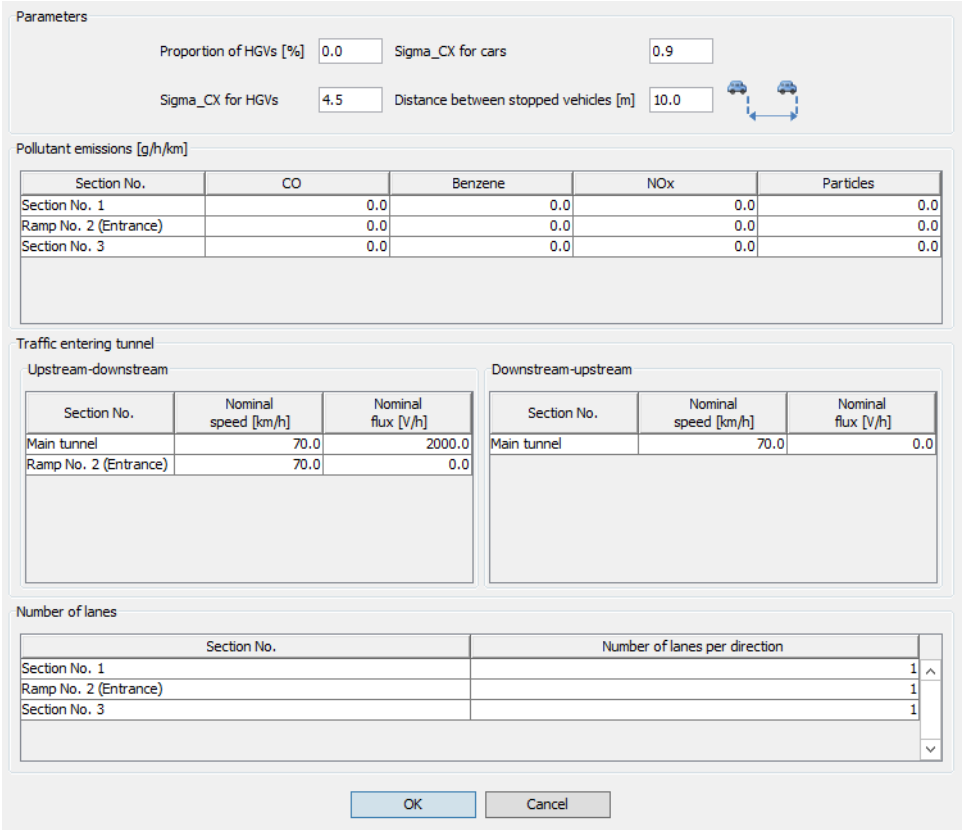


Σχήμα 20: Θέσπιση παραμέτρων για δημιουργία νέας φωτιάς ή αλλαγή χαρακτηριστικών υπάρχουσας.

2.3.2.7 Κίνηση (Traffic)

Η εντολή «Traffic» από το menu «Parameters» χρησιμοποιείται για να προσδιοριστεί η κίνηση μέσα στη σήραγγα για το επιλεγμένο σενάριο(**Σχήμα 21**). Οι παράμετροι που πρέπει να οριστούν είναι:

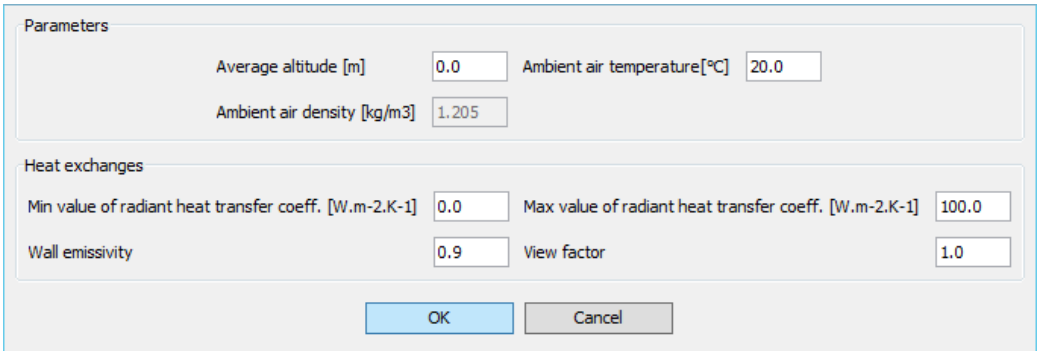
- Αναλογία βαρέων οχημάτων (HGVs)
- Μετωπική επιφάνεια ΙΧ αυτοκινήτων [m²]
- Μετωπική επιφάνεια βαρέων οχημάτων (HGVs) [m²]
- Απόσταση μεταξύ σταματημένων οχημάτων [m]
- Εκπομπές ρύπων [kg/s*m]
- Ονομαστική ταχύτητα [km/h]
- Ονομαστική ροή [veh/h]
- Αριθμός λωρίδων ανά διεύθυνση



Σχήμα 21: Παράμετροι για κίνηση οχημάτων εντός σήραγγας

2.3.2.8 Περιβάλλον

Με την εντολή «Environment» από το menu «Parameters» πρέπει ο χρήστης να ορίσει τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος της σήραγγας. Στην **Σχήμα 22** φαίνεται το παράθυρο διαλόγου που εμφανίζεται για την καταχώρηση των στοιχείων αυτών.



Σχήμα 22: Παράμετροι περιβάλλοντος σήραγγας

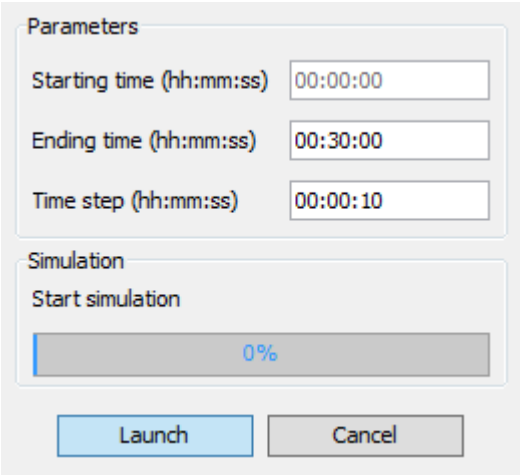
2.3.3 Προσομοίωση

Στο menu «Simulation» δίνονται δύο επιλογές. Να τρέξει το πρόγραμμα την προσομοίωση για τη φωτιά «Fire mode» ή για τους ρύπους «Pollution mode». Ο χρήστης θα τρέξει και τις δύο επιλογές για να έχει μία συνολική εποπτεία των αποτελεσμάτων του σεναρίου του.

2.3.3.1 Fire mode

Επιλέγοντας να τρέξει το «Fire mode», εμφανίζεται στον χρήστη το παράθυρο διαλόγου του **Σχήματος 23** και τότε πρέπει να θέσει:

- Την ώρα έναρξης της φωτιάς, η οποία αυτόματα τίθεται στην αρχή του σεναρίου σε χρόνο 00:00:00
- Το τέλος της φωτιάς και του σεναρίου, το οποίο τίθεται και αυτό αυτόματα μετά από τριάντα λεπτά (00:30:00)
- Το βήμα χρόνου (step time), που χρησιμοποιείται για να καθορίσει τη δειγματοληψία των αποτελεσμάτων του υπολογισμού



Σχήμα 23: Παράθυρο διαλόγου για την υλοποίηση της προσομοίωσης

2.3.3.2 Pollution mode

Κατά παρόμοιο τρόπο, στην ίδια λίστα εντολών βρίσκεται και εντολή «Pollution mode» την οποία εκτελεί ο χρήστης και ο υπολογιστής με το πρόγραμμα κάνουν τους απαραίτητους υπολογισμούς.

2.3.4 Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα του υπολογισμού του σεναρίου εμφανίζονται με την χρήση του menu «Results». Εκεί ο χρήστης μπορεί να επιλέξει να δει αποτελέσματα σε

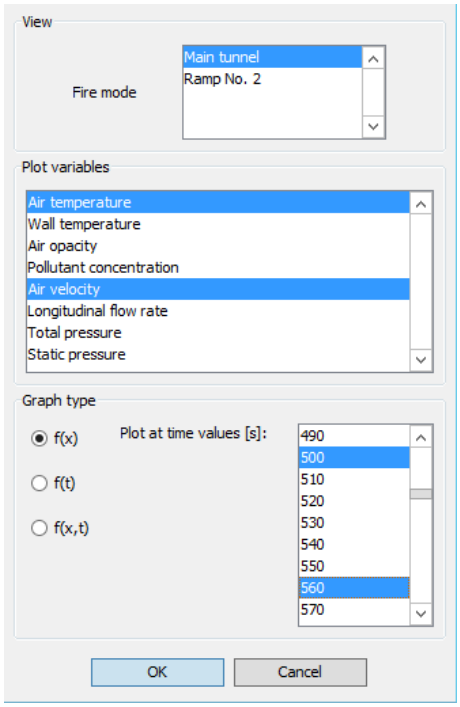
σχεδιαστική μορφή (Plot results), να δει την κίνηση των οχημάτων όπως θα εξελιχτεί σύμφωνα με το σενάριο που έχει επιλέξει και τις παραμέτρους που έχει ορίσει (Show traffic), να εξάγει τα αποτελέσματα σε κατάλληλη προς επεξεργασία μορφή (Export results/Export traffic results).

2.3.4.1 Plot results

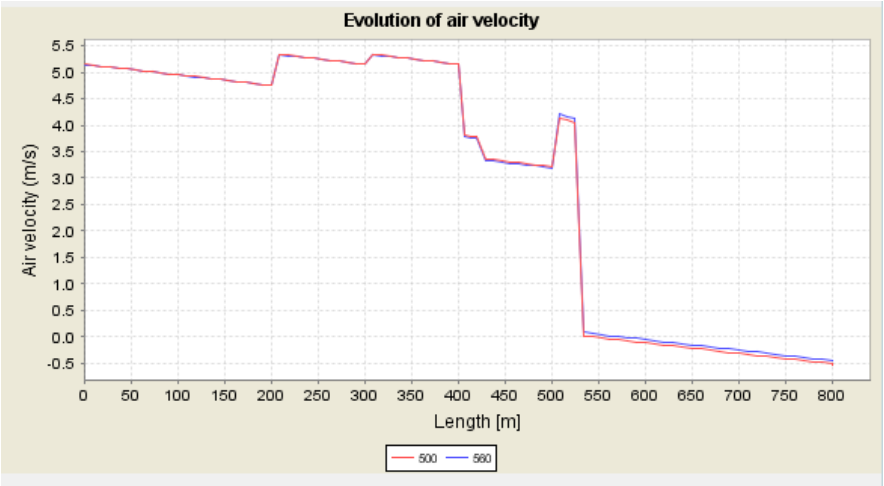
Είτε ο χρήστης έχει εκτελέσει την προσομοίωση των αποτελεσμάτων σε «Fire mode» είτε σε «Pollution mode», η εντολή «Plot results» στο menu «Results» είναι διαθέσιμη προς εκτέλεση. Από αυτή την εντολή του δίνεται η δυνατότητα να παρακολουθήσει με γραφικό τρόπο την εξέλιξη και τη μεταβολή διάφορων ποσοτήτων, με την πάροδο του χρόνου σε όλο το μήκος της σήραγγας.

Έτσι λοιπόν μπορεί να γίνει η επιλογή των ποσοτήτων που κρίνονται απαραίτητες προς ανάλυση και στη συνέχεια να γίνει μία από τις παρακάτω επιλογές:

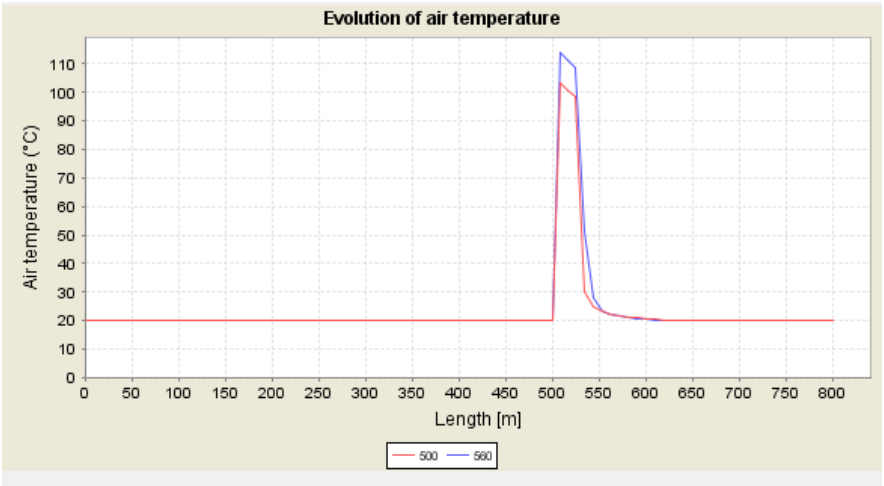
- Να ζητηθεί από το πρόγραμμα να προβάλλει διάγραμμα με τετμημένη την απόσταση από την αρχή της σήραγγας και τεταγμένη την επιλεγμένη ποσότητα που ζητείται η παρακολούθησή της, για μία ή περισσότερες συγκεκριμένες χρονικές στιγμές (**Σχήμα 24**$^{\alpha,\beta,\gamma}$)



Σχήμα 24$^{\alpha}$**: Επιλέγουμε να παρακολουθήσουμε τις ποσότητες «Air temperature» και «Air velocity», κατά μήκος της σήραγγας, τις χρονικές στιγμές 500 και 560 s**

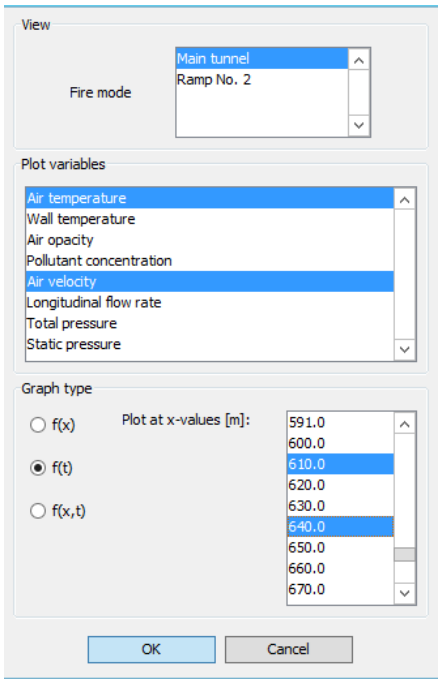


Σχήμα 24$^{\beta}$: Διάγραμμα ταχύτητας του αέρα σε όλο το μήκος της σήραγγας. Με κόκκινο χρώμα στα 500s, με μπλε χρώμα στα 560s

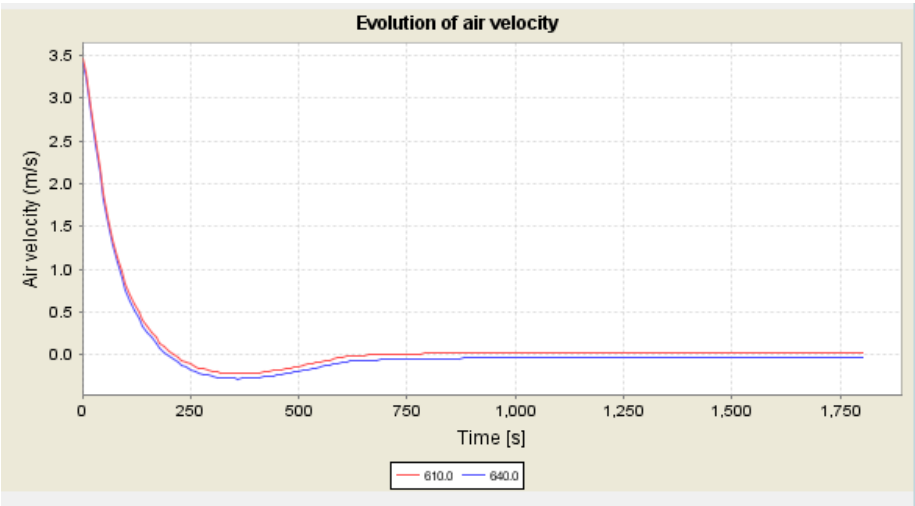


Σχήμα 24$^{\gamma}$: Διάγραμμα θερμοκρασίας του αέρα σε όλο το μήκος της σήραγγας. Με κόκκινο χρώμα στα 500s, με μπλε χρώμα στα 560s

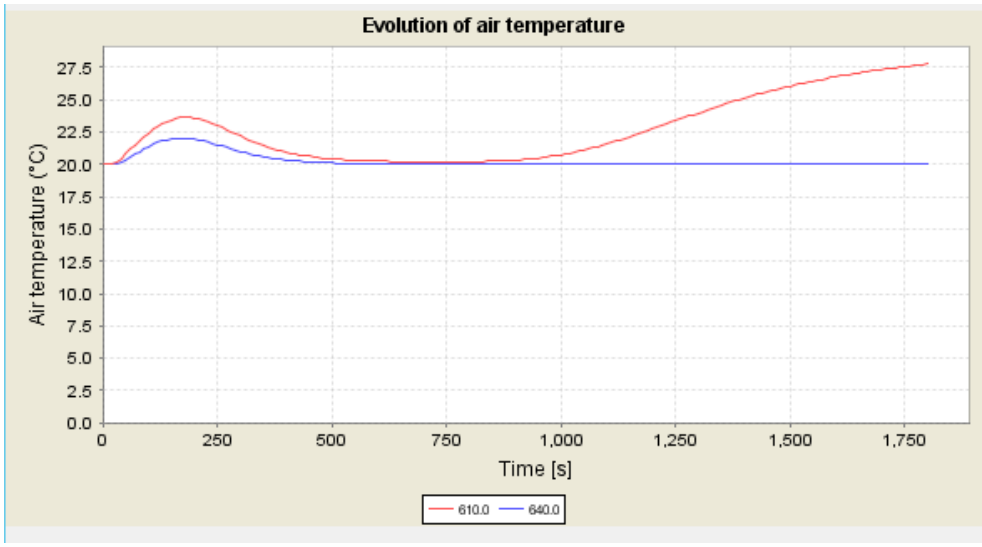
- Να ζητηθεί από το πρόγραμμα να προβάλλει διάγραμμα με τετμημένη τον χρόνο που περνά από την έναρξη του κρίσιμου γεγονότος (φωτιά) και τεταγμένη την επιλεγμένη ποσότητα που ζητείται να παρακολουθηθεί, για συγκεκριμένο/α σημεία της σήραγγας (**Σχήμα 25$^{\alpha,\beta,\gamma}$**)



Σχήμα 25^{α}: Επιλέγουμε να παρακολουθήσουμε τις ποσότητες «Air temperature» και «Air velocity», καθ' όλη τη διάρκεια της εξέλιξης του ατυχήματος στα σημεία 610 και 640m από την αρχή της σήραγγας

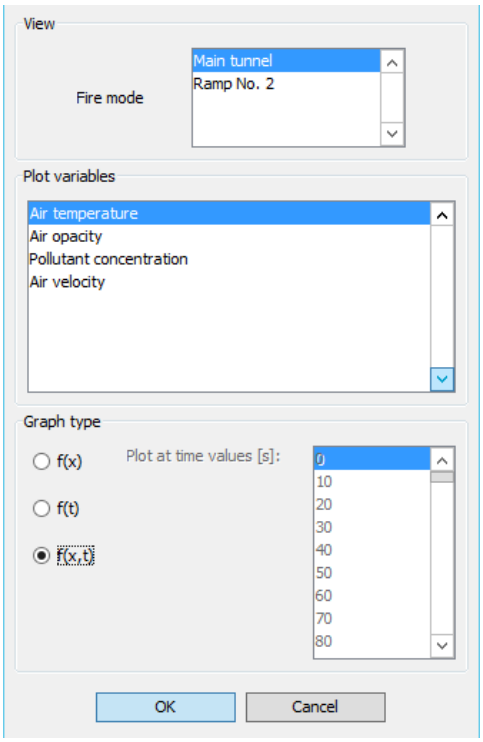


Σχήμα 25^{β}: Διάγραμμα ταχύτητας του αέρα καθ' όλη τη διάρκεια της εξέλιξης του ατυχήματος. Με κόκκινο χρώμα στα 610m, με μπλε χρώμα στα 640m

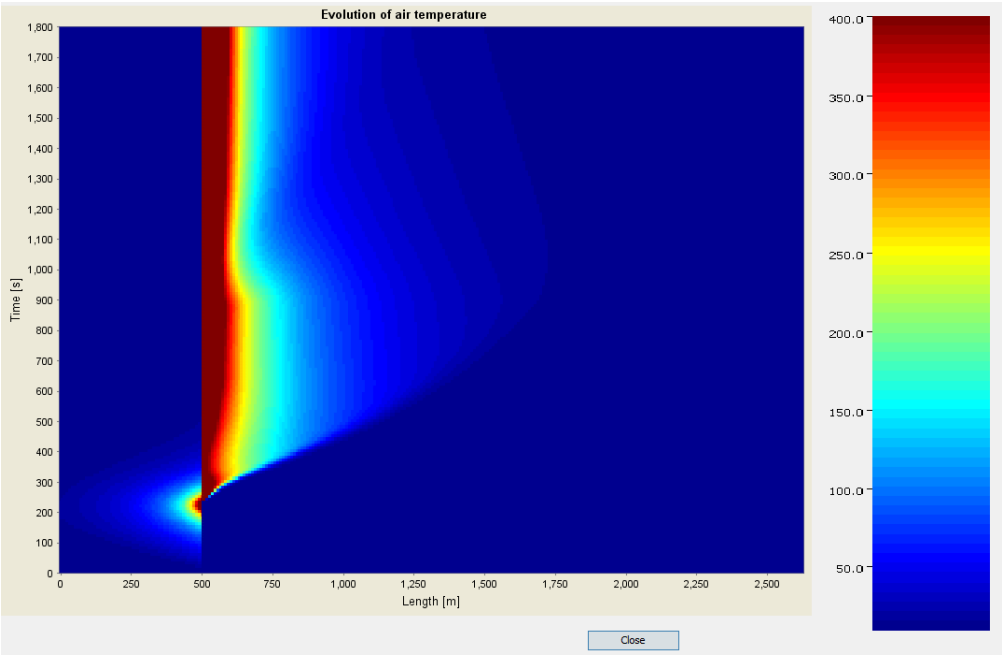


Σχήμα 25^{γ}: Διάγραμμα θερμοκρασίας του αέρα όλη τη διάρκεια της εξέλιξης του ατυχήματος. Με κόκκινο χρώμα στα 610m, με μπλε χρώμα στα 640m

- Να ζητηθεί από το πρόγραμμα να προβάλλει διάγραμμα με τετμημένη την απόσταση από την αρχή της σήραγγας, τεταγμένη τον χρόνο από την εκκίνηση του κρίσιμου συμβάντος και η επιλεγμένη ποσότητα που ζητείται να παρακολουθηθεί, να προσδιορίζεται με χρωματικό κώδικα σε αυτό το καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, (**Σχήμα 26^{α,β}**)



Σχήμα 26^{α}: Επιλέγουμε να παρακολουθήσουμε την ποσότητα «Air temperature» καθ' όλη τη διάρκεια του φαινομένου, σε όλο το μήκος της σήραγγας



Σχήμα 26^{β}: Η θερμοκρασία του αέρα φαίνεται στο διάγραμμα με χρωματικό κώδικα που αναλύεται δεξιά. Έτσι βλέπουμε σε κάθε χρονική στιγμή ποία είναι η θερμοκρασία του αέρα σε κάθε σημείο της σήραγγας

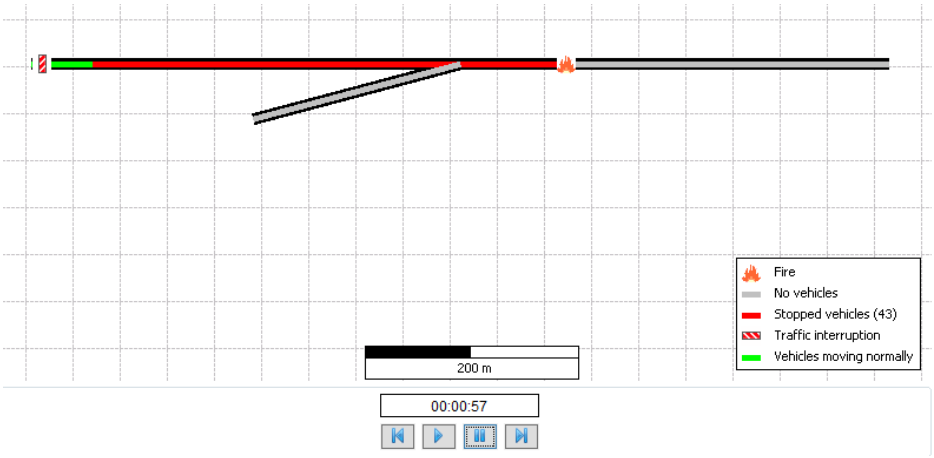
2.3.4.2 Show traffic

Η εντολή αυτή χρησιμοποιείται για να παρακολουθήσει ο χρήστης του προγράμματος την κατανομή της κυκλοφορίας εντός της σήραγγας μετά την εμφάνιση του κρίσιμου ατυχήματος.

