



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

Μελέτη συμπεριφοράς εκκένωσης οδικής σήραγγας  
στην περίπτωση χρηστών σε απόσταση από τροχαίο  
ατύχημα, με την χρήση εικονικής πραγματικότητας.

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Του

Χρήστου Φρουδάκη

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Μαρία Μενεγάκη

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2022

## Περιεχόμενα

|  |     |
|--|-----|
| Πίνακας Εικόνων και Διαγραμμάτων .....                               | ii  |
| Περίληψη .....   | vi  |
| Abstract .....   | vii |
| Εισαγωγή.....  | 1   |
| Κεφάλαιο 1: Εκκένωση και Γενικά Χαρακτηριστικά .....                 | 2   |
| Βασικές αρχές σχεδιασμού εκκένωσης.....                              | 2   |
| Τύποι εκκένωσης.....   | 2   |
| Κίνδυνοι διαδικασιών εκκένωσης.....                                  | 3   |
| Στάδια διαδικασίας εκκένωσης .....                                   | 4   |
| Διαδικασία εκκένωσης .....   | 7   |
| Εκτίμηση χρόνων εκκένωσης.....                                       | 7   |
| Ανάλυση εκτίμησης παραμέτρων χρόνου κίνησης $t_e$ .....              | 16  |
| Υπολογισμός ταχύτητας βαδίσματος κατά την εκκένωση .....             | 16  |
| Υπολογισμός ειδικής ροής $F_s$ .....                                 | 21  |
| Υπολογισμός ικανότητας ροής – Παροχή $Q$ .....                       | 22  |
| Επιρροή καπνού στην κίνηση .....                                     | 25  |
| Ανθρώπινη Συμπεριφορά .....  | 26  |
| Ένοικοι.....   | 27  |
| Προσωπικό Ελέγχου .....  | 29  |
| Προσωπικό έκτακτης ανάγκης .....                                     | 30  |
| Χαρακτηριστικά Καταστροφών και Επιπτώσεις στον Άνθρωπο.....          | 32  |
| Επιπτώσεις στον Άνθρωπο.....   | 32  |
| Εκκένωση σε Σήραγγες.....  | 44  |
| Ατυχήματα σε Σήραγγες .....  | 44  |
| Κανονισμοί Εκκένωσης Σήραγγας.....                                   | 50  |
| Κεφάλαιο 2: Προγράμματα 3DS Max, Unreal Engine 4 και Pathfinder..... | 61  |
| 3DS Max .....  | 61  |
| Unreal Engine 4.....   | 63  |
| Virtual Reality .....  | 65  |
| Pathfinder .....   | 66  |
| Κεφάλαιο 3: Παρουσίαση Μοντέλων και Σεναρίων.....                    | 69  |
| Μοντέλο σήραγγας στην UE4.....                                       | 69  |
| Περιγραφή Σεναρίου Εικονικής Πραγματικότητας .....                   | 71  |
| Προσομοίωση Σεναρίων .....   | 73  |

|   |     |
|---|-----|
| Προσομοίωση στο λογισμικό Pathfinder .....                          | 74  |
| Φωτιά .....   | 74  |
| Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα Πειράματος Εικονικής Πραγματικότητας ..... | 84  |
| Σενάριο 1 από Απόσταση (ΣΑ1).....                                   | 84  |
| Σενάριο 2 από Απόσταση (ΣΑ2).....                                   | 89  |
| Σενάριο 3 από Απόσταση (ΣΑ3).....                                   | 95  |
| Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα .....                                    | 101 |
| Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα Προσομοίωσης Pathfinder .....              | 106 |
| Σενάριο 1- ΣΠ1 .....  | 106 |
| Σενάριο 2-ΣΠ2 .....   | 115 |
| Σενάριο 3-ΣΠ3 .....   | 123 |
| Σενάριο 4-ΣΠ4 .....   | 131 |
| Συμπεράσματα .....  | 143 |
| Βιβλιογραφία.....   | 145 |

## Πίνακας Εικόνων και Διαγραμμάτων

|   |    |
|---|----|
| Εικόνα 1: Στάδια διαδικασίας εκκένωσης[5].....  | 4  |
| Εικόνα 2: Συμβολή παροχών σε κόμβο [6].....   | 24 |
| Εικόνα 3: Μεταβολή πλάτους σε όδευση διαφυγής [6] .....                                   | 25 |
| Εικόνα 4: Η ταχύτητα κίνησης των εθελοντών σε ερεθιστικό και μη ερεθιστικό καπνό[14]..... | 34 |
| Εικόνα 5: Σήμα σήραγγας[19] .....   | 54 |
| Εικόνα 6: Τηλέφωνο έκτακτης ανάγκης και πυροσβεστήρας[19] .....                           | 54 |
| Εικόνα 7: Σήμανση επι της εξόδου κινδύνου[19].....  | 55 |
| Εικόνα 8: Σήμανση πλησιέστερης εξόδου κινδύνου[19] .....                                  | 55 |
| Εικόνα 9: Τυπικός εξοπλισμός ασφαλείας στην σήραγγα [20].....                             | 57 |
| Εικόνα 10: Σηματοδότηση και εξοπλισμός ασφαλείας [21] .....                               | 58 |
| Εικόνα 11: Σηματοδότηση σήραγγας [21] .....   | 58 |
| Εικόνα 12: Σηματοδότηση σήραγγας [22] .....   | 59 |
| Εικόνα 13: Περιβάλλον Χρήστη στο 3DS Max.....   | 62 |
| Εικόνα 14: Επιλογή Project στην UE4.....  | 64 |
| Εικόνα 15: Πρότυπα Παιχνιδιών στην UE4.....   | 64 |
| Εικόνα 16: Παράδειγμα Blueprint στην UE4.....   | 65 |
| Εικόνα 17: Μοντέλο του Theatre de Vest στο Άλκμααρ της Ολλανδίας[36].....                 | 66 |
| Εικόνα 18: Παράδειγμα τρισδιάστατου τριγωνικού πλέγματος[36] .....                        | 67 |
| Εικόνα 19: Τυπική Διατομή Σήραγγας .....  | 69 |
| Εικόνα 20: Άποψη μοντέλου σήραγγας στην UE4 .....   | 70 |
| Εικόνα 21: Άποψη εσωτερικού της σήραγγας στην UE4 .....                                   | 70 |
| Εικόνα 22: Άποψη εξόδου διαφυγής, Π.Φ. και τηλεφώνου.....                                 | 70 |
| Εικόνα 23: Σημείο ατυχήματος και ακινητοποιημένα αυτοκίνητα στο βάθος.....                | 71 |
| Εικόνα 25: Όχημα χρήστη με περιορισμένη οπτική επαφή ως προς το ατύχημα .....             | 72 |
| Εικόνα 26: Ανάπτυξη φωτιάς στα 100 δευτερόλεπτα (Καπνός).....                             | 74 |
| Εικόνα 27: Ανάπτυξη φωτιάς στα 100 δευτερόλεπτα (Μονοξείδιο του άνθρακα).....             | 75 |
| Εικόνα 28: Ανάπτυξη φωτιάς στα 100 δευτερόλεπτα (Θερμοκρασία) .....                       | 75 |

|  |     |
|--|-----|
| Εικόνα 29: Ανάπτυξη φωτιάς στα 100 δευτερόλεπτα (Ορατότητα) .....                                  | 76  |
| Εικόνα 30: Ανάπτυξη φωτιάς στα 200 δευτερόλεπτα (Καπνός).....                                      | 76  |
| Εικόνα 31: Ανάπτυξη φωτιάς στα 200 δευτερόλεπτα (Μονοξείδιο του άνθρακα).....                      | 76  |
| Εικόνα 32: Ανάπτυξη φωτιάς στα 200 δευτερόλεπτα (Θερμοκρασία) .....                                | 77  |
| Εικόνα 33: Ανάπτυξη φωτιάς στα 200 δευτερόλεπτα (Ορατότητα) .....                                  | 77  |
| Εικόνα 34: Ανάπτυξη φωτιάς στα 300 δευτερόλεπτα (Καπνός).....                                      | 77  |
| Εικόνα 35: Ανάπτυξη φωτιάς στα 300 δευτερόλεπτα (Μονοξείδιο του άνθρακα).....                      | 78  |
| Εικόνα 36: Ανάπτυξη φωτιάς στα 300 δευτερόλεπτα (Θερμοκρασία) .....                                | 78  |
| Εικόνα 37: Ανάπτυξη φωτιάς στα 300 δευτερόλεπτα (Ορατότητα) .....                                  | 78  |
| Εικόνα 38: Ανάπτυξη φωτιάς στα 400 δευτερόλεπτα (Καπνός).....                                      | 79  |
| Εικόνα 39: Ανάπτυξη φωτιάς στα 400 δευτερόλεπτα (Μονοξείδιο του άνθρακα).....                      | 79  |
| Εικόνα 40: Ανάπτυξη φωτιάς στα 400 δευτερόλεπτα (Θερμοκρασία) .....                                | 79  |
| Εικόνα 41: Ανάπτυξη φωτιάς στα 400 δευτερόλεπτα (Ορατότητα) .....                                  | 80  |
| Εικόνα 42: Ανάπτυξη φωτιάς στα 500 δευτερόλεπτα (Καπνός).....                                      | 80  |
| Εικόνα 43: Ανάπτυξη φωτιάς στα 500 δευτερόλεπτα (Μονοξείδιο του άνθρακα).....                      | 80  |
| Εικόνα 44: Ανάπτυξη φωτιάς στα 500 δευτερόλεπτα (Θερμοκρασία) .....                                | 81  |
| Εικόνα 45: Ανάπτυξη φωτιάς στα 500 δευτερόλεπτα (Ορατότητα) .....                                  | 81  |
| Εικόνα 46: Σενάριο 4 Pathfinder.....   | 83  |
| Εικόνα 47: Ένοικος κοντά στο ατύχημα.....  | 106 |
| Εικόνα 48:Θέση ενοίκου με μέγιστο FED .....  | 108 |
| Εικόνα 49:Θέση ενοίκου με μέγιστη θερμοκρασία.....   | 110 |
| Εικόνα 50: Θέση του ενοίκου με την μέγιστη πρόσληψη μονοξειδίου του άνθρακα.....                   | 112 |
| Εικόνα 51: Ένοικος κοντά στο ατύχημα.....  | 116 |
| Εικόνα 52:Θέση ενοίκου με μέγιστο FED .....  | 118 |
| Εικόνα 53:Θέση ενοίκου με μέγιστη θερμοκρασία.....   | 120 |
| Εικόνα 54: Ένοικος κοντά στο ατύχημα.....  | 123 |
| Εικόνα 55:Θέση ενοίκου με μέγιστο FED .....  | 125 |
| Εικόνα 56:Θέση ενοίκου με μέγιστη θερμοκρασία και μέγιστη πρόσληψη μονοξειδίου του<br>άνθρακα..... | 127 |
| Εικόνα 57: Ένοικος κοντά στο ατύχημα.....  | 131 |
| Εικόνα 58:Θέση ενοίκου με μέγιστο FED .....  | 133 |
| Εικόνα 59:Θέση ενοίκου με μέγιστη θερμοκρασία.....   | 135 |
| <br>   |     |
| Διάγραμμα 1: Ισχύς φωτιάς σε σχέση με τον χρόνο .....  | 74  |
| Διάγραμμα 2: Χρόνος εκκένωσης ΣΑ 1.....  | 84  |
| Διάγραμμα 3: Χρόνος ανταπόκρισης ΣΑ 1.....   | 85  |
| Διάγραμμα 4: Συνολικοί χρόνοι ΣΑ 1.....  | 85  |
| Διάγραμμα 5: Αποστάσεις που διανύθηκαν ΣΑ 1.....   | 86  |
| Διάγραμμα 6: Συσχέτιση μέσου χρόνου εκκένωσης και εκπαίδευσης πυρασφάλειας.....                    | 87  |
| Διάγραμμα 7:Συσχέτιση μέσου χρόνου ανταπόκρισης και εκπαίδευσης πυρασφάλειας.....                  | 87  |
| Διάγραμμα 8:Συσχέτιση μέσου χρόνου ανταπόκρισης και αντίληψης πινακίδας εύφλεκτών υλικών<br>.....  | 88  |
| Διάγραμμα 9: Ποσοστά επιλογών εξόδου.....  | 88  |
| Διάγραμμα 10: Ποσοστά τρόπων επιλογής εξόδου .....   | 89  |
| Διάγραμμα 11: Χρόνος εκκένωσης ΣΑ 2.....   | 90  |
| Διάγραμμα 12: Χρόνος ανταπόκρισης ΣΑ 2.....  | 90  |
| Διάγραμμα 13: Σχέση Χρόνου ανταπόκρισης με ηχητικά και οπτικά ερεθίσματα.....                      | 91  |
| Διάγραμμα 14: Συνολικοί χρόνοι ΣΑ 2.....   | 91  |
| Διάγραμμα 15: Αποστάσεις που διανύθηκαν ΣΑ 2.....  | 92  |

|  |     |
|--|-----|
| Διάγραμμα 16: Συσχέτιση μέσου χρόνου εκκένωσης και εκπαίδευσης πυρασφάλειας.....   | 93  |
| Διάγραμμα 17: Συσχέτιση μέσου χρόνου ανταπόκρισης και εκπαίδευσης πυρασφάλειας.....  | 93  |
| Διάγραμμα 18: Συσχέτιση μέσου χρόνου ανταπόκρισης και αντίληψης πινακίδας εύφλεκτών υλικών .....                                   | 94  |
| Διάγραμμα 19: Ποσοστά επιλογών εξόδου.....   | 94  |
| Διάγραμμα 20: Ποσοστά τρόπων επιλογής εξόδου .....   | 95  |
| Διάγραμμα 21: Χρόνος εκκένωσης ΣΑ 3.....   | 96  |
| Διάγραμμα 22: Χρόνος ανταπόκρισης ΣΑ 3.....  | 96  |
| Διάγραμμα 23: Συνολικοί χρόνοι ΣΑ 3.....   | 97  |
| Διάγραμμα 24: Αποστάσεις που διανύθηκαν ΣΑ 3.....  | 97  |
| Διάγραμμα 25: Συσχέτιση μέσου χρόνου εκκένωσης και εκπαίδευσης πυρασφάλειας.....   | 98  |
| Διάγραμμα 26: Συσχέτιση μέσου χρόνου ανταπόκρισης και εκπαίδευσης πυρασφάλειας.....  | 99  |
| Διάγραμμα 27: Συσχέτιση μέσου χρόνου ανταπόκρισης και αντίληψης πινακίδας εύφλεκτών υλικών .....                                   | 99  |
| Διάγραμμα 28: Ποσοστά επιλογών εξόδου.....   | 100 |
| Διάγραμμα 29: Ποσοστά τρόπων επιλογής εξόδου .....   | 100 |
| Διάγραμμα 58: Μέσοι χρόνοι εκκένωσης όλων των σεναρίων .....   | 101 |
| Διάγραμμα 59: Μέσος χρόνος ανταπόκρισης όλων των σεναρίων.....   | 102 |
| Διάγραμμα 60: Συνολικός χρόνος όλων των σεναρίων .....   | 102 |
| Διάγραμμα 61: Μέση Απόσταση που διανύθηκε για όλα τα σεναρία .....   | 103 |
| Διάγραμμα 62: Αρχική Επιλογή Κίνησης Χρηστών.....  | 104 |
| Διάγραμμα 63: Συγκεντρωτικό διάγραμμα επιλογής εξόδου.....   | 104 |
| Διάγραμμα 64: Συγκεντρωτικό διάγραμμα τρόπου επιλογής εξόδου .....   | 105 |
| Διάγραμμα 65: Ποσοστό Συγχυσμένων από αυτούς που βγήκαν από το στόμιο .....  | 105 |
| Διάγραμμα 66: Όγκος μονοξειδίου του άνθρακα για τον ένοικο κοντά στο ατύχημα.....  | 107 |
| Διάγραμμα 67: Θερμοκρασία για τον ένοικο κοντά στο ατύχημα.....  | 107 |
| Διάγραμμα 68: FED για τον ένοικο κοντά στο ατύχημα .....   | 108 |
| Διάγραμμα 69: Όγκος μονοξειδίου του άνθρακα για τον ένοικο κοντά με μέγιστο FED.....   | 109 |
| Διάγραμμα 70: FED για τον ένοικο με μέγιστο FED.....   | 109 |
| Διάγραμμα 71: θερμοκρασία για τον ένοικο με μέγιστο FED .....  | 110 |
| Διάγραμμα 72: Όγκος μονοξειδίου του άνθρακα για τον ένοικο με μέγιστη θερμοκρασία .....  | 111 |
| Διάγραμμα 73: Θερμοκρασία ενοίκου με την μέγιστη θερμοκρασία .....   | 111 |
| Διάγραμμα 74: FED ενοίκου με την μέγιστη θερμοκρασία.....  | 112 |
| Διάγραμμα 75: Θερμοκρασία ενοίκου με την μέγιστη πρόσληψη μονοξειδίου του άνθρακα.....   | 113 |
| Διάγραμμα 76: Όγκος μονοξειδίου του άνθρακα για τον ένοικο με την μέγιστη πρόσληψη μονοξειδίου του άνθρακα.....                    | 113 |
| Διάγραμμα 77: FED ενοίκου με την μέγιστη πρόσληψη μονοξειδίου του άνθρακα .....  | 114 |
| Διάγραμμα 78: Θερμοκρασία - Χρόνος.....  | 114 |
| Διάγραμμα 79: Μονοξείδιο του άνθρακα - Χρόνος.....   | 115 |
| Διάγραμμα 80: FED – Χρόνος.....  | 115 |
| Διάγραμμα 81: Όγκος μονοξειδίου του άνθρακα για τον ένοικο κοντά στο ατύχημα.....  | 116 |
| Διάγραμμα 82: Θερμοκρασία για τον ένοικο κοντά στο ατύχημα.....  | 117 |
| Διάγραμμα 83: FED για τον ένοικο κοντά στο ατύχημα .....   | 117 |
| Διάγραμμα 84: Όγκος μονοξειδίου του άνθρακα για τον ένοικο κοντά με μέγιστο FED και μέγιστη πρόσληψη μονοξειδίου του άνθρακα ..... | 118 |
| Διάγραμμα 85: FED για τον ένοικο με μέγιστο FED και μέγιστη πρόσληψη μονοξειδίου του άνθρακα.....                                  | 119 |
| Διάγραμμα 86: θερμοκρασία για τον ένοικο με μέγιστο FED και μέγιστη πρόσληψη μονοξειδίου του άνθρακα .....                         | 119 |
| Διάγραμμα 87: Όγκος μονοξειδίου του άνθρακα για τον ένοικο με μέγιστη θερμοκρασία .....  | 120 |
| Διάγραμμα 88: Θερμοκρασία ενοίκου με την μέγιστη θερμοκρασία .....   | 121 |

|  |     |
|--|-----|
| Διάγραμμα 89: FED ενοίκου με την μέγιστη θερμοκρασία.....  | 121 |
| Διάγραμμα 90: Θερμοκρασία - Χρόνος.....  | 122 |
| Διάγραμμα 91: Μονοξειδίο του άνθρακα - Χρόνος.....   | 122 |
| Διάγραμμα 92: FED – Χρόνος.....  | 123 |
| Διάγραμμα 93: Όγκος μονοξειδίου του άνθρακα για τον ένοικο κοντά στο ατύχημα.....  | 124 |
| Διάγραμμα 94: Θερμοκρασία για τον ένοικο κοντά στο ατύχημα.....  | 124 |
| Διάγραμμα 95: FED για τον ένοικο κοντά στο ατύχημα .....   | 125 |
| Διάγραμμα 96:Όγκος μονοξειδίου του άνθρακα για τον ένοικο κοντά με μέγιστο FED.....  | 126 |
| Διάγραμμα 97:FED για τον ένοικο με μέγιστο FED.....  | 126 |
| Διάγραμμα 98: θερμοκρασία για τον ένοικο με μέγιστο FED .....  | 127 |
| Διάγραμμα 99:Όγκος μονοξειδίου του άνθρακα για τον ένοικο με μέγιστη θερμοκρασία και μέγιστη πρόσληψη μονοξειδίου του άνθρακα..... | 128 |
| Διάγραμμα 100: Θερμοκρασία ενοίκου με την μέγιστη θερμοκρασία και μέγιστη πρόσληψη μονοξειδίου του άνθρακα.....                    | 128 |
| Διάγραμμα 101: FED ενοίκου με την μέγιστη θερμοκρασία και μέγιστη πρόσληψη μονοξειδίου του άνθρακα .....                           | 129 |
| Διάγραμμα 102: Θερμοκρασία - Χρόνος.....   | 129 |
| Διάγραμμα 103: Μονοξειδίο του άνθρακα - Χρόνος.....  | 130 |
| Διάγραμμα 104: FED – Χρόνος.....   | 130 |
| Διάγραμμα 105: Όγκος μονοξειδίου του άνθρακα για τον ένοικο κοντά στο ατύχημα.....   | 132 |
| Διάγραμμα 106: Θερμοκρασία για τον ένοικο κοντά στο ατύχημα.....   | 132 |
| Διάγραμμα 107: FED για τον ένοικο κοντά στο ατύχημα .....  | 133 |
| Διάγραμμα 108:Όγκος μονοξειδίου του άνθρακα για τον ένοικο κοντά με μέγιστο FED.....   | 134 |
| Διάγραμμα 109:FED για τον ένοικο με μέγιστο FED.....   | 134 |
| Διάγραμμα 110: θερμοκρασία για τον ένοικο με μέγιστο FED .....   | 135 |
| Διάγραμμα 111:Όγκος μονοξειδίου του άνθρακα για τον ένοικο με μέγιστη θερμοκρασία .....  | 136 |
| Διάγραμμα 112: Θερμοκρασία ενοίκου με την μέγιστη θερμοκρασία .....  | 136 |
| Διάγραμμα 113: FED ενοίκου με την μέγιστη θερμοκρασία.....   | 137 |
| Διάγραμμα 114: Θερμοκρασία - Χρόνος.....   | 137 |
| Διάγραμμα 115: Μονοξειδίο του άνθρακα - Χρόνος.....  | 138 |
| Διάγραμμα 116: FED – Χρόνος.....   | 138 |
| Διάγραμμα 117: Θερμοκρασία ID 0 σε όλα τα σενάρια .....  | 140 |
| Διάγραμμα 118: FED ID 0 σε όλα τα σενάρια.....   | 140 |
| Διάγραμμα 119: Πρόσληψη μονοξειδίου ID 0 σε όλα τα σενάρια .....   | 141 |
| Διάγραμμα 120: Θερμοκρασία ID 49 σε όλα τα σενάρια.....  | 141 |
| Διάγραμμα 121: FED ID 49 σε όλα τα σενάρια.....  | 142 |
| Διάγραμμα 122: Πρόσληψη μονοξειδίου ID 49 σε όλα τα σενάρια .....  | 142 |

## Περίληψη

Οι οδικές σήραγγες αναπτύσσονται με ταχείς ρυθμούς και συνοδεύονται αναπόφευκτα από τροχαία ατυχήματα τα οποία λαμβάνουν χώρα μέσα σε αυτές. Ο απαιτούμενος χρόνος ασφαλούς εξόδου (RSET) είναι ένας κρίσιμος παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό των μεθόδων μετριασμού της πυρκαγιάς σε σήραγγες. Σε μια ιδιαίτερη περιοχή όπως οι σήραγγες που η διαδρομή εκκένωσης επηρεάζεται από την έλλειψη ορατότητας λόγω της παρουσίας καπνού, θα πρέπει να προσδιοριστεί η συμπεριφορά εκκένωσης συμπεριλαμβανομένου του χρόνου προεκκένωσης (ενεργοποίηση συναγερμού, χρόνος αντίδρασης, εγκατάλειψη οχήματος κ.λπ.). Ο σχεδιασμός της ενδεικτικής οδικής σήραγγας πλήρους μεγέθους σε περιβάλλον εικονικής πραγματικότητας (VR) και προσομοίωσης CFD και η διαμόρφωση των σεναρίων για μελέτη της συμπεριφοράς του επιβάτη πραγματοποιήθηκαν σε συνεργασία με τον κ. Κωτσάκη Βασίλειο. Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκαν τα 3 από αυτά που έχουν να κάνουν με τη συμπεριφορά των χρηστών που βρίσκονται σε απόσταση από ένα ατύχημα. Τα υπόλοιπα 3 σενάρια εξετάστηκαν από τον συνάδελφο Κωτσάκη Βασίλειο, μεταπτυχιακό φοιτητή του ΔΠΜΣ: ΣΚΥΕ και παρουσιάζονται στην διπλωματική του εργασία. Οι κύριοι παράγοντες που μελετήθηκαν είναι: (α) η απόφαση εκκένωσης (β) ο χρόνος πριν από την εκκένωση και (γ) η μέθοδος εύρεσης διαδρομής. Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκαν τα 3 από αυτά.

Τα αποτελέσματα αποκαλύπτουν ότι ο χρόνος πριν από την εκκένωση δεν εξαρτάται από τον τύπο του ερεθίσματος έκτακτης ανάγκης (καπνός, συναγερμός, άλλοι επιβάτες). Οι περισσότεροι συμμετέχοντες προσπάθησαν να βρουν τη διαδρομή εξόδου τους αναζητώντας τις πινακίδες εξόδου. Επιπλέον, διανύοντας μια διαδρομή με καπνό, κάποιοι επιβάτες χάνουν την κοντινή έξοδο και βρίσκουν διέξοδο σε μια πιο μακρινή έξοδο.

Σημειώνεται ότι για την εξαγωγή των συμπερασμάτων λήφθηκαν υπόψη τα αποτελέσματα που προέκυψαν τόσο από τη παρούσα διπλωματική όσο και από τη διπλωματική εργασία του κ. Β. Κωτσάκη.

## Abstract

Underground transport tunnels are developing rapidly and are inevitably, accompanied by road accidents that can lead to major fires. The required safety egress time (RSET) is a crucial factor to be considered in the design of fire mitigation methods in tunnels. In an unknown area such as tunnels that the evacuation route is affected by the lack of visibility due to the presence of smoke, the evacuation behavior including the pre-evacuation time (alarm activation, reaction time, vehicle abandonment etc.) should be determined. The design of the indicative full-size road tunnel in a virtual reality (VR) environment and CFD simulation and the configuration of the scenarios for the study of the passenger's behavior were realized in collaboration with Mr. Kotsakis Vasilios. In this thesis, 3 of them were examined, which have to do with the behavior of users who are at a distance from an accident. The remaining 3 scenarios were examined by my colleague Vasilios Kotsakis, a postgraduate student of MSC: Design and Construction of Tunnels and are presented in his diploma thesis. The main factors studied are: (a) the evacuation decision (b) the time before the evacuation and (c) the route finding method. In this thesis, 3 of them were examined. The main factors studied in this research are: (a) evacuation decision (b) pre-evacuation time and (c) route-finding method.

The results reveal that the pre-evacuation time doesn't depend on the type of emergency warning signals (smoke, alarm, other occupants). Most participants tried to find their egress route by searching the exit signs. Moreover, by traveling through a smoky route some occupants miss the nearby exit and find a way out at a more distant exit.

It is noted that in order to draw the conclusions, the results obtained from both the present thesis and the thesis of Mr. V. Kotsakis were taken into account.





## Εισαγωγή

Η ανάπτυξη και δυναμική που εμφανίζουν τα τελευταία χρόνια τα υπόγεια έργα, τροφοδοτείται από το γενικότερο πνεύμα της αιφόρου ανάπτυξης που καθορίζει σε στρατηγικό επίπεδο τις επιλογές του σύγχρονου κόσμου. Η απότομη αύξηση του πληθυσμού, σε συνδυασμό με την έλλειψη ανάλογου χωροταξικού σχεδιασμού, οδήγησε πολλές φορές κατά το παρελθόν σε σημαντικότερη υποβάθμιση της ποιότητας ζωής, ιδιαίτερα στις αστικές περιοχές, όπου πολύ συχνά παρατηρείται το φαινόμενο έλλειψης χώρου και περιβαλλοντικών προϋποθέσεων για την ανάπτυξη ζωτικών δραστηριοτήτων [1].

Το πρωταρχικό μέλημα σε ένα σχεδιασμό ενός υπόγειου έργου είναι η ασφάλεια των ατόμων που συμμετέχουν σε αυτό, καθώς και μετέπειτα στη χρήση του. Η ασφάλεια παρέχεται σύμφωνα με τις νομοθετικές και κανονιστικές διατάξεις που υφίστανται (NFPA, Π.Δ 230/07). Μια βασική στρατηγική αντιμετώπισης καταστάσεων έκτακτης ανάγκης για την ασφάλεια των ανθρώπων είναι η εκκένωση [2].

Η εκκένωση αφορά τη μετακίνηση των ενοίκων σε μια ασφαλέστερη τοποθεσία. Ωστόσο, για να είναι αποτελεσματική, πρέπει να σχεδιαστεί και να εκτελεστεί σωστά. Η όλη διαδικασία της εκκένωσης συνήθως περιλαμβάνει και την επιστροφή του οργανισμού στις δραστηριότητες του. Η φύση μιας συγκεκριμένης καταστροφής καθώς και ενός επικείμενου κινδύνου για την ασφάλεια των ενοίκων ενός οργανισμού, είναι βασικό μέλημα που καθορίζει την έναρξη της εκκένωσης [3]. Η συστηματική και πλήρης διαφυγή όλων των ενοίκων απαιτεί προσεκτική πρόβλεψη των διαδρομών εξόδου και καταμέτρηση όλων των ατόμων μετά την εκκένωση. Ένας σωστός και πλήρης σχεδιασμός, που λαμβάνει υπόψη όλους τους παράγοντες, μπορεί να οδηγήσει σε μια γρήγορη και ομαλή εκκένωση με ελάχιστα προβλήματα [4].

Για την βελτιστοποίηση των σχεδίων εκκένωσης χώρου, είναι απαραίτητη η προσομοίωση αυτής μέσω διάφορων μοντέλων. Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία η προσομοίωση της εκκένωσης έγινε με χρήση μοντέλου εικονικής πραγματικότητας (Virtual Reality). Συγκεκριμένα μελετάται ο χρόνος εκκένωσης του χρήστη και η συμπεριφορά του σε διάφορα σενάρια πυρκαγιάς εντός σήραγγας.

# Κεφάλαιο 1: Εκκένωση και Γενικά Χαρακτηριστικά

## Βασικές αρχές σχεδιασμού εκκένωσης

Οι βασικές αρχές σχεδιασμού εκκένωσης ταυτίζονται με αυτές του γενικού σχεδιασμού έκτακτης ανάγκης και περιλαμβάνουν [3]:

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

## Τύποι εκκένωσης

Οι τύποι της εκκένωσης καθορίζονται από δύο παράγοντες:

1. Το χρόνο εκκένωσης
2. Τον τρόπο διεξαγωγής τους.

Οι “χρονικοί” τύποι εκκένωσης αποτελούνται από δύο κατηγορίες:

### **Άμεση Εκκένωση**

Μια εκκένωση που προκύπτει λόγω ατυχήματος, απαιτεί άμεση αντίδραση και ως εκ τούτου επιτρέπει μικρή ή καθόλου προειδοποίηση, καθώς και περιορισμένο χρόνο προετοιμασίας. Καταστάσεις που απαιτούν τέτοιου είδους άμεση αντίδραση για εκκένωση είναι η διαρροή επικίνδυνων υλικών, εκδήλωση ανεξέλεγκτης φωτιάς, σεισμός κ.ά. [3].

### **Προειδοποιημένη Εκκένωση**

Τέτοιου τύπου εκκένωση προκύπτει από ένα γεγονός στο οποίο έχει προηγηθεί κάποια προειδοποίηση και δεν περιορίζει το χρόνο προετοιμασίας. Παραδείγματα αυτού του τύπου γεγονότων είναι κυρίως ακραία καιρικά φαινόμενα όπως πλημμύρες, κυκλώνες και άλλα.

Υπάρχουν δύο τρόποι εκκένωσης: η μερική εκκένωση και η ολική ή πλήρης εκκένωση. Αν και η φύση μιας συγκεκριμένης καταστροφής καθώς και ενός επικείμενου κινδύνου για την ασφάλεια των ενοίκων ενός οργανισμού καθορίζει τον τύπο της εκκένωσης, η αμεσότητα της απειλής πρέπει επίσης να λαμβάνεται υπόψη [3].

### **Μερική Εκκένωση**

Σε μια μερική εκκένωση, οι ένοικοι οι οποίοι επηρεάζονται άμεσα, ή των οποίων η ασφάλεια μπορεί να τεθεί σε κίνδυνο από την κατάσταση έκτακτης ανάγκης, πρέπει να μεταφερθούν από την απειλούμενη περιοχή σε ασφαλή χώρο. Αυτός ο ασφαλής χώρος μπορεί να βρίσκεται είτε εντός της εγκατάστασης είτε μακριά από αυτή. Για παράδειγμα, όταν ανιχνεύεται μια πυρκαγιά σε ένα πολυώροφο κτίριο, οι ένοικοι στα κοντινά πατώματα πάνω και κάτω από την προέλευση της φωτιάς, πρέπει να εκκενώσουν το χώρο άμεσα [3].

### **Πλήρης Εκκένωση**

Σε μια πλήρη εκκένωση, όλοι οι ένοικοι πρέπει να εκκενώσουν τις εγκαταστάσεις. Σε ορισμένες περιπτώσεις, και πάλι ανάλογα με τη φύση και την αμεσότητα της έκτακτης ανάγκης, μέλη της ομάδας επέμβασης μπορεί να παραμείνουν πίσω για να εξασφαλιστεί ότι όλοι οι άλλοι ένοικοι έχουν εκκενώσει το χώρο και να εξετασθεί η κατάσταση του [3].

### **Κίνδυνοι διαδικασιών εκκένωσης**

Αν η εκκένωση δεν έχει προγραμματιστεί και ολοκληρωθεί σωστά μπορεί να οδηγήσει σε ακόμη περισσότερους τραυματισμούς (ή θανάτους) και υλικές ζημιές από αυτές που προκύπτουν από την αρχική πηγή της εκδήλωσης της έκτακτης ανάγκης. Κατά τη διάρκεια μιας εκκένωσης, ελλοχεύουν διάφορων ειδών κίνδυνοι όπως [4]:

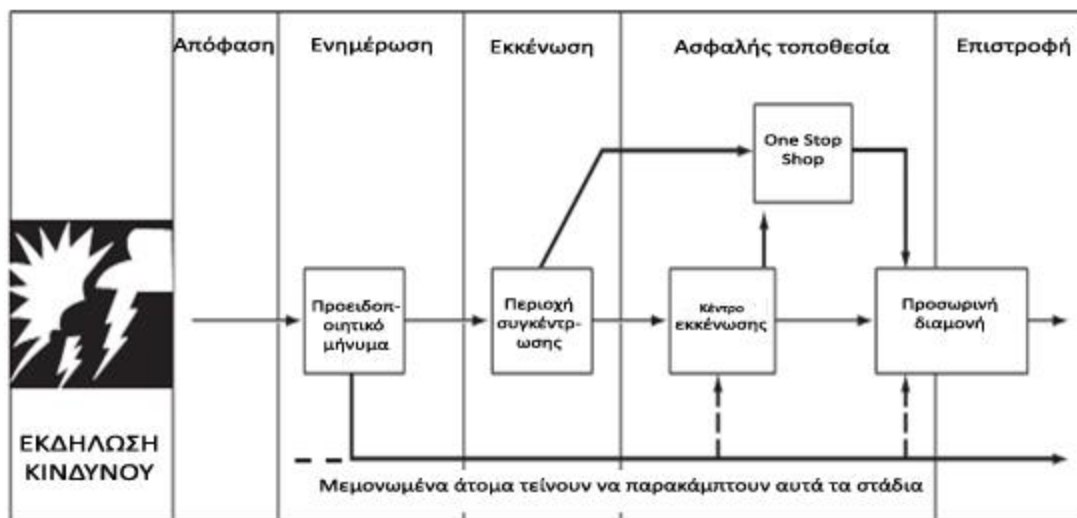
- Κίνδυνος λόγω της ίδιας κατάστασης (π.χ. φωτιά, καπνό)
- Κίνδυνοι λόγω πανικού και υστερίας (π.χ. περίπτωση ποδοπατήματος)
- Προσωπικοί κίνδυνοι στρες (π.χ. καρδιακή προσβολή)

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

## Στάδια διαδικασίας εκκένωσης

Η διαδικασία εκκένωσης περιλαμβάνει πέντε στάδια [3]:

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



Εικόνα 1: Στάδια διαδικασίας εκκένωσης[5]

### Εντολή - Απόφαση έναρξης εκκένωσης

Η απόφαση για την έναρξη της εκκένωσης είναι το πρώτο από τα πέντε στάδια της διαδικασίας εκκένωσης. Συχνά υπάρχουν πολλά σύνθετα ζητήματα που πρέπει να

λαμβάνονται υπόψη στη λήψη αυτής της απόφασης και ίσως πρέπει να γίνουν σε περίπτωση απουσίας απαραίτητων πληροφοριών για το είδος ή την έκταση του περιστατικού[5].

Επειδή η έγκυρη και έγκαιρη απόφαση για εκκένωση είναι καθοριστική για την αντιμετώπιση των επιπτώσεων του κινδύνου που την απαιτεί και κατ' επέκταση της ασφάλειας των ενοίκων, η λήψη της απόφασης πρέπει να λαμβάνεται με βάση τα παρακάτω[5]:

- Η καλύτερη απόφαση λαμβάνεται μετά από σωστή αξιολόγηση όλων των διαθέσιμων πληροφοριών. Πρέπει όμως να γίνει κατανοητό ότι η “πολυτέλεια” της αξιολόγησης όλων των δυνατών εκτιμήσεων, δεν είναι διαθέσιμη
- Η απόφαση για εκκένωση πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις ειδικές νομοθεσίες και κανονισμούς
- Η ύπαρξη ενός, καλά δομημένου, αξιόπιστου και επιβεβαιωμένου σχεδίου εκκένωσης δίνει στον υπεύθυνο (που θα δώσει εντολή για έναρξη της εκκένωσης) μεγαλύτερη εμπιστοσύνη
- Οι καλές αποφάσεις λαμβάνονται με σωστή και έγκαιρη πληροφόρηση. Οι υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων πρέπει να αναζητούν και να αξιολογούν τις συμβουλές των εμπειρογνομόνων.

### **Προειδοποίηση – Ενημέρωση**

Η προειδοποίηση είναι το δεύτερο από τα πέντε στάδια της διαδικασίας εκκένωσης και περιλαμβάνει τη διάδοση των πληροφοριών στους ενοίκους, με τη μορφή συμβουλών και οδηγιών κατεύθυνσης. Μια προειδοποίηση εκκένωσης πρέπει να είναι δομημένη έτσι ώστε να παρέχει έγκαιρη και αποτελεσματική πληροφόρηση. Η αποτελεσματικότητα της ενημέρωσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα της διαδικασίας προειδοποίησης. Στους παράγοντες που ενδέχεται να επηρεάσουν την αποτελεσματικότητα της προειδοποίησης περιλαμβάνονται ο χρόνος, η απόσταση, η οπτική επαφή με το σήμα της προειδοποίησης, τα χαρακτηριστικά της κατάστασης έκτακτης ανάγκης, καθώς και ο τρόπος με τον οποίο θα μεταδοθεί η ενημέρωση από το εξειδικευμένο προσωπικό. Για παράδειγμα, όσο πιο άμεση είναι η απειλή τόσο μεγαλύτερη πρέπει να είναι η προθυμία των ενοίκων να αποδεχθούν και να αντιδράσουν κατάλληλα στην προειδοποίηση [3].

### **Απομάκρυνση των ενοίκων σε ασφαλή τοποθεσία**

Η απομάκρυνση των ενοίκων σε ασφαλή τοποθεσία είναι το τρίτο στάδιο της διαδικασίας εκκένωσης. Ορισμένα από τα βασικά ζητήματα κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού απομάκρυνσης ενοίκων είναι τα εξής[3]:

- Έλεγχος/Συντονισμός
- Προτεραιότητες εκκένωσης
- Πόροι
- Οδεύσεις διαφυγής
- Σταδιακή εκκένωση
- Τοποθεσίες αναφοράς
- Ειδικές παροχές σε ομάδες με ειδικές ανάγκες
- Καταχώρηση ονομάτων ενοίκων
- Ασφάλιση της εκκενωμένης περιοχής
- Δημιουργία σημείου ελέγχου της εκκένωσης
- Ενημέρωση των διοικητών από κάθε εμπλεκόμενο οργανισμό ή ομάδα

### **Επιλογή τοποθεσίας αναφοράς**

Η επιλογή τοποθεσίας συγκέντρωσης είναι το τέταρτο στάδιο της διαδικασίας εκκένωσης και περιλαμβάνει την παροχή ασφάλειας των ενοίκων και την ικανοποίηση βασικών αναγκών των πληγέντων από τις άμεσες ή δυνητικές επιπτώσεις του κινδύνου [3].

### **Επιστροφή στις εγκαταστάσεις**

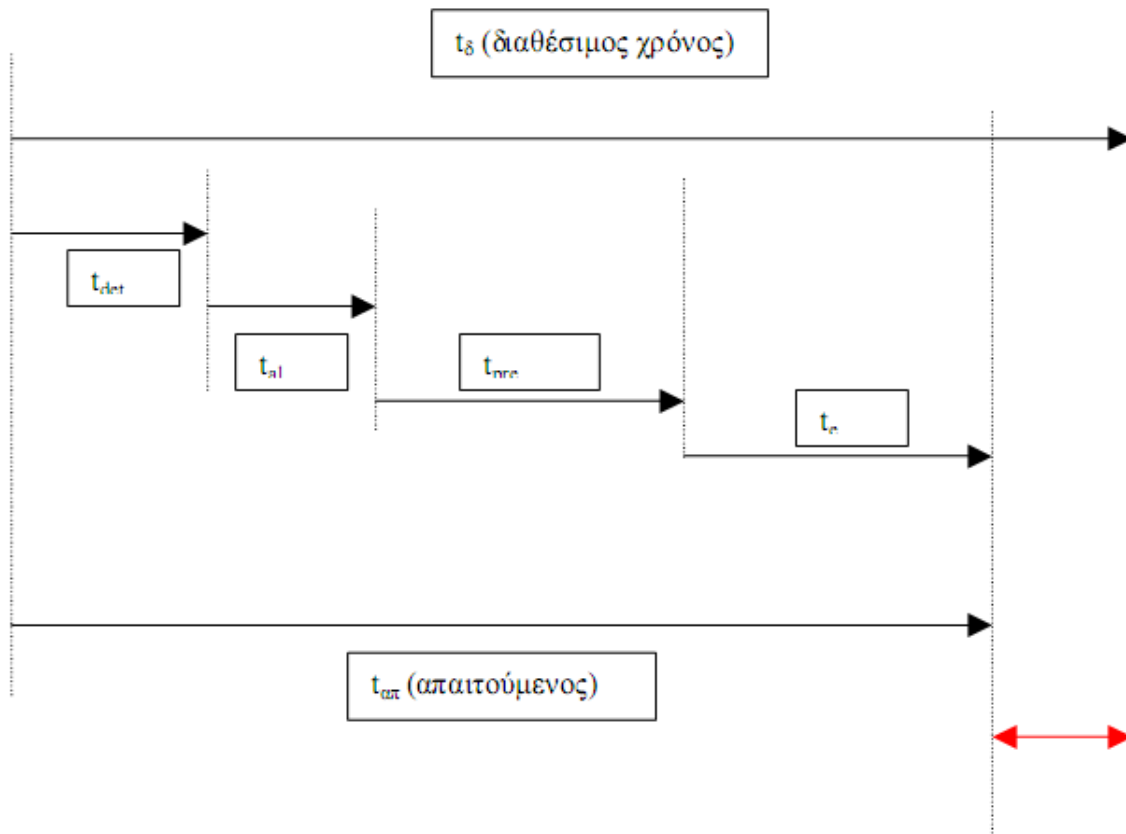
Η επιστροφή στις εγκαταστάσεις είναι το πέμπτο και τελευταίο στάδιο της διαδικασίας εκκένωσης. Σε αυτό το σημείο είναι απαραίτητο να εκτιμηθούν οι συνθήκες που επικρατούν στην πληγείσα περιοχή για να καθοριστεί αν η επιστροφή σε αυτές είναι ασφαλής και να επισημανθούν τυχόν ειδικές τροποποιήσεις που ενδεχομένως χρειαστεί να επιβληθούν [3].

## Διαδικασία εκκένωσης

Οι δύο παράγοντες που παίζουν σημαντικό ρόλο στην επιτυχία μιας εκκένωσης είναι, πρώτον, ο χρόνος που χρειάζεται για την εκκένωση του χώρου και, δεύτερον, τα προβλήματα συνωστισμού που μπορούν να δημιουργηθούν.

### Εκτίμηση χρόνων εκκένωσης

Το πιο σημαντικό στάδιο για την ολοκλήρωση του σχεδίου εκκένωσης είναι ο προσδιορισμός του διαθέσιμου χρόνου εκκένωσης και του απαιτούμενου χρόνου εκκένωσης[3].



Γράφημα 1: Συνιστώσες χρόνων εκκένωσης[6]

Στο Γράφημα 1 με κόκκινο χρώμα συμβολίζεται το περιθώριο ασφαλείας  $t_{safety}$ , δηλαδή ο χρόνος που απομένει από την ολοκλήρωση της εκκένωσης μέχρι οι συνθήκες στις εγκαταστάσεις να είναι ανυπόφορες [3].



## Εκτίμηση διαθέσιμου χρόνου $t_s$

Ο διαθέσιμος χρόνος υπολογίζεται από τη στιγμή έναρξης του συμβάντος έκτακτης ανάγκης μέχρι τη στιγμή που οι συνθήκες στο χώρο θα είναι ανυπόφορες για τους ένοικους [7]. Ανάλογα με την αιτία εκκένωσης μπορεί να ληφθεί διαφορετικός χρόνος. Για τον υπολογισμό του χρόνου αυτού πρέπει να μελετηθούν οι ιδιαίτερες συνθήκες του εκάστοτε χώρου και να αξιολογηθούν σε συνάρτηση με την υπάρχουσα εμπειρία και τους κανονισμούς. Στον Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε. παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά εκκένωσης των υπόγειων χώρων και των λοιπών εγκαταστάσεων.

Πίνακας 1: Σύγκριση υπόγειων χώρων και λοιπών εγκαταστάσεων ως προς τα χαρακτηριστικά εκκένωσης[8]

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

Για ένα υπόγειο έργο, οι διαθέσιμοι χρόνοι εκκένωσης παρατίθενται στον παρακάτω Πίνακας 2:

Πίνακας 2: Διαθέσιμος χρόνος ανά περίπτωση ατυχήματος[8]

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

Όσον αφορά τον  $t_{\delta}$  που αναφέρεται σε περίπτωση φωτιάς και στη διαρροή τοξικών ουσιών, για ακριβέστερο προσδιορισμό απαιτείται υπολογισμός καμπυλών χρόνων συγκέντρωσης για βασικά τοξικά προϊόντα, καπνό και θερμότητα σαν παράγωγα από τη φωτιά. Για τη χάραξη αυτών των καμπυλών, συνυπολογίζεται η συγκέντρωση, η θέση και η φύση των προς καύση υλικών που βρίσκονται στο χώρο. Ένας τρόπος για την ακριβή χάραξη αυτών των καμπυλών είναι η θεώρηση υποθετικών σεναρίων εκδήλωσης φωτιάς, λαμβάνοντας υπ' όψιν τη γεωμετρία του χώρου (όγκος, ύψος οροφής κ.α.) ή τη θεώρηση μιας φωτιάς σχεδιασμού. Όλοι οι υπολογισμοί των σεναρίων και της φωτιάς σχεδιασμού, έχουν σκοπό

τον προσδιορισμό της κίνησης της φωτιάς, των συγκεντρώσεων των τοξικών παραγόντων, του καπνού και της θερμότητας. Αυτές οι παράμετροι συγκρίνονται με τα κριτήρια διαβίωσης μέσα στο χώρο που έχουν τεθεί αρχικά και προκύπτει ο διαθέσιμος χρόνος. Για τους σκοπούς αυτούς υπάρχουν λογισμικά προσομοίωσης που προβλέπουν τα αποτελέσματα εξάπλωσης φωτιάς σε συγκεκριμένο όγκο, ανάλογα με τα υλικά που βρίσκονται μέσα σε αυτά και ανάλογα με τα συστήματα πυρόσβεσης (sprinklers), αν υπάρχουν [3].

#### Υπολογισμός απαιτούμενου χρόνου εκκένωσης $t_{ap}$

Ο απαιτούμενος χρόνος αναφέρεται στο χρόνο από τη στιγμή του ατυχήματος, μέχρι τη στιγμή που και ο τελευταίος ένοικος των εγκαταστάσεων φτάσει σε ασφαλές μέρος (τοποθεσίας αναφοράς) [9].

Ο χρόνος  $t_{ap}$  διακρίνεται σε τέσσερις ξεχωριστούς χρόνους, οι οποίοι με τη σειρά τους εξαρτώνται από τα φυσικά χαρακτηριστικά των ενοίκων και τη συμπεριφορά τους, σε συνάρτηση με τις διαθέσιμες διατάξεις ασφαλείας.

Ονομαστικά οι χρόνοι που αποτελούν αθροιστικά τον απαιτούμενο χρόνο εκκένωσης είναι, πρώτον, ο χρόνος εντοπισμού  $t_{det}$ , που είναι ο χρόνος από τη στιγμή εκδήλωσης του συμβάντος μέχρι τη στιγμή που γίνεται αντιληπτό από τους εργαζομένους ή κάποιον αισθητήρα. Δεύτερον, ο χρόνος συναγερμού  $t_{al}$ , που είναι ο χρόνος που μεσολαβεί από τον εντοπισμό μέχρι τη σήμανση του συναγερμού για εκκένωση. Πολλοί ερευνητές και εμπειρικά μοντέλα ενσωματώνουν το χρόνο συναγερμού στο χρόνο εντοπισμού, όμως στην περίπτωση υπογείου χώρου ο χρόνος αυτός είναι διαφορετικός, διότι εμπλέκεται και το στάδιο της απόφασης για εκκένωση μέχρι την ενεργοποίηση του συναγερμού και την ειδοποίηση του πληθυσμού. Τρίτον, είναι ο χρόνος πριν την μετακίνηση των ενοίκων (pre-movement time)  $t_{pre}$ , ο οποίος αποτελείται από δύο συνιστώσες, το χρόνο αναγνώρισης του σήματος της εκκένωσης και το χρόνο ανταπόκρισης. Ο χρόνος  $t_{pre}$ , αναφέρεται μέχρι τη στιγμή που ξεκινάει ο πρώτος άνθρωπος να κινείται προς κάποια έξοδο κινδύνου. Τέλος, υπάρχει και ο χρόνος κίνησης των ενοίκων προς την τελική έξοδο και την επίτευξη της εκκένωσης  $t_e$ , ο οποίος είναι ο χρόνος που χρειάζεται μέχρι και ο τελευταίος ένοικος να εξέλθει από την τελική έξοδο προς ασφαλές μέρος. Κάθε χρόνος επηρεάζεται από συγκεκριμένες παραμέτρους οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 3 [3]:

Πίνακας 3: Παράγοντες που επηρεάζουν τους συντελεστές του απαιτούμενου χρόνου εκκένωσης

| Κατηγορία Χρόνου | Παράγοντας Επιρροής  |
|------------------|--|
| $t_{det} + t_a$  | Ανιχνευτές, αισθητήρες, πυκνότητα ενοίκων, θερμοκρασία ενεργοποίησης, χώρος επιρροής αισθητήρων - κάλυψη, είδος δραστηριότητας ενοίκων, χαρακτηριστικά φωτιάς      |
| $t_{pre}$        | Εκπαίδευση ενοίκων, σύστημα συναγερμού, βαθμός εξοικείωσης   |
| $t_e$            | Θέση φωτιάς, αριθμός εξόδων, μήκη διαδρόμων, πληθυσμός, πλάτη εξόδων, συμπεριφορά ενοίκων, ταχύτητα ενοίκων, διατάξεις διάσωσης, βάθος υπερκειμένου υπογείου χώρου |

Στην περίπτωση της φωτιάς, η στιγμή της "ανάφλεξης" είναι η στιγμή που λαμβάνει χώρα το περιστατικό της πυρκαγιάς. Από αυτή τη στιγμή υπολογίζεται ο χρόνος μέχρι τον εντοπισμό της φωτιάς. Ο χρόνος εντοπισμού μπορεί να διαρκέσει από μερικά δευτερόλεπτα μέχρι έως μερικές ώρες, ανάλογα με τον τύπο της φωτιάς και τις συσκευές εντοπισμού που υπάρχουν στις εγκαταστάσεις. Ακόμα, πρέπει να υπολογίζεται και ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ εντοπισμού και ενεργοποίησης του συναγερμού. Σε ορισμένες περιπτώσεις τα δύο αυτά γεγονότα (εντοπισμός και συναγερμός) γίνονται ταυτόχρονα, αλλά συνήθως υπάρχει κάποια καθυστέρηση, όπως για παράδειγμα αν οι εργαζόμενοι πρέπει να ενεργοποιήσουν χειροκίνητα το σήμα συναγερμού [10].

#### Χρόνος Εντοπισμού $t_{det}$

Σε ένα αυτόματο σύστημα ο χρόνος εντοπισμού μιας φωτιάς ή μιας διαρροής εξαρτάται από την ευαισθησία του συστήματος, οπότε αυτός ο χρόνος μπορεί να προκύψει από τις προδιαγραφές του συστήματος χωρίς περαιτέρω μελέτη. Αν δεν υπάρχει τέτοιο σύστημα στο χώρο, ο χρόνος εντοπισμού μπορεί να εξαχθεί από το σχεδιασμό των σεναρίων πυρκαγιάς. Κάποια χαρακτηριστικά που μπορεί να επηρεάσουν το χρόνο εντοπισμού είναι τα παρακάτω [6]:

- Χαρακτηριστικά ενοίκων: ικανότητα αντίληψης και δραστηριότητες που μπορεί να τις επηρεάσουν
- Χαρακτηριστικά εγκατάστασης
- Χαρακτηριστικά φωτιάς: ταχύτητα εξάπλωσης, καπνός κ.α.

Για υπόγειους χώρους που έχουν κατασκευαστεί με τη μέθοδο θαλάμων και στύλων, υπάρχουν περιοχές μειωμένης αντίληψης και ο χρόνος εντοπισμού κάποιας βλάβης ή συμβάντος από τον άνθρωπο αυξάνεται. Γενικά ο χρόνος εντοπισμού παρουσιάζεται στον Πίνακα 4:

Πίνακας 4: Χρόνοι  $t_{det}$  ανά κατηγορία συστήματος ανίχνευσης [8]

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

### Χρόνος Συναγερμού $t_{al}$

Ο χρόνος συναγερμού εξαρτάται αφενός από το σχεδιασμό του σχεδίου εκκένωσης, δηλαδή την απόφαση για εκκένωση του χώρου και τον τρόπο που προβλέπει την εκπομπή του σήματος εκκένωσης και αφετέρου από το σχεδιασμό αντίδρασης του συστήματος ανίχνευσης. Εγκαταστάσεις που περιλαμβάνουν σύστημα που οι αισθητήρες είναι ρυθμισμένοι να εντοπίζουν θερμότητα, τοξικές ουσίες, καπνό και μεταφέρουν τα δεδομένα σε κεντρικό υπολογιστή, όπου λαμβάνεται η απόφαση εκκένωσης βάση λογισμικού ανήκουν στην Κατηγορία 1. Επίσης, ο χρόνος που μεσολαβεί από τον εντοπισμό μέχρι το συναγερμό είναι μηδενικός. Στους χώρους Κατηγορίας 2 υπάρχει σύστημα ανίχνευσης, αλλά ο γενικός συναγερμός και η ειδοποίηση για εκκένωση δεν ακολουθεί άμεσα, καθώς μια ειδοποίηση κατευθύνεται πρώτα στο κέντρο ελέγχου και ανάλογα με τη στρατηγική του σχεδίου εκκένωσης για κάθε περίπτωση γίνεται αξιολόγηση και δίνεται ή όχι το σήμα γενικού συναγερμού εκκένωσης. Τέλος, στην Κατηγορία 3, το σύστημα συναγερμού δίνεται χειροκίνητα από τοπικό χειριστήριο κοντά στο συμβάν, από κάποιο άνθρωπο στο χώρο που το αντιλαμβάνεται, με αποτέλεσμα το εύρος του χρόνου που απαιτείται να ποικίλει ως προς το είδος των εργαζομένων και των ενοίκων γενικότερα (ηλικία, εκπαίδευση, μόνιμος ή επισκέπτης του χώρου)[3] (Πίνακας 5).

Πίνακας 5: Χρόνοι  $t_{ai}$  ανά κατηγορία συστήματος συναγερμού[6,8]

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

#### Χρόνος πριν τη μετακίνηση $t_{pre}$

Ο χρόνος πριν την μετακίνηση  $t_{pre}$  είναι αυτός που τυγχάνει σημαντικής διαφοροποίησης ανάλογα με τη σύνθεση του πληθυσμού, ειδικά σε ένα υπόγειο έργο. Έτσι, εκτός από τον αριθμό των ανθρώπων, που παίζει ρόλο όσον αφορά την αντίδρασή τους, σημαντικό είναι ακόμα το φύλο και η ηλικία. Από έρευνες που έχουν γίνει καταδεικνύεται ότι οι γυναίκες λαμβάνουν προστατευτικά μέτρα, ξεκινώντας παράλληλα γρηγορότερα την εκκένωση, ενώ οι άντρες τείνουν να καθυστερούν προσπαθώντας να αντιμετωπίσουν τον κίνδυνο φωτιάς. Η ηλικία είναι ένας άλλος παράγοντας, καθώς το προχωρημένο της ηλικίας δυσκολεύει την αναγνώριση του συναγερμού, ενώ αντίθετα οι νεότεροι, όταν αποφασίσουν να μετακινηθούν, το κάνουν γρηγορότερα και εντονότερα.

Συνοπτικά, στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία ακολουθήθηκαν οι εξής παραδοχές για την ανάλυση:

- Μικρή πιθανότητα ύπαρξης ανθρώπων με κινητικά ή πνευματικά προβλήματα
- Όλοι θα βρίσκονται σε εγρήγορση, καθώς είναι δρόμος ταχείας κυκλοφορίας
- Μικρή συχνότητα λανθασμένων συναγερμών

Συγκεντρώνοντας στοιχεία βιβλιογραφίας, δημιουργούνται τρεις κατηγορίες ανάλογα με το σύστημα συναγερμού, οι οποίες θα ονομαστούν A1, A2 και A3, για να μην γίνει σύγχυση με τον χρόνο  $t_{ai}$  όπου η κατηγοριοποίηση αφορούσε τη λήψη απόφασης για εκκένωση. Αναλυτικά είναι οι εξής:

- Κατηγορία A1: παρέχονται σε πραγματικό χρόνο οδηγίες χρησιμοποιώντας φωνητικά μηνύματα από το κέντρο ελέγχου ή οδηγίες μαγνητοφωνημένες σε συνδυασμό με μέλη προσωπικού με διακριτικά, που κατευθύνουν τον κόσμο.
- Κατηγορία A2: μόνο μαγνητοφωνημένα μηνύματα
- Κατηγορία A3: σύστημα συναγερμού και σειρήνες με προσωπικό χωρίς σχετική εκπαίδευση.

Οι αντίστοιχοι χρόνοι δίνονται στον Πίνακα 6 :

Πίνακας 6: Χρόνοι  $t_{pre}$  ανά κατηγορία συστήματος συναγερμού[11,12]

| Τύπος Χρήσης Χώρου                  | Κατηγορία A1 (min) | Κατηγορία A2 (min) | Κατηγορία A3 (min) |
|-------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Γραφεία σε Υπόγειο                  | 1                  | 3                  | 4-5                |
| Χώρος Αποθήκευσης σε Υπόγειο        | 2                  | 3                  | 5-6                |
| Χώρος Επισκεπτών (αραιή συνάθροιση) | 1                  | 3                  | 5                  |
| Χώρος Επισκεπτών (πυκνή συνάθροιση) | 1                  | 3                  | 4-5                |

#### Χρόνος κίνησης για εκκένωση $t_e$

Ουσιαστικά είναι ο πραγματικός χρόνος κίνησης των ενοίκων για εκκένωση προς μια ασφαλή τοποθεσία. Ο χρόνος αυτός επηρεάζεται αφενός από τον τύπο και την ποσότητα του πληθυσμού (των ενοίκων) που βρίσκονται στο χώρο και αφετέρου από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του χώρου (πλάτος οδούσεων διαφυγής, μήκος διαδρομής, πλάτος εξόδων, είδος σκάλας, ραμπών κ.α.)[3].

Επίσης, προκύπτει ότι ο χρόνος  $t_e$  εξαρτάται από τρεις παράγοντες[7]:

- Χρόνο κίνησης, δηλαδή τον μέσο χρόνο διάνυσης της όδευσης διαφυγής
- Χρόνο δαπανώμενο σε ουρά
- Χρόνο για κίνηση της ροής διαμέσου εξόδων

Για να προσδιοριστούν οι τρεις αυτοί παράγοντες, λαμβάνονται υπόψη τρία στοιχεία τα οποία είναι:

1. η ταχύτητα βαδίσματος,
2. η ειδική ροή ανθρώπων και
3. η παροχή ανθρώπων κατά τη διέλευση από την έξοδο κινδύνου.

Για να ολοκληρωθεί μια ανάλυση προσδιορισμού χρόνου εκκένωσης, χρειάζεται να γίνει μια παράθεση σημαντικών στοιχείων που έχουν εντοπιστεί σε πολλαπλές έρευνες, επικεντρώνοντας σε κινήσεις ανθρώπων σε καταστάσεις εκκένωσης. Οι παρατηρήσεις ισχύουν και σε υπόγειους χώρους [8]:

- Ο πανικός είναι (όσο και αν έχει δαιμονοποιηθεί) ένα σχετικά σπάνιο γεγονός σε φωτιές. Σε έκτακτες καταστάσεις τείνουν να επικρατούν κανονικές συμπεριφορές και σωστές επιλογές οδών διαφυγής .
- Η συμπεριφορά των ανθρώπων τείνει να γίνει αλτρουιστική και λογική.
- Μετά τη σήμανση συναγερμού ή την εμφάνιση καπνού, οσμών κ.α., οι άνθρωποι συχνά αγνοούν αυτά τα σημάδια και ερευνούν την αιτία, σπαταλώντας χρόνο, για να εκτιμήσουν τη σοβαρότητα της κατάστασης. Σε ένα υπόγειο χώρο θα σπαταλήσουν λιγότερο χρόνο για κάτι τέτοιο λόγω μεγαλύτερης ανασφάλειας που εμπνέει το περιβάλλον.
- Όταν αντιμετωπίζουν έντονες καταστάσεις όπου ο χρόνος λήψης αποφάσεων είναι μικρός, οι άνθρωποι πιθανότερα θα κινηθούν επιλέγοντας την πιο οικεία διαδρομή για έξοδο.
- Η εκκένωση και γενικότερα η ανταπόκριση σε φωτιά (ή άλλο ατύχημα), είναι συχνά και κοινωνική αντίδραση. Οι άνθρωποι τείνουν να δρουν ως ομάδα και να επιχειρούν να φύγουν με άλλους που σχετίζονται ή γνωρίζουν.
- Προβλήματα που συναντώνται σε κανονική κατάσταση λειτουργίας του χώρου, θα μεγιστοποιούνται και θα προκαλούν έντονες καταστάσεις σε φάση εκκένωσης (χαλασμένες επικοινωνίες, προβλήματα κυκλοφορίας, μπλοκαρισμένες έξοδοι κ.α.).



## Χρόνος Ασφαλείας $t_{\text{safety}}$

Ο χρόνος ασφαλείας δίνει το περιθώριο ασφαλείας που υπάρχει μεταξύ διαθέσιμου και απαιτούμενου χρόνου εκκένωσης. Αφού υπολογιστεί ο  $t_{\text{απ}}$  σαν άθροισμα των επί μέρους χρόνων, βάση υπάρχουσας γεωμετρίας, διατάξεων και πληθυσμών και εντοπιστεί από σχετικό πίνακα ο διαθέσιμος χρόνος  $t_{\delta}$  (Πίνακας 2) ή προκύψουν από προσομοίωση, τότε η διαφορά  $t_{\delta} - t_{\text{απ}} > 0$ , δίνει τον χρόνο ασφαλείας[3].

Αν έχουν ληφθεί υπ' όψη και οι δυσμενέστερες συνθήκες (μπλοκάρισμα εξόδων, μέγιστοι πληθυσμοί, καπνός) τότε ο χρόνος  $t_{\text{safety}} > 0$  θα δίνει με πραγματική προσέγγιση το περιθώριο ασφαλείας για όλο το έργο σε περίπτωση ανάγκης εκκένωσης μετά από κάποιο έκτακτο συμβάν[3].

