



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

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΟΔΙΚΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ξυνού Βασιλική

Επιβλέπων: Δαμίγος Δημήτριος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2023



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

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΟΔΙΚΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ

MODELLING OF A ROAD TUNNEL VENTILATION SYSTEM UNDER FIRE CONDITIONS

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ξυνού Βασιλική

Επιβλέπων: Δαμίγος Δημήτριος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή

Δαμίγος Δημήτριος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Μιχαλακόπουλος Θεόδωρος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Μπενάρδος Ανδρέας, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2023

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	i
EXTENDED ABSTRACT	iii
1 Εισαγωγή.....	1
2 Συστήματα αερισμού σηράγγων.....	6
2.1 Εισαγωγή.....	6
2.2 Φυσικός αερισμός	6
2.3 Μηχανικός αερισμός	8
2.3.1 Διαμήκης αερισμός.....	8
2.3.2 Ημιεγκάρσιος αερισμός.....	11
2.3.3 Εγκάρσιος αερισμός.....	13
2.4 Επιλογή τύπου συστήματος αερισμού	14
2.5 Χαρακτηριστικά ανεμιστήρων	15
2.5.1 Αξονικοί ανεμιστήρες	15
2.5.2 Ταχύτητα ανεμιστήρων.....	16
2.5.3 Αναστρεψιμότητα των ανεμιστήρων	16
2.5.4 Υπό συνθήκες θερμότητας	16
3 Ανάγκες αερισμού σε κανονικές συνθήκες	17
3.1 Γενικά	17
3.2 Τύποι εκπομπών οχημάτων.....	17
3.2.1 Μονοξείδιο του άνθρακα	17
3.2.2 Οξείδια του αζώτου	18
3.2.3 Αιωρούμενα σωματίδια.....	18
3.3 Επιρροή υψομέτρου	19
3.4 Μέγιστες επιτρεπόμενες συγκεντρώσεις	19
3.5 Δεδομένα για την κυκλοφορία των οχημάτων στη σήραγγα.....	21
3.6 Υπολογισμός απαιτούμενης παροχής αέρα	22
3.6.1 Υπολογισμός εκπομπών ρύπων.....	23
3.6.2 Υπολογισμός αριθμού οχημάτων ανά κατηγορία	24
3.7 Υπολογισμός πτώσης πίεσης	25
4 Ανάγκες αερισμού σε περίπτωση πυρκαγιάς.....	29

4.1	Εισαγωγή.....	29
4.2	Χαρακτηριστικά φωτιάς.....	29
4.2.1	Θερμική Ισχύς (HRR)	29
4.2.2	Θερμοκρασία	33
4.3	Backlayering	34
4.4	Κρίσιμη ταχύτητα.....	35
4.5	Υπολογισμός πτώσης πίεσης λόγω πυρκαγιάς.....	38
4.6	Προσδιορισμός τύπου και αριθμού ανεμιστήρων.....	39
4.7	Κριτήρια έκτακτης ανάγκης και εγκαταστάσεις διαφυγής	40
5	Έρευνες με υπολογιστική προσομοίωση	42
6	Περίπτωση μελέτης.....	57
6.1	Υπολογισμός φορτίων και πυκνοτήτων κυκλοφορίας	58
6.2	Υπολογισμός παροχής φρέσκου αέρα.....	58
6.3	Υπολογισμός πτώσης πίεσης εντός της σήραγγας	59
6.4	Υπολογισμός αερισμού υπό συνθήκες πυρκαγιάς.....	60
6.5	Προσδιορισμός τύπου και αριθμού απαιτούμενων ανεμιστήρων	61
7	Μονοδιάστατη ανάλυση	63
7.1	Σημαντικές παράμετροι των αναλύσεων	63
7.2	Αποτελέσματα	65
7.2.1	Φωτιά στο μέσον της σήραγγας	65
7.2.2	Φωτιά 100 m από το στόμιο εξόδου	74
8	Τρισδιάστατη ανάλυση	84
8.1	Γεωμετρία προσομοιώματος σήραγγας	84
8.1.1	Σήραγγα	84
8.1.2	Κάνναβος	85
8.2	Σημαντικές παράμετροι των αναλύσεων	85
8.3	Αναλύσεις	87
8.3.1	Φωτιά στο μέσον	87
8.3.2	Φωτιά 100 m από το στόμιο εξόδου	95
9	Συμπεράσματα - Προτάσεις.....	105
9.1	Τελικά συμπεράσματα.....	105
9.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	106
10	Βιβλιογραφία	107

Περιεχόμενα Σχημάτων

Σχήμα 1. Πρόσφατες σήραγγες μετά από πυρκαγιά [3]	2
Σχήμα 2. Φυσικός αερισμός: (α) Σχηματική απεικόνιση, (β) ταχύτητα αέρα κατά μήκος της σήραγγας, (γ) ποσοστό ρυπαντών κατά μήκος της σήραγγας [14].....	7
Σχήμα 3. Φυσικός αερισμός με φρέαρ: (α) Σχηματική απεικόνιση, (β) ταχύτητα αέρα κατά μήκος της σήραγγας, (γ) ποσοστό ρυπαντών κατά μήκος της σήραγγας [14].....	7
Σχήμα 4. Διαμήκης αερισμός με εγχυτήρα: (α) Σχηματική απεικόνιση, (β) ταχύτητα αέρα κατά μήκος της σήραγγας, (γ) ποσοστό ρυπαντών κατά μήκος της σήραγγας [14].....	9
Σχήμα 5. Διαμήκης αερισμός με φρέαρ: (α) Σχηματική απεικόνιση, (β) ταχύτητα αέρα κατά μήκος της σήραγγας, (γ) ποσοστό ρυπαντών κατά μήκος της σήραγγας [14].....	9
Σχήμα 6. Διαμήκης αερισμός με δύο φρέατα: (α) Σχηματική απεικόνιση, (β) ταχύτητα αέρα κατά μήκος της σήραγγας, (γ) ποσοστό ρυπαντών κατά μήκος της σήραγγας [14]	10
Σχήμα 7. Διαμήκης αερισμός: (α) Σχηματική απεικόνιση, (β) ταχύτητα αέρα κατά μήκος της σήραγγας, (γ) ποσοστό ρυπαντών κατά μήκος της σήραγγας [14].....	10
Σχήμα 8. Διαμήκης αερισμός με ανεμιστήρες [14].....	11
Σχήμα 9. Ημιεγκάρσιος αερισμός με εισαγωγή αέρα [14]	12
Σχήμα 10. Ημιεγκάρσιος αερισμός σε περίπτωση πυρκαγιάς [17]	12
Σχήμα 11. Εγκάρσιος αερισμός με ομοιόμορφη απαγωγή και εξαγωγή του αέρα [14]	13
Σχήμα 12. Εγκάρσιος αερισμός σε περίπτωση πυρκαγιάς [17]	14
Σχήμα 13. Εξέλιξη καπνού σε σήραγγα με μηδενική κλίση και χωρίς σύστημα αερισμού [21]	29
Σχήμα 14. Ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας για διάφορες περιπτώσεις ανάπτυξης φωτιάς [11].....	30
Σχήμα 15. Τυπικό διάγραμμα ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας – χρόνου [32]	32
Σχήμα 16. Η επιρροή του διαμήκη αερισμού με την κρίσιμη ταχύτητα [21]	35
Σχήμα 17. Συσχέτιση K_g με την κατά μήκος κλίση της σήραγγας [1]	36
Σχήμα 18. Διάγραμμα ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας - ταχύτητας αερισμού με τις αντίστοιχες περιοχές [31].....	37
Σχήμα 19. Κρίσιμη ταχύτητα συναρτήσει του συντελεστή άνωσης για διαφορετικά ύψη της σήραγγας [38].....	38
Σχήμα 20. Κάτοψη της σήραγγας [6].....	42
Σχήμα 21. Πυρκαγιά στη ζώνη 3 [6]	43
Σχήμα 22. Πυρκαγιά στη ζώνη 3 - ταχύτητα του αέρα [6]	43
Σχήμα 23. Χρόνος όπου ο καπνός παραμένει στρωματοποιημένος στην οροφή της σήραγγας συναρτήσει της ταχύτητα του αέρα (Pucher, 1999).....	43
Σχήμα 24. Πυρκαγιά στη ζώνη 3 - θερμοκρασία αέρα [6]	44
Σχήμα 25. Πυρκαγιά στη ζώνη 3 - θερμοκρασία τοίχου [6].....	44
Σχήμα 26. Προσομοίωση διατομής σήραγγας [8].....	45
Σχήμα 27. Συγκέντρωση καπνού σε διάφορα ύψη μεταξύ της μέσης και δεξιάς λωρίδας (α) $h=1$ m (β) $h=2$ m και (γ) $h=3$ m [8].....	45
Σχήμα 28. Διακυμάνσεις θερμοκρασίας σε διάφορα ύψη μεταξύ της μέσης και δεξιάς λωρίδας (α) $h=1$ m (β) $h=2$ m και (γ) $h=3$ m [8]	46
Σχήμα 29. Μέγεθος της ταχύτητας σε διάφορα ύψη μεταξύ της μέσης και δεξιάς λωρίδας (α) $h=1$ m (β) $h=2$ m και (γ) $h=3$ m [8].....	46
Σχήμα 30. Προσομοίωση διατομής σήραγγας [7].....	47