Αφού επιλεγεί από τον χρήστη η εντολή αυτή, του δίνεται η δυνατότητα:

- Να διαβάσει την κατανομή της κυκλοφορίας σύμφωνα με τον χρόνο, πατώντας το ‘‘play”
- Να σταματήσει την κατανομή της κυκλοφορίας τη χρονική στιγμή που το επιθυμεί, πατώντας το ‘‘pause”, ώστε να μπορεί να μελετήσει κάθε μεταβολή στα κυκλοφοριακά δεδομένα της σήραγγας
- Να δει την κατανομή της κυκλοφορίας στο τέλος της προσομοίωσης

Τα παραπάνω φαίνονται στο **Σχήμα 27** όπου με πράσινο χρώμα φαίνεται το κομμάτι της σήραγγας που την συγκεκριμένη στιγμή κινούνται κανονικά τα οχήματα, με γκρι το κομμάτι εκείνο που δεν υπάρχουν οχήματα και με κόκκινο το κομμάτι που υπάρχουν ακκινητοποιημένα οχήματα.



Σχήμα 27: Η κατανομή της κυκλοφορίας για τη χρονική στιγμή των 57s

Όπως είναι εύκολα διακριτό, στο 57° δευτερόλεπτο της προσομοίωσης έχει ήδη μπλοκαριστεί το μεγαλύτερο μέρος της σήραγγας που βρίσκεται πίσω από τη φωτιά, το σύνολο των μέχρι τότε ακινητοποιημένων οχημάτων είναι 43 και στο κομμάτι που έπεται της φωτιάς, αλλά και στη ράμπα, δεν υπάρχουν πλέον οχήματα.

3 Εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας - μελέτη περίπτωσης

3.1 Πεδίο ορισμού ασφάλειας της σήραγγας

Στα πρότυπα του άρθρου 3 της Διοικητικής Αρχής Σηράγγων (Δ.Α.Σ), αναφέρονται τα παρακάτω χαρακτηριστικά της οδικής σήραγγας.

3.1.1 Απαιτήσεις επιτελεστικότητας

Οι απαιτήσεις επιτελεστικότητας είναι οι απαραίτητες χαρακτηριστικές ιδιότητες που ορίζονται για μια σήραγγα πριν και κατά τη φάση της μελέτης (ΔΑΣ). Είναι απαιτήσεις που πρέπει να εκπληρώνει ώστε να έχει αξία και χρησιμότητα η σήραγγα τόσο από άποψη χρησιμότητας και ασφάλειας, όσο και από αισθητικής πλευράς. Οι απαιτήσεις αυτές πρέπει να είναι απλές, τεχνικά επιτεύξιμες όσον αφορά το κόστος και τον χρονικό προγραμματισμό, προσβάσιμες σε κάθε ενδιαφερόμενο, ανιχνεύσιμες μέχρι την προέλευση τους, ποσοτικές στον βαθμό που αυτό είναι εφικτό και επαληθεύσιμες. Στην προκειμένη ανάλυση, που εξετάζει τις συνέπειες μίας πυρκαγιάς σε σήραγγα, βασικές απαιτήσεις είναι ο καθορισμός σαφών κριτηρίων και οριακών τιμών για τις εξής απειλές:

- Ορατότητα
- Τοξικότητα, ασφυξιογόνα αέρια όπως το μονοξείδιο του άνθρακα
- Θερμότητα, από ακτινοβολία και μεταγωγή
- Θόρυβος

3.1.1.1 Κριτήρια ικανότητας διαφυγής

<u>Ορατότητα</u>

Ο καπνός που παράγεται από την φωτιά, έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται πολύ η ορατότητα ή αλλιώς να αυξάνεται η θολότητα και έτσι να δυσχεραίνεται το έργο τον ατόμων για διαφυγή. Ο τρόπος που υπολογίζεται η ορατότητα είναι ο εξής.

Αρχικά προσδιορίζεται η οπτική πυκνότητα (OD) ως αδιάστατο μέγεθος:

$$OD = \log\left(\frac{l_0}{l_1}\right)$$

Όπου I_0 είναι η ένταση μίας πρότυπης πηγής φωτός και I_1 η ένταση του φωτός όταν αυτή διανύει απόσταση L μέσα στον καπνό

Ο συντελεστής απόσβεσης είναι:

$$K = \left(\frac{OD}{L}\right) \times 2.303$$

Και η ορατότητα προσεγγίζεται από τη σχέση :

$$VIS = \frac{A}{K}$$

Όπου A είναι μία αδιάστατη σταθερά που παίρνει την τιμή 6 για εσωτερικώς φωτιζόμενα σήματα και 2 για ανακλαστικά σήματα. Οι μονάδες τις ορατότητας (VIS) είναι σε μέτρα (m).

Θερμότητα

Η θερμότητα είναι ο πλέον βασικός παράγοντας που επηρεάζει των αριθμό των ατόμων που θα εξουδετερωθούν σε μία ενδεχομένη πυρκαγιά σε σήραγγα. Διακρίνεται σε δύο κατηγορίες. Θερμότητα από ακτινοβολία και από μεταγωγή, οι οποίες αναπτύσσονται διεξοδικά στη συνέχεια.

Η θερμότητα από ακτινοβολία που δέχονται τα άτομα προέρχεται από την πηγή της φωτιάς και από τον θερμό στρώμα του καπνού.

Μία πρώτη αρχική οριακή τιμή για την θερμότητα από ακτινοβολία είναι το κατώφλι πόνου. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε έκθεση 2,5 kW/m² για διάστημα 24 δευτερολέπτων. Αυτή η σωρευτική δόση ακτινοβολίας προκαλεί πόνο στο άτομο, χωρίς όμως να καίγεται, αλλά δυσχεραίνει την προσπάθεια του για εκκένωση.

Η δεύτερη και ουσιαστική οριακή τιμή ονομάζεται κατώφλι εξουδετέρωσης και αντιστοιχεί σε έκθεση 8,25 kW/m² για διάστημα 60 δευτερολέπτων. Σε αυτές τις συνθήκες το άτομο καθίσταται αδύναμο να ολοκληρώσει την εκκένωση που επιχειρεί, αφού είναι πιθανό να υποφέρει από σοβαρά εγκαύματα δευτέρου βαθμού. Σε αντίθεση με το κατώφλι πόνου, το οποίο μπορεί να αντέξει ένα άτομο, όταν σε ακραίες συνθήκες μάχεται για την επιβίωσή του.

Σύμφωνα με τη σχετική οδηγία της Δ.Α.Σ, η μέγιστη ποσότητα θερμότητας από ακτινοβολία που μπορεί να αντέξει ένα μέσο άτομο, ορίζεται σε 2,5 kW/m². Κάτω από αυτό το όριο, ένας άνθρωπος μπορεί να συνεχίσει την διαδικασία εκκένωσης, χωρίς να αντιμετωπίσει κάποιο σημαντικό πρόβλημα, για 30 λεπτά. Υπενθυμίζεται εδώ ότι ο μέσος χρόνος εκκένωσης μίας οδικής σήραγγας ορίζεται στα 30 λεπτά. Για τιμές πάνω από τα 2,5 kW/m², ο χρόνος δημιουργίας εγκαύματος δευτέρου βαθμού και κατά συνέπεια η αδυναμία συνέχισης της προσπάθειας εκκένωσης, δίνεται από τον τύπο:

$$t_{Irad}=4*q^{-1.36} \text{ [min]}$$

t_{Irad}: χρόνος δημιουργίας εγκαύματος στο δέρμα

$q=5,67*10^{-8}*\varepsilon*T^4$ ροή ακτινοβολίας θερμότητας

T: η θερμοκρασία σε ºC

ε: συντελεστής μέλανος σώματος, εδώ έχει τεθεί ίσος με ένα (1)

Ακρίβεια εξίσωσης: ±25%

Ο χρόνος που μεσολαβεί μέχρι να εξουδετερωθεί ένα άτομο που δέχεται θερμότητα μεταγωγής από αέρα με υγρασία μικρότερη από 10%, δίνεται από τους τύπους:

- $t_{Icovn}=(4.1*10^8)T^{-3,61}$ για άτομα με πλήρη ή βαρύ ρουχισμό
- $t_{Iconv}=(5*10^7)T^{-3,4}$ για άτομα με ελαφρύ ρουχισμό, στην ανάλυση που ακολουθεί έχει θεωρηθεί αυτή την επιλογή

t_{Iconv}: ο χρόνος εξουδετέρωσης σε λεπτά

T: η θερμοκρασία σε ºC

Ακρίβεια εξίσωσης ±25%

Η συνολική κλασματική δραστική δόση θερμότητας από την έκθεση του ατόμου σε αυτή, μπορεί να δοθεί από ένα τύπο που συνδυάζει τις ανωτέρω εξισώσεις. Ο τύπος αυτός είναι:

$$FED = \Sigma(\frac{1}{t_{Irad}} + \frac{1}{t_{Icon}})\Delta t_{t_1}^{t_2}$$

Το σφάλμα του αποτελέσματος της σχέσης αυτής, προέρχεται από την αβεβαιότητα των προηγούμενων δύο εξισώσεων.

Αν η ροή θερμότητας από ακτινοβολία είναι μικρότερη των 2,5 kW/m² ο πρώτος όρος τίθεται ίσος με μηδέν.

Για FED=0,30 (ή μεγαλύτερη), έχουμε θεωρείται ότι το άτομο εξουδετερώνεται.

<u>Τοξικότητα</u>

Κύρια απειλή για την εξουδετέρωση του ατόμου θεωρείται η συγκέντρωση του αέρα σε μονοξείδιο του άνθρακα. Οι μέγιστες μέσες ανεκτές συγκεντρώσεις είναι:

- 2000 ppm για λίγα δευτερόλεπτα
- 1150 ppm για τα πρώτα έξι λεπτά της έκθεσης
- 450 ppm για τα πρώτα δεκαπέντε λεπτά της έκθεσης
- 225 ppm για τα πρώτα τριάντα λεπτά της έκθεσης

Θόρυβος

Τα μέγιστα επιτρεπτά επίπεδα θορύβου είναι 115 dbA για λίγα δευτερόλεπτα και 92 dbA για τον υπόλοιπο χρόνο έκθεσης.

3.1.2 Τεχνική διάρκεια ζωής της σήραγγας

Η τεχνική διάρκεια ζωής της σήραγγας έχει θεωρηθεί από τη μελέτη στα 40 χρόνια. Η τεχνική διάρκεια ζωής των επιμέρους στοιχείων και υποσυστημάτων της σήραγγας μπορεί να εντοπιστεί στα φύλλα οδηγιών των κατασκευαστών.

3.1.3 Θέση κέντρου ελέγχου

Το κέντρο ελέγχου της σήραγγας, το οποίο έχει υπό την επίβλεψή του τέσσερα ζευγάρια δίδυμων σηράγγων του οδικού δικτύου, βρίσκεται δεκαπέντε χιλιόμετρα από το στόμιο εξόδου της.

Το πλησιέστερο κέντρο υγείας με μονάδα ΕΚΑΒ βρίσκεται οχτώ χιλιόμετρα από το στόμιο εξόδου της σήραγγας και η πυροσβεστική υπηρεσία απέχει από το στόμιο εισόδου 10 χιλιόμετρα με χρόνους άφιξης δώδεκα και δεκατέσσερα λεπτά αντίστοιχα.

3.1.4 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά

Βασικά στοιχεία:

- Η ταχύτητα σχεδιασμού (V_e) είναι 100 km/h και εξισώνεται με το νόμιμο όριο ταχύτητας ($V_{επιτρ}$) και την λειτουργική ταχύτητα (V_{85}) που αντιπροσωπεύει το 80% των οχημάτων
- Η διαφορά ταχυτήτων των βαρέων οχημάτων με τα επιβατηγά κυμαίνεται στα 20 km/h
- Η οριζόντια και η κατακόρυφη χάραξη της σήραγγας φαίνονται στον **Πίνακα 1** που ακολουθεί:

Πίνακας 1: Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της σήραγγας

Γεωμετρικά Στοιχεία Σήραγγας	
Υψόμετρο στομίου εισόδου [m]	900
Υψόμετρο στομίου εξόδου[m]	860
Μήκος σήραγγας [m]	2500
κλίση (- για κατηφορική)	-3%

Διάταξη περιοχής στομίων εισόδου-εξόδου:

- Τα στόμια εισόδου και εξόδου βρίσκονται σε υψόμετρο 900 και 860 αντίστοιχα και είναι όμοια μεταξύ τους. Το εμβαδό της διατομής τους είναι 60m² και η υδραυλική διάμετρος 7,5 m.
- Πλάτυσμα στάθμευσης. Δεν υπάρχει πλάτυσμα στάθμευσης στην είσοδο ή την έξοδο της σήραγγας
- Πλάτυσμα αναστροφής. Υπάρχει πλάτυσμα αναστροφής στην είσοδο, αλλά όχι στην έξοδο της σήραγγας
- Δεν υπάρχει σύστημα προσαρμογής των ταχυτήτων των οχημάτων για τα οδικά τμήματα που προηγούνται ή έπονται της οδικής σήραγγας
- Δεν υπάρχει σε κανένα στόμιο μεταβολή του αριθμού λωρίδων κυκλοφορίας. Οι λωρίδες παραμένουν δύο καθ' όλο το μήκος της σήραγγας.

Διατομή χρήσης

- Το εμβαδό της διατομής χρήσης είναι 60 m² με διάμετρο 7,5 m.
- Το πλάτος των λωρίδων κυκλοφορίας είναι 3,5 m, ενώ δεν υπάρχουν λωρίδες καθοδήγησης και λωρίδες πολλαπλών χρήσεων
- Το πλάτος των πεζοδρομίων είναι 0,65 m

Βοηθητικές εγκαταστάσεις εντός σήραγγας

- Έξοδοι διαφυγής οχημάτων είναι μόνο τα δύο στόμια, καθώς δεν υπάρχουν άλλοι κατασκευασμένοι τρόποι εκκένωσης της σήραγγας. Τα οχήματα εκτάκτων καταστάσεων μπορούν να προσεγγίσουν την σήραγγα από το στόμιο εισόδου, αφού τα οχήματα που θα έχουν ακινητοποιηθεί στην είσοδο θα έχουν εκτελέσει αναστροφή μέσω του σχετικού πλατύσματος, αλλά και από το στόμιο εξόδου, κινούμενα αντίθετα στη κανονική ροή κυκλοφορίας. Αυτό δεν θα είναι επικίνδυνο για τα σωστικά συνεργία καθώς, μετά τη διακοπή της κυκλοφορίας λόγο του ατυχήματος, θα σταματήσει μετά από λίγα λεπτά η ροή των οχημάτων που εξέρχονται από τη σήραγγα.
- Οι πεζοί έχουν τη δυνατότητα να διαφύγουν από κάποια από τις έξι (6) συνολικά εξόδους κινδύνου που είναι διαμοιρασμένες κατά μήκος της σήραγγας, ανά περίπου 375 m, με την πρώτη να ξεκινά στα 375 m από την αρχή της σήραγγας και την τελευταία να απέχει 372 m από το τέλος

- Η κατασκευή της σήραγγας δεν περιλαμβάνει εσοχές έκτακτης στάθμευσης
- Οι Η/Μ εγκαταστάσεις της σήραγγας βρίσκονται στο στόμιο εξόδου
- Υπάρχουν κατάλληλα διαμορφωμένες διατάξεις αποστράγγισης-αποχέτευσης των νερών του οδοστρώματος και των νερών της περιβάλλουσας βραχομάζας

3.1.5 Κυκλοφοριακός φόρτος

Ο κυκλοφοριακός φόρτος ADDT για τη συγκεκριμένη σήραγγα, κατά τον χρόνο αυτής της εκπονούμενης ανάλυσης επικινδυνότητας, είναι 400 οχήματα ανά ώρα. Αυτό σημαίνει ότι βρίσκεται εντός του ορίου της ονομαστικής κυκλοφοριακής ροής, που είναι ορισμένη στα 400 οχήματα ανά ώρα.

Ακόμα το ποσοστό των βαρέων οχημάτων εντός της σήραγγας είναι 15%.

Οι προβλέψεις αυτές προέρχονται από στατιστικά στοιχεία και καταγραφές του οδικού άξονα και της εξεταζόμενης σήραγγας.

Συνοπτικά το πεδίο ορισμού της σήραγγας, δηλαδή τα πιο βασικά χαρακτηριστικά του, φαίνονται στον **πίνακα 2** που ακολουθεί.

Πίνακας 2: Συνοπτική παρουσίαση πεδίου ορισμού της σήραγγας

Σήραγγα	
Μήκος σήραγγας [m]	2500
Διατομή σήραγγας [m²]	60
Περίμετρος διατομής [m]	30
Υδραυλική διάμετρος [m]	7,5
Κλίση (- για κατηφορική) [%]	-3
Έξοδοι κινδύνου	6
# εξόδου κινδύνου	Απόσταση [m]
1	375
2	700
3	1125
4	1500
5	1900
6	2200
Περιβάλλον	
Υψόμετρο [m]	880
Υψόμετρο στομίου εισ. [m]	900
Υψόμετρο στομίου εξ. [m]	860
Θερμοκρασία αέρα [^{o}C]	10
Κυκλοφοριακά δεδομένα	
Ποσοστό βαρέων οχημάτων	15%
Νόμιμη ταχύτητα [km/h]	100
Ονομαστική ροή κυκλοφορίας [V/h]	400
Λωρίδες κυκλοφορίας	2
Μονής ή διπλής κατεύθυνσης	Μονής
AADT (κυκλοφοριακός φόρτος) [v/h]	400
Μέσος αριθμός ατόμων ανά όχημα	2
Μέσος αριθμός ατόμων ανά βαρέο όχημα	1

Κάθε ένα από τα στοιχεία του **Πίνακα 2** έχει τοποθετηθεί στο κατάλληλο κελί εισαγωγής δεδομένων του προγράμματος CAMATT.

3.2 Εξέταση σεναρίων

Στη συγκεκριμένη ανάλυση μελετάται πυρκαγιά που ξεσπά μέσα σε σήραγγα. Η φωτιά έχει προκληθεί από φορτηγό που δεν μεταφέρει επικίνδυνα εμπορεύματα, μετά από απότομο φρενάρισμά του. Ο οδηγός κινούταν στη δεξιά λωρίδα κυκλοφορίας αλλά δεν τηρούσε το όριο ταχύτητας. Όταν το προπορευόμενο όχημα φρέναρε, ο οδηγός του φορτηγού δεν προλάβαινε να σταματήσει ομαλά και η μεγάλη τριβή που προκλήθηκε στα φρένα, προκάλεσε την υπερθέρμανση τους και την

ανάφλεξη του οχήματός του. Τα οχήματα που βρίσκονταν πίσω του και στην αριστερή λωρίδα, πρόλαβαν και προσπέρασαν το φορτηγό, προτού ξεσπάσει η πυρκαγιά, κατευθυνόμενα προς την έξοδο κινδύνου. Τα υπόλοιπα οχήματα που ακολουθούσαν πίσω από το φορτηγό, είτε βρίσκονταν στην αριστερή είτε στην δεξιά λωρίδα, συνωστίστηκαν για αρκετά μέτρα.

Στη διενεργηθείσα ανάλυση μελετώνται τα εξής βασικά σενάρια:

1. Πυρκαγιά εντάσεως 100 MW, ξεσπά στα 500 μέτρα από το στόμιο εισόδου
2. Πυρκαγιά εντάσεως 100 MW, ξεσπά στα 1300 μέτρα από το στόμιο εισόδου
3. Πυρκαγιά εντάσεως 150 MW, ξεσπά στα 500 μέτρα από το στόμιο εισόδου
4. Πυρκαγιά εντάσεως 150 MW, ξεσπά στα 1300 μέτρα από το στόμιο εισόδου

Άρα λοιπόν η ανάλυση αφορά 4 βασικά σενάρια. Για το κάθε βασικό σενάριο έχει γίνει κοινή υπόθεση για τον χρόνο που απαιτείται από την χρήστες της σήραγγας να ξεκινήσουν την εκκένωσή της. Εδώ έχει οριστεί ο χρόνος για να εκκενωθεί το όχημα από τον όλους τους χρήστες του 60 δευτερόλεπτα και για να ξεκινήσουν την εκκένωση, άλλα 60 δευτερόλεπτα. Άρα λοιπόν περνούν 2 λεπτά μέχρι οι χρήστες των οχημάτων να ξεκινήσουν να κινούνται προς την πλησιέστερη έξοδο κινδύνου.