Όμως, τα τελευταία χρόνια όλοι αυτοί οι παράγοντες έχουν ενσωματωθεί μέσα σε ηλεκτρονικά υπολογιστικά προγράμματα, τα οποία προσομοιώνουν τις ειδικές συνθήκες στο χώρο και παραθέτουν τα τελικά αποτελέσματα σε μορφή αρχείου αλλά και σε τρισδιάστατη εικόνα. Παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών είναι τα:

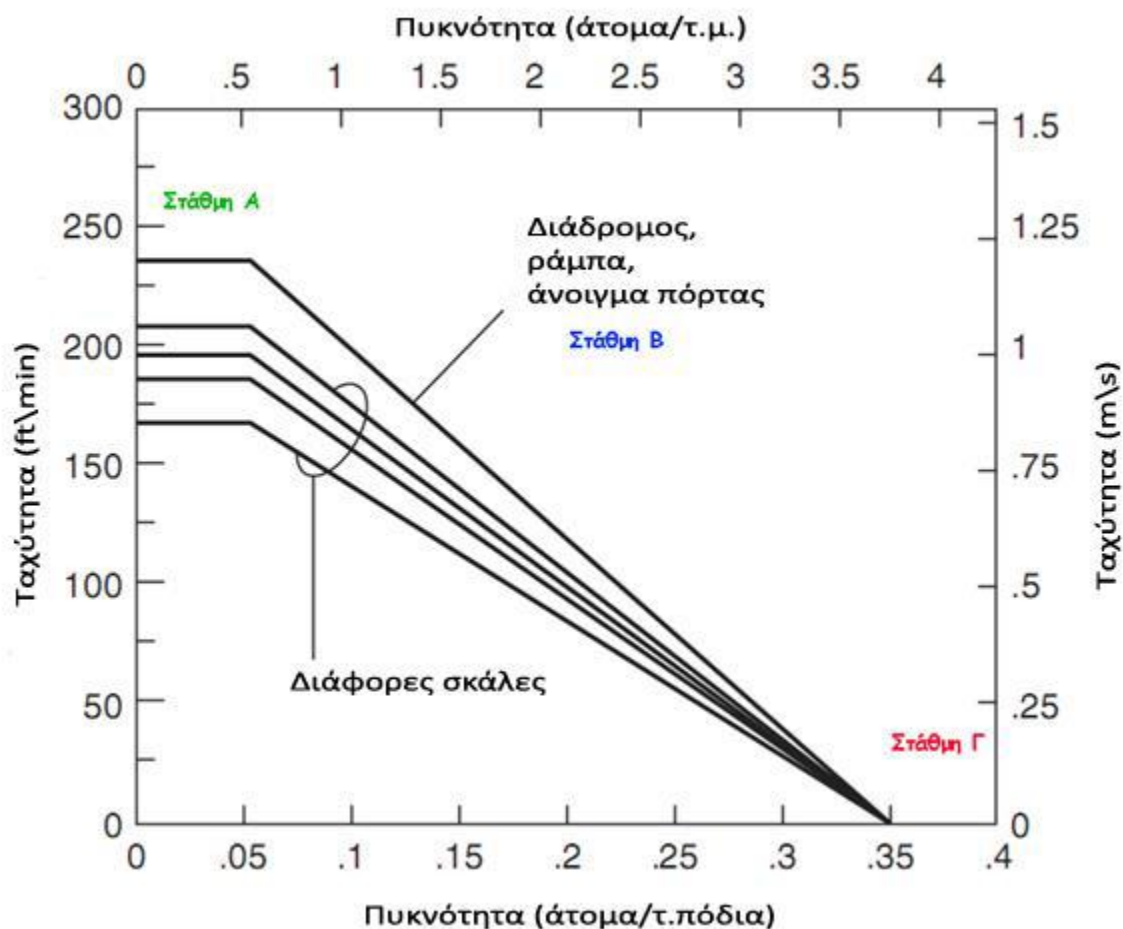
- EXODUS
- STEPS
- PathFinder
- Legion
- EXITT

Καθένα από τα λογισμικά αυτά έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά του, καθώς και τη δυνατότητα συνεργασίας ή όχι με αντίστοιχες εφαρμογές προσομοίωσης συγκέντρωσης και κίνησης φωτιάς, καπνού ή άλλων αερίων.

## Ανάλυση εκτίμησης παραμέτρων χρόνου κίνησης $t_e$

### Υπολογισμός ταχύτητας βαδίσματος κατά την εκκένωση

Η ταχύτητα βαδίσματος θεωρείται μέση, αναφέρεται σε όλη την ομάδα εκκένωσης μέσω μίας δεδομένης όδευσης διαφυγής, αναφέρεται σε οριζόντιο ή σχεδόν οριζόντιο δάπεδο και σε σκάλες, στις οποίες λόγω της φύσης του έργου έχουμε μόνο άνοδο. Το Γράφημα 2, παρουσιάζει την ταχύτητα βαδίσματος συναρτήσει της πυκνότητας των ενοίκων[3].



Γράφημα 2: Ταχύτητες βαδίσματος κατά τη διαδικασία εκκένωσης συναρτήσει της πυκνότητας[7]

Με βάση το Γράφημα 2 δημιουργούνται τρεις στάθμες εξυπηρέτησης ως εξής:

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

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

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

Συνεπώς, αν η πυκνότητα του πληθυσμού είναι μικρότερη από  $0,54 \text{ άτομα}/\text{m}^2$ , τότε οι ένοικοι θα κινούνται με τη δική τους ταχύτητα (Πίνακας 7), ανεξαρτήτως της κίνησης των γειτονικών ατόμων. Αν η πυκνότητα ξεπερνά τα  $3,8 \text{ άτομα}/\text{m}^2$ , τότε δεν παρατηρείται καμία κίνηση μέχρι τη στιγμή που ικανός αριθμός ατόμων θα φύγει από την πυκνή περιοχή και θα μειωθεί η τοπική πυκνότητα. Τέλος, μεταξύ των πυκνοτήτων  $0,54$  και  $3,8 \text{ άτομα}/\text{m}^2$ , η σχέση μεταξύ ταχύτητας και πυκνότητας είναι μια γραμμική εξίσωση

$$S = k - a \cdot k \cdot D \text{ (Εξίσωση 1)}$$

όπου[7,11]:

- S = ταχύτητα
- D = πυκνότητα των ατόμων ανά μονάδα επιφάνειας
- K= σταθερά, στους πίνακες θα δίνεται k<sub>1</sub> για ταχύτητα σε ft/m και k<sub>2</sub> για ταχύτητα σε m/s για να αποφευχθεί η σύγχυση, αλλά και τα δύο αναφέρονται στο k της εξίσωσης (Πίνακας 8)
- a = 2,86 για ταχύτητα σε πόδια/λεπτό και 0,266 για ταχύτητα σε μέτρα/δευτερόλεπτο

Πίνακας 7:Μέγιστες ταχύτητες διαφυγής (ανεμπόδιστες)[7]

| Στοιχείο Διαδρομής Εξόδου        |                         | ft/m | m/s  |
|----------------------------------|-------------------------|------|------|
| Διάδρομος, ράμπα, άνοιγμα πόρτας |                         | 235  | 1.19 |
| Σκάλες                           |                         |      |      |
| ύψος σκαλοπατιού (in)            | Πλάτος σκαλοπατιού (in) |      |      |
| 7.5                              | 10                      | 167  | 0.85 |
| 7.0                              | 11                      | 187  | 0.95 |
| 6.5                              | 12                      | 196  | 1.00 |
| 6.5                              | 13                      | 207  | 1.05 |

Πίνακας 8:Σταθερά k [7]

| Στοιχείο Διαδρομής Εξόδου        |                         | k1  | k2   |
|----------------------------------|-------------------------|-----|------|
| Διάδρομος, ράμπα, άνοιγμα πόρτας |                         | 275 | 1.4  |
| Σκάλες                           |                         |     |      |
| ύψος σκαλοπατιού (in)            | Πλάτος σκαλοπατιού (in) |     |      |
| 7.5                              | 10                      | 196 | 1.00 |
| 7.0                              | 11                      | 212 | 1.08 |
| 6.5                              | 12                      | 229 | 1.16 |
| 6.5                              | 13                      | 242 | 1.23 |

Όλοι οι παραπάνω χρόνοι και υπολογισμοί αναφέρονται σε ενήλικες χωρίς αναπηρία. Για να θεωρηθεί μια μελέτη ρεαλιστική πρέπει να υπολογίσει και αυτούς τους παράγοντες. Για

παράδειγμα, έχει υπολογιστεί ότι η ταχύτητα βαδίσματος ηλικιωμένων και παιδιών μέχρι 6 ετών είναι περίπου 0,45m/s[10]. Ο Πίνακας 9 δίνει τις αναμενόμενες ταχύτητες για διαφόρους τύπους ανθρώπων σε επίπεδη επιφάνεια και ο Πίνακας 10 σε κεκλιμένη επιφάνεια (σκάλες)[3].

Πρέπει να σημειωθεί ότι ο Πίνακας 9 παρουσιάζει αποτελέσματα μελέτης που έγινε σε 155 άτομα με αναπηρία (ΑμεΑ), εκ των οποίων οι 121 μπορούσαν να κινούνται χωρίς βοήθεια ενώ οι υπόλοιποι 34 χρειάστηκαν βοήθεια για τη μετακίνησή τους κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων. Επιπροσθέτως, ο Πίνακας 10 παρουσιάζει στοιχεία από 30 άτομα (διαλογή μέσω δοκιμασίας) με αναπηρία και 8 άτομα που δεν συμπεριλαμβάνονται στα ΑμεΑ [3].

Πίνακας 9: Ταχύτητα σε οριζόντια επιφάνεια[11]

| Ομάδα ατόμων<br>(αριθμός)                   | Μέση<br>ταχύτητα<br>(m/s) | Τυπική<br>απόκλιση<br>(m/s) | Εύρος<br>(m/s) | Ενδοτεταρτομοριακό<br>εύρος (m/s) |
|---|---------------------------|-----------------------------|----------------|-----------------------------------|
| Όλες οι αναπηρίες<br>(107)                  | 1.00                      | 0.42                        | 0.10–1.77      | 0.71–1.28                         |
| Με κινητικό<br>πρόβλημα (101)               | 0.80                      | 0.37                        | 0.10–1.68      | 0.57–1.02                         |
| Χωρίς βοήθεια (52)                          | 0.95                      | 0.32                        | 0.24–1.68      | 0.70–1.02                         |
| Με πατερίτσα (6)                            | 0.94                      | 0.3                         | 0.63–1.35      | 0.67–1.24                         |
| Με μπαστούνι (33)                           | 0.81                      | 0.38                        | 0.26–1.60      | 0.49–1.08                         |
| Με χρήση Π (10)                             | 0.57                      | 0.29                        | 0.10–1.02      | 0.34–0.83                         |
| Χωρίς κινητική<br>ανεπάρκεια (6)            | 1.25                      | 0.32                        | 0.82–1.77      | 1.05–1.34                         |
| Ηλεκτρικό<br>καρεκλάκι (2)                  | 0.89                      | —                           | 0.85–0.93      | —                                 |
| Χειροκίνητο<br>καρεκλάκι με<br>βοήθεια (12) | 0.69                      | 0.35                        | 0.13–1.35      | 0.38–0.94                         |
| Χειροκίνητο<br>καρεκλάκι με<br>βοήθεια (16) | 1.30                      | 0.34                        | 0.84–1.98      | 1.02–1.59                         |

|                            |      |      |           |           |
|----------------------------|------|------|-----------|-----------|
| Με ιατρική βοήθεια<br>(18) | 0.78 | 0.34 | 0.21–1.40 | 0.58–0.92 |
|----------------------------|------|------|-----------|-----------|

Πίνακας 10: Ταχύτητα σε σκάλες[11]

| Ομάδα<br>ατόμων<br>(αριθμός) | Μέση<br>ταχύτητα<br>(m/s) | Τυπική<br>απόκλιση<br>(m/s) | Εύρος<br>(m/s) | Ενδοτεταρτομοριακό<br>εύρος (m/s) |
|------------------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------|-----------------------------------|
| <b>Άνοδος</b>                |                           |                             |                |                                   |
| Με κινητικό<br>πρόβλημα (30) | 0.38                      | 0.14                        | 0.13–0.62      | 0.26–0.52                         |
| Χωρίς βοήθεια<br>(19)        | 0.43                      | 0.13                        | 0.14–0.62      | 0.35–0.55                         |
| Με πατερίτσα<br>(1)          | 0.22                      | —                           | 0.13–0.31      | 0.26–0.45                         |
| Με μαστούνι<br>(9)           | 0.35                      | 0.11                        | 0.18–0.49      | —                                 |
| Με χρήση Π (1)               | 0.14                      | —                           | —              | —                                 |
| Χωρίς<br>αναπηρία (8)        | 0.70                      | 0.24                        | 0.55–0.82      | 0.55–0.78                         |
| <b>Κάθοδος</b>               |                           |                             |                |                                   |
| Με κινητικό<br>πρόβλημα (30) | 0.33                      | 0.16                        | 0.11–0.70      | 0.22–0.45                         |
| Χωρίς βοήθεια<br>(19)        | 0.36                      | 0.14                        | 0.13–0.70      | 0.20–0.47                         |
| Με πατερίτσα<br>(1)          | 0.22                      | —                           | —              | —                                 |
| Με μαστούνι<br>(9)           | 0.32                      | 0.12                        | 0.11–0.49      | 0.24–0.46                         |
| Με χρήση Π (1)               | 0.16                      | —                           | —              | —                                 |
| Χωρίς<br>αναπηρία (8)        | 0.70                      | 0.26                        | 0.45–1.10      | 0.53–0.90                         |

## Υπολογισμός ειδικής ροής $F_s$

Ειδική ροή  $F_s$ , είναι η ροή των ενοίκων που εκκενώνουν το χώρο χρησιμοποιώντας μια όδευση διαφυγής, ανά μονάδα ενεργού πλάτους, ανά μονάδα χρόνου (άτομα/s/m)[7].

Υπολογίζεται ως το γινόμενο της ταχύτητας επί την πυκνότητα:

$$F_s = S \cdot D \text{ (Εξίσωση 2)}$$

όπου:

- $F_s$  = ειδική ροή
- $D$  = πυκνότητα των ατόμων ανά μονάδα επιφάνειας
- $S$  = ταχύτητα

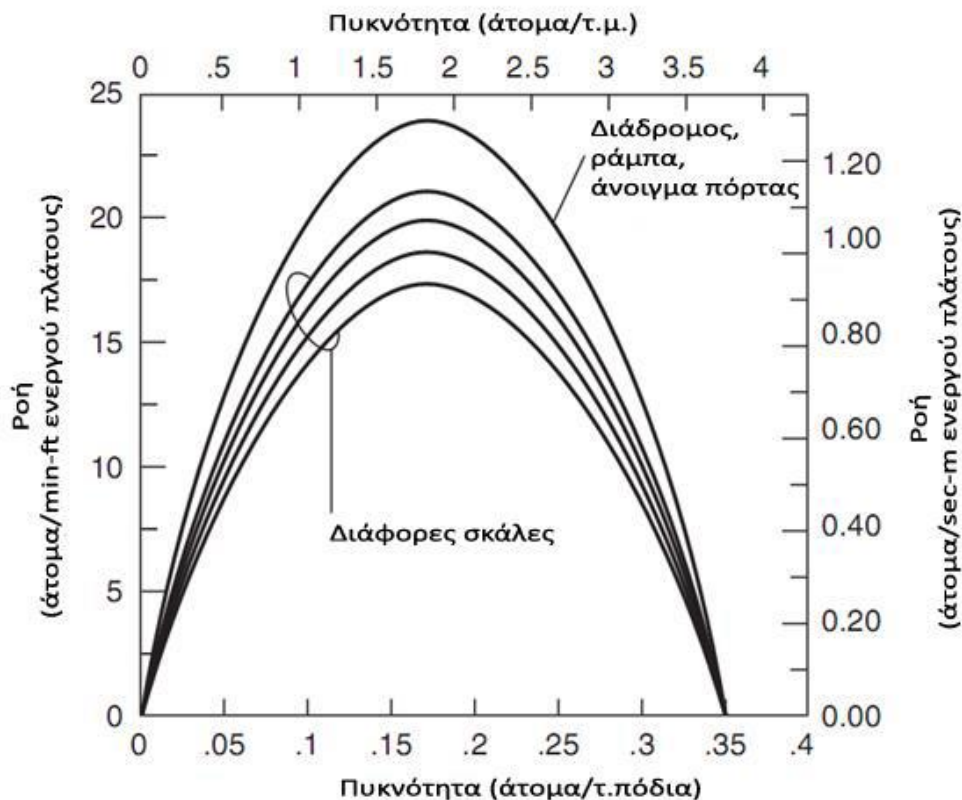
Συνδυάζοντας την  $S = k - a \cdot k \cdot D$  (Εξίσωση 1 με την  $F_s = S \cdot D$  (Εξίσωση 2 προκύπτει:

$$F_s = (1 - a \cdot D) \cdot k \cdot D \text{ (Εξίσωση 3)}$$

Η μέγιστη ειδική ροή (που εμφανίζεται όταν  $D = 1,9$  άτομα/μ<sup>2</sup>) σε μια οδό διαφυγής παρουσιάζεται στον Πίνακα 11 και η σχέση της με την πυκνότητα φαίνεται στο Γράφημα 3.

Πίνακας 11: Μέγιστη ειδική ροή  $F_s$  [7]

| Στοιχείο Διαδρομής<br>Εξόδου        | Άτομα/m/ft ενεργού πλάτους | Άτομα/s/m ενεργού<br>πλάτους |      |
|-------------------------------------|----------------------------|------------------------------|------|
| Διάδρομος, ράμπα,<br>άνοιγμα πόρτας | 24.0                       | 1.3                          |      |
| Σκάλες                              |                            |                              |      |
| ύψος σκαλοπατιού (in)               | Πλάτος σκαλοπατιού (in)    |                              |      |
| 7.5                                 | 10                         | 17.1                         | 0.94 |
| 7.0                                 | 11                         | 18.5                         | 1.01 |
| 6.5                                 | 12                         | 20.0                         | 1.09 |
| 6.5                                 | 13                         | 21.2                         | 1.16 |



Γράφημα 3: Ειδική ροή συναρτήσει της πυκνότητας [7]

### Υπολογισμός ικανότητας ροής – Παροχή Q

Ορίζεται ως ο αριθμός των ανθρώπων που διέρχονται μέσα από μία διατομή όδευσης διαφυγής ανά δευτερόλεπτο. Προκύπτει πολλαπλασιάζοντας την ειδική ροή  $F_s$  με το ενεργό πλάτος  $W_e$  δηλαδή[3]:

$$Q = F_s \cdot W_e \text{ (Εξίσωση 4)}$$

όπου:

- $Q$  = παροχή
- $F_s$  = ειδική ροή
- $W_e$  = ενεργό πλάτος

Εδώ πρέπει να γίνει μία σημείωση για την έννοια του ενεργού πλάτους. Από πειραματικές μετρήσεις έχει βρεθεί ότι οι πεζοί τείνουν να μην φτάνουν ακριβώς σε επαφή με τα τοιχώματα ή άλλα εμπόδια κατά μήκος μιας όδευσης διαφυγής κατά την κίνησή τους. Το

πλάτος μείωσης από κάθε πλευρά εξαρτάται από τον τύπο του εμποδίου κατά μήκος της όδευσης. Εδώ θα χρησιμοποιείται η μέγιστη παρατηρούμενη τιμή 20 εκ. για κάθε πλευρά καθώς συνήθως οι τοίχοι των διαδρόμων διαθέτουν μεγάλη τραχύτητα (εκτοξευμένο σκυρόδεμα) σε περίπτωση που η όδευση καταλαμβάνει όλο το πλάτος διαδρόμου. Αλλά ακόμη και σε διάδρομο όδευσης διαφυγής νοητό μέσα σε διάδρομο υπογείου χώρου, υπάρχει περίπτωση να υπάρχουν σταθμευμένα μηχανήματα ή οχήματα μεταφοράς φορτίων (κακή πρόληψη και συντήρηση οδύσεων διαφυγής). Έτσι το ενεργό πλάτος  $W_e$  θα είναι το πλάτος της όδευσης διαφυγής σχεδιασμού μείον το διπλάσιο του πλάτους μείωσης[3].

Συνδυάζοντας την  $F_s = S \cdot D$  (Εξίσωση 2 με την  $F_s = (1 - a \cdot D) \cdot k \cdot D$  (Εξίσωση 3 προκύπτει:

$$Q = (1 - a \cdot D) \cdot k \cdot D \cdot W_e \text{ (Εξίσωση 5)}$$

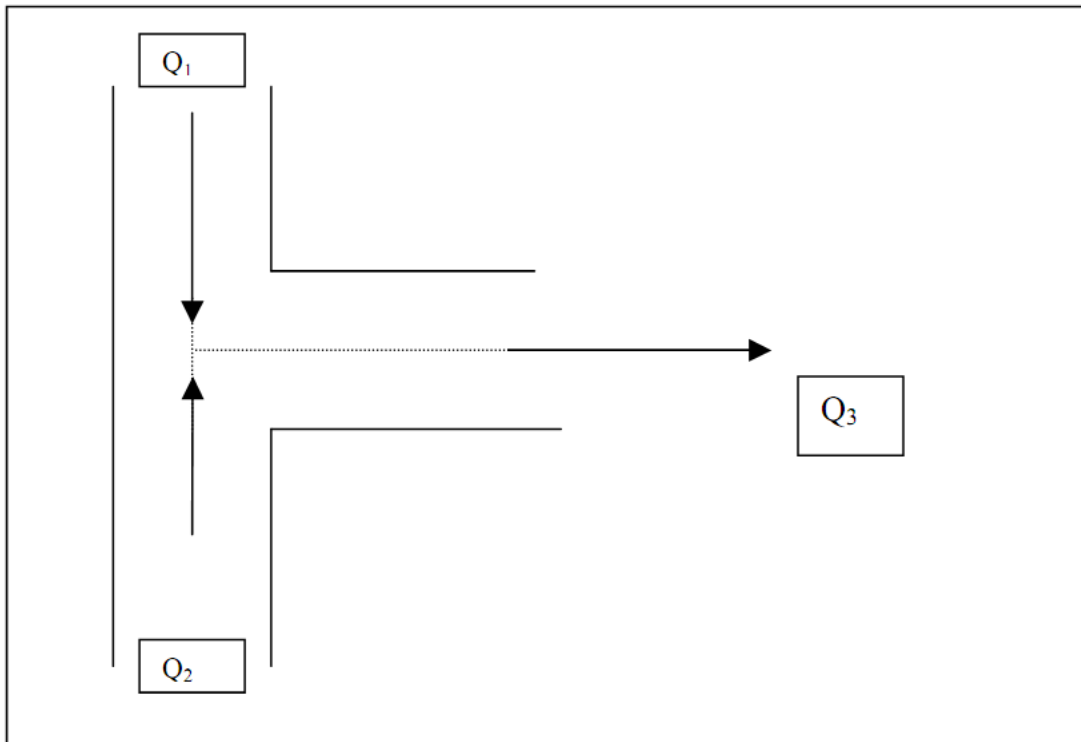
Για την παροχή ανάλογα με το σχεδιασμό των οδύσεων διαφυγής είναι δυνατόν να προκύψουν δύο ειδικές περιπτώσεις, των οποίων η αντιμετώπιση παρουσιάζεται παρακάτω.

#### Συμβολή παροχών εκκένωσης

Σύμφωνα με την Εικόνα 2 η συνδυασμένη παροχή ανθρώπων  $Q_1$  και  $Q_2$  που εισρέει σε διασταύρωση ρευμάτων (κόμβος), είναι ίση με την παροχή ανθρώπων που εξέρχεται  $Q_3$ , δηλαδή  $Q_1 + Q_2 = Q_3 \Rightarrow F_{s1} \cdot W_{e1} + F_{s2} \cdot W_{e2} = F_{s3} \cdot W_{e3} \Rightarrow$

$$F_{s3} = \frac{F_{s1} \cdot W_{e1} + F_{s2} \cdot W_{e2}}{W_{e3}} \text{ (Εξίσωση 6)}$$



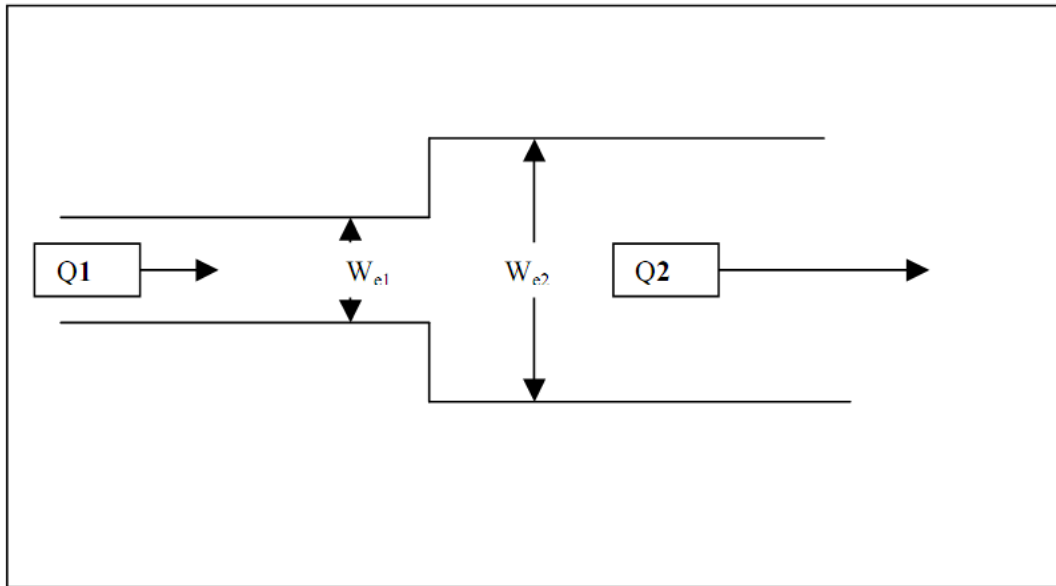


Εικόνα 2: Συμβολή παροχών σε κόμβο [6]

Η  $F_{s3} = F_{s1} \cdot W_{e1} + F_{s2} \cdot W_{e2} \cdot W_{e3}$  (Εξίσωση 6 ισχύει για διαδρόμους, ενώ μπορεί στη φάση ελέγχου της σχεδίασης των οδών διαφυγής να χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστεί η παροχή της κύριας οδού διαφυγής ως το άθροισμα των τοπικών διαδρόμων που συγκλίνουν σε αυτήν. Ακόμη, για έλεγχο του χρόνου εκκένωσης σε περίπτωση ύπαρξης εμποδίου ή "απενεργοποίησης" μίας εξόδου, η συνολική παροχή θα προκύψει ως σύνολο διαφορετικών κλάδων οδεύσεων διαφυγής[3].

#### Μεταβολή πλάτους όδευσης διαφυγής

Όταν το πλάτος σε τμήμα όδευσης αλλάζει, αναμένεται να αλλάξει και η ειδική ροή όπως στην Εικόνα 3.



Εικόνα 3: Μεταβολή πλάτους σε όδευση διαφυγής [6]

Ισχύει:

$$Q_1 = Q_2 \Rightarrow F_{s1} \cdot W_{e1} = F_{s2} \cdot W_{e2} \Rightarrow$$

$$F_{s2} = \frac{F_{s1} \cdot W_{e1}}{W_{e2}} \text{ (Εξίσωση 7)}$$

Επιρροή καπνού στην κίνηση

Όλη η προηγούμενη ανάλυση για τον υπολογισμό του χρόνου μετακίνησης  $t_e$  βασίστηκε σε κινήσεις πεζών σε καθαρό περιβάλλον χωρίς καπνό. Έχει γίνει η παραδοχή ότι θα λειτουργήσει, μετά τη λήψη ειδοποίησης από τους αισθητήρες, το αυτόματο σύστημα εξαερισμού έκτακτης ανάγκης και με αυτό τον τρόπο θα επαληθευθεί η παραδοχή καθαρού περιβάλλοντος για χρόνους που προβλέπονται στον Πίνακα 6. Σε περίπτωση που υπάρχει καπνός υπάρχει ψυχολογική και σωματική επιβάρυνση στα άτομα που εκκενώνουν. Σε ένα διάδρομο γεμάτο με καπνό που εξαπλώνεται, οι άνθρωποι τείνουν να γυρνάνε πίσω παρά να μουν μέσα στον καπνό. Αυτό θα το κάνουν μόνο αν πίσω τους βλέπουν φλόγες φωτιάς. Άλλη συνέπεια σε περίπτωση αραιού καπνού και κίνησης μέσα σε αυτόν, είναι η μείωση ταχύτητας. Από μελέτες και σχετικές έρευνες μπορεί να γίνει χρήση των τιμών ταχυτήτων από τον Πίνακα 12.

Πίνακας 12: Επιρροή καπνού στην ορατότητα και την ταχύτητα [6]

| Πυκνότητα Καπνού     | Μείωση Ορατότητας | Επίδραση                      |
|----------------------|-------------------|-------------------------------|
| Καμία                | Καμία             | Μέση ταχύτητα 1.2 m/s         |
| Λίγος χωρίς ενόχληση | 2 μέτρα           | Μέση ταχύτητα 0.3 m/s         |
| Ενοχλητική           | Μειωμένη          | Μέση ταχύτητα 0.3 m/s         |
| Πυκνός               | <3 μέτρα          | 30% των ανθρώπων γυρνάνε πίσω |

### Ανθρώπινη Συμπεριφορά

Μια σήραγγα δεν απαρτίζεται καθαρά από τα τεχνικά της χαρακτηριστικά. Η ανθρώπινη συμπεριφορά επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την εκδήλωση ανεπιθύμητων γεγονότων, την εξέλιξη τους αλλά και την επιτυχή αντιμετώπιση τους. Οι ομάδες ανθρώπων που απαντώνται στην σήραγγα είναι οι ακόλουθες [13]:

1. Ένοικοι
2. Προσωπικό ελέγχου
3. Προσωπικό έκτακτης ανάγκης

Η ανθρώπινη συμπεριφορά ανάλογα με την κατάσταση διακρίνεται στις ακόλουθες κατηγορίες [13]:

- Συμπεριφορά «ρουτίνας» προ του συμβάντος και πρόληψη αυτού
- Συμπεριφορά που προκαλεί ανεπιθύμητα συμβάντα, ατυχήματα και πυρκαγιές
- Ανθρώπινη αντίδραση στη φωτιά
- Διάσωση και εκκένωση
- Πυρόσβεση

Ένοικοι

### *Συμπεριφορά «ρουτίνας»*

Στις σήραγγες υπάρχει ένα σύνολο κανόνων που προσδιορίζουν την συμπεριφορά των ενοίκων και του προσωπικού της σήραγγας. Όσον αφορά τους ενοίκους, οι κανόνες αυτοί έχουν ως στόχο την μείωση του εύρους των συμπεριφορών που μπορεί να έχουν. Οι κανόνες ορίζουν τρεις κατηγορίες συμπεριφορών [13]:

1. Υποχρεωτική συμπεριφορά
2. Επιτρεπτή συμπεριφορά
3. Απαγορευμένη συμπεριφορά

Καθοριστικοί παράγοντες συμπεριφοράς των ενοίκων είναι [13]:

- a. Η υποδομή της σήραγγας
- b. η ερμηνεία των κανόνων χρήσης της
- c. και η συμπεριφορά των άλλων ενοίκων και του προσωπικού

Κατά την οδήγηση, ο ένοικος επεξεργάζεται την κυκλοφορία των οχημάτων και προσαρμόζει την συμπεριφορά του ώστε να αντιδράσει σωστά για εκείνον στην εκάστοτε κατάσταση που μπορεί να συναντήσει [13].

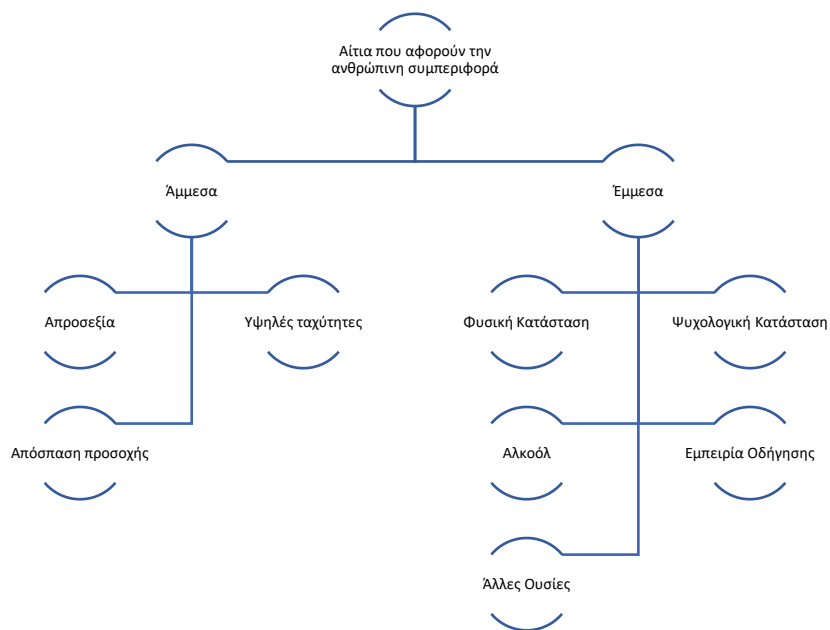
### *Συμπεριφορά που προκαλεί ανεπιθύμητα συμβάντα, ατυχήματα και πυρκαγιές*

Η αιτία των ατυχημάτων συνδέεται, στην πλειονότητα των περιπτώσεων, με την ανθρώπινη συμπεριφορά. Τα κυριότερα αίτια είναι [13]:

- Υψηλές ταχύτητες
- Απροσεξία
- Απόσπαση προσοχής

Έμμεσα αίτια μπορεί να είναι η σωματική και η ψυχολογική κατάσταση του οδηγού καθώς και αν βρίσκεται υπό την επήρεια ουσιών (βλέπε Γράφημα 4).

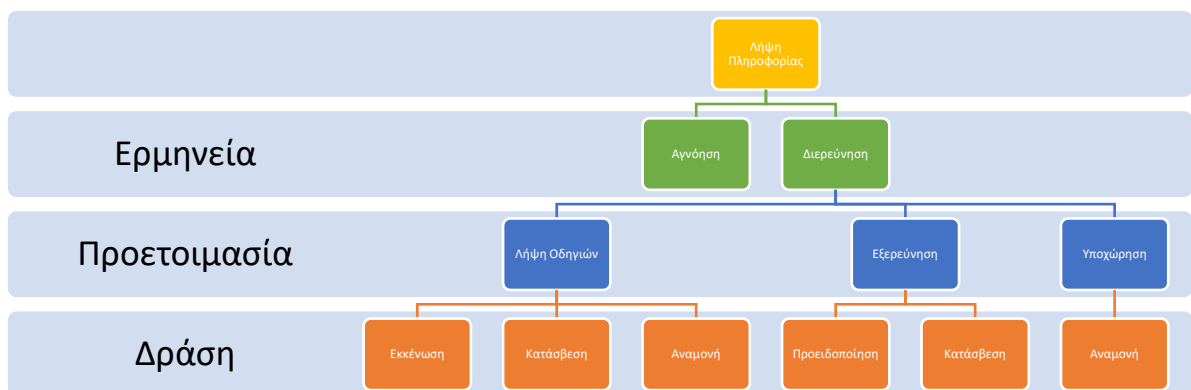
Ένας μεγάλος αριθμός ατυχημάτων και πυρκαγιών θα μπορούσε να αποφευχθεί εάν όλοι οι οδηγοί τηρούσαν τα όρια ταχύτητας και αποστάσεων, ήταν νηφάλιοι και είχαν σωστά συντηρημένα οχήματα [13].



Γράφημα 4: Άμεσα και Έμμεσα Αίτια Ατυχημάτων συνδεδεμένα με την συμπεριφορά των ενοίκων [13]

### Ανθρώπινη αντίδραση στη φωτιά

Η φωτιά βιώνεται από τους ενοίκους ως ένα σύνθετο, ταχέως μεταβαλλόμενο γεγονός, το οποίο, στα πρώτα του στάδια τουλάχιστον, είναι συνήθως πολύ διαφορούμενο, γιατί ο ένοικος δεν ξέρει αν χρειάζεται να δράσει ή όχι. Το γενικό μοντέλο αλληλουχιών περιγράφεται στο Γράφημα 5:



Γράφημα 5: Μοντέλο Αλληλουχίας Αποφάσεων [13]

Έχει παρατηρηθεί ότι σε πολλές καταστάσεις έκτακτης ανάγκης οι άνθρωποι συμπεριφέρονται ορθολογικά. Η φαινομενικά «λανθασμένη» συμπεριφορά είναι αποτέλεσμα λανθασμένης αντίληψης της κατάστασης και η ασφάλεια μπορεί να βελτιωθεί μέσω της ενημέρωσης των ενοίκων και της έγκυρης και έγκαιρης προειδοποίησης μέσα στην σήραγγα [13].

### *Εκκένωση*

Η ανθρώπινη συμπεριφορά που σχετίζεται με την εκκένωση μπορεί να μοντελοποιηθεί σε τρία στάδια [13]:

- Στάδιο 1: Αντίληψη του γεγονότος
- Στάδιο 2: Δισταγμός εγκατάλειψης οχήματος
- Στάδιο 3: Εκκένωση

Έχει παρατηρηθεί ότι οι οδηγοί είναι πολύ απρόθυμοι να εγκαταλείψουν τα οχήματά τους σε περίπτωση πυρκαγιάς σε σήραγγα. Οι χρήστες τείνουν να υποτιμούν την κατάσταση και μόνο σε περίπτωση σαφώς επικίνδυνης κατάστασης θα εγκαταλείψουν τα οχήματά τους. Είναι απαραίτητο λοιπόν να λάβουν απευθείας οδηγίες για την εγκατάλειψη του οχήματος τους. Σε πρόσφατες σοβαρές πυρκαγιές σε σήραγγες, οι απώλειες σε ανθρώπινες ζωές θα μπορούσαν να είχαν μειωθεί σημαντικά εάν οι χρήστες είχαν εκκενώσει εγκαίρως και προς τη σωστή κατεύθυνση.

### *Προσωπικό Ελέγχου*

Η συμπεριφορά του προσωπικού των σιηράγγων ακολουθεί ορισμένες γενικές αρχές λειτουργίας τεχνικών έργων. Οι υποχρεώσεις του προσωπικού διαφέρουν, από σήραγγα σε σήραγγα, ανάλογα με την υποδομή τους. Τα καθήκοντα περιλαμβάνουν [13]:

- Διασφάλιση της ομαλής λειτουργίας (πρόληψη)
- Παρακολούθηση της απόδοσης όλων των τεχνικών εγκαταστάσεων κατά την λειτουργία και την προσαρμογή τους όπως απαιτείται κατά τη διάρκεια έκτακτων συμβάντων

- Σωστή συντήρηση δομικών και ηλεκτρομηχανολογικών εγκαταστάσεων.

Η αλληλουχία ενεργειών του προσωπικού σε περίπτωση συμβάντος μπορεί να χωριστεί στις κάτωθι κατηγορίες [13]:

- Αξιολόγηση της Κατάστασης
  - Συνεχής παρακολούθηση της κυκλοφορίας των οχημάτων και της κατάστασης της σήραγγας
- Αξιολόγηση Διαταραχών
- Λήψη Αποφάσεων
  - Όταν δεν υπάρχει διαθέσιμο σχέδιο αντιμετώπισης συμβάντων το προσωπικό μπορεί να κινηθεί κατά βούληση για να αποφευχθεί η κλιμάκωση των συμβάντων
- Καθοδήγηση και Έλεγχος
  - Το προσωπικό συμμετέχει σε επιχειρήσεις διάσωσης αν είναι απαραίτητο. Επίσης έχει καθοριστικό ρόλο σε συμβάντα, ειδικά στα πρώτα στάδια, πριν από την άφιξη των υπηρεσιών διάσωσης.

Γενικά η απόδοση του προσωπικού μπορεί να βελτιωθεί με τις ακόλουθες ενέργειες:

- Προγραμματισμός
  - Λίστα των καθηκόντων/υποχρεώσεων του προσωπικού
  - Προσδιορισμός σημείων συμφόρησης με χρήση των λιστών εργασιών της γνώσης και της εμπειρίας
  - Γνωμάτευση για έλεγχο, συμπλήρωση και ιεράρχηση των σημείων συμφόρησης
  - Προσδιορισμός και αξιολόγηση λύσεων
- Πρόσληψη Προσωπικού
- Προπόνηση και Άσκηση
- Υποστήριξη εργασιών (διαδικασίες, οδηγίες, νομοθεσίες, και λογισμικό)
- Σχεδιασμός χώρου ελέγχου

Προσωπικό έκτακτης ανάγκης

Τα επείγοντα περιστατικά σήραγγας που απαιτούν ομάδες διάσωσης συμβαίνουν σπάνια και δεν αναμένεται ότι οι ομάδες μπορούν να αποκτήσουν εμπειρία χωρίς προπόνηση. Ο σχεδιασμός έκτακτης ανάγκης είναι απαραίτητος για την αποτελεσματική και επιτυχημένη επέμβαση. Υπάρχουν δύο είδη σχεδίων ετοιμότητας έκτακτης ανάγκης [13]:

- **Το οργανωτικό σχέδιο**, το οποίο παραμένει σταθερό ανεξάρτητα από την κατάσταση έκτακτης ανάγκης
- **Το σχέδιο απόκρισης**, το οποίο ποικίλλει ανάλογα με την κατάσταση έκτακτης ανάγκης.

Ένα οργανωτικό σχέδιο έκτακτης ανάγκης περιλαμβάνει πέντε βασικά καθήκοντα:

1. Αξιολόγηση
2. Πρόληψη
3. Ετοιμότητα
4. Ανταπόκριση και επαναφορά στην λειτουργία

Η διαχείριση απόκρισης χωρίζεται σε τρία επίπεδα:

- Λειτουργικό
- Τακτικό
- Στρατηγικό

Τα περιστατικά συνήθως αντιμετωπίζονται σε λειτουργικό επίπεδο και μόνο όταν η κατάσταση γίνει κρίσιμη αντιμετωπίζεται σε τακτικό και στρατηγικό επίπεδο. Σε μια κατάσταση έκτακτης ανάγκης, κάθε συμμετέχων που εμπλέκεται πρέπει να έχει έναν συγκεκριμένο ρόλο. Οι υπεύθυνοι πρέπει να έχουν την κατάλληλη εκπαίδευση και εμπειρία. Ο γενικός υπεύθυνος χρειάζεται συντονίζει τους επιμέρους υπεύθυνους της κάθε ομάδας. Τα μέσα και οι μέθοδοι επικοινωνίας είναι εξαιρετικά σημαντικοί κατά τη διάρκεια της έκτακτης ανάγκης και πρέπει να έχουν σχεδιαστεί εκ των προτέρων.



## Χαρακτηριστικά Καταστροφών και Επιπτώσεις στον Άνθρωπο

### Επιπτώσεις στον Άνθρωπο

Τα προϊόντα της καύσης είναι πολλά και ποικίλα. Ο καπνός που παράγεται από τις φωτιές είναι ένα πτητικό μείγμα που περιλαμβάνει, στερεά σωματίδια αιθάλης, άκαυτο ή μερικώς καμένο καύσιμο και μείγμα θερμού αέρα και τοξικών αερίων [14].

Ενώ η πυκνότητα και η χημική σύνθεση του καπνού που παράγεται από τις πυρκαγιές εξαρτάται από τη φύση του καυσίμου που καίγεται, ο συνολικός όγκος καπνού που παράγεται θα εξαρτηθεί από το φυσικό μέγεθος της φωτιάς και τα όρια του πυροσβεστικού περιβλήματος - ιδίως το ύψος της οροφής του [14].

Η φωτιά και κατ' επέκταση ο καπνός θέτουν σε κίνδυνο την ανθρώπινη ζωή καθώς προκαλούν[14]:

1. Απώλεια ορατότητας λόγω της συσκότισής που προκαλείται
2. Ύπαρξη τοξικών αερίων
3. Έκκληση θερμότητας

#### *Απώλεια ορατότητας*

Η συσκότιση που προκαλεί ο καπνός οδηγεί σε μείωση της ορατότητας και με αυτόν τον τρόπο καθιστά ακόμα πιο δύσκολη την διαφυγή των θυμάτων από την πυρκαγιά. Οι επιπτώσεις της μειωμένης ορατότητας μπορεί να γίνουν αισθητές πολύ μακριά από το σημείο της πυρκαγιάς.

Η συσκότιση του φωτός εκφράζεται συχνά με την έννοια της οπτικής πυκνότητας. Αυτό είναι ένα μέτρο της εξασθένησης της έντασης ( $I$ ) μιας δέσμης φωτός που διανύει απόσταση  $L$  μέσα από τον καπνό. Η οπτική πυκνότητα ( $OD$ ) ορίζεται από την αδιαστατοποιημένη παράμετρο [14]:

$$OD = \log\left(\frac{I_0}{I_l}\right)$$

όπου  $I_0$  είναι η ένταση μιας τυπικής πηγής φωτός και  $I_1$  είναι η ένταση φωτός μετά τη κίνηση σε απόσταση  $l$  μέσα από τον καπνό. Ένα άλλο μέτρο συγκέντρωσης καπνού είναι ο συντελεστής απόσβεσης ( $K$ ).

Τόσο το OD όσο και το  $K$  σχετίζονται με το επίπεδο των σωματιδίων καπνού που μετράται στο περιβάλλον. Προκειμένου να μετατραπεί το  $K$  σε οπτική πυκνότητα ανά μέτρο (OD/L), πολλαπλασιάζεται το OD/L επί 2,3, δηλαδή [14]:

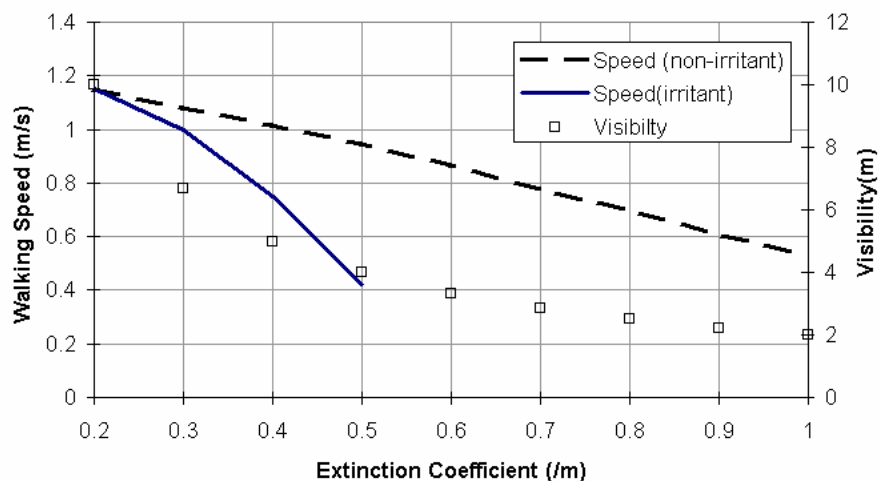
$$K = \frac{OD}{L} * 2,3$$

Από τις παραπάνω σχέσεις η ορατότητα μπορεί να προσεγγιστεί, καθώς το αντίστροφο της οπτικής πυκνότητας δίνει μια ένδειξη για το επίπεδο ορατότητας [14].

Ο Jin υπολόγισε ότι το 2,0 διαιρούμενο με τον συντελεστή απόσβεσης ( $K$ ) δίνει μια συντηρητική εκτίμηση ως την ορατότητα που παρέχει το περιβάλλον [14].

Ο Jin διεξήγαγε μια σειρά πειραμάτων διερευνώντας τη σχέση μεταξύ της ορατότητας στους ρυθμούς κινήσεων καπνού και εκκένωσης. Τα πειράματα του Jin διεξήχθησαν διάδρομο γεμάτο καπνό μήκους περίπου 20μ. Στο πείραμα συμμετείχαν 17 γυναίκες και 14 άντρες με ηλικίες από 20-51 ετών. Τα πειράματα διεξήχθησαν χρησιμοποιώντας τόσο μη ερεθιστικό όσο και ερεθιστικό καπνό. Ζητήθηκε από τα άτομα να περπατήσουν από τη μία άκρη του διαδρόμου έως την άλλη, σημειώνοντας πότε μπορούσαν να δουν μια πινακίδα εξόδου κινδύνου [14].

Τόσο ο ερεθισμός όσο και η πυκνότητα του καπνού επηρέασαν την ταχύτητα κίνησης του εθελοντή. Η Εικόνα 4 δείχνει τη σταδιακή μείωση της καταγεγραμμένης ταχύτητας κίνησης μέσα από μη ερεθιστικό καπνό καθώς η πυκνότητα του καπνού αυξάνεται, ενώ όσον αφορά τον ερεθιστικό καπνό η μείωση της ταχύτητας είναι πολύ πιο απότομη. Ο Jin εξήγησε ότι αυτό προκλήθηκε από την ακανόνιστη κίνηση των εθελοντών λόγω της αδυναμίας να κρατήσουν τα μάτια τους ανοιχτά. Ο Jin παρατήρησε επίσης ότι οι εθελοντές προσπάθησαν να αντισταθμίσουν αυτήν την έλλειψη προσανατολισμού χρησιμοποιώντας τους τοίχους ως καθοδήγηση [14].



Εικόνα 4: Η ταχύτητα κίνησης των εθελοντών σε ερεθιστικό και μη ερεθιστικό καπνό [14]

Τα αποτελέσματα του Jin υποδηλώνουν ότι στον μη ερεθιστικό καπνό, οι ταχύτητες κίνησης μειώνονται στα [14]:

- 0,5 m/s στον καπνό με  $OD = 0,43$  m ( $K = 1,0$ ), ενώ
- στον ερεθιστικό καπνό, η ταχύτητα κίνησης μειώνεται στα 0,4 m/s σε  $OD = 0,22$  m/s ( $K = 0,5$ ).

#### Τοξικά αέρια

Τα τοξικά αέρια που παράγονται από τη φωτιά χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες:

1. Τα ναρκωτικά αέρια π.χ. Μονοξείδιο του άνθρακα (CO), Διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), Υδροκυάνιο (HCN)
2. Τα ερεθιστικά αέρια π.χ. Υδροχλώριο (HCl), Υδροφθόριο (HF), Βρωμιούχο Υδρογόνο (HBr), Διοξείδιο του Θείου (SO<sub>2</sub>)

Υπολογίζεται ότι στις πυρκαγιές παράγονται περίπου είκοσι τοξικά αέρια. Ενώ η πιο διαδεδομένη αντίληψη είναι ότι η θερμότητα είναι το κύριο αίτιο θανάτου σε περίπτωση πυρκαγιάς, τα αέρια που αναφέρθηκαν προκαλούν περισσότερους θανάτους ετησίως.

#### Ναρκωτικά αέρια

Τα ναρκωτικά αέρια όταν εισπνευστούν μπορούν να προκαλέσουν από ανικανότητα μέχρι και θάνατο που εξαρτάται από την δόση που θα λάβει ο κάθε άνθρωπος. Αυτά τα αέρια επιτίθενται στο κεντρικό νευρικό σύστημα του ανθρώπου και προκαλούν μειωμένη παρατηρητικότητα, μέθη και μειωμένη ικανότητα διαφυγής. Εκτεταμένη έκθεση (αρκετά

λεπτά σε ορισμένες περιπτώσεις) προκαλεί απώλεια των αισθήσεων και τελικά θάνατο. Η έκθεση σε τέτοιου είδους αέρια είναι η κύρια αίτια θανάτων σε πυρκαγιές κτηρίων [14].

#### Ερεθιστικά αέρια

Τα ερεθιστικά αέρια προκαλούν ερεθισμό των ματιών, της μύτης, του φάρυγγα και των πνευμόνων. Τα άτομα μπορεί να αισθανθούν από μια μικρή ενόχληση μέχρι σοβαρό πόνο. Όσο μεγαλώνει ο βαθμός ερεθισμού, η ικανότητα διαφυγής των ενοίκων μπορεί να μειωθεί σε μεγάλο βαθμό. Η επίδραση εξαρτάται από την συγκέντρωση του ερεθιστικού αερίου. Σε περιπτώσεις υψηλών συγκεντρώσεων αυτών των αερίων, όπως και στα ναρκωτικά αέρια μπορεί να προκληθεί ανικανότητα έως και θάνατος[14].

#### Επίδραση των κύριων τοξικών αερίων

Η επίδραση ορισμένων τοξικών αερίων αναφέρονται περιληπτικά παρακάτω[14]:

##### a) Μονοξείδιο του Άνθρακα (CO):

Παράγεται όταν ένα εύφλεκτο υλικό δεν κάνει πλήρη καύση. Είναι παρών σε κάθε πυρκαγιά και μπορεί να φτάσει πολύ μεγάλες συγκεντρώσεις (αρκετά χιλιάδες ppm). Όταν γίνει εισπνοή του CO, απορροφάται από το αίμα μέσω των πνευμόνων και αντιδρά με την αιμοσφαιρίνη και παράγει καρβοξυαιμοσφαιρίνη (CoHb). Αυτή εμποδίζει την απορρόφηση και μεταφορά του οξυγόνου στα κύτταρα.

- 10 - 20% CoHb προκαλεί πονοκέφαλο
- 30 - 40% CoHb προκαλεί σοβαρό πονοκέφαλο, ναυτία, εμετούς και κατάρρευση
- 50 - 100% CoHb προκαλεί θάνατο.

Υπάρχουν όμως περιπτώσεις που και συγκέντρωση της τάξης του 20% έχουν επιφέρει το θάνατο σε κάποια άτομα. Έτσι κρίνεται απαραίτητο να λαμβάνεται υπόψη και η υγεία του θύματος.

b) Υδροκυάνιο (HCN):

Παράγεται από την καύση του αζώτου (N) το οποίο περιέχεται σε υλικά όπως μαλλί, μετάξι, πολυουρεθάνη, νάιλον, δέρμα, ακρυλικά και μερικά πλαστικά. Επίπεδα των 3 mg/lit είναι θανατηφόρα, ωστόσο χαμηλά επίπεδα της τάξης του 1 mg/lit έχουν οδηγήσει σε θάνατο. Από την άλλη υπάρχουν περιπτώσεις που άνθρωποι επιβίωσαν σε επίπεδα έως και 7 mg/lit. Μια ατμοσφαιρική συγκέντρωση 200 ppm θα προκαλέσει ταχεία κατάρρευση και θάνατο.

Μια σημαντική διαφορά μεταξύ του CO και του HCN είναι το λεγόμενο «knock down effect» που έχει το HCN. Το CO ακολουθεί τον κανόνα του Haber, ο οποίος αναφέρει ότι ο αντίκτυπος του χρόνου έκθεσης και της συγκέντρωσης είναι ίδιος. Το HCN ωστόσο δεν ακολουθεί αυτή τη σχέση και σε χαμηλές συγκεντρώσεις μπορεί να εμφανίσει ανικανότητα σε σχετικά μεγάλους χρόνους ενώ σε υψηλές συγκεντρώσεις (περίπου 200ppm) η ανικανότητα εμφανίζεται σε λιγότερο από ένα λεπτό.

c) Διοξείδιο του Άνθρακα (CO<sub>2</sub>):

Παράγεται από την καύση οποιουδήποτε καυσίμου. Οι επιπτώσεις καθορίζονται εν μέρει από την συγκέντρωση του αερίου και της δόσης που λαμβάνεται. Το CO<sub>2</sub> παράγει υποξία - μείωση της ποσότητας οξυγόνου διαθέσιμο για στα κύτταρα. Έχει επίσης την τάση να αυξάνει τον ρυθμό αναπνοής, αυξάνοντας έτσι τον ρυθμό πρόσληψης άλλων τοξικών αερίων πυρκαγιάς εκτός από το CO<sub>2</sub>.

- 3 - 6% δυσκολία στην αναπνοή
- 6 - 7% ζαλάδα, οριακή απώλεια των αισθήσεων
- 7 - 10% απώλεια αισθήσεων

d) Χαμηλό O<sub>2</sub>:

Όλες οι πυρκαγιές καταναλώνουν O<sub>2</sub>, εάν ο χώρος δεν αερίζεται καλά, η συγκέντρωση του O<sub>2</sub> μπορεί πέσει δραματικά. Οι επιδράσεις της χαμηλής συγκέντρωσης του O<sub>2</sub> σχετίζονται εν μέρει με τη συγκέντρωση και εν μέρει που σχετίζονται με τη δόση που λαμβάνεται.

- 20,9 - 14,4% ελαφρά απώλεια ανοχής στην άσκηση
- 14,4 - 11,8% μείωση στην απόδοση νοητικής εργασίας, μειωμένη ανοχή στην άσκηση,

- 11,8 - 9,6% σοβαρή ανικανότητα, απώλεια αισθήσεων,
- 9,6 - 7,8% απώλεια αισθήσεων, θάνατος.

e) Υδροφθόριο (HF):

Παράγεται από φθοριούχα πολυμερή όπως το πολυβινυλοφθορίδιο. Αντιδρά με την υγρασία και παράγεται υδροφθορικό οξύ - ένα εξαιρετικά ισχυρό οξύ. Προκαλεί οίδημα (συσσώρευση υπερβολική ποσότητα υγρού σε κύτταρα, ιστούς ή σωματικές κοιλότητες) εντός της αναπνευστικής οδού. Εγκαύματα που προκαλούνται από το υδροφθορικό οξύ προκαλούν πόνο.

- 32 ppm Ερεθισμός των ματιών και της μύτης
- 60 ppm Κνησμός, ερεθισμός της αναπνευστικής οδού
- 50 - 100 ppm Επικίνδυνο για τη ζωή μετά από λίγα λεπτά.

f) Υδροχλωρικό οξύ HCl:

Παράγεται από την καύση PVC και πολλών βραδύκαυστων υλικών. Αντιδρά με το νερό και είναι πολύ ερεθιστικό για τα μάτια, το λαιμό και το αναπνευστικό σύστημα.

- 35 ppm Ερεθισμός του λαιμού,
- 50 - 100 ppm Οριακά ανεκτός πόνος
- 1000 ppm Κίνδυνος οίδηματος μετά από σύντομη έκθεση.

g) Θειικά (SO<sub>2</sub>):

Παράγεται από την καύση καουτσούκ και άλλων ενώσεων που περιέχουν θείο. Αντιδρά με το νερό και παράγει θειικό οξύ που είναι πολύ ερεθιστικό για τα μάτια. Προκαλεί βήχα.

- 20 ppm Βήχας και ερεθισμός των ματιών,
- 100 - 250 ppm Επικίνδυνο για τη ζωή,
- 600 - 800 ppm Θάνατος σε λίγα λεπτά.

h) CH<sub>2</sub>CH CHO:

Παράγεται από την καύση φυσικών υλικών όπως το ξύλο και το βαμβάκι και υδρογονάνθρακες όπως η κηροζίνη. Είναι έντονα ερεθιστικό για τα μάτια και προκαλεί ερεθισμό στο πάνω μέρος της αναπνευστικής οδού.

- 1 ppm Ερεθισμός,
- 5,5 ppm Έντονος ερεθισμός
- 24 ppm Αφόρητο

Οι παραπάνω τιμές στα αέρια είναι ενδεικτικές. Παράγοντες όπως η υγεία, το σωματικό βάρος, η ηλικία, το πόσο δραστήριο είναι το άτομο, μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την ανοχή του στα τοξικά αέρια. Για τα ερεθιστικά αέρια, Ο Purser [14] συνιστά τα επίπεδα στα οποία οι επιπτώσεις γίνονται σοβαρές και επιδρούν στην ικανότητα εκκένωσης των ενοίκων, όπως φαίνεται στον πίνακα:

| Τοξικό αέριο           | Συγκέντρωση (ppm)               |                       |
|------------------------|---------------------------------|-----------------------|
|                        | Επιδείνωση ικανότητας εκκένωσης | Ανικανότητα εκκένωσης |
| HCL                    | 200                             | 900                   |
| HBr                    | 200                             | 900                   |
| HF                     | 200                             | 900                   |
| SO <sub>2</sub>        | 24                              | 120                   |
| NO <sub>2</sub>        | 70                              | 350                   |
| CH <sub>2</sub> CH CHO | 4                               | 20                    |
| HCHO                   | 6                               | 30                    |

Πίνακας 13: Επίπεδα συγκέντρωσης τοξικών αερίων που επιδρούν στην ικανότητα εκκένωσης [14,15]

## Θερμότητα

Οι πυρκαγιές απελευθερώνουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας, αυτή η ενέργεια χρησιμοποιείται για τη θέρμανση του γειτονικού τους περιβάλλοντος. Θερμοκρασίες αέρα άνω των 1000°C μπορούν να δημιουργηθούν σε πλήρως ανεπτυγμένες πυρκαγιές[14].

Η υπερβολική μεταφορά θερμότητας στο δέρμα των εκτεθειμένων ατόμων μπορεί να προκαλέσει πόνο και εγκαύματα. Αυτά με τη σειρά τους μπορεί να οδηγήσουν σε ανικανότητα και θάνατο. Όταν ένα θύμα προσπαθεί να διαφύγει από μια πυρκαγιά είναι πιο πιθανό να επηρεαστεί τόσο από τη μεταφορά θερμότητας όσο και από την ακτινοβολία. Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας από τον θερμό αέρα εξαρτάται από τη θερμοκρασία του αέρα, βαθμό της μόνωσης που παρέχεται από τα ρούχα και την υγρασία του αέρα. Πάνω από 120°C οι εκτεθειμένες περιοχές του δέρματος υπόκεινται σε καύση από μεταφορά θερμότητας. Τα υψηλά επίπεδα υγρασίας περιπλέκουν το πρόβλημα (μείωση της κρίσιμης θερμοκρασίας) μειώνοντας τα αποτελέσματα ψύξης. Επιπλέον, ο υγρός αέρας προσφέρει

περισσότερη θερμότητα στο δέρμα λόγω της υψηλότερης θερμοχωρητικότητας του νερού[14].

Η βλάβη στην αναπνευστική οδό λόγω εγκαυμάτων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την υγρασία του αέρα. Ωστόσο, λόγω της υψηλότερης θερμοχωρητικότητας, ο εισπνεόμενος ζεστός αέρας με υψηλή περιεκτικότητα σε υδρατμούς μπορεί προκαλέσει σοβαρότερη βλάβη στην αναπνευστική οδό από τον ξηρό αέρα στην ίδια θερμοκρασία. Ο ξηρός αέρας στους 300°C μπορεί να προκαλέσει εγκαύματα στον λάρυγγα μετά από λίγα λεπτά ενώ ο υγρός αέρας στους 100°C μπορεί να προκαλέσει έγκαυμα σε όλη την αναπνευστική οδό[14].

Μεγαλύτερη ανησυχία προκαλεί η επίδραση της θερμικής ακτινοβολίας. Η κρίσιμη τιμή ανοχής λόγω της έκθεσης σε θερμική ακτινοβολία ισοδυναμεί με έκθεση σε 2,5 kW/m<sup>2</sup> για 24 δευτερόλεπτα. Αυτή είναι μια συντηρητική τιμή και είναι η τιμή που προτείνει ο Purser. Η λογική για τη χρήση αυτής ως κρίσιμης τιμής ανοχής είναι ότι το άτομο έχει λάβει αθροιστική δόση θερμικής ακτινοβολίας ισοδύναμη με εκείνη που απαιτείται για την εμφάνιση του πόνου (αλλά όχι εγκαύματα) και ως αποτέλεσμα καθίσταται ανίκανο να συνεχίσει την αποτελεσματική εκκένωση[14].

Μια αναμφισβήτητα πιο αντιπροσωπευτική διατύπωση είναι το λεγόμενο «όριο ανικανότητας». Αυτό ισοδυναμεί με έκθεση 8,25 kW/m<sup>2</sup> για ένα λεπτό. Αθροιστική δόση ακτινοβολίας ισοδύναμη με 8,6 kW/m<sup>2</sup> για ένα λεπτό αναμένεται να προκαλέσει θνησιμότητα στο 1% του πληθυσμού. Η λογική για τη χρήση αυτού ως κρίσιμης τιμής ανοχής είναι ότι ο επιβάτης έλαβε μια σοβαρή αθροιστική δόση θερμικής ακτινοβολίας και επομένως είναι πιθανό να υπέστη εγκαύματα δεύτερου βαθμού στο εκτεθειμένο δέρμα με αποτέλεσμα έντονο πόνο και έτσι θα δυσκολευτεί να συνεχίσει την εκκένωση[14].

Για να συγκρίνετε την επίδραση των δύο διατυπώσεων, σκεφτείτε ένα άτομο που εκτίθεται σε μια σταθερά ροή θερμότητας ακτινοβολίας περίπου 2,5 kW/m<sup>2</sup>. Η έκθεση σε 2,5 kW/m<sup>2</sup> για 24 δευτερόλεπτα είναι ο συνιστώμενος χρόνος ανοχής σύμφωνα με τον Purser [14]. Σύμφωνα με τους Hymes et al [16] η έκθεση σε 2,6 kW/m<sup>2</sup> για 1 λεπτό είναι το κατώτερο όριο για τη δημιουργία φυσαλίδων δεύτερου βαθμού εκτεθειμένο δέρμα, μια έκθεση σε 2,6 kW/m<sup>2</sup> για 5 λεπτά μπορεί να οδηγήσει σε θνησιμότητα 1% και η έκθεση σε 2,8 kW/m<sup>2</sup> για 5 λεπτά είναι το κατώτερο όριο για το δεύτερο βαθμό συν εγκαύματα (>0,1 mm βαθιά) σε εκτεθειμένο δέρμα.

Χρησιμοποιώντας την προσέγγιση της κρίσιμης τιμής ανοχής, ένας επιβάτης που εκτίθεται σε 2,5 kW/m<sup>2</sup> για 24 δευτερόλεπτα θεωρείται ανίκανος να εκκενώσει. Χρησιμοποιώντας



την προσέγγιση της «ανικανότητας», αυτή η τιμή αυξάνεται ώστε ένα άτομο που εκτίθεται σε 2,5 kW/m<sup>2</sup> για 5 λεπτά να θεωρείται ανίκανο να εκκενώσει. Ως εκ τούτου, η πρώτη προσέγγιση προϋποθέτει ότι το άτομο θα υποστεί μια φορά πόνο ο οποίος ξεπερνά την κρίσιμη τιμή ανοχής. Το άτομο στη συνέχεια υποκύπτει σε πολύ χαμηλότερο επίπεδο ακτινοβολίας [14].

Και οι δύο προσεγγίσεις είναι υποκειμενικές και εξαρτώνται από πολλές μεταβλητές όπως η ηλικία του ενοίκου, η κατάσταση της υγείας, η ποσότητα και ο τύπος ενδυμάτων που φοράει, το ποσοστό του δέρματος που εκτίθεται κ.λπ., εάν το κεφάλι, ο λαιμός και τα χέρια είναι εκτεθειμένα, αυτό ισοδυναμεί με περίπου 14% της επιφάνειας του σώματος. Εάν τα χέρια και τα πόδια είναι επίσης εκτεθειμένα, αυτό αυξάνει την έκθεση επιφάνεια σε περίπου 61% [14].

Οι ηλικιωμένοι είναι πιο επιρρεπείς σε εγκαύματα από τους νέους. Το προβλεπόμενο ποσοστό θνησιμότητας από εγκαύματα ως συνάρτηση του ποσοστού της καμένης περιοχής και της ηλικίας υποδηλώνει ότι ένας 20χρονος με 20% καμένη επιφάνεια έχει 1% πιθανότητα θανάτου που αυξάνεται στο 5% στην ηλικία των 40 ετών και στο 31% στην ηλικία των 70 ετών. Για το 65% της καμένης περιοχής, η πιθανότητα θανάτου είναι 67%, 90% και 99% για ηλικίες 20, 40 και 70 ετών αντίστοιχα. Ως αποτέλεσμα αυτές οι τιμές προορίζονται μόνο να είναι ενδεικτικά [14].