Σχήμα 31. Σχηματική απεικόνιση του εμποδίου και της πυρκαγιάς: (α) χωρίς κανένα εμπόδιο, (β) με εμπόδιο στα 0 m από το δάπεδο της σήραγγας, (γ) με εμπόδιο στα 0.03 m από το δάπεδο της σήραγγας, (δ) με εμπόδιο στα 0.06 m από το δάπεδο της σήραγγας [7].....	47
Σχήμα 32. Μήκος επιστροφής του καπνού συναρτήσει της ταχύτητας του αερισμού με και χωρίς εμπόδιο για πυρκαγιά 12.9kW [7].....	48
Σχήμα 33. Μεταβολή της ταχύτητας αερισμού συναρτήσει του μήκους επιστροφής του καπνού με την ύπαρξη εμποδίου [7]	48
Σχήμα 34. Διαδικασία εξάπλωσης του καπνού εντός της σήραγγας (α) κάτοψη (β) πλάγια όψη [43]	49
Σχήμα 35. Προσομοίωση της σήραγγας [43]	50
Σχήμα 36. Προσδιορισμός της έναρξης της μονοδιάστατης ροής για θερμική ισχύ: (α) 5 MW (β) 15 MW (γ) 30 MW [43]	51
Σχήμα 37. Σχέση μεταξύ του αδιάστατου μήκους της κοντινής περιοχής με τον αδιάστατο ρυθμό απελευθέρωσης της φωτιάς [43]	52
Σχήμα 38. Διαστάσεις της σήραγγας (α) όψη (β) τομή [10].....	52
Σχήμα 39. Θερμική ροή συναρτήσει της κλίσης της σήραγγας (HRR = 3 MW) [10]	54
Σχήμα 40. Θερμοκρασία και πιέσεις ανάντη της πυρκαγιάς (HRR = 3MW) [10].....	55
Σχήμα 41. Επίδραση της κλίσης της σήραγγας συναρτήσει (α) ταχύτητα εξόδου καπνού (β) ταχύτητα εισόδου καθαρού αέρα [10].....	56
Σχήμα 42. Διαμήκης κατανομή της θερμοκρασία στην οροφή της σήραγγας για διάφορες κλίσεις (HRR = 3 MW) [10].....	56
Σχήμα 43. Προσομοίωση σήραγγας μέσω Camatt	65
Σχήμα 44. Προσομοίωση φωτιάς στο μέσον της σήραγγας	65
Σχήμα 45. Κυκλοφοριακή συμφόρηση με πυρκαγιά στο μέσον της σήραγγας	66
Σχήμα 46. Κατανομή της θερμοκρασίας του αέρα για φωτιά στο μέσον με HRR=15 MW	66
Σχήμα 47. Κατανομή των ρυπογόνων ουσιών για φωτιά στο μέσον με HRR=15 MW	67
Σχήμα 48. Θερμοκρασία του αέρα εντός της σήραγγας για $x=760$ m και HRR=15 MW	67
Σχήμα 49. Ταχύτητα αέρα εντός της σήραγγας για $x=760$ m και HRR=15 MW	68
Σχήμα 50. Ορατότητα κατά μήκος της σήραγγας για $t=200$ sec, $t=220$ sec, $t=300$ sec και HRR=15 MW .	68
Σχήμα 51. Κατανομή της θερμοκρασίας του αέρα για φωτιά στο μέσον με HRR=30 MW	69
Σχήμα 52. Κατανομή των ρυπογόνων ουσιών για φωτιά στο μέσον με HRR=30 MW	69
Σχήμα 53. Θερμοκρασία εντός της σήραγγας για $x=760$ m και HRR=30 MW	70
Σχήμα 54. Ταχύτητα αέρα εντός της σήραγγας για $x=760$ m και HRR=30 MW	70
Σχήμα 55. Ορατότητα κατά μήκος της σήραγγας για $t=200$ sec, $t=220$ sec, $t=300$ sec και HRR=30 MW .	71
Σχήμα 56. Κατανομή της θερμοκρασίας του αέρα για φωτιά στο μέσον με HRR=50 MW	72
Σχήμα 57. Κατανομή των ρυπογόνων ουσιών για φωτιά στο μέσον με HRR=50 MW	72
Σχήμα 58. Θερμοκρασία εντός της σήραγγας για $x=760$ m και HRR=50 MW	73
Σχήμα 59. Ταχύτητα αέρα εντός της σήραγγας για $x=760$ m και HRR=50 MW	73
Σχήμα 60. Ορατότητα κατά μήκος της σήραγγας για $t=200$ sec, $t=220$ sec, $t=300$ sec και HRR=50 MW .	74
Σχήμα 61. Προσομοίωση φωτιάς κοντά στο στόμιο εξόδου	74
Σχήμα 62. Κυκλοφοριακή συμφόρηση με πυρκαγιά κοντά στο στόμιο εξόδου	75
Σχήμα 63. Κατανομή της θερμοκρασίας του αέρα για φωτιά κοντά στο στόμιο εξόδου με HRR=15 MW	75
Σχήμα 64. Κατανομή των ρυπογόνων ουσιών για φωτιά κοντά στο στόμιο εξόδου με HRR=15 MW.....	76
Σχήμα 65. Θερμοκρασία εντός της σήραγγας για $x=1400$ m και HRR=15 MW	76

Σχήμα 66. Ταχύτητα αέρα εντός της σήραγγας για $x=1400$ m και $HRR=15$ MW	77
Σχήμα 67. Ορατότητα κατά μήκος της σήραγγας για $t=200$ sec, $t=210$ sec, $t=300$ sec και $HRR=15$ MW .	77
Σχήμα 68. Κατανομή της θερμοκρασίας του αέρα για φωτιά κοντά στο στόμιο εισόδου με $HRR=30$ MW	78
Σχήμα 69. Κατανομή των ρυπογόνων ουσιών για φωτιά κοντά στο στόμιο εισόδου με $HRR=30$ MW	78
Σχήμα 70. Θερμοκρασία εντός της σήραγγας για $x=1400$ m και $HRR=30$ MW	79
Σχήμα 71. Ταχύτητα αέρα εντός της σήραγγας για $x=1400$ m και $HRR=30$ MW	79
Σχήμα 72. Ορατότητα κατά μήκος της σήραγγας για $t=190$ sec, $t=210$ sec, $t=300$ sec και $HRR=30$ MW .	80
Σχήμα 73. Κατανομή της θερμοκρασίας του αέρα για φωτιά κοντά στο στόμιο εξόδου με $HRR=50$ MW	81
Σχήμα 74. Κατανομή των ρυπογόνων ουσιών για φωτιά κοντά στο στόμιο εξόδου με $HRR=50$ MW.....	81
Σχήμα 75. Θερμοκρασία εντός της σήραγγας για $x=1400$ m και $HRR=50$ MW	82
Σχήμα 76. Ταχύτητα αέρα εντός της σήραγγας για $x=1400$ m και $HRR=50$ MW	82
Σχήμα 77. Ορατότητα κατά μήκος της σήραγγας για $t=190$ sec, $t=200$ sec, $t=300$ sec και $HRR=50$ MW .	83
Σχήμα 78. Διατομή σήραγγας μέσω Pyrosim.....	84
Σχήμα 79. Λεπτομέρεια καννάβου στο στόμιο εισόδου της σήραγγας	85
Σχήμα 80. Όψη σήραγγας.....	86
Σχήμα 81. Βήματα τρισδιάστατης ανάλυσης	87
Σχήμα 82. Κάτοψη σήραγγας με φωτιά στο μέσον της	88
Σχήμα 83. Ρυθμός απελευθέρωσης της θερμότητας, $HRR=15$ MW, συναρτήσει του χρόνου της ανάλυσης	88
Σχήμα 84. Επιρροή της θερμοκρασίας στον ανεμιστήρα No. 8, για φωτιά στο μέσον και $HRR=15$ MW .	89
Σχήμα 85. Φαινόμενο αναστροφής του καπνού για φωτιά στο μέσον της σήραγγας με $HRR=15$ MW ...	89
Σχήμα 86. Μηδενισμός του φαινομένου της αναστροφής του καπνού για φωτιά στο μέσον της σήραγγας με $HRR=15$ MW	89
Σχήμα 87. Διανύσματα ταχύτητας για: (α) 520 sec (β) 540 sec (γ) 560 sec στο σημείο που μεγιστοποιείται το backlayering για $HR=15$ MW και φωτιά στο μέσον της σήραγγας	90
Σχήμα 88. Ρυθμός απελευθέρωσης της θερμότητας, $HRR=30$ MW, συναρτήσει του χρόνου της ανάλυσης	91
Σχήμα 89. Επιρροή της θερμοκρασίας στον ανεμιστήρα No. 8, για φωτιά στο μέσον και $HRR=30$ MW .	91
Σχήμα 90. Φαινόμενο αναστροφής του καπνού για φωτιά στο μέσον της σήραγγας με $HRR=30$ MW ...	92
Σχήμα 91. Μηδενισμός του φαινομένου της αναστροφής του καπνού για φωτιά στο μέσον της σήραγγας με $HRR=30$ MW	92
Σχήμα 92. Διανύσματα ταχύτητας για: (α) 520 sec (β) 540 sec (γ) 560 sec στο σημείο που μεγιστοποιείται το backlayering για $HR=30$ MW και φωτιά στο μέσον της σήραγγας	92
Σχήμα 93. Ρυθμός απελευθέρωσης της θερμότητας, $HRR=50$ MW, συναρτήσει του χρόνου της ανάλυσης	93
Σχήμα 94. Επιρροή της θερμοκρασίας στους ανεμιστήρες No. 8 και No. 9, για φωτιά στο μέσον και $HRR=50$ MW.....	93
Σχήμα 95. Φαινόμενο αναστροφής του καπνού για φωτιά στο μέσον της σήραγγας με $HRR=50$ MW ...	94
Σχήμα 96. Μηδενισμός του φαινομένου της αναστροφής του καπνού για φωτιά στο μέσον της σήραγγας με $HRR=50$ MW	94
Σχήμα 97. Διανύσματα ταχύτητας για: (α) 520 sec (β) 540 sec (γ) 560 sec στο σημείο που μεγιστοποιείται το backlayering για $HR=50$ MW και φωτιά στο μέσον της σήραγγας	95