Η ταχύτητα βαδίσματος των ανθρώπων είναι:

- Με καλή ορατότητα: 1 m/s
- Με μειωμένη ορατότητα 0,5 m/s
- Χωρίς ορατότητα 0,3 m/s

Η ταχύτητα αυτή μπορεί να φτάσει και το 1,5 m/s εφόσον είναι επαρκείς ο φωτισμός των οδών διαφυγής.

Θεωρούμε ότι σε όλα τα οχήματα, εκτός των λεωφορείων, ο μέσος αριθμός ατόμων είναι 2 άτομα/όχημα και στα φορτηγά 1.

Ακόμα θεωρώ ότι το κέντρου ελέγχου αντιλαμβάνεται την πυρκαγιά 155 δευτερόλεπτα μετά την έναρξή της και ενεργοποιεί αυτόματα το σύστημα διακοπής της κυκλοφορίας και τον έκτακτο αερισμό (emergency ventilation). Το σύστημα διακοπής κυκλοφορίας αποτελείται από φωτεινούς σηματοδότες και πινακίδες, που θεωρούνται απόλυτα αποτελεσματικά στον σκοπό που θέλουν να επιτύχουν. Ο έκτακτος αερισμός θα είναι σε λειτουργία 240 δευτερόλεπτα μετά την εκδήλωση του

ατυχήματος. Αυτό οφείλεται στο ότι οι ανεμιστήρες απαιτούν κάποιο χρονικό διάστημα μέχρι να φτάσουν την επιθυμητή ισχύ.

3.2.1 Εξέταση σεναρίου φωτιάς 100 MW

3.2.1.1 Στα 500m

Τη χρονική στιγμή 0 sec ξεσπά η φωτιά στα 500 μέτρα από το στόμιο εισόδου. Οι παράγοντες που ωθούν τον καπνό προς το στόμιο εξόδου είναι:

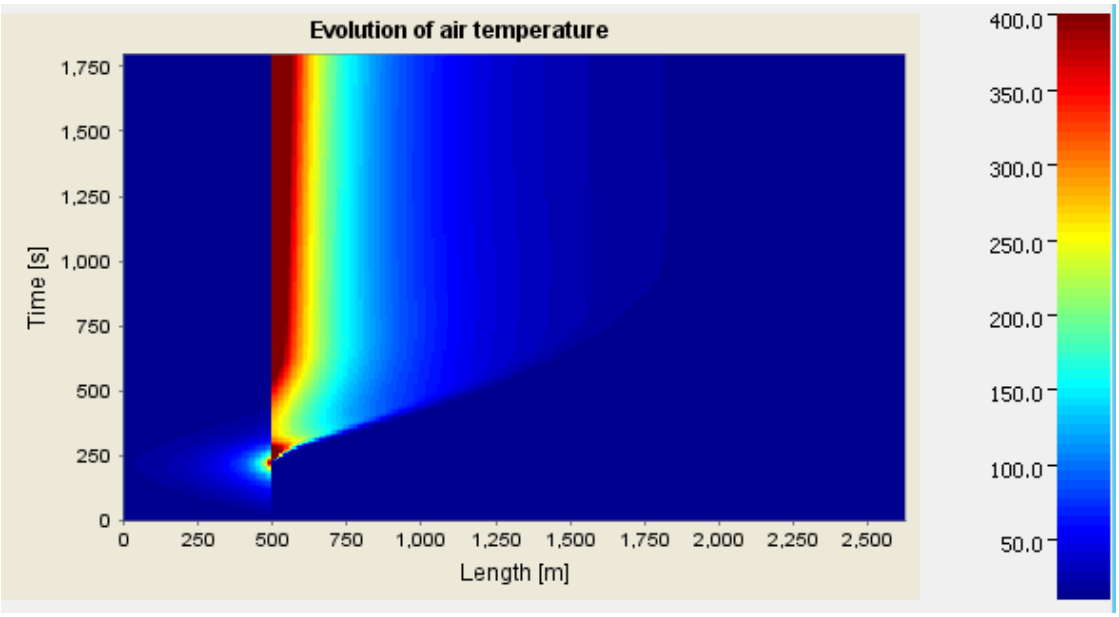
- Η κίνηση των οχημάτων (piston effect)
- Ο υφιστάμενος αερισμός της σήραγγας που δουλεύει σε κανονική λειτουργία

Όπως φαίνεται στα διαγράμματα που ακολουθούν όμως, ο καπνός αρχικά γυρνά προς το στόμιο εισόδου. Αυτό συμβαίνει για δύο κυρίως λόγους:

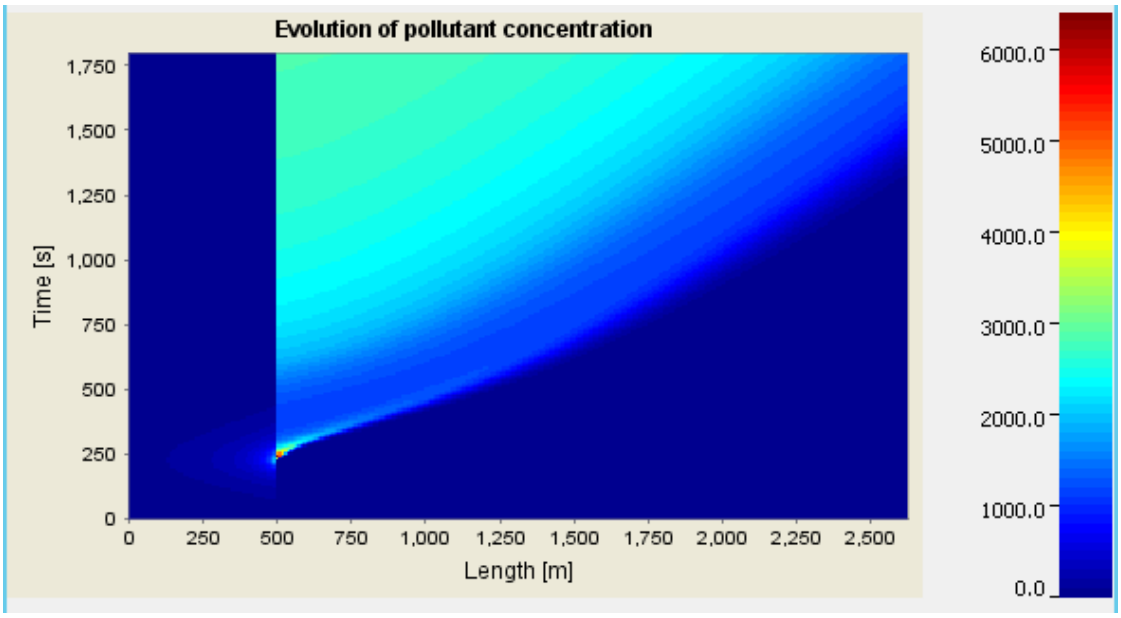
- Η κλίση της σήραγγας είναι κατηφορική από την είσοδο προς την έξοδο (3%)
- Η πίεση στο στόμιο εισόδου είναι 0,854585 atm = 86590 Pa, ενώ στο στόμιο εξόδου είναι 0,859479 atm = 87086 Pa

Έτσι λοιπόν συντελείται η οπισθοδρόμηση του καπνού (back layering) (**Σχήμα 28**), η οποία και διαρκεί μέχρις ότου τεθεί ο αερισμός της σήραγγας στην έκτακτη κατάσταση, δηλαδή τη χρονική στιγμή 240 sec. Μετά τη χρονική στιγμή αυτή, αρχίζει η σταδιακή εξισορρόπηση της διανυσματικά αρνητικής έως τότε ταχύτητας του καπνού, με αποτέλεσμα μετά από περίπου τρία λεπτά (420 sec) να κατευθύνεται ο καπνός προς το στόμιο εξόδου.

Οι ρύποι έχουν ανάλογη πορεία με αυτή του καπνού και της θερμοκρασίας όπως μπορεί να φανεί στο **Σχήμα 29**.



Σχήμα 28: Η θερμοκρασία μέσα στη σήραγγα



Σχήμα 29: Η συγκέντρωση ρύπων μέσα στη σήραγγα

Για τον υπολογισμό των θυμάτων ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία

Εξετάζεται το όχημα σε κάποια θέση της σήραγγας. Πρώτος που εξετάζεται είναι ο οδηγός του φορτηγού. Θεωρείται η χρονική στιγμή 0 sec η στιγμή που ξεκινάει η φωτιά, άρα και η ανάλυση. Την χρονική στιγμή 0 sec ο οδηγός βρίσκεται στη θέση x=500 m. Ο οδηγός θα μείνει στο όχημά του 2 λεπτά, άρα για τα επόμενα 120 δευτερόλεπτα ο οδηγός θα βρίσκεται στη θέση x=500 m. Άρα λοιπόν μέχρι τη χρονική στιγμή t=120 sec δεν ενδιαφέρει την ανάλυση η ορατότητα των επιβατών του

οχήματος, καθώς δεν κινούνται προς κάποια έξοδο κινδύνου. Στο 120° δευτερόλεπτο όμως που ξεκινά η προσπάθεια αυτό-διάσωσης, λαμβάνεται ανά δέκα δευτερόλεπτα ως εξαγόμενο από το πρόγραμμα CAMATT, η ορατότητα των ατόμων. Από την ορατότητα υπολογίζεται η ταχύτητα των ατόμων με τον εξής τρόπο:

- Αν η ορατότητα είναι μεγαλύτερη από 5 μέτρα, η ταχύτητα είναι 1m/s
- Αν η ορατότητα είναι μικρότερη από 1,5 μέτρο, η ταχύτητα είναι 0,3m/s
- Διαφορετικά η ταχύτητα είναι 0,5 m/s

Τη χρονική στιγμή t=120 sec και x=500 m η ορατότητα βρίσκεται να είναι 3,5 μέτρα, άρα η ταχύτητα είναι ίση με 0,5 m/s. Αυτό σημαίνει ότι μετά από δέκα δευτερόλεπτα (t=130 sec), οι επιβάτες του φορτηγού θα βρίσκονται 5 μέτρα πιο κοντά την έξοδο κινδύνου, στη θέση x=495 m. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι να φτάσουν οι επιβάτες του φορτηγού στην πλησιέστερη έξοδο κινδύνου, δηλαδή στη θέση x=375 m. Με τον τρόπο αυτό γίνεται γνωστό, με βήμα δέκα δευτερολέπτων, που θα βρίσκονταν οι επιβάτες του οχήματος, αν κατάφερναν να ολοκληρώσουν την προσπάθεια εκκένωσης της σήραγγας. Αναλυτικά η πορεία του κάθε εξεταζόμενου οχήματος/επιβάτη φαίνεται στο **Παράστημα Α**.

Για το κάθε ζεύγος σημείων χρονικής στιγμής και θέσης, χρησιμοποιώντας μέσω του προγράμματος CAMATT τα διαγράμματα του **Σχήματος 24$^{\gamma}$** (Plot results), πραγματοποιείται ο εντοπισμός της θερμοκρασία. Έτσι υπολογίζονται οι χρόνοι που μεσολαβούν για την εξουδετέρωση ενός ατόμου λόγο θερμότητας από ακτινοβολία και από μεταγωγή, όπως αυτό ορίστηκε από τη ΔΑΣ και περιγράφεται στις απαιτήσεις επιτελεστικότητας (κριτήρια ικανότητας διαφυγής). Οι χρόνοι εξουδετέρωσης από ακτινοβολία (t_{Irad}) και μεταγωγή (t_{Iconv}) εμπεριέχουν σφάλμα της τάξεως του ±25%. Το σφάλμα αυτό μεταδίδεται στον τύπο υπολογισμού της FED και γι αυτό υπολόγιστηκε το διαδοχικό σφάλμα σ_{FED} ως εξής:

$$FED = \Sigma\left(\frac{1}{t_{Irad}} + \frac{1}{t_{Icon}}\right)\Delta t_{t_1}^{t_2}$$

Το σφάλμα της συνολικής κλασματικής δράσης δίνεται από τον τύπο:

$$\sigma_{FED} = \sqrt{\left(\frac{\vartheta FED}{\vartheta t_{Iconv}}\sigma_{t_{Iconv}}\right)^2 + \left(\frac{\vartheta FED}{\vartheta t_{Irad}}\sigma_{t_{Irad}}\right)^2}$$

Όπου:

$$\frac{\vartheta FED}{\vartheta t_{Iconv}} = -\frac{\Delta t}{t_{Iconv}^2}$$

και

$$\frac{\vartheta FED}{\vartheta t_{Irad}} = -\frac{\Delta t}{t_{Irad}^2}$$

Άρα λοιπόν το σφάλμα της συνολικής κλασματικής δράσης υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\sigma_{FED} = \sqrt{\left(-\frac{\Delta t}{t_{Iconv}^2}\sigma_{t_{Iconv}}\right)^2 + \left(-\frac{\Delta t}{t_{Irad}^2}\sigma_{t_{Irad}}\right)^2}$$

Δηλαδή από τον τύπο:

$$\sigma_{FED} = \sqrt{\left(\frac{\Delta t^2}{t_{Iconv}^4}\sigma_{t_{Iconv}}^2\right) + \left(\frac{\Delta t^2}{t_{Irad}^4}\sigma_{t_{Irad}}^2\right)}$$

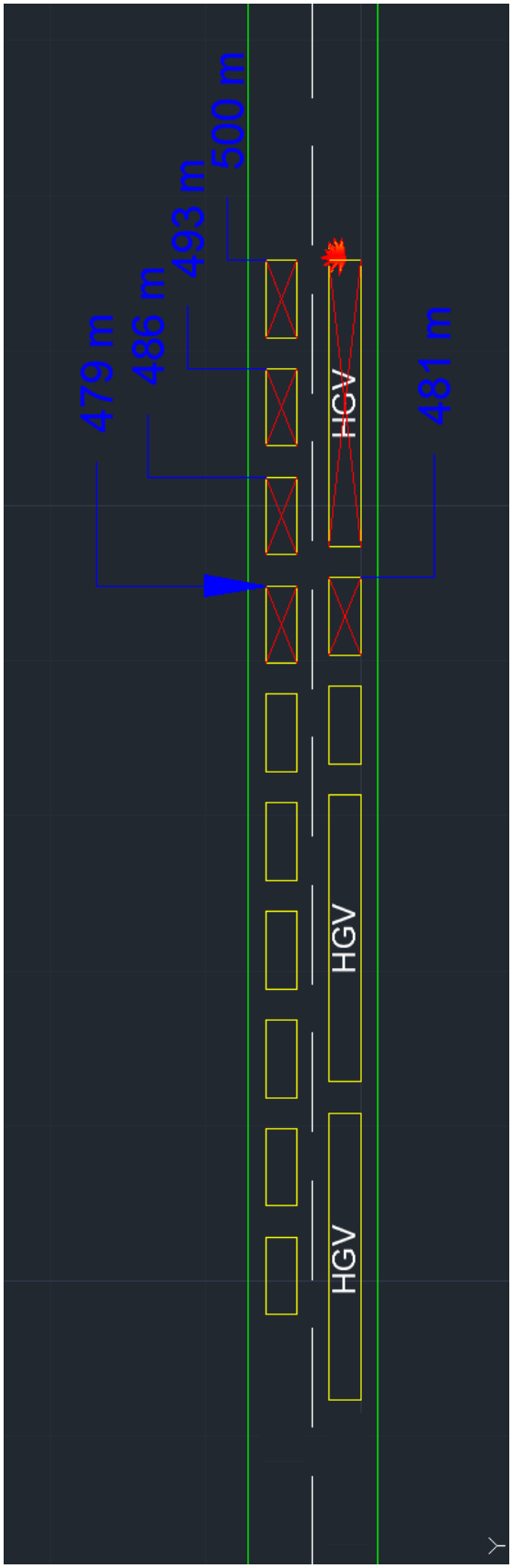
Η FED είναι αθροιστικό μέγεθος και γι αυτό υπολογίζεται το άθροισμα της FED σε κάθε θέση μέχρι να φτάσει το άτομο σε κάποια έξοδο κινδύνου. Αν η FED ξεπεράσει την οριακή τιμή 0.3, τότε θεωρείται ότι το άτομο δεν κατάφερε να ολοκληρώσει την προσπάθεια εκκένωσης της σήραγγας.

Ταυτόχρονα με την θερμοκρασία. Για κάθε ζεύγος σημείων χρονικής στιγμής και θέσης, χρησιμοποιείται το πρόγραμμα CAMATT για να βρεθεί η συγκέντρωση των ρύπων. Αν το όριο της συγκέντρωσης σε μονοξείδιο του άνθρακα ξεπεράσει τα όρια που έχουν οριστεί στα κριτήρια ικανότητας διαφυγής, όπως έχουν αυτά οριστεί από τη ΔΑΣ, τότε πάλι θεωρείται ότι οι επιβάτες εξουδετερώθηκαν.

Οι αναλυτικές τιμές των χρονικών στιγμών, των θέσεων, της θερμοκρασίας, της FED και των συγκεντρώσεων των ρυπογόνων ουσιών, φαίνονται στο **Παράρτημα Β**, στο αρχείο excel.

Στο **Σχήμα 30** που ακολουθεί, έγινε η σχεδίαση μίας κάτοψης της σήραγγας για να αποτυπωθεί ο τρόπος που έχουν συνωστιστεί τα οχήματα. Ακόμα φαίνεται πόσοι και ποίοι επιβάτες εξουδετερώθηκαν κατά την προσπάθεια εκκένωσης της σήραγγας.

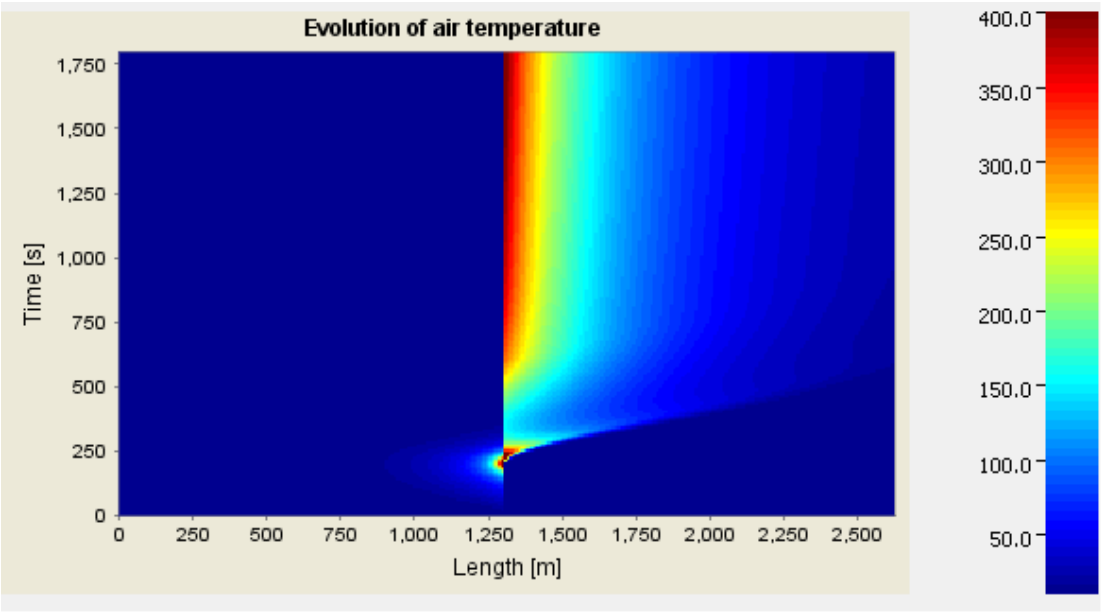
Ο αριθμός των οχημάτων που έχουν ακινητοποιηθεί πίσω από την πυρκαγιά και το μήκος της ουράς αυτής, δίδεται από το πρόγραμμα CAMATT, όπως περιγράφηκε στο αντίστοιχο κεφάλαιο της διπλωματικής αυτής (Show traffic). Στην προκειμένη περίπτωση υπάρχουν συνολικά δεκαπέντε (15) ακινητοποιημένα οχήματα πίσω από τη φωτιά με την ουρά να εκτείνεται μέχρι και 427 μέτρα από το στόμιο εισόδου. Υπολογίζοντας ότι σε κάθε μικρό όχημα ο μέσος όρος των επιβατών είναι 2 και σε κάθε βαρύ φορτηγό είναι 1, μπορεί να γίνει η εκτίμηση ότι το σύνολο των υπολογιζόμενων απωλειών, σε αυτή την περίπτωση, είναι 10.



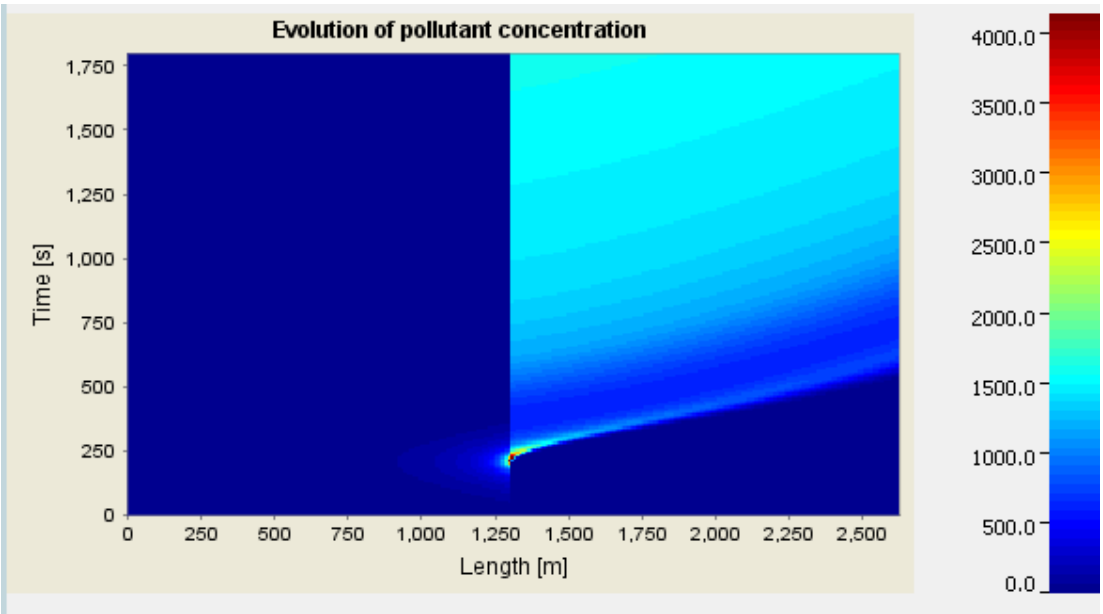
Σχήμα 30: Με το κόκκινο x φαίνονται τα οχήματα, των οποίων οι επιβάτες δεν επιβίωσαν

3.2.1.2 Στα 1300m

Για τα διαγράμματα που περιγράφουν τη φωτιά που ξεσπά στα 1300 ισχύουν ακριβώς τα ίδια με όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο που αφορούσε τη φωτιά των 100 MW που ξεσπά στα 500 μέτρα. Στο **Σχήμα 31** που αφορά την θερμοκρασία εντός της σήραγγας και στο **Σχήμα 32** που περιγράφει τις συγκεντρώσεις ρυπογόνων ουσιών, φαίνεται και πάλι η ύπαρξη οπισθοδρόμησης του καπνού (back layering).