Στην πραγματικότητα, ο βαθμός θερμικής ακτινοβολίας στην οποία υποβάλλεται ένα άτομο είναι πιθανό να επηρεάσει την συμπεριφορά του ατόμου καθώς και τη φυσική του ικανότητα να εκκενώσει. Για παράδειγμα, κατά τη διάρκεια πυρκαγιάς σενάριο εκκένωσης, ένα άτομο μπορεί να είναι λιγότερο πιθανό να επιλέξει να εισέλθει σε ένα περιβάλλον στο οποίο εκτεθεί σε υψηλή δόση θερμικής ακτινοβολίας (π.χ. αυτή που απαιτείται για να προκαλέσει την έναρξη πόνου). Αντιμέτωπο με μια τέτοια κατάσταση, το άτομο μπορεί να είναι πιο πιθανό να επιλέξει εναλλακτική διαδρομή εξόδου εάν υπάρχει ή να παραμείνει σε μέρος σχετικής ασφάλειας. Ωστόσο, εάν το άτομο είναι ήδη εκτεθειμένο στο περιβάλλον της φωτιάς και βρίσκεται σε διαδικασία εκκένωσης είναι πιθανό να μπορεί να ανεχτεί έκθεση σε υψηλότερες τιμές θερμικής ακτινοβολίας από αυτές που απαιτούνται για την πρόκληση πόνου προτού καταστεί ανίκανο να εκκενώσει. Έτσι, για περιβάλλοντα πυρκαγιάς σήραγγας, είναι πιθανόν ότι η υψηλότερη τιμή είναι πιο λογικό να χρησιμοποιηθεί [14].

## Κριτήρια ανθεκτικότητας ενοίκων

Τα όρια ανθεκτικότητας περιλαμβάνουν συνήθως την ορατότητα και τη θερμοκρασία καθώς και τις τοξικές επιδράσεις άλλων αερίων λυμάτων με σημαντικότερο το μονοξείδιο του άνθρακα.

### Ορατότητα

Η ορατότητα δεν επηρεάζει άμεσα την υγεία των επιβατών, αλλά επηρεάζει την κίνησή τους μειώνοντας την ταχύτητά τους και επομένως αυξάνει τον χρόνο εκκένωσης και τον χρόνο που περνά σε δυσχερές περιβάλλον (υψηλές θερμοκρασίες και συγκεντρώσεις τοξικών αερίων) κατά την εκκένωση. Το όριο ορατότητας επηρεάζει την ταχύτητα από διαφορετικούς παράγοντες όπως φαίνεται στον Πίνακα 14.

Πίνακας 14: Απομείωση ταχύτητας ανάλογα με τα επίπεδα ορατότητας

| Επίπεδα ορατότητας   | Συντελεστής ταχύτητας |
|----------------------|-----------------------|
| Ορατότητα > 10m      | 1                     |
| 2m < Ορατότητα < 10m | 0.5                   |
| Ορατότητα < 2m       | 0.3                   |

### Θερμοκρασία

Η έκθεση στη ζέστη μπορεί να οδηγήσει σε ανικανότητα ή θάνατο σε θύματα πυρκαγιάς με 3 τρόπους: Υπερθερμία (Θερμοπληξία), Εγκαύματα Επιφανείας Σώματος και Εγκαύματα της Αναπνευστικής Οδού. Το NFPA 130 [17] παρέχει όρια ανθεκτικότητας για τη θερμοκρασία χρησιμοποιώντας το FED, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 15.

Πίνακας 15: Θερμοκρασία έκθεσης και χρόνος αντοχής σε αυτήν

| Θερμοκρασία έκθεσης (°C) | Χρόνος αντοχής (min) |
|--------------------------|----------------------|
| 80                       | 3.8                  |
| 75                       | 4.7                  |
| 70                       | 6.0                  |
| 65                       | 7.7                  |
| 60                       | 10.1                 |
| 55                       | 13.6                 |
| 50                       | 18.8                 |
| 45                       | 26.9                 |
| 40                       | 40.2                 |

Η αποδεκτή μέγιστη τιμή FED για το ευρύ κοινό είναι 0,3 και υπολογίζεται για κανονικά ντυμένο σώμα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$t_{exp} = (1.125 \times 10^7) T^{-3.4}$$

#### Μονοξειδίο του άνθρακα

Το NFPA 130 [17] παρέχει κριτήρια ανθεκτικότητας για το επίπεδο μονοξειδίου του άνθρακα για μια σειρά από οριακές τιμές (Πίνακας 16). Μια τιμή για το όριο FED 0,5 είναι τυπική για υγιείς ενήλικους πληθυσμούς, 0,3 είναι τυπική προκειμένου είναι δυνατή η διαφυγή από τους πιο ευαίσθητους πληθυσμούς και τα όρια AEGL 2 προορίζονται για την προστασία του γενικού πληθυσμού, συμπεριλαμβανομένων των ευπαθών ατόμων.

Πίνακας 16: Όρια αντοχής στο μονοξειδίο του άνθρακα

| Χρόνος (min) | Όρια αντοχής (ppm) |         |         |
|--------------|--------------------|---------|---------|
|              | AEGL2              | FED 0.3 | FED 0.5 |
| 4            | -                  | 1706    | 2844    |
| 6            | -                  | 1138    | 1896    |
| 10           | 420                | 683     | 1138    |
| 15           | -                  | 455     | 758     |
| 30           | 150                | 228     | 379     |
| 60           | 83                 | 117     | 190     |
| 240          | 33                 | 28      | 48      |

Ωστόσο, η διαδικασία καύσης μπορεί να παράγει πολλά διαφορετικά λύματα. Αυτά περιλαμβάνουν διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), μονοξείδιο του άνθρακα (CO), υδροκυάνιο (HCN), υδροχλώριο (HCl), διοξείδιο του αζώτου (NO<sub>2</sub>) και οργανικές ουσίες. Όλες οι πυρκαγιές είναι πιθανό να περιλαμβάνουν CO<sub>2</sub> και CO, αλλά οι τύποι των λυμάτων που υπάρχουν επηρεάζονται από τα υλικά που εμπλέκονται σε μια πυρκαγιά. Ως εκ τούτου, όσον αφορά την υγεία των ενοίκων και την ικανότητά τους να εκκενώσουν το κτίριο σε περίπτωση πυρκαγιάς, η τιμή 1 για το FED από την έκθεση σε ναρκωτικά αέρια, CO, CO<sub>2</sub> και O<sub>2</sub> θα πρέπει να χρησιμοποιείται ως το κρίσιμο σημείο μετά το οποίο η εκκένωση θεωρείται ότι έχει σταματήσει (το 50% του πληθυσμού θα επηρεαστεί σε μια τέτοια κατάσταση). Σύμφωνα με το SFPE Handbook of Fire Protection Engineering [11] το FED θα υπολογιστεί από την ακόλουθη εξίσωση:

$$FED_{tot} = FED_{CO} \times V_{CO_2} + FED_{O_2}$$

Το διοξείδιο του άνθρακα δεν έχει τοξικές επιδράσεις σε συγκεντρώσεις έως και 5%, αλλά αυξάνει τον ρυθμό αναπνοής, γεγονός που αυξάνει τον ρυθμό με τον οποίο προσλαμβάνονται τα άλλα προϊόντα πυρκαγιάς.

Το κλάσμα της δόσης που οδηγεί σε ανικανότητα του CO υπολογίζεται ως:

$$FED_{CO} = 3.317 \times 10^{-5} [CO]^{1.036} (V)(t)/D$$

Όπου,

[CO]: Συγκέντρωση μονοξειδίου του άνθρακα (ppm v/v 20 Κελσίου).

V: Όγκος αέρα που αναπνέεται κάθε λεπτό (L/min). Η τιμή είναι 25 λίτρα/λεπτό για ένα επίπεδο δραστηριότητας ελαφριάς εργασίας (π.χ. περπάτημα για εκκένωση).

t: χρόνος (λεπτά).

Δ: Δόση έκθεσης (ποσοστό COHb). Η τιμή είναι 30% για ένα επίπεδο δραστηριότητας ελαφριάς εργασίας (π.χ. περπάτημα για εκκένωση).

Η αύξηση ρυθμού αναπνοής λόγω διοξειδίου του άνθρακα μπορεί να αυξήσει τον ρυθμό με τον οποίο προσλαμβάνονται άλλα τοξικά προϊόντα πυρκαγιάς (όπως το CO). Ο συντελεστής πολλαπλασιασμού δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

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

Οπού,

%CO: κλάσμα όγκου CO<sub>2</sub> (v/v).

Το κλάσμα της δόσης που οδηγεί σε ανικανότητα λόγω χαμηλού O<sub>2</sub> υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$FED_{O_2} = t / \{ \exp [8.13 - 0.54 (20.9 - \%O_2)] \}$$

Οπού,

t: χρόνος (λεπτά).

%O<sub>2</sub>: κλάσμα όγκου O<sub>2</sub> (v/v).

## Εκκένωση σε Σήραγγες

Στο υποκεφάλαιο που ακολουθεί παρατίθενται μερικά ατυχήματα που έχουν συμβεί σε οδικές σήραγγες ανά τα έτη, σε διεθνές επίπεδο και στην συνέχεια παρουσιάζονται οι κανονισμοί εκκένωσης που ισχύουν.

### Ατυχήματα σε Σήραγγες

Μια πυρκαγιά σε ένα υπόγειο σύστημα μεταφοράς, μπορεί να έχει καταστροφικές συνέπειες τόσο από οικονομική σκοπιά όσο και από απώλειες ανθρώπινων ζωών. Αυτό αποδεικνύεται σαφώς από πολλά ατυχήματα στο παρελθόν τόσο σε σιδηροδρομικές όσο και σε οδικές εγκαταστάσεις. Υπάρχουν, ωστόσο, παράγοντες που είναι ιδιαίτερα σημαντικοί για την εκκένωση πυρκαγιάς στα υπόγεια συστήματα μεταφοράς. Για παράδειγμα, μια σήραγγα είναι πολύ διαφορετική σε σύγκριση με ένα κτίριο, καθώς η απόσταση από μια ασφαλή τοποθεσία, δηλαδή τις εισόδους της σήραγγας, τις εξόδους κινδύνου ή τα καταφύγια ασφαλείας, είναι συνήθως πολύ μεγάλη. Επομένως, ένας σημαντικός παράγοντας είναι η ταχύτητα κίνησης, η οποία μπορεί να επηρεαστεί από πτυχές όπως οι συνθήκες φωτισμού, το υλικό της επιφάνειας του δαπέδου και ο καπνός. Οι μεγάλες αποστάσεις στις σήραγγες μπορούν επίσης να κάνουν τις επιχειρήσεις διάσωσης πιο περίπλοκες από ότι στα περισσότερα κτίρια. Αυτό σημαίνει ότι οι υπηρεσίες διάσωσης ενδέχεται να μην είναι σε θέση να βοηθήσουν σε περίπτωση εκκένωσης. Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας είναι οι πληροφορίες, οι οποίες είναι σχετικές τόσο για την έναρξη της εκκένωσης όσο και για την κατεύθυνση των ατόμων στις κατάλληλες εξόδους [2].

Τα ατυχήματα που πραγματοποιήθηκαν με το πέρασμα των χρόνων έδειξαν ότι, μερικές φορές είναι δύσκολο να πείσουμε τους ανθρώπους να ανταποκριθούν. Πολλές από τις θεωρίες για την ανθρώπινη συμπεριφορά στην πυρκαγιά εφαρμόζονται σε ένα ευρύ φάσμα καταστάσεων και μπορούν ως εκ τούτου να εφαρμοστούν σε πυρκαγιές σε υπόγεια συστήματα μεταφοράς καθώς και σε πυρκαγιές κτιρίων[2].

### **1) Σήραγγα Nihonzaka, Ιαπωνία (1979)**

Η σήραγγα Nihonzaka βρίσκεται στο μέσο της διαδρομής μεταξύ των πόλεων Τόκιο και Ναγκόγια. Η σήραγγα αποτελείται από δύο κλάδους μήκους περίπου 2 km διπλής κατεύθυνσης. Στην σήραγγα δεν υπήρχαν περιορισμοί όσον αφορά την διέλευση επικίνδυνων φορτίων διαμέσου της σήραγγας μέχρι το συμβάν[14].

Η φωτιά ξέσπασε στις 11 Ιουλίου 1979, από σύγκρουση μεταξύ τεσσάρων φορτηγών και δύο αυτοκινήτων. Το ατύχημα προκάλεσε διαρροή στα ντεπόζιτα των οχημάτων με αποτέλεσμα τα καύσιμα (βενζίνη και ντίζελ) να διαρρεύσουν. Τα καύσιμα αναφλέχθηκαν και ως εκ τούτου προκλήθηκε πυρκαγιά που επηρέασε 173 οχήματα. Ανάμεσα στα καμένα οχήματα υπήρχαν δύο βυτιοφόρα που μετέφεραν νεοπρένιο και συνοδευτικό διαλύτη. Το φορτίο σε άλλο φορτηγό που ενεπλάκη στο ατύχημα ήταν 10 βαρέλια αιθέρα τα οποία εμφάνισαν διαρροές λόγω του ατυχήματος. Ο αιθέρας που διέρρευσε αμέσως άρχισε να καίει έντονα. Άλλα υλικά που κάηκαν ήταν τεχνητή ρητίνη και πλαστικά είδη. Οι καταιονιστήρες νερού που βρίσκονταν στη σήραγγα ενεργοποιήθηκαν αυτόματα από τα συστήματα συναγερμού πυρκαγιάς. 10 λεπτά μετά την εμφάνιση της, η φωτιά φάνηκε να έχει σβήσει. Ωστόσο, περίπου 15 λεπτά αργότερα η φωτιά αναζωπυρώθηκε. Η αναζωπύρωση παρήγαγε πυκνό μαύρο καπνό. Η πυρκαγιά έφτασε σε μήκος περισσότερο από 1100 μέτρα. Αν και υπήρχε μήνυμα στην είσοδο της σήραγγας ότι είχε γίνει ατύχημα, οχήματα συνέχισαν να εισέρχονται σε αυτή. Μια ουρά 231 οχημάτων σχηματίστηκε μπροστά από το εστία της φωτιάς. Από τα 230 οχήματα στη σήραγγα, τα 173 καταστράφηκαν από τη φωτιά. 7 άνθρωποι έχασαν τη ζωή τους ενώ άλλοι 2 τραυματίστηκαν[14].

Η επένδυση της σήραγγας για μήκος περίπου 1.100 μέτρα καταστράφηκε. Η μεγαλύτερη ζημιά σημειώθηκε σε περιοχή περίπου 500 μέτρα εκατέρωθεν της εστίας της πυρκαγιάς. Το οδόστρωμα έλιωσε κατά τόπους έως και βάθος 2-3 cm κατά μέσο όρο, με το μέγιστο βάθος να είναι περίπου 7 εκ. Κατά τη διάρκεια των εργασιών επισκευής το σκυρόδεμα της επένδυσης της σήραγγας αφαιρέθηκε σε βάθος περίπου 3 εκ. Στη συνέχεια τοποθετήθηκε

ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Μετά την ολοκλήρωση των εργασιών επισκευής στο οδόστρωμα στις 7 Αυγούστου, ξεκίνησαν οι εργασίες επισκευή του εξοπλισμού της σήραγγας. Αυτή η εργασία διήρκεσε περίπου. 1 μήνα, και περιείχε [14]:

α) ανανέωση των συστημάτων επιτήρησης και συναγερμού πυρκαγιάς

β) ανακατασκευή του συστήματος εξαερισμού

γ) ανανέωση και συμπλήρωση του πυροσβεστικού εξοπλισμού

δ) εγκατάσταση συστήματος καθοδηγούμενης διαφυγής (συμπεριλαμβανομένων των μεγάλων)

## **2) Caldecott Tunnel, Όκλαντ, Καλιφόρνια (1982)**

Η φωτιά εκδηλώθηκε στις 7 Απριλίου 1982, λίγο πριν τα μεσάνυχτα, με πολύ μικρή κίνηση στο τούνελ. Ένας μεθυσμένος οδηγός αυτοκινήτου έχασε τον έλεγχο του αυτοκινήτου του και συγκρούστηκε πολλές φορές με τον τοίχο της σήραγγας. Πίσω από μια δεξιά στροφή στο τούνελ σταμάτησε στην αριστερή λωρίδα για να επιθεωρήσει τη ζημιά που είχε προκαλέσει. Στη συνέχεια, δύο ή τρία αυτοκίνητα πέρασαν δίπλα από το ακινητοποιημένο όχημα χωρίς να προκληθεί ατύχημα. Ωστόσο, ένα άδειο λεωφορείο στη συνέχεια επιχείρησε για να προσπεράσει ένα γεμάτο βυτιοφόρο χωρίς να προσέξει το ακινητοποιημένο αυτοκίνητο στην αριστερή λωρίδα. Όταν το βυτιοφόρο βρέθηκε στο ίδιο σημείο με το ακίνητο αυτοκίνητο και τα τρία οχήματα συγκρούστηκαν. Από τη δύναμη της σύγκρουσης ο οδηγός του λεωφορείου εκτινάχθηκε έξω από το λεωφορείο. Το ίδιο το λεωφορείο συγκρούστηκε έπειτα σε μια τσιμεντένια κολόνα έξω από τη σήραγγα. Αυτό ειδοποίησε το προσωπικό που χειριζόταν τη σήραγγα για το ατύχημα μέσα στη σήραγγα. Το βυτιοφόρο μετέφερε συνολικά 33.300 λίτρα βενζίνης. Η βενζίνη διέρρευσε και άναψε. Η σήραγγα γέμισε καπνό εντός περίπου 3 λεπτών. Καθώς δεν υπήρχαν φανάρια στην είσοδο της σήραγγας, τα οχήματα συνέχισαν την διέλευση τους από τη σήραγγα ακόμα και μετά το ξέσπασμα της φωτιάς. Μερικοί από αυτούς οδήγησαν στην περιοχή που επλήγη από τη φωτιά, με αποτέλεσμα συνολικά να καούν 2 φορτηγά και 4 Ι.Χ. Οι οδοί διαφυγής προς τον γειτονικό κλάδο δεν χρησιμοποιήθηκαν λόγω ανεπαρκούς σήμανσης και τον πυκνό καπνό [14].

Η σήραγγα και ο εξοπλισμός της, καθώς και το οδόστρωμα, υπέστησαν σοβαρές ζημιές σε μήκος περίπου 580 μέτρων. Το κόστος επισκευής ανήλθε σε περισσότερο από περίπου. 3,3 εκατ. ευρώ [14].

### **3) Pfänder Tunnel, Αυστρία (1995)**

Στις 10 Απριλίου 1995 σημειώθηκε τροχαίο στη σήραγγα με αποτέλεσμα τρία οχήματα να καούν. Η φωτιά εντοπίστηκε περίπου 4,3 χλμ από το βόρειο στόμιο και 2,4 χλμ από το νότιο. Το ατύχημα προκλήθηκε από οδηγό αυτοκινήτου που αποκοιμήθηκε στο τιμόνι οδεύοντας προς νότια κατεύθυνση. Πέρασε στην στο αντίθετο κυκλοφορίας και τράκαρε με ένα αρθρωτό όχημα φορτωμένο με ψωμί. Αυτό το φορτηγό άρχισε να πλαγιολισθαίνει και στη συνέχεια πέρασε επίσης στο αντίθετο ρεύμα, σύρθηκε κατά μήκος του τοίχου της σήραγγας για περίπου 130 μέτρα και τελικά έπεσε πάνω σε ένα αυτοκινούμενο τροχόσπιτο που μετέφερε τρία άτομα. Το τροχόσπιτο πήρε φωτιά αμέσως που στη συνέχεια εξαπλώθηκε στο φορτηγό και ένα ακόμη αυτοκίνητο[14].

Από τη φωτιά καταστράφηκε το φορτηγό, ένα αυτοκίνητο και το τροχόσπιτο. Η οροφή της σήραγγας στο τμήμα που ξέσπασε η πυρκαγιά εμφάνισε ρωγμές. Αυτή η δομική βλάβη είχε έκταση περίπου 24 μέτρα. Ο εξοπλισμός λειτουργίας, όπως ο φωτισμός, τα εναέρια καλώδια και οι γραμμές τροφοδοσίας, υπέστησαν ζημιές σε μήκος περίπου 360 μέτρων[14].

Για να μπορέσει η σήραγγα να ξανατεθεί σε προσωρινή λειτουργία, η ψευδοροφή στηρίχθηκε αρχικά με χοντρά ξύλινα κοντάρια και σανίδες. Επιπλέον, τοποθετήθηκε χαλύβδινο πλέγμα που στερεώθηκε στην οροφή του κατεστραμμένου τμήματος της σήραγγας. Μετά από περίπου 2 μέρες ήταν δυνατό να δοθεί ξανά η σήραγγα στη κυκλοφορία. Οι τελικές εργασίες επισκευής πραγματοποιήθηκαν τον Μάιο του 1995. Το κόστος αυτών των εργασιών εκτιμήθηκε ότι ήταν περίπου 200.000EUR[14].

### **4) Σήραγγα Γκότθαρντ, Ελβετία (1997)**

Στις 31 Οκτωβρίου 1997, ένα φορτηγό που μετέφερε αυτοκίνητα έπιασε φωτιά στο τούνελ. Το φορτηγό ήταν φορτωμένο με 8 αυτοκίνητα. Αφού αντιλήφθηκε τη φωτιά, ο οδηγός σταμάτησε περίπου 1 χλμ πριν από το στόμιο εξόδου και κάλεσε σε βοήθεια μέσω του πλησιέστερου τηλεφώνου έκτακτης ανάγκης. Το αυτόματο σύστημα συναγερμού πυρκαγιάς της σήραγγας κατέγραψε τη φωτιά περίπου 1 λεπτό μετά την κλήση έκτακτης ανάγκης που έγινε από τον οδηγό του φορτηγού. Όταν ξέσπασε η φωτιά υπήρχαν 60 οχήματα, εκ των οποίων 20 φορτηγά, στη σήραγγα. Περίπου τα μισά από αυτά τα οχήματα κινούνταν προς την κατεύθυνση της φωτιάς και ως εκ τούτου έπρεπε να τα σταματήσουν[14].

Η αποφλοίωση της οροφής εκτείνεται σε μια περιοχή 90 m<sup>2</sup> έως 100 m<sup>2</sup> και έφτασε μέχρι τον οπλισμό. Η κατακόρυφη παραμόρφωση της οροφής ήταν περίπου 10 cm.



Μεταγενέστερες εργαστηριακές αναλύσεις έδειξαν ότι η αντοχή των τμημάτων της οροφής είχε μειωθεί λόγω των υψηλών θερμοκρασιών της πυρκαγιάς και του νερού που χρησιμοποιήθηκε για την κατάσβεση της φωτιάς. Εκτεταμένες ήταν και οι ζημιές στον εξοπλισμό της σήραγγας[14].

Οι εργασίες επισκευής ξεκίνησαν αμέσως μετά την κατάσβεση της φωτιάς και ολοκληρώθηκαν την ίδια ώρα με τον καθαρισμό της σήραγγας (απομάκρυνση του κατεστραμμένου οχήματος και των φορτηγών που έχουν μπλοκαριστεί στη σήραγγα). Τέτοια μέτρα ελήφθησαν αμέσως με την πρόθεση να ανοίξει η σήραγγα το συντομότερο δυνατό. Το συνολικό κόστος για την επισκευή της σήραγγας, ήταν περίπου. 1,2 εκατ. ευρώ[14].

#### **5) Σήραγγα Mont Blanc, Γαλλία/Ιταλία (1999)**

Η σήραγγα Mont Blanc έχει μήκος 11,6 km, με διατομή περίπου 46 m<sup>2</sup>. Το τμήμα της σήραγγας διαμορφώνεται σαν θόλος με το υψηλότερο σημείο 6 m πάνω από το οδόστρωμα. Το πλάτος είναι 8,5μ. Πριν από τη μεγάλη πυρκαγιά που εκδηλώθηκε στις 24 Μαρτίου 1999, είχαν ήδη σημειωθεί συνολικά 17 πυρκαγιές φορτηγών στη σήραγγα του Mont Blanc από τότε που άνοιξε το 1965. Οι περισσότερες από αυτές τις πυρκαγιές κατσασβέστηκαν με πυροσβεστήρες που βρίσκονται στα φορτηγά ή στη σήραγγα. Σε τουλάχιστον 5 από τις πυρκαγιές κλήθηκε η πυροσβεστική. Σε 4 από τις 5 πυρκαγιές στις οποίες χρειάστηκε να δράσει η πυροσβεστική εμπλέκονταν φορτηγά με υπερθερμασμένο κινητήρα. Μια τέτοια υπερθέρμανση μπορεί να αποδοθεί στις υψομετρικές διαφορές που έχει το οδικό σύστημα. Καμία από τις 17 πυρκαγιές δεν επεκτάθηκε σε άλλα οχήματα. Αν και υπήρχε εμπειρία από πυρκαγιές οχημάτων στη σήραγγα του Mont Blanc, η φωτιά στο φορτηγό στις 24 Μαρτίου 1999, βγήκε εκτός ελέγχου. Η φωτιά ξεκίνησε σε αρθρωτό φορτηγό που μετέφερε περίπου 9 τόνους μαργαρίνης και 12 τόνους αλεύρι. Εκτός από το φορτίο, άλλα εύφλεκτα υλικά στο φορτηγό ήταν περίπου 550 λίτρα καυσίμου ντίζελ και το εξαιρετικά εύφλεκτο αφρώδες υλικό της θερμομόνωσης του ψυγείου. Αυτό σταμάτησε 6,5 χλμ. από τη γαλλική είσοδο. Ένα δεύτερο φορτηγό σταμάτησε 12 μέτρα πίσω από το πρώτο και ένα τρίτο φορτηγό 6 μέτρα πίσω από το δεύτερο, και ούτω καθεξής. Συνολικά 14 φορτηγά ακινητοποιήθηκαν πίσω από το πρώτο φορτηγό[14].

Η φωτιά ξεκίνησε κάτω από την καμπίνα του οδηγού και επεκτάθηκε σε ολόκληρο το φορτηγό αφού είχε σταματήσει. Κατά τη διάρκεια της φωτιάς η μαργαρίνη έλιωσε και μετατράπηκε σε εξαιρετικά εύφλεκτο λάδι. Επιπλέον, η υγρή μαργαρίνη πιθανότατα έρεε

στο δρόμο, με αποτέλεσμα η ισχύς της φωτιάς να αυξηθεί σημαντικά λόγω της μεγαλύτερης επιφάνειας φλόγας. Η φωτιά επεκτάθηκε στα πίσω οχήματα. Οι φλόγες «σέρνονταν» κατά μήκος της οροφής πάνω από τα οχήματα[14].

Έτσι, για παράδειγμα οι φλόγες από το πρώτο όχημα προσέκρουσαν στην οροφή και λόγω της ακτινοβολίας της φλόγας το δεύτερο όχημα αναφλέχθηκε. Η φωτιά στο πρώτο και το δεύτερο όχημα έκαψε τα εμπορεύματα, την καμπίνα, έσπασε τα τζάμια και τα ελαστικά. Τελικά, η δεξαμενή καυσίμου σε συνδυασμό με τα λιωμένα εμπορεύματα δημιούργησαν πυρκαγιές στο οδόστρωμα, οι οποίες με τη σειρά τους ενίσχυσαν την τοπική εξάπλωση της πυρκαγιάς. Ακόμα, οι φλόγες συνέχισαν να σέρνονται στην οροφή και το τρίτο όχημα αναφλέχθηκε από την ακτινοβολία της φλόγας. Οι θερμοκρασίες κατάντη αυτών των οχημάτων αυξήθηκαν σημαντικά από εδώ και έτσι υπήρξε αλυσιδωτή αντίδραση[14].

Η ζημιά στον θόλο της σήραγγας εκτεινόταν σε μήκος άνω των 900 μέτρων. Η επιφάνεια του δρόμου και οι πλάκες κάτω από το οδόστρωμα υπέστησαν ζημιές σε κάπως μικρότερη απόσταση. Επιπλέον, ο εξοπλισμός της σήραγγας καταστράφηκε ή κατέστη άχρηστος σε μεγάλη απόσταση αποτέλεσμα των υψηλών θερμοκρασιών ή των εκκρίσεων που προκλήθηκαν από τη φωτιά. Το κόστος επισκευής και εκσυγχρονισμού των κλάδων της σήραγγας υπολογίστηκε σε περίπου. 155 εκατομμύρια ευρώ. Η σήραγγα δόθηκε ξανά στην κυκλοφορία τον Μάρτιο του 2002 [14].

#### **6) Tauern Tunnel, Αυστρία (1999)**

Το ατύχημα της σήραγγας Tauern συνέβη στις 29 Μαΐου 1999. Η σήραγγα έχει μήκος 6400 m, 9,5m πλάτος και 5 m ύψος. Στη σήραγγα Tauern είχαν κατασκευαστεί οδικά έργα περίπου 800 μέτρα πριν από τη βόρεια πύλη. Ένα φορτηγό φορτωμένο με μπογιές, πίσω από το οποίο βρίσκονταν 4 αυτοκίνητα, σταμάτησε στο κόκκινο φανάρι μπροστά από αυτά τα οδικά έργα. Ένα επόμενο αρθρωτό φορτηγό παρατήρησε πολύ αργά ότι τα οχήματα που ήταν μπροστά του είχαν σταματήσει. Ο οδηγός δεν κατάφερε να φρενάρει έγκαιρα. Από την σύγκρουση, 2 αυτοκίνητα βρέθηκαν κάτω από το φορτηγό με τις μπογιές και 2 αυτοκίνητα στον τοίχο του τούνελ. Τα οχήματα πήραν αμέσως φωτιά. Στη συνέχεια η φωτιά επεκτάθηκε στα οχήματα που είχαν σχηματίσει ουρά. Συνολικά 16 φορτηγά και 24 αυτοκίνητα κάηκαν.

Η σήραγγα έπρεπε να επισκευαστεί σε μήκος περίπου 1.5χιλιόμετρο.

Συνολικά το κόστος των επισκευών:

α) Μέτρα ανασυγκρότησης: περ. 5,8 εκατ. ευρώ

β) Βελτιωτικά μέτρα: περ. 2,2 εκατ. ευρώ

γ) Προτεινόμενα μέτρα συντήρησης: περίπου. 0,7 εκατ. ευρώ

Σε αυτές τις δαπάνες πρέπει να προστεθεί και η απώλεια εσόδων από διόδια, η οποία υπολογίζεται σε περίπου. 19 εκατ. ευρώ. Η σήραγγα δόθηκε στην κυκλοφορία στις 28 Αυγούστου 1999, περίπου. 3 μήνες μετά την εκδήλωση της πυρκαγιάς.

#### Κανονισμοί Εκκένωσης Σήραγγας

Τα μέτρα ασφαλείας που πρέπει να εφαρμόζονται σε μια σήραγγα βασίζονται σε συστηματική εξέταση όλων των πτυχών του συστήματος που απαρτίζεται από την υποδομή, τη λειτουργία, τους χρήστες και τα οχήματα.

#### Παράμετροι ασφαλείας

Λαμβάνονται υπόψη οι ακόλουθες παράμετροι[18]:

- το μήκος της σήραγγας
- ο αριθμός των κλάδων
- ο αριθμός των λωρίδων κυκλοφορίας
- γεωμετρική μορφή της διατομής
- η οριζοντιογραφία και μηκοτομή
- ο τύπος της κατασκευής
- η κυκλοφορία μονής ή διπλής κατεύθυνσης
- ο κυκλοφοριακός φόρτος ανά κλάδο (συμπεριλαμβανομένης της χρονικής κατανομής του)
- ο κίνδυνος συμφόρησης (ημερήσια ή εποχιακή)
- ο χρόνος πρόσβασης των υπηρεσιών έκτακτης ανάγκης
- η παρουσία και το ποσοστό βαρέων φορτηγών οχημάτων
- η παρουσία, το ποσοστό και ο τύπος των επικινδύνων φορτίων
- τα χαρακτηριστικά των οδών προσπέλασης
- το πλάτος των λωρίδων κυκλοφορίας
- ζητήματα ταχύτητας,
- γεωγραφικό και μετεωρολογικό περιβάλλον

Όταν μια σήραγγα έχει ειδικά χαρακτηριστικά σε σχέση με τις προαναφερόμενες παραμέτρους, διεξάγεται ανάλυση επικινδυνότητας προκειμένου να προσδιοριστεί αν απαιτούνται πρόσθετα μέτρα ασφαλείας ή/και συμπληρωματικός εξοπλισμός προκειμένου να επιτευχθεί υψηλός βαθμός ασφάλειας της σήραγγας. Κατ' αυτήν την ανάλυση επικινδυνότητας λαμβάνονται υπόψη τα ενδεχόμενα ατυχήματα που σαφώς επηρεάζουν την ασφάλεια των χρηστών της οδού στις σήραγγες τα οποία ενδέχεται να συμβούν κατά το στάδιο λειτουργίας καθώς και το είδος και η έκταση των ενδεχόμενων συνεπειών τους[18].

#### Οδοί διαφυγής και έξοδοι κινδύνου

Στις νέες σήραγγες χωρίς λωρίδα έκτακτης ανάγκης, πρέπει να προβλέπονται πεζοδρόμια έκτακτων αναγκών, υπερυψωμένα ή όχι, τα οποία οι χρήστες της σήραγγας θα χρησιμοποιούν σε περίπτωση μηχανικής βλάβης ή ατυχήματος. Η διάταξη αυτή δεν εφαρμόζεται αν τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της σήραγγας δεν το επιτρέπουν ή εάν η σχετική δαπάνη είναι δυσανάλογη προς το αποτέλεσμα και εφόσον η σήραγγα είναι μιας κατεύθυνσης και διαθέτει μόνιμο σύστημα επιτήρησης και κλεισίματος λωρίδων. Στις υφιστάμενες σήραγγες, εάν δεν υπάρχουν ούτε λωρίδα έκτακτης ανάγκης ούτε πεζοδρόμια έκτακτων αναγκών, λαμβάνονται πρόσθετα ή/και ενισχυμένα μέτρα για να εξασφαλίζεται η ασφάλεια[18].

Οι έξοδοι κινδύνου επιτρέπουν στους χρήστες της σήραγγας να εγκαταλείπουν τη σήραγγα χωρίς τα οχήματα τους και να φθάνουν σε ασφαλές μέρος σε περίπτωση ατυχήματος ή πυρκαγιάς. Επίσης, παρέχουν πρόσβαση πεζή στη σήραγγα στις υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης. Παραδείγματα τέτοιων εξόδων κινδύνου είναι τα εξής[18]:

- άμεσες εξοδοι από τη σήραγγα προς τον εξωτερικό χώρο
- διασυνδέσεις μεταξύ κλάδων της σήραγγας
- έξοδοι προς στοά διαφυγής
- καταφύγια με οδό διαφυγής χωριστή από τον κλάδο της σήραγγας.

Πρέπει να υπάρχουν έξοδοι κινδύνου εάν οι αναλύσεις των σχετικών επικινδυνοτήτων, στις οποίες περιλαμβάνονται η εξάπλωση του καπνού και ταχύτητα διάδοσης υπό τις τοπικές συνθήκες, δείχνουν ότι ο εξαερισμός και τα άλλα μέτρα ασφαλείας δεν επαρκούν για να εξασφαλίσουν την ασφάλεια των χρηστών. Εν πάσει περιπτώσει, στις νέες σήραγγες πρέπει να υπάρχουν έξοδοι κινδύνου όταν ο κυκλοφοριακός φόρτος είναι μεγαλύτερος από 2.000

οχήματα. Σημειώνεται ότι όταν υπάρχουν έξοδοι κινδύνου, η απόσταση μεταξύ δύο εξόδων κινδύνου δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 500 μέτρα [18].

Στις σήραγγες δύο κλάδων, εφόσον οι δύο κλάδοι ευρίσκονται στο ίδιο ή σχεδόν στο ίδιο επίπεδο, οι διασυνδέσεις πρέπει να είναι κατάλληλες για τη διέλευση των οχημάτων των υπηρεσιών έκτακτης ανάγκης τουλάχιστον κάθε 1.500 μέτρα. Όταν είναι εφικτό από άποψη γεωγραφικής διαμόρφωσης, πρέπει να είναι δυνατή η διέλευση μέσω της κεντρικής νησίδας (μεσαία λωρίδα), έξω από σήραγγα δύο ή περισσότερων κλάδων, κοντά στις εισόδους, ούτως ώστε οι υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης να έχουν άμεση προσπέλαση και στους δύο κλάδους[18].

### Φωτισμός

Ο κανονικός φωτισμός εξασφαλίζει επαρκή ορατότητα για τους οδηγούς στη ζώνη εισόδου και στο εσωτερικό της σήραγγας, ημέρα και νύχτα. Ο φωτισμός ασφαλείας παρέχεται ώστε να διασφαλίζει την ελάχιστη απαραίτητη ορατότητα στους χρήστες της σήραγγας προκειμένου να εκκενώσουν τη σήραγγα με το όχημα τους σε περίπτωση βλάβης της ηλεκτρικής τροφοδοσίας. Ο φωτισμός εκκένωσης, όπως φωτεινοί δείκτες εκκένωσης, σε ύψος 1,5 μέτρων το πολύ, παρέχεται ώστε να καθοδηγεί τους χρήστες της σήραγγας προκειμένου να εγκαταλείψουν πεζή τη σήραγγα, σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης[18].

### Αερισμός

Κατά τον σχεδιασμό, την κατασκευή και τη λειτουργία του συστήματος αερισμού λαμβάνονται υπόψη τα εξής[18]:

- ο έλεγχος των ρύπων που εκπέμπουν τα οδικά οχήματα, τόσο υπό κανονικές συνθήκες κυκλοφορίας όσο και σε συνθήκες αιχμής
- ο έλεγχος των ρύπων που εκπέμπουν τα οδικά οχήματα όταν η κυκλοφορία έχει σταματήσει λόγω συμβάντος ή ατυχήματος
- ο έλεγχος της θερμότητας και του καπνού σε περίπτωση πυρκαγιάς.

Όλες οι σήραγγες μήκους άνω των 1000 μέτρων με κυκλοφοριακό φόρτο άνω των 2000 οχημάτων εξοπλίζονται με σύστημα μηχανικού αερισμού.

Σε σήραγγες διπλής κατεύθυνσης κυκλοφορίας, των οποίων ο κυκλοφοριακός φόρτος υπερβαίνει τα 2000 οχήματα, μήκους άνω των 3000 μέτρων και οι οποίες διαθέτουν

κέντρο ελέγχου και σύστημα εγκάρσιου ή ημiegάρσιου αερισμού, λαμβάνονται τα εξής στοιχειώδη μέτρα όσον αφορά τον αερισμό[18]:

- εγκαθίστανται φράκτες αέρα και καπνού, οι οποίοι μπορούν να λειτουργούν χωριστά ή σε ομάδες
- η διαμήκης ταχύτητα του αέρα παρακολουθείται συνεχώς και η διαδικασία ρύθμισης του συστήματος εξαερισμού (φράκτες, ανεμιστήρες κ.λπ.) προσαρμόζεται ανάλογα.

### Σταθμοί έκτακτης ανάγκης

Οι σταθμοί έκτακτης ανάγκης αποβλέπουν στην παροχή εξοπλισμού ασφαλείας διαφόρων ειδών, ιδίως τηλέφωνο έκτακτης ανάγκης και πυροσβεστήρες, αλλά δεν προορίζονται για την προστασία των χρηστών από τα αποτελέσματα πυρκαγιάς. Οι σταθμοί αυτοί μπορούν να συνίστανται σε κιβώτιο στο πλευρικό τοίχωμα ή, κατά προτίμηση, σε εσοχή του τοιχώματος. Εξοπλίζονται με τουλάχιστον ένα τηλέφωνο κινδύνου και με δύο πυροσβεστήρες.

Σταθμοί επείγουσας ανάγκης πρέπει να υπάρχουν κοντά στις εισόδους και στο εσωτερικό των σηράγγων, ανά διαστήματα που δεν υπερβαίνουν τα 150 μέτρα για τις νέες σήραγγες και τα 250 μέτρα για τις υφιστάμενες.

### Σήμανση σηράγγων

Τα οδικά σήματα χρησιμοποιούνται για την υπόδειξη των ακόλουθων εξοπλισμών ασφαλείας μέσα σε σήραγγες[18]:

- Χώροι στάθμευσης
- Έξοδοι κινδύνου: το ίδιο σήμα χρησιμοποιείται για όλα τα είδη εξόδων κινδύνου
- Οδοί διαφυγής προς τις εξόδους ασφαλείας: οι δύο πλησιέστερες έξοδοι κινδύνου επισημαίνονται στα τοιχώματα της σήραγγας δίπλα στις εξόδους, σε αποστάσεις 25 μέτρων το πολύ, και σε ύψος από 1,0 έως 1,5 μέτρων, από τη στάθμη της διόδου διαφυγής με αναγραφή των αποστάσεων μέχρι τις εξόδους. Σταθμοί έκτακτης ανάγκης: σήματα που υποδεικνύουν το σημείο όπου βρίσκονται τα τηλέφωνα έκτακτης ανάγκης και οι πυροσβεστήρες.

Τα σήματα και οι επισημάνσεις σχεδιάζονται και τοποθετούνται έτσι ώστε να είναι σαφώς ορατά.

Σε κάθε είσοδο της σήραγγας τοποθετείται το ακόλουθο σήμα:



Εικόνα 5: Σήμα σήραγγας[19]

Για τις σήραγγες μήκους άνω των 3 000 μέτρων, το εναπομένον μήκος της σήραγγας αναγράφεται κάθε 1.000 μέτρα.

Οι σταθμοί έκτακτης ανάγκης φέρουν ενημερωτικά σήματα τα οποία υποδεικνύουν τον εξοπλισμό που ευρίσκεται στη διάθεση των χρηστών, όπως:



Εικόνα 6: Τηλέφωνο έκτακτης ανάγκης και πυροσβεστήρας[19]

Τα σήματα επισημάνσης των «Εξόδων κινδύνου» έχουν την μορφή των ακόλουθων παραδειγμάτων:



Εικόνα 7: Σήμανση επι της εξόδου κινδύνου[19]



Εικόνα 8: Σήμανση πλησιέστερης εξόδου κινδύνου[19]

### Κέντρο ελέγχου και συστήματα παρακολούθησης

Σε όλες τις σήραγγες που διαθέτουν κέντρο ελέγχου εγκαθίστανται τηλεοπτικά συστήματα παρακολούθησης καθώς και σύστημα για την αυτόματη ανίχνευση των κυκλοφοριακών συμβάντων (π.χ. οχημάτων που σταματούν). Η επιτήρηση περισσότερων της μιας σηράγγων είναι δυνατό να γίνεται από ένα μόνο κέντρο ελέγχου[18].

### Εξοπλισμός για το κλείσιμο της σήραγγας

Σε όλες τις σήραγγες μήκους άνω των 1000 μέτρων εγκαθίστανται φωτεινοί σηματοδότες πριν από τις εισόδους ούτως ώστε η σήραγγα να μπορεί να κλείνει σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης. Για την εξασφάλιση της δέουσας συμμόρφωσης προβλέπονται συμπληρωματικά μέσα όπως πίνακες μεταβλητών μηνυμάτων και φράγματα.



Στο εσωτερικό όλων των σηράγγων μήκους άνω των 3000 μέτρων οι οποίες διαθέτουν κέντρο ελέγχου και των οποίων ο κυκλοφοριακός φόρτος υπερβαίνει τα 2000 οχήματα, συνιστάται να εγκαθίσταται ανά διαστήματα το πολύ 1000 μέτρων, εξοπλισμός που να επιτρέπει την ακινητοποίηση των οχημάτων. Ο εν λόγω εξοπλισμός αποτελείται από φωτεινούς σηματοδότες και, ενδεχομένως, συμπληρωματικά μέσα όπως μεγάφωνα, πίνακες μεταβλητών μηνυμάτων και φράγματα[18].

### Συστήματα επικοινωνίας

Σε όλες τις σήραγγες μήκους άνω των 1000 μέτρων με κυκλοφοριακό φόρτο άνω των 2000 οχημάτων, εγκαθίσταται σύστημα ραδιοφωνικής αναμετάδοσης για τις υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης.

Όταν υπάρχει κέντρο ελέγχου, πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα διακοπής της ραδιοφωνικής αναμετάδοσης των διαύλων που προορίζονται για τους χρήστες της σήραγγας, εφόσον υπάρχουν, για τη μετάδοση μηνυμάτων επείγουσας ανάγκης.

Τα καταφύγια και οι λοιπές εγκαταστάσεις όπου οι χρήστες πρέπει να περιμένουν πριν εξέλθουν από τη σήραγγα πρέπει να διαθέτουν μεγάφωνα για την ενημέρωση των χρηστών[18].

### Ηλεκτροδότηση και ηλεκτρικά κυκλώματα

Όλες οι σήραγγες πρέπει να διαθέτουν σύστημα ηλεκτροδότησης έκτακτης ανάγκης ικανό να εξασφαλίζει τη λειτουργία των εξοπλισμών ασφαλείας που είναι απαραίτητοι για την εκκένωση, μέχρις ότου οι χρήστες εκκενώσουν τη σήραγγα.

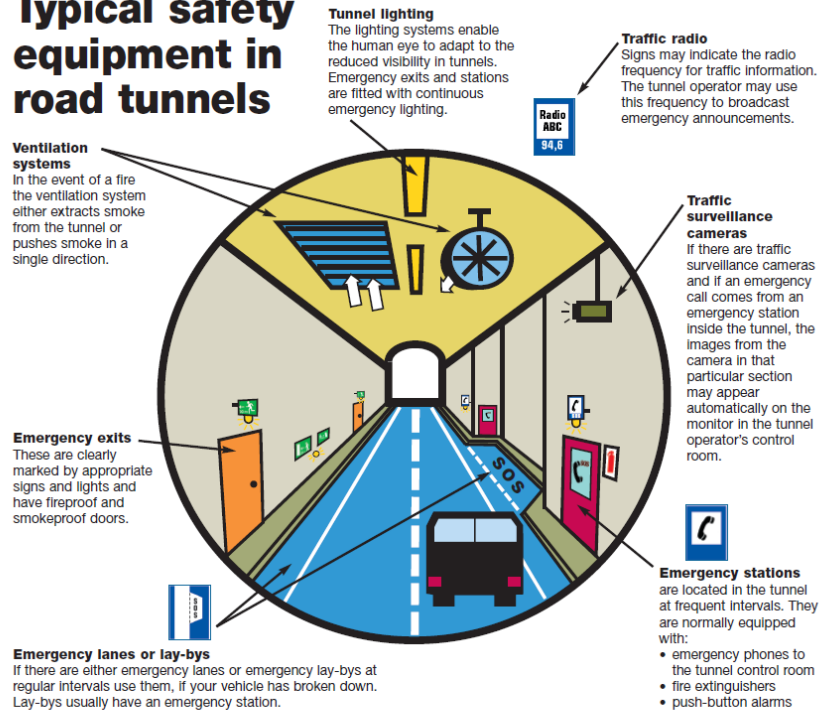
Τα ηλεκτρικά κυκλώματα καθώς και τα κυκλώματα μετρήσεων και ελέγχου σχεδιάζονται ούτως ώστε τυχόν τοπική βλάβη (π.χ. λόγω πυρκαγιάς) να μην επηρεάζει τα μη ενεχόμενα κυκλώματα[18].

### Αντοχή των εξοπλισμών στην πυρκαγιά

Κατά την επιλογή του επιπέδου αντοχής όλων των εξοπλισμών της σήραγγας στην πυρκαγιά λαμβάνονται υπόψη οι τεχνολογικές δυνατότητες και επιδιώκεται η διατήρηση των απαραίτητων λειτουργιών ασφαλείας σε περίπτωση πυρκαγιάς[18].

Στην συνέχεια παρατίθενται κάποιες εικόνες που δίνουν μια γενική άποψη των σημάτων στις σήραγγες:

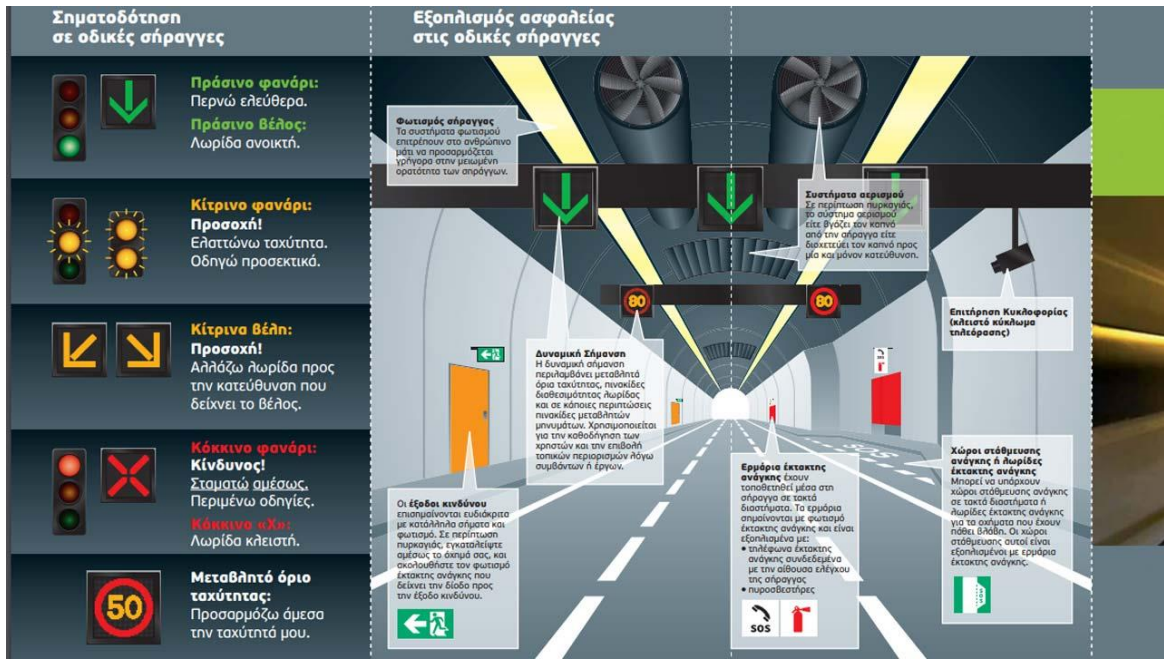
## Typical safety equipment in road tunnels



European Commission Energy and Transport DG • B-1049 Brussels  
[http://europa.eu.int/comm/dgs/energy\\_transport/index\\_en.html](http://europa.eu.int/comm/dgs/energy_transport/index_en.html)

**IRU** International Road Transport Union  
[www.iru.org](http://www.iru.org)

Εικόνα 9: Τυπικός εξοπλισμός ασφαλείας στην σήραγγα [20]



Εικόνα 10: Σηματοδότηση και εξοπλισμός ασφαλείας [21]

| Όταν μπαίνετε σε σήραγγα  | Σε περίπτωση συμφόρησης (Μποτιλιάρισμα)  | Σε περίπτωση θλάθης ή ατυχήματος   | Σε περίπτωση φωτιάς στο δικό σας ή σε τρίτο όχημα   |
|---|--|--|---|
| <p><b>Ελέγξτε την επέρχουσα κουβίση.</b></p> <p>Ανάψτε τα <b>μεσαία φώτα</b> (διαστάυρωσης) <b>Βγάψτε το γυαλό ήλιου.</b></p> <p>Θηρείτε πιστά την <b>φωτεινή σηματοδότηση.</b></p> <p><b>Θηρείτε επαρκή αποστάσεις ασφαλείας.</b> Το IX πρέπει να αφήνουν απόσταση τουλάχιστον <b>50 μέτρων. Το φορτηγό, 100 μέτρα.</b></p> <p><b>Μην προεπρνάτε</b> εάν υπάρχει μόνο μία λωρίδα ανά κατεύθυνση.</p> <p><b>Αποφεύγετε</b> τις άσκοπες αλλαγές λωρίδας.</p> <p><b>Μην αναστρέψετε</b> ή κινήστε με όπισθεν.</p> <p><b>Μην σταματάτε</b> εκτός από περίπτωση ανάγκης.</p> <p><b>80</b> <b>Θηρείτε</b> τα ισκονά όρια ταχύτητας.</p> <p><b>Μην πετάτε τσιγάρα</b> εντός της σήραγγας.</p> | <p>Ανάψτε τα φώτα <b>έκτακτης ανάγκης</b> (σύστημα φωτισμού αναγκών - alarm).</p> <p><b>Θηρείτε</b> αποστάσεις ακόμο και αν κινείστε αργά ή σταματήσατε. Σε περίπτωση στάσης, διατηρείστε απόσταση τουλάχιστον <b>5 μέτρων</b> από το προπορευόμενο όχημα.</p> <p><b>Σβάστε τον κινητήρα</b> εάν βρίσκεστε σε στάση για πάνω από 1 λεπτό.</p> <p>Ακολουθήστε τις <b>οδηγίες των οργάνων</b> της σήραγγας ή τις <b>φωτεινές πινακίδες μεταθλητών μινιματών.</b></p> | <p>Ανάψτε τα φώτα <b>έκτακτης ανάγκης</b> (σύστημα φωτισμού αναγκών - alarm).</p> <p>Εάν είναι δυνατόν, μετακινήστε το όχημα σε <b>κατά έκτακτης ανάγκης ή έστω στο δεξιότερο σημείο της οδού.</b></p> <p><b>Σβάστε τον κινητήρα.</b></p> <p>Παραμείνετε κοντά στο αυτοκίνητό σας. Σταθείτε μακριά από την κυκλοφορία, κατά πρόταση στο <b>πεζοδρόμιο.</b></p> <p><b>Καλέστε για βοήθεια</b> από το τηλέφωνο έκτακτης ανάγκης.</p> <p>Εάν μπορείτε, <b>παρέχετε τις πρώτες βοήθειες</b> σε τυχόν τραυματίες.</p> | <p>Σε περίπτωση που εκδηλωθεί φωτιά στο όχημά σας, <b>και εάν αυτό είναι δυνατόν, οδηγήστε εκτός της σήραγγας.</b></p> <p>Εάν το παρόνιο δεν είναι δυνατόν, σταματήστε στην άκρη της οδού, <b>σβάστε τον κινητήρα και εγκαταλείψτε άμεσα το όχημα.</b></p> <p>Κινήθείτε προς την κατεύθυνση από όπου μπήκατε στη σήραγγα. Καλέστε για βοήθεια από το τηλέφωνο έκτακτης ανάγκης.</p> <p>Εάν μπορείτε, <b>σβάστε την φωτιά</b> με τον <b>εξοπλισμό πυρόσβεσης</b> ο οποίος βρίσκεται στο Εργαία Έκτακτης Ανάγκης της σήραγγας.</p> <p>Εάν μπορείτε, <b>παρέχετε τις πρώτες βοήθειες</b> σε τυχόν τραυματίες.</p> <p>Εάν η φωτιά δεν σβήνει, <b>εγκαταλείψτε τη σήραγγα</b> κινούμενοι προς την πλησιέστερη έξοδο κινδύνου.</p> <p><b>Αφήστε τα κλειδιά</b> επάνω στην ανάρτηση. Οι υπαρκτές μπορεί να χρειαστεί να μετακινήσουν το όχημά σας.</p> |
| <p><b>Θυμηθείτε:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Πριν εισέλθετε σε σήραγγα</li> <li>• Ελέγξτε το καυσιμά σας</li> <li>• Ανάψτε τα φώτα διαστάυρωσης</li> <li>• Ελέγξτε τη φωτεινή σηματοδότηση</li> </ul>  | <p><b>Θυμηθείτε:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Σε περίπτωση συμφόρησης εντός της σήραγγας</li> <li>• Ανάψτε τα φώτα έκτακτης ανάγκης (alarm)</li> <li>• Θηρείτε αποστάσεις ασφαλείας</li> </ul>   | <p><b>Θυμηθείτε:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Σε περίπτωση ατύχους εντός της σήραγγας, η ενεργοποίηση του Κλήτηρου Διασκέπτης Κυκλοφορίας είναι προτιμότερη να γίνεται από το <b>Τηλέφωνο Έκτακτης Ανάγκης</b> της σήραγγας, καθώς έτσι διευκολύνεται η σωστή εντοπισμός του συμβάντος και η ταχεία παροχή βοήθειας.</li> </ul>  | <p><b>Θυμηθείτε:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ο καπνός και η φωτιά <b>ΣΚΟΤΑΝΟΥΝ</b> Σώστε την ζωή σας, όχι το αυτοκίνητό.</li> </ul>  |

Εικόνα 11: Σηματοδότηση σήραγγας [21]

|   |   |  |  |
|---|---|--|--|
| <p><b>Όταν μπαίνετε και καθώς διασχίζετε τη σήραγγα</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Βεβαιωθείτε για την επάρκεια καυσίμου.</li> <li>Αναψήστε τα μεσαία φώτα (διασταύρωσης).</li> <li>Βγάλτε τα γυαλιά ή λιν.</li> <li>Δώστε ιδιαίτερη προσοχή σε περίπτωση που μειώνονται οι λωρίδες κυκλοφορίας πριν την είσοδο σας στη σήραγγα.</li> <li>Μην παραβιάζετε τις μπάρες διακοπής κυκλοφορίας ή τους ερυθρούς σηματοδότες στην είσοδο της σήραγγας.</li> <li>Τηρείτε τα ισχύοντα όρια ταχύτητας.</li> <li>Παρακολουθείτε τις ηλεκτρονικές πινακίδες μεταβλητών μηνυμάτων.</li> <li>Σεβαστείτε τους φωτεινούς σηματοδότες και σηματοδότες ελέγχου λωρίδας στην οροφή της σήραγγας.</li> <li>Τηρείτε αποστάσεις ασφαλείας (τουλάχιστον 3 δευτερόλεπτα απόσταση από το προπορευόμενο όχημα για τα ΙΧ σε κανονικές συνθήκες).</li> <li>Αλλάζετε λωρίδα μόνο αν είναι απαραίτητο.</li> <li>Μην σταματάτε εντός της σήραγγας.</li> <li>Μην πετάτε τσιγάρα εντός της σήραγγας.</li> <li>Μεταβείτε στη λωρίδα εξόδου για τον προορισμό σας όσο νωρίτερα γίνεται.</li> </ul> | <p><b>Σε περίπτωση συμφόρησης (Μητσιλιάρισμα)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Αναψήστε τα φώτα έκτακτης ανάγκης (alarm).</li> <li>Τηρείτε αποστάσεις ασφαλείας ανάμεσα και αν κινείστε οργά (τουλάχιστον 3 δευτερόλεπτα απόσταση από το προπορευόμενο όχημα για τα ΙΧ σε κανονικές συνθήκες).</li> <li><b>Σε περίπτωση στάσης διατηρείτε απόσταση τουλάχιστον ενός οχήματος από το προπορευόμενο όχημα.</b></li> <li>Σβήστε τον κινητήρα εάν βρισκόμαστε σε στάση για πάνω από 1 λεπτό.</li> <li>Κλείστε τα παράθυρα και ρυθμίστε τον αερισμό του αυτοκινήτου στην ανακύκλωση.</li> <li><b>Μην κάνετε αναστροφή ή κινήστε με όπισθεν.</b></li> <li>Μην οδηγείτε στη ΛΕΑ.</li> <li>Ακολουθήστε τις οδηγίες των αρμοδίων που θα λάβετε από τις πινακίδες μεταβλητών μηνυμάτων, τα μεγάφωνα ή το ραδιόφωνο.</li> </ul> <p><a href="http://odds.simor.mech.ntua.gr">http://odds.simor.mech.ntua.gr</a></p> | <p><b>Σε περίπτωση ακινητοποίησης από βλάβη ή ατύχημα</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Αναψήστε τα φώτα έκτακτης ανάγκης (alarm).</li> <li><b>Εάν είναι δυνατόν, μετακινήστε το όχημα στους ειδικούς χώρους στάθμευσης έκτακτης ανάγκης, στη ΛΕΑ ή στο δεξιότερο άκρο του οδοστρώματος.</b></li> <li>Σβήστε τον κινητήρα.</li> <li><b>Καλέστε για βοήθεια στον αριθμό έκτακτης ανάγκης ή από τα τηλέφωνα εκτάκτου ανάγκης.</b></li> <li>Ακολουθήστε τις οδηγίες των αρμοδίων.</li> <li>Εάν έχετε γνώσεις πρώτων βοηθειών και μπορείτε με ασφάλεια να τις παρέχετε, δώστε τις πρώτες βοήθειες σε τυχόν τραυματίες.</li> </ol> <p><b>Ε.Δ.Ο.Σ</b></p> | <p><b>Σε περίπτωση φωτιάς</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li><b>Σε περίπτωση που εκδηλωθεί φωτιά στο όχημά σας, οδηγήστε εκτός της σήραγγας, εάν αυτό είναι δυνατόν.</b></li> <li>Εάν το παραπάνω δεν είναι δυνατόν, σταματήστε στους ειδικούς χώρους στάθμευσης έκτακτης ανάγκης, στη ΛΕΑ ή στο δεξιότερο άκρο του οδοστρώματος.</li> <li>Αν η φωτιά είναι σε άλλο όχημα, σταματήστε το όχημά σας σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερη απόσταση ασφαλείας από το φλεγόμενο όχημα.</li> <li><b>Μην κάνετε αναστροφή ή κινήστε με όπισθεν.</b></li> <li>Σβήστε τον κινητήρα και αφήστε τα κλειδιά επάνω στην ανάφλεξη (μίζα).</li> <li>Εγκαταλείψτε άμεσα το όχημα.</li> <li><b>Κυνηθείτε πεζή αντίθετα από τη φωτιά και τον καπνό και χρησιμοποιήστε την πρώτη έξοδο κανόνου που θα συναντήσετε, ακολουθώντας την ειδική σημάση.</b></li> <li>Καλέστε για βοήθεια από τα τηλέφωνα εκτάκτου ανάγκης.</li> <li>Ακολουθήστε τις οδηγίες των αρμοδίων που θα λάβετε από τις πινακίδες μεταβλητών μηνυμάτων, τα μεγάφωνα ή το ραδιόφωνο.</li> <li>Εάν μπορείτε, σβήστε την φωτιά με πυροσβεστήρα που υπάρχει στα Ερμάρια Έκτακτης Ανάγκης της σήραγγας.</li> <li>Εάν έχετε γνώσεις πρώτων βοηθειών και μπορείτε με ασφάλεια να τις παρέχετε, δώστε τις πρώτες βοήθειες σε τυχόν τραυματίες.</li> </ol> <p><b>Προστατεύω τη ζωή μου και όχι το αυτοκίνητο. Η φωτιά και ο καπνός σκοτώνουν.</b></p> |
| <p>Ευρωπαϊκή Ένωση<br/>Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης</p> <p><b>ΕΠΑΝΕΚ 2014-2020</b><br/>ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ<br/>ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑ<br/>ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ<br/>ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ</p> <p><b>ΕΣΠΑ</b><br/>2014-2020<br/>ανάπτυξη - εργασία - αλληλεγγύη</p> <p><small>Υποστηρίχθηκε στο πλαίσιο της Δράσης ΕΡΕΥΝΑ - ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ - ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ και συγχρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση και εθνικούς πόρους μέσω του Ε.Π. Ανταγωνιστικότητα, Επιχειρηματικότητα &amp; Καινοτομία (ΕΠΙΛΕΚ) (κωδικός ργαμ: Τ1ΕΔΚ-02374)</small></p>  |   |  |  |

Εικόνα 12: Σηματοδότηση σήραγγας [22]

Ο πίνακας που ακολουθεί παρέχει σύνοψη των στοιχειωδών απαιτήσεων ασφαλείας σε σήραγγες.

| ΣΥΝΟΠΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΩΝ ΑΠΑΙΤΗΣΕΩΝ |   | Κυκλοφορία ≤ 2000 οχημάτων |        | Κυκλοφορία >2000 οχημάτων |            |        | Σημειολογιστικές προϋποθέσεις εφαρμογής που θα καταστούν υποχρεωτικές ή παρατηρήσεις   |
|---|---|----------------------------|--------|---------------------------|------------|--------|--|
|   |   | 500-1000μ                  | >1000μ | 500-1000μ                 | 1000-3000μ | >3000μ |  |
| Διαμήτρηση μήτρα                          | 2 ή περισσότεροι κλάδοι   |                            |        |                           |            |        | Υποχρεωτικό όταν η προβολή 15 επόν δείχνει ότι ο κυκλοφοριακός φόρτος > 10000 οχήματα  |
|   | Κλίση ≤ 5%  | *                          | *      | *                         | *          | *      | Υποχρεωτικό, εκτός αν είναι αδύνατο λόγω της γεωγραφικής διαμόρφωσης   |
|   | Πεζοδρόμια έκτακτης ανάγκης   | *                          | *      | *                         | *          | *      | Υποχρεωτικό όπου δεν υπάρχει η λωρίδα έκτακτης ανάγκης, εκτός εάν πληροίται η προϋπόθεση της παρ 2.3.1<br>Στις υφιστάμενες σήραγγες όπου δεν υπάρχει ούτε η λωρίδα έκτακτης ανάγκης, ούτε πεζοδρόμιο κινδύνου, λαμβάνονται συμπληρωματικά/εναλλακτικά μέτρα. |
|   | Εξοδοί κινδύνου ανά 500 μέτρα τουλάχιστον   | ○                          | ○      | *                         | *          | *      | Η εγκατάσταση εξόδων κινδύνου στις υφιστάμενες σήραγγες θα εκτιμηθεί κατά περίπτωση  |
|   | Εγκάρσιες διασυνδέσεις για τις υπερασίες έκτακτης ανάγκης ανά 1500μέτρα τουλάχιστον | ○                          | ○/●    | ○                         | ○/●        | ●      | Υποχρεωτικό στις σήραγγες δύο κλάδων μήκους άνω των 1500 μέτρων.   |
|   | Διαβίβαση μέσω της κεντρικής υφιάδας πριν από κάθε είσοδο                           | ●                          | ●      | ●                         | ●          | ●      | Υποχρεωτικό εκτός των σιδηρών με δύο ή περισσότερους κλάδους όταν η γεωγραφική διαμόρφωση το επιτρέπει   |
|   | Χώροι στάθμευσης ανά 1000 μέτρα τουλάχιστον   | ○                          | ○      | ○                         | ○/●        | ○/●    | Υποχρεωτικό στις νέες σήραγγες διελθής κατεύθυνσης > 1500μ, χωρίς λωρίδες έκτακτης ανάγκης. Στις υφιστάμενες διελθής κατεύθυνσης > 1500μ, αναρτήσεις της ανάλογης Ισχύος για τις νέες και υφιστάμενες, αναρτήσεις που ασφαλισμό πλάτους της σήραγγας         |
|   | Αποστράγγιση για τα τοξικά και ειδικά υγρά  | *                          | *      | *                         | *          | *      | Υποχρεωτικό όπου επιτρέπεται η μεταφορά επικινδύνων φορτίων  |
|   | Αντοχή των κατασκευών στη φωτιά   | ●                          | ●      | ●                         | ●          | ●      | Υποχρεωτικό όπου η τοπική κατάσταση μπορεί να έχει καταστροφικές συνέπειες   |
|   | ● Υποχρεωτικό για όλες τις σήραγγες<br>* Υποχρεωτικό με εξαιρέσεις                  | ○ μη υποχρεωτικό           |        |                           |            |        |  |

| ΣΥΝΟΠΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΩΝ ΑΠΑΙΤΗΣΕΩΝ |   | Κυκλοφορία ≤ 2000 οχημάτων |        | Κυκλοφορία >2000 οχημάτων |            |        | Σημειολογιστικές προϋποθέσεις εφαρμογής που θα καταστούν υποχρεωτικές ή παρατηρήσεις                |
|---|---|----------------------------|--------|---------------------------|------------|--------|---|
|   |   | 500-1000μ                  | >1000μ | 500-1000μ                 | 1000-3000μ | >3000μ |   |
| Φωτισμός                                  | Κανονικός φωτισμός                        | ●                          | ●      | ●                         | ●          | ●      |   |
|   | Φωτισμός ασφαλείας                        | ●                          | ●      | ●                         | ●          | ●      |   |
|   | Φωτισμός εκκίνησης                        | ●                          | ●      | ●                         | ●          | ●      |   |
| Αερισμός                                  | Μηχανικός αερισμός                        | ○                          | ○      | ○                         | ●          | ●      |   |
|   | Ειδικές διατάξεις για (ημι)γκάρσο αερισμό | ○                          | ○      | ○                         | ○          | ●      | Υποχρεωτικό στις σήραγγες διελθής κατεύθυνσης που διαθέτουν κεντρο έλεγχο                           |
| Σταθμοί έκτακτης ανάγκης                  | Τουλάχιστον ανά 150 μέτρα                 | *                          | *      | *                         | *          | *      | Εξοπλισμένοι με τηλέφωνο και δύο πυροσβεστήρες. Στις υφιστάμενες επιτρέπεται μέγιστο διάστημα 250μ. |
| Υδροδότηση                                | Τουλάχιστον ανά 250 μέτρα                 | ●                          | ●      | ●                         | ●          | ●      | Αν δεν υπάρχει υποχρεωτική η παροχή ύδατος με άλλο τρόπο  |
| Οδική σήμανση                             |   | ●                          | ●      | ●                         | ●          | ●      | Για όλες τις εγκαταστάσεις ασφαλείας για τους χρήστες (βλέπε παράρτημα III)                         |

|                                     |   |                  |   |   |   |   |  |
|-------------------------------------|---|------------------|---|---|---|---|--|
| Κέντρο ελέγχου                      |   | ○                | ○ | ○ | ○ | ● | Η εκτίμηση κεραιών της μίας σήραγγας είναι δυνατόν να γίνεται συγκεντρωτικά από ένα μόνο κέντρο ελέγχου                          |
|                                     | Συστήματα τηλεοπτικά  | ○                | ○ | ○ | ○ | ● | Υποχρεωτικό όπου υπάρχει κέντρο ελέγχου  |
| Σύστημα παρακολούθησης              | Αυτόματη ανίχνευση συμβάντων ή/και πυρκαγιάς                        | ●                | ● | ● | ● | ● | Ένα τουλάχιστον από αυτά τα δύο συστήματα είναι υποχρεωτικό στις σήραγγες που διαθέτουν κέντρο ελέγχου                           |
|                                     | Εξοπλισμός για το κλείσιμο της σήραγγας                             | ○                | ● | ○ | ● | ● |  |
| Συστήματα επικοινωνίας              | Οδική σήμανση στο εισαγωγικό της σήραγγας τουλάχιστον ανά 1000μέτρα | ○                | ○ | ○ | ○ | ■ | Επινοείται όπου υπάρχει κέντρο ελέγχου και το μήκος υπερβαίνει τα 3000μέτρα  |
|                                     | Ραδιοφωνική αναμετάδοση για τις υπερασίες έκτακτης ανάγκης          | ○                | ○ | ○ | ● | ● |  |
|                                     | Ραδιοφωνικά μηνύματα έκτακτης ανάγκης για τους χρήστες της σήραγγας | ●                | ● | ● | ● | ● | Υποχρεωτικό όταν προβλέπεται αναμετάδοση των ραδιοφωνικών εκπομπών για τους χρήστες της σήραγγας και όπου υπάρχει κέντρο ελέγχου |
|                                     | Μεγάρωνα στα καταφύγια και τις εξόδους                              | ●                | ● | ● | ● | ● | Υποχρεωτικό στις περιπτώσεις που οι χρήστες που εκκενώνουν την σήραγγα πρέπει να περιμένουν πριν φθάσουν στον εξωτερικό χώρο     |
| Ηλεκτροδότηση εκτάκτου ανάγκης      |   | ●                | ● | ● | ● | ● | Για την εξασφάλιση της λειτουργίας των απαραίτητων εξοπλισμών ασφαλείας τουλάχιστον κατά την εκκένωση της σήραγγας               |
| Αντοχή των εξοπλισμών στη φωτιά     |   | ●                | ● | ● | ● | ● | Αποσκοπεί στην διατήρηση των απαραίτητων λειτουργιών ασφαλείας   |
| ● Υποχρεωτικό για όλες τις σήραγγες |   | ○ μη υποχρεωτικό |   |   |   |   |  |
| * Υποχρεωτικό με εξαιρέσεις         |   | ■ συνιστάται     |   |   |   |   |  |

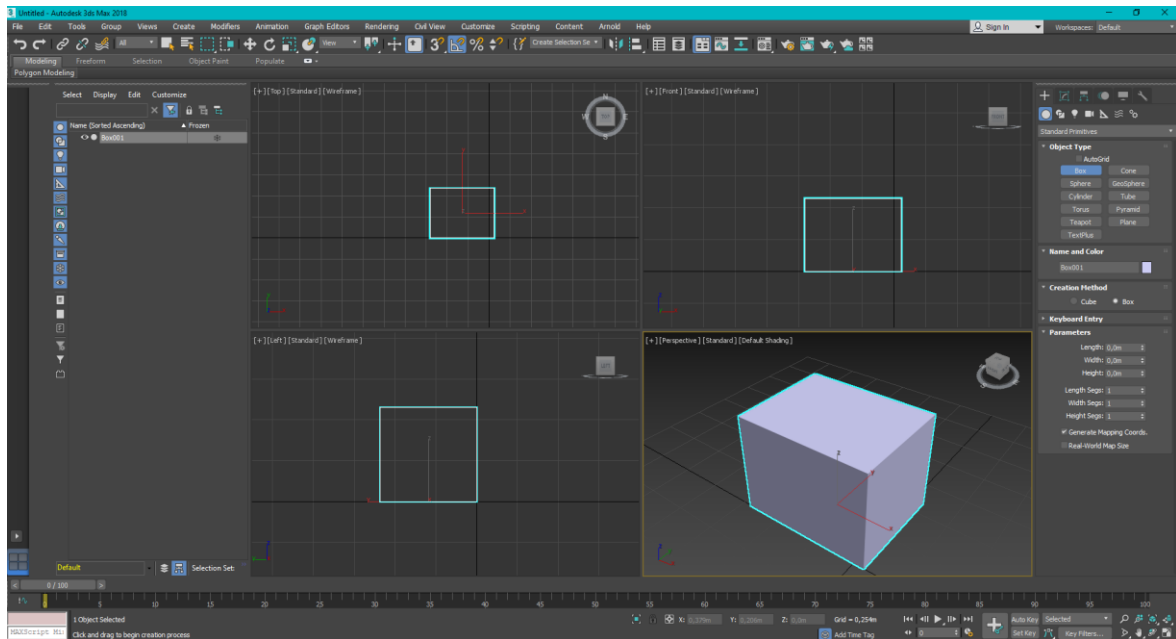
Πίνακας 17: Στοιχειώδης απαιτήσεις ασφαλείας σε σήραγγες [18]

## Κεφάλαιο 2: Προγράμματα 3DS Max, Unreal Engine 4 και Pathfinder

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε χρήση του προγράμματος επεξεργασίας τρισδιάστατων γραφικών (Autodesk 3DS Max®) και της μηχανής γραφικών (Unreal Engine 4) με σκοπό την προσομοίωση μοντέλου οδικής σήραγγας σε λειτουργία, τον εξοπλισμό που περιλαμβάνει καθώς και των διερχομένων από αυτή οχημάτων. Ο σχεδιασμός της σήραγγας και του εξοπλισμού έγινε στο 3DS Max® ενώ στην συνέχεια τα στοιχεία αυτά περάστηκαν στην μηχανή γραφικών (Unreal Engine 4) ώστε να δημιουργηθούν διαδραστικά σενάρια ατυχήματος με εικονική πραγματικότητα (Virtual Reality-VR).