Σχήμα 98. Κάτοψη σήραγγας με φωτιά 100 m από το στόμιο εξόδου	95
Σχήμα 99. Ρυθμός απελευθέρωσης της θερμότητας, HRR=15 MW, συναρτήσει του χρόνου της ανάλυσης	96
Σχήμα 100. Θερμοκρασία εντός της σήραγγας για φωτιά HRR=15 MW, 100 m από το στόμιο εξόδου ..	96
Σχήμα 101. Φαινόμενο αναστροφής του καπνού για φωτιά 100 m από το στόμιο εξόδου της σήραγγας με HRR=15 MW	97
Σχήμα 102. Μηδενισμός του φαινομένου της αναστροφής του καπνού για φωτιά 100 m από το στόμιο εξόδου της σήραγγας με HRR=15 MW	97
Σχήμα 103. Διανύσματα ταχύτητας για: (α) 510 sec (β) 530 sec (γ) 550 sec στο σημείο που μεγιστοποιείται το backlayering για HR=15 MW και φωτιά κοντά στο στόμιο εξόδου	98
Σχήμα 104. Ρυθμός απελευθέρωσης της θερμότητας, HRR=30 MW, συναρτήσει του χρόνου της ανάλυσης	99
Σχήμα 105. Θερμοκρασία εντός της σήραγγας για φωτιά HRR=30 MW, 100 m από το στόμιο εξόδου ..	99
Σχήμα 106. Φαινόμενο αναστροφής του καπνού για φωτιά 100 m από το στόμιο εξόδου της σήραγγας με HRR=30 MW	100
Σχήμα 107. Μηδενισμός του φαινομένου της αναστροφής του καπνού για φωτιά 100 m από το στόμιο εξόδου της σήραγγας με HRR=30 MW	100
Σχήμα 108. Διανύσματα ταχύτητας για: (α) 510 sec (β) 530 sec (γ) 550 sec στο σημείο που μεγιστοποιείται το backlayering για HR=30 MW και φωτιά κοντά στο στόμιο εξόδου	101
Σχήμα 109. Ρυθμός απελευθέρωσης της θερμότητας, HRR=50 MW, συναρτήσει του χρόνου της ανάλυσης	102
Σχήμα 110. Θερμοκρασία εντός της σήραγγας για φωτιά HRR=50 MW, 100 m από το στόμιο εξόδου	102
Σχήμα 111. Φαινόμενο αναστροφής του καπνού για φωτιά 100 m από το στόμιο εξόδου της σήραγγας με HRR=50 MW	103
Σχήμα 112. Μηδενισμός του φαινομένου της αναστροφής του καπνού για φωτιά 100 m από το στόμιο εξόδου της σήραγγας με HRR=50 MW	103
Σχήμα 113. Διανύσματα ταχύτητας για: (α) 510 sec (β) 530 sec (γ) 550 sec στο σημείο που μεγιστοποιείται το backlayering για HR=50 MW και φωτιά κοντά στο στόμιο εξόδου	104

Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1. Επιλεγμένα μεγάλα ατυχήματα πυρκαγιάς σε σήραγγες με σοβαρό αριθμό θυμάτων τα τελευταία 50 χρόνια [3]	3
Πίνακας 2. Περιοχές εφαρμογής των συστημάτων αερισμού [19]	15
Πίνακας 3. Τιμές σχεδιασμού και λειτουργίας για το μονοξείδιο του άνθρακα CO [23]	18
Πίνακας 4. Συνθήκες ορατότητας και ο συντελεστής K [23]	19
Πίνακας 5. Μέγιστη επιτρεπόμενη συγκέντρωση [18]	20
Πίνακας 6. Βαθμίδες λειτουργίας και αντίστοιχα επίπεδα ρυπαντών [18]	20
Πίνακας 7. Μέγιστες κυκλοφοριακές πυκνότητες για υπεραστικές και αστικές σήραγγες [23]	22
Πίνακας 8. Ποσόστωση της τεχνολογίας του στόλου οχημάτων για τον υπολογισμό των εκπομπών ρύπων για το έτος 2018 [23]	24
Πίνακας 9. Τιμές του συντελεστή ανάπτυξης α [11]	30
Πίνακας 10. Ρυθμός απελευθέρωσης της θερμότητας με βάσει τον τύπο του οχήματος [21]	31
Πίνακας 11. Χρόνοι διάρκειας πυρκαγιάς και εύρος μέγιστου ρυθμού απελευθέρωσης της θερμότητας [32]	32
Πίνακας 12. Ρυθμός απελευθέρωσης της θερμότητας και ρυθμός ροής του καπνού για διαφορετικά σενάρια πυρκαγιών [33]	33
Πίνακας 13. Μέγιστες αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες και μέγιστη θερμική ισχύς [4]	34
Πίνακας 14. Κριτήρια για την ασφαλή εκκένωση της σήραγγας [42]	41
Πίνακας 15. Σενάρια προσομοίωσης [43]	49
Πίνακας 16. Χαρακτηριστικά σήραγγας και οχημάτων	57
Πίνακας 17. Ποσόστωση οχημάτων κυκλοφορίας	57
Πίνακας 18. Ωριαίο φορτίο αιχμής	58
Πίνακας 19. Υπολογισμός κυκλοφοριακού φορτίου	58
Πίνακας 20. Απαιτούμενη παροχή νωπού αέρα για ταχύτητα 0 km/h	59
Πίνακας 21. Απαιτούμενη παροχή νωπού αέρα για ταχύτητα 60 km/h	59
Πίνακας 22. Πτώση πίεσης εντός της σήραγγας σε κανονική λειτουργία	60
Πίνακας 23. Πτώση πίεσης εντός της σήραγγας στην περίπτωση πυρκαγιάς	60
Πίνακας 24. Βασικότερα χαρακτηριστικά σήραγγας	62
Πίνακας 25. Χαρακτηριστικά σήραγγας	63
Πίνακας 26. Χαρακτηριστικά ανεμιστήρων	63
Πίνακας 27. Παράμετροι για την κυκλοφορία	63
Πίνακας 28. Χαρακτηριστικά περιβάλλοντος σήραγγας	64
Πίνακας 29. Σενάρια μονοδιάστατης ανάλυσης	64
Πίνακας 30. Χαρακτηριστικά ανεμιστήρων	86
Πίνακας 31. Διαστάσεις επιβατικών και φορτηγών οχημάτων	86
Πίνακας A- 1. Εκπομπές CO για επιβατικά βενζινοκίνητα οχήματα έτους αναφοράς 2018	1
Πίνακας A- 2. Εκπομπές NO _x για επιβατικά βενζινοκίνητα οχήματα έτους αναφοράς 2018	1
Πίνακας A- 3. Εκπομπές καπνού και σωματιδίων για επιβατικά βενζινοκίνητα οχήματα έτους αναφοράς 2018	2
Πίνακας A- 4. Εκπομπές CO για επιβατικά πετρελαιοκίνητα οχήματα έτους αναφοράς 2018	2