Σχήμα 31: Η θερμοκρασία μέσα στη σήραγγα

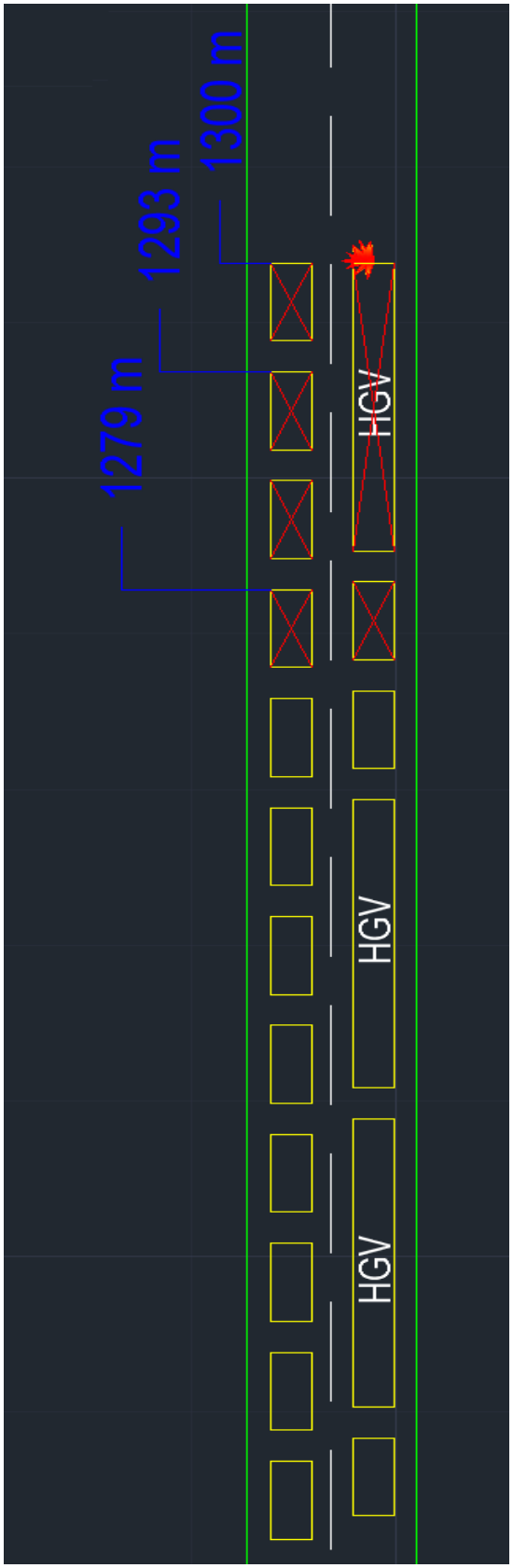


Σχήμα 32: Η συγκέντρωση ρύπων μέσα στη σήραγγα

Για τον υπολογισμό των θυμάτων ακολουθείται την ίδια διαδικασία με αυτήν που αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.2.1.1 με τη διαφορά ότι το πρώτο υπό εξέταση όχημα είναι το φορτηγό που προκάλεσε τη φωτιά στη θέση x=1300 μέτρα. Ακολουθώντας όλη τη διαδικασία, βρίσκεται η πορεία και η θέση που θα έχουν όλοι οι εξεταζόμενοι επιβάτες (**Παράρτημα Α**), με το βήμα της ανάλυσης να είναι πάλι δέκα δευτερόλεπτα, βρίσκεται η θερμοκρασία/θερμότητα που δέχονται στην κάθε θέση, υπολογίζεται τη συνολική κλασματική δόση και εξάγεται το συμπέρασμα για το αν επιβιώνουν από την θερμότητα που δέχονται ή όχι. Παράλληλα εξετάζεται αν οι επιβάτες είναι σε θέση να ανταπεξέλθουν τους ρύπους που αναπνέουν καθ' όλη την προσπάθεια εκκένωσης της σήραγγας. Στα αρχεία excel του **Παραρτήματος Β,** υπάρχουν αναλυτικά όλες οι τιμές των μεγεθών που περιγράφονται και ο τρόπος που αυτά υπολογίστηκαν.

Στο **Σχήμα 33** που ακολουθεί, έχει σχεδιαστεί μία κάτοψη της σήραγγας για να αποτυπωθεί ο τρόπος που έχουν συνωστιστεί τα οχήματα. Ακόμα φαίνεται πόσοι και ποίοι επιβάτες εξουδετερώθηκαν κατά την προσπάθεια εκκένωσης της σήραγγας.

Ο αριθμός των οχημάτων που έχουν ακινητοποιηθεί πίσω από την πυρκαγιά και το μήκος της ουράς αυτής, δίδεται από το πρόγραμμα CAMATT, όπως περιγράφηκε στο αντίστοιχο κεφάλαιο της διπλωματικής αυτής (Show traffic).). Στην προκειμένη περίπτωση έχουμε συνολικά δεκαοχτώ (18) ακινητοποιημένα οχήματα πίσω από τη φωτιά με την ουρά να εκτείνεται μέχρι και 1215 μέτρα από το στόμιο εισόδου. Υπολογίζοντας ότι σε κάθε μικρό όχημα ο μέσος όρος των επιβατών είναι 2 και σε κάθε βαρύ φορτηγό είναι 1, είναι δυνατό να εκτιμηθεί ότι το σύνολο των υπολογιζόμενων απωλειών και σε αυτή την περίπτωση είναι 10.



Σχήμα 33: Με το κόκκινο x φαίνονται τα οχήματα, των οποίων οι επιβάτες δεν επιβίωσαν

3.2.2 Εξέταση σεναρίου φωτιάς 150 MW

Για τις συνθήκες που επικρατούν κατά την εξέλιξη του σεναρίου με φωτιά ισχύος 150 MW, ισχύει ότι ίσχυε και στις παραπάνω παραγράφους για την αντίστοιχη φωτιά των 100 MW. Η ειδοποιός διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι στην προκειμένη περίπτωση η πυρκαγιά είναι κατά 50 MW ισχυρότερη.

3.2.2.1 Στα 500m

Τη χρονική στιγμή 0 sec ξεσπά η φωτιά στα 500 μέτρα από το στόμιο εισόδου. Οι παράγοντες που ωθούν τον καπνό προς το στόμιο εξόδου είναι:

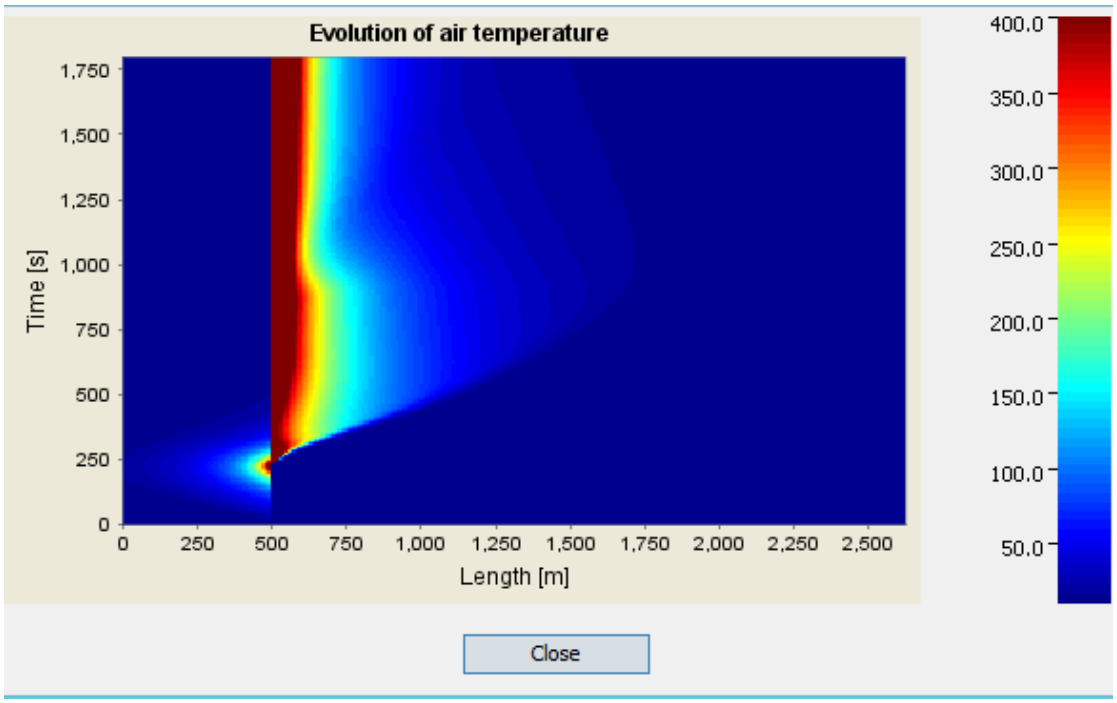
- Η κίνηση των οχημάτων (piston effect)
- Ο υφιστάμενος αερισμός της σήραγγας που δουλεύει σε κανονική λειτουργίας

Όπως είναι ορατό από τα διαγράμματα όμως, ο καπνός αρχικά γυρνά προς το στόμιο εισόδου. Αυτό συμβαίνει για δύο κυρίως λόγους:

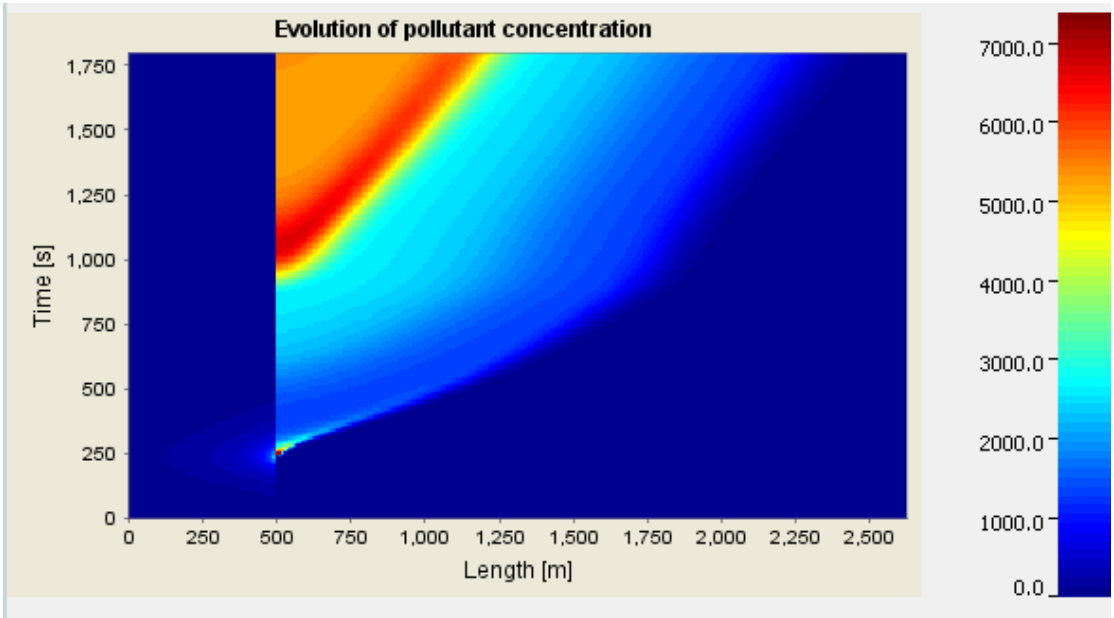
- Η κλίση της σήραγγας είναι κατηφορική από την είσοδο προς την έξοδο (1,5%)
- Η πίεση στο στόμιο εισόδου είναι 0,854585 atm = 86590 Pa, ενώ στο στόμιο εξόδου είναι 0,859479 atm = 87086 Pa

Έτσι λοιπόν εμφανίζεται η οπισθοδρόμηση του καπνού (back layering) (**Σχήμα 34**), η οποία και διαρκεί μέχρις ότου τεθεί ο αερισμός της σήραγγας στην έκτακτη κατάσταση, δηλαδή τη χρονική στιγμή 240 sec. Μετά τη χρονική στιγμή αυτή, αρχίζει η σταδιακή εξισορρόπηση της διανυσματικά αρνητικής έως τότε ταχύτητας του καπνού, με αποτέλεσμα μετά από περίπου τρία λεπτά (420 sec) να κατευθύνεται ο καπνός προς το στόμιο εξόδου.

Οι ρύποι έχουν ανάλογη πορεία με αυτή του καπνού και της θερμοκρασίας όπως μπορεί να φανεί στην **Σχήμα 35**.



Σχήμα 34: Η θερμοκρασία μέσα στη σήραγγα



Σχήμα 35: Η συγκέντρωση ρύπων μέσα στη σήραγγα

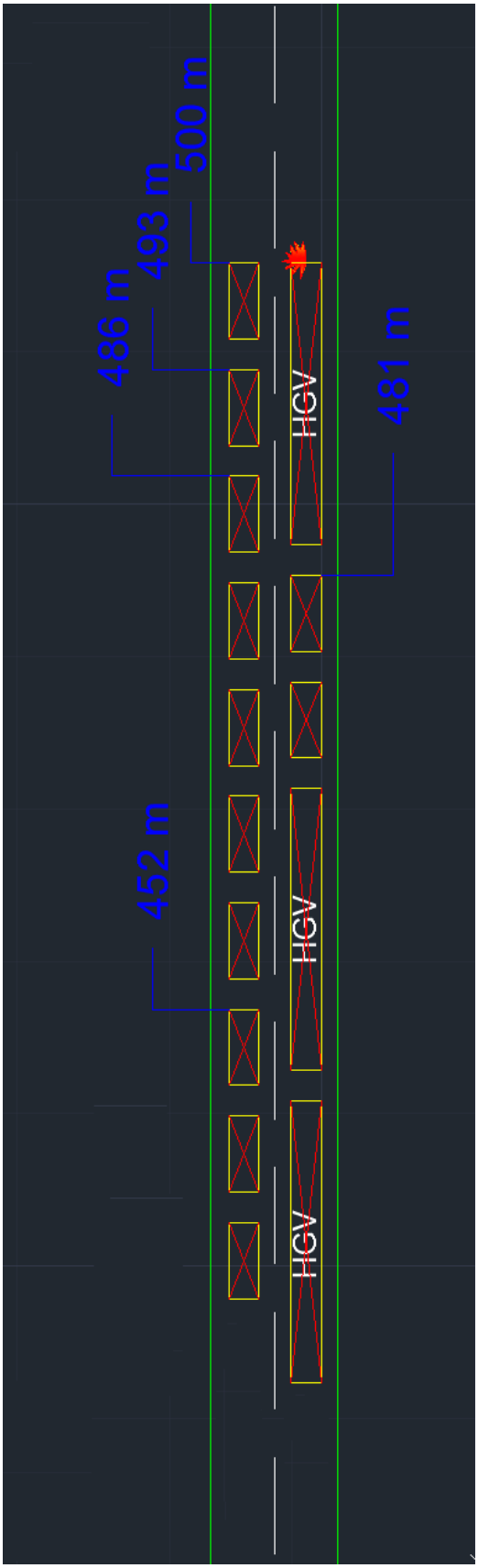
Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι σε απόσταση δέκα μέτρων από το σημείο που ξεσπά η φωτιά στη σήραγγα (θέση x=510 m), υπάρχει μονάδα αερισμού που αποτελείται από 2 ανεμιστήρες. Αυτοί τίθενται εκτός λειτουργίας λόγο της υψηλής θερμοκρασίας που αναπτύσσεται κοντά τους. Αυτό συμβαίνει στο διακοσιοστό τεσσαρακοστό δευτερόλεπτο (240 sec). Η συνέπειες που μπορεί να έχει η

καταστροφή των ανεμιστήρων, φαίνεται αν τεθούν σε σύγκριση τα διαγράμματα για τη φωτιά ισχύος 150 MW για τα 500 και τα 1300 μέτρα.

Για τον υπολογισμό των θυμάτων ακολουθείται η ίδια διαδικασία με αυτήν που αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.2.1.1. Ακολουθώντας όλη τη διαδικασία, εντοπίζεται η πορεία και η θέση που θα έχουν όλοι οι εξεταζόμενοι επιβάτες (**Παράρτημα Α**), με το βήμα της ανάλυσης να είναι πάλι δέκα δευτερόλεπτα, εξάγεται από τα διαγράμματα του λογισμικού CAMATT η θερμοκρασία/θερμότητα που δέχονται στην κάθε θέση, υπολογίζεται η συνολική κλασματική δόση και προκύπτει το συμπέρασμα για το αν επιβιώνουν από την θερμότητα που δέχονται ή όχι. Παράλληλα εξετάζεται αν οι επιβάτες είναι σε θέση να ανταπεξέλθουν τους ρύπους που αναπνέουν καθ' όλη την προσπάθεια εκκένωσης της σήραγγας. Στα αρχεία excel του **Παραρτήματος Β,** υπάρχουν αναλυτικά όλες οι τιμές των μεγεθών που περιγράφονται και ο τρόπος που αυτά υπολογίστηκαν.

Στο **Σχήμα 36** που ακολουθεί, έχει σχεδιασθεί μία κάτοψη της σήραγγας για να αποτυπωθεί ο τρόπος που έχουν συνωστιστεί τα οχήματα. Ακόμα φαίνεται πόσοι και ποίοι επιβάτες εξουδετερώθηκαν κατά την προσπάθεια εκκένωσης της σήραγγας.

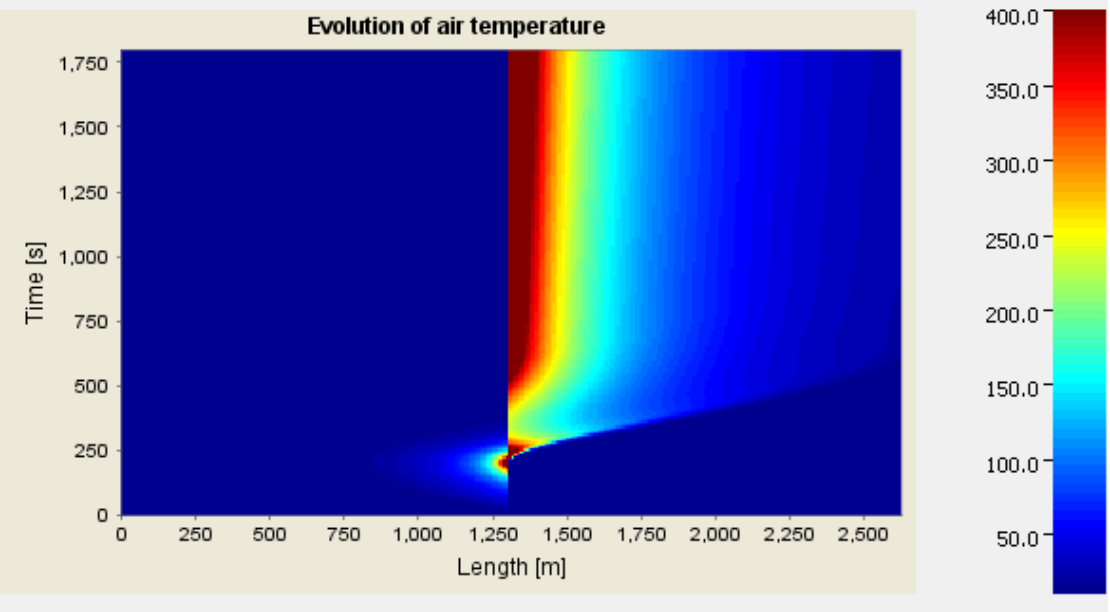
Ο αριθμός των οχημάτων που έχουν ακινητοποιηθεί πίσω από την πυρκαγιά και το μήκος της ουράς αυτής, δίδεται από το πρόγραμμα CAMATT, όπως έχει περιγραφεί στο αντίστοιχο κεφάλαιο της διπλωματικής αυτής (Show traffic). Πάλι εδώ τα ακινητοποιημένα οχήματα πίσω από τη φωτιά είναι δεκαπέντε, με την ουρά να εκτείνεται στα 427 μέτρα από το στόμιο εισόδου. Υπολογίζοντας ότι σε κάθε μικρό όχημα ο μέσος όρος των επιβατών είναι 2 και σε κάθε βαρύ φορτηγό είναι 1, είναι δυνατό να πούμε ότι το σύνολο των υπολογιζόμενων απωλειών σε αυτή την περίπτωση είναι 26.