### 3DS Max

Το Autodesk 3DS Max, πρώην 3D Studio και 3D Studio Max, είναι ένα επαγγελματικό πρόγραμμα τρισδιάστατων γραφικών υπολογιστή για τη δημιουργία τρισδιάστατων κινούμενων εικόνων, μοντέλων, παιχνιδιών και εικόνων. Αναπτύχθηκε και παράγεται από την Autodesk Media and Entertainment. Διαθέτει δυνατότητες μοντελοποίησης και ευέλικτη αρχιτεκτονική πρόσθετων και είναι συμβατό με τα Windows. Χρησιμοποιείται συχνά από προγραμματιστές βιντεοπαιχνιδιών, πολλά στούντιο τηλεοπτικών διαφημίσεων. Χρησιμοποιείται επίσης για εφέ ταινιών. Το 3ds Max διαθέτει επίσης shaders, δυναμική προσομοίωση (dynamic simulation) , συστήματα σωματιδίων (particle systems), ραδιοσυχνότητα (radiosity), καθολικό φωτισμό (global illumination) , προσαρμόσιμο περιβάλλον χρήστη (customizable user interface), νέα εικονίδια και τη δική του γλώσσα προγραμματισμού. Στην Εικόνα 13 φαίνεται το περιβάλλον που εργάζεται ο χρήστης.



Εικόνα 13: Περιβάλλον Χρήστη στο 3DS Max

Για τον σχεδιασμό ο χρήστης έχει την επιλογή να χρησιμοποιήσει κάποια από τις έτοιμες επιλογές σχημάτων για το μοντέλο του ή να δημιουργήσει δικό του μέσω εργαλείων μορφοποίησης. Το πρόγραμμα επίσης δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να προσθέσει υφές σε κάθε τρισδιάστατο αντικείμενο που σχεδιάζει.

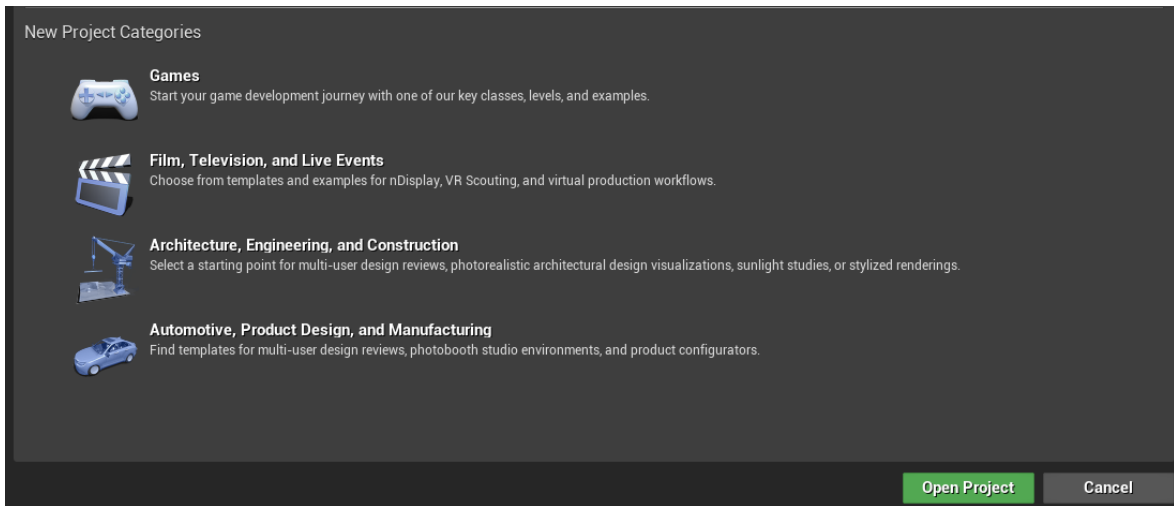
## Unreal Engine 4

Η Unreal Engine (UE εν συντομία) είναι μια μηχανή παιχνιδιών που αναπτύχθηκε από την Epic Games, η οποία παρουσιάστηκε για πρώτη φορά στο παιχνίδι first person shooter Unreal το 1998. Αρχικά αναπτύχθηκε για first person shooters στο PC, έκτοτε έχει χρησιμοποιηθεί σε διάφορα είδη τρισδιάστατων (3D) παιχνιδιών και έχει υιοθετηθεί από άλλες βιομηχανίες, κυρίως από τη βιομηχανία του κινηματογράφου και της τηλεόρασης. Γραμμένο σε C++, η Unreal Engine διαθέτει υψηλό βαθμό φορητότητας, υποστηρίζοντας ένα ευρύ φάσμα πλατφορμών όπως υπολογιστές, κινητά, κονσόλες και εργαλεία εικονικής πραγματικότητας.

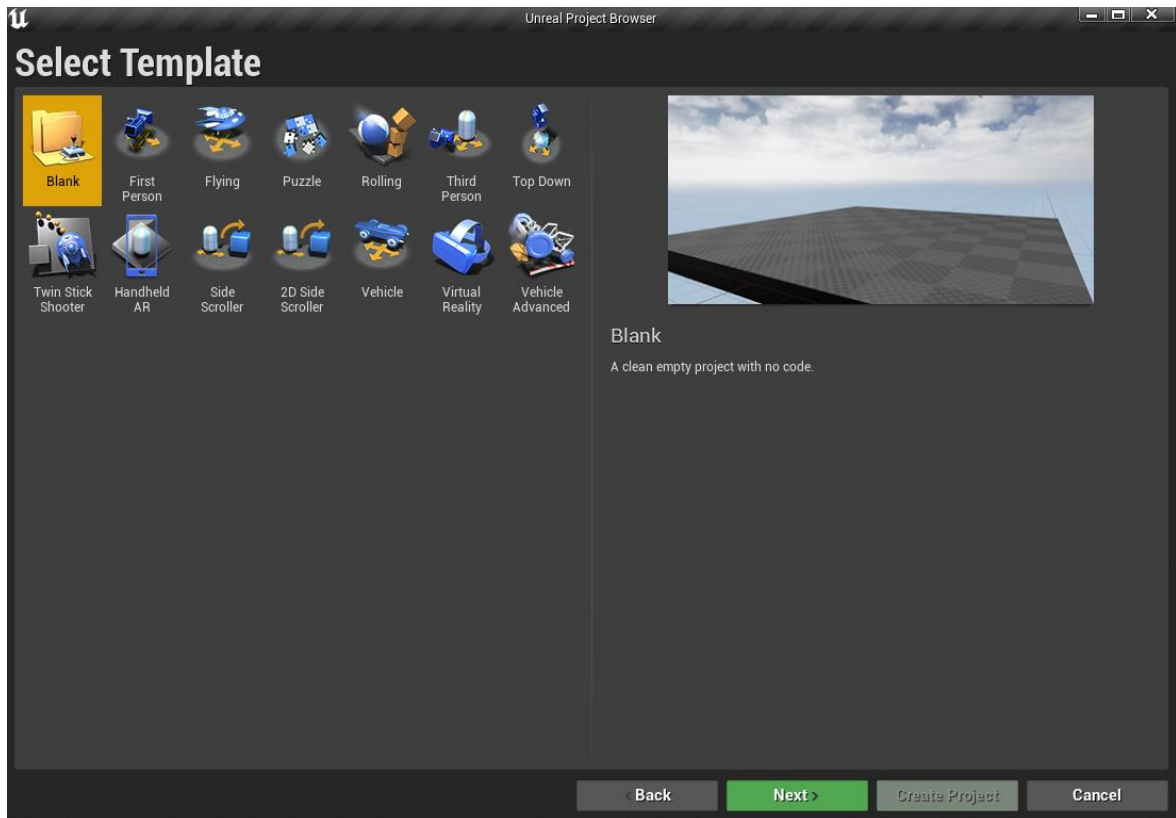
Η τελευταία γενιά είναι η Unreal Engine 4, η οποία κυκλοφόρησε το 2014. Είναι δωρεάν για εγκατάσταση, με τον πηγαίο κώδικα διαθέσιμο στο GitHub. Η Epic επιτρέπει τη χρήση της σε εμπορικά προϊόντα που βασίζονται σε ένα μοντέλο δικαιωμάτων εκμετάλλευσης, ζητώντας συνήθως από τους προγραμματιστές το 5% των εσόδων από τις πωλήσεις, αν και η Epic αποσύρει τη χρέωση αυτή για προγραμματιστές που διανέμουν τα παιχνίδια τους μέσω του Epic Games Store. Στις 13 Μαΐου 2020, η Epic ανακοίνωσε ότι το μέρος των δικαιωμάτων εκμετάλλευσης για παιχνίδια που αναπτύχθηκαν στο Unreal Engine αποσύρεται έως ότου οι προγραμματιστές αποκτήσουν τα πρώτα έσοδα 1 εκατομμυρίου \$ ΗΠΑ, με αναδρομική ισχύ έως την 1η Ιανουαρίου 2020. Η Unreal Engine 5 έχει προγραμματιστεί για κυκλοφορία στις αρχές του 2022.

Στην Εικόνα 14 φαίνονται οι επιλογές που δίνονται από την UE4 στον χρήστη. Ακόμα η UE4 δίνει την δυνατότητα έτοιμων προτύπων (templates) για την διευκόλυνση του χρήστη όπως φαίνεται στην Εικόνα 15. Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε η κατηγορία «Games» και «Blank Template».



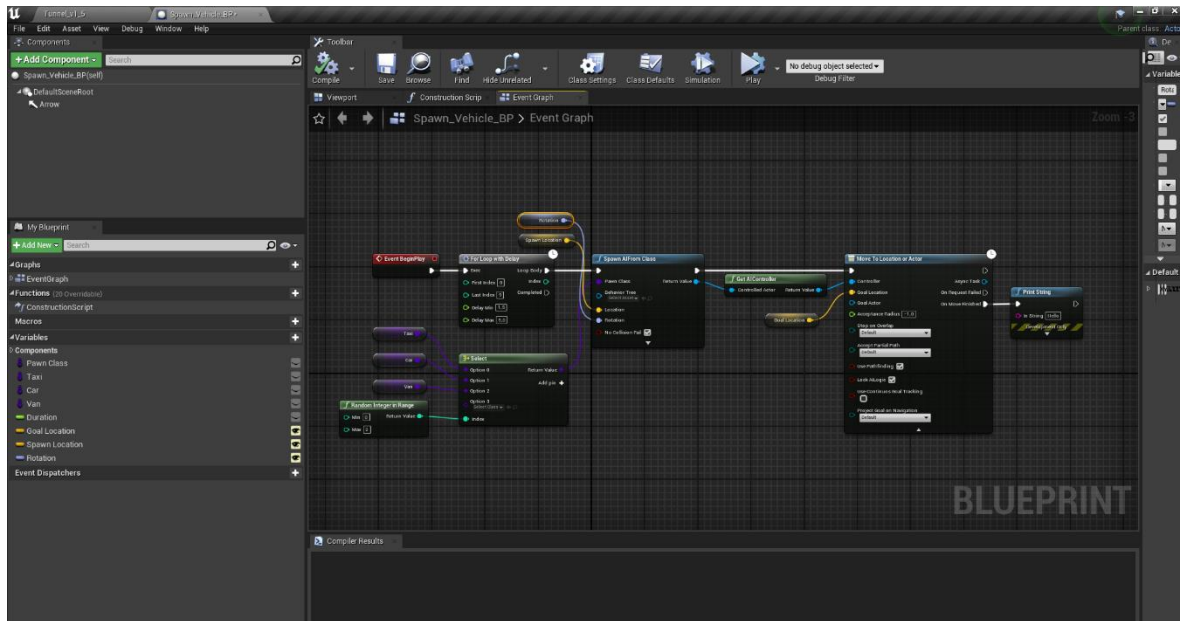


Εικόνα 14: Επιλογή Project στην UE4



Εικόνα 15: Πρότυπα Παιχνιδιών στην UE4

Για την δημιουργία σεναρίων η UE χρησιμοποιεί δικιά της μέθοδο οπτικού προγραμματισμού βασισμένη στην C++ την οποία ονομάζει «Blueprint». Στην Εικόνα 16 φαίνεται ένα παράδειγμα Blueprint.



Εικόνα 16: Παράδειγμα Blueprint στην UE4

## Virtual Reality

Η εκκένωση είναι μία από τις κύριες λύσεις διαχείρισης καταστροφών για τη μείωση των επιπτώσεων των ανθρωπογενών και φυσικών απειλών στους ενοίκους των κτιρίων. Μέχρι σήμερα, σύγχρονες τεχνολογίες όπως η εικονική πραγματικότητα, έχουν χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση της ετοιμότητας και της αποτελεσματικότητας των κτιρίων για εκκένωση. Αυτά τα εργαλεία έχουν χρησιμοποιηθεί τόσο για τη διερεύνηση της ανθρώπινης συμπεριφοράς κατά τη διάρκεια έκτακτης ανάγκης κτιρίου όσο και για την εκπαίδευση των ενοίκων του κτιρίου σχετικά με το πώς να αντιμετωπίζουν τις εκκενώσεις κτιρίων [23].

Οι νέες τεχνολογίες, όπως η εικονική πραγματικότητα, έχουν αποδειχθεί θεμελιώδη για τη διερεύνηση της ανθρώπινης συμπεριφοράς σε καταστροφές και για την ενίσχυση της ετοιμότητας των ενοίκων του κτιρίου. Για παράδειγμα, η εικονική πραγματικότητα έχει χρησιμοποιηθεί[23]:

- (1) για τη διερεύνηση της αντίληψης των ενοίκων των συστημάτων εκκένωσης [24,25]
- (2) για τη διερεύνηση των επιλογών διαδρομής και εξόδου των ενοίκων [26–28]
- (3) πλοήγηση ενοίκων[29–32]. και εκπαίδευση των ενοίκων του κτιρίου για καταστάσεις έκτακτης ανάγκης πυρκαγιάς και σεισμού, όπως εξετάζεται στο[23,33].

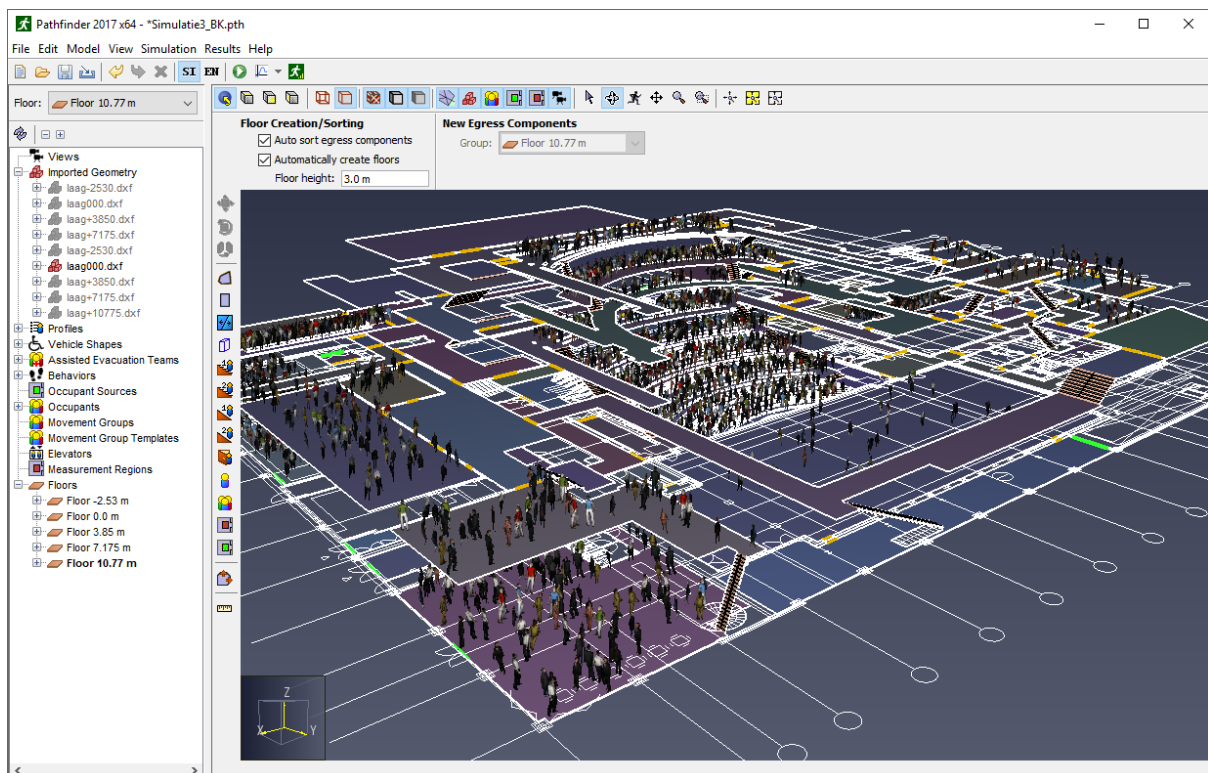
Η εικονική πραγματικότητα έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για τη διερεύνηση της ανθρώπινης συμπεριφοράς και την εκπαίδευση των ενοίκων του κτιρίου σε διαφορετικά στάδια αξιολόγησης. Μέχρι σήμερα, αρκετές ανασκοπήσεις είναι διαθέσιμες στη βιβλιογραφία που διερευνούν διαφορετικούς σκοπούς εκκένωσης των εργαλείων εικονικής πραγματικότητας, βλέπε για παράδειγμα [33,34]. Ως εκ τούτου, η παρούσα εργασία στοχεύει στην δημιουργία περιβάλλοντος εκκένωσης υπογείου έργου και συγκεκριμένα οδικής σήραγγας.

## Pathfinder

Το Pathfinder είναι ένα πρόγραμμα προσομοίωσης εκκένωσης χώρου το οποίο λαμβάνει υπόψιν την ανθρώπινη κίνηση. Παρέχει γραφικό περιβάλλον για σχεδιασμό και εκτέλεση προσομοίωσης, καθώς και εργαλεία οπτικοποίησης 2D και 3D για ανάλυση αποτελεσμάτων[35].

### Γραφικό περιβάλλον

Το Pathfinder περιλαμβάνει γραφικό περιβάλλον που χρησιμοποιείται κυρίως για τη δημιουργία και εκτέλεση μοντέλων προσομοίωσης. Ένα στιγμιότυπο αυτού του περιβάλλοντος φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα:

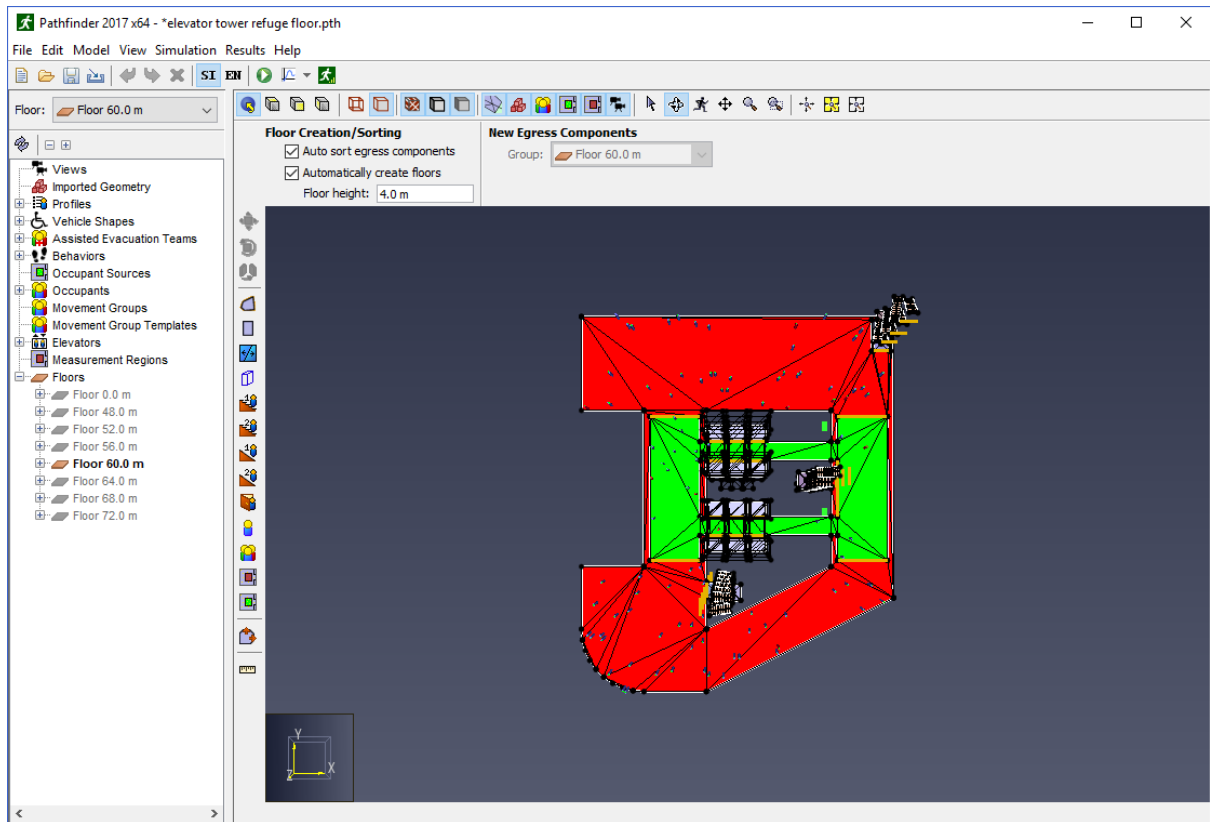


Εικόνα 17: Μοντέλο του Theatre de Vest στο Άλκμααρ της Ολλανδίας[35].

Η παραπάνω εικόνα εμφανίζει ένα μοντέλο του Theatre de Vest στο Άλκμααρ της Ολλανδίας. Το μοντέλο δημιουργήθηκε από τον Van Hooft Adviesburo. Το μοντέλο περιλαμβάνει 2177 άτομα.

### Αναπαράσταση Μοντέλου

Το περιβάλλον κίνησης είναι ένα τρισδιάστατο τριγωνικό πλέγμα, σχεδιασμένο να ταιριάζει με τις πραγματικές διαστάσεις ενός κτιριακού μοντέλου. Αυτό το πλέγμα κίνησης μπορεί να εισαχθεί χειροκίνητα ή αυτόματα με βάση τα εισαγόμενα δεδομένα (π.χ. FDS γεωμετρία)[35].



Εικόνα 18: Παράδειγμα τρισδιάστατου τριγωνικού πλέγματος[35]

Οι τοίχοι και άλλες αδιάβατες περιοχές παρουσιάζονται ως κενά στο πλέγμα πλοήγησης. Οι πόρτες απεικονίζονται ως ειδικές άκρες πλέγματος πλοήγησης. Σε όλες τις προσομοιώσεις, οι πόρτες παρέχουν έναν μηχανισμό για την ένωση δωματίων και την παρακολούθηση της ροής των επιβατών. Οι σκάλες προσομοιώνονται ως ειδικά άκρα και τρίγωνα πλέγματος πλοήγησης. Η ταχύτητα κίνησης των επιβατών μειώνεται σε συντελεστή της ταχύτητας τους με βάση την κλίση της σκάλας. Κάθε σκάλα ορίζει έμμεσα δύο πόρτες. Αυτές οι πόρτες λειτουργούν όπως κάθε άλλη πόρτα στον προσομοιωτή, αλλά ελέγχονται μέσω του επεξεργαστή κλιμακοστασίων στο γραφικό περιβάλλον για να διασφαλιστεί ότι δεν

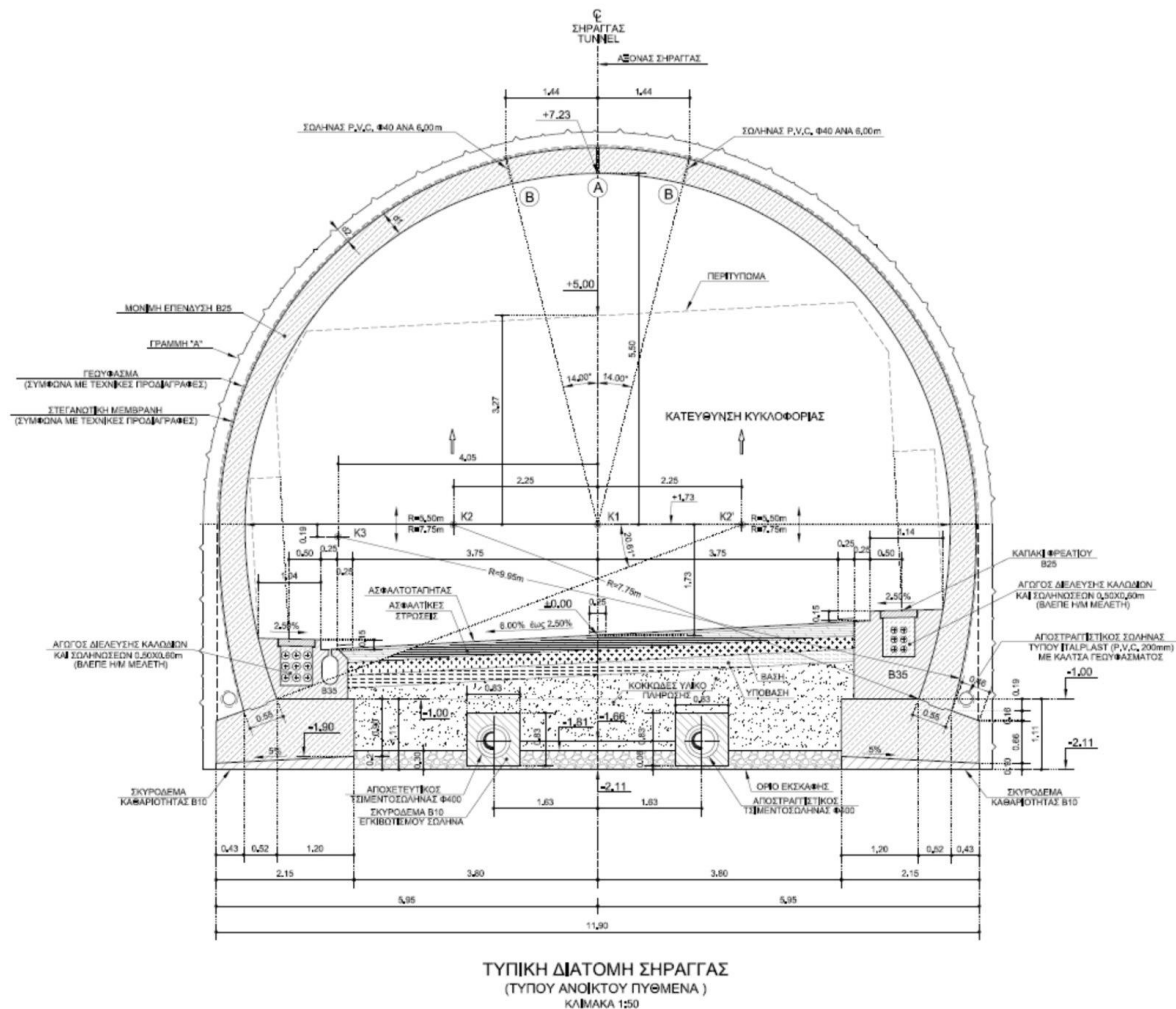
προκύπτουν γεωμετρικά σφάλματα από αναντιστοιχία μεταξύ κλιμακοστασίων και συνδετικών θυρών.

Κάθε επιβάτης καθορίζεται από τη θέση, ένα προφίλ που καθορίζει το μέγεθος, την ταχύτητα κ.λπ. και μια συμπεριφορά που καθορίζει τους στόχους για τον επιβάτη. Η συμπεριφορά επιτρέπει τη δημιουργία σεναρίων έτσι ώστε, για παράδειγμα, ένας επιβάτης να μπορεί να περιμένει σε μια τοποθεσία για ένα καθορισμένο χρόνο και στη συνέχεια να προχωρήσει σε έναν ανελκυστήρα. Ο επιβάτης αναπαρίσταται ως όρθιος κύλινδρος στο πλέγμα κίνησης[35].

## Κεφάλαιο 3: Παρουσίαση Μοντέλων και Σεναρίων

### Μοντέλο σήραγγας στην UE4

Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι βασισμένο σε μια τυπική διατομή σήραγγας όπως φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 19: Τυπική Διατομή Σήραγγας

Μερικά τεχνικά χαρακτηριστικά της είναι:

- Διατομή (m): 10
- Μήκος (m): 1200
- Έξοδοι κινδύνου κάθε 350 m
- Πυροσβεστικές φωλιές και τηλέφωνο κάθε 150 m
- Διπλή λωρίδα χωρίς ΛΕΑ
- Πλήρης σήμανση διαφυγής

Μια άποψη του μοντέλου εμφανίζεται στις παρακάτω εικόνες:



Εικόνα 20: Άποψη μοντέλου σήραγγας στην UE4



Εικόνα 21: Άποψη εσωτερικού της σήραγγας στην UE4



Εικόνα 22: Άποψη εξόδου διαφυγής, Π.Φ. και τηλεφώνου

Στο μοντέλο προστέθηκαν αυτοκίνητα που κινούνται στην σήραγγα, ανθρώπινα μοντέλα ως ένοικοι άλλων οχημάτων, φωτιά, καπνός και φορηγό αυτοκίνητο που οδηγείται σε ατύχημα.

## Περιγραφή Σεναρίου Εικονικής Πραγματικότητας

### Εμπλεκόμενα οχήματα και είδος συμβάντος

Φορηγό αυτοκίνητο «χάνει» τον έλεγχο, συγκρούεται με τοιχώματα της σήραγγας και αυτοαναφλέγεται. Ακολουθούν οχήματα από πίσω τα οποία ακινητοποιούνται.

### Ακριβής τοποθεσία του συμβάντος

Επιλέχθηκε το ατύχημα να συμβεί ακριβώς στη 2η έξοδο κινδύνου (στα 700 m εντός της σήραγγας)



Εικόνα 23: Σημείο ατυχήματος και ακινητοποιημένα αυτοκίνητα στο βάθος



### **Ακριβής τοποθεσία του χρήστη**

Επιλέχθηκε η θέση του χρήστη:

- 1) 100 μέτρα πίσω από το φορτηγό (περιορισμένη οπτική επαφή)



*Εικόνα 24: Όχημα χρήστη με περιορισμένη οπτική επαφή ως προς το ατύχημα*

### **Καιρικές Συνθήκες:**

Άνεμος αντίθετα με την κίνηση των οχημάτων

### **Ταχύτητες:**

Εύρος ταχύτητας οχήματος: 50-80km/hr

Ταχύτητα χρήστη: 1.2m/s

### **Κυκλοφοριακές συνθήκες**

Κυκλοφοριακός φόρτος: 20-25

Εκτίμηση αριθμού εγκλωβισμένων οχημάτων: ~26 επιβατηγά οχήματα

### **Εξέλιξη του συμβάντος**

- 1) 50μ πριν την σύγκρουση, χάνει τον έλεγχο το φορτηγό
- 2) Σύγκρουση και απευθείας αυτανάφλεξη
- 3) Ακινητοποίηση του οχήματος του χρήστη (έναρξη χρονομέτρησης χρόνου ανταπόκρισης του χρήστη)
- 4) Ενεργοποίηση συναγερμού και αλλαγή φαναριών από πράσινα βέλη σε κόκκινα «x»
- 5) Έξοδος του χρήστη από το όχημα (έναρξη χρονομέτρησης χρόνου εκκένωσης και μέτρηση απόστασης που διανύθηκε από τον χρήστη)

- 6) Οδευση προς έξοδο κινδύνου
- 7) Έξοδος (τέλος χρονομέτρησης και απόστασης)

### Εμπλεκόμενοι χρήστες

38 (~1,5\*25) άτομα από άλλα αυτοκίνητα

~10% θα τρέξουν προς την έξοδο της σήραγγας (από εκεί που μπήκαν)

~90% θα ψάξουν την πλησιέστερη έξοδο κινδύνου ([36])

Παρατηρούμενες μεταβλητές:

- Χρόνος εκκένωσης (sec)
- Χρόνος ανταπόκρισης χρήστη (χρόνος που μένει μέσα στο αυτοκίνητο, sec)
- Απόσταση που διανύθηκε (m)
- Μέσες τιμές όλων

### Στόχοι

- Στόχος 1: Εκτίμηση χρόνου εκκένωσης και οδευση διαφυγής
- Στόχος 2: Δοκιμή και εξοικείωση όλων των εμπλεκόμενων με το σενάριο φωτιάς σε σήραγγα

### Προσομοίωση Σεναρίων

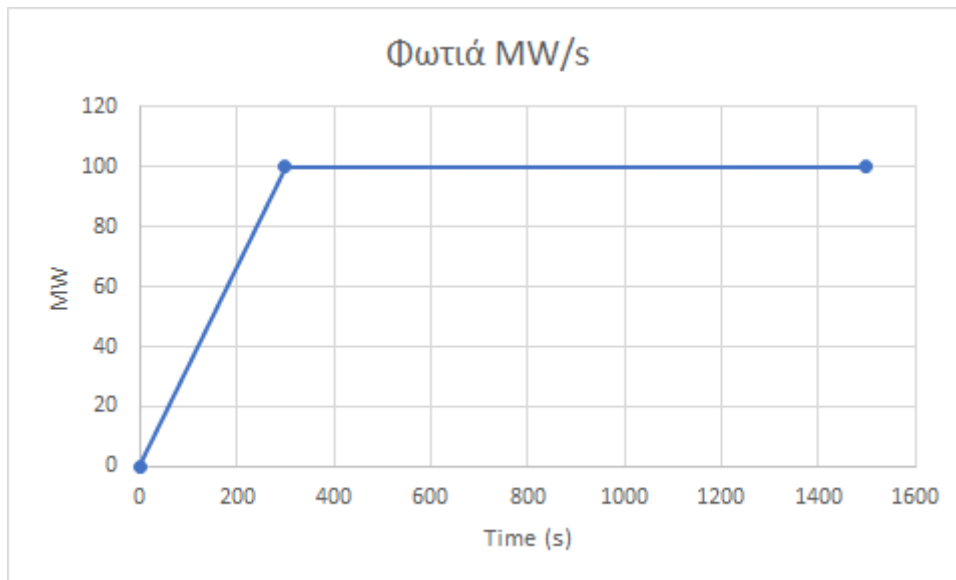
Δημιουργήθηκαν 3 διαφορετικά σενάρια στο προσομοίωμα που αφορούν συνθήκες σε απόσταση. Αυτά είναι:

- 1) Όχημα χρήστη με περιορισμένη ορατότητα ως προς το ατύχημα με καπνό και φωτιά. Έναρξη συναγερμού στα 60 sec
- 2) Όχημα χρήστη με περιορισμένη ορατότητα ως προς το ατύχημα χωρίς καπνό και φωτιά. Έναρξη συναγερμού στα 60 sec
- 3) Όχημα χρήστη με περιορισμένη ορατότητα ως προς το ατύχημα με καπνό και φωτιά. Έναρξη συναγερμού στα 20 sec

## Προσομοίωση στο λογισμικό Pathfinder

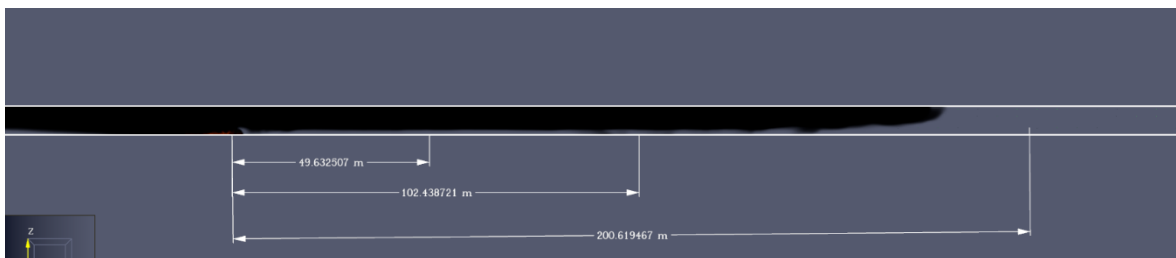
### Φωτιά

Η φωτιά που χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση είναι της τάξης των 100 MW με διαφορά πίεσης 3 Pa, το οποίο μεταφράζεται σε αερισμό με ταχύτητα 1 m/s. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η ισχύς της φωτιάς σε σχέση με τον χρόνο.

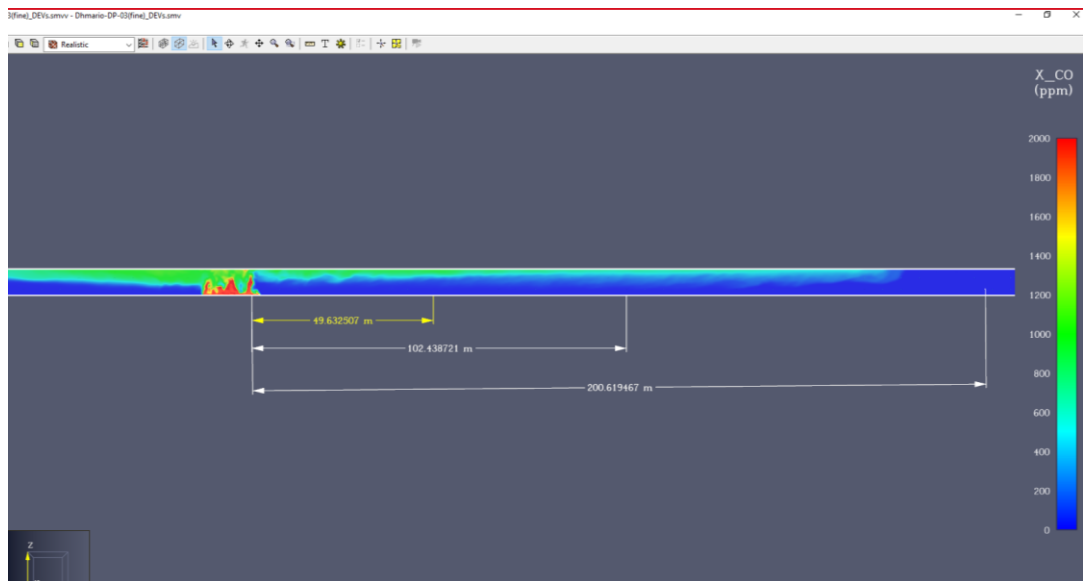


Διάγραμμα 1: Ισχύς φωτιάς σε σχέση με τον χρόνο

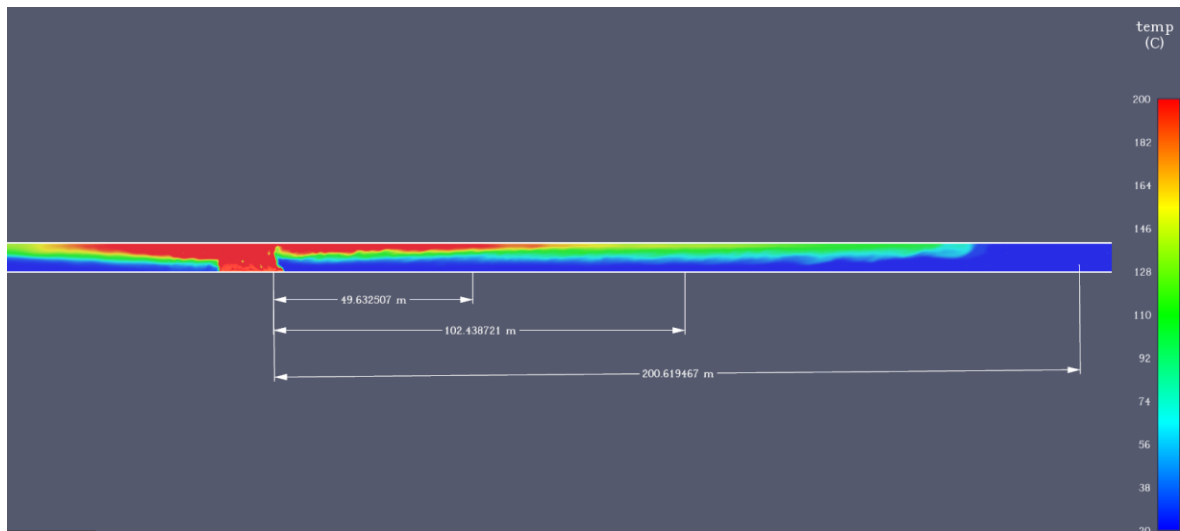
Παρακάτω παρουσιάζεται σε εικόνες η ανάπτυξη της φωτιάς σε σχέση με τον χρόνο και την απόσταση.



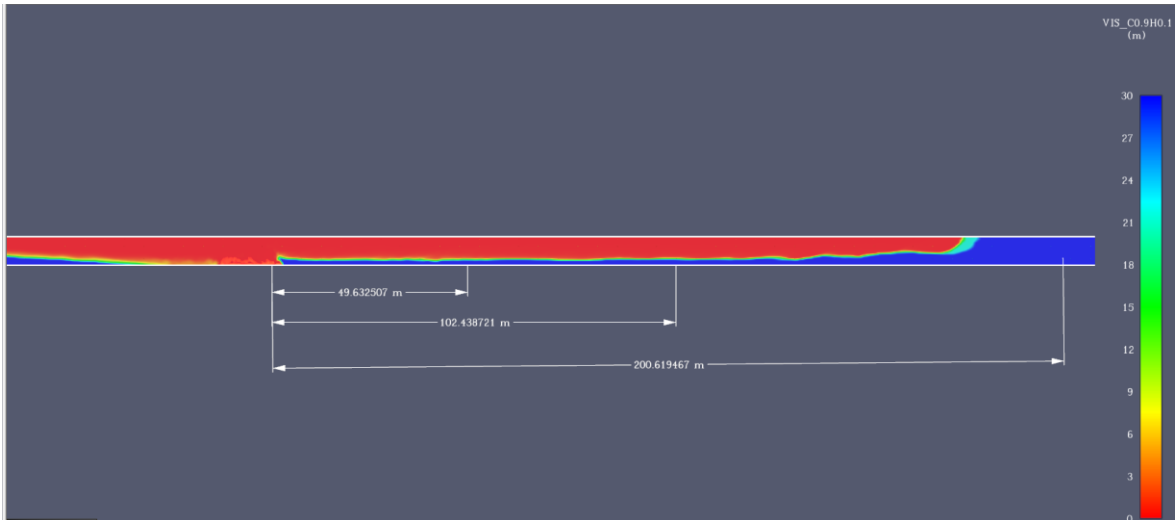
Εικόνα 25: Ανάπτυξη φωτιάς στα 100 δευτερόλεπτα (Καπνός)



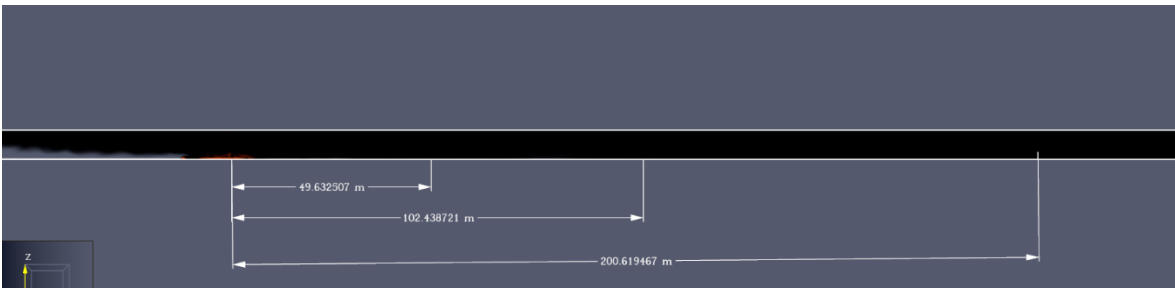
Εικόνα 26: Ανάπτυξη φωτιάς στα 100 δευτερόλεπτα (Μονοξείδιο του άνθρακα)



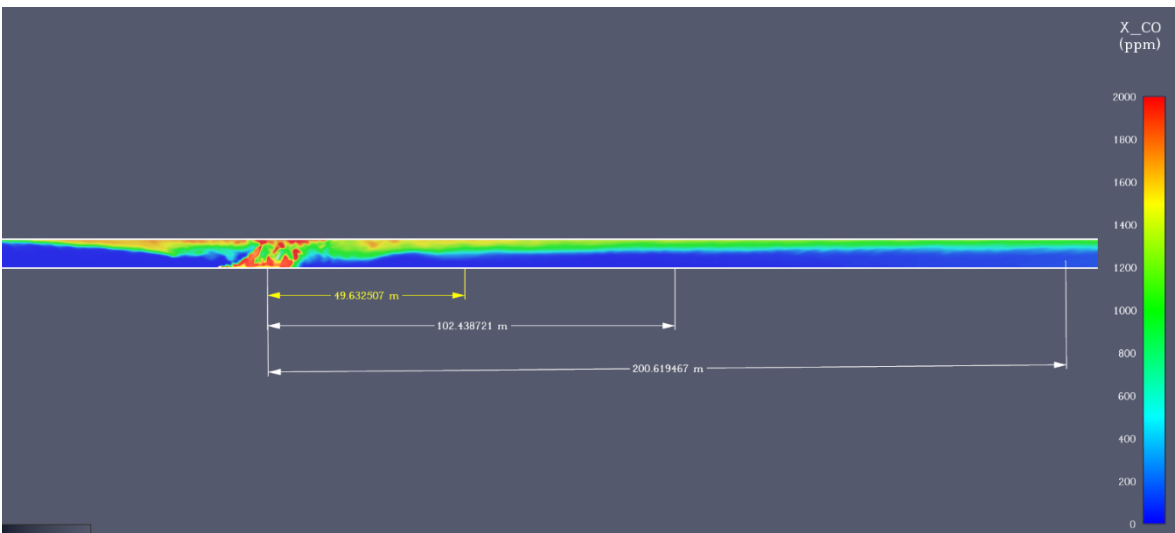
Εικόνα 27: Ανάπτυξη φωτιάς στα 100 δευτερόλεπτα (Θερμοκρασία)



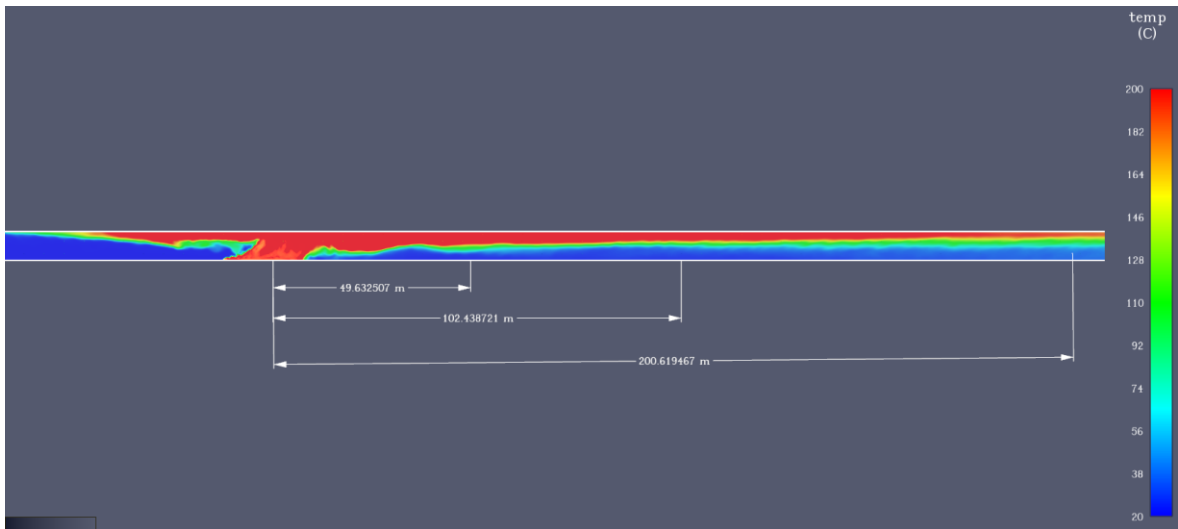
Εικόνα 28: Ανάπτυξη φωτιάς στα 100 δευτερόλεπτα (Ορατότητα)



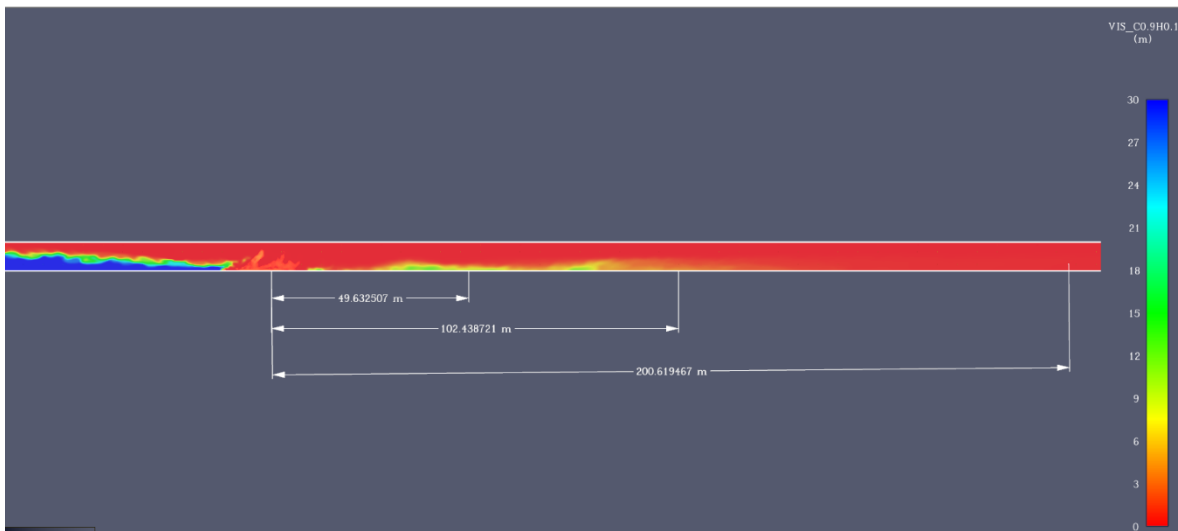
Εικόνα 29: Ανάπτυξη φωτιάς στα 200 δευτερόλεπτα (Καπνός)



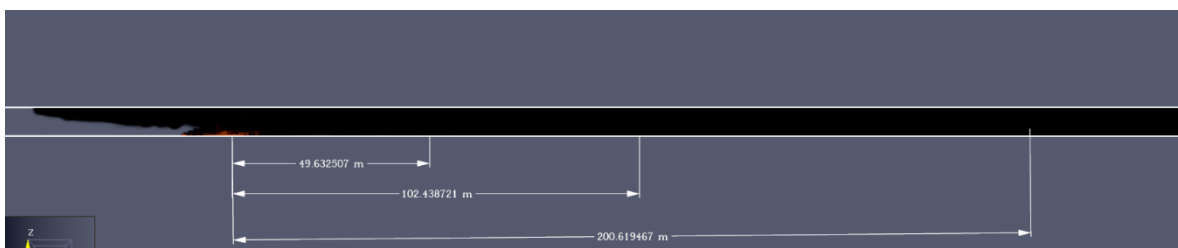
Εικόνα 30: Ανάπτυξη φωτιάς στα 200 δευτερόλεπτα (Μονοξείδιο του άνθρακα)



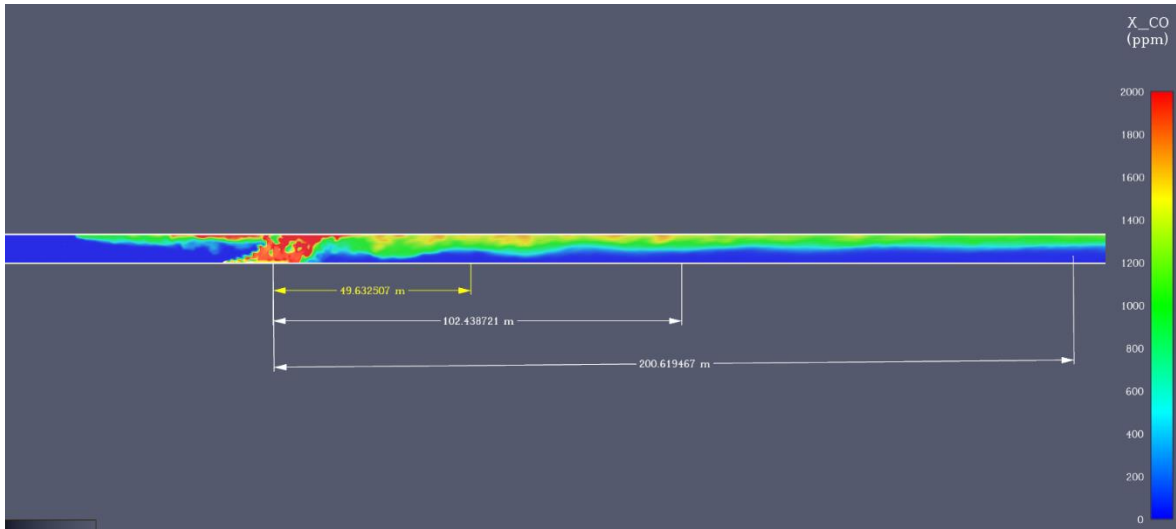
Εικόνα 31: Ανάπτυξη φωτιάς στα 200 δευτερόλεπτα (Θερμοκρασία)



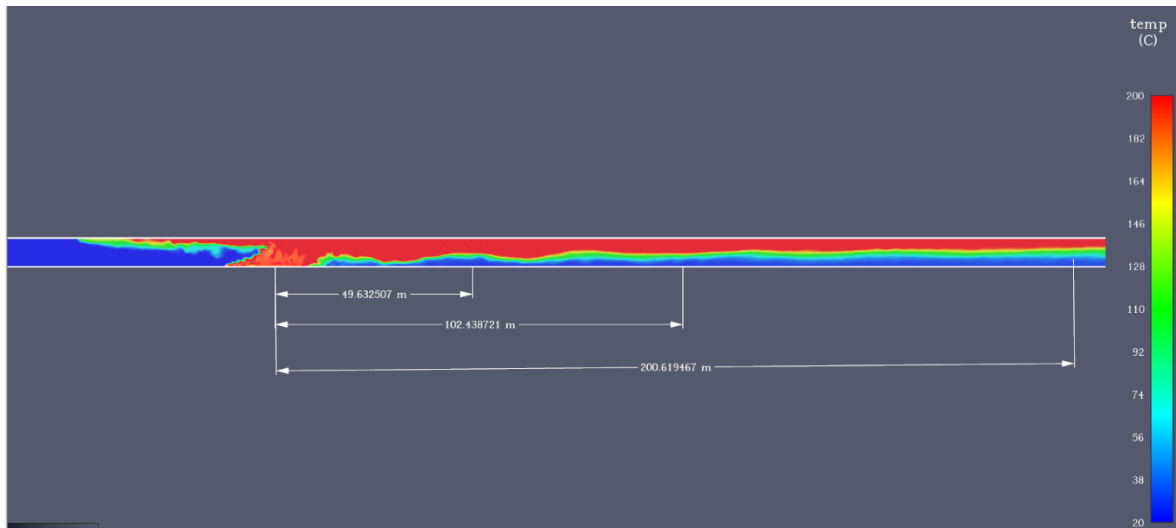
Εικόνα 32: Ανάπτυξη φωτιάς στα 200 δευτερόλεπτα (Ορατότητα)



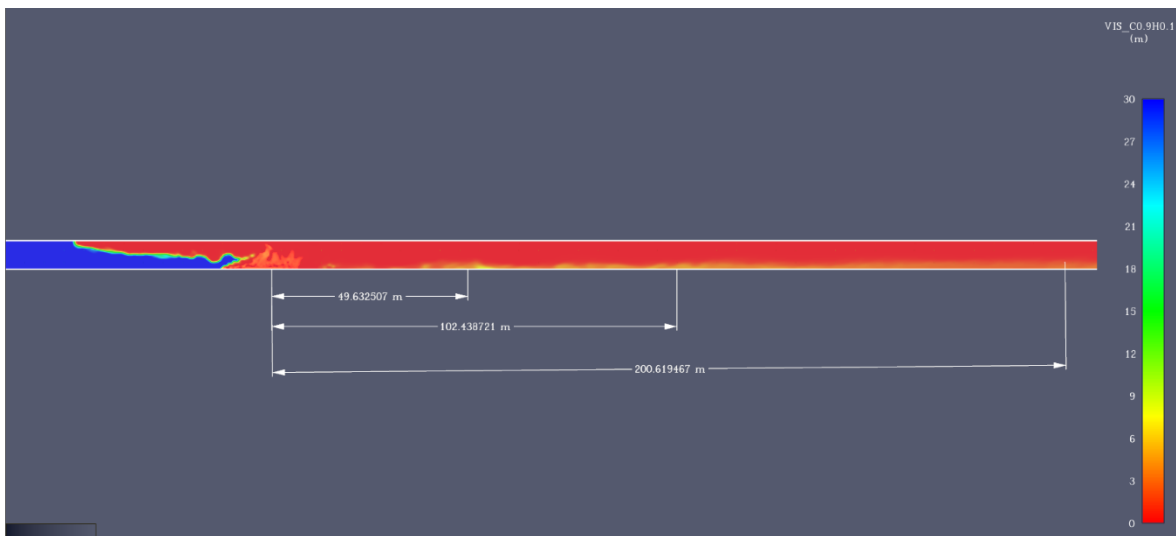
Εικόνα 33: Ανάπτυξη φωτιάς στα 300 δευτερόλεπτα (Καπνός)