Πίνακας Α- 5. Εκπομπές NO _x για επιβατικά πετρελαιοκίνητα οχήματα έτους αναφοράς 2018.....	3
Πίνακας Α- 6. Εκπομπές καπνού και σωματιδίων για επιβατικά πετρελαιοκίνητα οχήματα έτους αναφοράς 2018.....	3
Πίνακας Α- 7. Εκπομπές CO για ελαφρύ επαγγελματικό βενζινοκίνητο όχημα έτους αναφοράς 2018.....	4
Πίνακας Α- 8. Εκπομπές NO _x για ελαφρύ επαγγελματικό βενζινοκίνητο όχημα έτους αναφοράς 2018 ...	4
Πίνακας Α- 9. Εκπομπές καπνού και σωματιδίων για ελαφρύ επαγγελματικό βενζινοκίνητο όχημα έτους αναφοράς 2018.....	5
Πίνακας Α- 10. Εκπομπές CO για ελαφρύ επαγγελματικό πετρελαιοκίνητο όχημα έτους αναφοράς 2018	5
Πίνακας Α- 11. Εκπομπές NO _x για ελαφρύ επαγγελματικό πετρελαιοκίνητο όχημα έτους αναφοράς 2018	6
Πίνακας Α- 12. Εκπομπές καπνού και σωματιδίων για ελαφρύ επαγγελματικό πετρελαιοκίνητο όχημα έτους αναφοράς 2018	6
Πίνακας Α- 13. Εκπομπές CO για βαρύ φορτηγό πετρελαιοκίνητο όχημα έτους αναφοράς 2018.....	7
Πίνακας Α- 14. Εκπομπές NO _x για βαρύ φορτηγό πετρελαιοκίνητο όχημα έτους αναφοράς 2018.....	7
Πίνακας Α- 15. Εκπομπές καπνού και σωματιδίων για βαρύ φορτηγό πετρελαιοκίνητο όχημα έτους αναφοράς 2018.....	8
Πίνακας Α- 16. Συντελεστής βελτίωσης της τεχνολογίας για επιβατικά οχήματα	8
Πίνακας Α- 17. Συντελεστής βελτίωσης της τεχνολογίας για ελαφρύ επαγγελματικό όχημα	8
Πίνακας Α- 18. Συντελεστής βελτίωσης της τεχνολογίας για βαρύ φορτηγό όχημα	8
Πίνακας Α- 19. Συντελεστής διόρθωσης υψομέτρου για επιβατικά οχήματα	9
Πίνακας Α- 20. Συντελεστής βάρους για βαρύ φορτηγό όχημα.....	9
Πίνακας Α- 21. Εκπομπές παραγόμενων σωματιδίων άλλου τύπου για επιβατικά οχήματα	9
Πίνακας Α- 22. Εκπομπές παραγόμενων σωματιδίων άλλου τύπου για βαρύ φορτηγό όχημα.....	10

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να μελετηθεί το σύστημα του αερισμού μιας οδικής σήραγγας σε περίπτωση πυρκαγιάς ως προς την κρίσιμη ταχύτητα και το φαινόμενο της αναστροφής του καπνού, μέσω μονοδιάστατων και τρισδιάστατων αναλύσεων. Πιο συγκεκριμένα, τα προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν για τις μονοδιάστατες αναλύσεις είναι το Camatt, ενώ για τις τρισδιάστατες αναλύσεις επιλέχθηκε το πρόγραμμα Pygosim. Συγκεκριμένα, η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από εννέα κεφάλαια, ήτοι:

Στο 1^ο Κεφάλαιο γίνεται μια αναφορά σε ορισμένα μεγάλα και σοβαρά ατυχήματα που έχουν συμβεί παγκοσμίως στα υπόγεια έργα.

Στο 2^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συστήματα του αερισμού, φυσικού και μηχανικού, πώς γίνεται η επιλογή του τύπου συστήματος αερισμού σύμφωνα με την εκάστοτε σήραγγα και τέλος ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά των ανεμιστήρων.

Στο 3^ο Κεφάλαιο περιγράφονται οι ανάγκες αερισμού σε κανονικές συνθήκες. Αρχικά, περιγράφονται οι εκπομπές των οχημάτων, ανά τύπο οχήματος, καθώς και ο υπολογισμός του απαιτούμενου νωπού αέρα και ο υπολογισμός της πτώσης πίεσης σύμφωνα με την κυκλοφορία των οχημάτων. Ύστερα περιγράφεται ο υπολογισμός της εκπομπής των ρύπων, όπως και ο υπολογισμός του αριθμού των οχημάτων ανά κατηγορία.

Στο 4^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται εκτενώς θέματα που αφορούν στην περίπτωση της πυρκαγιάς σε υπόγειο χώρο. Πιο συγκεκριμένα, περιγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά της φωτιάς και του καπνού, και παρουσιάζεται ο τρόπος υπολογισμού της πτώσης πίεσης λόγω πυρκαγιάς. Επίσης, προσδιορίζεται ο τύπος και ο αριθμός των ανεμιστήρων που απαιτούνται, σύμφωνα με τις επιτρεπόμενες συγκεντρώσεις, και αναφέρονται τα κριτήρια έκτακτης ανάγκης και οι απαιτούμενες εγκαταστάσεις διαφυγής.

Στο 5^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται επιλεγμένες δημοσιεύσεις που αφορούν έρευνες, με υπολογιστική προσομοίωση, σχετικά με την εκδήλωση πυρκαγιάς σε οδική σήραγγα.

Στο 6^ο Κεφάλαιο περιγράφεται η υπό εξέταση οδική σήραγγα, όπως και ο αναλυτικός προσδιορισμός του τύπου και του αριθμού των απαιτούμενων ανεμιστήρων.

Στο 7^ο Κεφάλαιο γίνεται η μονοδιάστατη ανάλυση της σήραγγας και περιγράφονται οι βασικές παράμετροι του προβλήματος που διαφοροποιούν τις αναλύσεις. Ύστερα, παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα για κάθε σενάριο.

Στο 8^ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται η τρισδιάστατη ανάλυση της σήραγγας και περιγράφονται οι βασικές παράμετροι του προβλήματος που διαφοροποιούν τις αναλύσεις. Τέλος, παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα για κάθε σενάριο.

Στο 9^ο Κεφάλαιο συνοψίζονται τα κυριότερα συμπεράσματα και οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Δαμίγο Δημήτρη, καθώς και την υποψήφια διδάκτωρ Ε.Μ.Π. κ. Καραγιάννη Μαρία και τον διδάκτορα Ε.Μ.Π. κ. Καλλιανιώτη Αναστάσιο για την αξιοσημείωτη συνεισφορά τους και την εν γένει υποστήριξή τους στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την συνεχή συμπαράσταση και ενθάρρυνσή τους.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το σύστημα του αερισμού, σε μια οδική σήραγγα, είναι απαραίτητο για την αραιώση των ρύπων εκπομπής των οχημάτων και για τον έλεγχο των τοξικών αερίων σε περίπτωση πυρκαγιάς. Ωστόσο, η τελική διαστασιολόγηση του συστήματος αερισμού γίνεται σύμφωνα με την δυσμενέστερη περίπτωση, η οποία είναι η εκδήλωση της πυρκαγιάς.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η εκπόνηση αναλύσεων μονοδιάστατης (1D) και τρισδιάστατης (3D) προσομοίωσης της εκδήλωσης και ανάπτυξης πυρκαγιάς ισχύος 15 MW, 30 MW και 50 MW, και η παρακολούθηση του φαινομένου της αντιστροφής του καπνού σε σχέση με την κρίσιμη ταχύτητα. Η υπό εξέταση σήραγγα έχει διαστασιολογηθεί με μηχανικό αερισμό για φωτιά σχεδιασμού 50 MW, και έχει μήκος 1500 m με ομοιόμορφη κλίση +2%. Αποτελείται από μια οπή, δύο κατευθύνσεων κυκλοφορίας, με κυκλοφοριακό φόρτο τα 1000 οχήματα ανά κατεύθυνση, εκ των οποίων το 80% είναι επιβατικά και το 20% βαρέα οχήματα. Εκτελέστηκαν έξι μονοδιάστατες αναλύσεις και έξι τρισδιάστατες αναλύσεις, για δύο διαφορετικές θέσεις εκδήλωσης πυρκαγιάς, στο μέσον της σήραγγας και 100 m από το στόμιο εξόδου. Για την μονοδιάστατη ανάλυση χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό CAMATT 2.20, ενώ για την τρισδιάστατη ανάλυση χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Pyrosim. Σημειώνεται ότι τα δεδομένα της μελέτης είναι από την τελική έκθεση του έργου «Προκαταρκτική διερεύνηση και σχεδιασμός από το Μετσόβιο Κέντρο Διεπιστημονικής Έρευνας οδικής σήραγγας μεταξύ των οικισμών Θεοδωριάνων – Μελισσουργών». Τα βασικότερα συμπεράσματα που εξάγονται από την εργασία είναι τα εξής:

- ❖ Το διαμήκες σύστημα αερισμού λειτούργησε ικανοποιητικά για το σύνολο των αναλύσεων, καθώς η αναστροφή του καπνού περιορίστηκε και ελέγχθηκε από την στιγμή που ενεργοποιήθηκαν οι ανεμιστήρες.
- ❖ Στην μονοδιάστατη ανάλυση, παρατηρείται ότι η θέση της πυρκαγιάς, σε σχέση με το στόμιο, επηρεάζει το μήκος του backlayering. Συγκεκριμένα, όσο πιο μακριά είναι η θέση της πυρκαγιάς από τα στόμια της σήραγγας, τόσο περισσότερο εκτείνεται η αντιστροφή του καπνού.
- ❖ Στις τρισδιάστατες αναλύσεις παρατηρήθηκε ότι όσο αυξάνεται ο ρυθμός ανάπτυξης της θερμότητας, αυξάνεται το μήκος του καπνού προς την ανάντη πλευρά όταν το backlayering είναι μέγιστο.
- ❖ Γενικά, στις τρισδιάστατες αναλύσεις το backlayering είναι μεγαλύτερο, καθώς γίνεται ταυτόχρονη κίνηση του καπνού και προς τις δύο κατευθύνσεις της σήραγγας. Σε αντίθεση στις μονοδιάστατες αναλύσεις, ο καπνός γυρνάει μόλις η μέση ταχύτητα αλλάξει πρόσημο.
- ❖ Η προσομοίωση της φωτιάς διαφοροποιείται ανά πρόγραμμα, συνεπώς δεν μπορεί να γίνει άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων. Στην μονοδιάστατη ανάλυση, ο τύπος της φωτιάς είναι έτοιμος και παραμετροποιημένος από το πρόγραμμα και επιλέγεται το είδος του ατυχήματος. Αντιθέτως, στην τρισδιάστατη ανάλυση ορίζεται μια αντίδραση και ο ρυθμός απελευθέρωσης της θερμότητας, αναμιγνύεται με τον αέρα και αντιδρά, σχηματίζοντας τα προϊόντα καύσης.
- ❖ Στην τρισδιάστατη ανάλυση, όσο αυξάνεται η θερμική ισχύς, αυξάνεται και ο χρόνος που απαιτείται για να μηδενιστεί το backlayering.
- ❖ Ο αριθμός των ανεμιστήρων που βγήκαν εκτός λειτουργίας διαφέρουν ανά τύπο ανάλυσης, 1D και 3D, συνεπώς τα αποτελέσματα των δύο προγραμμάτων δεν είναι άμεσα συγκρίσιμα.