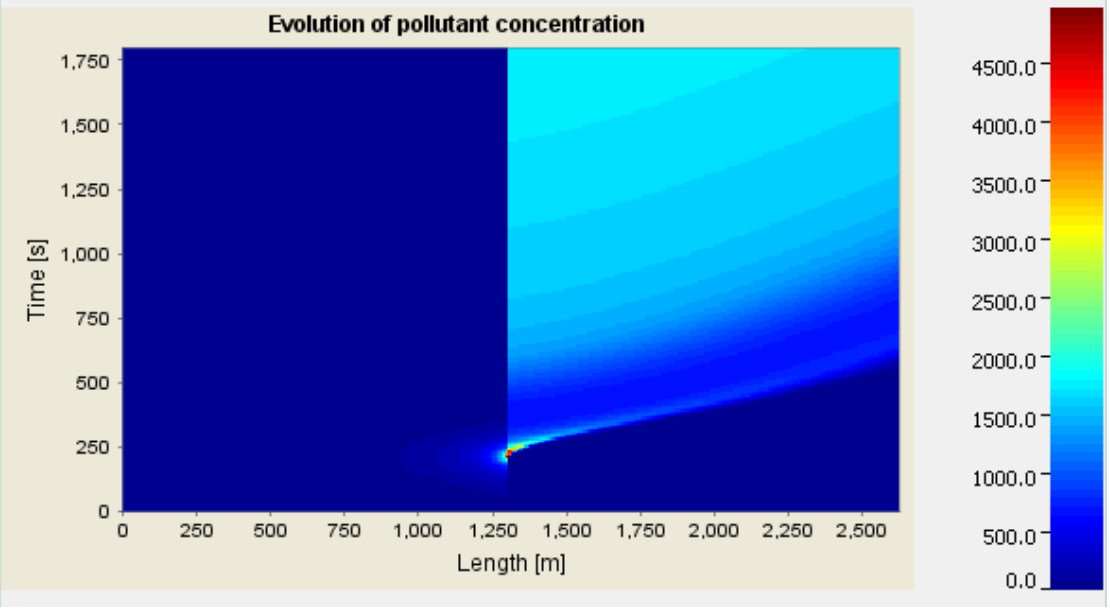
Σχήμα 36: Με το κόκκινο x φαίνονται τα οχήματα, των οποίων οι επιβάτες δεν επιβίωσαν

3.2.2.2 Στα 1300m

Για τα διαγράμματα που περιγράφουν τη φωτιά που ξεσπά στα 1300 ισχύουν ακριβώς τα ίδια με όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο που αφορούσε τη φωτιά των 150 MW που ξεσπά στα 500 μέτρα. Βασική διαφορά εντοπίζεται στο ότι η φωτιά πλέον βρίσκεται σε άλλο σημείο της σήραγγας (θέση x=1300 m). Στο **Σχήμα 37** που αφορά την θερμοκρασία εντός της σήραγγας και στο **Σχήμα 38** που περιγράφει τις συγκεντρώσεις ρυπογόνων ουσιών, βλέπουμε και πάλι την ύπαρξη οπισθοδρόμησης του καπνού (back layering).



Σχήμα 37: Η θερμοκρασία μέσα στη σήραγγα

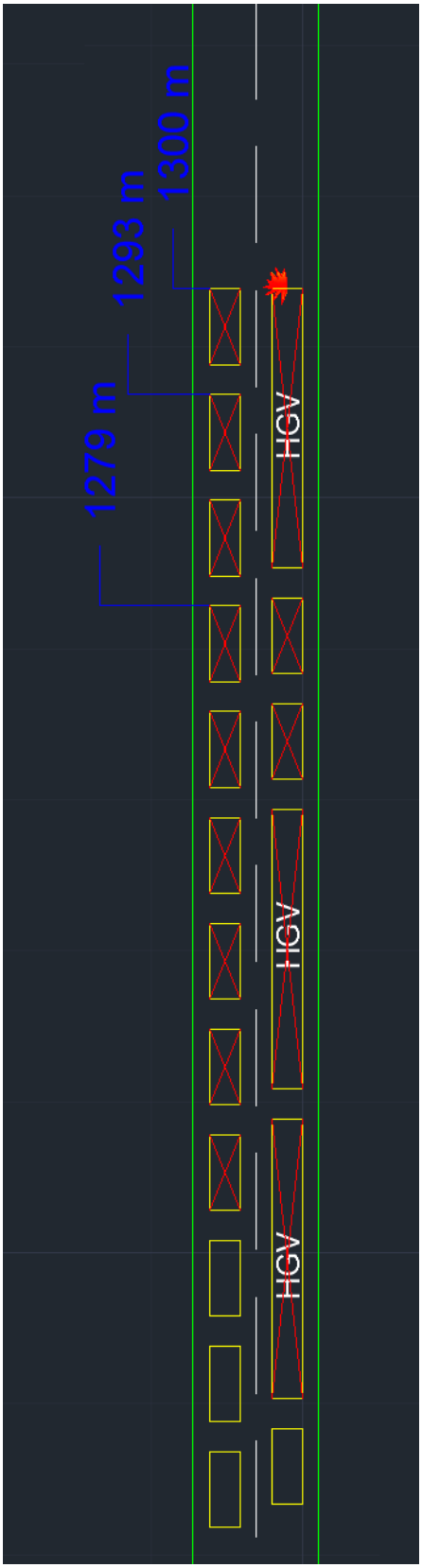


Σχήμα 38: Η συγκέντρωση ρύπων μέσα στη σήραγγα

Για τον υπολογισμό των θυμάτων ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία με αυτήν που αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.2.1.1 με τη διαφορά ότι το πρώτο υπό εξέταση όχημα είναι το φορτηγό που προκάλεσε τη φωτιά στη θέση x=1300 μέτρα. Ακολουθώντας όλη τη διαδικασία, εντοπίζεται η πορεία και η θέση που θα έχουν όλοι οι εξεταζόμενοι επιβάτες (**Παράρτημα Α**), με το βήμα της ανάλυσης να είναι πάλι δέκα δευτερόλεπτα, εντοπίζεται από τα διαγράμματα του λογισμικού CAMATT η θερμοκρασία/θερμότητα που δέχονται στην κάθε θέση, υπολογίζεται τη συνολική κλασματική δόση και βγαίνει το συμπέρασμα για το αν επιβιώνουν από την θερμότητα που δέχονται ή όχι. Παράλληλα εξετάζεται αν οι επιβάτες είναι σε θέση να ανταπεξέλθουν τους ρύπους μονοξειδίου του άνθρακα που αναπνέουν καθ' όλη την προσπάθεια εκκένωσης της σήραγγας. Στα αρχεία excel του **Παραρτήματος Β,** υπάρχουν αναλυτικά όλες οι τιμές των μεγεθών που περιγράφονται και ο τρόπος που αυτά υπολογίστηκαν.

Στο **Σχήμα 39** που ακολουθεί, είναι σχεδιασμένη μία κάτοψη της σήραγγας για να αποτυπωθεί ο τρόπος που έχουν συνωστιστεί τα οχήματα. Ακόμα φαίνεται πόσοι και ποίοι επιβάτες εξουδετερώθηκαν κατά την προσπάθεια εκκένωσης της σήραγγας.

Ο αριθμός των οχημάτων που έχουν ακινητοποιηθεί πίσω από την πυρκαγιά και το μήκος της ουράς αυτής, δίδεται από το πρόγραμμα CAMATT, όπως έχει περιγραφεί στο αντίστοιχο κεφάλαιο της διπλωματικής αυτής (Show traffic). Συνολικά δεκαοχτώ (18) οχήματα είναι ακινητοποιημένα πίσω από τη φωτιά με την ουρά να εκτείνεται μέχρι και 1215 μέτρα από το στόμιο εισόδου. Υπολογίζοντας ότι σε κάθε μικρό όχημα ο μέσος όρος των επιβατών είναι 2 και σε κάθε βαρύ φορτηγό είναι 1, μπορεί να γίνει η εκτίμηση ότι το σύνολο των υπολογιζόμενων απωλειών σε αυτή την περίπτωση είναι 24.



Σχήμα 39: Με το κόκκινο x φαίνονται τα οχήματα, των οποίων οι επιβάτες δεν επιβίωσαν

3.2.3 Μέτρα μείωσης της επικινδυνότητας

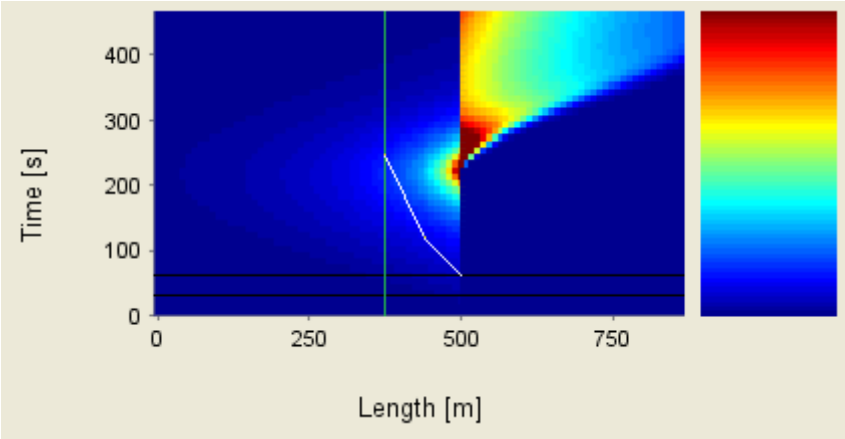
Τα αποτελέσματα των αναλύσεων στα βασικά σενάρια, ανέδειξαν ότι σε περίπτωση μεγάλης πυρκαγιάς, οι συνέπειες σε ανθρώπινες ζωές θα είναι πολύ μεγάλες σε έκταση. Αυτό το γεγονός έπρεπε να αντιμετωπιστεί με κάποιο τρόπο. Έτσι λοιπόν λήφθηκαν μέτρα μείωσης της επικινδυνότητας, τα οποία αφορούν την καλύτερη επικοινωνία των χρηστών της σήραγγας και του κέντρου ελέγχου. Στα βασικά σενάρια είχε γίνει αποδεκτό ότι οι επιβάτες ξεκινούν την διαδικασία αυτό-διάσωσης δύο λεπτά αφού ξεσπάσει η φωτιά. Γίνεται η υπόθεση λοιπόν, ότι σε μία σήραγγα όπως αυτή της μελέτης, με καλή ορατότητα για τους οδηγούς και με διαθέσιμο κέντρου ελέγχου, μπορεί να μειώσει τον χρόνο που απαιτείται για την έναρξη της προσπάθειας εκκένωσης στο μισό, δηλαδή στο ένα λεπτό.

Σε περίπτωση που χρησιμοποιηθούν μέσα, για την καλύτερη ενημέρωση και καθοδήγηση των χρηστών της σήραγγας, ο χρόνος για να εκκενωθεί ένα όχημα από τον όλους τους επιβάτες του είναι 30 δευτερόλεπτα και για να ξεκινήσουν την διαδικασία εκκένωσης, άλλα 30 δευτερόλεπτα. Άρα λοιπόν περνά ένα λεπτό μέχρι οι χρήστες των οχημάτων να ξεκινήσουν να κινούνται προς την πλησιέστερη έξοδο κινδύνου. Τα αποτελέσματα που προήλθαν από αυτή τη παραδοχή ακολουθούν στη συνέχεια.

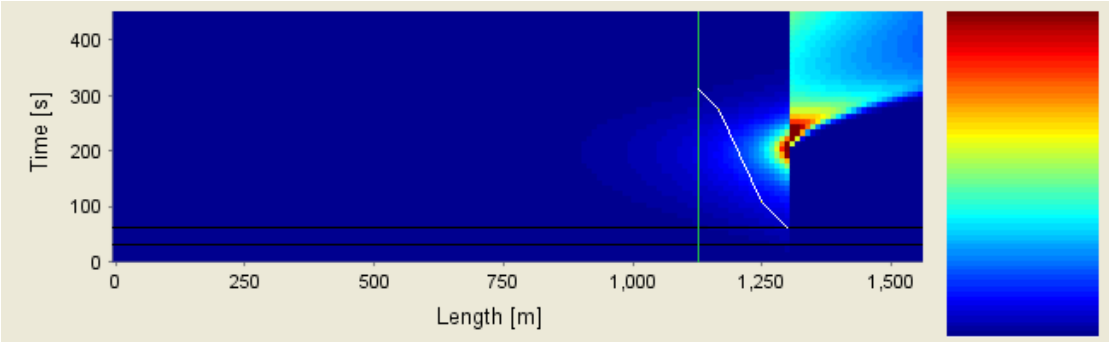
3.2.3.1 Σενάριο των 100 MW

Χρησιμοποιώντας όλη την μεθοδολογία που περιγράφηκε και εκτελέστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, τα αποτελέσματα σε ανθρώπινες ζωές τόσο για την φωτιά στα 500 μέτρα, όσο και για την φωτιά στα 1300 μέτρα, ήταν μηδενικά. Δηλαδή κανένας επιβάτης οχήματος δεν εξουδετερώθηκε από τη φωτιά, ούτε καν ο οδηγός του φορτηγού που την προκάλεσε.

Στα **Σχήματα 40** και **41** φαίνεται η πορεία του οδηγού του φορτηγού, που έπιασε φωτιά στα 500 και 1300 μέτρα αντίστοιχα, την οποία διένυσε για να φτάσει μέχρι την πλησιέστερη έξοδο κινδύνου. Παρόμοιες εικόνες που αφορούν κυρίως την πορεία των χρηστών προς τις εξόδους κινδύνου, βρίσκονται στο **Παράρτημα Α**. Η πράσινη κατακόρυφη γραμμή δίνει το σημείο του διαγράμματος όπου βρίσκεται η έξοδος κινδύνου. Η άσπρη γραμμή ‘‘δείχνει’’ την πορεία του ατόμου. Οι δύο μαύρες οριζόντιες γραμμές, χαμηλά στο διάγραμμα, υποδεικνύουν, η πρώτη τον χρόνο εκκένωσης του οχήματος και δεύτερη τον χρόνο που απαιτείται για να ληφθεί η απόφαση για την εκκίνηση της προσπάθειας διαφυγής και επιβίωσης.



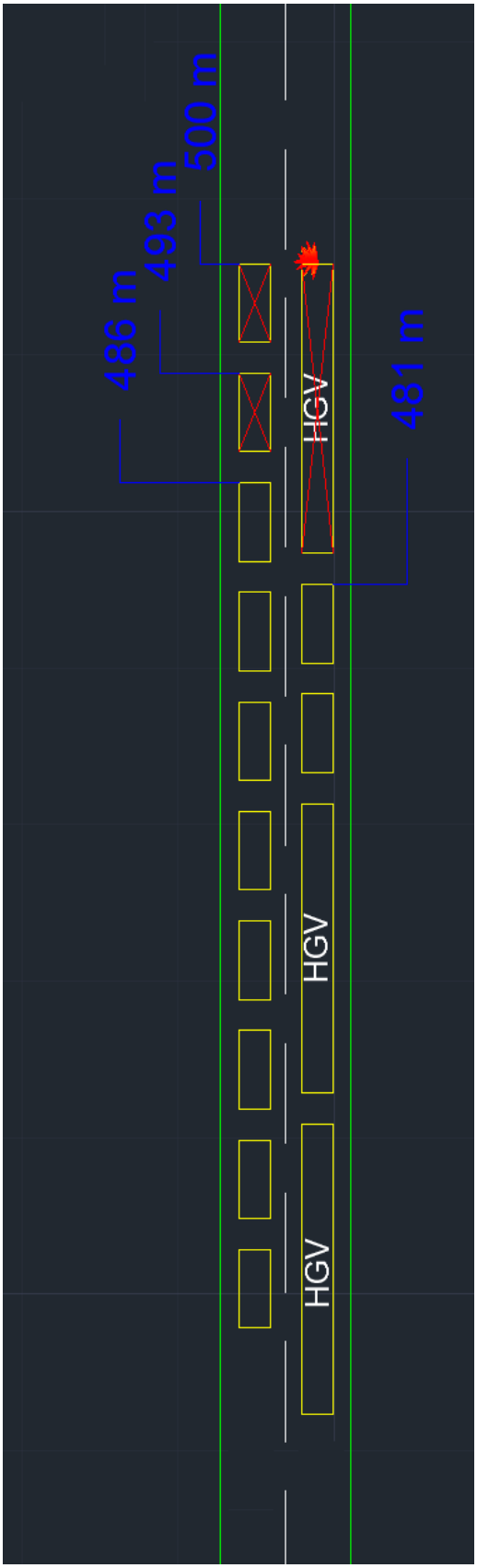
Σχήμα 40: Η πορεία που διέγραψε ο οδηγός του φορτηγού από τη θέση x=500 m



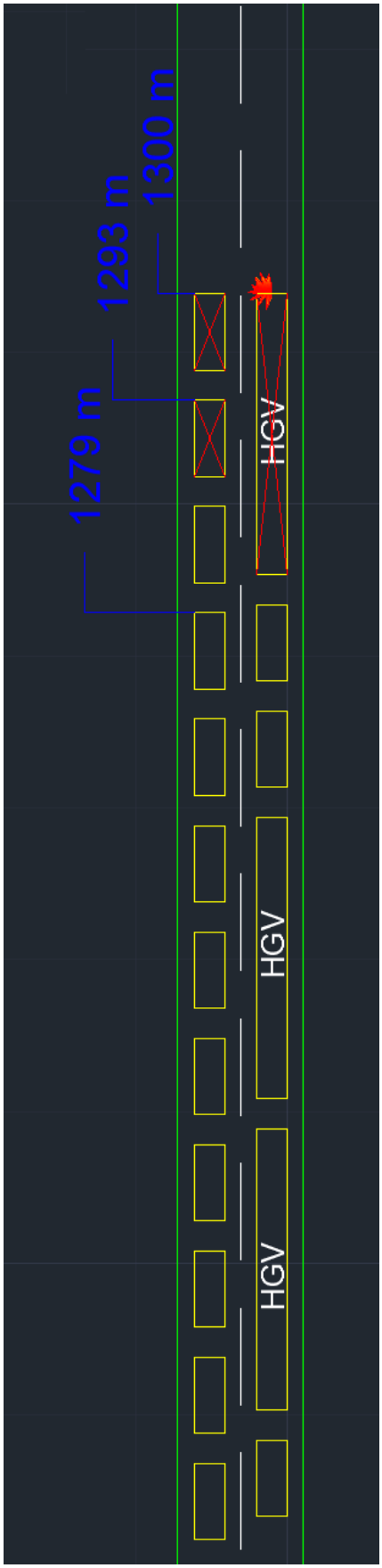
Σχήμα 41: Η πορεία που διέγραψε ο οδηγός του φορτηγού από τη θέση x=1300 m

3.2.3.2 Σενάριο των 150 MW

Στην περίπτωση της φωτιάς ισχύος 150 MW, οι αποτελέσματα σε ανθρώπινες απώλειες, μπορεί να μην ήταν μηδενικά, αλλά ήταν πολύ λιγότερα από αυτά των βασικών σεναρίων. Και στις δύο περιπτώσεις, δηλαδή για την φωτιά που ξεσπά στα 500 μέτρα και στα 1300 μέτρα, έχουμε 5 ανθρώπινες απώλειες. Τα **Σήματα 42** και **43** που ακολουθούν, απεικονίζουν την κάτοψη της σήραγγας για κάθε μία από τις φωτιές των 150 MW, για τα 500 και τα 1300 μέτρα αντίστοιχα.



Σχήμα 42: Με το κόκκινο x φαίνονται τα οχήματα, των οποίων οι επιβάτες δεν επιβίωσαν



Σχήμα 43: Με το κόκκινο x φαίνονται τα οχήματα, των οποίων οι επιβάτες δεν επιβίωσαν

4 Αποτελέσματα-Συμπεράσματα

Από την ανάλυση επικινδυνότητας που πραγματοποιήθηκε στις προηγούμενες παραγράφους, εξάγονται δεδομένα που οδηγούν σε πολύ χρήσιμα και ουσιαστικά συμπεράσματα για την υπάρχουσα διαμορφωμένη στρατηγική ασφάλειας της σήραγγας.

Καταρχήν τα συγκεντρωμένα αποτελέσματα της ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε βρίσκονται στον **Πίνακα 3** που περιέχει συνοπτικά, τα αποτελέσματα σε ανθρώπινες ζωές, τόσο για τα βασικά σενάρια που εξετάσθηκαν, όσο και για εκείνα που είχαν σκοπό τη μείωση της επικινδυνότητας.

Πίνακας 3: Αριθμός απωλειών για τα 4 βασικά σενάρια. Ακόμα φαίνεται το κατά πόσο μειώθηκε ο αριθμός τους με τα μέτρα μείωσης επικινδυνότητας που λήφθηκαν

Βασικό σενάριο		
	Φωτιά [MW]	
Θέση [m]	100	150
500	10	28
1300	10	24

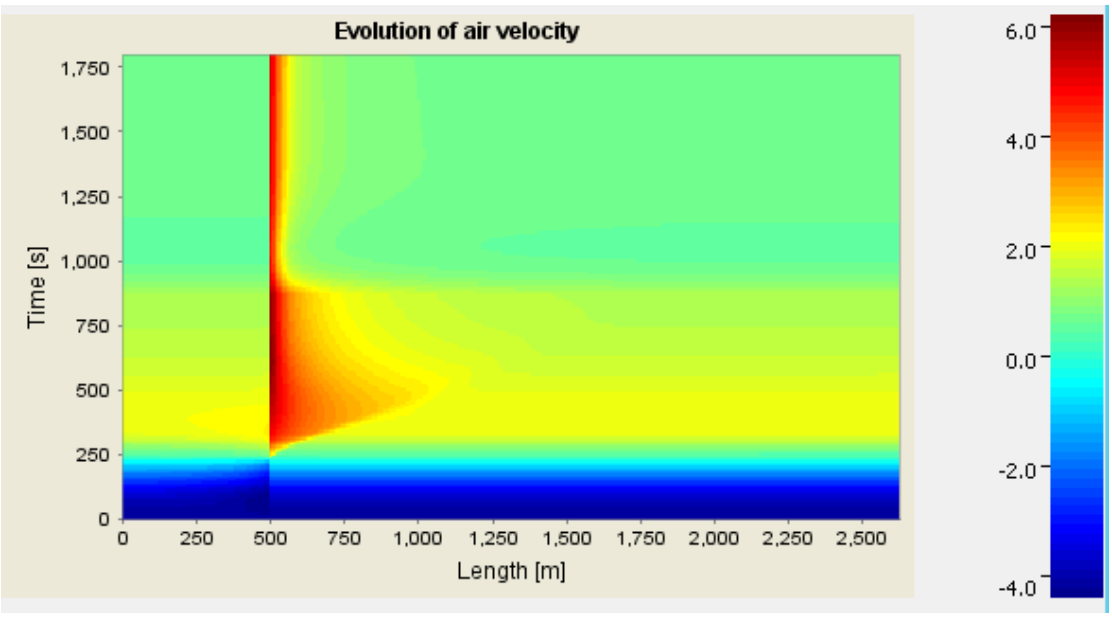
Μέτρα μείωσης επικινδυνότητας		
	Φωτιά [MW]	
Θέση [m]	100	150
500	0	5
1300	0	5

Από τα δεδομένα αυτά γίνεται αντιληπτό, πως η σήραγγα είναι τρωτή σε πυρκαγιές μεγάλης ισχύος. Ο αριθμός των απωλειών στην περίπτωση των 100 MW είναι μεγάλος, πόσο μάλλον για την φωτιά ισχύος 150 MW, όπου οι νεκροί ήταν όλοι οι επιβάτες που επέβαιναν στα οχήματα που εγκλωβίστηκαν εντός της σήραγγας.