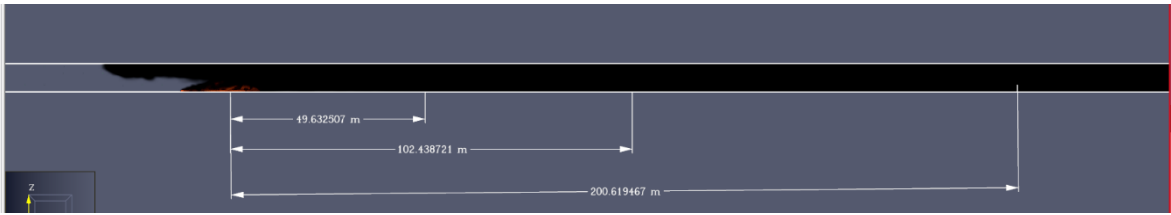
Εικόνα 34: Ανάπτυξη φωτιάς στα 300 δευτερόλεπτα (Μονοξείδιο του άνθρακα)



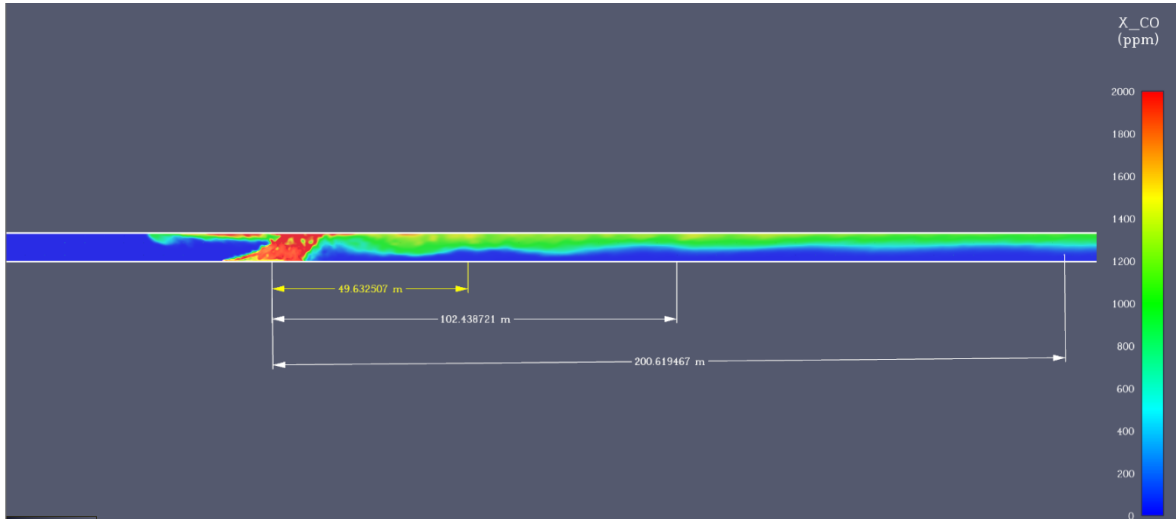
Εικόνα 35: Ανάπτυξη φωτιάς στα 300 δευτερόλεπτα (Θερμοκρασία)



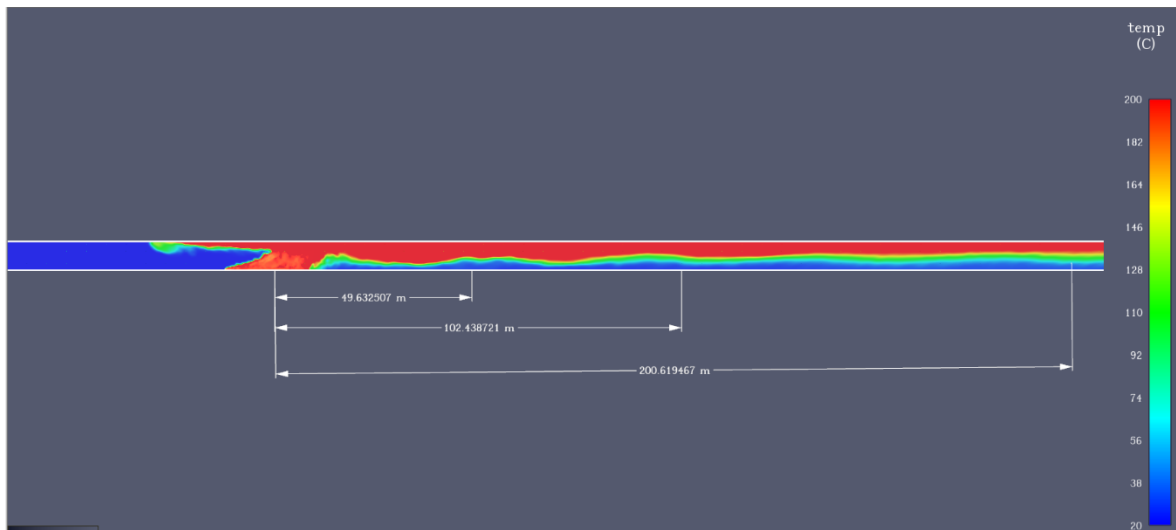
Εικόνα 36: Ανάπτυξη φωτιάς στα 300 δευτερόλεπτα (Ορατότητα)



Εικόνα 37: Ανάπτυξη φωτιάς στα 400 δευτερόλεπτα (Καπνός)

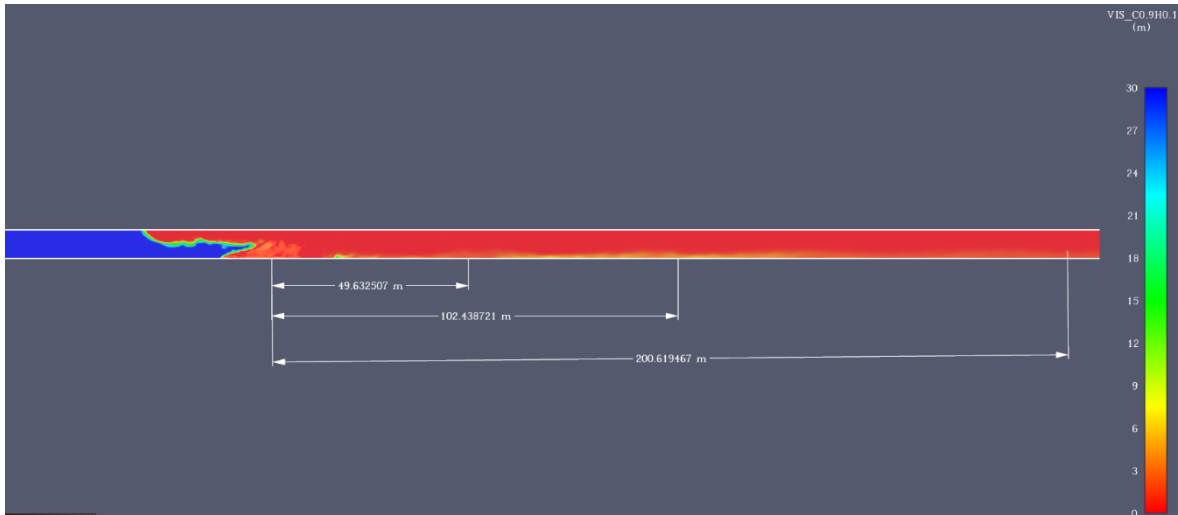


Εικόνα 38: Ανάπτυξη φωτιάς στα 400 δευτερόλεπτα (Μονοξείδιο του άνθρακα)

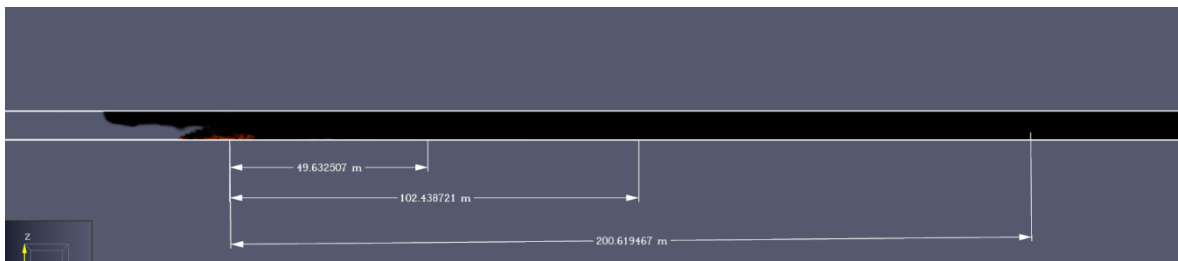


Εικόνα 39: Ανάπτυξη φωτιάς στα 400 δευτερόλεπτα (Θερμοκρασία)

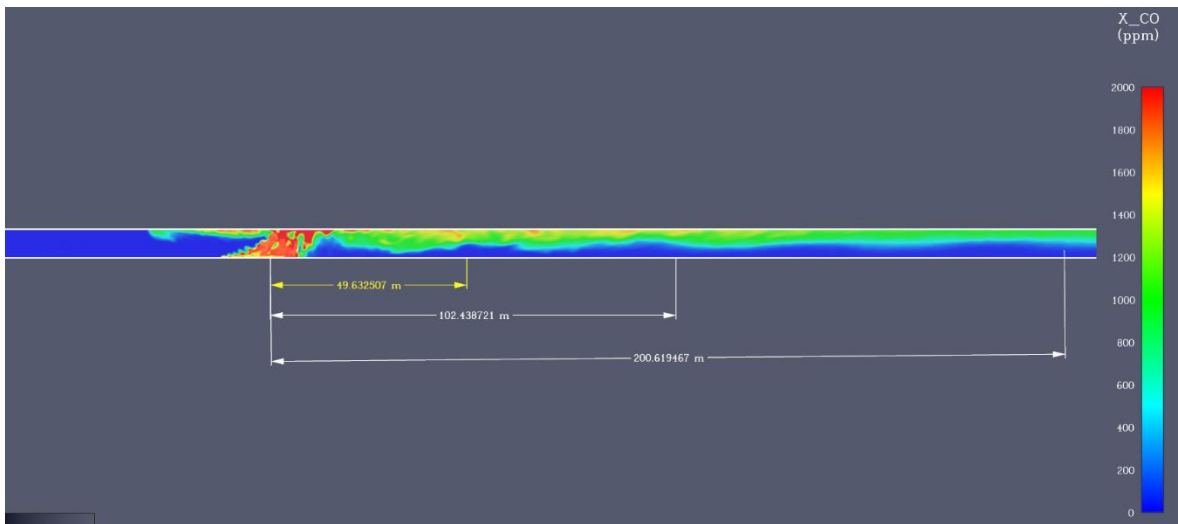




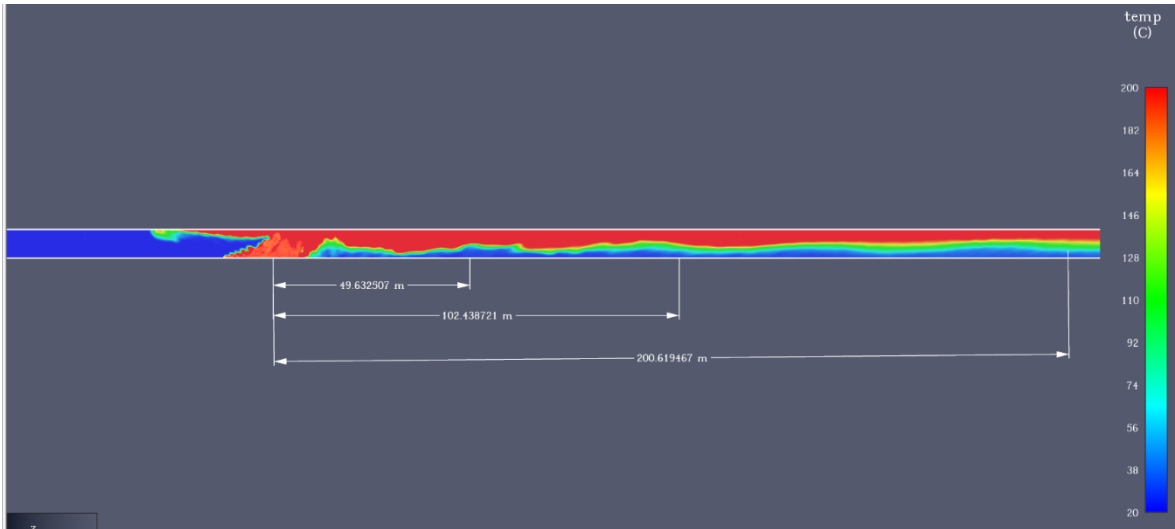
Εικόνα 40: Ανάπτυξη φωτιάς στα 400 δευτερόλεπτα (Ορατότητα)



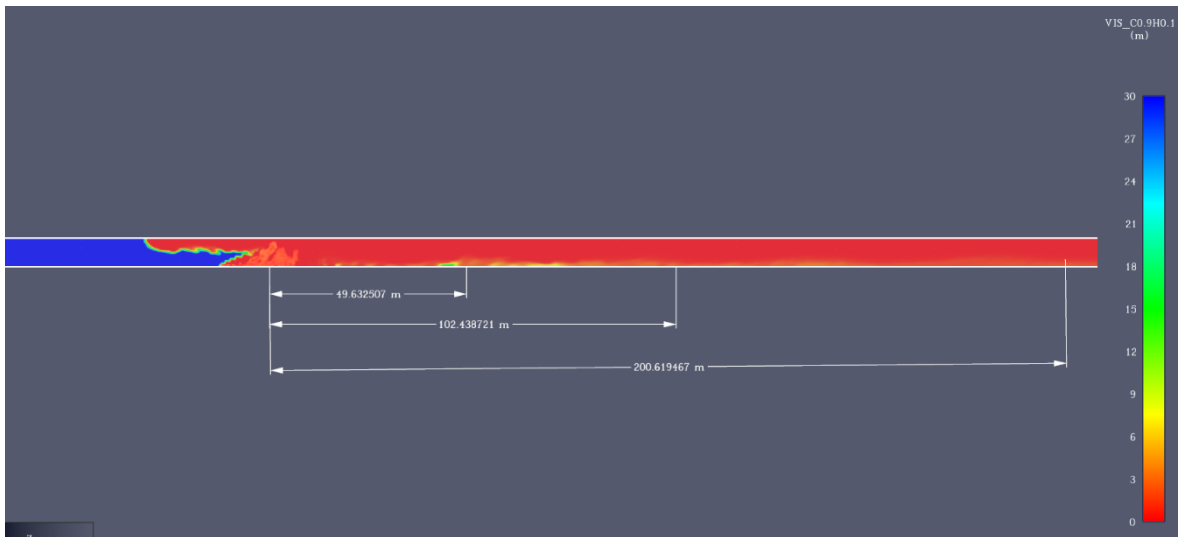
Εικόνα 41: Ανάπτυξη φωτιάς στα 500 δευτερόλεπτα (Καπνός)



Εικόνα 42: Ανάπτυξη φωτιάς στα 500 δευτερόλεπτα (Μονοξείδιο του άνθρακα)

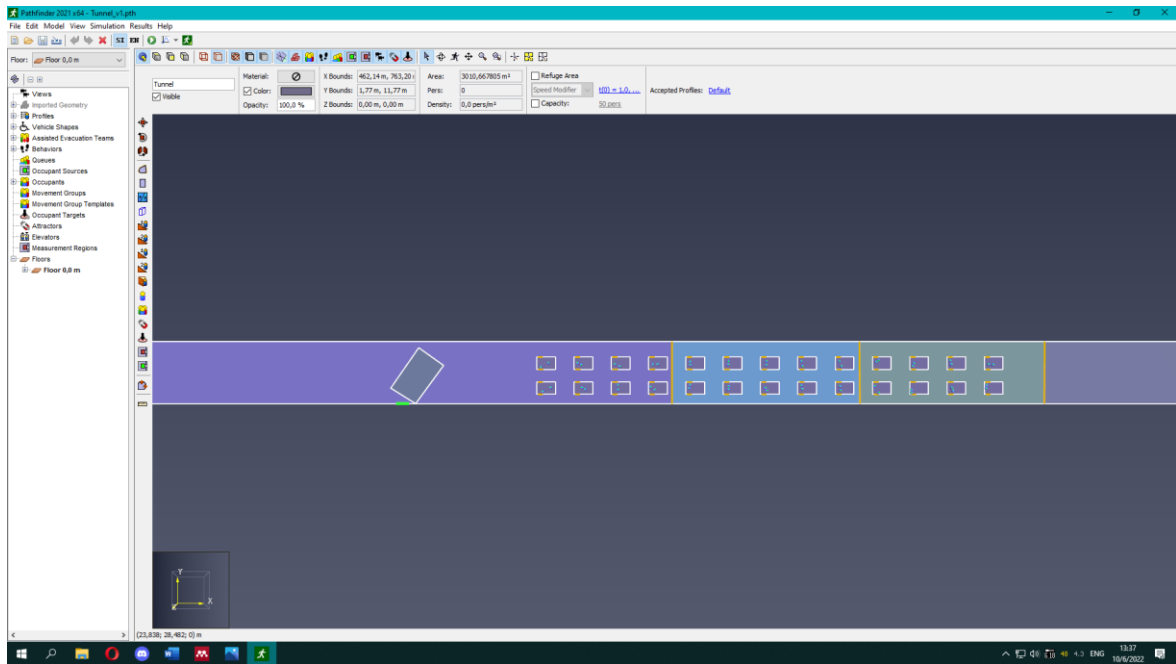


Εικόνα 43: Ανάπτυξη φωτιάς στα 500 δευτερόλεπτα (Θερμοκρασία)



Εικόνα 44: Ανάπτυξη φωτιάς στα 500 δευτερόλεπτα (Ορατότητα)

Δημιουργήθηκε ένα σενάριο με το λογισμικό προσομοίωσης εκκένωσης Pathfinder έτσι ώστε να συγκριθούν τα αποτελέσματα του πειράματος. Το προσομοίωμα φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



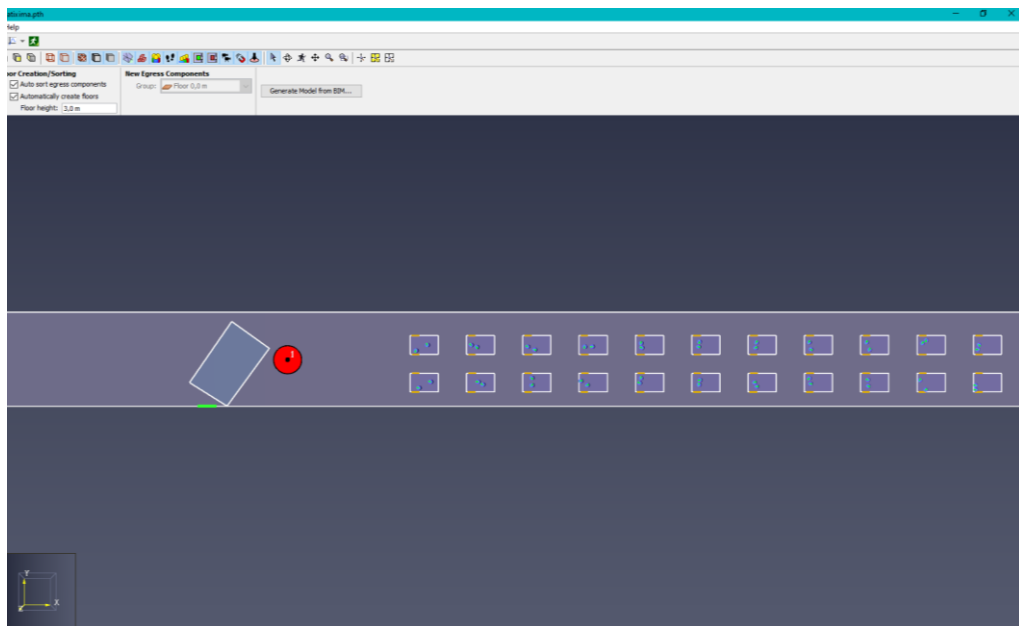
Το προσομοίωμα έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με τα πειράματα που διεξήχθησαν στην UE4, εκτός από την προσομοίωση της ταχύτητας, όπου στην UE4 ήταν σταθερή και ίση με 1,2m/s ενώ στο Pathfinder η ταχύτητα μειώνεται σύμφωνα με τον παρακάτω κανόνα:

- 1) Για όσο η ορατότητα του ένοικου είναι  $>10\text{m}$  τότε η ταχύτητα είναι ίση με αυτή που έχει οριστεί ως μέγιστη ( $V_{\text{max}}$ , εδώ 1,2m/s)
- 2) Για όσο η ορατότητα του ένοικου είναι μεταξύ 2m και 10 m τότε η ταχύτητα είναι ίση με  $V_{\text{max}}/2$
- 3) Για όσο η ορατότητα του ένοικου είναι  $< 2\text{m}$  τότε η ταχύτητα είναι ίση με  $0.3 \cdot V_{\text{max}}$

Στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στο Pathfinder, η μεταβλητή η οποία άλλαζε ήταν ο χρόνος ανταπόκρισης των ενοίκων. Με τον τρόπο αυτό κατασκευάστηκαν 4 διαφορετικά σενάρια, τα εξής:

1. Χρόνος Ανταπόκρισης: 5-7 sec, επιλογή εξόδου 80% έξοδος κινδύνου και 20% στόμιο σήραγγας.
2. Χρόνος Ανταπόκρισης: 7-19 sec, επιλογή εξόδου 90% έξοδος κινδύνου και 10% στόμιο σήραγγας. Το συγκεκριμένο σενάριο βασίστηκε στα αποτελέσματα της ανάλυσης με εικονική πραγματικότητα.
3. Χρόνος Ανταπόκρισης: 30-180 sec, επιλογή εξόδου 90% έξοδος κινδύνου και 10% στόμιο σήραγγας. Το συγκεκριμένο σενάριο βασίστηκε στα βιβλιογραφικά δεδομένα της Δ.Α.Σ [37]

4. Χρόνος Ανταπόκρισης: 7-19 sec, επιλογή εξόδου 90% έξοδος κινδύνου και 10% στόμιο σήραγγας. Στο συγκεκριμένο σενάριο επιλέχθηκε ένας ένοικος να κινηθεί προς το ατύχημα και να περιμένει στο σημείο για 10 δευτερόλεπτα. Χρόνος ανταπόκρισης συγκεκριμένου ενοίκου 9 sec. Το παραπάνω βασίστηκε σε παρατηρήσεις για την κίνηση των χρηστών κατά την διάρκεια διεξαγωγής των πειραμάτων με εικονική πραγματικότητα. Στην Εικόνα 45 με κόκκινο κύκλο φαίνεται το σημείο αναμονής του ενοίκου.



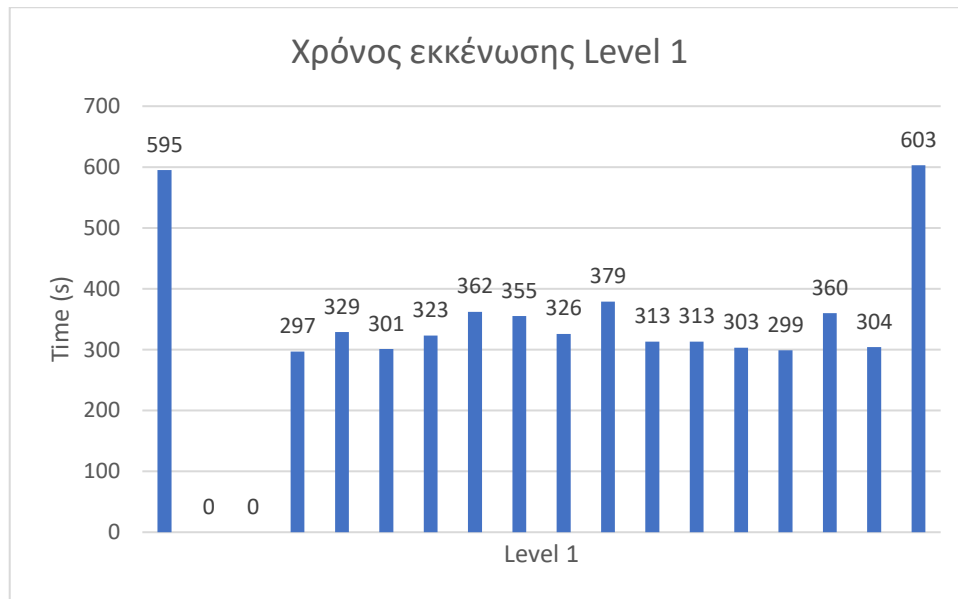
Εικόνα 45: Σενάριο 4 Pathfinder

## Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα Πειράματος Εικονικής Πραγματικότητας

### Σενάριο 1 από Απόσταση (ΣΑ1)

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το 1<sup>ο</sup> Σενάριο από απόσταση.

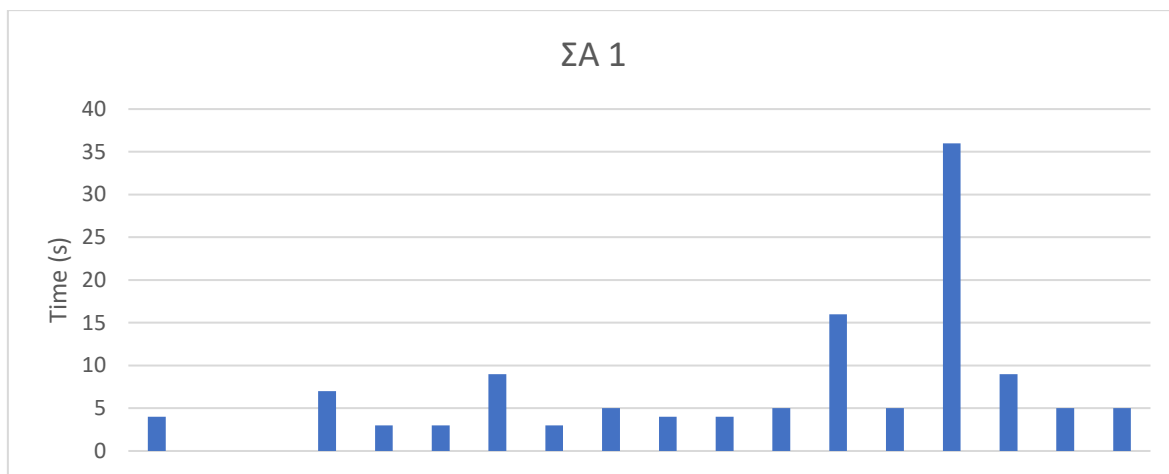
Αρχικά παρατίθενται στο Διάγραμμα 2. οι χρόνοι εκκένωσης των χρηστών.



Διάγραμμα 2: Χρόνος εκκένωσης ΣΑ1

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι οι περισσότεροι χρόνοι εκκένωσης είναι σχετικά χαμηλοί και συγκεκριμένα χαμηλότεροι από 400 δευτερόλεπτα. Με εξαίρεση κάποιες τιμές που είναι άνω των 500 δευτερολέπτων.

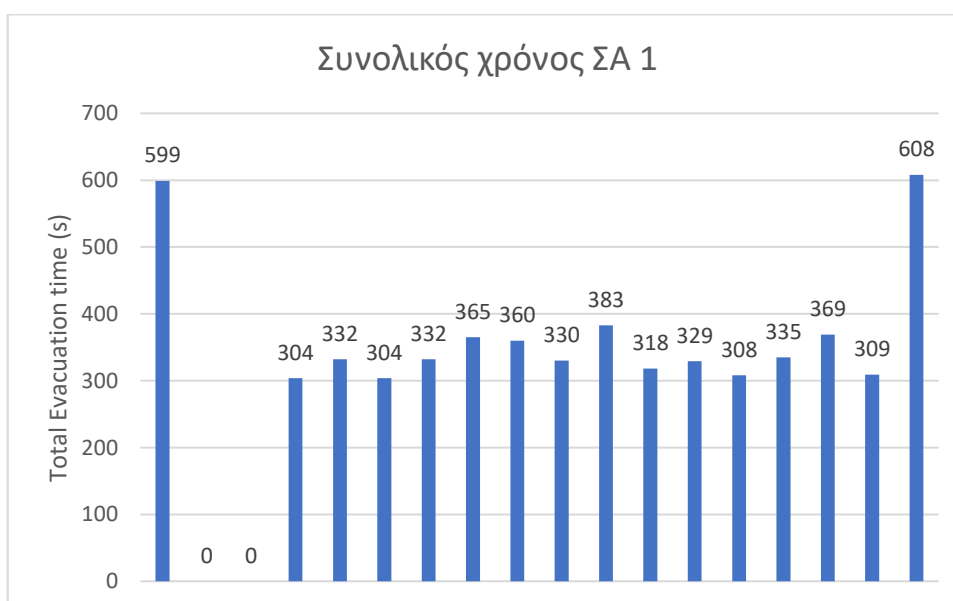
Ακολούθως παρατίθενται στο οι χρόνοι ανταπόκρισης των χρηστών.



Διάγραμμα 3: Χρόνος ανταπόκρισης ΣΑ1

Όσον αφορά τους χρόνους ανταπόκρισης, παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο ποσοστό έχει χρόνο ανταπόκρισης κάτω από 10 δευτερόλεπτα. Σημειώνεται ότι ηχητικό σήμα του συναγερμού ενεργοποιείται στα 60 δευτερόλεπτα, γεγονός που μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι χρήστες δεν βασίσθηκαν στον συναγερμό για να εξέλθουν από τα οχήματα τους.

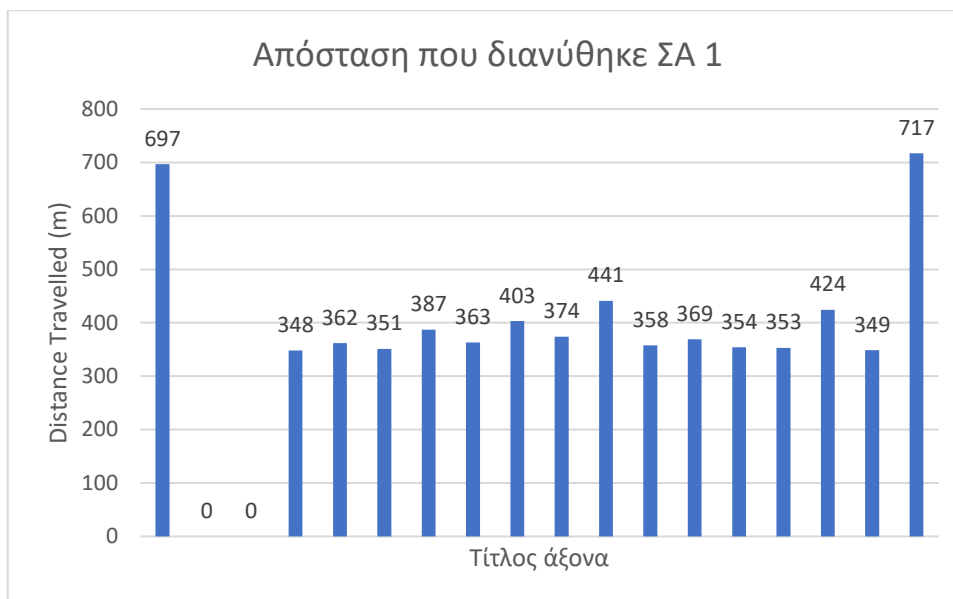
Στην συνέχεια παρατίθενται στο Διάγραμμα 4 οι συνολικοί χρόνοι των χρηστών.



Διάγραμμα 4: Συνολικοί χρόνοι ΣΑ 1

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι οι περισσότεροι χρήστες είχαν συνολικό χρόνο κάτω από τα 400 δευτερόλεπτα, με κάποιες εξαιρέσεις άνω των 500 δευτερολέπτων.

Τέλος παρατίθενται στο Διάγραμμα 5 οι αποστάσεις που διένυσαν οι χρήστες.



Διάγραμμα 5: Αποστάσεις που διανύθηκαν ΣΑ 1

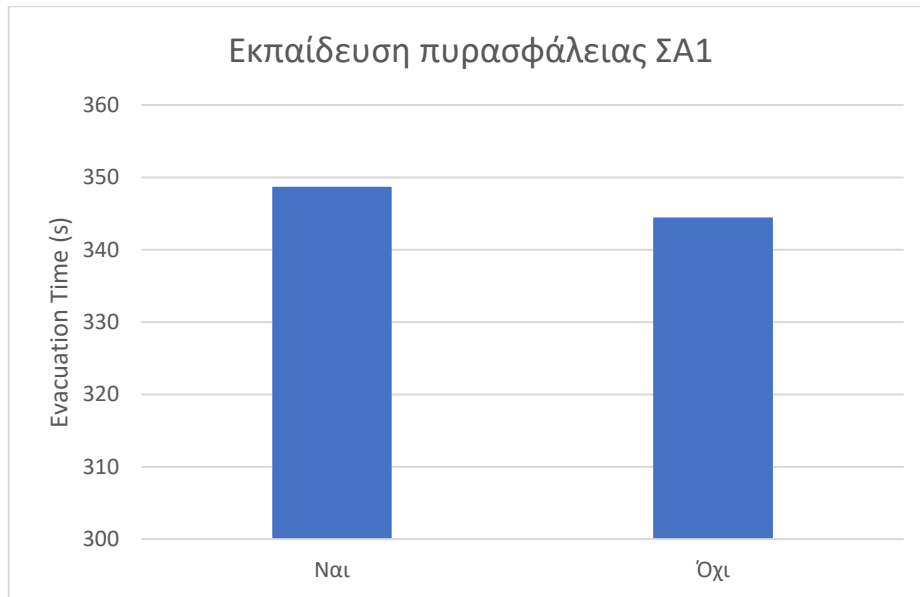
Παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο ποσοστό διένυσε απόσταση μικρότερη των 400 μέτρων.

Στον Πίνακα 18 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές όλων των μετρήσεων που αναφέρθηκαν.

Πίνακας 18: Μέσες τιμές μετρήσεων ΣΑ 1

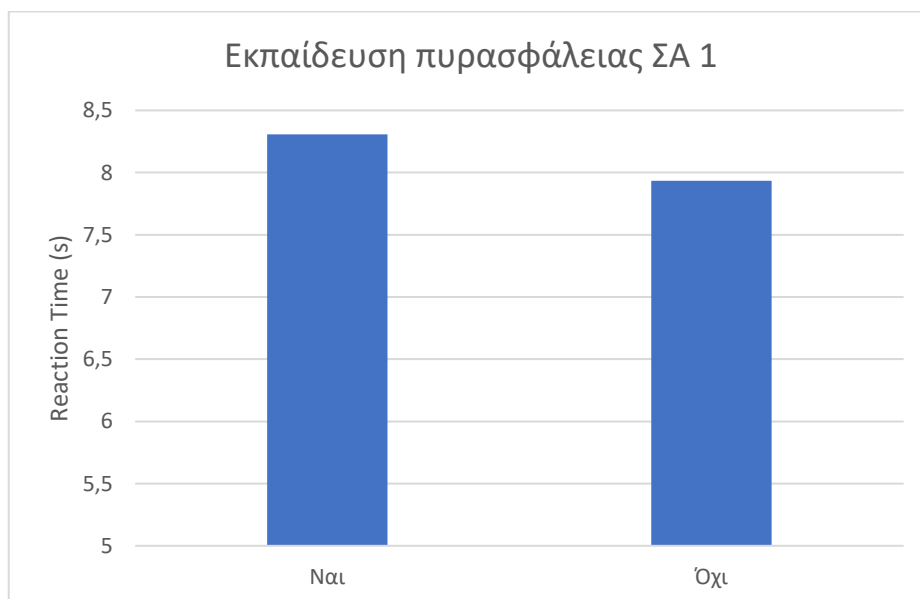
| Μέσος χρόνος εκκένωσης (sec) | Μέσος χρόνος ανταπόκρισης (sec) | Μέσος συνολικός χρόνος (sec) | Μέση απόσταση (m) |
|------------------------------|---------------------------------|------------------------------|-------------------|
| 360                          | 7,69                            | 368                          | 416               |

Σε περαιτέρω διερεύνηση οι χρήστες ερωτήθηκαν εάν έχουν λάβει κάποια εκπαίδευση πυρασφάλειας και εάν παρατήρησαν την πινακίδα εύφλεκτων υλικών στον πίσω μέρος του φορτηγού που προκάλεσε το ατύχημα. Οι απαντήσεις τους ως προς την πυρασφάλεια συσχετίστηκαν με τον μέσο χρόνο εκκένωσης και τον μέσο χρόνο αναμονής. Στα ακόλουθα ραβδογράμματα παρουσιάζονται οι παραπάνω συσχετίσεις.



Διάγραμμα 6: Συσχέτιση μέσου χρόνου εκκένωσης και εκπαίδευσης πυρασφάλειας

Στο Διάγραμμα 6 δεν παρατηρείται ιδιαίτερη διαφορά μεταξύ των μέσων χρόνων εκκένωσης των χρηστών.

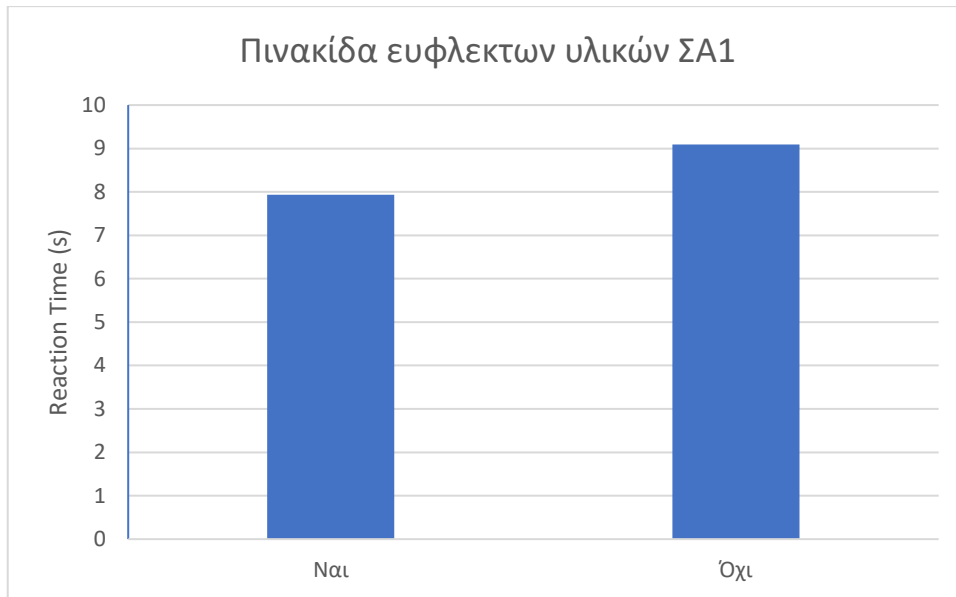


Διάγραμμα 7: Συσχέτιση μέσου χρόνου ανταπόκρισης και εκπαίδευσης πυρασφάλειας

Στο Διάγραμμα 7 παρατηρείται μια μικρή διαφορά στον χρόνο ανταπόκρισης των χρηστών, της τάξης του μισού δευτερολέπτου.

Όσον αφορά την συσχέτιση του χρόνου ανταπόκρισης με την αντίληψη της ύπαρξης της πινακίδας εύφλεκτών υλικών, προέκυψε το ακόλουθο Διάγραμμα 8.

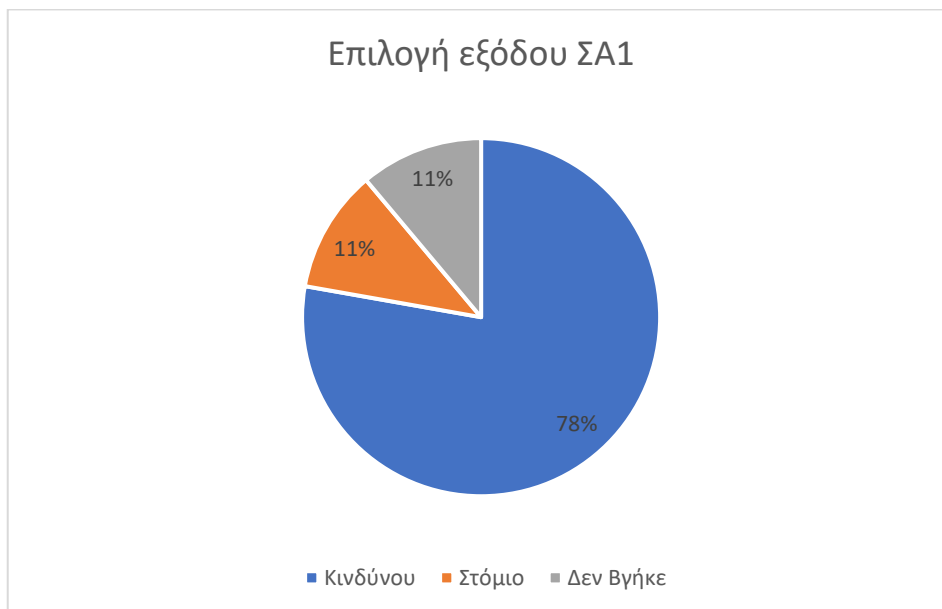




Διάγραμμα 8: Συσχέτιση μέσου χρόνου ανταπόκρισης και αντίληψης πινακίδας εύφλεκτών υλικών

Στο παραπάνω παρατηρείται μια μικρή διαφοροποίηση, της τάξης του ενός δευτερολέπτου, όσον αφορά τον χρόνο ανταπόκρισης.

Οι χρήστες ερωτήθηκαν επιπλέον για το ποια έξοδο διάλεξαν αλλά και τον τρόπο επιλογής αυτής. Τα αποτελέσματα των απαντήσεων τους συγκεντρώνονται στα παρακάτω διαγράμματα.



Διάγραμμα 9: Ποσοστά επιλογών εξόδου



*Διάγραμμα 10: Ποσοστά τρόπων επιλογής εξόδου*

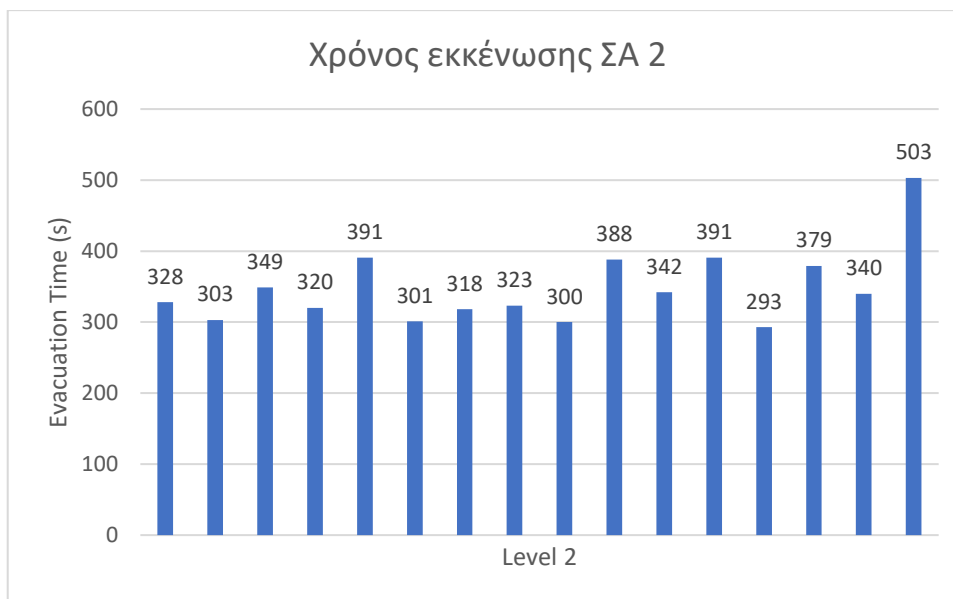
Στο Διάγραμμα 9 παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των χρηστών επέλεξε την έξοδο κινδύνου και ένα μικρό ποσοστό είτε το στόμιο είτε δεν κατάφερε να εξέλθει από την σήραγγα. Αυτό μπορεί να οφείλεται είτε επειδή ζαλίστηκαν κατά την διάρκεια του πειράματος είτε επειδή όντως δεν κατάφεραν να βρουν την έξοδο.

Στο Διάγραμμα 10 παρατηρείται ότι παραπάνω από τους μισούς χρήστες αναζήτησαν τις σημάσεις, ένα μικρότερο ποσοστό απάντησε ότι βγήκε από εκεί που μπήκε στην σήραγγα, ένα ακόμα μικρότερο ακολούθησε τους άλλους ενοίκους και μόλις το 5% επέλεξε τρόπο εξόδου στην τύχη.

## Σενάριο 2 από Απόσταση (ΣΑ2)

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το 2<sup>ο</sup> Σενάριο από απόσταση.

Αρχικά παρατίθενται στο Διάγραμμα 11 οι χρόνοι εκκένωσης των χρηστών.



Διάγραμμα 11: Χρόνος εκκένωσης ΣΑ 2

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι οι περισσότεροι χρόνοι εκκένωσης είναι σχετικά χαμηλοί και συγκεκριμένα χαμηλότεροι από 400 δευτερόλεπτα. Εξαιρέση αποτελεί μία τιμή που είναι άνω των 500 δευτερολέπτων.

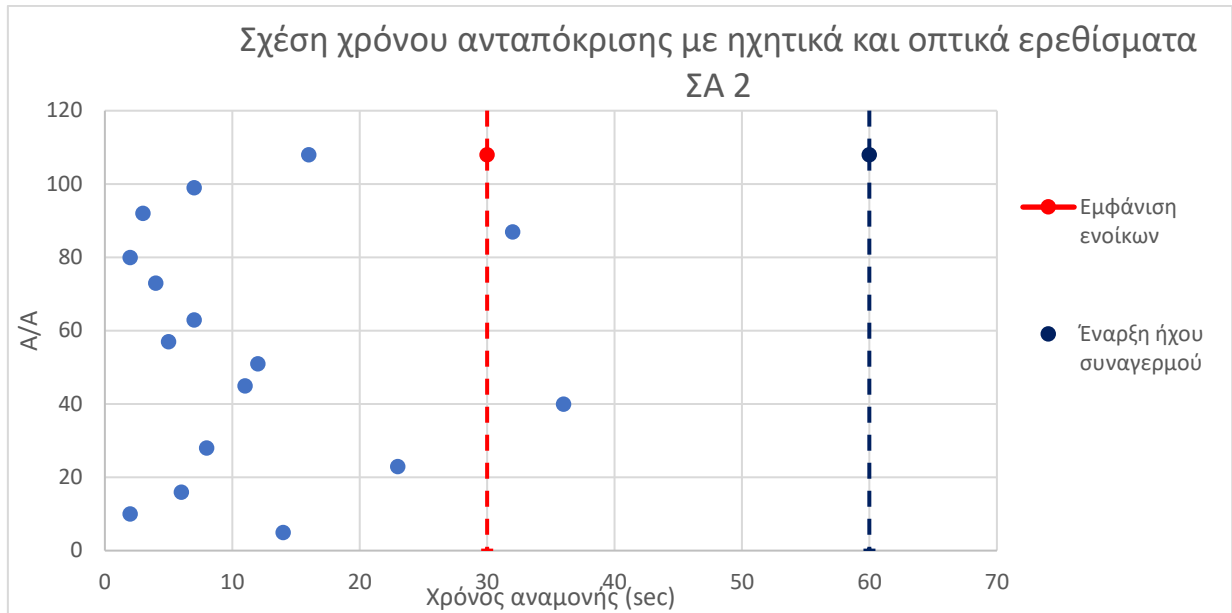
Ακολούθως παρατίθενται στο οι χρόνοι ανταπόκρισης των χρηστών.



Διάγραμμα 12: Χρόνος ανταπόκρισης ΣΑ 2

Όσον αφορά τους χρόνους ανταπόκρισης, παρατηρείται ότι υπάρχει μια σαφής αύξηση αυτών σε σύγκριση με τους αντίστοιχους του 4<sup>ου</sup> σεναρίου, γεγονός που οφείλεται στο ότι στο συγκεκριμένο σενάριο δεν έχουμε ύπαρξη καπνού και φωτιάς και άρα οι χρήστες δεν αισθάνονται άμεσα την ανάγκη να εγκαταλείψουν το όχημα τους. Το συγκεκριμένο ζήτημα

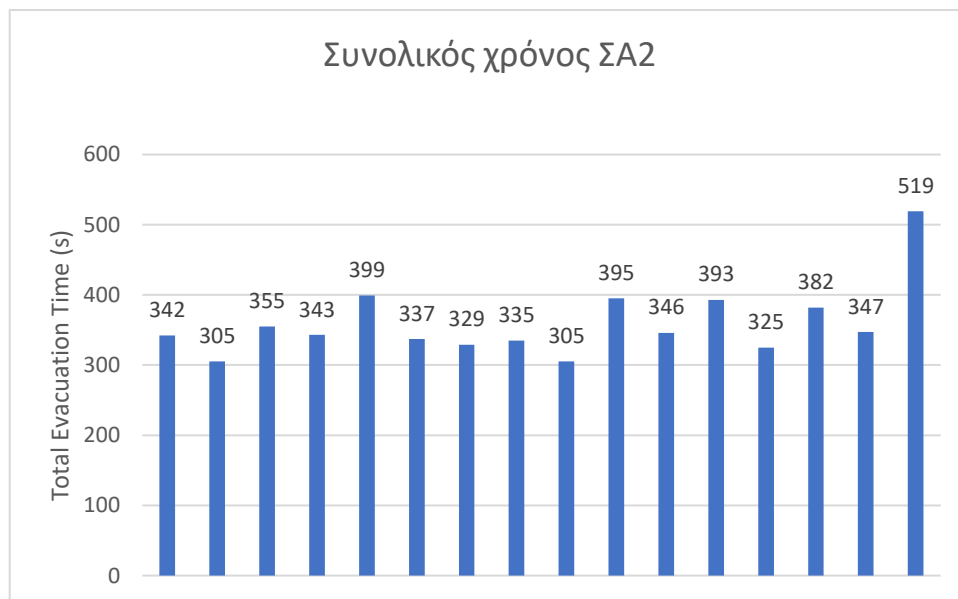
διερευνήθηκε περαιτέρω και δημιουργήθηκε το ακόλουθο διάγραμμα στο οποίο συσχετίζονται οι χρόνοι ανταπόκρισης των χρηστών με τους χρόνους ερεθισμάτων.



Διάγραμμα 13: Σχέση Χρόνου ανταπόκρισης με ηχητικά και οπτικά ερεθίσματα

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι οι περισσότεροι χρήστες δεν βασίστηκαν στα ερεθίσματα αλλά έδρασαν αυτοβούλως, με εξαίρεση 2 χρηστών που κινήθηκαν με βάση τους άλλους ένοικους.

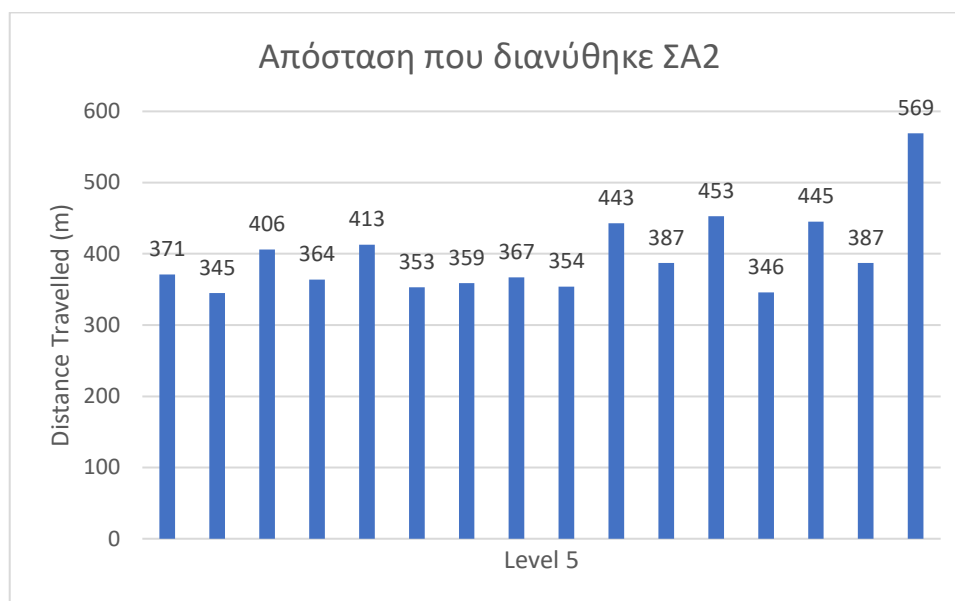
Στην συνέχεια παρατίθενται στο Διάγραμμα 14 οι συνολικοί χρόνοι των χρηστών.



Διάγραμμα 14: Συνολικοί χρόνοι ΣΑ 2

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι οι περισσότεροι χρήστες είχαν συνολικό χρόνο κάτω από τα 400 δευτερόλεπτα, με μία εξαίρεση άνω των 500 δευτερολέπτων.

Τέλος παρατίθενται στο Διάγραμμα 15 οι αποστάσεις που διένυσαν οι χρήστες.



Διάγραμμα 15: Αποστάσεις που διανύθηκαν ΣΑ 2

Παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο ποσοστό διένυσε απόσταση μικρότερη των 400 μέτρων.

Στον Πίνακα 19 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές όλων των μετρήσεων που αναφέρθηκαν.

Πίνακας 19: Μέσες τιμές μετρήσεων ΣΑ 2

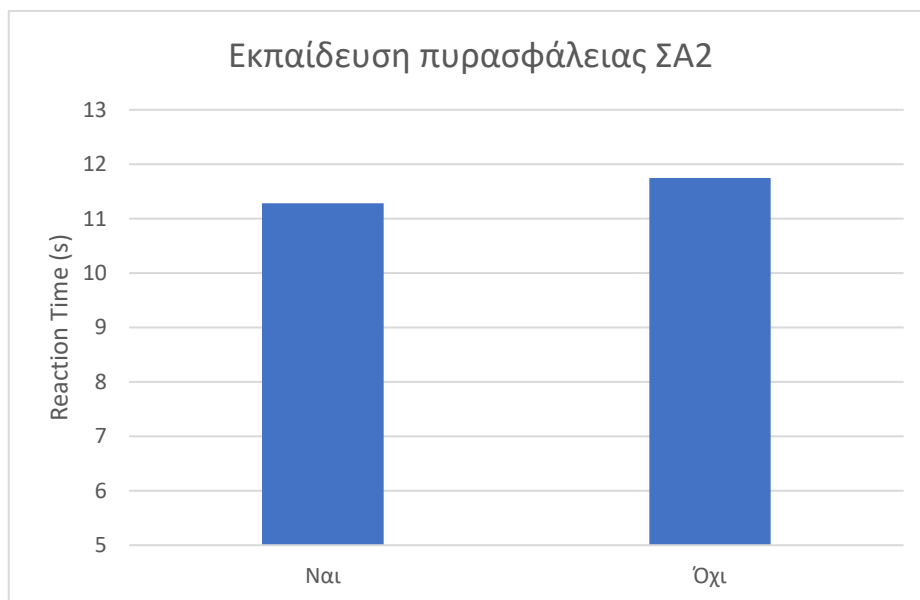
| Μέσος χρόνος εκκένωσης (sec) | Μέσος χρόνος ανταπόκρισης (sec) | Μέσος συνολικός χρόνος (sec) | Μέση απόσταση (m) |
|------------------------------|---------------------------------|------------------------------|-------------------|
| 348                          | 11,75                           | 360                          | 398               |

Σε περαιτέρω διερεύνηση οι χρήστες ερωτήθηκαν εάν έχουν λάβει κάποια εκπαίδευση πυρασφάλειας και εάν παρατήρησαν την πινακίδα εύφλεκτων υλικών στον πίσω μέρος του φορτηγού που προκάλεσε το ατύχημα. Οι απαντήσεις τους ως προς την πυρασφάλεια συσχετίστηκαν με τον μέσο χρόνο εκκένωσης και τον μέσο χρόνο αναμονής. Στα ακόλουθα ραβδογράμματα παρουσιάζονται οι παραπάνω συσχετίσεις.



Διάγραμμα 16: Συσχέτιση μέσου χρόνου εκκένωσης και εκπαίδευσης πυρασφάλειας

Στο Διάγραμμα 16 παρατηρείται διαφοροποίηση μεταξύ των μέσων χρόνων εκκένωσης των χρηστών. Αυτό συμβαίνει επειδή δεν υφίσταται φωτιά και καπνός, οι μη εκπαιδευμένοι τείνουν να αισθάνονται πιο μπερδεμένοι για το τι να κάνουν και έτσι οδηγούνται σε μεγαλύτερους χρόνους εκκένωσης.



Διάγραμμα 17: Συσχέτιση μέσου χρόνου ανταπόκρισης και εκπαίδευσης πυρασφάλειας

Στο Διάγραμμα 17 παρατηρείται μια μικρή διαφορά στον χρόνο ανταπόκρισης των χρηστών, της τάξης του μισού δευτερολέπτου.

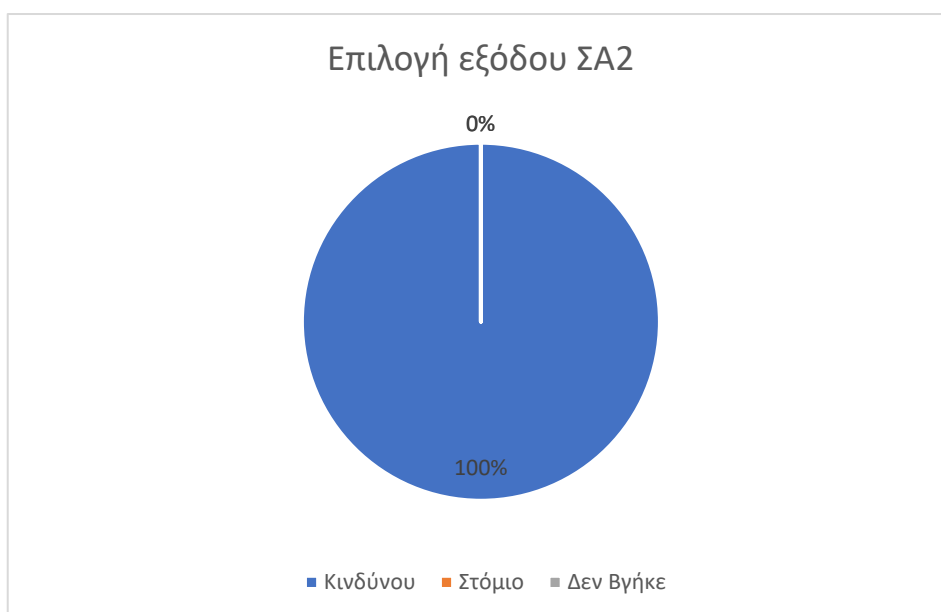
Όσον αφορά την συσχέτιση του χρόνου ανταπόκρισης με την αντίληψη της ύπαρξης της πινακίδας εύφλεκτων υλικών, προέκυψε το ακόλουθο Διάγραμμα 18.



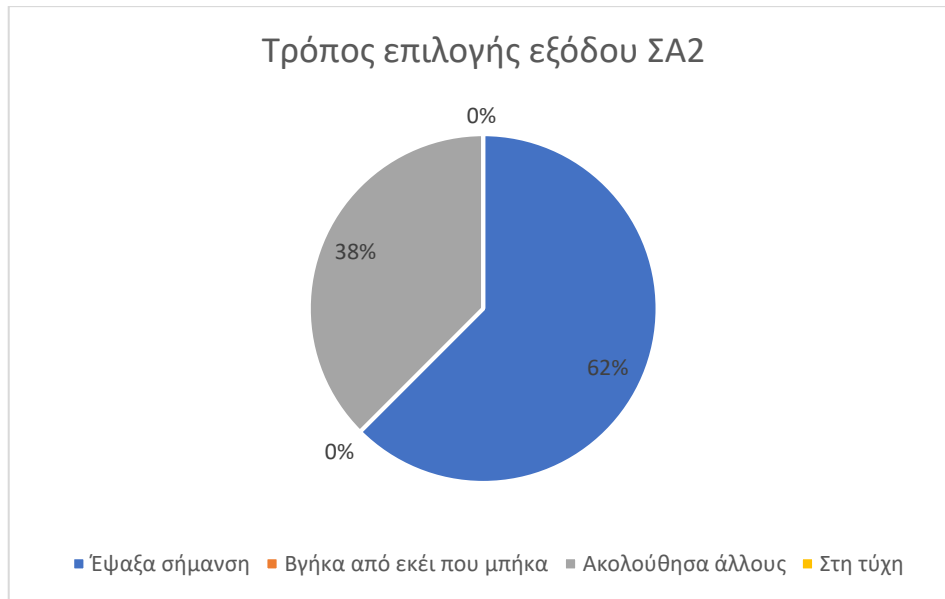
Διάγραμμα 18: Συσχέτιση μέσου χρόνου ανταπόκρισης και αντίληψης πινακίδας εύφλεκτων υλικών

Στο παραπάνω δεν παρατηρείται διαφοροποίηση όσον αφορά τον χρόνο ανταπόκρισης.

Οι χρήστες ερωτήθηκαν επιπλέον για το ποια έξοδο διάλεξαν αλλά και τον τρόπο επιλογής αυτής. Τα αποτελέσματα των απαντήσεων τους συγκεντρώνονται στα παρακάτω διαγράμματα.



Διάγραμμα 19: Ποσοστά επιλογών εξόδου



*Διάγραμμα 20: Ποσοστά τρόπων επιλογής εξόδου*

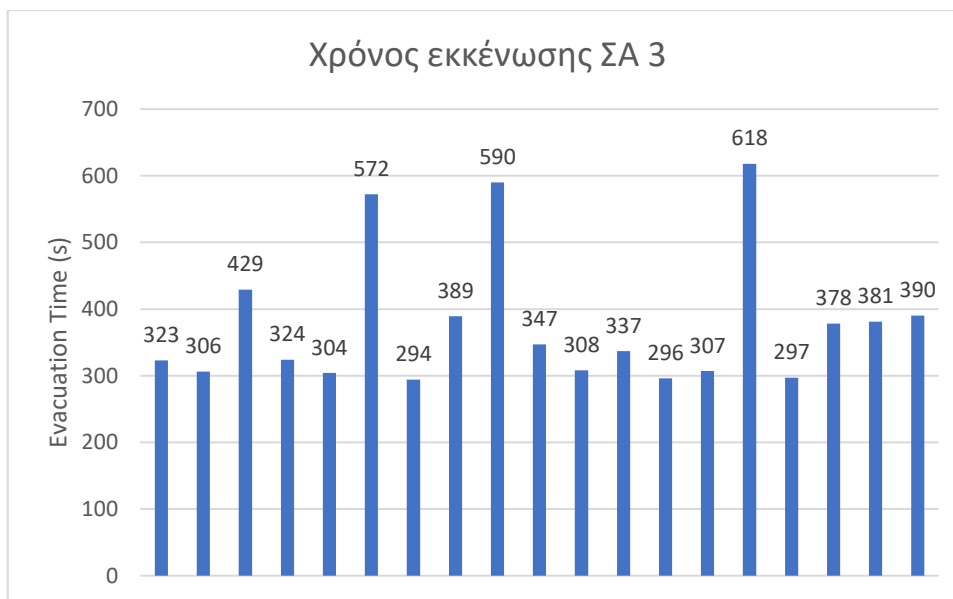
Στο Διάγραμμα 19 παρατηρείται όλοι οι χρήστες επέλεξαν την έξοδο κινδύνου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι δεν υπήρχε καπνός και φωτιά και έτσι η όδευση προς την έξοδο ήταν ξεκάθαρη. Στο Διάγραμμα 20 παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο ποσοστό από τους χρήστες αναζήτησαν τις σημάσεις, και οι υπόλοιποι ακολούθησαν τρίτους.

### Σενάριο 3 από Απόσταση (ΣΑ3)

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το 3<sup>ο</sup> Σενάριο από απόσταση.

Αρχικά παρατίθενται στο Διάγραμμα 21 οι χρόνοι εκκένωσης των χρηστών.

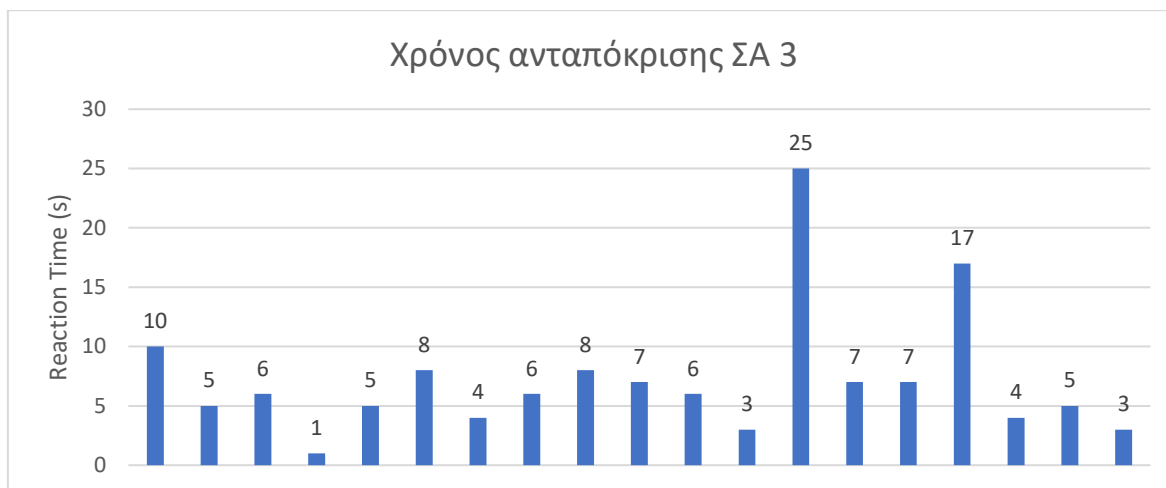




Διάγραμμα 21: Χρόνος εκκένωσης ΣΑ 3

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι οι περισσότεροι χρόνοι εκκένωσης είναι σχετικά χαμηλοί και συγκεκριμένα χαμηλότεροι από 400 δευτερόλεπτα. Εξαιρέση αποτελούν κάποιες τιμές που είναι άνω των 500 δευτερολέπτων.