Συνοπτικά, η εκδήλωση πυρκαγιάς σε υπόγειο χώρο αποτελεί το δυσμενέστερο σενάριο που όμως μπορεί να ελεγχθεί με τον κατάλληλο μηχανικό αερισμό. Η προσομοίωση της γίνεται ικανοποιητικά μέσω των τρισδιάστατων προγραμμάτων, καθώς προσαρμόζουν με μεγαλύτερη αντικειμενικότητα τις πραγματικές συνθήκες. Αντιθέτως, οι μονοδιάστατες συνθήκες παρουσιάζουν αδυναμία στην ανάδειξη του φαινομένου της στρωμάτωσης του καπνού καθ' ύψος της διατομής.

EXTENDED ABSTRACT

Ventilation systems in road tunnels are necessary in order to dilute and remove vehicle emissions and to control toxic gases in case of a fire. Thus, the design of the ventilation system in an underground work is done according to the worst-case scenario, which is the case of a sudden fire outbreak. Purpose of this master thesis is to examine the consequences of a tunnel fire related to the so-called critical velocity and the backlayering conditions. The examined case study is simulated in one-dimensional and three-dimensional analyses. The one-dimensional analysis is conducted with the aid of the Camatt 2.20 software, whereas the three-dimensional analysis with the PyroSim software.

Tunnel characteristics

Firstly, it is a non-urban two direction road tunnel in a single bore, with a total length of 1500 m, and a +2% uniform slope from northwest to southeast. The starting time for the traffic lights to turn red, after the fire ignition, is set to 2 min and 30 sec.

Regarding the system of the mechanical ventilation, it has been designed for a 50 MW design fire. The number of jet-fan-array is 1 every 100 m approximately, with 1 number of jet fans making-up the array, making a total number of 15 jet fans. The starting time of the ventilation system is 2 min and 30 sec after the fire ignition, and reaches its maximum efficiency in 1 min and 25 sec.

The portal elevations are of the same order, about 1380 m above the sea level with an ambient temperature of 20° C.

As far as the traffic conditions of the area are concerned, there are 150 veh/h with a proportion of HGVs being approximately of 20%.

Analysis

The analysis is being performed for three fire scenarios, involving:

- Two or three cars with a standardized source term of HRR_{max} equal to 15 MW.
- A bus or an HGV without fuel with a standardized source term of HRR_{max} equal to 30 MW.
- An HGV with a standardized source term of HRR_{max} equal to 50 MW.

The locations that are examined are in the middle of the tunnel (750 m) and 100 m from the exit portal. Relevant studies have shown that the selected locations are one of the most crucial ones. In both software programs, a wind that is blowing at the exit portal has been taken into account, which affects the overall flow within the tunnel according to the following equation:

$$\Delta P = \frac{1}{2} \times \rho \times u^2 = 21,6 Pa$$

With,

ρ : 1,29 kg/m³ for T=0° C

u : wind velocity [m/s], considered 6 m/s

The simulation data for the Camatt software are presented in detail below. **Table 1** refers to the characteristics of the tunnel and **Table 2** to the characteristics of the jet fans. Furthermore, **Table 3** presents the road traffic and, finally, **Table 4** shows the tunnel environment.

Table 1. Tunnel attributes

Length (m)	Cross-section area (m ²)	Perimeter (m)	Slope (%)	Friction coefficient
1500	55,72	28,66	+2	0,03

Table 2. Jet fans

Number of jet fans	Unit free-field thrust (N)	Jet velocity (m/s)	Efficiency	Max. working temperature (°C)	Reference density (kg/m ³)	Tunnel Cross-section area (m ²)	Cross-sect. area at jet fans (m ²)
15	1663	35,7	0,85	250	1,2	55,72	55,72

Table 3. Traffic

Proportion of HGVs (%)	Sigma_CX for HGVs (m ²)	Sigma_CX for cars (m ²)	Distance between stopped vehicles (m)	Pollutant emissions (g/h/km)			Traffic entering tunnel	
				CO	NO ₂	PM	Nominal speed (km/h)	Nominal flux (V/h)
20	7	3,5	10	1131,4	800,2	79,6	60	150

Table 4. Environment

Average altitude (m)	Ambient air temperature (°C)
1380	20

The three scenarios were mainly selected in accordance with the standardized fires of $\Delta A\Sigma$ [1], for risk analysis, and are being presented in **Table 5**.

Table 5. Scenarios for 1D analyses

Type of fire	HRR (MW)	t_g (sec)	t_d (sec)	t_T (sec)
2-3 passenger cars or small van	15	180	1380	2700
HGV-10 t low combustion	30	300	300	3300
HGV with fuel	50	300	3900	4800

With,

t_g : time that HRR reaches its maximum [sec]

t_d : time that HRR decays [sec]

t_T : total duration of fire [sec]

HRR: Heat Release Rate [MW]

In Pyrosim, the additional data that is being simulated, are presented firstly, in **Table 6**, which shows the characteristics of the jet fans and in **Table 7**, which shows the dimensions for the passenger's cars and HGVs, based on the congestion results from the one-dimensional analysis.

Table 6. Characteristics of jet fans

Number of jet fans	Volume flow rate (m ³ /s)	Diameter (m)
15	40,4	1,2

Table 7. Dimensions for passenger's cars and HGVs

Vehicle dimensions			
	Height (m)	Width (m)	Length (m)
Cars	1,7	1,75	3
HGVs	3	3	8

Results

➤ One-dimensional analysis

Figure 1 shows the pollutant concentration along the tunnel for HRR=15, 30, 50 MW and of the two different locations that were examined with Camatt 2.20 software.