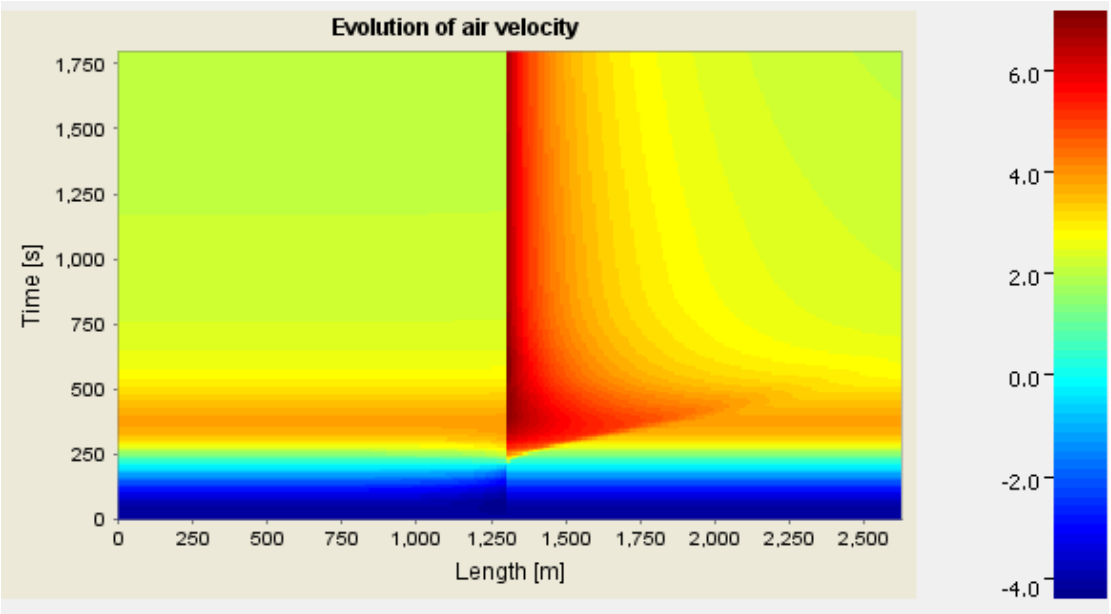
Παρακολουθώντας τα αριθμητικά μεγέθη και τα διαγράμματα καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα:

1. Στη φωτιά ισχύος 150 MW, τα θύματα του σεναρίου της παραγράφου 3.2.2.1, για την φωτιά που ξεσπά στα 500 μέτρα, είναι περισσότερα από εκείνα της αντίστοιχης φωτιάς της παραγράφου 3.2.2.2, που ξεσπά στα 1300 μέτρα από το στόμιο εισόδου. Αυτό συμβαίνει διότι ο αερισμός στην πρώτη περίπτωση δεν δύναται να αποτρέψει σε σύντομο χρονικό διάστημα την οπισθοδρόμηση του καπνού (back layering), πράγμα το οποίο καταφέρνει να κάνει σε πιο ικανοποιητικό

βαθμό ο μηχανικός αερισμός της δεύτερης περίπτωσης. Η ταχύτητα του αέρα σε κάθε περίπτωση, που αποδεικνύει την παραπάνω υπόθεση, φαίνεται από τα **Σχήματα 44** και **45**.

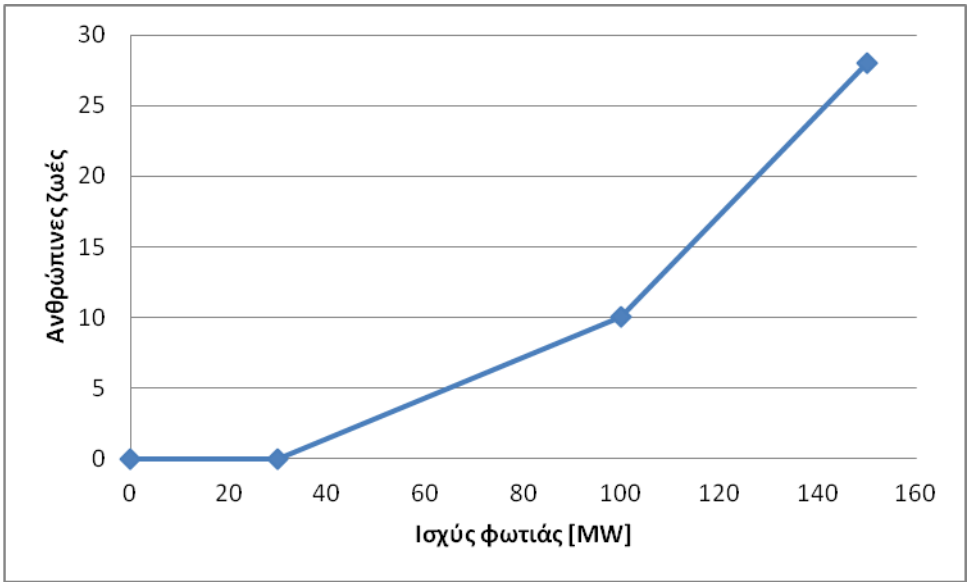


Σχήμα 44: Ταχύτητα του αέρα για την φωτιά ισχύος 150 MW που ξεσπά στα 500 μέτρα από την αρχή της σήραγγας



Σχήμα 45: Ταχύτητα του αέρα για την φωτιά ισχύος 150 MW που ξεσπά στα 1300 μέτρα από την αρχή της σήραγγας

2. Στα βασικά σενάρια της ανάλυσης είναι φανερό ,όπως αναμενόταν, ο αριθμός των απωλειών για την φωτιά μεγαλύτερης ισχύος να είναι και αυτός μεγαλύτερος. Παρατηρείται όμως ότι για φωτιά ισχύος αυξημένη κατά το μισό (από 100 σε 150 MW), υπάρχει υπερ-διπλασιασμός του αριθμού των απωλειών. Άρα η σχέση ισχύος φωτιάς και απωλειών σε ανθρώπινες ζωές δεν είναι γραμμική όταν το υπόλοιπα δεδομένα που ισχύουν για τη σήραγγα παραμείνουν σταθερά. Το **Σχήμα 46** που ακολουθεί αφορά τη φωτιά που αναπτύσσεται στα 500 μέτρα από το στόμιο της σήραγγας για διάφορες τιμές της ισχύος της. Τα σημεία που έχουν επιλεχθεί είναι τέσσερα. Όταν δεν υπάρχει φωτιά (0 MW) δεν υπάρχουν νεκροί από πυρκαγιά. Για φωτιά ισχύος 30 MW στα 500 μέτρα δεν υπάρχουν νεκροί για τη συγκεκριμένη σήραγγα και υπό τις δεδομένες συνθήκες. Το αποτέλεσμα αυτό έχει διαπιστωθεί μετά από υπολογισμούς αλλά δεν συμπεριλήφθηκε στην ανάλυση αυτή λόγο μικρής σημαντικότητας. Τα άλλα δύο σημεία (για 100 και 150 MW) έχουν παρουσιαστεί αναλυτικά σε αυτή τη μελέτη.



Σχήμα 46: Ο αριθμός των ανθρώπινων ζωών όπως μεταβάλλεται με το μέγεθος της πυρκαγιάς

3. Με τα μέτρα μείωσης της επικινδυνότητας που λήφθηκαν, αποδείχτηκε ότι είναι καθοριστικής σημασίας να υπάρχει καλός σχεδιασμός της σήραγγας αλλά και ενημέρωση σε θέματα ασφαλείας ώστε να γίνεται όσο το δυνατόν πιο γρήγορα η εκκένωση. Αποδείχτηκε πως ένας

καλός σχεδιασμός της σήραγγας, αποτελούμενος από τα μέσα εκείνα που θα ενημερώνουν και θα καθοδηγούν τους χρήστες της με σωστό τρόπο σε περίπτωση ανάγκης, μπορεί να μειώσει δραστικά τον κίνδυνο σε ανθρώπινες ζωές, έως και να τον εξαλείψει. Μειώνοντας τον χρόνο εκκενώσεως του οχήματος στο μισό και του χρόνου λήψης απόφασης για έναρξη προσπάθειας διάσωσης πάλι στο μισό, αποδείχτηκε πως για την ισχυρότατη φωτιά των 100 MW η παρούσα σήραγγα μπορεί να διαχειριστεί απόλυτα τον κίνδυνο, καθώς επιβιώνουν όλοι οι χρήστες της όπως φαίνεται στον **Πίνακα 3**.

Για την ακόμα μεγαλύτερη φωτιά των 150 MW, το μεγαλύτερο μέρος των εγκλωβισμένων χρηστών της μπορούν να διασωθούν, προσεγγίζοντας κάποια από τις έξι εξόδους κινδύνου. Πιο συγκεκριμένα, για την φωτιά των 100 MW, σε όποια θέση και αν προκύψει εκ των πεντακοσίων και των χιλίων τριακοσίων μέτρων, όλοι οι χρήστες θα διασωθούν. Για την φωτιά των 150 MW θα υπάρξουν 5 νεκροί σε κάθε μία από τις δύο περιπτώσεις, δηλαδή φωτιά στα 500 και στα 1300 μέτρα. Πράγμα που σημαίνει μόλις το 18% και 21% των απωλειών των βασικών σεναρίων αντίστοιχα.

Η διαφορές που εντοπίζονται είναι μεγάλες και μαρτυρούν την αλήθεια που αναφέρει ότι όποια και αν είναι η τεχνολογική πληρότητα της σήραγγας και όσο καλός και αν είναι ο εξοπλισμός της, ο σημαντικότερος παράγοντας που επηρεάζει το αποτέλεσμα των συνεπειών σε ανθρώπινες ζωές είναι η αρχή της αυτό-διάσωσης. Αυτό που πρέπει να έχουν φροντίσει να κάνουν οι ιθύνοντες ασφαλείας της σήραγγας, είναι να παρέχουν στον κόσμο που την χρησιμοποιεί, όλα τα εφόδια που θα χρειαστούν για να κάνουν το έργο τη αυτό-διάσωσης πιο εύκολο. Τα συνεργεία έκτακτης ανάγκης έχουν επικουρικό ρόλο στην όλη διαδικασία και πάντα φτάνουν με χρονική καθυστέρηση με ότι αυτό συνεπάγεται.

5 Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

Διοικητική Αρχή Σηράγγων Δ.Α.Σ, 2011, *Οδηγίες για την εκπόνηση ανάλυσης επικινδυνότητας χωρίς εμπλοκή οχημάτων που μεταφέρουν επικίνδυνα εμπορεύματα μέσα από οδικές σήραγγες που εμπίπτουν στο πεδίο εφαρμογής του Π.Δ 230/07 (σεναριακή προσέγγιση), Διοικητική Αρχή Σηράγγων, Ελλάδα*

Ελληνική Δημοκρατία, *Εφημερίς της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας 2007*, Προεδρικό διάταγμα 230/2007, 23 Νοεμβρίου, τεύχος 1

Beard A. and Carvel R., 2005, *The handbook of tunnel fire safety,* Thomas Telford, London

Capote, J.A., et al. 'A real-time stochastic evacuation model for road tunnels', Safety Sci. (2012), http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2012.02.006

Centre D' Etudes des Tunnels, 2011, *CAMATT 2.20 User's guide*, CETU, France

Defer R., Rentzeperis I., Koutsoukos K. and Pons Ph., Lacroix D., 2010, 'Application of a system-based and a scenario-based risk analysis to the Driskos tunnel. Reflections about accuracy of collected data and uncertainties of risk analysis methods', *Fourth International Symposium on Tunnel Safety, Frankfurt am Main, Germany, March 17-19,* Germany

Kolh b. and Walet F., 2008, Risk Analysis for Road Tunnels, World Road Association, France

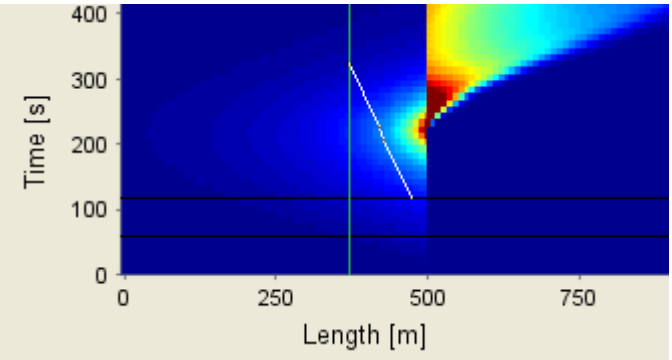
Lacroix D., Cassini Ph., Legrand M., and Pons Ph., 2003, *Guide to road tunnel safety documentation, Booklet 4: Specific hazard investigations*, Tunnel study center

6 Παράρτημα Α

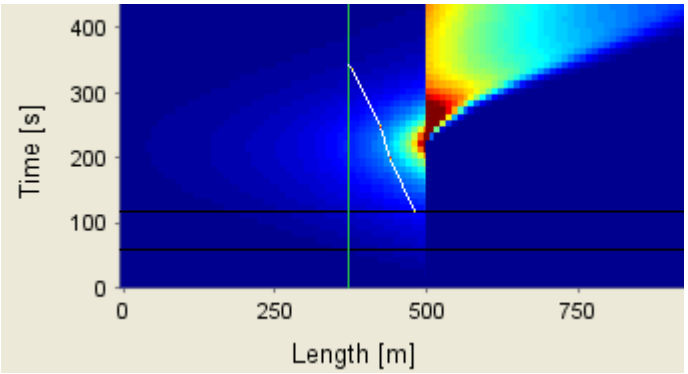
Οι διαγεγραμμένες πορείες των επιβατών των οχημάτων της σήραγγας εξετάσθηκαν προκειμένου να γίνει γνωστό σε ποίο σημείο της βρίσκονταν κάθε χρονική στιγμή. Για το κάθε σενάριο ξεχωριστά, σχεδιάστηκε η πορεία των επιβατών για να μπορεί ο ενδιαφερόμενος να παρατηρήσει με γραφικό τρόπο, πότε και που μεταβαλλόταν η ταχύτητα των επιβατών και μέσα από τι συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας ήταν αναγκασμένοι να κινηθούν.

Η πράσινη κατακόρυφη γραμμή δίνει το σημείο του διαγράμματος όπου βρίσκεται η έξοδος κινδύνου. Η άσπρη γραμμή ‘‘δείχνει’’ την πορεία του ατόμου. Οι δύο μαύρες οριζόντιες γραμμές, χαμηλά στο διάγραμμα, υποδεικνύουν, η πρώτη τον χρόνο εκκένωσης του οχήματος και δεύτερη τον χρόνο που απαιτείται για να ληφθεί η απόφαση για την εκκίνηση της προσπάθειας διαφυγής και επιβίωσης.

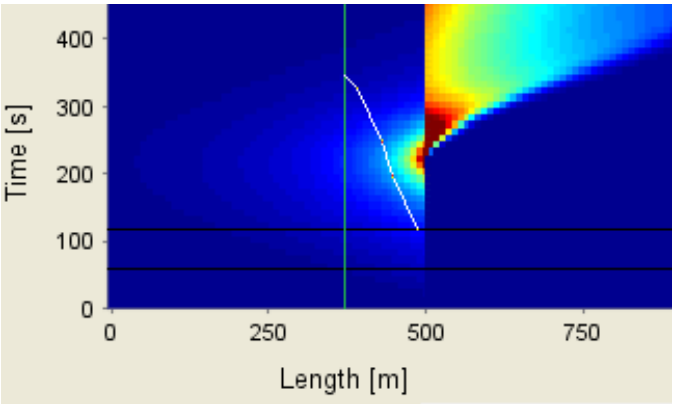
6.1 Βασικό σενάριο: 500 μέτρα – 100 MW



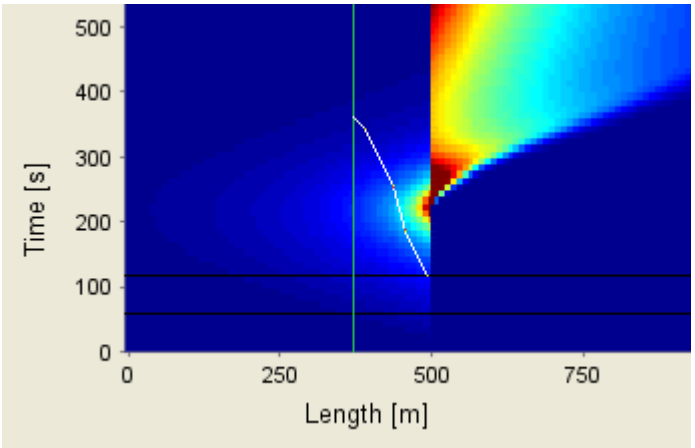
Σχήμα 47: Η πορεία του επιβάτη που ξεκινά τη διαδικασία εκκένωσης από τα 473 μέτρα και επιβιώνει



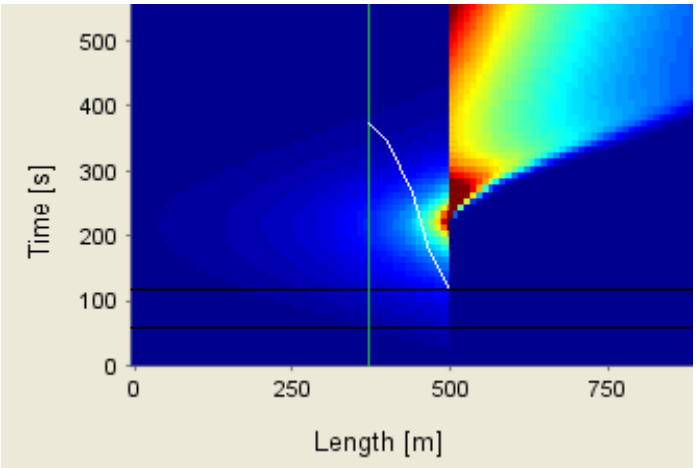
Σχήμα 48: Η πορεία του επιβάτη που ξεκινά τη διαδικασία εκκένωσης από τα 480 μέτρα, αλλά εξουδετερώνεται από τη θερμότητα που δέχεται



Σχήμα 49: Η πορεία του επιβάτη που ξεκινά τη διαδικασία εκκένωσης από τα 486 μέτρα, αλλά εξουδετερώνεται από τη θερμότητα που δέχεται

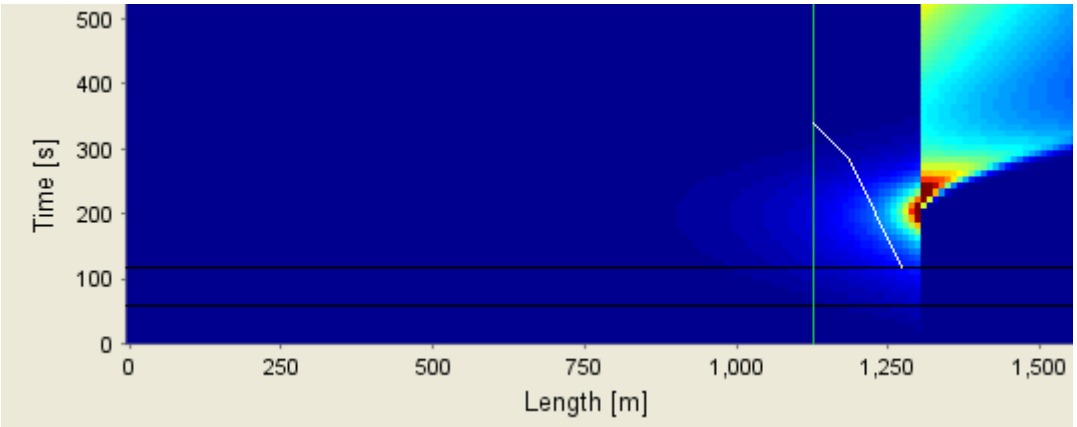


Σχήμα 50: Η πορεία του επιβάτη που ξεκινά τη διαδικασία εκκένωσης από τα 493 μέτρα, αλλά εξουδετερώνεται από τη θερμότητα που δέχεται

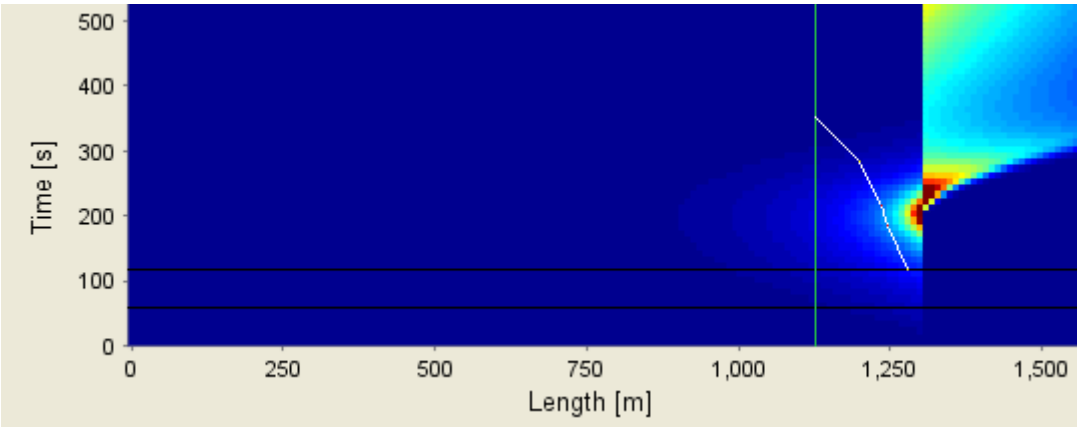


Σχήμα 51: Η πορεία του επιβάτη που ξεκινά τη διαδικασία εκκένωσης από τα 500 μέτρα, αλλά εξουδετερώνεται από τη θερμότητα που δέχεται