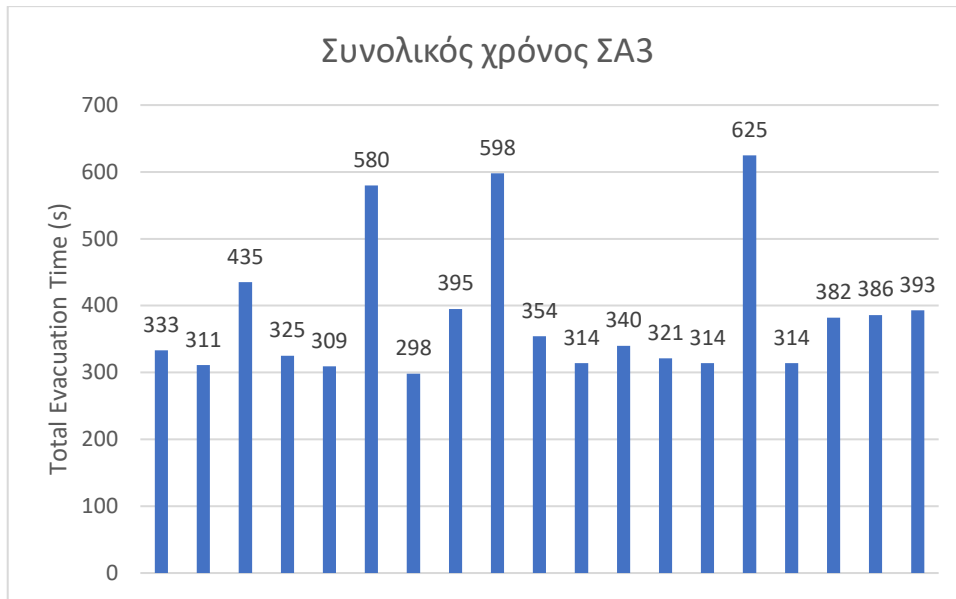
Ακολούθως παρατίθενται στο οι χρόνοι ανταπόκρισης των χρηστών.



Διάγραμμα 22: Χρόνος ανταπόκρισης ΣΑ 3

Όσον αφορά τους χρόνους ανταπόκρισης, παρατηρείται μια αντιστοιχία με το 1<sup>ο</sup> Σενάριο

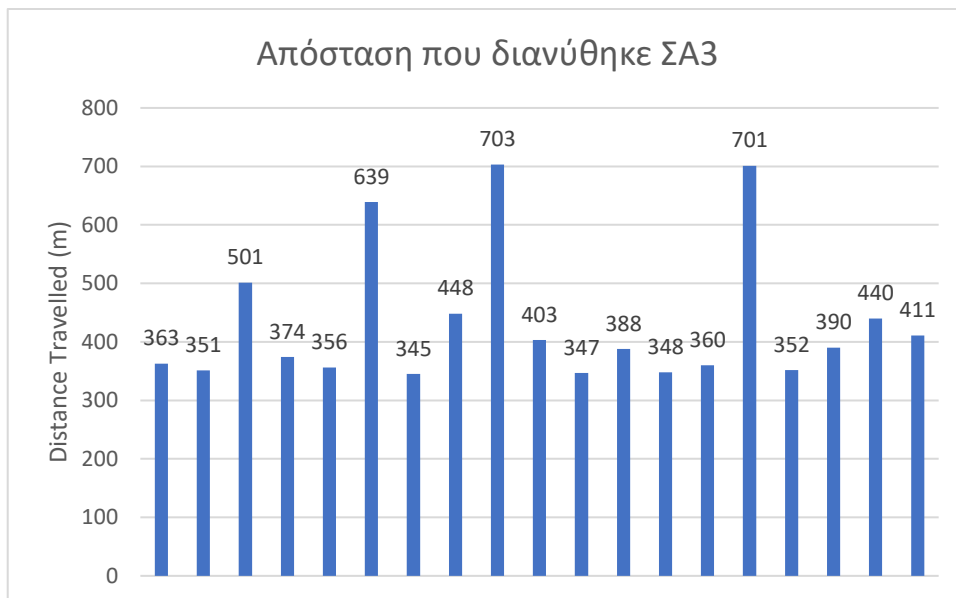
Στην συνέχεια παρατίθενται στο Διάγραμμα 23 οι συνολικοί χρόνοι των χρηστών.



Διάγραμμα 23: Συνολικοί χρόνοι ΣΑ 3

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι οι περισσότεροι χρήστες είχαν συνολικό χρόνο κάτω από τα 400 δευτερόλεπτα, με εξαίρεση κάποιες τιμές άνω των 500 δευτερολέπτων.

Τέλος παρατίθενται στο Διάγραμμα 24 οι αποστάσεις που διένυσαν οι χρήστες.



Διάγραμμα 24: Αποστάσεις που διανύθηκαν ΣΑ 3

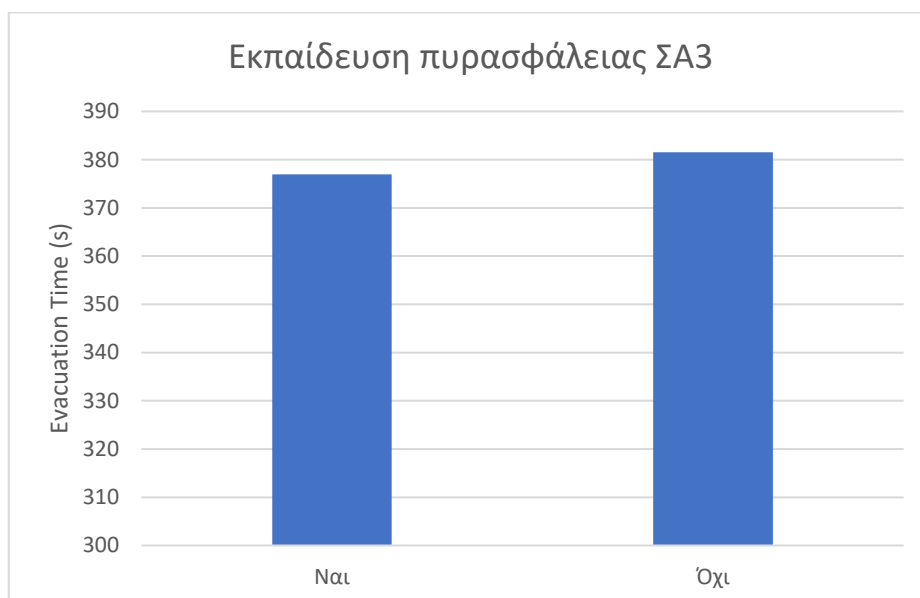
Παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο ποσοστό διένυσε απόσταση μικρότερη των 400 μέτρων.

Στον Πίνακα 20 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές όλων των μετρήσεων που αναφέρθηκαν.

Πίνακας 20: Μέσες τιμές μετρήσεων ΣΑ 3

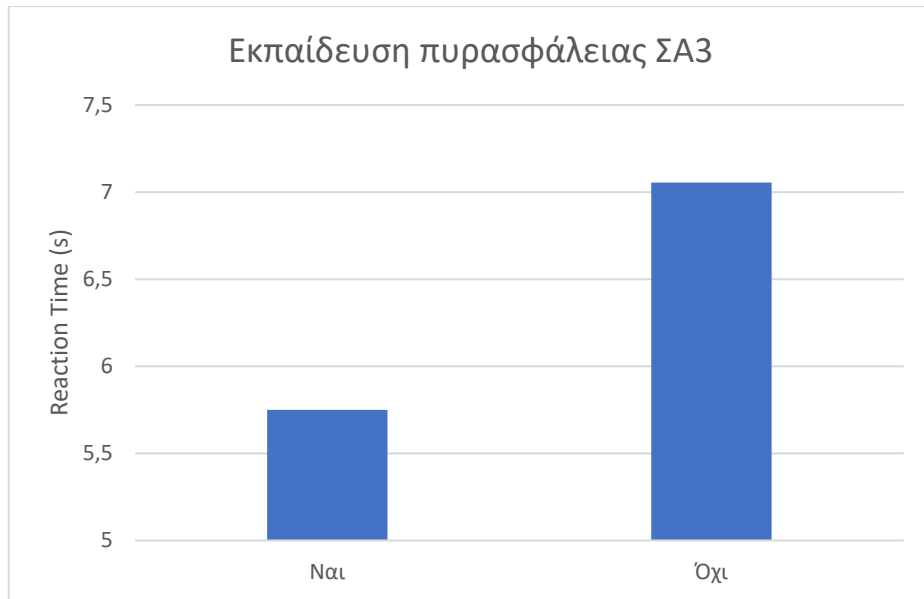
| Μέσος χρόνος εκκένωσης (sec) | Μέσος χρόνος ανταπόκρισης (sec) | Μέσος συνολικός χρόνος (sec) | Μέση απόσταση (m) |
|------------------------------|---------------------------------|------------------------------|-------------------|
| 378                          | 7,21                            | 386                          | 433               |

Σε περαιτέρω διερεύνηση οι χρήστες ερωτήθηκαν εάν έχουν λάβει κάποια εκπαίδευση πυρασφάλειας και εάν παρατήρησαν την πινακίδα εύφλεκτων υλικών στον πίσω μέρος του φορτηγού που προκάλεσε το ατύχημα. Οι απαντήσεις τους ως προς την πυρασφάλεια συσχετίστηκαν με τον μέσο χρόνο εκκένωσης και τον μέσο χρόνο αναμονής. Στα ακόλουθα ραβδογράμματα παρουσιάζονται οι παραπάνω συσχετίσεις.



Διάγραμμα 25: Συσχέτιση μέσου χρόνου εκκένωσης και εκπαίδευσης πυρασφάλειας

Στο Διάγραμμα 25 παρατηρείται διαφοροποίηση μεταξύ των μέσων χρόνων εκκένωσης των χρηστών της τάξης των 5 δευτερολέπτων. Αυτό ακολουθεί τα αναμενόμενα αποτελέσματα.



Διάγραμμα 26: Συσχέτιση μέσου χρόνου ανταπόκρισης και εκπαίδευσης πυρασφάλειας

Στο Διάγραμμα 26 παρατηρείται μια μικρή διαφορά στον χρόνο ανταπόκρισης των χρηστών, της τάξης του 1,25 sec.

Όσον αφορά την συσχέτιση του χρόνου ανταπόκρισης με την αντίληψη της ύπαρξης της πινακίδας εύφλεκτων υλικών, προέκυψε το ακόλουθο Διάγραμμα 27.



Διάγραμμα 27: Συσχέτιση μέσου χρόνου ανταπόκρισης και αντίληψης πινακίδας εύφλεκτων υλικών

Στο παραπάνω δεν παρατηρείται κάποια σημαντική διαφοροποίηση όσον αφορά τον χρόνο ανταπόκρισης.

Οι χρήστες ερωτήθηκαν επιπλέον για το ποια έξοδο διάλεξαν αλλά και τον τρόπο επιλογής αυτής. Τα αποτελέσματα των απαντήσεων τους συγκεντρώνονται στα παρακάτω διαγράμματα.



Διάγραμμα 28: Ποσοστά επιλογών εξόδου

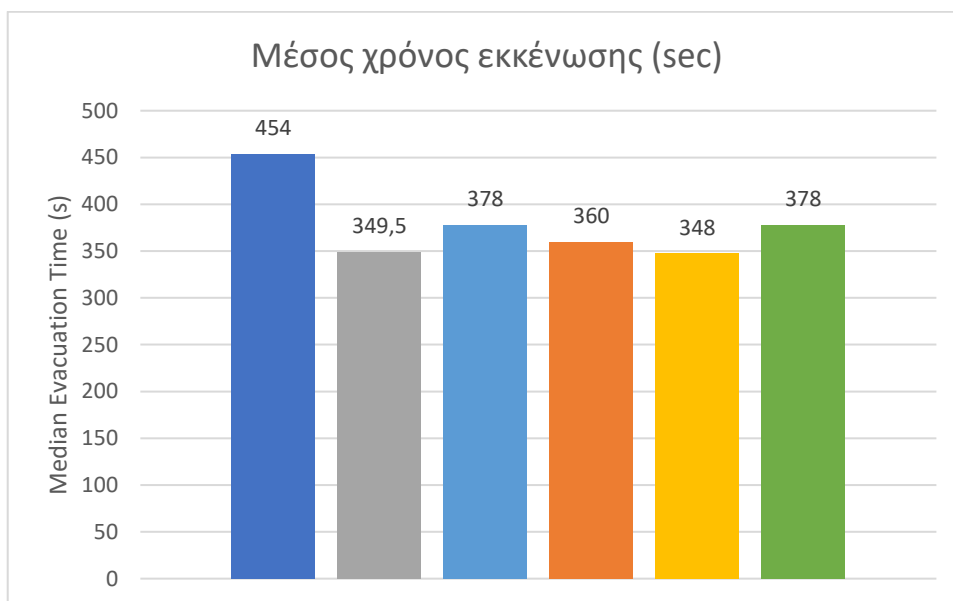


Διάγραμμα 29: Ποσοστά τρόπων επιλογής εξόδου

Στο Διάγραμμα 28 παρατηρείται σχεδόν όλοι οι χρήστες επέλεξαν την έξοδο κινδύνου. Στο Διάγραμμα 29 παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο ποσοστό από τους χρήστες αναζήτησαν τις σημάσεις, σε περίπου ίσα ποσοστά βγήκαν από εκεί που μπήκαν στην σήραγγα και στην κινήθηκαν στην τύχη. Τέλος, το μικρότερο ποσοστό ακολούθησε άλλους ενοίκους.

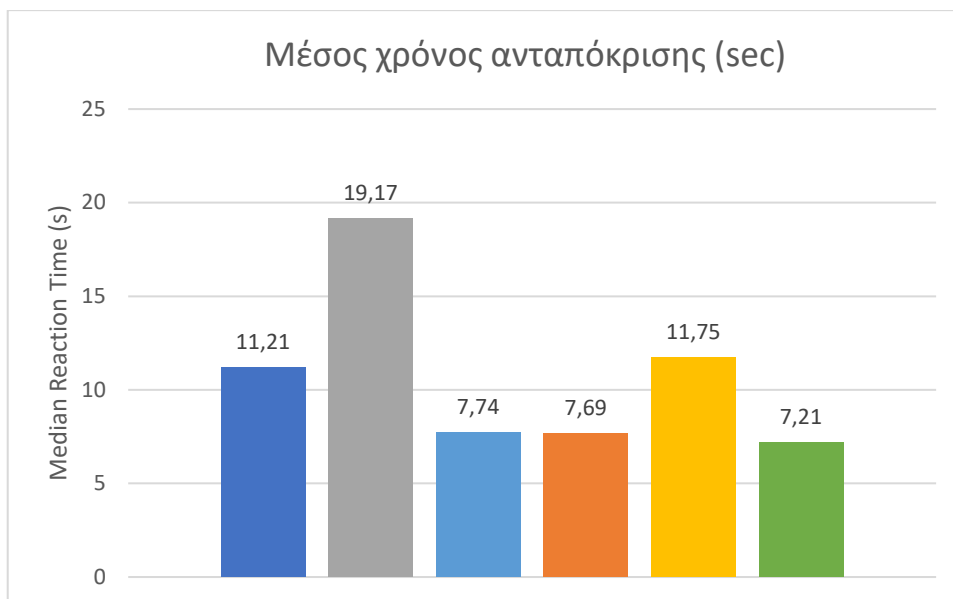
## Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα

Παρακάτω παρατίθενται διαγράμματα με τις μέσες τιμές των μεταβλητών συγκεντρωτικά για όλα τα σενάρια σε συνδυασμό με την παρεμφερή διπλωματική εργασία του Βασίλη Κωτσάκη [38], όπου μελέτησε την συμπεριφορά εκκένωσης οδικής σήραγγας στην περίπτωση εγγύτητας των χρηστών σε τροχαίο ατύχημα, με την χρήση εικονικής πραγματικότητας. Στα διαγράμματα που ακολουθούν οι πρώτες 3 ράβδοι αφορούν τα σενάρια που μελετήθηκαν στην παρούσα διπλωματική ενώ οι 3 τελευταίες αυτές που μελετήθηκαν σε συνεργασία με τον συνάδελφο Βασίλη Κωτσάκη



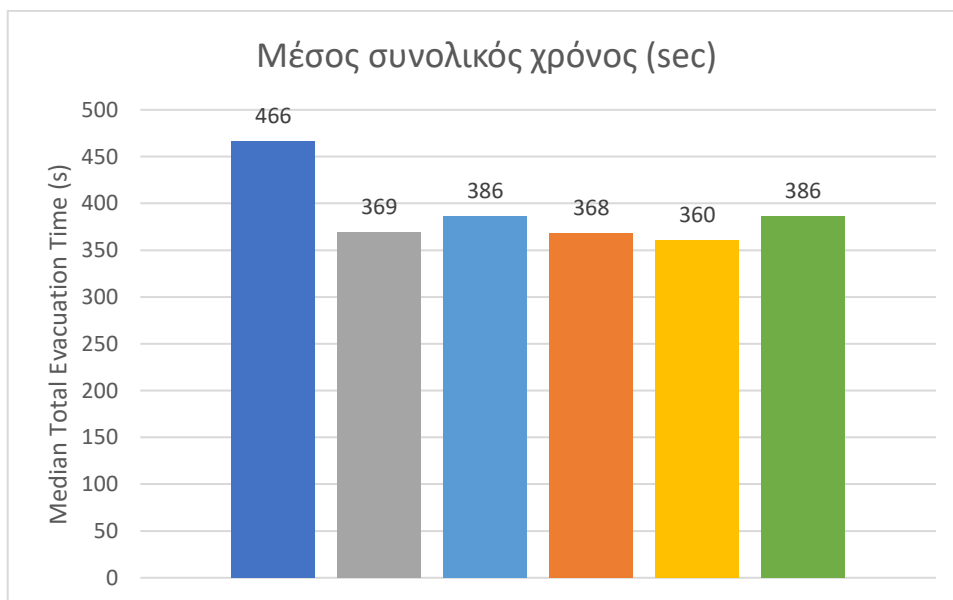
Διάγραμμα 30: Μέσοι χρόνοι εκκένωσης όλων των σεναρίων

Στο Διάγραμμα 30 παρατηρείται ότι ο μεγαλύτερος χρόνος είναι στο ΣΑ2 ενώ οι μικρότεροι χρόνοι στα ΣΑ2 και ΣΕ2 όπου εκεί έχουμε έλλειψη καπνού και φωτιάς.



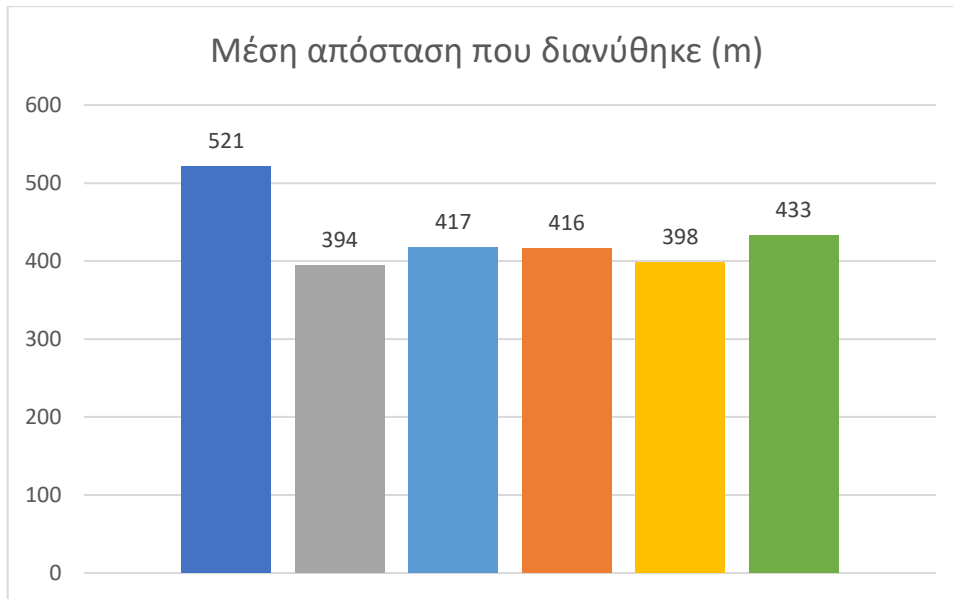
Διάγραμμα 31: Μέσος χρόνος ανταπόκρισης όλων των σεναρίων

Στο Διάγραμμα 31 παρατηρούμε ότι ο μεγαλύτεροι χρόνοι ανταπόκρισης είναι στο σενάριο ΣΑ2 και ΣΕ2 όπου δεν υπάρχει καπνός. Στο ΣΑ1 παρατηρείται επίσης μεγάλος χρόνος ανταπόκρισης ο οποίος δεν αναμενόταν και πιθανώς οφείλεται στον τρόπο διαχείρισης των χρηστών.



Διάγραμμα 32: Συνολικός χρόνος όλων των σεναρίων

Το Διάγραμμα 32 ακολουθεί το Διάγραμμα 30.



*Διάγραμμα 33: Μέση Απόσταση που διανύθηκε για όλα τα σενάρια*

Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 33 οι μικρότερες αποστάσεις πραγματοποιήθηκαν στα ΣΑ2 ΣΕ2 στα οποία δεν υπάρχει καπνός. Αυτό οφείλεται στην ορατότητα που δεν ήταν περιορισμένη. Στο ΣΑ1 που υπάρχει καπνός και ο χρήστης είναι πιο κοντά στο ατύχημα, η μεγάλη τιμή της απόστασης πιθανώς να οφείλεται στο ότι οι χρήστες κατευθύνθηκαν προς το ατύχημα ή μπερδεύτηκαν.

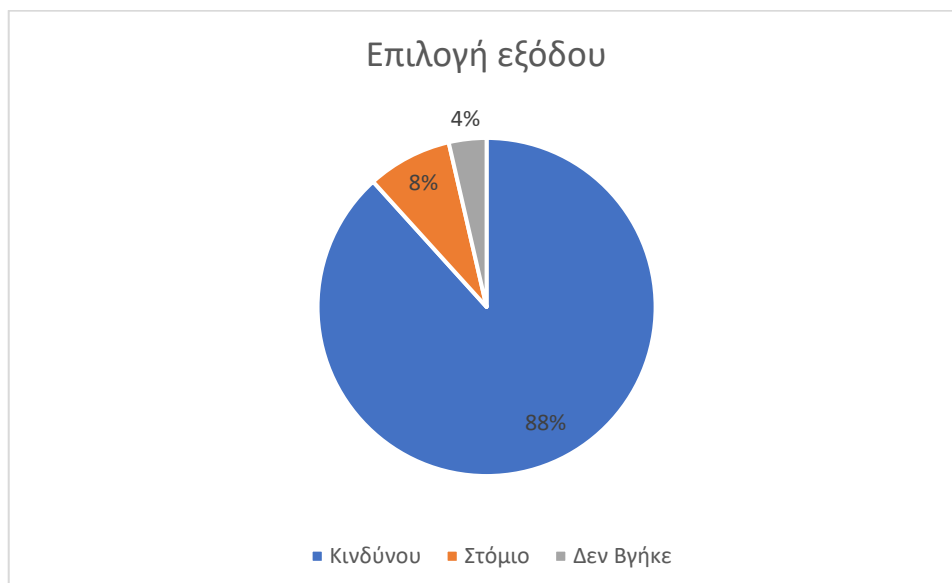
Στην συνέχεια διερευνήθηκε ποια ήταν η αρχική απόφαση κίνησης των χρηστών, δηλαδή αν κινήθηκαν προς το ατύχημα ή όχι. Από την μελέτη προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα. Φαίνεται από αυτό ότι περίπου 1 στους 4 κινήθηκε προς το ατύχημα.





*Διάγραμμα 34: Αρχική Επιλογή Κίνησης Χρηστών*

Στην συνέχεια βλέπουμε τα συνολικά διαγράμματα για όλα τα σενάρια επιλογής εξόδου και τρόπου επιλογής εξόδου. Παρατηρείται στο Διάγραμμα 35 ότι το 88% των χρηστών χρησιμοποίησε την έξοδο κινδύνου, μόλις το 8% βγήκε από το στόμιο και ένα 4% δεν κατάφερε να βγει. Στο Διάγραμμα 36 φαίνεται ότι το 59% έψαξαν σήμανση, το 22% ακολούθησε άλλους, 12% βγήκε από εκεί που μπήκε και το 7% έψαξε στην τύχη.

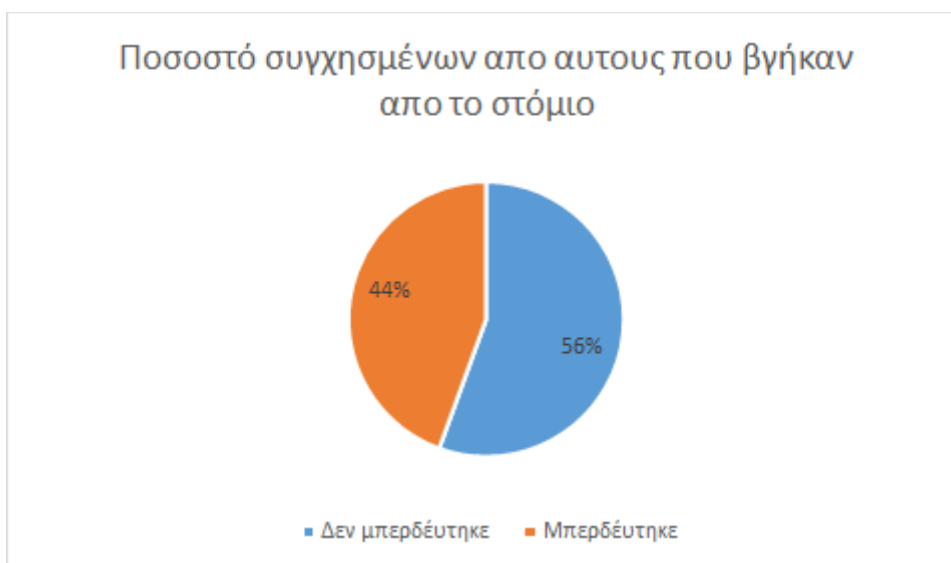


*Διάγραμμα 35: Συγκεντρωτικό διάγραμμα επιλογής εξόδου*



Διάγραμμα 36: Συγκεντρωτικό διάγραμμα τρόπου επιλογής εξόδου

Στην συνέχεια μελετήθηκε η συμπεριφορά των ατόμων που επέλεξαν το στόμιο έτσι ώστε να υπάρξει κατανόηση αν αυτό έγινε θελημένα ή όχι. Το κριτήριο για το αν χάθηκε ο χρήστης είναι η παρατήρηση μας κατά την διάρκεια του πειράματος. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα, το ποσοστό μοιράστηκε σχεδόν στην μέση.



Διάγραμμα 37: Ποσοστό Συγχυσμένων από αυτούς που βγήκαν από το στόμιο

## Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα Προσομοίωσης Pathfinder

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των σεναρίων που εκτελέστηκαν στο Pathfinder. Κατά την ανάλυση επιλέχθηκαν κάποιες μεταβλητές οι οποίες και παρατηρήθηκαν, αυτές είναι :

- Θερμοκρασία
- Πρόσληψη μονοξειδίου του άνθρακα
- FED.

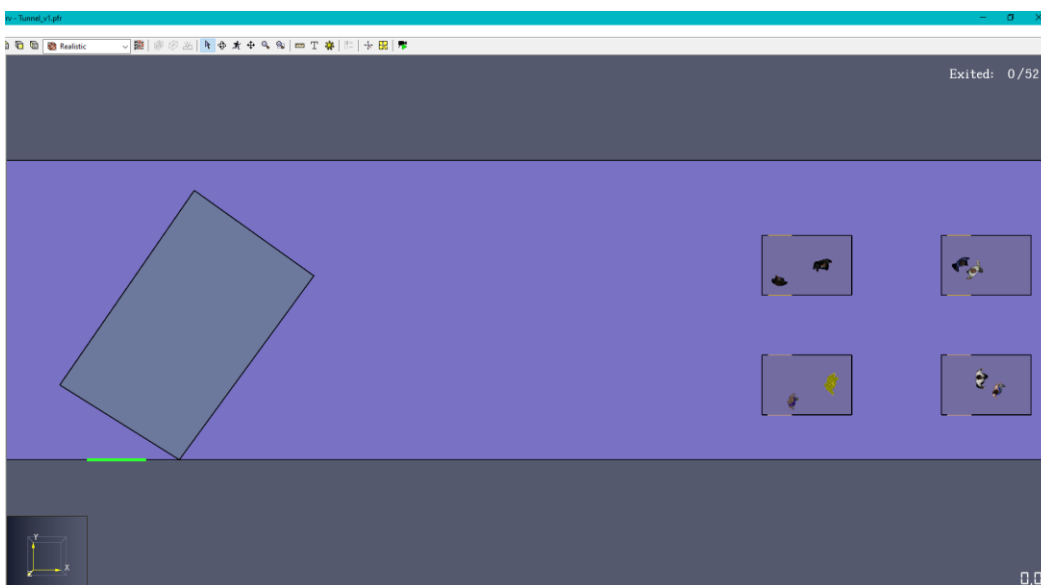
Το FED είναι ένα μέτρο των ατμοσφαιρικών ρύπων που προσλαμβάνονται από έναν ένοικο. Αέρια όπως μονοξείδιο του άνθρακα και διοξείδιο του άνθρακα συσσωρεύονται κατά τη μετακίνηση του ενοίκου μέσα από ένα φλεγόμενο κτίριο. Το Pathfinder καταγράφει ποσότητες από τα αποτελέσματα του FDS, όπως όγκος είδους αερίου, ορατότητα και θερμοκρασία. [39]

### Σενάριο 1- ΣΠ1

Με βάση τα αποτελέσματα επιλέχθηκαν 3 ένοικοι, στους οποίους οι παραπάνω μεταβλητές έχουν μέγιστες τιμές, και ένας ένοικος ο οποίος βρίσκεται κοντά στο ατύχημα. Μελετήθηκαν όλες οι μεταβλητές για κάθε ένοικο.

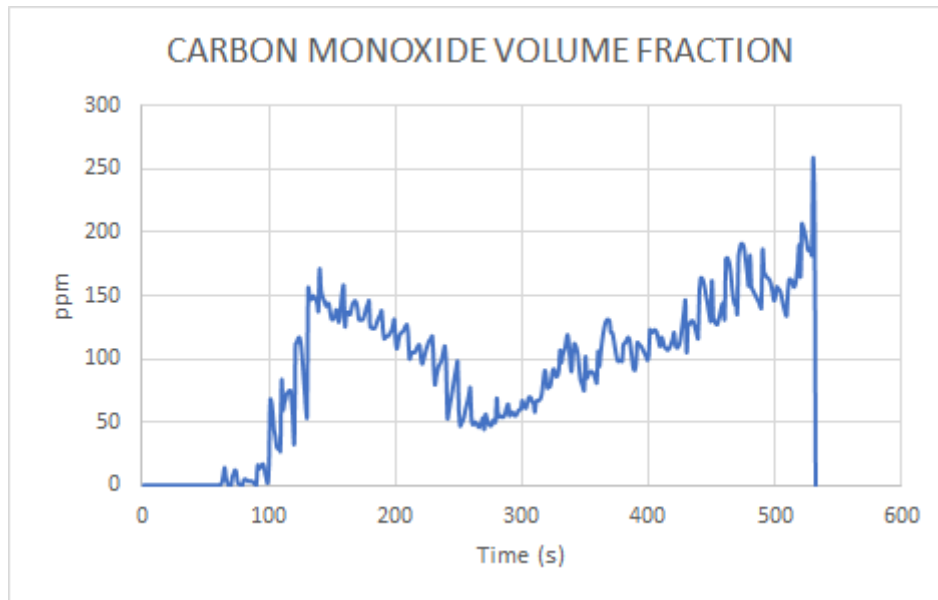
#### Ένοικος κοντά στο ατύχημα (ID 0)

Στην Εικόνα 46 φαίνεται η θέση του ενοίκου με κίτρινο χρώμα.

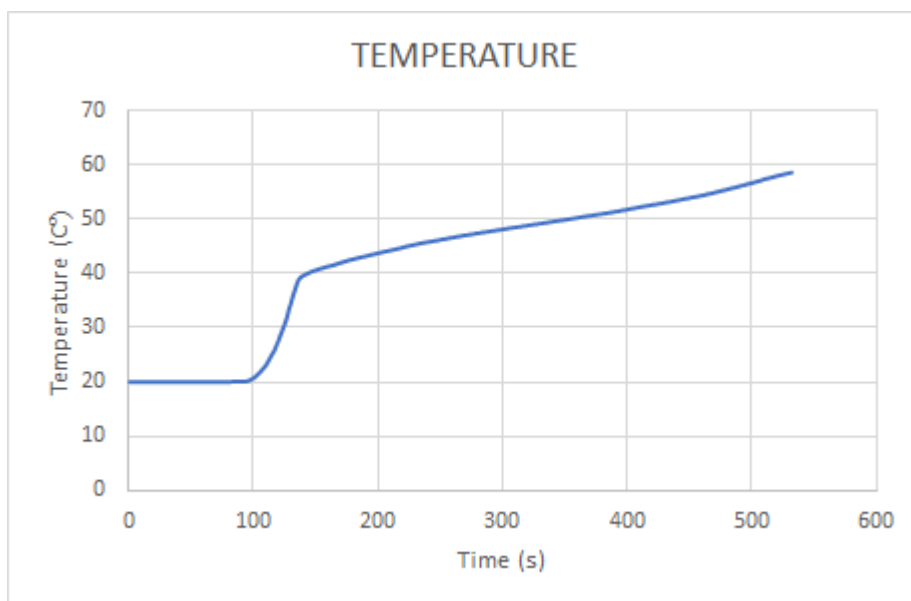


Εικόνα 46: Ένοικος κοντά στο ατύχημα

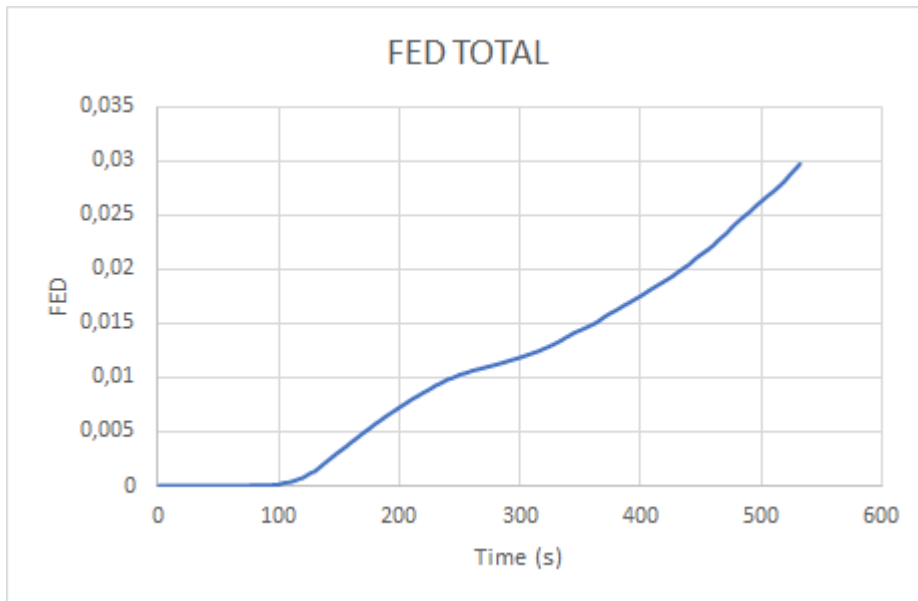
Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα που προέκυψαν για τις μεταβλητές οι οποίες μελετήθηκαν.



Διάγραμμα 38: Όγκος μονοξειδίου του άνθρακα για τον ένοικο κοντά στο ατύχημα



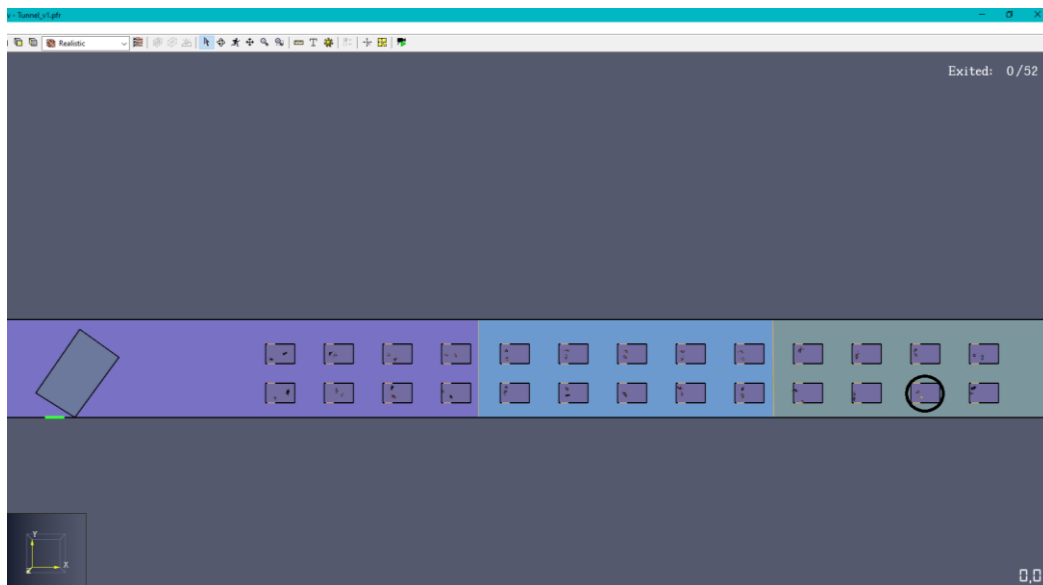
Διάγραμμα 39: Θερμοκρασία για τον ένοικο κοντά στο ατύχημα



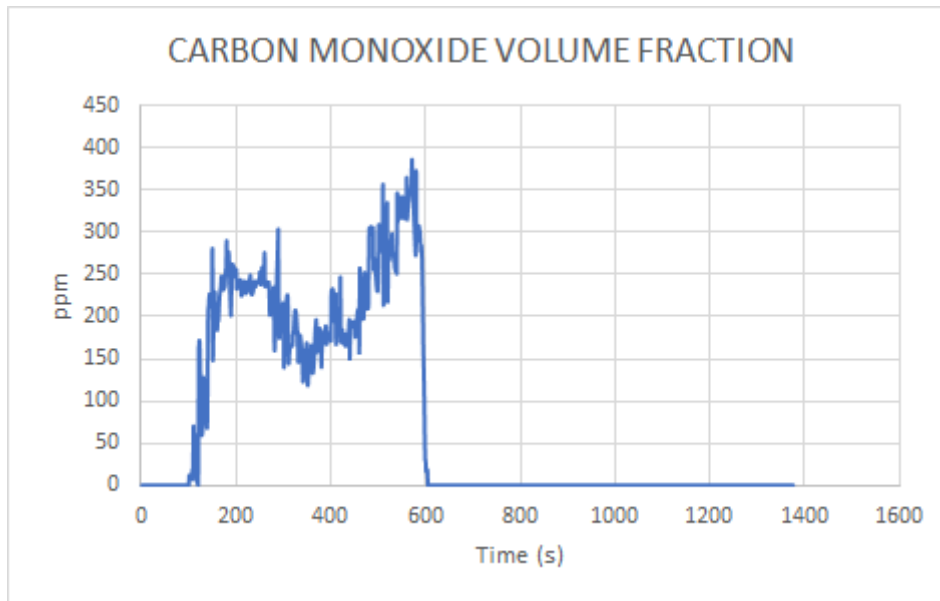
Διάγραμμα 40: FED για τον ένοικο κοντά στο ατύχημα

Ένοικος με μέγιστο FED (ID 44)

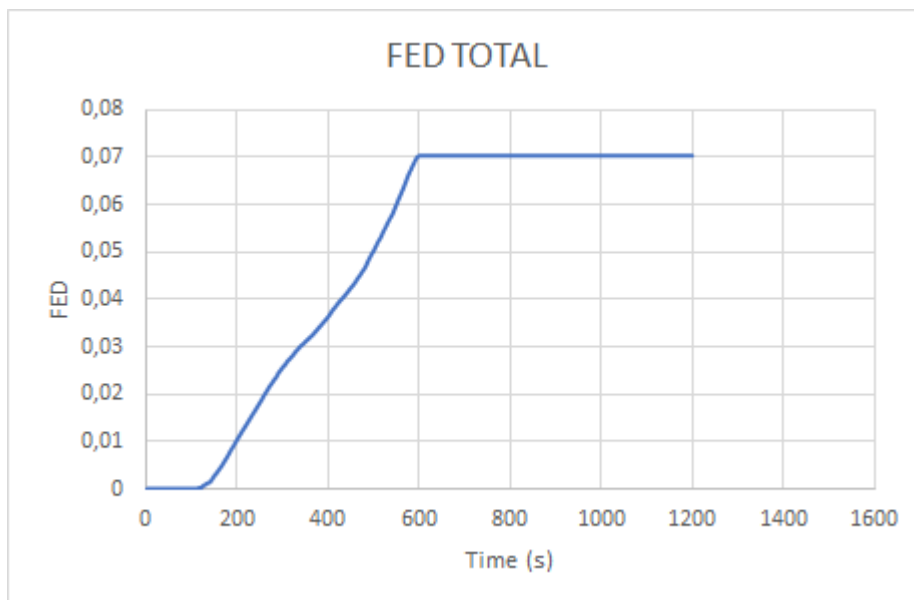
Στην Εικόνα 47 φαίνεται με τον μαύρο κύκλο η θέση του ενοίκου.



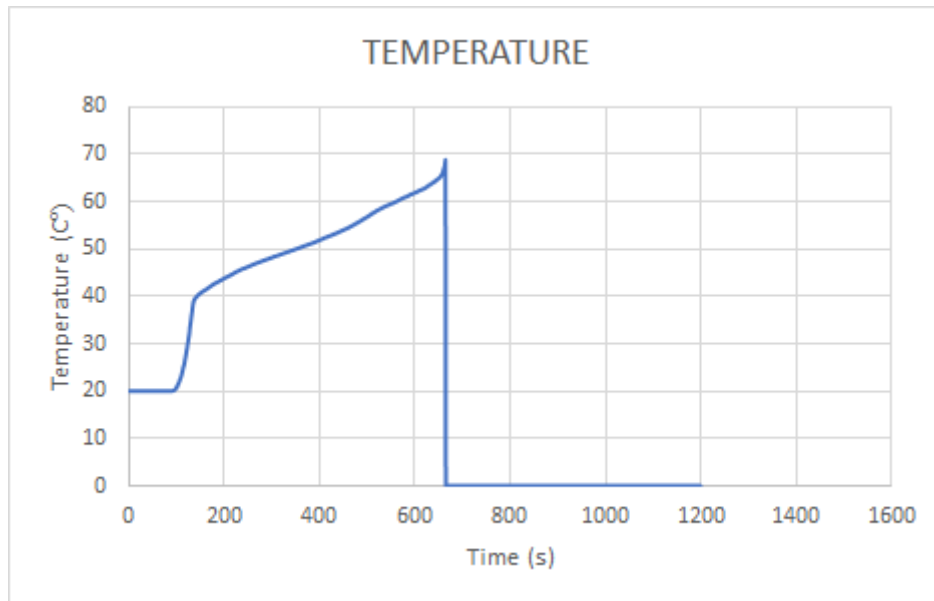
Εικόνα 47:Θέση ενοίκου με μέγιστο FED



Διάγραμμα 41: Όγκος μονοξειδίου του άνθρακα για τον ένοικο κοντά με μέγιστο FED



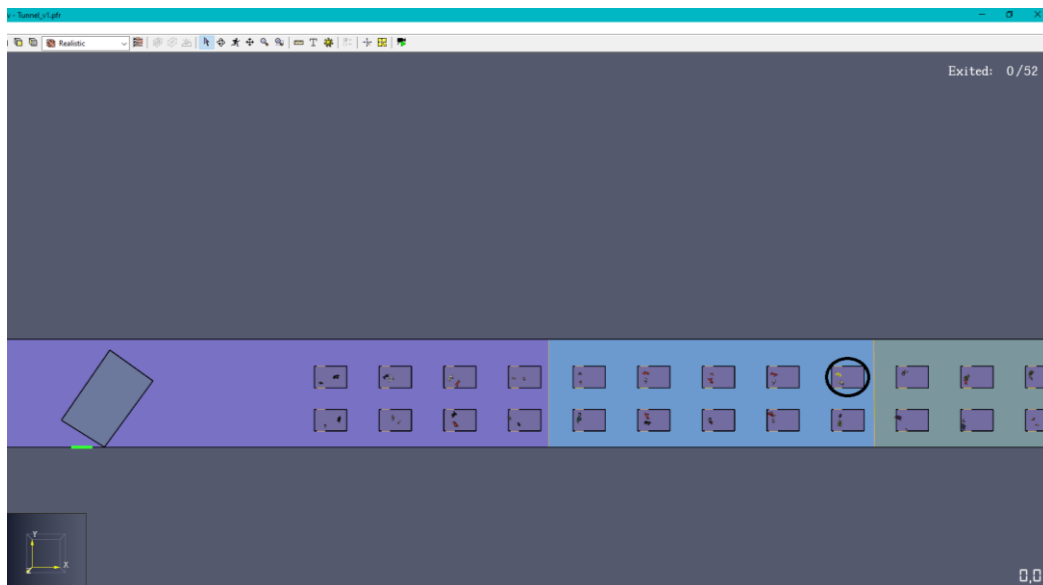
Διάγραμμα 42: FED για τον ένοικο με μέγιστο FED



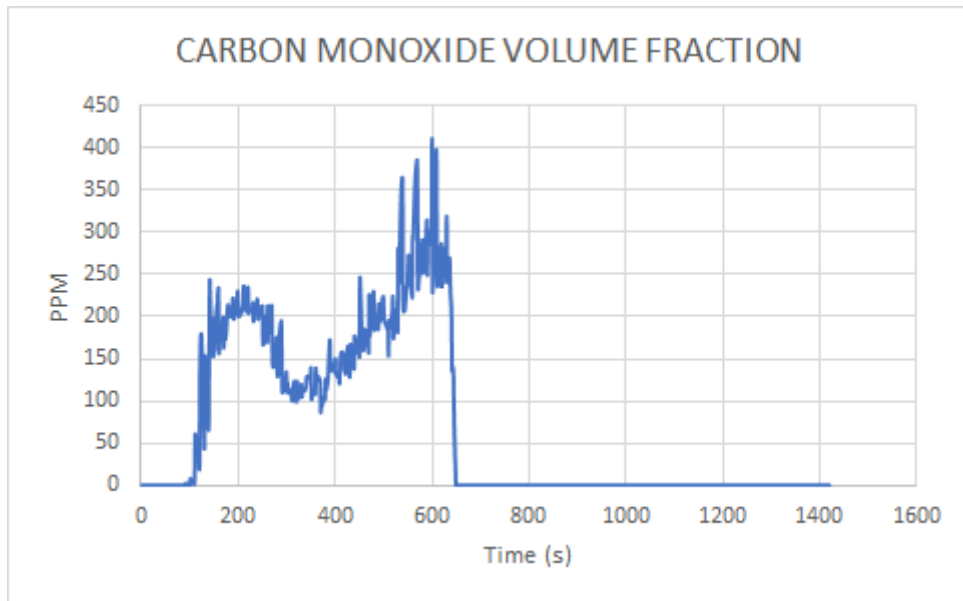
Διάγραμμα 43: θερμοκρασία για τον ένοικο με μέγιστο FED

Ένοικος με μέγιστη θερμοκρασία (ID 34)

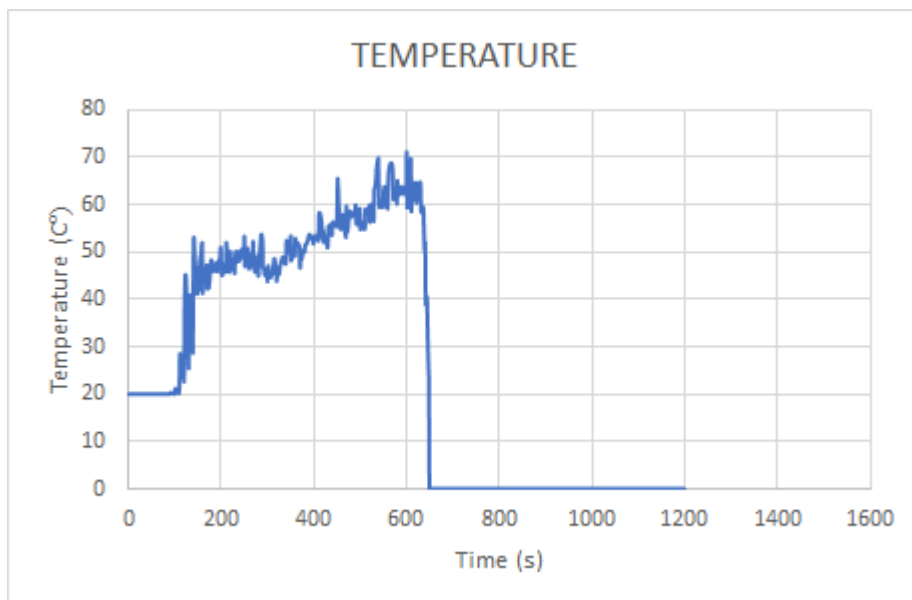
Στην Εικόνα 48 φαίνεται η θέση του ενοίκου με την μέγιστη θερμοκρασία.



Εικόνα 48: Θέση ενοίκου με μέγιστη θερμοκρασία

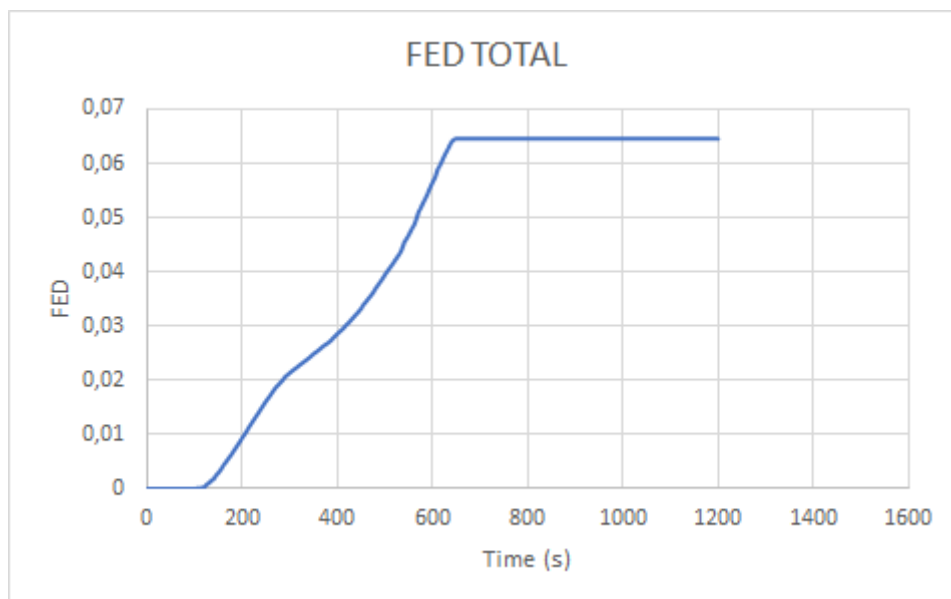


Διάγραμμα 44: Όγκος μονοξειδίου του άνθρακα για τον ένοικο με μέγιστη θερμοκρασία



Διάγραμμα 45: Θερμοκρασία ενοίκου με την μέγιστη θερμοκρασία

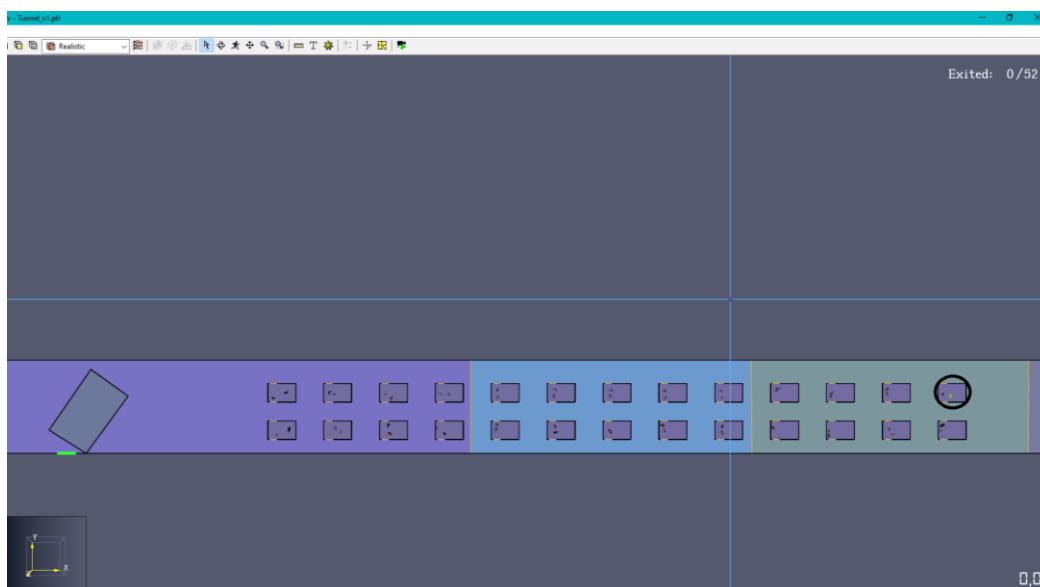




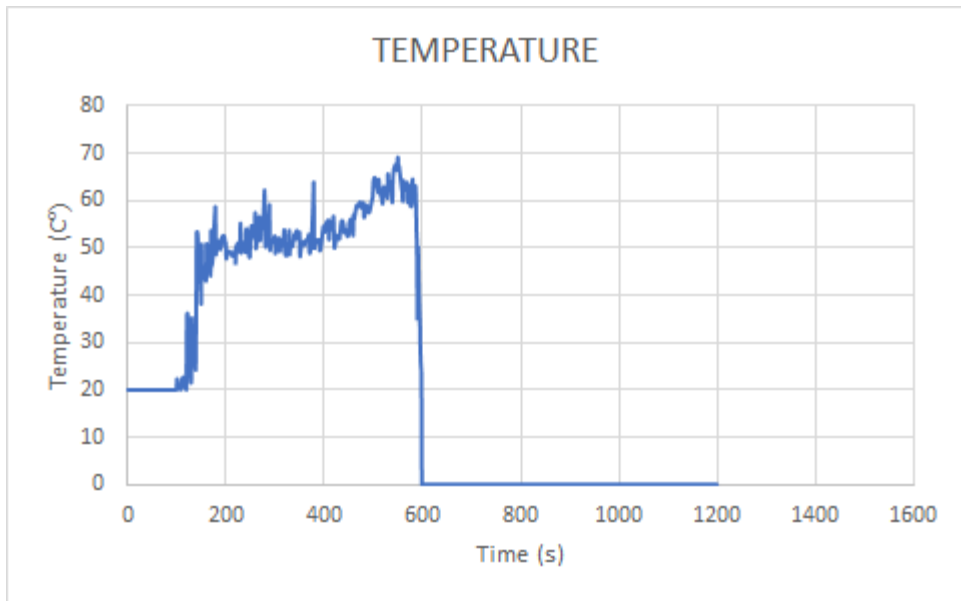
Διάγραμμα 46: FED ενοίκου με την μέγιστη θερμοκρασία

Ένοικος με την μέγιστη πρόσληψη μονοξειδίου του άνθρακα (ID 49)

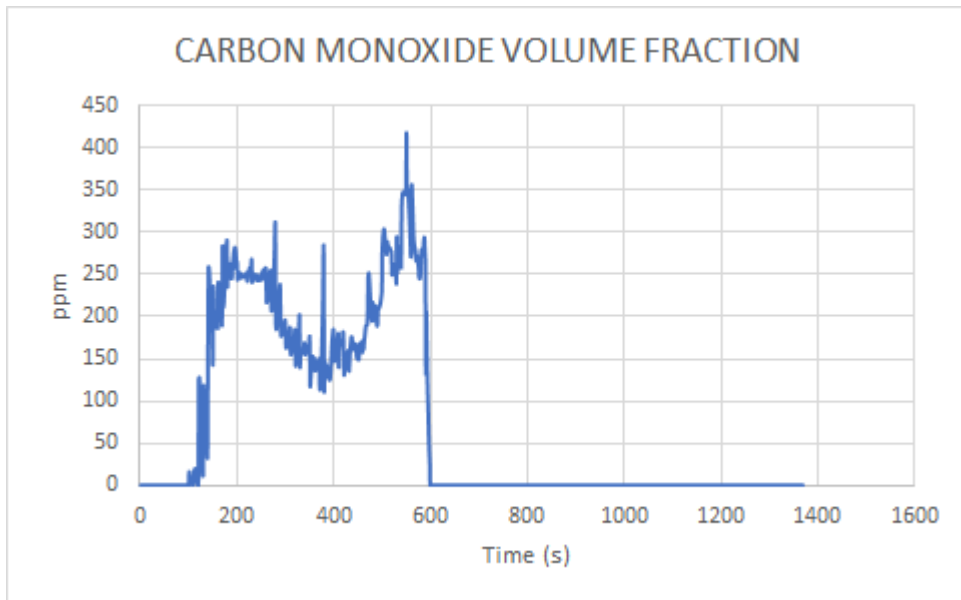
Στην Εικόνα 49 φαίνεται η θέση του ενοίκου με μαύρο κύκλο.



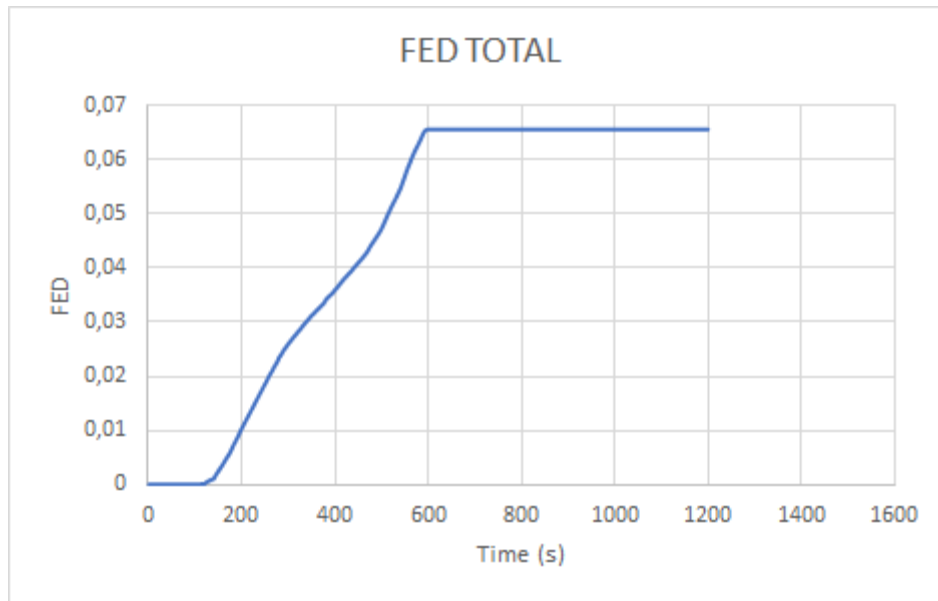
Εικόνα 49: Θέση του ενοίκου με την μέγιστη πρόσληψη μονοξειδίου του άνθρακα



Διάγραμμα 47: Θερμοκρασία ενοίκου με την μέγιστη πρόσληψη μονοξειδίου του άνθρακα

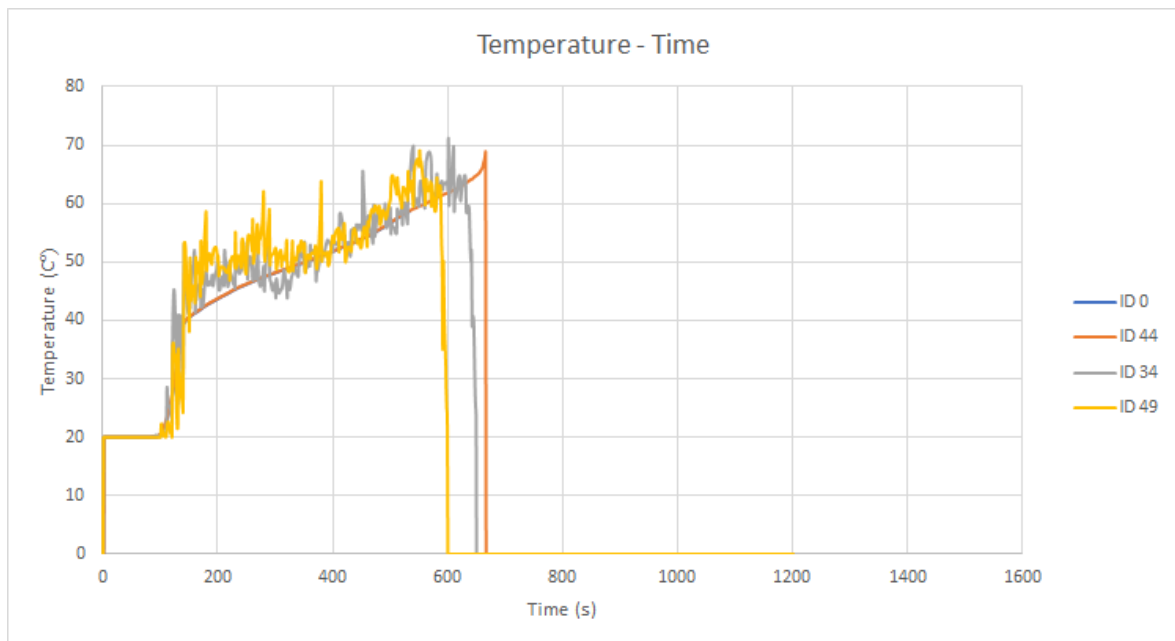


Διάγραμμα 48: Όγκος μονοξειδίου του άνθρακα για τον ένοικο με την μέγιστη πρόσληψη μονοξειδίου του άνθρακα

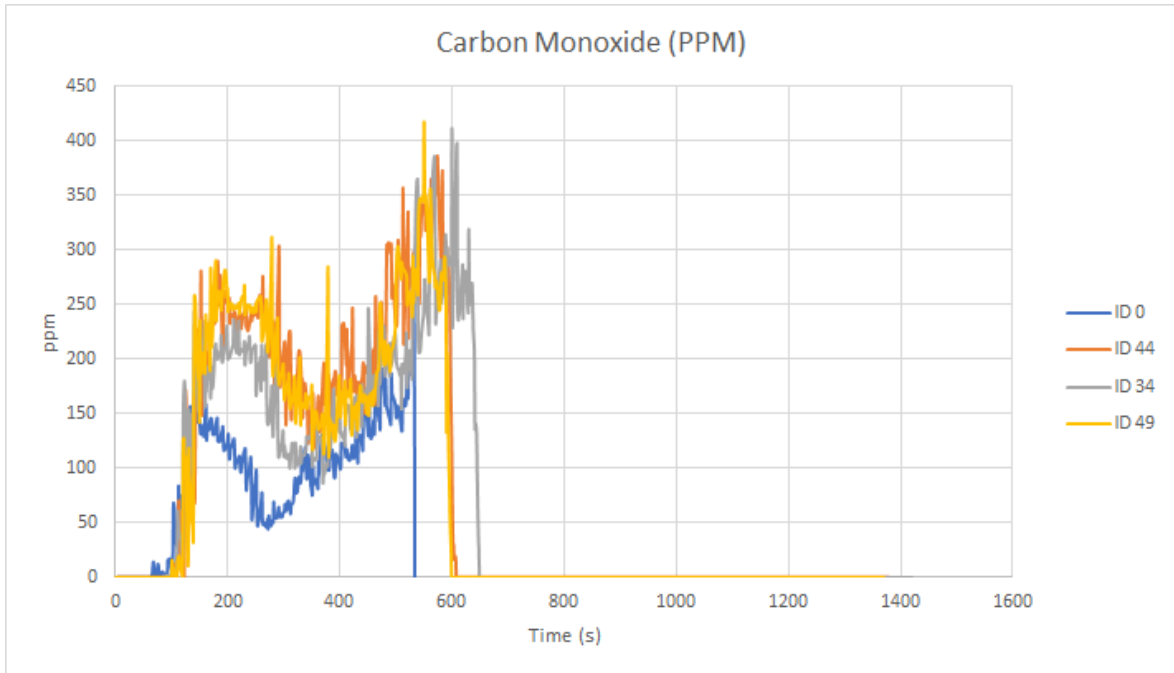


Διάγραμμα 49: FED ενοίκου με την μέγιστη πρόσληψη μονοξειδίου του άνθρακα

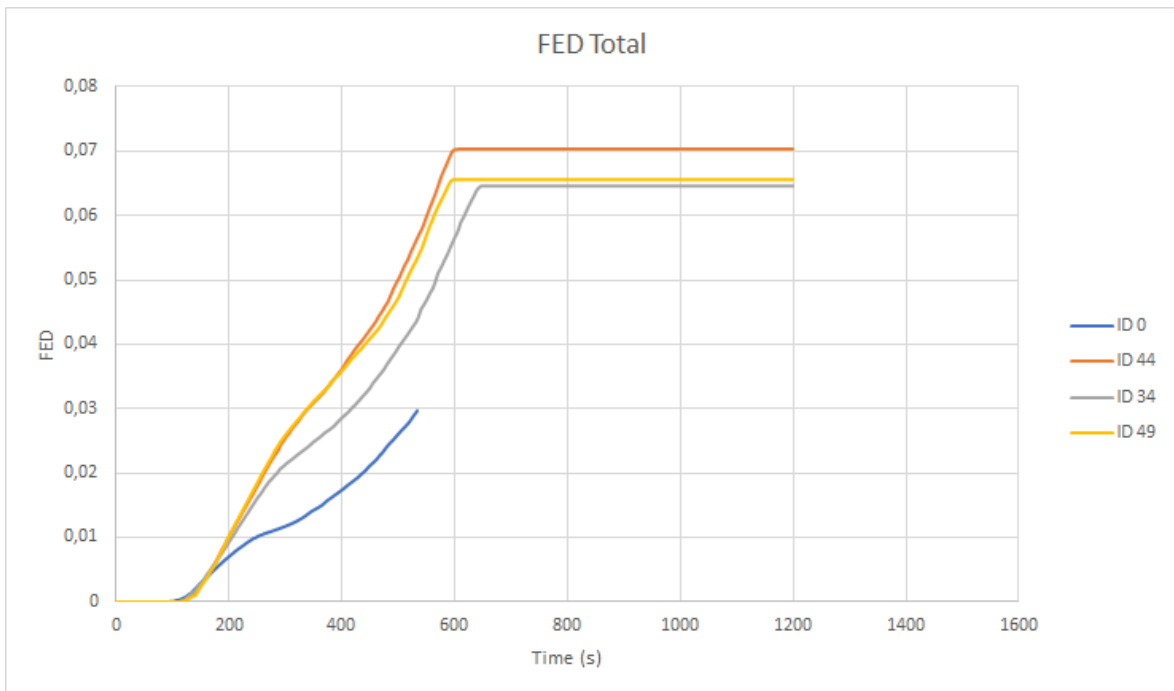
Στην συνέχεια παρουσιάζονται συγκεντρωτικά διαγράμματα για τις μεταβλητές και τους ενοίκους.