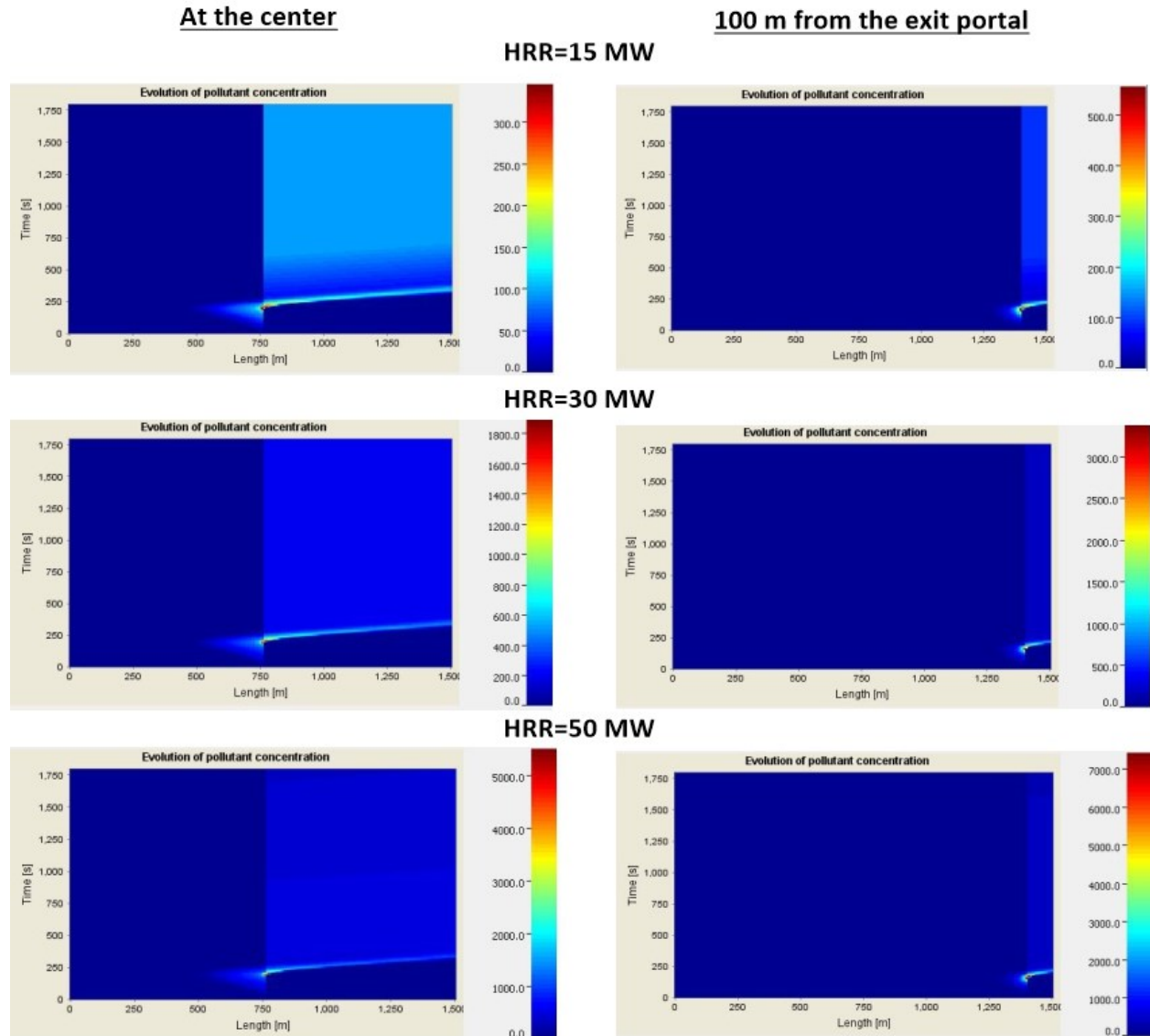


Figure 1. Pollutant concentration for each analysis with Camatt

An aggregated table is presented below, **Table 8**, with all the results related to the backlayering effect and the corresponding time from the moment of the fire start. More specifically, t_{back} denotes the time that backlayering is maximized, L_{back} is the length of the backlayering and $t_{\text{no_back}}$ the time where the backlayering effect is completely suppressed.

Table 8. Results of Camatt analyses

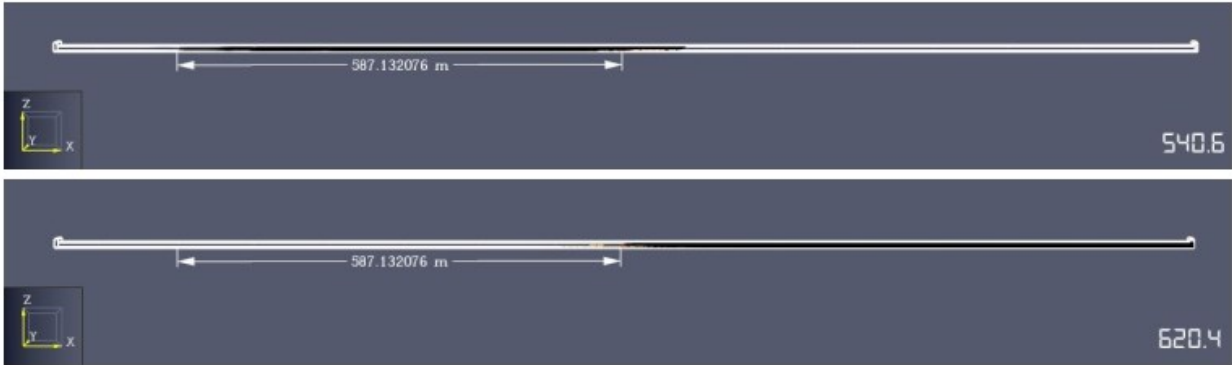
HRR (MW)	Camatt 1D							
	x=750 m				x=1400 m			
	t _{back}	L _{back}	t _{no_back}	Number of disabled fans	t _{back}	L _{back}	t _{no_back}	Number of disabled fans
15	3min 20sec	300m	4min 30sec	-	2min 50sec	130m	3min 40sec	-
30	3min 20sec	285m	4min 30sec	1	2min 50sec	110m	3min 40sec	-
50	3min 10sec	270m	4min 30sec	1	2min 50sec	110m	3min 40sec	1

➤ Three-dimensional analysis

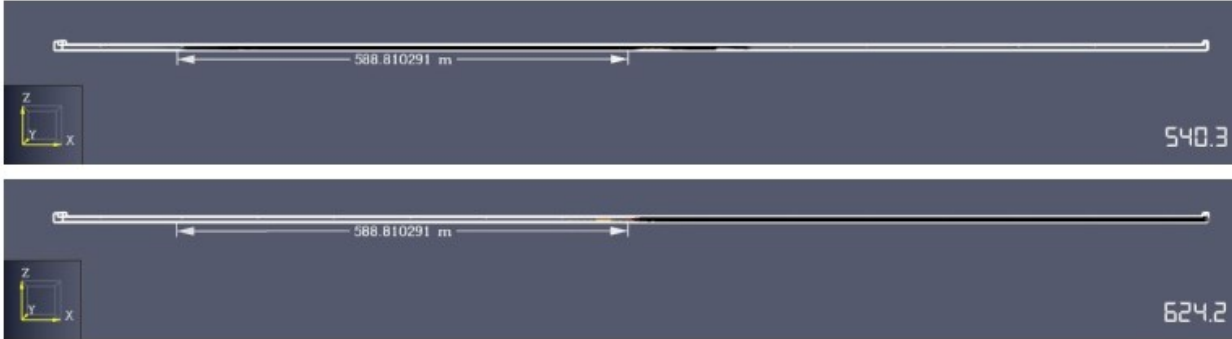
As mentioned, the three-dimensional analysis was conducted using the Pyrosim software. The following figures illustrate the cross-section profile of the tunnel at the time that the backlayering is at its maximum value, and the time that it is suppressed, for: (a) HRR=15 MW; (b) HRR=30 MW; and (c) HRR=50 MW. In particular, **Figure 2** refers to the case that the fire is at the center of the tunnel, and **Figure 3** to the case that the fire is 100 m from the exit portal.

Fire at the center

(a) HRR=15 MW



(b) HRR=30 MW



(c) HRR=50 MW

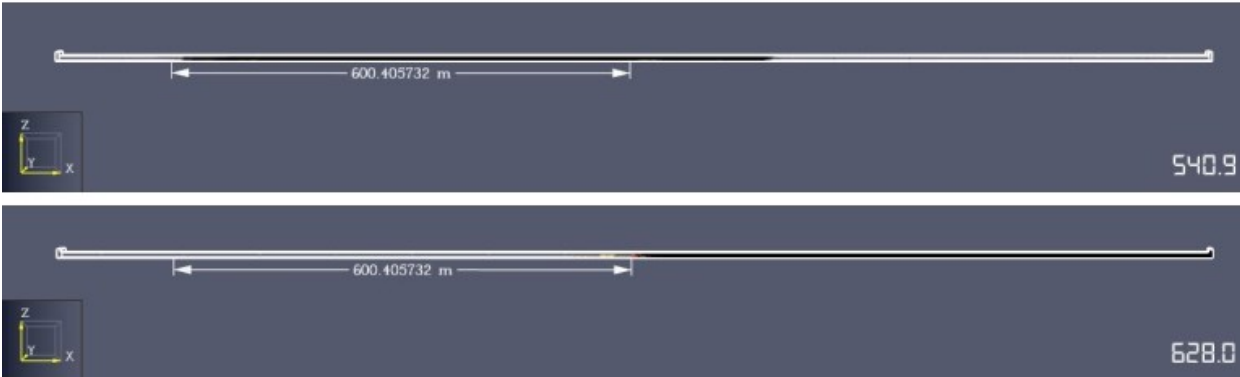
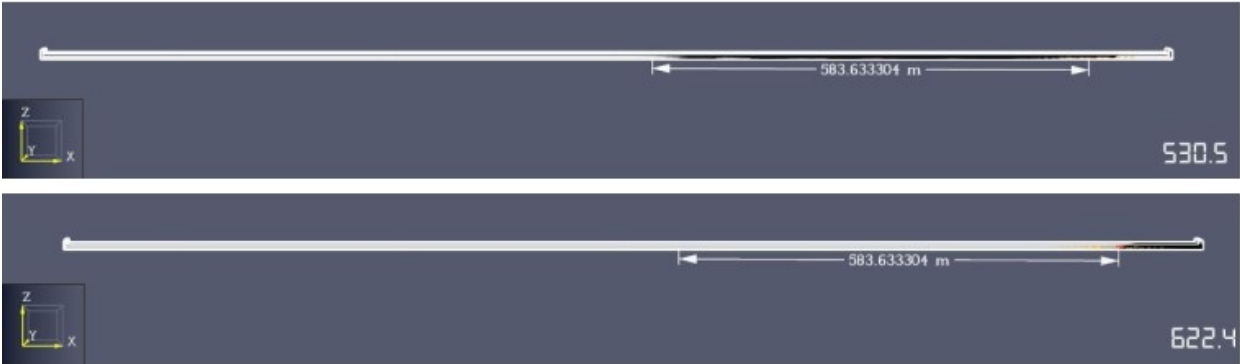


Figure 2. Cross-section profile of the tunnel with and without backlayering for fire at the center of the tunnel, for: (a) HRR=15 MW; (b) HRR=30 MW; (c) HRR=50 MW