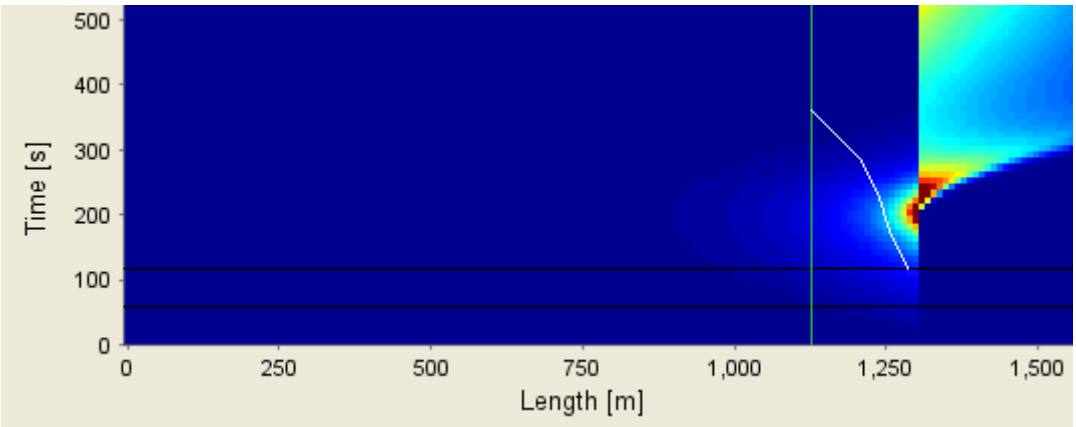
6.2 Βασικό σενάριο: 1300 μέτρα – 100 MW



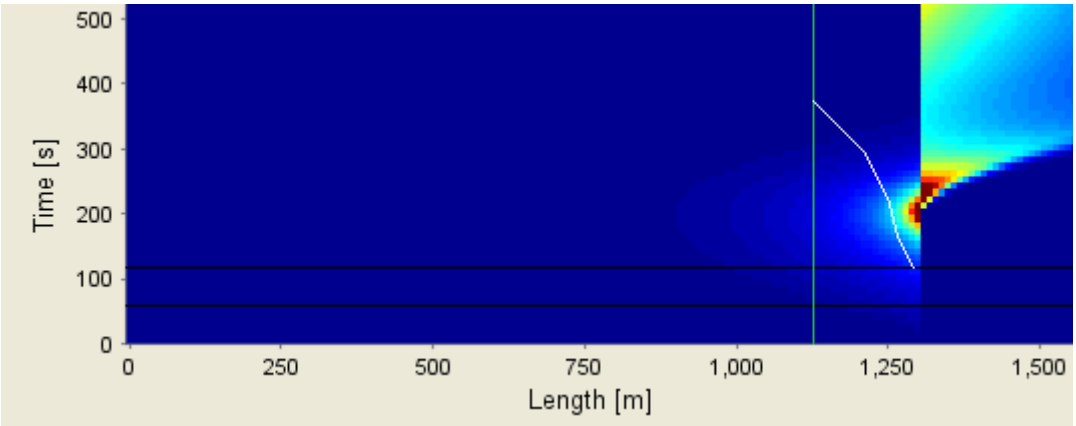
Σχήμα 52: Η πορεία του επιβάτη που ξεκινά τη διαδικασία εκκένωσης από τα 1273 μέτρα και επιβιώνει



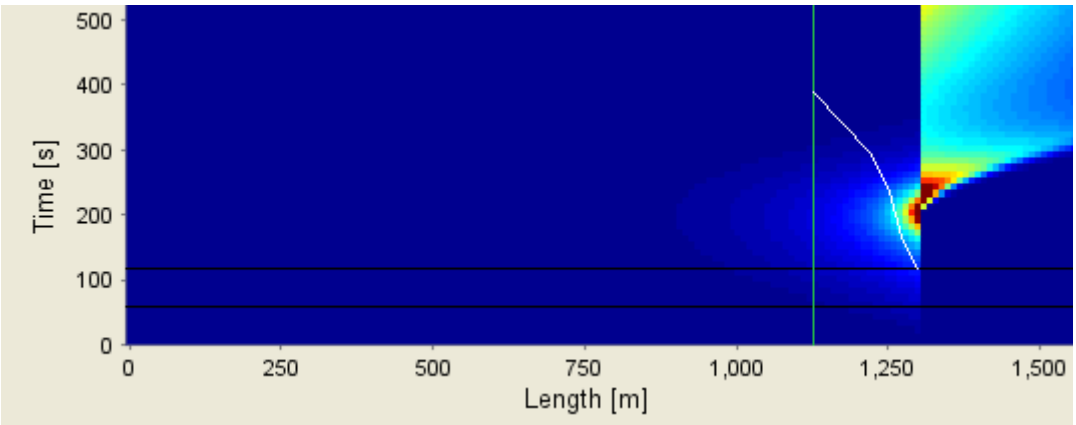
Σχήμα 53: Η πορεία του επιβάτη που ξεκινά τη διαδικασία εκκένωσης από τα 1280 μέτρα, αλλά εξουδετερώνεται από τη θερμότητα που δέχεται



Σχήμα 54: Η πορεία του επιβάτη που ξεκινά τη διαδικασία εκκένωσης από τα 1286 μέτρα, αλλά εξουδετερώνεται από τη θερμότητα που δέχεται

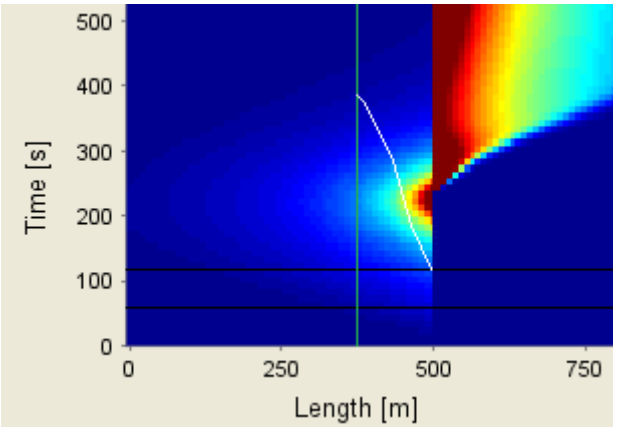


Σχήμα 55: Η πορεία του επιβάτη που ξεκινά τη διαδικασία εκκένωσης από τα 1293 μέτρα, αλλά εξουδετερώνεται από τη θερμότητα που δέχεται

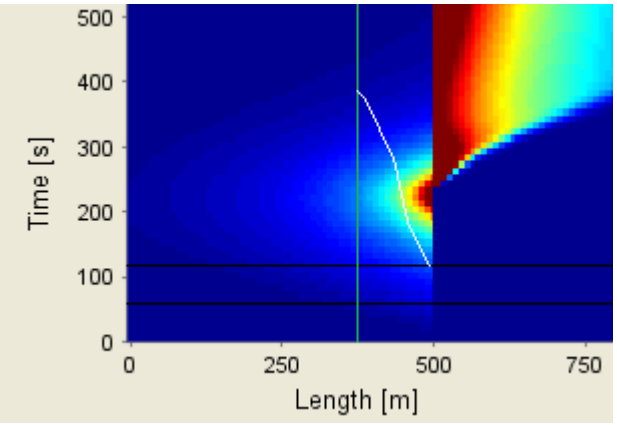


Σχήμα 56: Η πορεία του επιβάτη που ξεκινά τη διαδικασία εκκένωσης από τα 1300 μέτρα, αλλά εξουδετερώνεται από τη θερμότητα που δέχεται

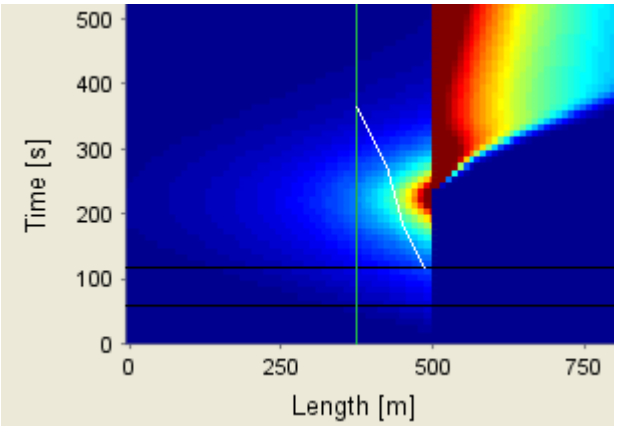
6.3 Βασικό σενάριο: 500 μέτρα – 150 MW



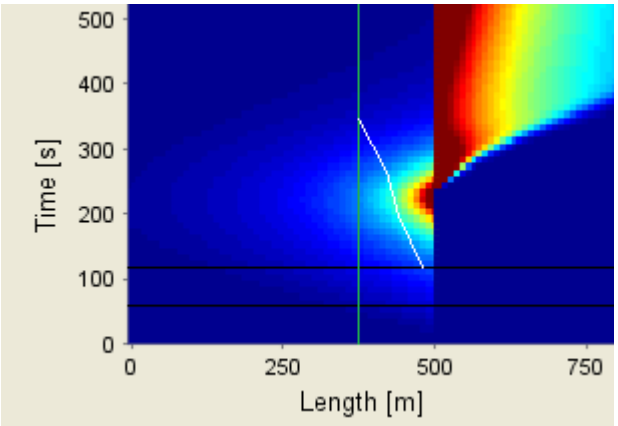
Σχήμα 57: Η πορεία του επιβάτη που ξεκινά τη διαδικασία εκκένωσης από τα 500 μέτρα, αλλά εξουδετερώνεται από τη θερμότητα που δέχεται



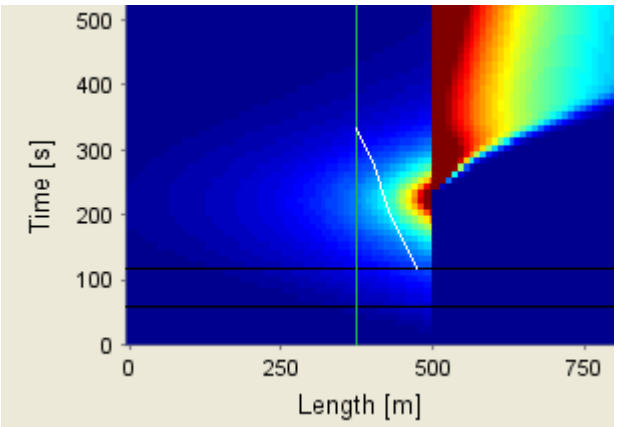
Σχήμα 58: Η πορεία του επιβάτη που ξεκινά τη διαδικασία εκκένωσης από τα 493 μέτρα, αλλά εξουδετερώνεται από τη θερμότητα που δέχεται



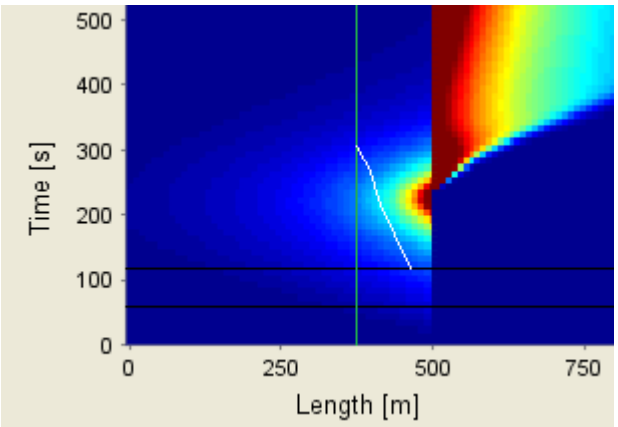
Σχήμα 59: Η πορεία του επιβάτη που ξεκινά τη διαδικασία εκκένωσης από τα 486 μέτρα, αλλά εξουδετερώνεται από τη θερμότητα που δέχεται



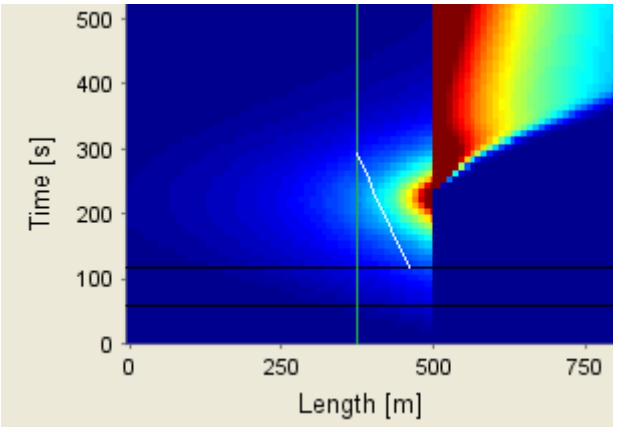
Σχήμα 60: Η πορεία του επιβάτη που ξεκινά τη διαδικασία εκκένωσης από τα 480 μέτρα, αλλά εξουδετερώνεται από τη θερμότητα που δέχεται



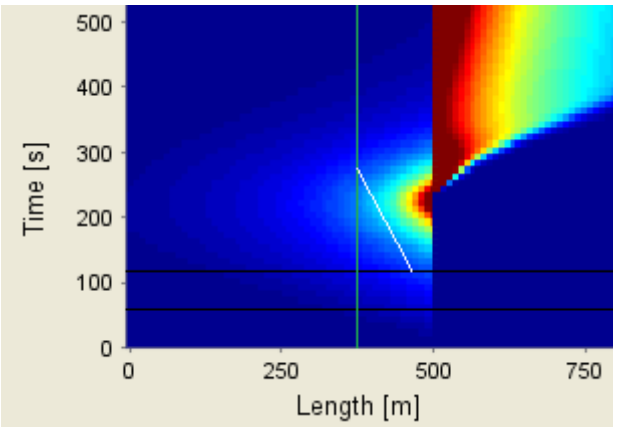
Σχήμα 61: Η πορεία του επιβάτη που ξεκινά τη διαδικασία εκκένωσης από τα 473 μέτρα, αλλά εξουδετερώνεται από τη θερμότητα που δέχεται



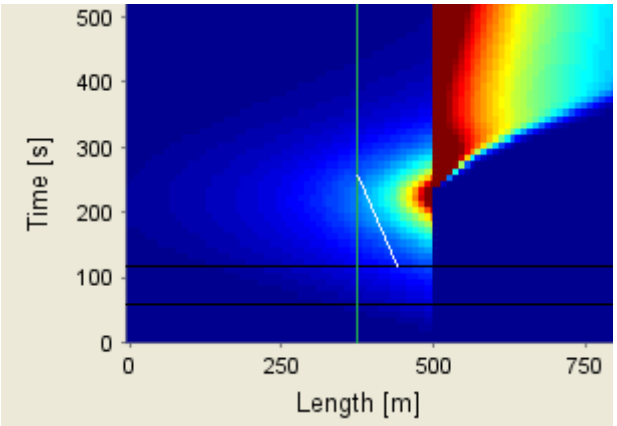
Σχήμα 62: Η πορεία του επιβάτη που ξεκινά τη διαδικασία εκκένωσης από τα 465 μέτρα, αλλά εξουδετερώνεται από τη θερμότητα που δέχεται



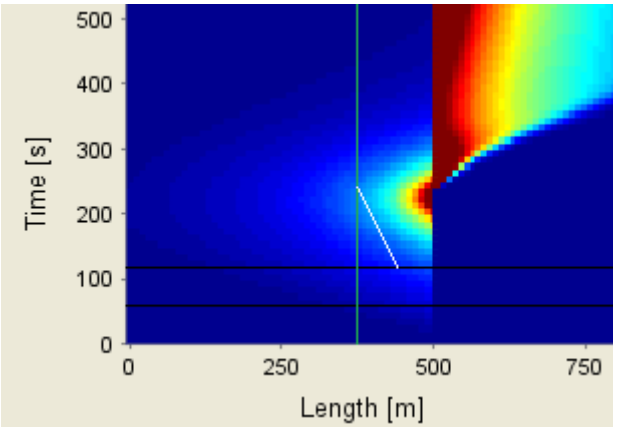
Σχήμα 63: Η πορεία του επιβάτη που ξεκινά τη διαδικασία εκκένωσης από τα 459 μέτρα, αλλά εξουδετερώνεται από τη θερμότητα που δέχεται



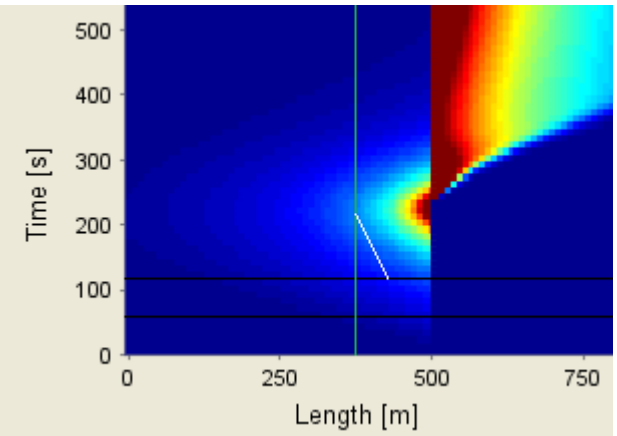
Σχήμα 64: Η πορεία του επιβάτη που ξεκινά τη διαδικασία εκκένωσης από τα 452 μέτρα, αλλά εξουδετερώνεται από τη θερμότητα που δέχεται



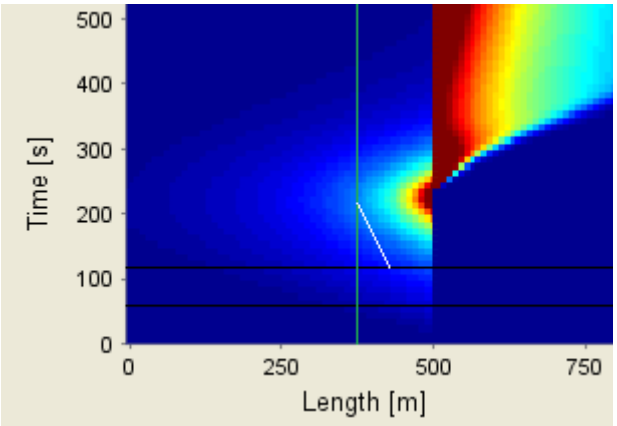
Σχήμα 65: Η πορεία του επιβάτη που ξεκινά τη διαδικασία εκκένωσης από τα 445 μέτρα, αλλά εξουδετερώνεται από τη θερμότητα που δέχεται



Σχήμα 66: Η πορεία του επιβάτη που ξεκινά τη διαδικασία εκκένωσης από τα 438 μέτρα, αλλά εξουδετερώνεται από τη θερμότητα που δέχεται

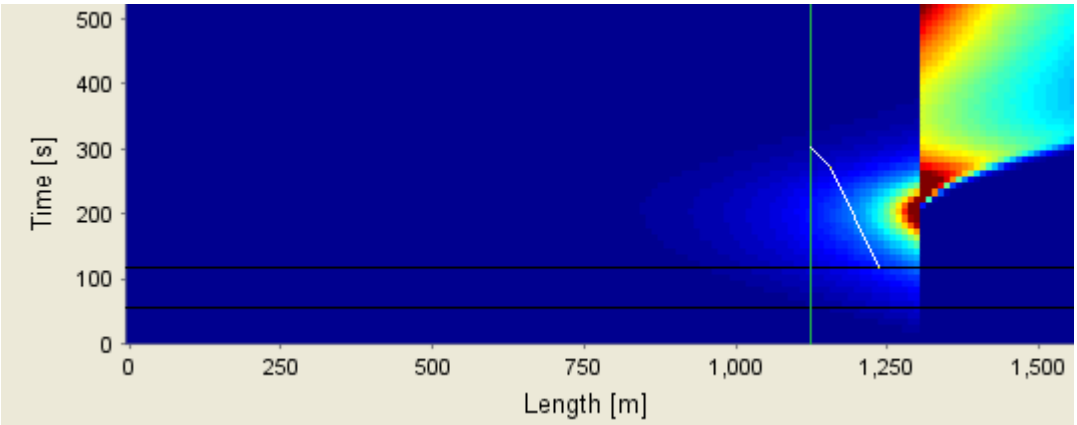


Σχήμα 67: Η πορεία του επιβάτη που ξεκινά τη διαδικασία εκκένωσης από τα 431 μέτρα, αλλά εξουδετερώνεται από τη θερμότητα που δέχεται

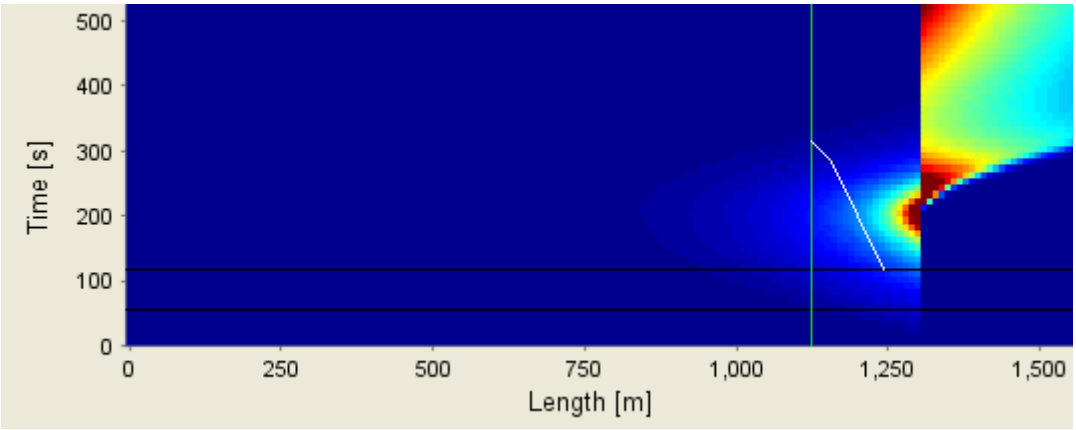


Σχήμα 68: Η πορεία του επιβάτη που ξεκινά τη διαδικασία εκκένωσης από τα 427 μέτρα και επιβιώνει

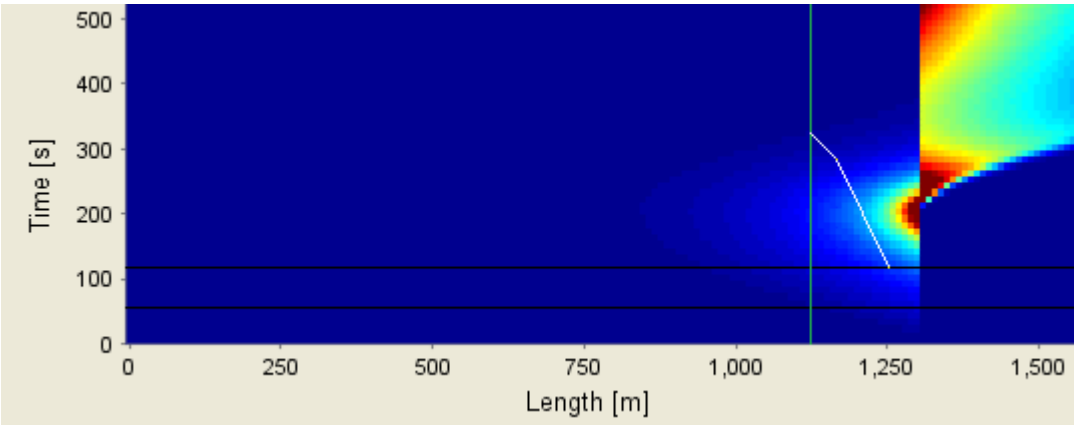
6.4 Βασικό σενάριο: 1300 μέτρα – 150 MW



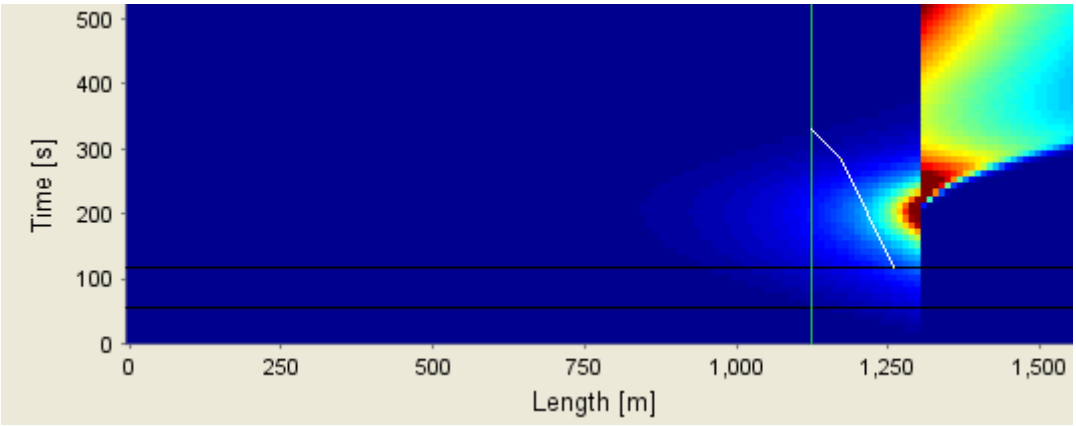
Σχήμα 69: Η πορεία του επιβάτη που ξεκινά τη διαδικασία εκκένωσης από τα 1238 μέτρα και επιβιώνει