Διάγραμμα 50: Θερμοκρασία - Χρόνος



Διάγραμμα 51: Μονοξείδιο του άνθρακα - Χρόνος



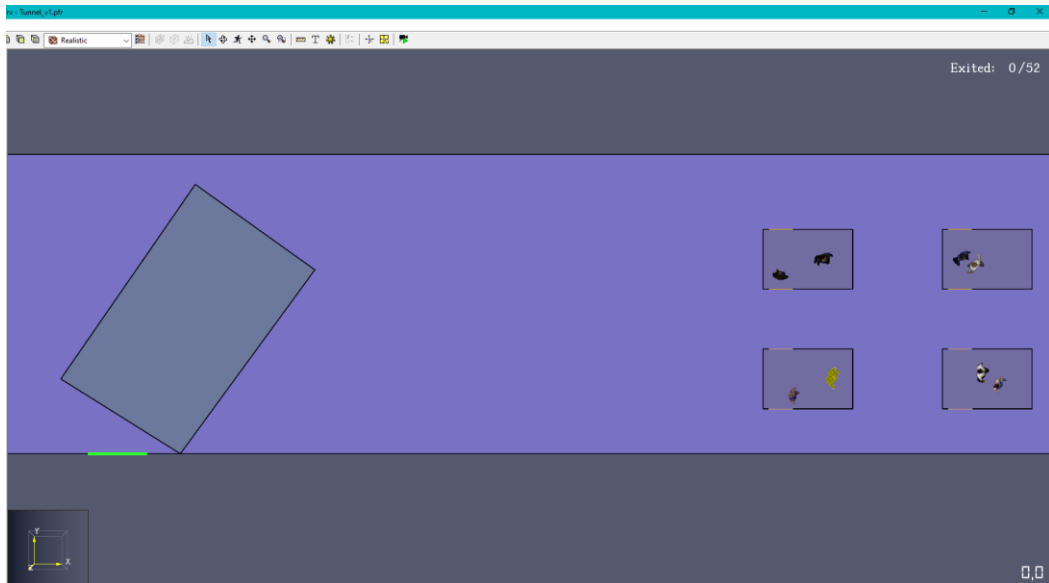
Διάγραμμα 52: FED – Χρόνος

## Σενάριο 2-ΣΠ2

Με βάση τα αποτελέσματα επιλέχθηκαν 2 ένοικοι, στους οποίους οι παραπάνω μεταβλητές έχουν μέγιστες τιμές, και ένας ένοικος ο οποίος βρίσκεται κοντά στο ατύχημα. Μελετήθηκαν όλες οι μεταβλητές για κάθε ένοικο.

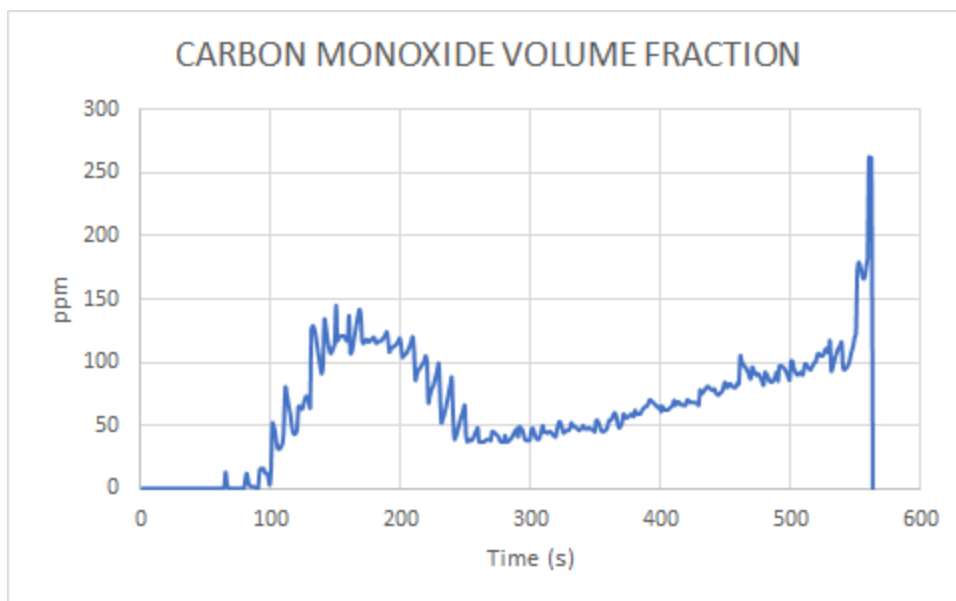
## Ένοικος κοντά στο ατύχημα (ID 0)

Στην Εικόνα 46 φαίνεται η θέση του ενοίκου με κίτρινο χρώμα.

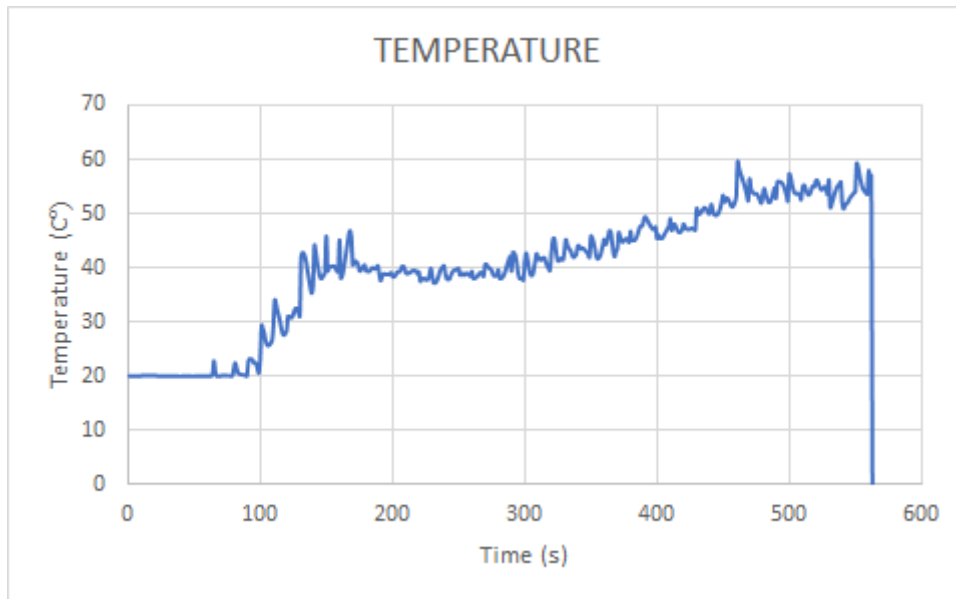


Εικόνα 50: Ένοικος κοντά στο ατύχημα

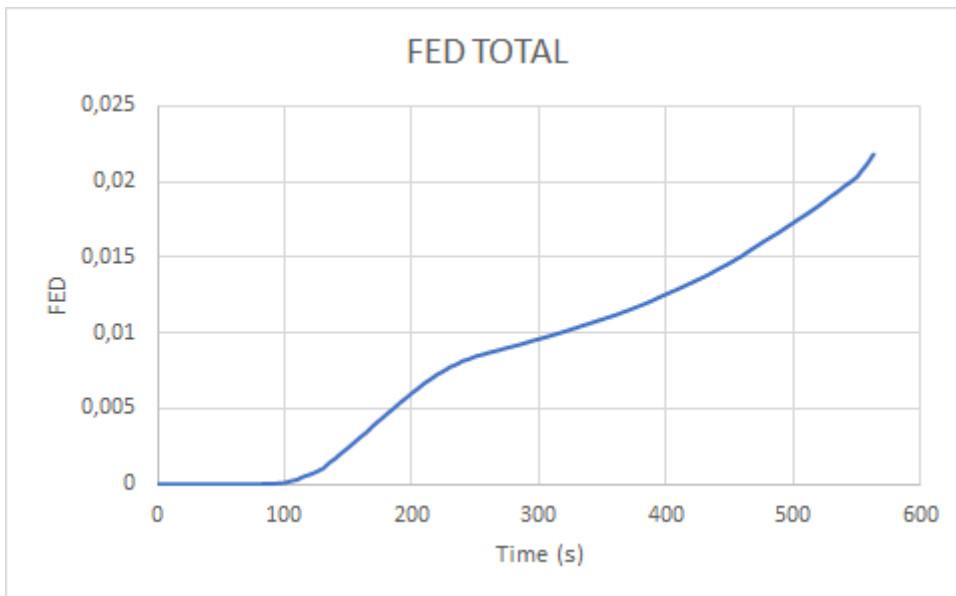
Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα που προέκυψαν για τις μεταβλητές οι οποίες μελετήθηκαν.



Διάγραμμα 53: Όγκος μονοξειδίου του άνθρακα για τον ένοικο κοντά στο ατύχημα



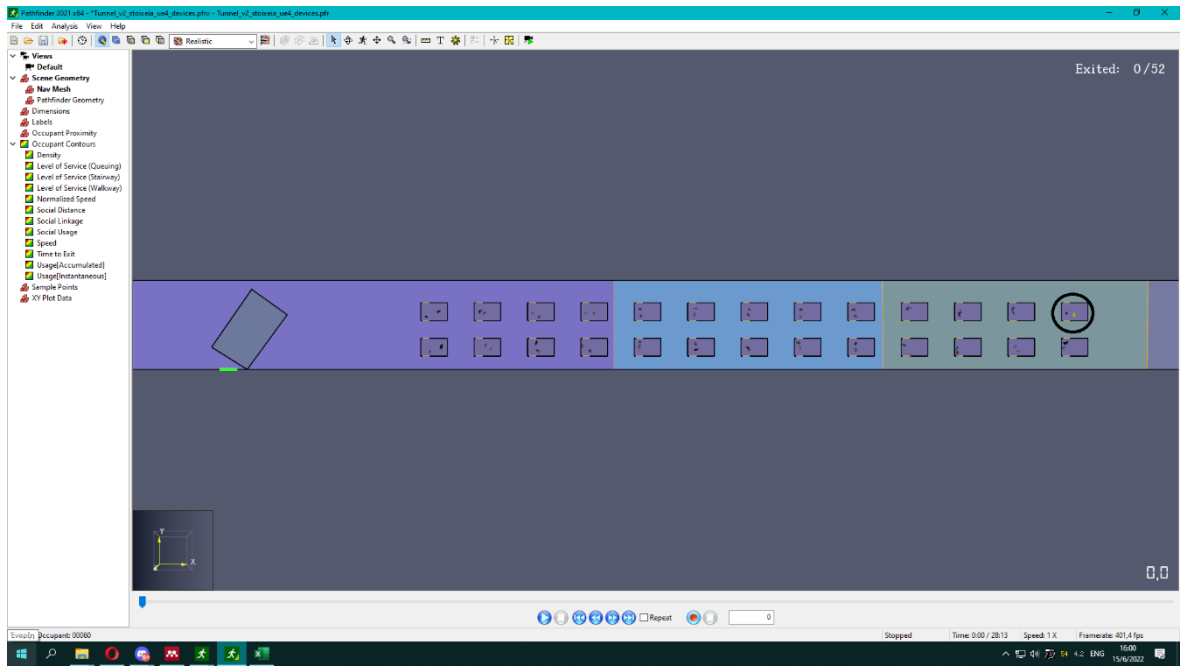
Διάγραμμα 54: Θερμοκρασία για τον ένοικο κοντά στο ατύχημα



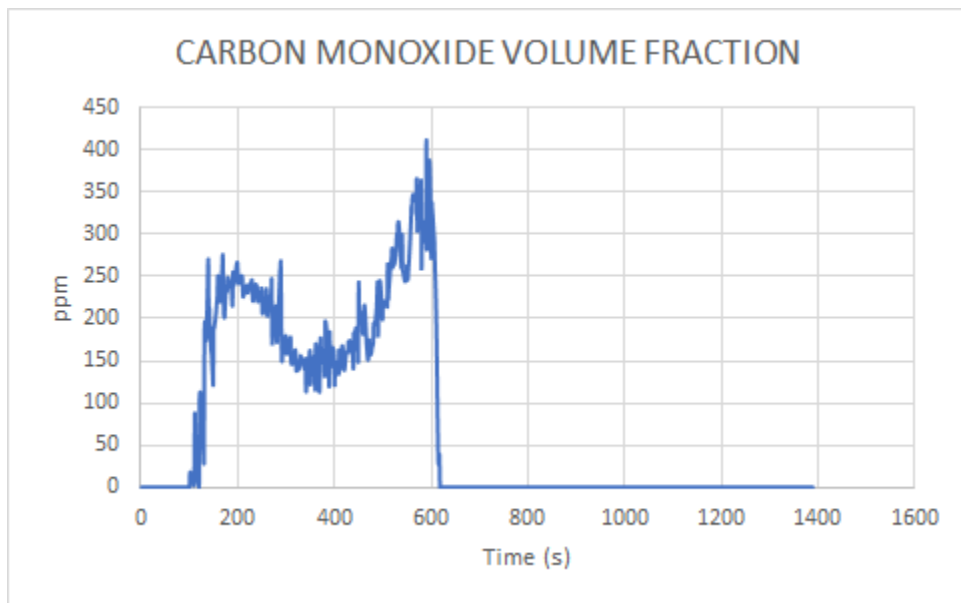
Διάγραμμα 55: FED για τον ένοικο κοντά στο ατύχημα

Ένοικος με μέγιστο FED και μέγιστη πρόσληψη μονοξειδίου του άνθρακα (ID 49)

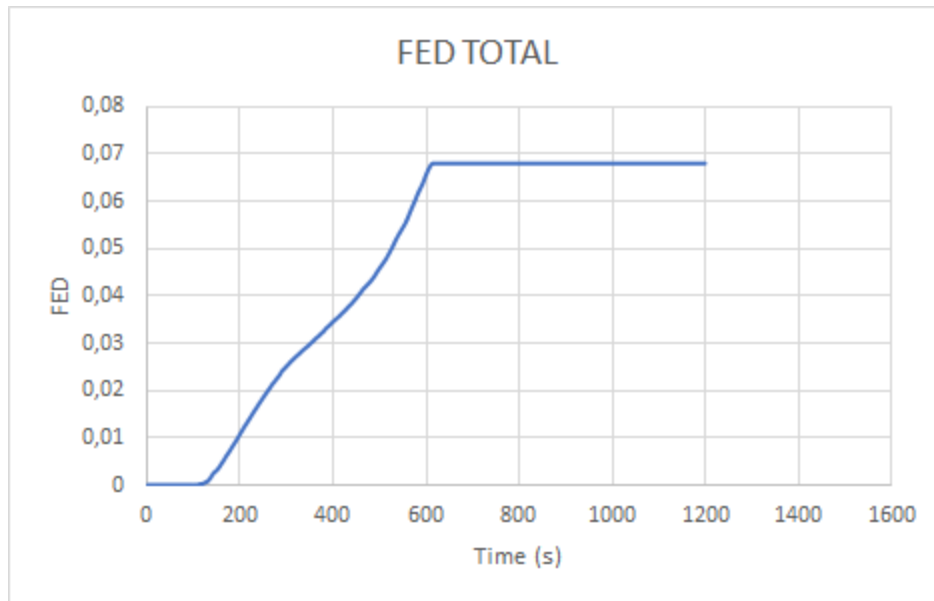
Στην Εικόνα 51 φαίνεται με τον μαύρο κύκλο η θέση του ενοίκου.



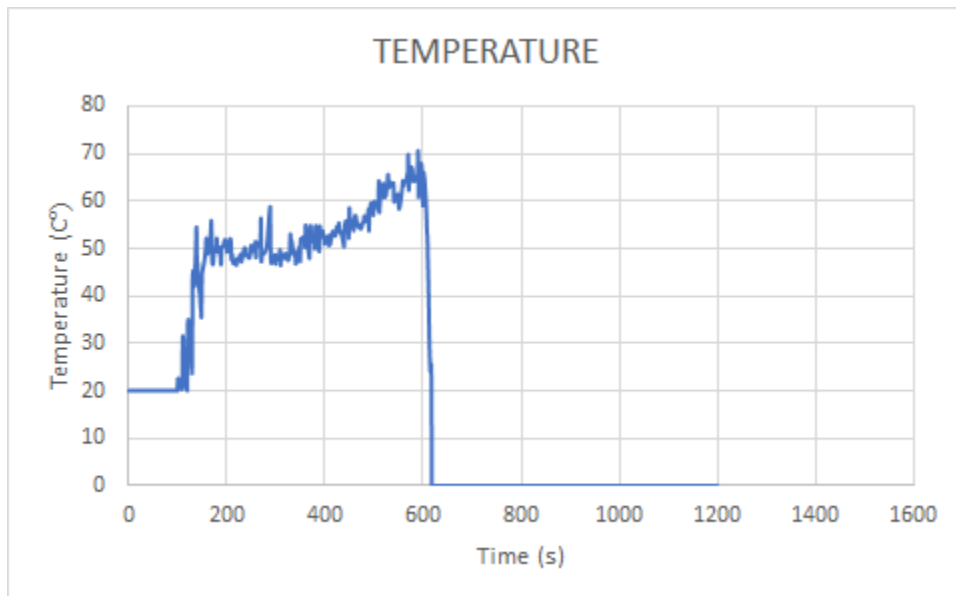
Εικόνα 51: Θέση ενοίκου με μέγιστο FED



Διάγραμμα 56: Όγκος μονοξειδίου του άνθρακα για τον ένοικο κοντά με μέγιστο FED και μέγιστη πρόσληψη μονοξειδίου του άνθρακα



Διάγραμμα 57: FED για τον ένοικο με μέγιστο FED και μέγιστη πρόσληψη μονοξειδίου του άνθρακα

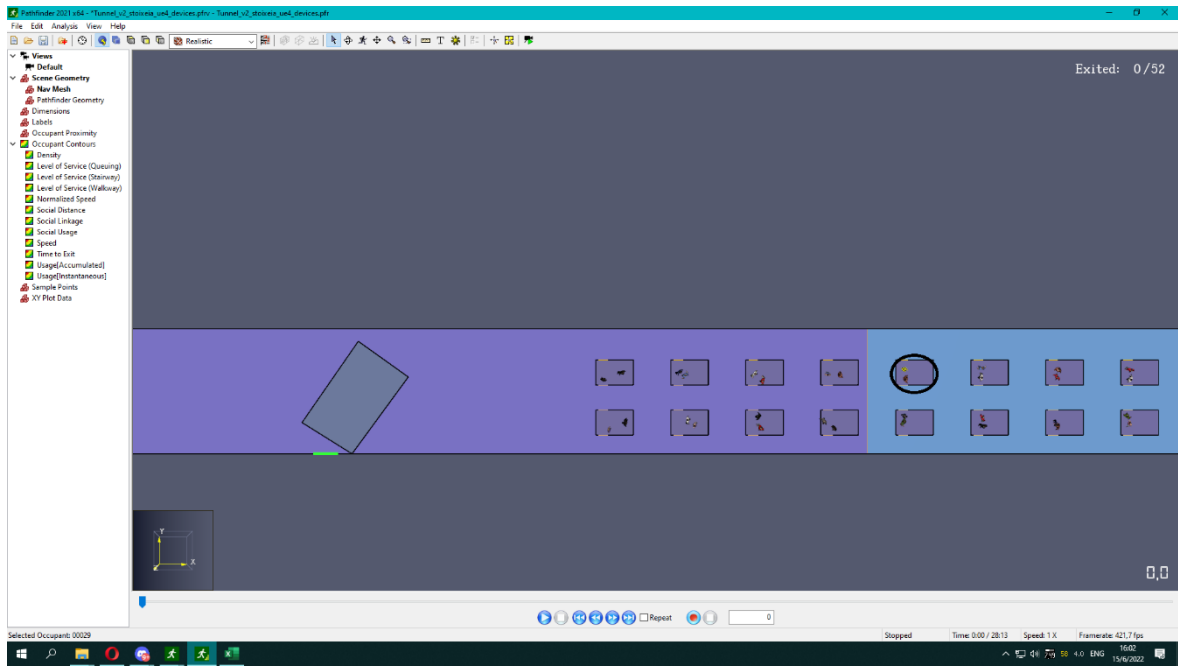


Διάγραμμα 58: θερμοκρασία για τον ένοικο με μέγιστο FED και μέγιστη πρόσληψη μονοξειδίου του άνθρακα

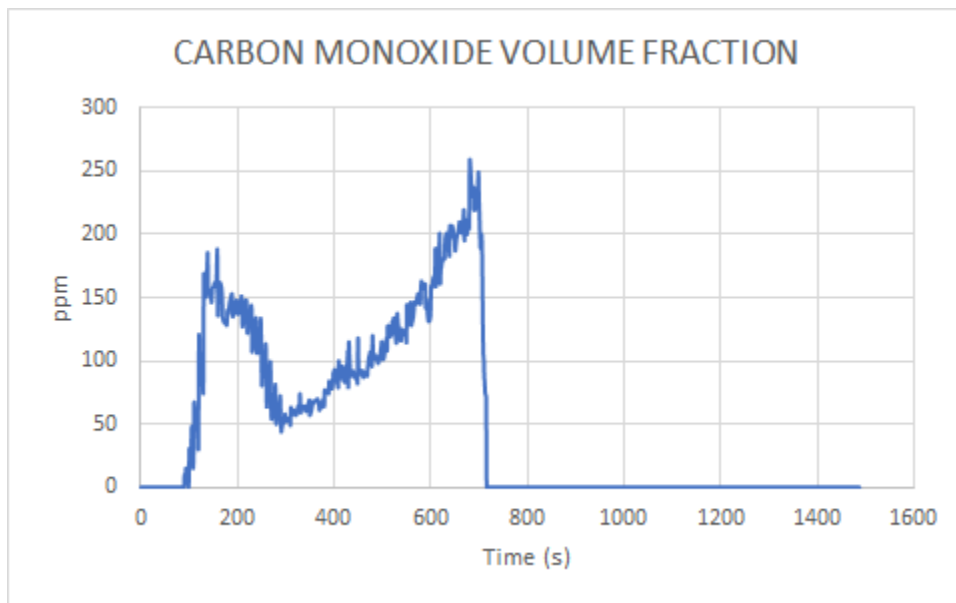
Ένοικος με μέγιστη θερμοκρασία (ID 19)

Στην Εικόνα 52 φαίνεται η θέση του ενοίκου με την μέγιστη θερμοκρασία.

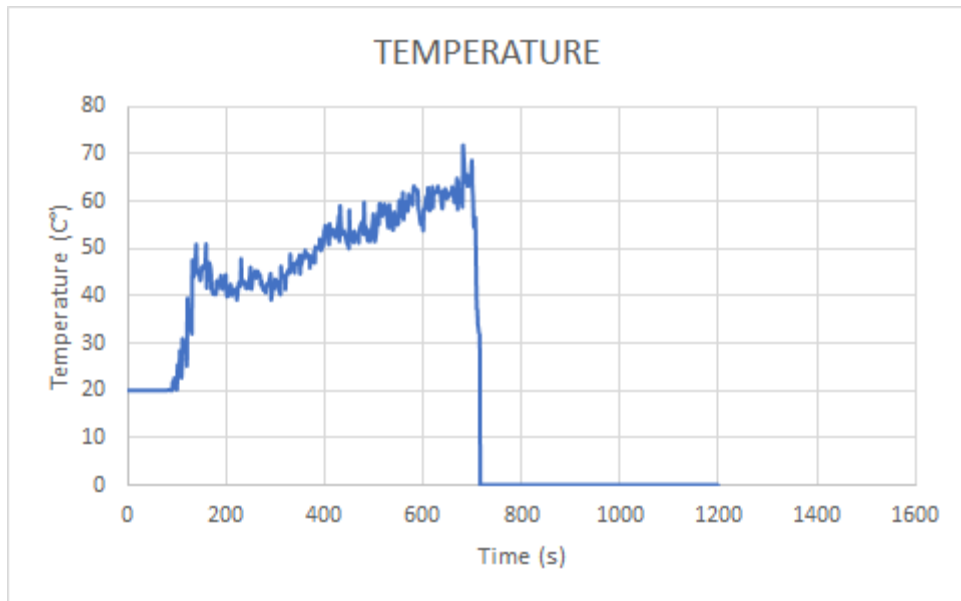




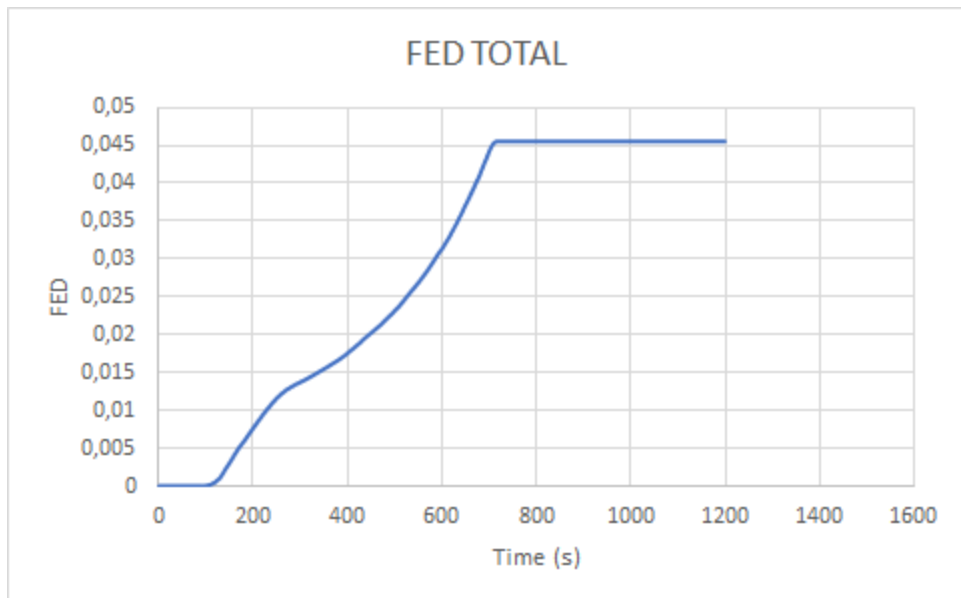
Εικόνα 52: Θέση ενοίκου με μέγιστη θερμοκρασία



Διάγραμμα 59: Όγκος μονοξειδίου του άνθρακα για τον ένοικο με μέγιστη θερμοκρασία

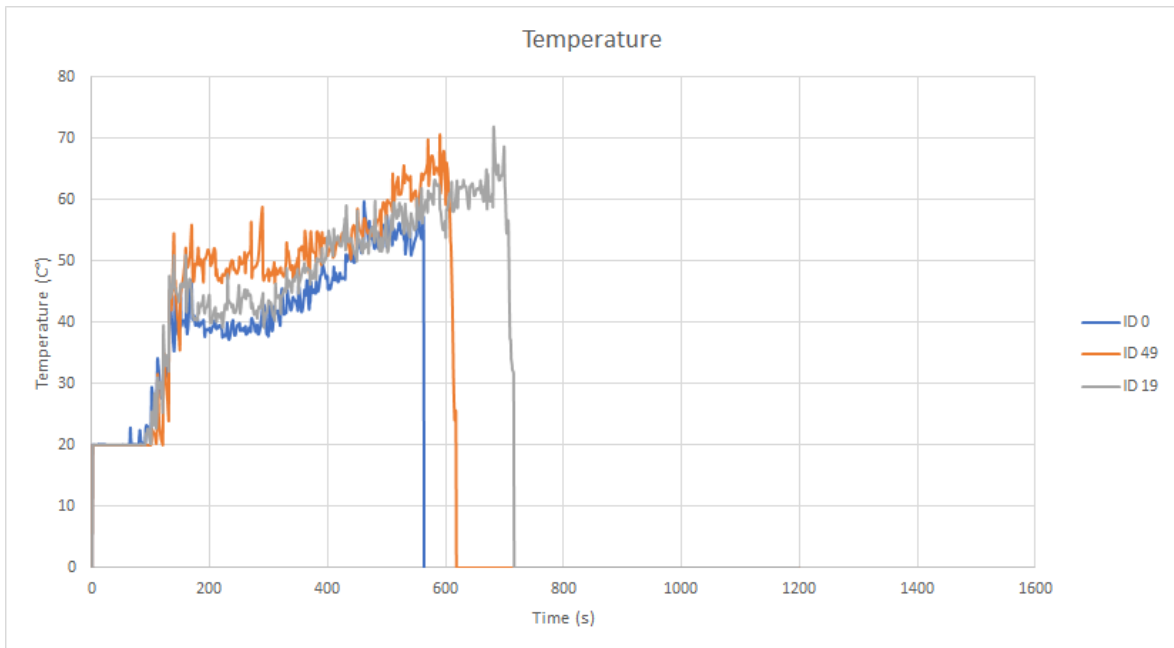


Διάγραμμα 60: Θερμοκρασία ενοίκου με την μέγιστη θερμοκρασία

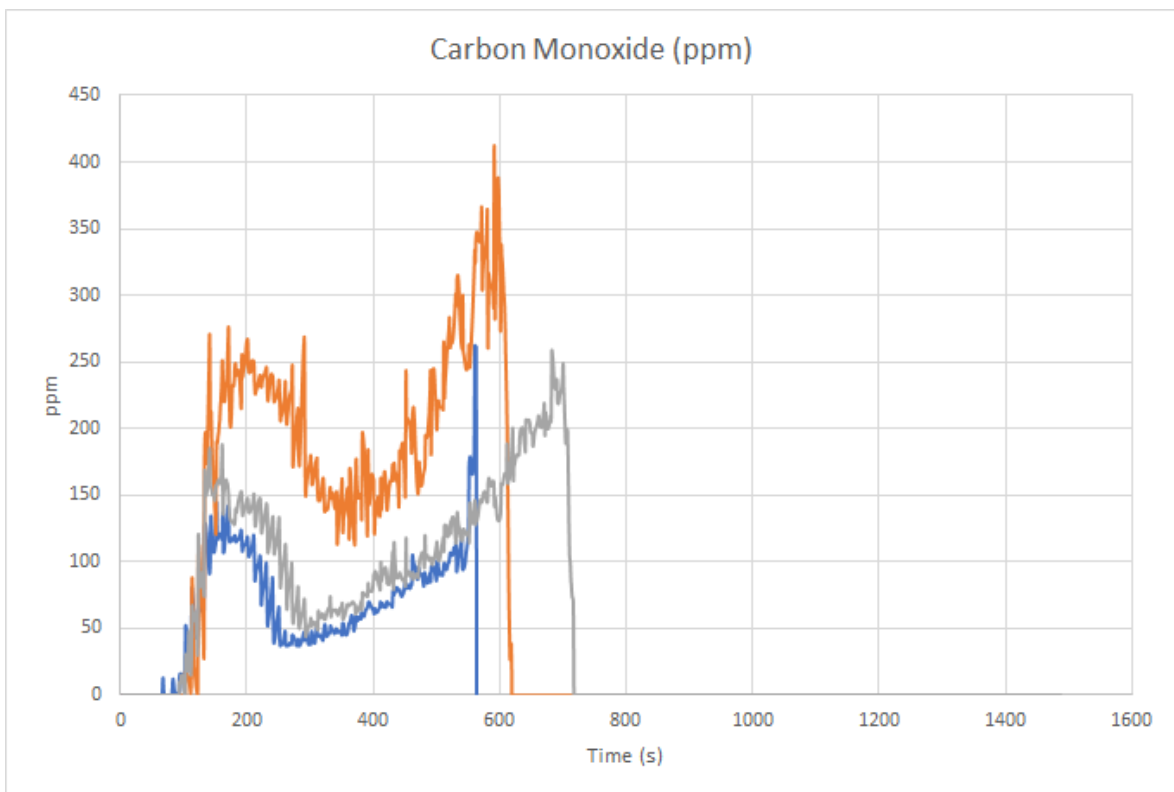


Διάγραμμα 61: FED ενοίκου με την μέγιστη θερμοκρασία

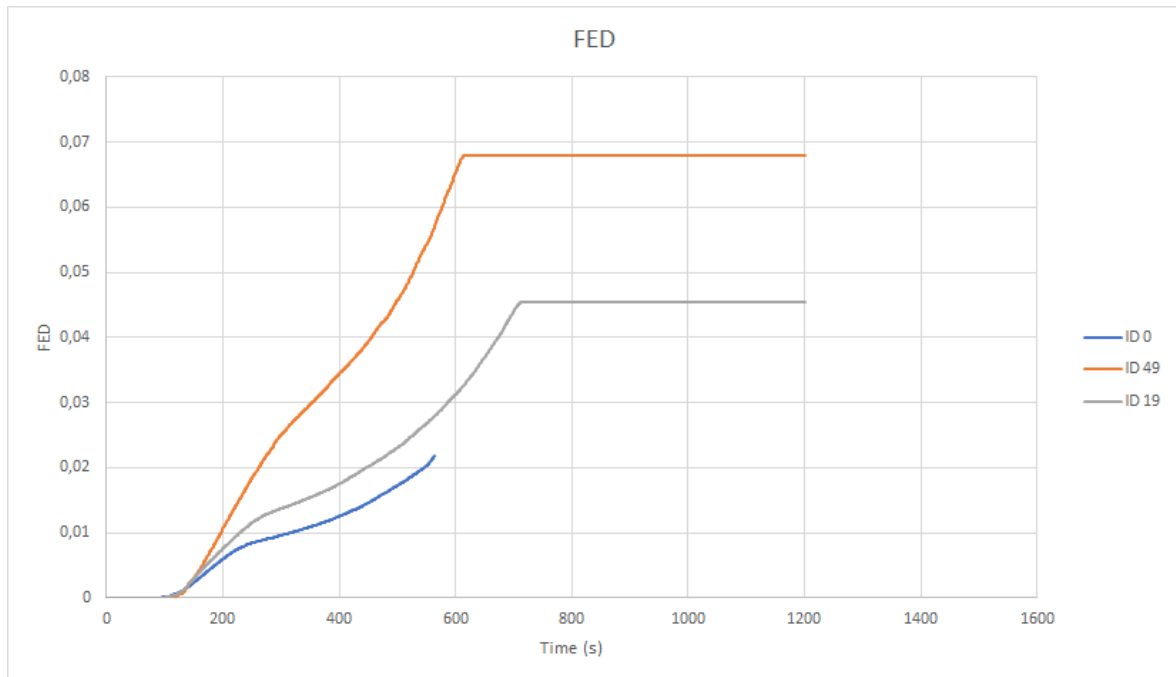
Στην συνέχεια παρουσιάζονται συγκεντρωτικά διαγράμματα για τις μεταβλητές και τους ενοίκους.



Διάγραμμα 62: Θερμοκρασία - Χρόνος



Διάγραμμα 63: Μονοξείδιο του άνθρακα - Χρόνος



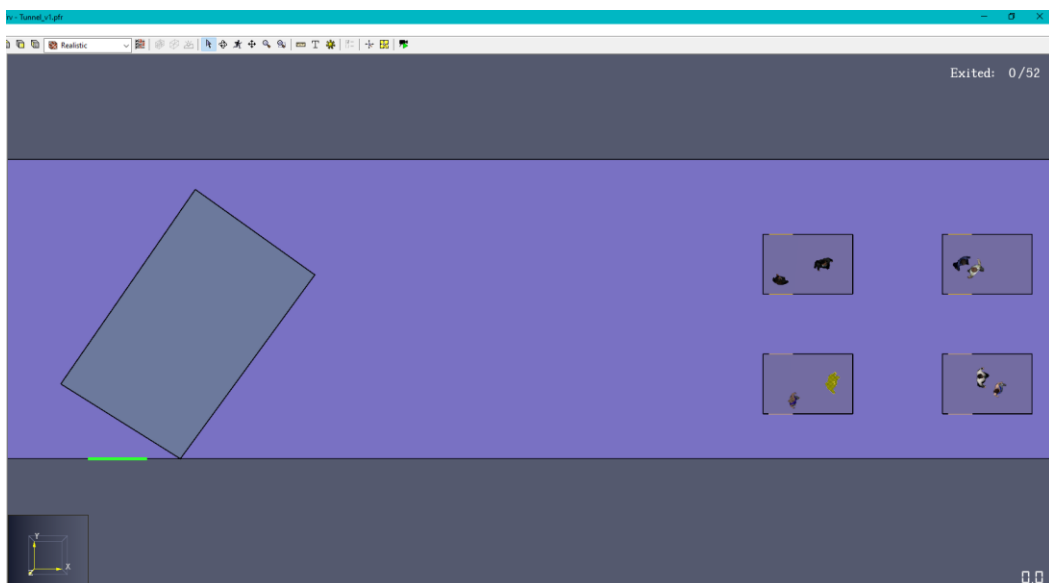
Διάγραμμα 64: FED – Χρόνος

### Σενάριο 3-ΣΠ3

Με βάση τα αποτελέσματα επιλέχθηκαν 2 ένοικοι, στους οποίους οι παραπάνω μεταβλητές έχουν μέγιστες τιμές, και ένας ένοικος ο οποίος βρίσκεται κοντά στο ατύχημα. Μελετήθηκαν όλες οι μεταβλητές για κάθε ένοικο.

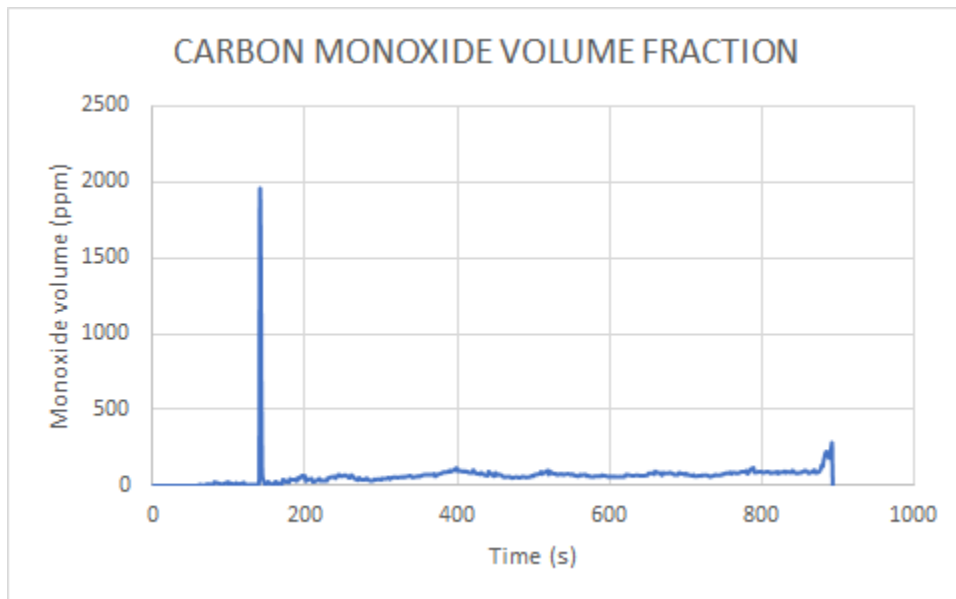
#### Ένοικος κοντά στο ατύχημα (ID 0)

Στην Εικόνα 53 φαίνεται η θέση του ενοίκου με κίτρινο χρώμα.

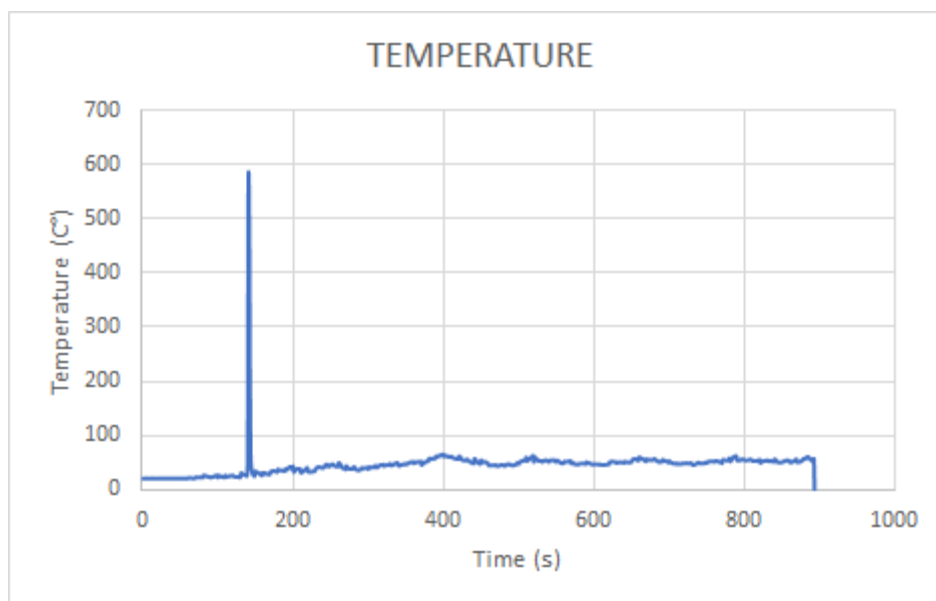


Εικόνα 53: Ένοικος κοντά στο ατύχημα

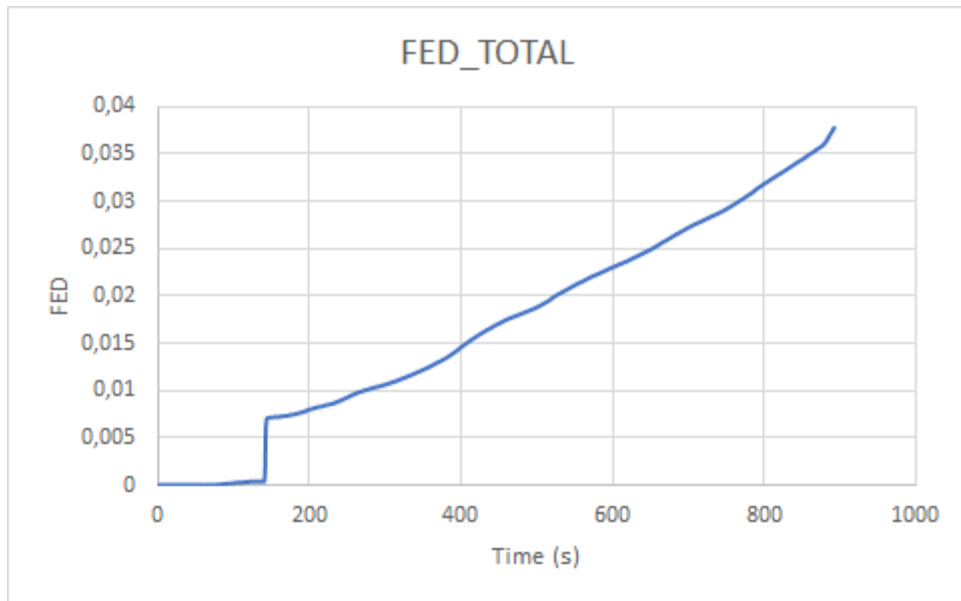
Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα που προέκυψαν για τις μεταβλητές οι οποίες μελετήθηκαν.



Διάγραμμα 65: Όγκος μονοξειδίου του άνθρακα για τον ένοικο κοντά στο ατύχημα



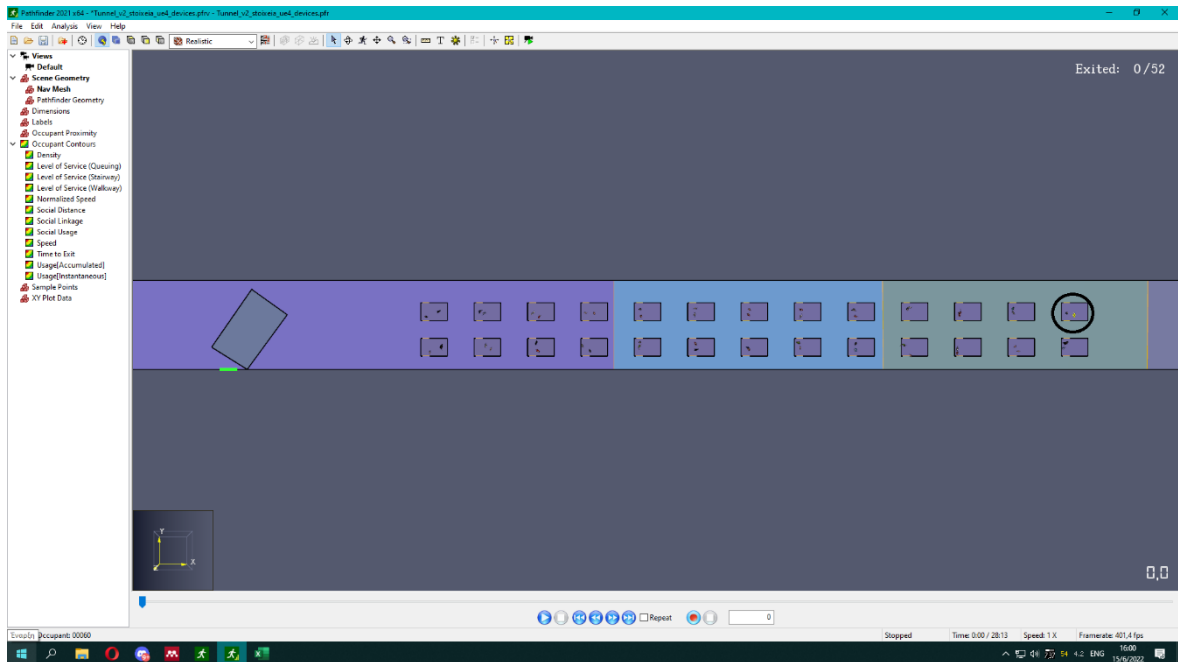
Διάγραμμα 66: Θερμοκρασία για τον ένοικο κοντά στο ατύχημα



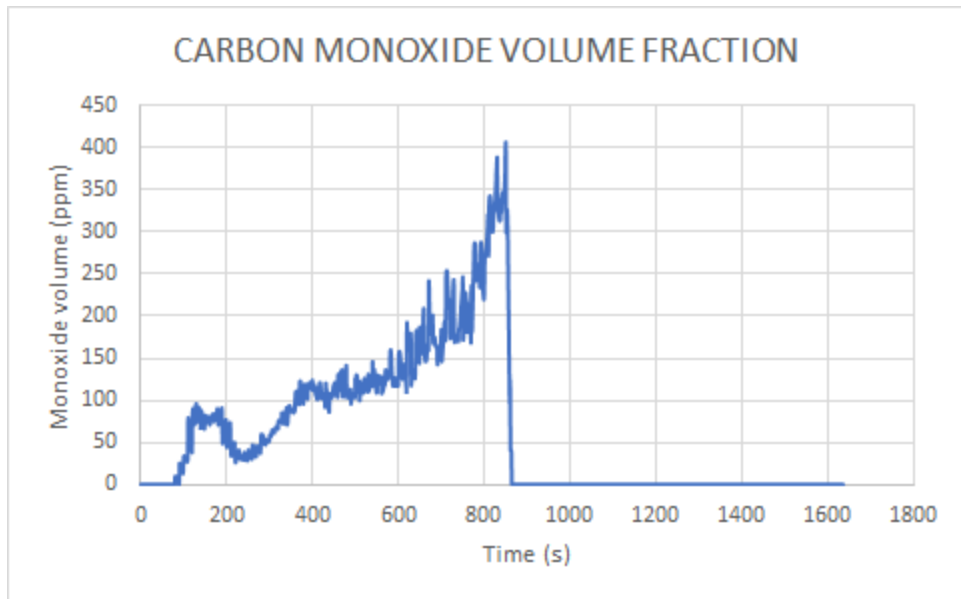
Διάγραμμα 67: FED για τον ένοικο κοντά στο ατύχημα

### Ένοικος με μέγιστο FED (ID 49)

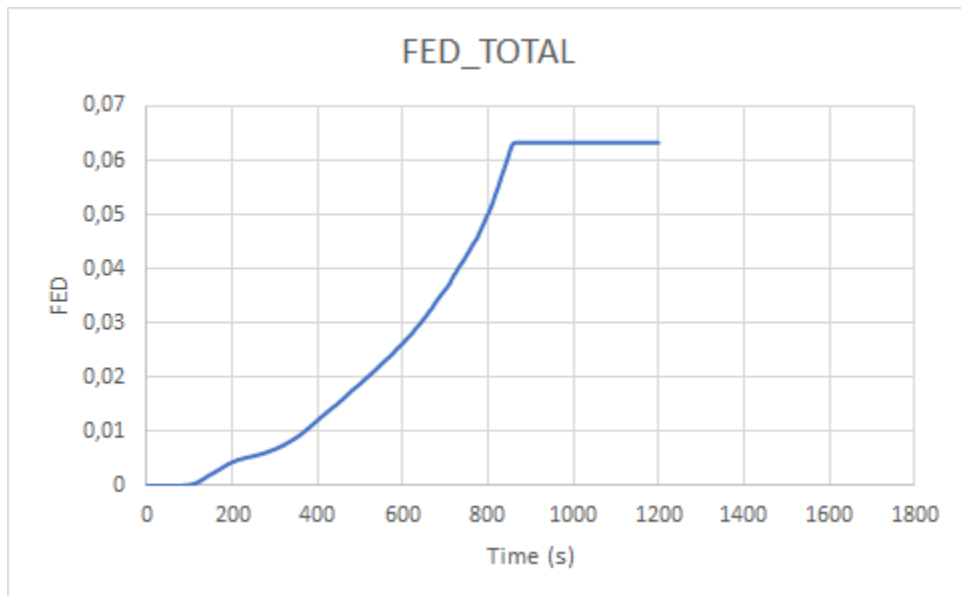
Στην Εικόνα 54 φαίνεται με τον μαύρο κύκλο η θέση του ενοίκου.



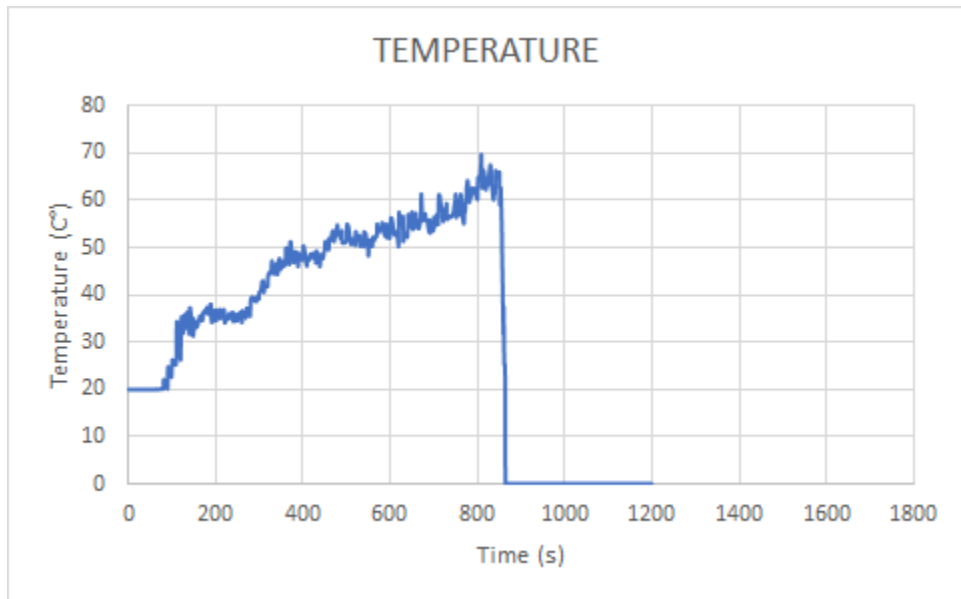
Εικόνα 54: Θέση ενοίκου με μέγιστο FED



Διάγραμμα 68: Όγκος μονοξειδίου του άνθρακα για τον ένοικο κοντά με μέγιστο FED



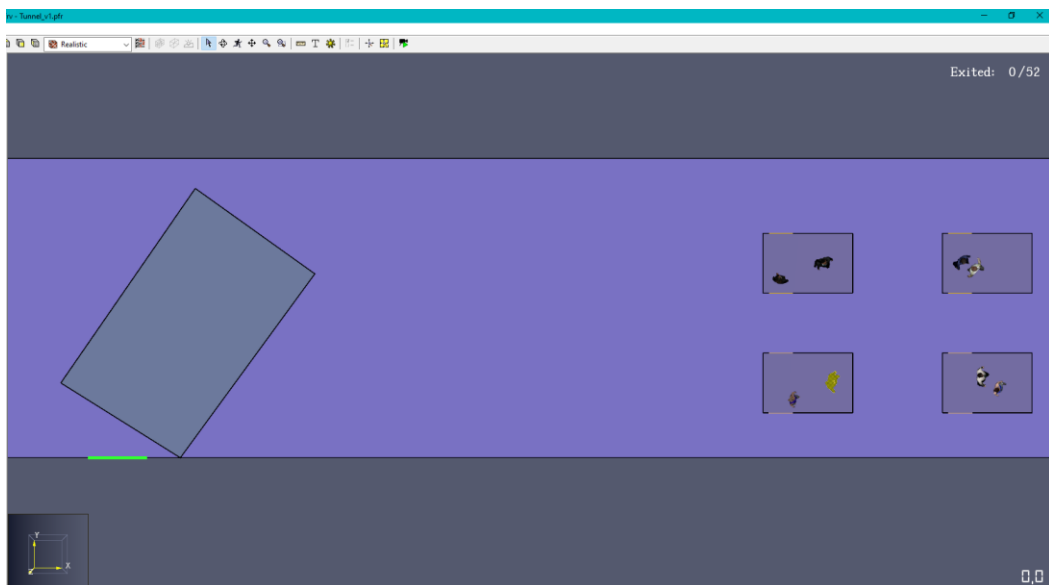
Διάγραμμα 69: FED για τον ένοικο με μέγιστο FED



Διάγραμμα 70: θερμοκρασία για τον ενοίκο με μέγιστο FED

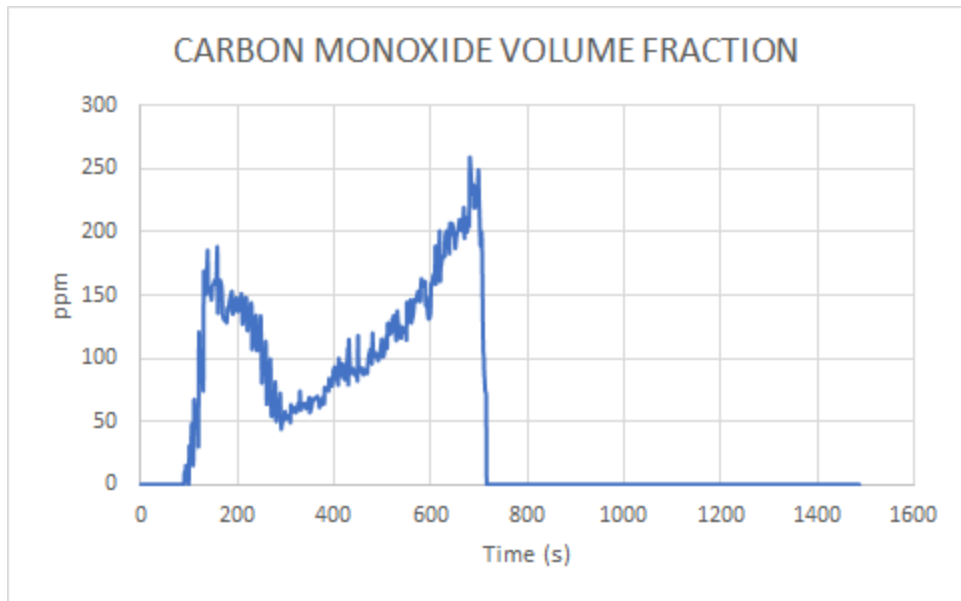
Ένοικος με μέγιστη θερμοκρασία και μέγιστη πρόσληψη μονοξειδίου του άνθρακα (ID 1)

Στην Εικόνα 55 φαίνεται η θέση του ενοίκου με μαύρο κύκλο.

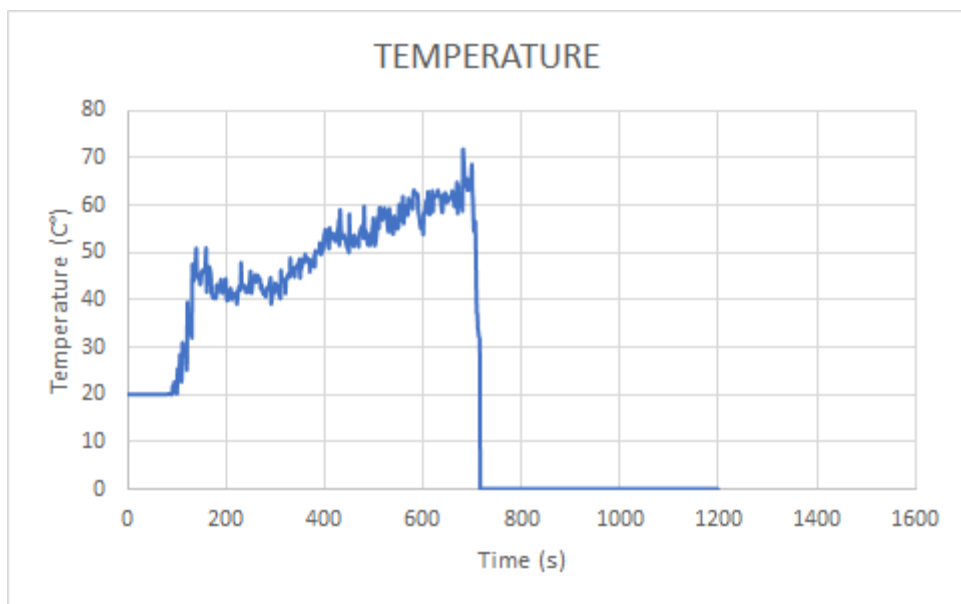


Εικόνα 55: Θέση ενοίκου με μέγιστη θερμοκρασία και μέγιστη πρόσληψη μονοξειδίου του άνθρακα

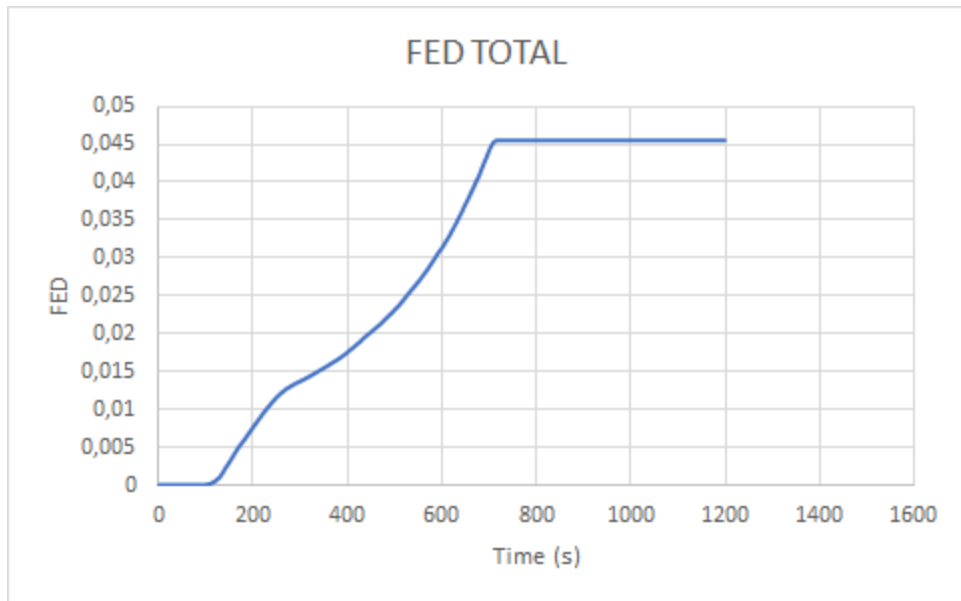




Διάγραμμα 71: Όγκος μονοξειδίου του άνθρακα για τον ένοικο με μέγιστη θερμοκρασία και μέγιστη πρόσληψη μονοξειδίου του άνθρακα

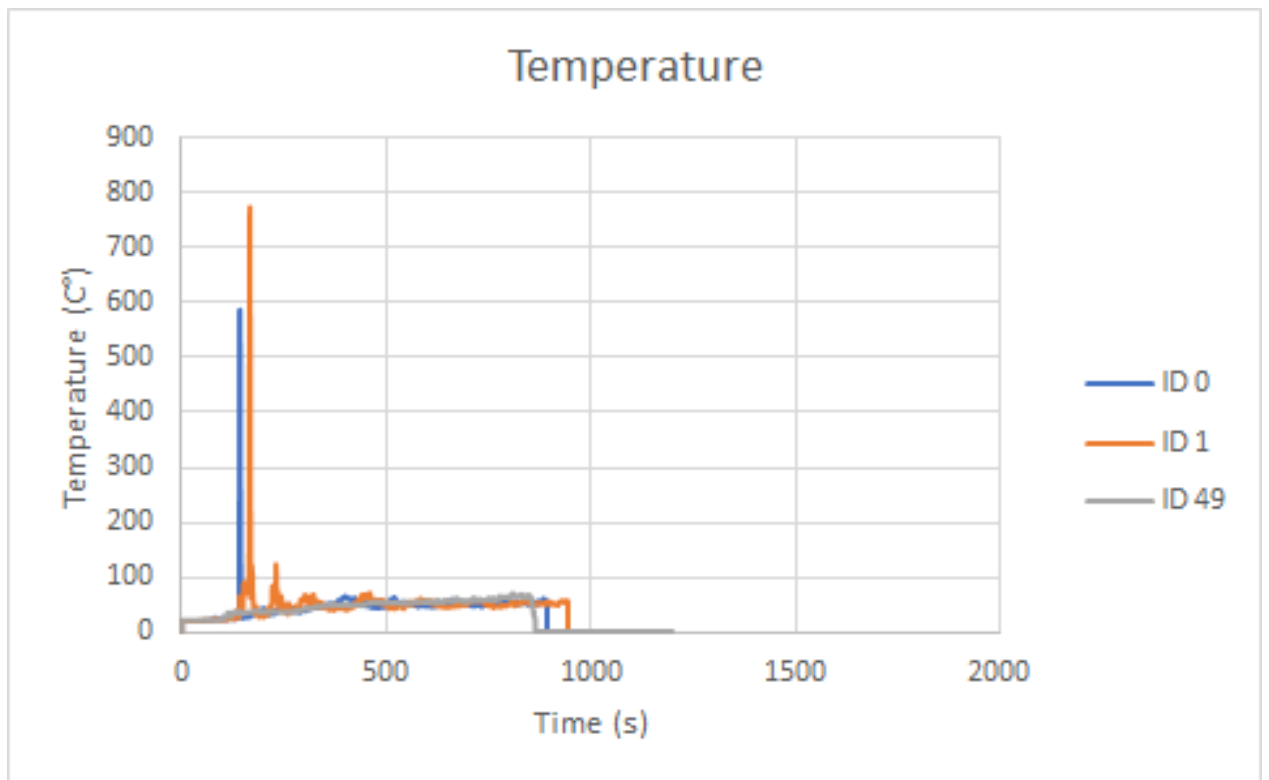


Διάγραμμα 72: Θερμοκρασία ενοίκου με την μέγιστη θερμοκρασία και μέγιστη πρόσληψη μονοξειδίου του άνθρακα

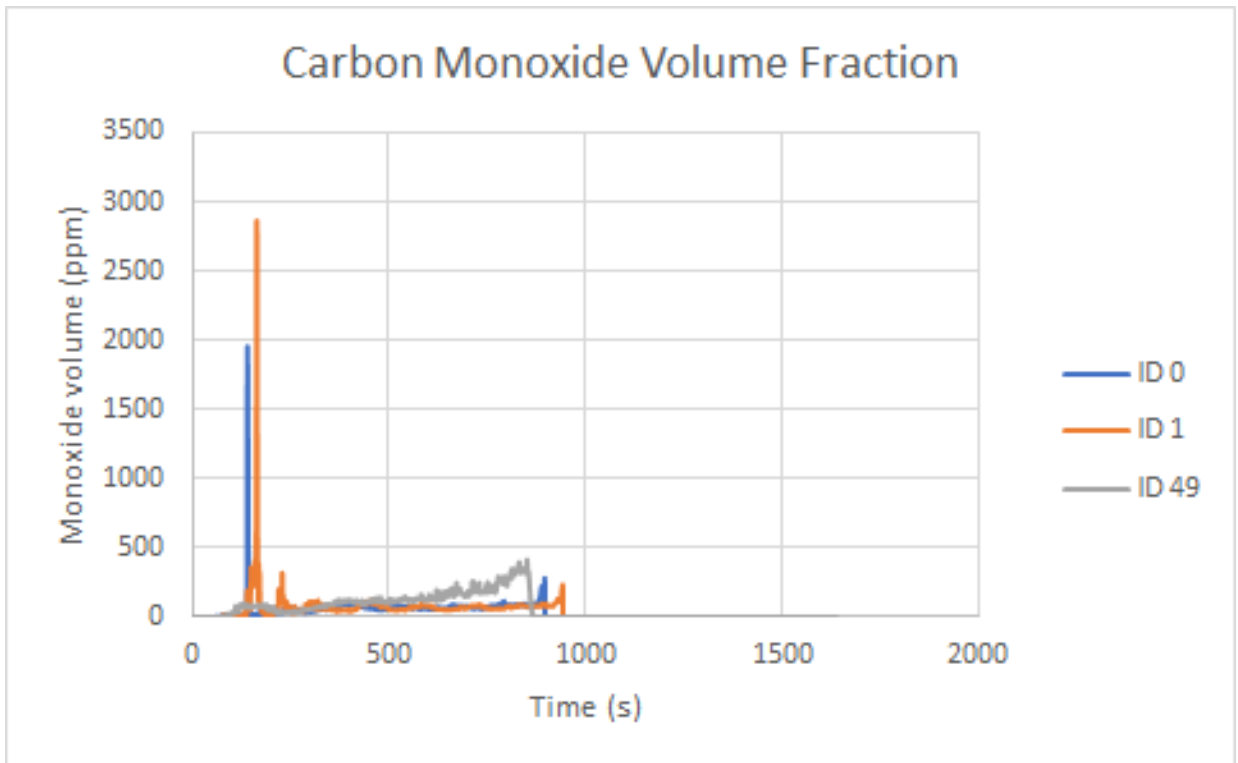


Διάγραμμα 73: FED ενοίκου με την μέγιστη θερμοκρασία και μέγιστη πρόσληψη μονοξειδίου του άνθρακα

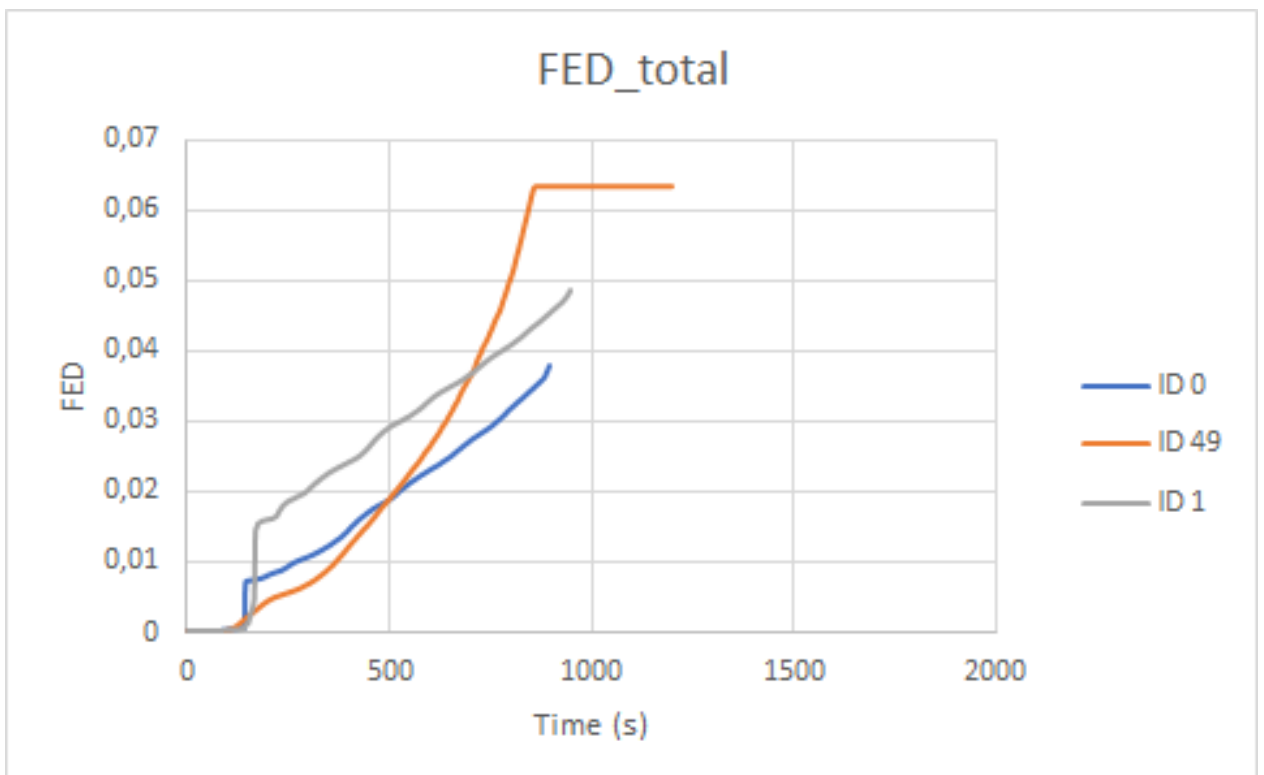
Στην συνέχεια παρουσιάζονται συγκεντρωτικά διαγράμματα για τις μεταβλητές και τους ενοίκους.