Fire 100 m from the exit portal

(a) HRR=15 MW



(b) HRR=30 MW



(c) HRR=50 MW

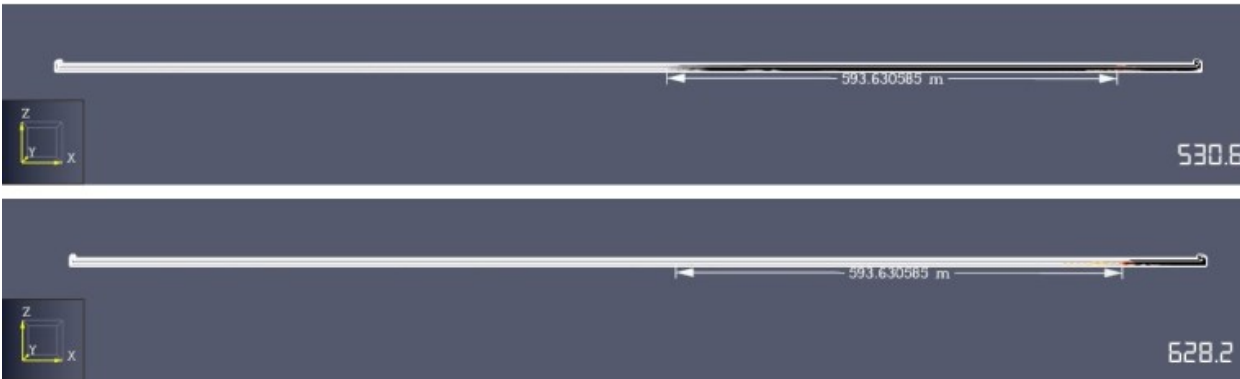


Figure 3. Cross-section profile of the tunnel with and without backlayering for fire 100 m from the exit portal of the tunnel, for: (a) HRR=15 MW; (b) HRR=30 MW; (c) HRR=50 MW

Table 9 presents all the basic information based on the backlayering effect and the corresponding time from the moment that the fire started. More specifically, t_{back} denotes the time that backlayering is maximized, L_{back} is the length of backlayering and t_{no_back} the time where the backlayering effect is completely suppressed.

Table 9. Results of Pyrosim analyses

Pyrosim 3D								
HRR (MW)	x=750 m				x=1400 m			
	t _{back}	L _{back}	t _{no_back}	Number of disabled fans	t _{back}	L _{back}	t _{no_back}	Number of disabled fans
15	4min	587m	5min 18sec	1	3min 48sec	584m	5min 22sec	-
30	4min	594m	5min 24sec	1	3min 48sec	585m	5min 26sec	2
50	4min	600m	5min 30sec	2	3min 48sec	594m	5min 28sec	2

Conclusions

The basic conclusions drawn from this study are the following:

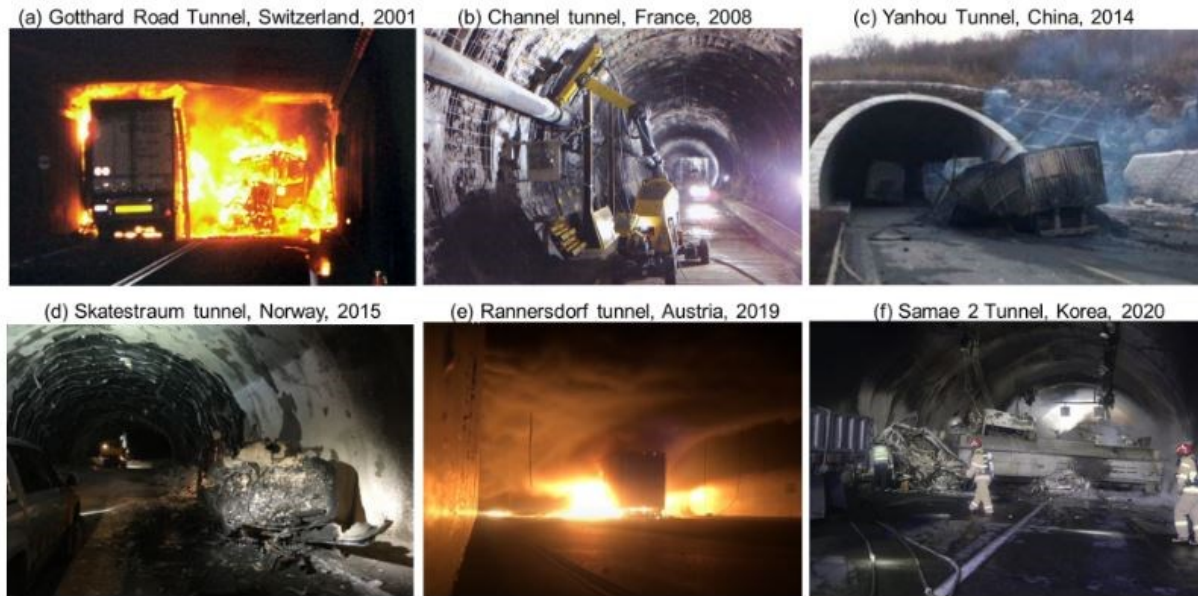
- ❖ The longitudinal ventilation system worked satisfactorily for all analyses, as the backlayering length was limited and controlled once the fans were activated.
- ❖ In the one-dimensional analyses, the further the fire location is from the tunnel portal, the greater the backlayering extends.
- ❖ In the three-dimensional analyses, it was observed that as the heat release rate increases, the length of smoke increases upstream from the fire source.
- ❖ In general, in the three-dimensional analyses, the length of backlayering is greater as there is simultaneous movement of the smoke in both directions of the tunnel. In contrast, in the one-dimensional analyses the smoke changes direction as soon as the mean velocity inside the tunnel changes sign.
- ❖ Fire simulations vary according to the one-dimensional and three-dimensional programs, so, a direct comparison of results cannot be made. In the one-dimensional analysis, the fire type is pre-defined and parameterized by the program, so only the type of a car accident is required to be selected. In contrast, the three-dimensional analysis requires to specify a reaction that defines the products and energy released during combustion and a heat release rate that defines the size of the fire. Once those data are defined, the fuel is released from the surface, mixes with the air, and reacts to form combustion products.
- ❖ In the three-dimensional analysis, as the heat release rate increases, the time required for the length of backlayering to be suppressed, increases.
- ❖ The total number of fans that went out of service differs by analysis type, one- and three-dimensional, so the results of the two programs are not comparable.

In summary, a fire in an underground space is the worst-case scenario but can be controlled with the appropriate mechanical ventilation system. Fire simulations can satisfactorily be performed with three-dimensional programs, as these programs adapt more objectively to the real-life conditions. On the contrary, the one-dimensional simulations have a weakness in showing the phenomenon of smoke stratification along the cross-sectional height.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η κατασκευή των οδικών σηράγγων έχει διευκολύνει τις οδικές μεταφορές, καθώς μειώνεται η απόσταση και ο χρόνος μετακίνησης, και αυξάνεται η ασφάλεια. Επίσης, έχει την ελάχιστη δυνατή όχληση στο περιβάλλον, καθώς απαιτούνται ελάχιστες επιφανειακές εκσκαφές και αποψιλώσεις βλάστησης. Σύμφωνα με τον ηλεκτρονικό χάρτη των ελληνικών σηράγγων και υπογείων έργων, τα τελευταία 25 χρόνια είναι κατασκευασμένες και λειτουργούν 288 οδικές σήραγγες, μήκους μεγαλύτερου από 178 km [2]. Παράλληλα, όμως, με την αύξηση του αριθμού και του μήκους των οδικών σηράγγων, αυξάνονται και οι απαιτήσεις σχεδιασμού ενός συστήματος αερισμού, για την κάλυψη των δύο βασικών συνθηκών λειτουργίας. Η πρώτη συνθήκη αναφέρεται στην κανονική λειτουργία, και αφορά στην αραίωση και την απομάκρυνση των εκπεμπόμενων ρύπων από τα κυκλοφορούντα οχήματα. Η δεύτερη συνθήκη αναφέρεται σε περίπτωση πυρκαγιάς εντός της σήραγγας και αφορά στην εξασφάλιση των απαραίτητων συνθηκών περιβάλλοντος για την ασφαλή απομάκρυνση των επιβατών των οχημάτων.