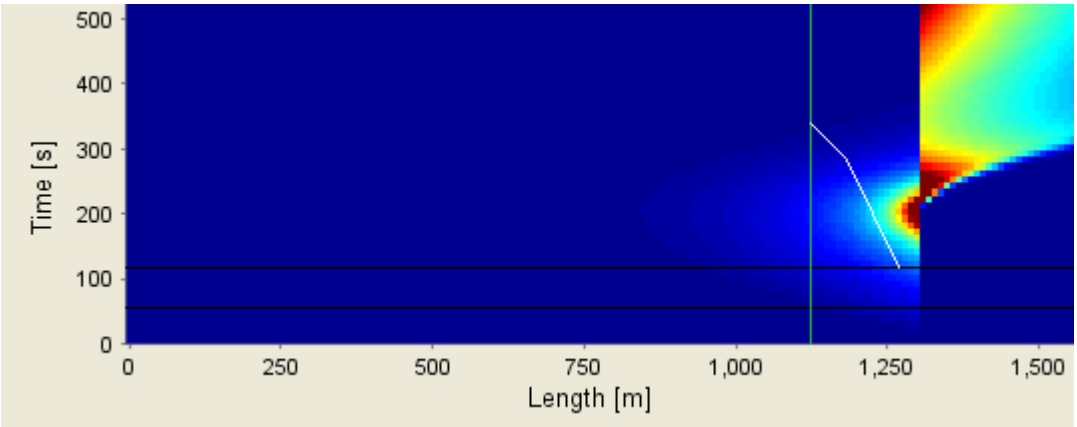
Σχήμα 70: Η πορεία του επιβάτη που ξεκινά τη διαδικασία εκκένωσης από τα 1245 μέτρα, αλλά εξουδετερώνεται από τη θερμότητα που δέχεται



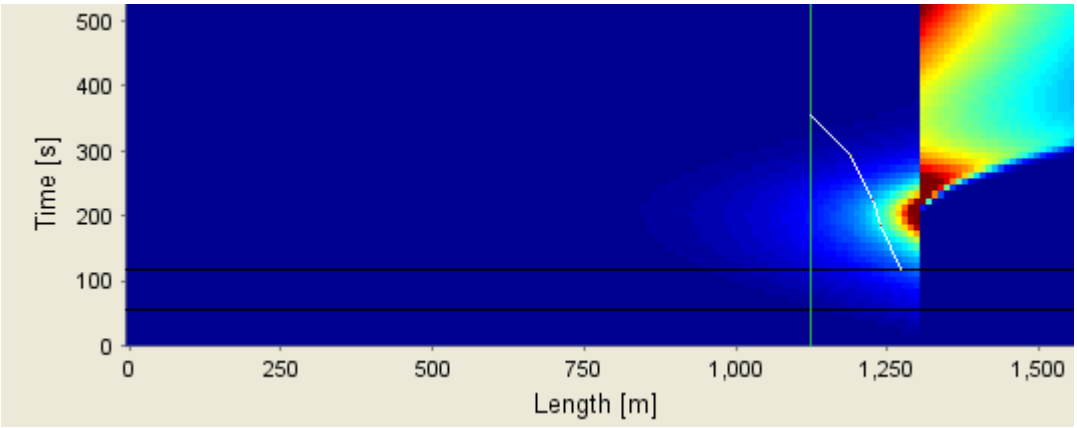
Σχήμα 71: Η πορεία του επιβάτη που ξεκινά τη διαδικασία εκκένωσης από τα 1253 μέτρα, αλλά εξουδετερώνεται από τη θερμότητα που δέχεται



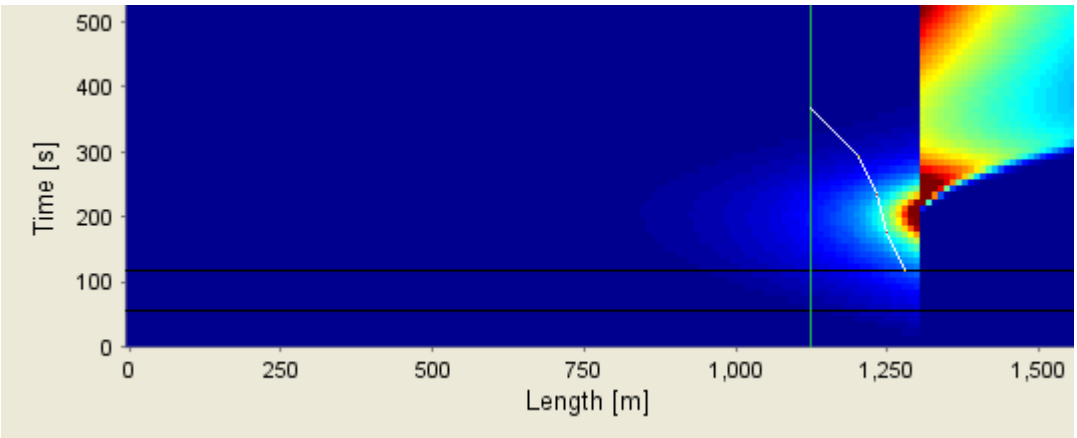
Σχήμα 72: Η πορεία του επιβάτη που ξεκινά τη διαδικασία εκκένωσης από τα 1259 μέτρα, αλλά εξουδετερώνεται από τη θερμότητα που δέχεται



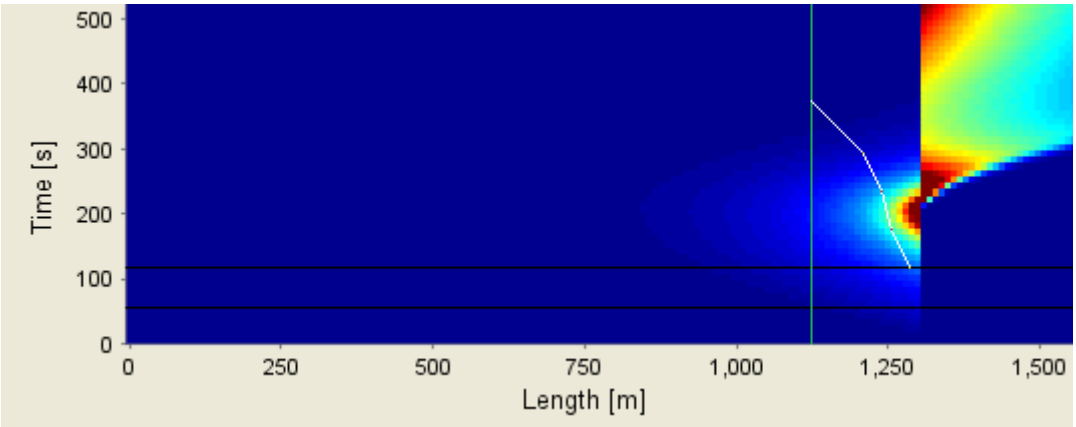
Σχήμα 73: Η πορεία του επιβάτη που ξεκινά τη διαδικασία εκκένωσης από τα 1265 μέτρα, αλλά εξουδετερώνεται από τη θερμότητα που δέχεται



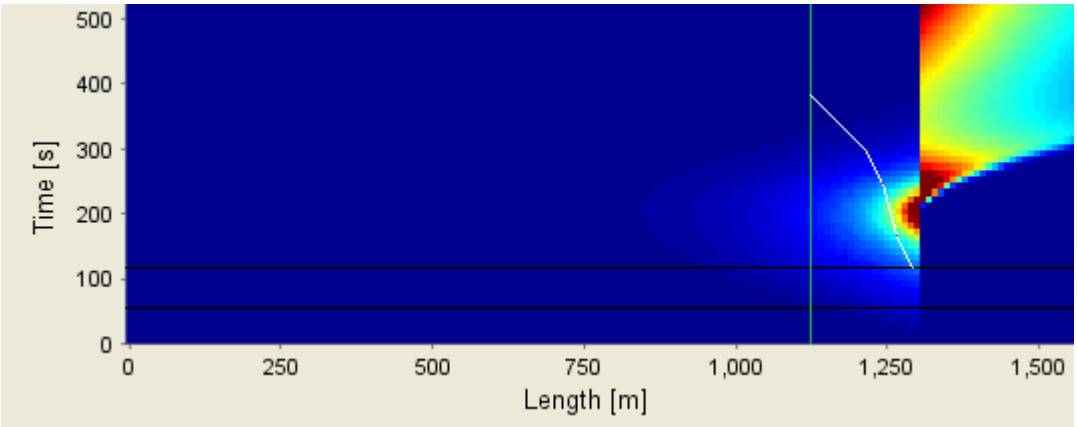
Σχήμα 74: Η πορεία του επιβάτη που ξεκινά τη διαδικασία εκκένωσης από τα 1273 μέτρα, αλλά εξουδετερώνεται από τη θερμότητα που δέχεται



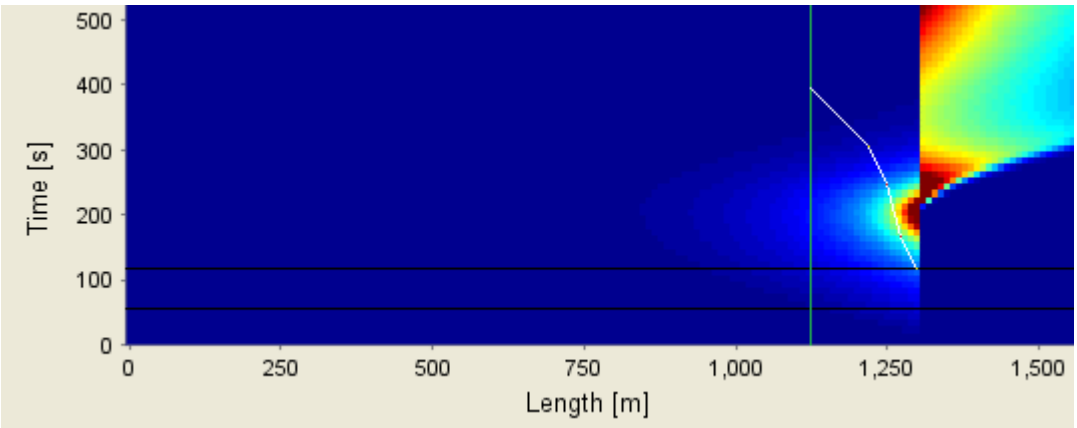
Σχήμα 75: Η πορεία του επιβάτη που ξεκινά τη διαδικασία εκκένωσης από τα 1280 μέτρα, αλλά εξουδετερώνεται από τη θερμότητα που δέχεται



Σχήμα 76: Η πορεία του επιβάτη που ξεκινά τη διαδικασία εκκένωσης από τα 1286 μέτρα, αλλά εξουδετερώνεται από τη θερμότητα που δέχεται



Σχήμα 77: Η πορεία του επιβάτη που ξεκινά τη διαδικασία εκκένωσης από τα 1293 μέτρα, αλλά εξουδετερώνεται από τη θερμότητα που δέχεται



Σχήμα 78: Η πορεία του επιβάτη που ξεκινά τη διαδικασία εκκένωσης από τα 1300 μέτρα, αλλά εξουδετερώνεται από τη θερμότητα που δέχεται

7 Παράρτημα Β

Στο παράρτημα αυτό δίνονται με αναλυτικό τρόπο τα νούμερα που εξήχθησαν από το λογισμικό CAMATT (αδιαφάνεια, θερμοκρασία, συγκέντρωση ρύπων) και εκείνα που υπολογίστηκαν με τη βοήθεια του Ms Excel:

- ορατότητα
- ταχύτητα
- tIrad, ο χρόνος εξουδετέρωσης από ακτινοβολία
- δtIrad, το σφάλμα του υπολογισμού του tIrad
- tIconv, ο χρόνος εξουδετέρωσης από μεταγωγή
- δtIconv, το σφάλμα του υπολογισμού του tIconv
- proFED, η κλασματική δόση χωρίς το σφάλμα της
- δFED, το σφάλμα της κλασματικής δόσης
- FED, το άθροισμα των proFED+δFED
- SumFED, το άθροισμα της κλασματική δόσης όλων των προηγούμενων θέσεων

προκειμένου να διαπιστωθεί, με τον τρόπο που έχει αναφερθεί σε παραπάνω κεφάλαιο, ο αριθμός των απωλειών. Για λόγους οικονομίας, παρουσιάζεται διεξοδικά, μόνο ο τρόπος που υπολογίστηκε η ικανότητα για διαφυγή και αυτό-διάσωση, του οδηγού του φορτηγού και των συνεπιβατών του, όταν η φωτιά έχει ισχύ 100 MW και ξεσπά στα 500 μέτρα από το στόμιο εισόδου.

7.1 Βασικό σενάριο: 500 μέτρα – 100 MW

Πίνακας 4: Η ορατότητα που έχουν οι επιβάτες του οχήματος (φορτηγό) που προκαλεί το ατύχημα στη θέση x=500 m

		Ορατότητα		
Χρ. Στιγμή	**Θέση**	**Αδιαφάνεια CAMATT**	**Ορατότητα**	**Ταχύτητα**
0	500			
10	500			
20	500			
30	500			
40	500			
50	500			
60	500			
70	500			
80	500			
90	500			
100	500			
110	500			
120	500	0,283	3,5	0,5
130	495	0,283	3,5	0,5
140	490	0,283	3,5	0,5
150	485	0,283	3,5	0,5
160	480	0,494	2,0	0,5
170	475	0,494	2,0	0,5
180	470	0,656	1,5	0,5
190	465	0,749	1,3	0,3
200	462	0,861	1,2	0,3

Από τη χρονική στιγμή 0 sec έως και τα 120 sec ο επιβάτης δεν έχει ξεκινήσει τη διαδικασία της εκκένωσης. Για ευκολία στην ανάγνωση των αποτελεσμάτων τα κελιά αυτά έχουν χρωματιστεί με πράσινο χρώμα.

Οι χρόνοι εξουδετέρωσης λόγω θερμότητας από ακτινοβολία που ακολουθούν, είναι τόσο μεγάλοι γιατί η ΔΑΣ μας γνωστοποιεί ότι κάτω από ένα ποσό θερμότητας που είναι ορισμένο περίπου στα 2,5 kW/m^2,το κλάσμα στον τύπο υπολογισμού της FED που έχει παρανομαστή το t_{Irad} θα λογίζεται ίσο με μηδέν. Δηλαδή ο χρόνος εξουδετέρωσης τείνει στο άπειρο. Η τιμή των 2,5 kW/m^2 πρακτικά υπερβαίνεται κοντά σε επιφανειακή πηγή θερμότητας περίπου διακοσίων (200) βαθμών κελσίου.

«*An irradiance of 2.5 kW/m^2 would correspond to a source surface temperature of approximately 200 °C, which is most likely to be exceeded near the fire, where conditions are changing rapidly*» (Report on Proposals A2007 – NFPA, σελ. 19).

Πίνακας 5: Η θερμότητα από ακτινοβολία που δέχονται οι επιβάτες του οχήματος (φορτηγό) που προκαλεί το ατύχημα στη θέση x=500 m και οι αντίστοιχοι χρόνοι εξουδετέρωσης με το σφάλμα τους (+25%)

		Από ακτινοβολία		
Χρ.Στιγμή	**Θέση**	**Θερμοκρασία**	**tIrad [min]**	**δtIrad**
0	500	10	∞	∞
10	500	12,5	∞	∞
20	500	16	∞	∞
30	500	19,7	∞	∞
40	500	23,5	∞	∞
50	500	27,4	∞	∞
60	500	31,5	∞	∞
70	500	35,7	∞	∞
80	500	40,4	∞	∞
90	500	45,5	∞	∞
100	500	51,3	∞	∞
110	500	58,1	∞	∞
120	500	66,2	∞	∞
130	495	73,6	∞	∞
140	490	82,1	∞	∞
150	485	91,7	∞	∞
160	480	102,6	∞	∞
170	475	114,5	∞	∞
180	470	126,9	∞	∞
190	465	138,9	∞	∞
200	462	152,1	∞	∞

Πίνακας 6: Η θερμότητα από μεταγωγή που δέχονται οι επιβάτες του οχήματος (φορτηγό) που προκαλεί το ατύχημα στη θέση x=500 m και οι αντίστοιχοι χρόνοι εξουδετέρωσης με το σφάλμα τους (+25%)

			Από μεταγωγή	
Χρ.Στιγμή	**Θέση**	**Θερμοκρασία T [˚C]**	**tIconv [min]**	**δtIconv [min]**
0	500	10	19905,36	4976,34
10	500	12,5	9321,29	2330,32
20	500	16	4026,82	1006,70
30	500	19,7	1985,11	496,28
40	500	23,5	1089,78	272,45
50	500	27,4	646,57	161,64
60	500	31,5	402,45	100,61
70	500	35,7	262,97	65,74
80	500	40,4	172,69	43,17
90	500	45,5	115,27	28,82
100	500	51,3	76,66	19,17
110	500	58,1	50,21	12,55
120	500	66,2	32,21	8,05
130	495	73,6	22,47	5,62
140	490	82,1	15,50	3,87
150	485	91,7	10,64	2,66
160	480	102,6	7,26	1,82
170	475	114,5	5,00	1,25
180	470	126,9	3,53	0,88
190	465	138,9	2,59	0,65
200	462	152,1	1,90	0,48

Πίνακας 7: Η συνολική κλασματική δόση (Fractional Effective Dose)

Χρ.Στιγμή	Θέση	proFED	δFED	FED	SumFED
0	500	0,00001	0,00000	0,00001	0,00001
10	500	0,00002	0,00000	0,00002	0,00003
20	500	0,00004	0,00001	0,00005	0,00009
30	500	0,00008	0,00002	0,00011	0,00019
40	500	0,00015	0,00004	0,00019	0,00038
50	500	0,00026	0,00006	0,00032	0,00070
60	500	0,00041	0,00010	0,00052	0,00122
70	500	0,00063	0,00016	0,00079	0,00201
80	500	0,00097	0,00024	0,00121	0,00322
90	500	0,00145	0,00036	0,00181	0,00503
100	500	0,00217	0,00054	0,00272	0,00775
110	500	0,00332	0,00083	0,00415	0,01190
120	500	0,00517	0,00129	0,00647	0,01836
130	495	0,00742	0,00185	0,00927	0,02763
140	490	0,01076	0,00269	0,01345	0,04108
150	485	0,01567	0,00392	0,01958	0,06066
160	480	0,02295	0,00574	0,02869	0,08935
170	475	0,03333	0,00833	0,04166	0,13101
180	470	0,04728	0,01182	0,05910	0,19011
190	465	0,06428	0,01607	0,08035	0,27045
200	462	0,08752	0,02188	0,10940	0,37986

Η συνολική κλασματική δόση, υπολογίζεται αρχικά από τον τύπο

$$FED = \Sigma\left(\frac{1}{t_{Irad}} + \frac{1}{t_{Icon}}\right)\Delta t_{t_1}^{t_2}$$

όπως ορίστηκε παραπάνω (proFED). Στη συνέχεια υπολογίζεται το σφάλμα της (δFED), το οποίο είναι διαδοχικό σφάλμα που προέρχεται από την αβεβαιότητα του υπολογισμού των χρόνων εξουδετέρωσης t_{Irad} και t_{Iconv}. Έπειτα υπολογίστηκε η FED θέσης προσθέτοντας τα δύο προηγούμενα κελιά. Το αν θα ξεπεράσει η FED το κρίσιμο όριο 0,3 εξαρτάται από το άθροισμά της, σε όλες τις προηγούμενες θέσεις στις οποίες μετρήθηκε. Βλέπουμε λοιπόν ότι ο οδηγός του φορτηγού που έχει

ακινητοποιηθεί στα 500 μέτρα από το στόμιο της σήραγγας, θα εξουδετερωθεί μετά από 200 δευτερόλεπτα, στη θέση x= 462 μέτρα.

Παράλληλα με την εξέταση που κάνω για το αν οι χρήστες της σήραγγας εξουδετερώνονται από τη θερμότητα που απορροφούν, πρέπει να εξετάσω ποίο θα είναι το αποτέλεσμα στην υγεία τους, λόγω των ρύπων που αναπνέουν.

Πίνακας 8: Η συνολική συγκέντρωση ρύπων που αναπνέουν οι επιβάτες του οχήματος που είναι ακινητοποιημένο στη θέση x=500 μέτρα

Χρ. Στιγμή	Συγκεντρώσεις ρύπων [ppm]
0	0
10	9
20	23
30	37
40	51
50	66
60	82
70	100
80	120
90	144
100	172
110	184
120	215
130	288
140	338
150	399
160	470
170	553
180	656
190	754
200	809

Εδώ βλέπουμε ότι οι επιβάτες του οχήματος δεν αντιμετώπισαν κάποιον κίνδυνο από την εισπνοή ρυπογόνων ουσιών. Ο έλεγχος αυτός πραγματοποιήθηκε μέχρι τα 200 sec όπου βρέθηκε ότι οι επιβάτες του φορτηγού εξουδετερώνονται από τη θερμότητα που απορροφούν. Αν δεν είχε προκύψει ο θάνατος των επιβατών στα 200 δευτερόλεπτα λόγο θερμότητας, θα έλεγχα τη συγκέντρωση σε ppm (parts per million) μέχρις ότου οι επιβάτες φτάσουν σε κάποια έξοδο κινδύνου.

Η ίδια διαδικασία και τα ανάλογα υπολογιστικά φύλλα excel καταστρώθηκαν για όλα τα οχήματα και τους επιβάτες τους, για κάθε σενάριο που εξετάστηκε.