Διάγραμμα 74: Θερμοκρασία - Χρόνος



Διάγραμμα 75: Μονοξείδιο του άνθρακα - Χρόνος



Διάγραμμα 76: FED – Χρόνος

Σχόλιο: Οι ακραίες τιμές στα παραπάνω διαγράμματα μπορούν να ερμηνευθούν από τον τρόπο προσομοίωσης του προγράμματος Pyrosim. Η παρούσα διπλωματική εργασία δεν εξετάζει τον

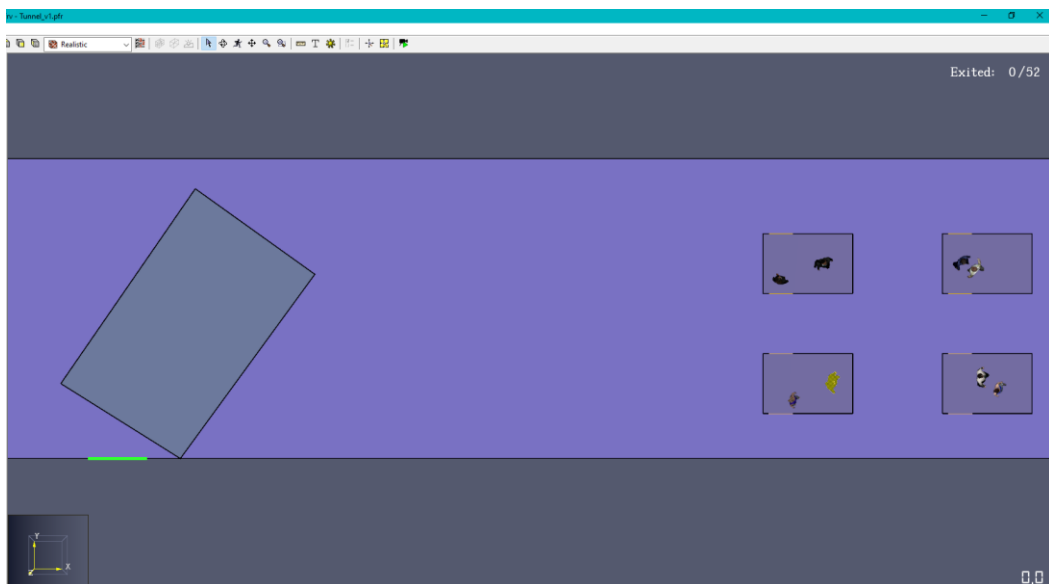
τρόπο λειτουργίας του προγράμματος, όμως οι τιμές αυτές μπορούν να εξηγηθούν με βάση το πλέγμα που καταμετρά τις μεταβλητές της προσομοίωσης. Έτσι αν σε ένα σημείο του πλέγματος υπάρξει ριπή θερμοκρασίας και μονοξειδίου του άνθρακα τότε αυτό φαίνεται στο διάγραμμα ως ένα ακραίο σημείο.

#### Σενάριο 4-ΣΠ4

Με βάση τα αποτελέσματα επιλέχθηκαν 2 ένοικοι, στους οποίους οι παραπάνω μεταβλητές έχουν μέγιστες τιμές, και ένας ένοικος ο οποίος βρίσκεται κοντά στο ατύχημα. Μελετήθηκαν όλες οι μεταβλητές για κάθε ένοικο.

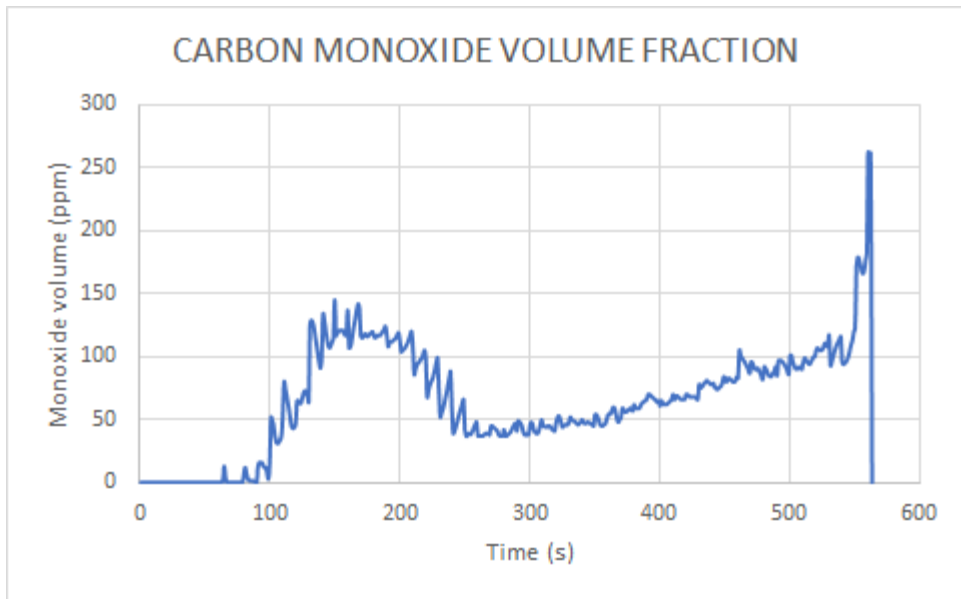
#### Ένοικος κοντά στο ατύχημα (ID 0)

Στην Εικόνα 56 φαίνεται η θέση του ενοίκου με κίτρινο χρώμα.

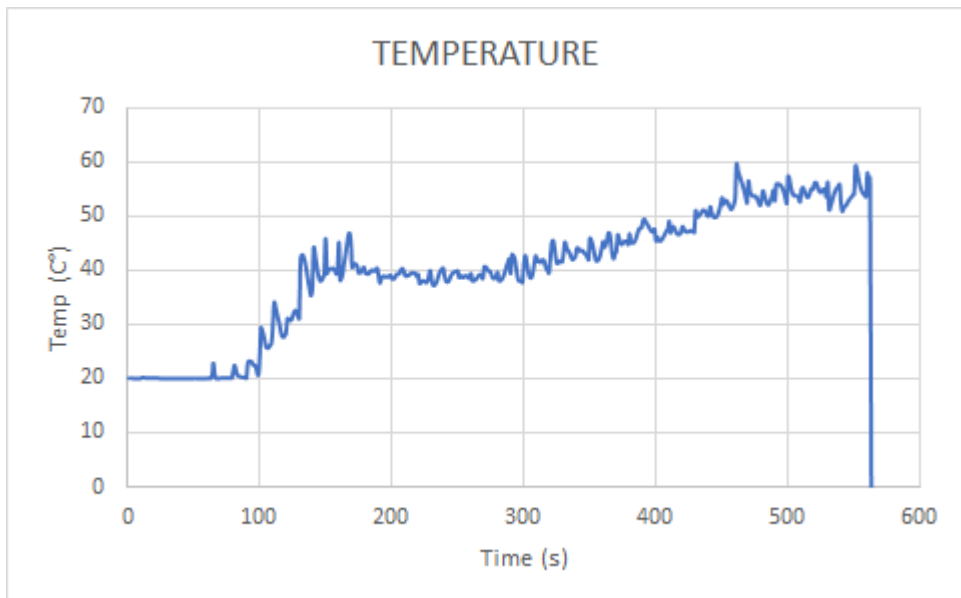


Εικόνα 56: Ένοικος κοντά στο ατύχημα

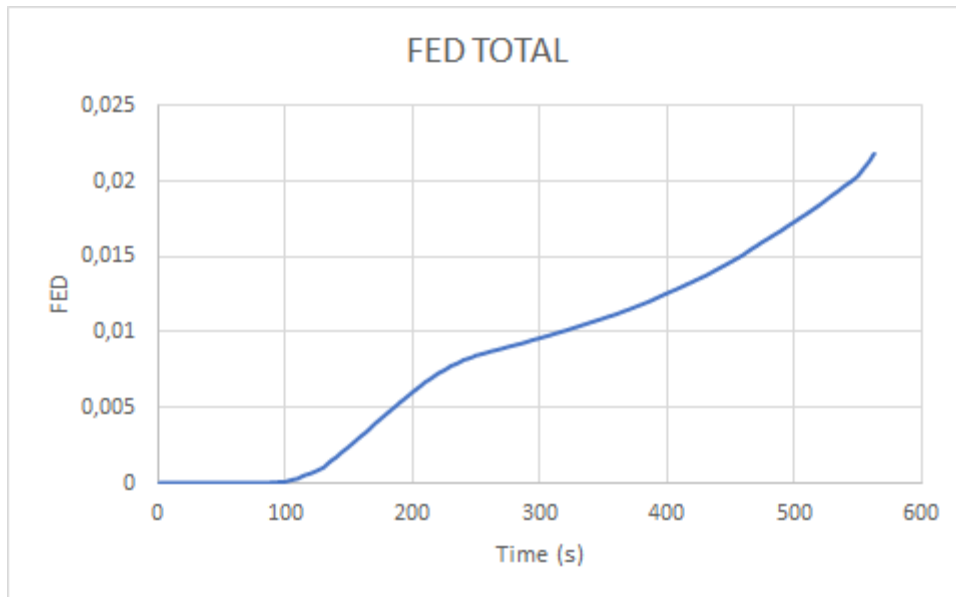
Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα που προέκυψαν για τις μεταβλητές οι οποίες μελετήθηκαν.



Διάγραμμα 77: Όγκος μονοξειδίου του άνθρακα για τον ένοικο κοντά στο ατύχημα



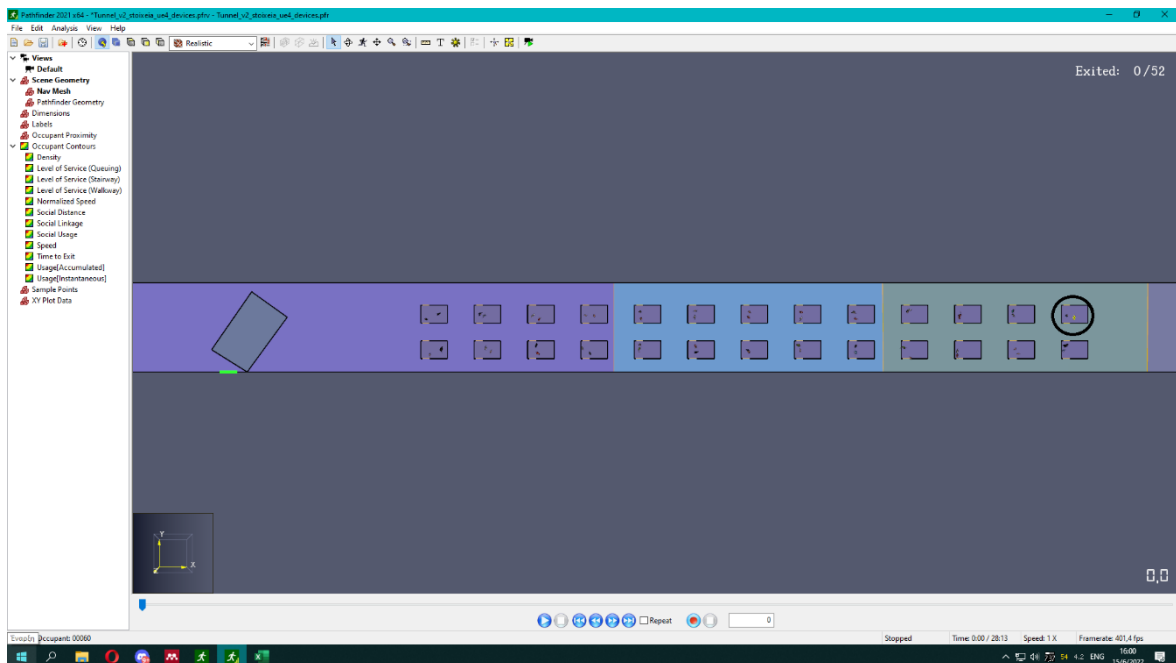
Διάγραμμα 78: Θερμοκρασία για τον ένοικο κοντά στο ατύχημα



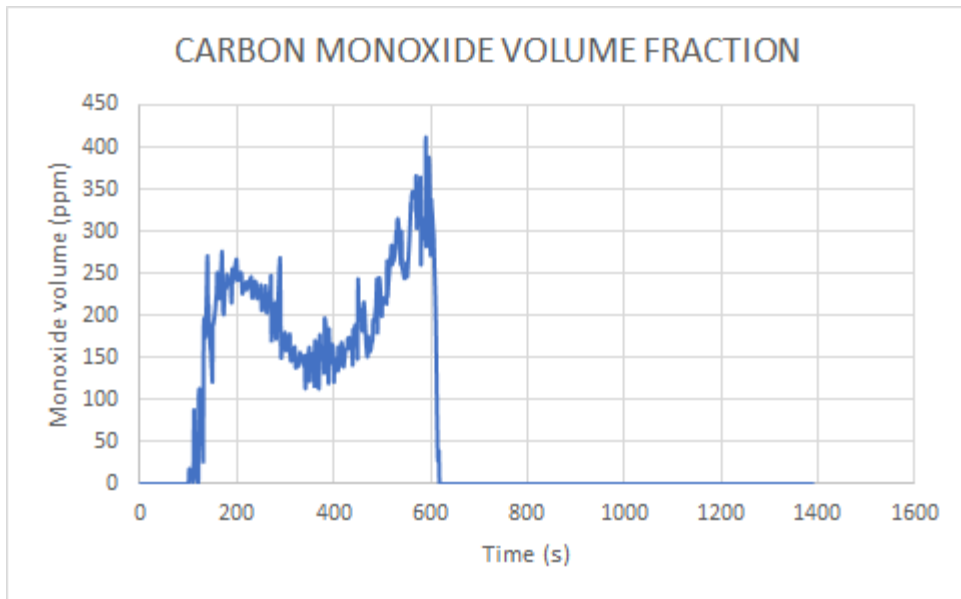
Διάγραμμα 79: FED για τον ένοικο κοντά στο ατύχημα

### Ένοικος με μέγιστο FED (ID 49)

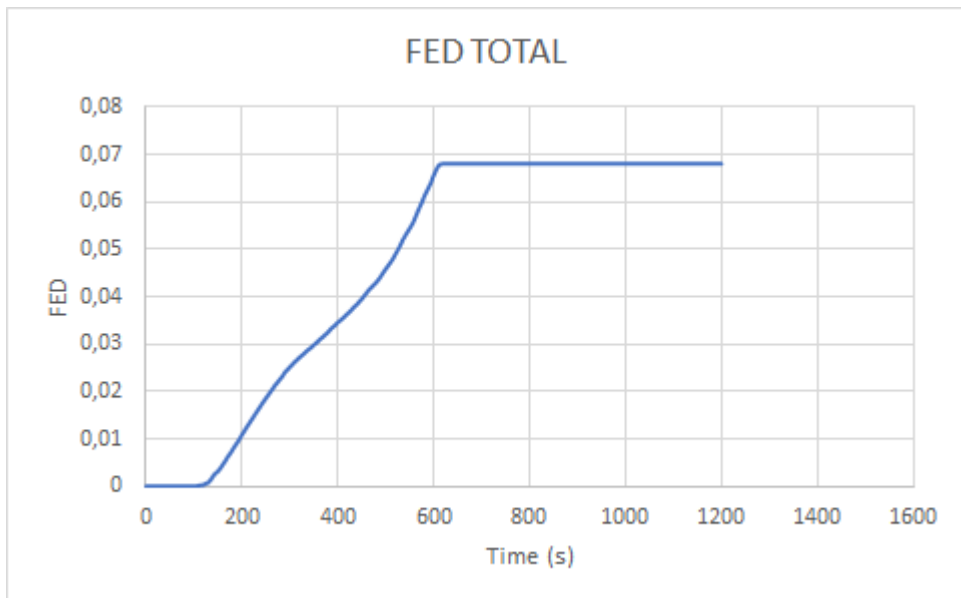
Στην Εικόνα 57 φαίνεται με τον μαύρο κύκλο η θέση του ενοίκου.



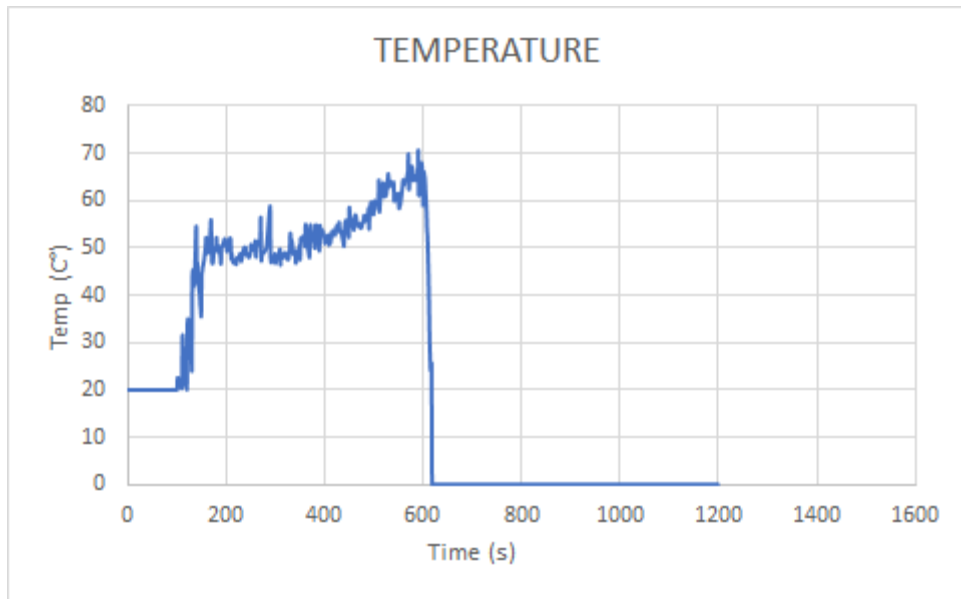
Εικόνα 57: Θέση ενοίκου με μέγιστο FED



*Διάγραμμα 80: Όγκος μονοξειδίου του άνθρακα για τον ένοικο κοντά με μέγιστο FED*

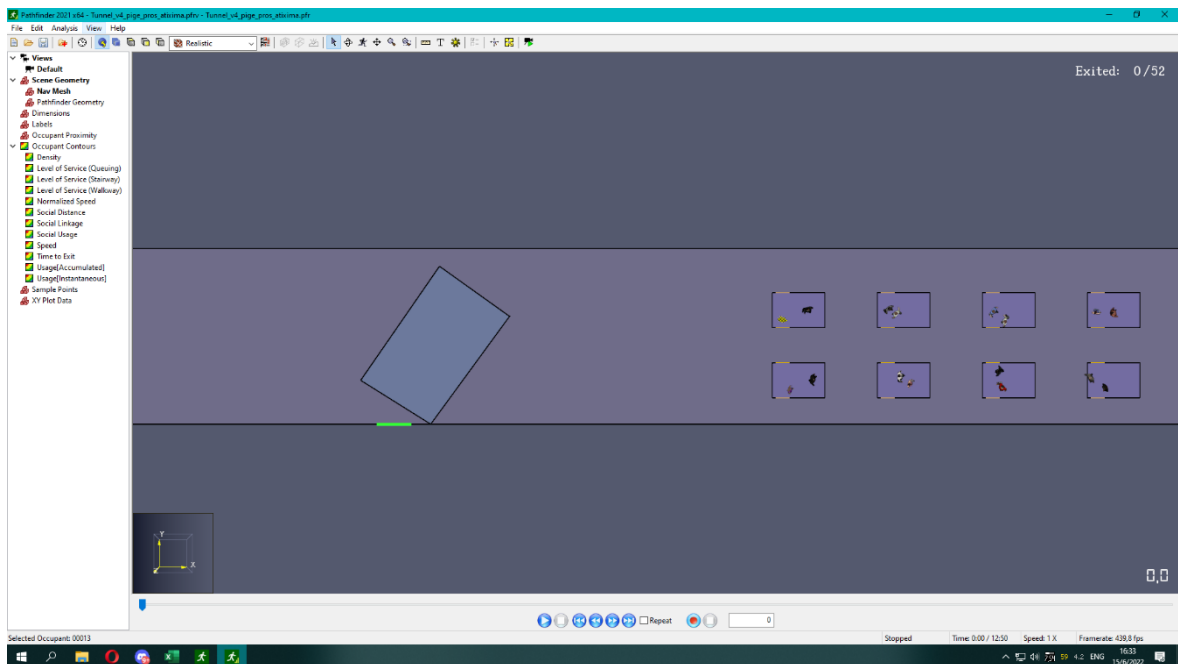


*Διάγραμμα 81: FED για τον ένοικο με μέγιστο FED*



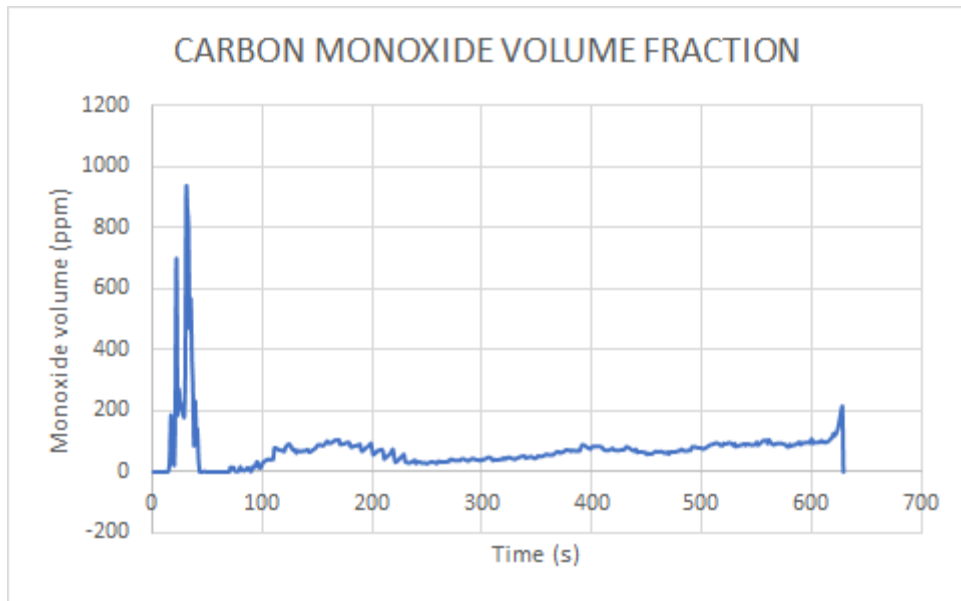
Διάγραμμα 82: θερμοκρασία για τον ένοικο με μέγιστο FED

Ένοικος με μέγιστη θερμοκρασία και μέγιστη πρόσληψη μονοξειδίου του άνθρακα (ID 2)  
 Στην Εικόνα 58 φαίνεται η θέση του ενοίκου με κίτρινο χρώμα.

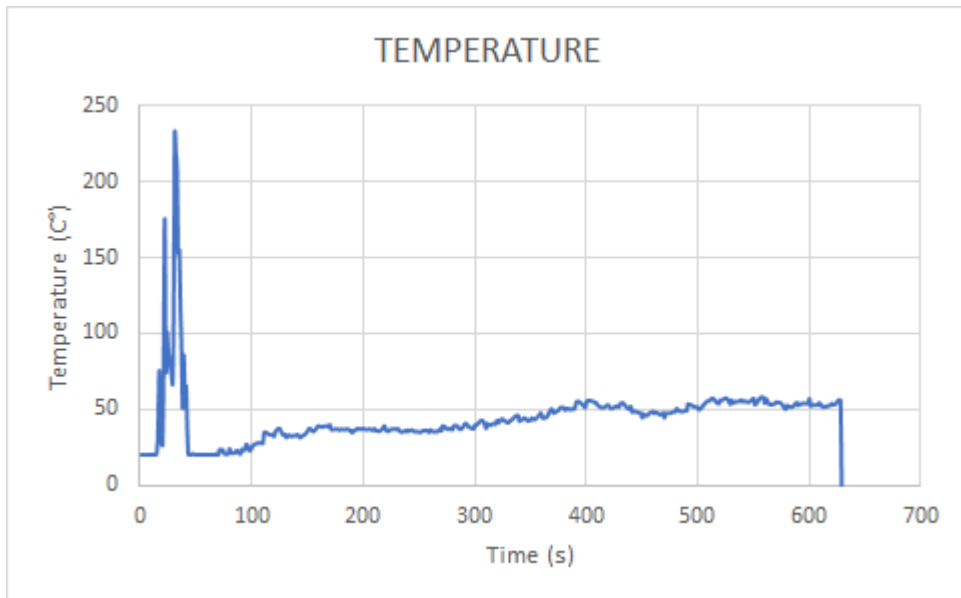


Εικόνα 58: Θέση ενοίκου με μέγιστη θερμοκρασία

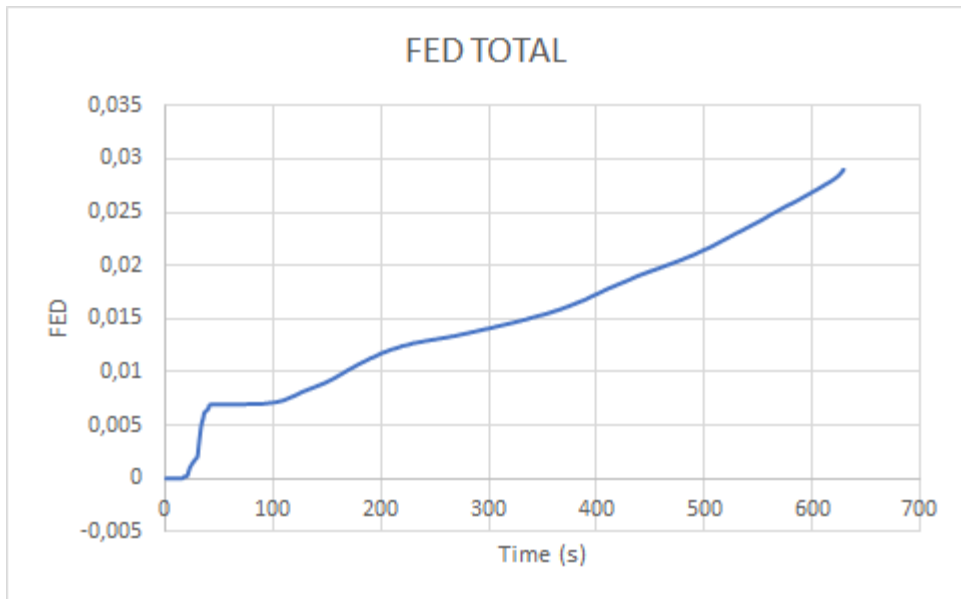




Διάγραμμα 83: Όγκος μονοξειδίου του άνθρακα για τον ένοικο με μέγιστη θερμοκρασία

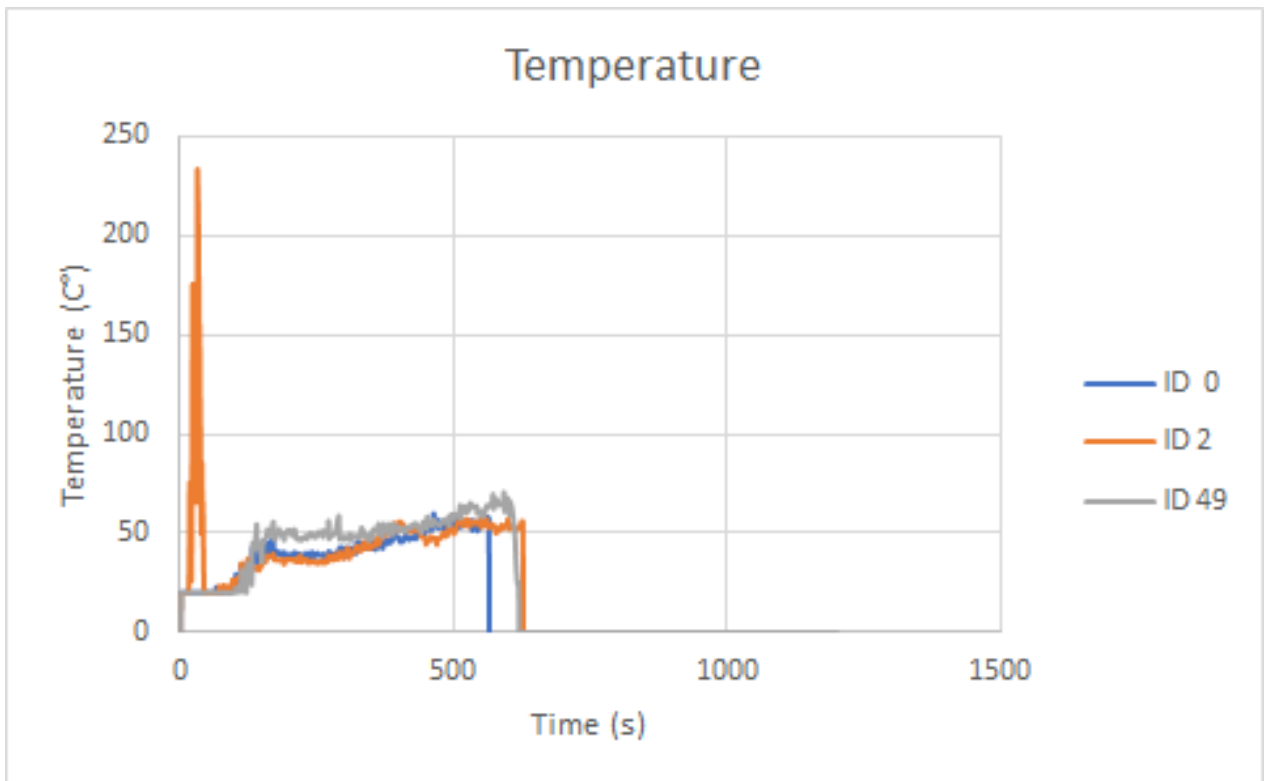


Διάγραμμα 84: Θερμοκρασία ενοίκου με την μέγιστη θερμοκρασία

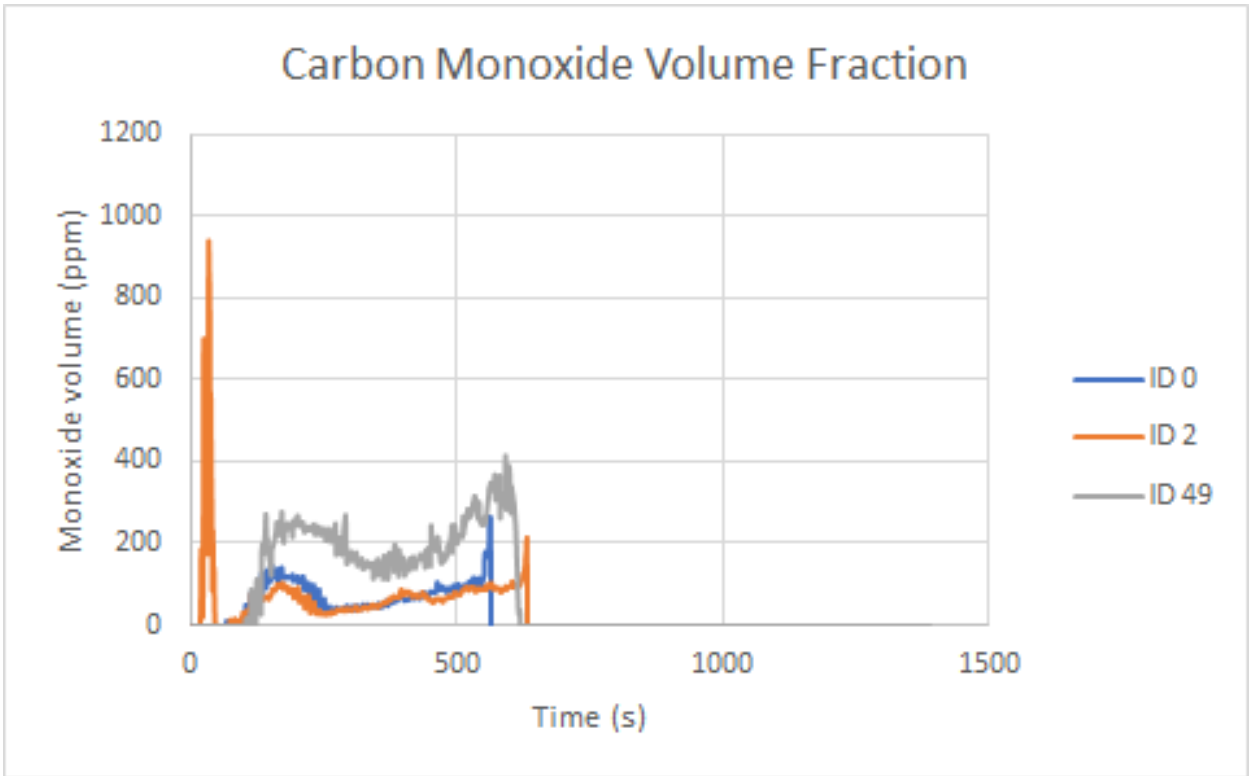


Διάγραμμα 85: FED ενοίκου με την μέγιστη θερμοκρασία

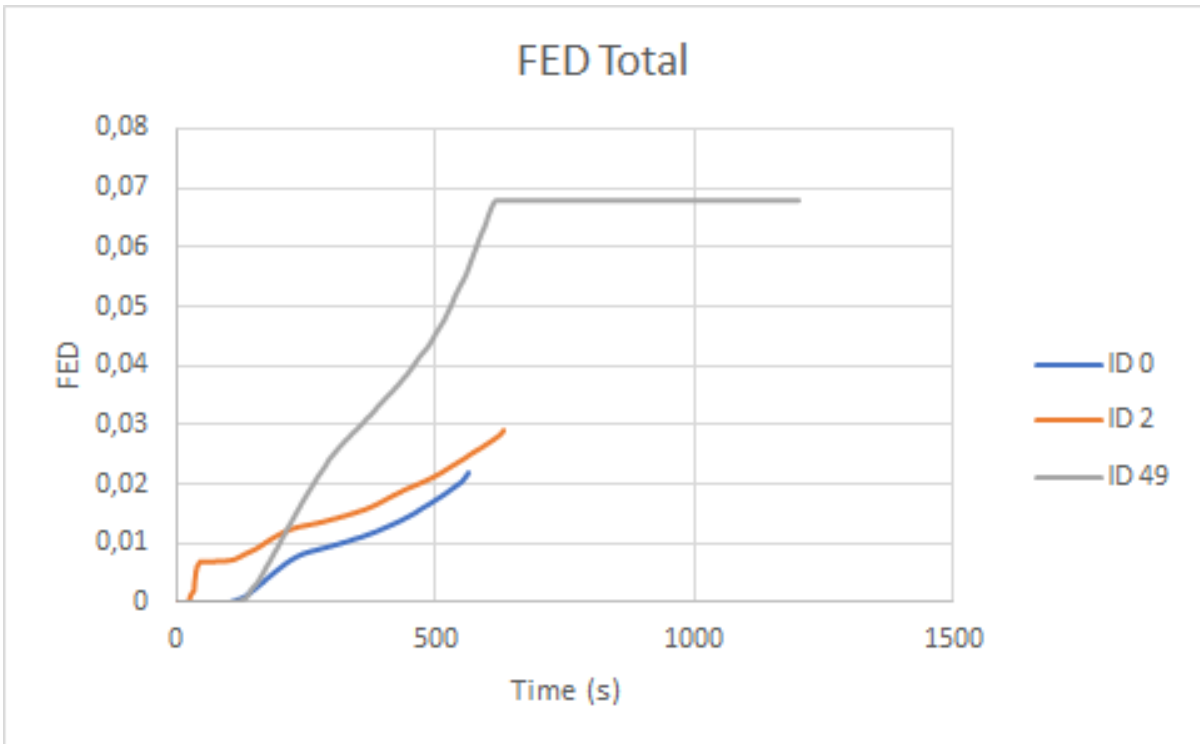
Στην συνέχεια παρουσιάζονται συγκεντρωτικά διαγράμματα για τις μεταβλητές και τους ενοίκους.



Διάγραμμα 86: Θερμοκρασία - Χρόνος



Διάγραμμα 87: Μονοξείδιο του άνθρακα - Χρόνος



Διάγραμμα 88: FED – Χρόνος

Σχόλιο: Στα παραπάνω διαγράμματα οι ακραίες τιμές που φαίνονται για τον ένοικο ID 2 είναι διότι ο συγκεκριμένος κινείται προς το ατύχημα και περιμένει για 10 δευτερόλεπτα πολύ κοντά στο σημείο της φωτιάς.

Στον παρακάτω Πίνακα 21 παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές που λήφθηκαν υπόψιν για την θερμοκρασία, την πρόσληψη μονοξειδίου του άνθρακα και το FED σε όλα τα σενάρια.

Πίνακας 21: Μέγιστες τιμές μεταβλητών σε κάθε σενάριο

|                              | Σενάρια |      |      |      |
|------------------------------|---------|------|------|------|
|                              | ΣΠ1     | ΣΠ2  | ΣΠ3  | ΣΠ4  |
| <b>Temperature (C°)</b>      | 70      | 72   | 50   | 65   |
| <b>Carbon Monoxide (ppm)</b> | 418     | 412  | 405  | 380  |
| <b>FED</b>                   | <0.1    | <0.1 | <0.1 | <0.1 |

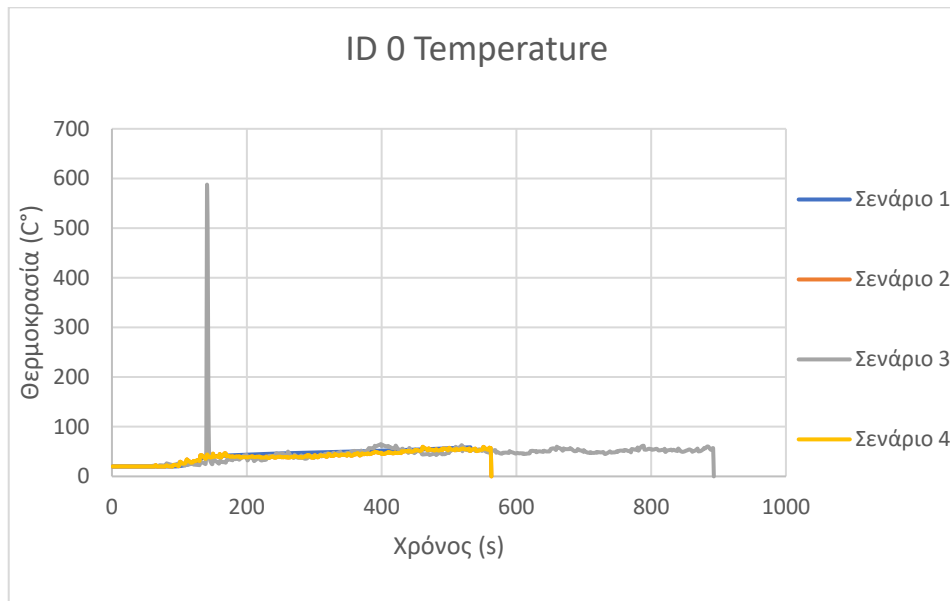
Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει σύμφωνα με τον NFPA [17] τους χρόνους αντοχής των χρηστών για τις μέγιστες τιμές των μεταβλητών σε κάθε σενάριο.

Πίνακας 22: Χρόνοι αντοχής των χρηστών για τις μέγιστες τιμές των μεταβλητών

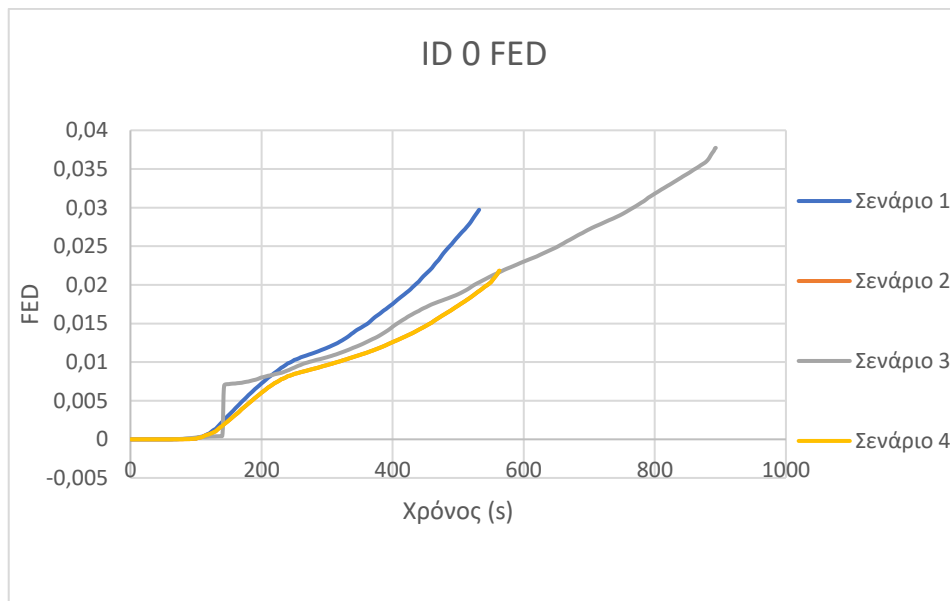
|                        | Σενάριο |         |          |         |
|------------------------|---------|---------|----------|---------|
|                        | ΣΠ1     | ΣΠ2     | ΣΠ3      | ΣΠ4     |
| <b>Temperature</b>     | 6 min   | 5 min   | 18.8 min | 7.7 min |
| <b>Carbon Monoxide</b> | >15 min | >15 min | >15 min  | >15 min |

Τέλος παρουσιάζονται τα ακόλουθα διαγράμματα τα οποία απεικονίζουν την θερμοκρασία σε σχέση με τον χρόνο, την πρόσληψη μονοξειδίου σε σχέση με τον χρόνο και το FED σε σχέση με τον χρόνο για τους ενοίκους με ID 49 (έχει στα σενάρια ΣΠ2,ΣΠ3,ΣΠ4 το μέγιστο FED και στο σενάριο ΣΠ1 την μέγιστη πρόσληψη μονοξειδίου του άνθρακα, Εικόνα 57) και ID 0 (πιο κοντά στο ατύχημα, Εικόνα 53).

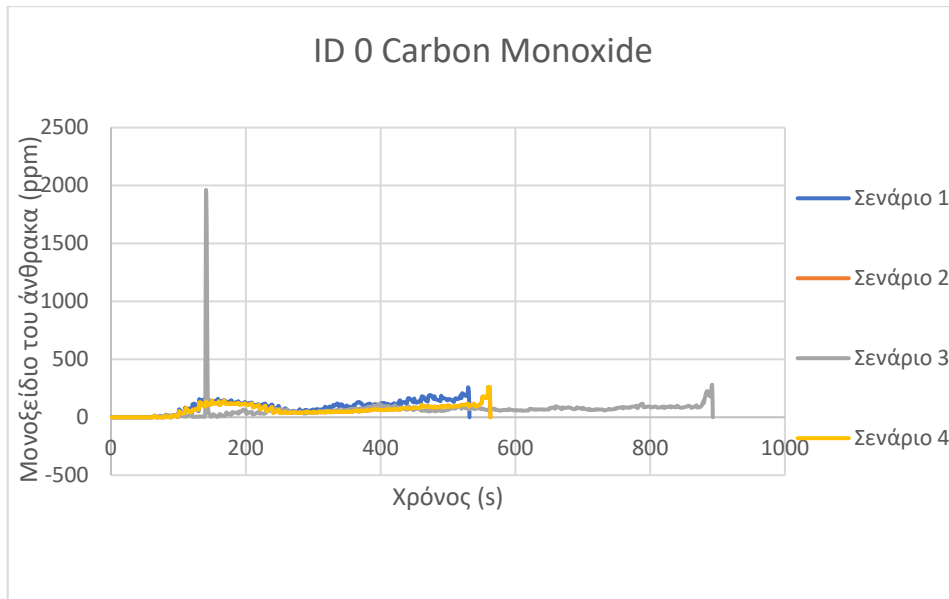
## ID 0



Διάγραμμα 89: Θερμοκρασία ID 0 σε όλα τα σενάρια

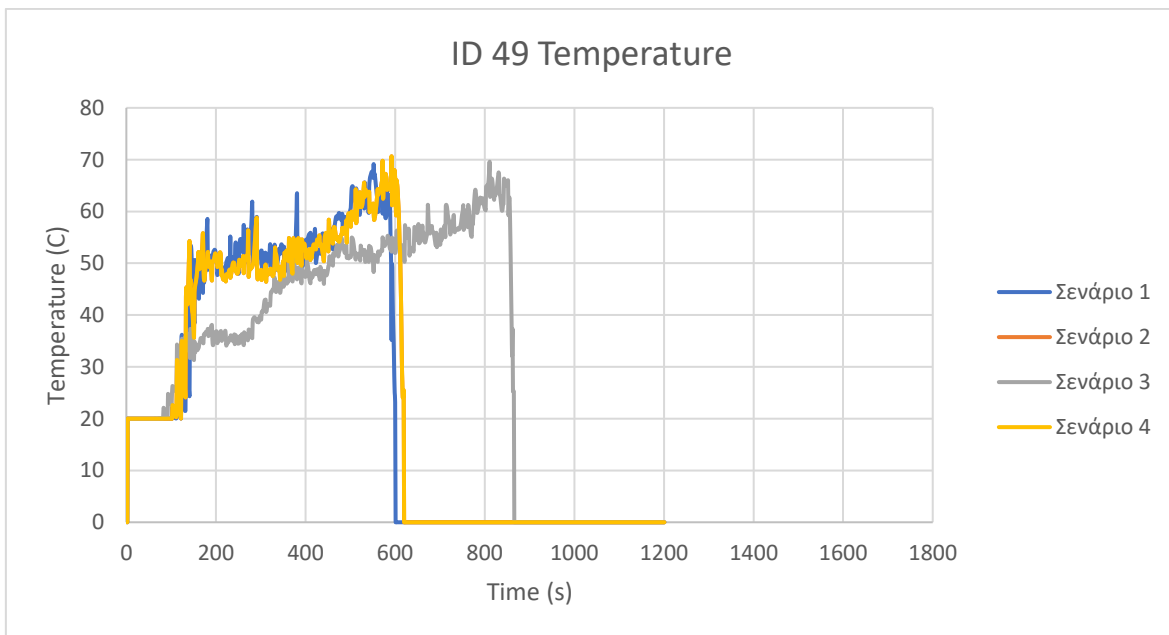


Διάγραμμα 90: FED ID 0 σε όλα τα σενάρια

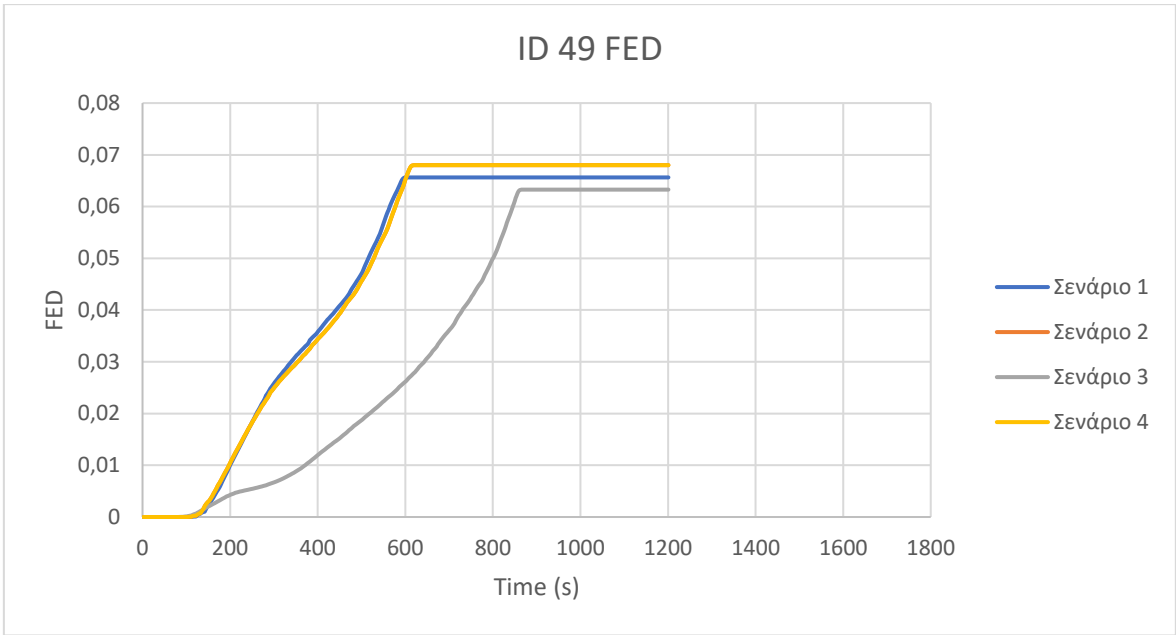


Διάγραμμα 91: Πρόσληψη μονοξειδίου ID 0 σε όλα τα σενάρια

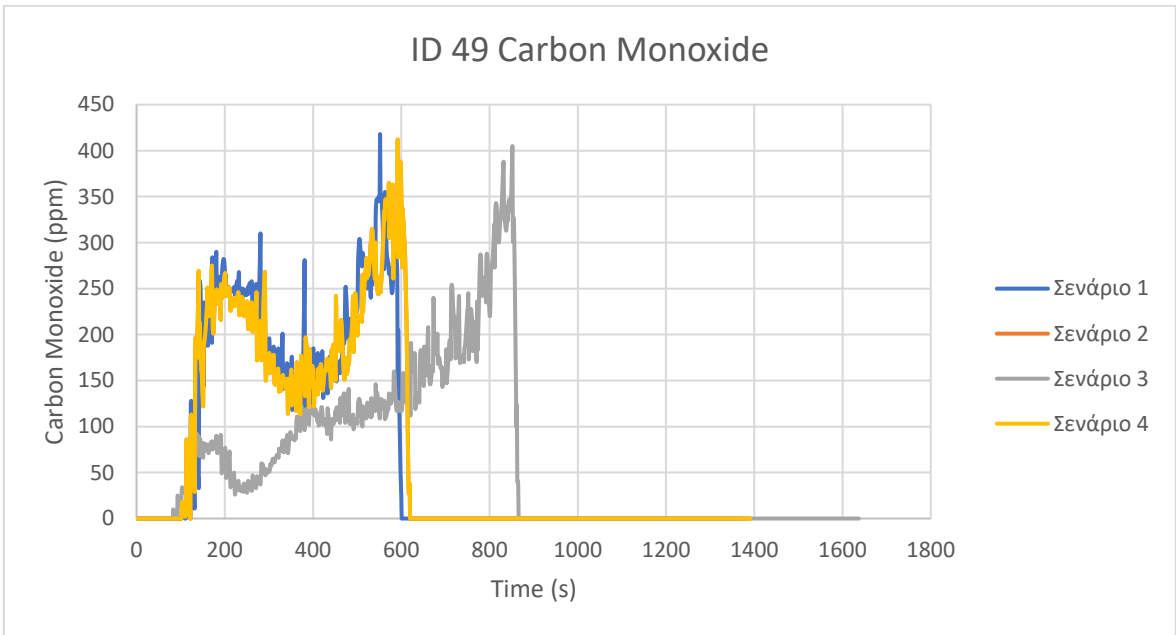
ID 49



Διάγραμμα 92: Θερμοκρασία ID 49 σε όλα τα σενάρια



Διάγραμμα 93: FED ID 49 σε όλα τα σενάρια



Διάγραμμα 94: Πρόσληψη μονοξειδίου ID 49 σε όλα τα σενάρια

## Συμπεράσματα

Από τις αναλύσεις με την μέθοδο εικονικής πραγματικότητας προέκυψαν τα συμπεράσματα που παρουσιάζονται στη συνέχεια. Όπως αναφέρθηκε, αναλύθηκαν τα 3 από τα 6 σενάρια της προσομοίωσης τα οποία είναι τα εξής:

- 1) Όχημα χρήστη με περιορισμένη ορατότητα ως προς το ατύχημα με καπνό και φωτιά. Έναρξη συναγερμού στα 60 sec
- 2) Όχημα χρήστη με περιορισμένη ορατότητα ως προς το ατύχημα χωρίς καπνό και φωτιά. Έναρξη συναγερμού στα 60 sec
- 3) Όχημα χρήστη με περιορισμένη ορατότητα ως προς το ατύχημα με καπνό και φωτιά. Έναρξη συναγερμού στα 20 sec

Για λόγους πληρότητας και για την εξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων στη συνέχεια παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν, λαμβάνοντας υπόψη και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα 3 σενάρια που εξέτασε ο κ. Β. Κωτσάκης.

1. Στα σενάρια στα οποία δεν υπήρχε καπνός κανένας χρήστης δεν έχασε την έξοδο κινδύνου.
2. Το 23% των χρηστών επέλεξε να κινηθεί αρχικά προς το ατύχημα
3. Το 59% των χρηστών είχε ως μέθοδο εύρεσης της εξόδου την αναζήτηση σήμανσης
4. Το 88% των χρηστών επέλεξε να βγει από την έξοδο κινδύνου, ενώ το 8% επέλεξε να βγει από το στόμιο της σήραγγας. Ποσοστό το οποίο συμφωνεί και με τα βιβλιογραφικά δεδομένα που δίνουν ποσοστά 90% και 10% αντίστοιχα[36].
5. Από τους ένοικου που επέλεξαν να βγουν από το στόμιο της σήραγγας το 56% το επέλεξε συνειδητά, ενώ το 44 % το επέλεξε επειδή μπερδεύτηκε και έχασε την έξοδο κινδύνου.
6. Δεν υπήρξε σημαντική διαφορά στους χρόνους ανταπόκρισης και εκκένωσης των ενοίκων, ανάλογα με το αν είχαν λάβει εκπαίδευση πυρασφάλειας στο παρελθόν.
7. Δεν υπήρξε σημαντική διαφορά στους χρόνους ανταπόκρισης των ενοίκων, ανάλογα με το αν αντιλήφθηκαν την σήμανση εύφλεκτων υλικών στο πίσω μέρος του φορτηγού που προκάλεσε το ατύχημα.
8. Στα σενάρια στα οποία δεν υπήρχε καπνός δεν αποτελέσαν τα οπτικά και τα ηχητικά ερεθίσματα αιτία εγκατάλειψης του οχήματος.

Από τις αναλύσεις με το λογισμικό Pathfinder προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:



1. Παρατηρήθηκε ότι όσον αφορά τις μέγιστες θερμοκρασίες ενώ θα περιμέναμε αυτές να συναντώνται στους ενοίκους που βρίσκονται πιο κοντά στην φωτιά αυτό δεν συνέβη σε όλα τα σενάρια καθώς σε κάποια την μέγιστη θερμοκρασία είχαν ένοικοι αρκετά μέτρα μακριά από το ατύχημα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο καπνός όταν εξαπλώνεται δημιουργεί κοιλάδες και λόφους ως προς την θερμοκρασία (όπως φαίνεται και στην Εικόνα 43) με αποτέλεσμα ένοικοι που βρίσκονται πιο μακριά να αντιμετωπίζουν δυσμενέστερες συνθήκες.
2. Από τα συγκεντρωτικά διαγράμματα προέκυψε ότι όσον αφορά την θερμοκρασία:
  - a. σενάριο 1 χρόνο αντοχής τα 6 λεπτά
  - b. σενάριο 2 τα 5 λεπτά
  - c. σενάριο 3 τα 18,8 λεπτά
  - d. σενάριο 4 τα 7,7 λεπτά

Τα παραπάνω σημειώνεται ότι αφορούν τις μέγιστες τιμές της θερμοκρασίας σε κάθε σενάριο.

3. Από τα συγκεντρωτικά διαγράμματα προέκυψε ότι όσον αφορά την πρόσληψη μονοξειδίου του άνθρακα ο χρόνος αντοχής είναι σε όλα τα σενάρια πάνω από 15 λεπτά. Σημειώνεται ότι αυτό αφορά τις μέγιστες τιμές σωματιδίων μονοξειδίου του άνθρακα στον αέρα σε κάθε σενάριο.
4. Από τα συγκεντρωτικά διαγράμματα προέκυψε ότι όσον αφορά FED σε όλα τα σενάρια είμαστε κάτω από το όριο του 0,1.

## Βιβλιογραφία

- [1] Καλιαμπάκος Δ, Μπενάρδος Α. Σχεδιασμός & Οικονομοτεχνική Αξιολόγηση Ειδικών Υπογείων Έργων 2009.
- [2] Γκανά Δ. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΑΕΡΑ ΕΝΤΟΣ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΣΤΗΝ ΥΓΕΙΑ ΤΩΝ ΕΠΙΒΑΤΩΝ ΣΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΕΚΔΗΛΩΣΗΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ. 2021.
- [3] Καλλιανιώτης ΑΚ. Βελτιστοποίηση συνθηκών εκκένωσης υπογείων χώρων: αξιολόγηση και βελτιστοποίηση θέσεων εξόδων διαφυγής. 2015.
- [4] Μενεγάκη Μ. Σχέδια Ασφαλείας & Εκκένωσης Ιδιαιτερότητες Υπογείων Χώρων n.d.
- [5] AEM. Australian Emergency Manual Series - Evacuation planning\_Manual Number 11. 2005.
- [6] CFPA Europe, Confederation of Fire Protection Associations Europe. Fire safety engineering concerning evacuation from buildings - Guidelines No 19:2009. CFPA Eur 2009.
- [7] Nelson, H. E., & Mowrer FW. Emergency Movement. 2002.
- [8] Κυρίτσης Φ. Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων. 2010.
- [9] Candy, M. N., & Chow W. A Brief Review on the Time Line Concept in Evacuation. Int J Archit Sci 2006.
- [10] Proulx G. Evacuation time and movement in apartment buildings. Fire Saf J 1995.
- [11] Proulx G. Movement of People: The Evacuation Timing. SFPE Handb. Fire Prot. Eng., 2002.
- [12] Institutue BS. Fire Safety Engineering in Buildings, Part 1: Guide to the Application of Fire Safety Engineering Principles. 1991.
- [13] FIT. Fire In Tunnels 2006;46:449–55.
- [14] Haack A. Fire In Tunnels Thematic network n.d.
- [15] OSHA. Carbon monoxide poisoning 2012;33:105–9.
- [16] Hymes, Ian; Boydell, Warren; Prescott BI of CE. Thermal radiation: physiological and pathological effects. 1996.
- [17] NFPA. NFPA 130- Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems.

2020.

- [18] Φ.Ε.Κ. Οδηγια 2004/54/EK 2007.
- [19] Πινακίδες αυτοκινητοδρόμου σε σήραγγα n.d. [www.shma.gr/categories/981/simapinakides-kok-kai-diafores-pinakidespinakides-simansis-kokpinakides-aytokinitodromon-kokpinakides-aytokinitodromoy-se-siragga/](http://www.shma.gr/categories/981/simapinakides-kok-kai-diafores-pinakidespinakides-simansis-kokpinakides-aytokinitodromon-kokpinakides-aytokinitodromoy-se-siragga/) (accessed January 21, 2022).
- [20] Commission E. Safe driving in road tunnels for professionals n.d.
- [21] Ολυμπία οδός. Οδηγίες Ασφαλούς Οδήγησης σε Σήραγγες n.d.
- [22] Κανόνες για ασφαλή διέλευση σε οδικές σήραγγες n.d. [http://odos.simor.mech.ntua.gr/index.php?option=com\\_content&view=article&id=90&Itemid=242](http://odos.simor.mech.ntua.gr/index.php?option=com_content&view=article&id=90&Itemid=242) (accessed January 21, 2022).
- [23] Ruggiero L. A Review of Augmented Reality Applications for Building Evacuation 2018.
- [24] Olander J, Ronchi E, Lovreglio R, Nilsson D. Dissuasive exit signage for building fire evacuation. *Appl Ergon* 2017;59:84–93. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2016.08.029>.
- [25] Daniel Nilsson ER. A Virtual Reality experiment on the design of flashing lights at emergency exit portals for road tunnel evacuations Enrico Ronchi Daniel Nilsson. 2015.
- [26] Andrée K, Eriksson DNJ. Evacuation experiments in a virtual reality high-rise building: exit choice and waiting time for evacuation elevators 2015:14. <https://doi.org/10.1002/fam.2310>.
- [27] Cosma G, Ronchi E, Nilsson D. Way-finding lighting systems for rail tunnel evacuation: A virtual reality experiment with Oculus Rift®. *J Transp Saf Secur* 2016;8:101–17. <https://doi.org/10.1080/19439962.2015.1046621>.
- [28] Lovreglio R, Fonzone A, dell’Olio L. A mixed logit model for predicting exit choice during building evacuations. *Transp Res Part A Policy Pract* 2016;92:59–75. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.06.018>.
- [29] Lovreglio R, Ronchi E, Nilsson D. Calibrating floor field cellular automaton models for pedestrian dynamics by using likelihood function optimization. *Phys A Stat Mech Its Appl* 2015;438:308–20. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2015.06.040>.
- [30] Moussaïd M, Kapadia M, Thrash T, Sumner RW, Gross M, Helbing D, et al. Crowd behaviour during high-stress evacuations in an immersive virtual environment. *J R Soc Interface* 2016;13:4–11. <https://doi.org/10.1098/rsif.2016.0414>.
- [31] Kyriakou M, Pan X, Chrysanthou Y. Interaction with virtual crowd in Immersive and semi-Immersive Virtual Reality systems. *Comput Animat Virtual Worlds* 2017;28.

<https://doi.org/10.1002/cav.1729>.

- [32] Ríos A, Mateu D, Pelechano N. Follower Behavior in a Virtual Environment. IEEE Virtual Humans Crowds Immersive Environ 2018.
- [33] Feng Z, González VA, Amor R, Lovreglio R, Cabrera-Guerrero G. Immersive virtual reality serious games for evacuation training and research: A systematic literature review. Comput Educ 2018;127:252–66. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2018.09.002>.
- [34] Kinateder M, Ronchi E, Nilsson D, Kobes M, Müller M, Pauli P, et al. Virtual reality for fire evacuation research. 2014 Fed Conf Comput Sci Inf Syst FedCSIS 2014 2014;2014-Janua:313–21. <https://doi.org/10.15439/2014F94>.
- [35] Pathfinder n.d. <https://support.thunderheadeng.com/docs/pathfinder/2021-2/user-manual/>.
- [36] Kinateder M, Gromer D, Gast P, Buld S, Müller M, Jost M, et al. The effect of dangerous goods transporters on hazard perception and evacuation behavior - A virtual reality experiment on tunnel emergencies. Fire Saf J 2015;78:24–30. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2015.07.002>.
- [37] ΥΠ Υποδομών Μεταφορών και Δικτύων. ΟΔΗΓΙΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΠΙΟΝΗΣΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΧΩΡΙΣ ΕΜΠΛΟΚΗ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΜΕΤΑΦΕΡΟΥΝ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΑ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΑ ΜΕΣΑ ΑΠΟ ΟΔΙΚΕΣ ΣΗΡΑΓΓΕΣ ΠΟΥ ΕΜΠΙΠΤΟΥΝ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥ Π.Δ. 230/07 2011:1–43.
- [38] Κωτσάκης Β. Μελέτη συμπεριφοράς εκκένωσης οδικής σήραγγας στην περίπτωση εγγύτητας των χρηστών σε τροχαίο ατύχημα , με την χρήση εικονικής πραγματικότητας ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Του Βασίλη Κωτσάκη 2022.
- [39] Thunderhead Engineering. Fractional Effective Dose Integration with Evacuation Results n.d.:3. <https://support.thunderheadeng.com/tutorials/pathfinder/fractional-effective-dose-integration/>.