Παγκοσμίως, έχουν σημειωθεί σοβαρά περιστατικά πυρκαγιάς σε σήραγγες τα οποία έχουν προκαλέσει μεγάλη οικολογική και οικονομική καταστροφή και ιδίως ανθρώπινες απώλειες. Στο **Σχήμα 1** παρουσιάζονται έξι πρόσφατα παγκόσμια σοβαρά ατυχήματα πυρκαγιάς σε οδικές σήραγγες. Πιο συγκεκριμένα, το **Σχήμα 1(α)** αναφέρεται στη σήραγγα Gotthard Road της Ελβετίας, όπου το 2001 συγκρούστηκαν δύο φορτηγά και προκλήθηκε πυρκαγιά. Έκτοτε, έχουν αναθεωρηθεί οι κανονισμοί κυκλοφορίας εντός της σήραγγας, και είναι περιορισμένος ο αριθμός των φορτηγών οχημάτων. Στο **Σχήμα 1(β)** παρουσιάζεται η σήραγγα Channel, από την πλευρά της Γαλλίας, όπου το 2008 ξέσπασε φωτιά σε ένα φορτηγό όχημα βαρέως τύπου και εξαπλώθηκε σε μικρό χρονικό διάστημα σε έξι γειτονικά οχήματα. Αποτέλεσμα αυτής της πυρκαγιάς ήταν ο τραυματισμός πολλών ανθρώπων λόγω εισπνοής τοξικών αερίων. Το 2014 στη σήραγγα Yanhou της Κίνας, ένα φορτηγό όχημα συγκρούστηκε με ένα βυτιοφόρο και προκάλεσε σοβαρές εκρήξεις και ταχεία εξάπλωση της πυρκαγιάς, που οδήγησε σε περισσότερο από τριάντα θανάτους (**Σχήμα 1(γ)**). Το 2015 στη σήραγγα Skatestraum της Νορβηγίας, ένα φορτηγό με δεξαμενή πετρελαίου χτύπησε στα τοιχώματα της σήραγγας με αποτέλεσμα τα 16500L βενζίνης να οδηγήσουν σε μια πυρκαγιά μήκους 500m, σοβαρούς ανθρώπινους τραυματισμούς και σοβαρές ζημιές στα τοιχώματα της σήραγγας (**Σχήμα 1(δ)**). Στο **Σχήμα 1(ε)** παρουσιάζεται η σήραγγα Rannersdorf της Αυστρίας, όπου το 2019 ξέσπασε πυρκαγιά σε επιβατικό όχημα λόγω μηχανικής βλάβης. Τέλος, στο **Σχήμα 1(στ)** παρουσιάζεται η σήραγγα Samae 2 της Νότιας Κορέας, όπου το 2020 συγκρούστηκαν αρκετά φορτηγά προκαλώντας τον θάνατο τεσσάρων ανθρώπων και τραυματίζοντας περισσότερο από σαράντα. Η ζημιά που προκλήθηκε εντός της σήραγγας ήταν σοβαρή λόγω απουσίας του συστήματος αερισμού [3].



Σχήμα 1. Πρόσφατες σήραγγες μετά από πυρκαγιά [3]

Στον **Πίνακα 1** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά ορισμένα μεγάλα ατυχήματα πυρκαγιάς, που έχουν σημειωθεί τα τελευταία 50 χρόνια σε σήραγγες. Παρατηρείται λοιπόν ότι παρά τις συνεχείς έρευνες που γίνονται και τις αναθεωρήσεις σχετικά με τους κανονισμούς της πυρασφάλειας στις σύγχρονες οδικές και σιδηροδρομικές σήραγγες, τα ατυχήματα συνεχίζονται με μεγάλες επιπτώσεις, όπως οι ανθρώπινες απώλειες και τα σοβαρά οικονομικά κόστη. Η αύξηση του αριθμού των οχημάτων, του ορίου της ταχύτητας εντός της σήραγγας, του μήκους των σηράγγων αλλά και ο αριθμός τους είναι ορισμένοι από τους λόγους που η εκδήλωση της πυρκαγιάς, εντός της σήραγγας, παρατηρείται όλο και συχνότερα [4]. Ο Beard το 2019 επιβεβαίωσε μέσω στατιστικών μελετών, ότι οι περισσότεροι θάνατοι έχουν επέλθει από την εισπνοή τοξικών αερίων και είναι παρόμοια με τα ατυχήματα πυρκαγιάς σε κατοικίες [3]. Συνεπώς, σκοπός του συστήματος αερισμού είναι να λειτουργεί αυτόματα για τον έλεγχο της εξάπλωσης του καπνού και της θερμότητας, και να εξασφαλίσει άμεσα οδό διαφυγής στους παγιδευμένους χρήστες εντός της σήραγγας.

Για να εξασφαλισθεί η μέγιστη ασφάλεια που δύναται στους χρήστες των υπογείων έργων, πραγματοποιούνται έρευνες σχετικά με τις συνθήκες αυτές. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται είτε λογισμικά σχεδιασμού κυκλωμάτων αερισμού υπογείων έργων ([5], [6], [7], [8], [9], [10]), είτε πειράματα υπό κλίμακα ([11], [12]), είτε δοκιμές σε πραγματικές συνθήκες (όπως EUREKA-EU 499 Test; Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program κ.α.).

Πίνακας 1. Επιλεγμένα μεγάλα ατυχήματα πυρκαγιάς σε σήραγγες με σοβαρό αριθμό θυμάτων τα τελευταία 50 χρόνια [3]

Year	Tunnel location	Accident type	Casualties	Comments
1972	Hokuriku tunnel, Japan	short circuit	744	No extinguisher, no smoke exhaust
1976	Crossing BP - A6, France	Lorry fire	12	Serious damage over 150 m
1978	Velsen tunnel, Nederland	Collision	10	Serious damage over 30 m
1979	Nihonzaka tunnel, Japan	Collision	8	Serious damage over 1,100 m
1980	Sakai, Japan	Collision	10	Serious damage to structure
1982	Caldecott, USA	Collision	9	Serious damage over 580 m
1983	Percile, Italy	Collision	31	-
1984	San Benedetto tunnel, Italy	Bomb attack	137	Railway tunnel
1986	L'Arme, France	Collision	8	-
1993	Serra Ripoli tunnel, Italy	Collision	8	-
1993	Hovden, Norway	Collision	5	111 m insulation material destroyed
1994	Huguenot, South Africa	Electrical fault	29	Serious damage to tunnel lining
1995	Pfander tunnel, Austria	Collision	7	Serious damage to structure
1995	Baku underground railway, Azerbaijan	Electrical malfunction	559	-
1996	Channel tunnel, Britain-France	Cargo fire	-	Widespread damage on tunnel region
1996	Isola delle Femmine, Italy	Collision	25	Serious damage to tunnel, closed for 2.5 days
1999	Mont Blanc, France-Italy	Oil leakage Motor	39	Serious spalling on tunnel lining

Year	Tunnel location	Accident type	Casualties	Comments
1999	Tauren tunnel, Austria	Multi-car collision	61	Part of tunnel vault collapsed
2000	Seljestad tunnel, Norway	Multi-car collision	6	Structural damage and closed for 1.5 days
2000	Gletscherbahn Kaprun, Austria	Electric fan heater	155	Fire had burned through a 16 kW power cable
2001	Gothard, Switzerland	Collision of two trucks	21	Serious spalling on tunnel lining
2001	Gleinalm tunnel, Austria	Collision	9	Tunnel structures seriously damaged
2001	Prapontin tunnel, Italy	Self-ignition of tire	11	-
2001	Madaoling tunnel, China	Engine fire	18	-
2003	Vicenza, Italy	Bus turnover	56	-
2003	Daegu subway, South Korea	Subway fire	340	Rapid spread of flames and smoke due to petrol incendiary incidents
2003	Baregg tunnel, Switzerland	Collision	6	-
2004	Takayama, Japan	Collision	5	Surface concrete damage
2005	Frejus, France-Italy	Car accident	23	Serious damage on tunnel lining
2005	Feiluanling tunnel, China	Passenger car brake failure	8	-
2006	Viamala, Switzerland	Car-bus collision	15	-
2007	San Martino, Italy	Collision	12	-

Year	Tunnel location	Accident type	Casualties	Comments
2007	Chongqibg Univ. tunnel, China	Technical problems	6	Lighting and ventilation system are paralyzed
2007	Newhall Pass tunnel, USA	Multi-track collision	13	It took 24 h to control the fire, and structure was severely damaged
2008	Ofenauer, Austria	Collision	17	-
2009	Gubrist, Switzerland	Collision	4	-
2009	Eiksund tunnel, Norway	Collision	5	-
2010	Huishan tunnel, China	Man-made arson	43	Damage to mechanical and electrical facilities
2012	Xueshan tunnel, China	Collision	24	-
2013	Liushiliang tunnel, China	Multi-car collision	18	Damage to tunnel facilities
2014	Yanhou, China	Collision	31	Serious damage to tunnel lining
2017	Taojiakuang tunnel, China	Arson	11	-
2019	Maoling tunnel, China	Self-ignition of tire	36	-
2020	Central Park North-110th Street station, USA	Possible arson	17	Severe damages in the station and the train cars
2020	Samae 2 tunnel, Korea	Collision	47	Tank truck carrying nitric acid ran into some cars involved in an earlier accident

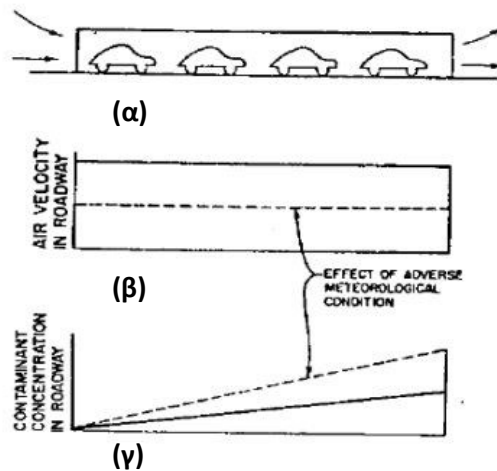
2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το σύστημα του αερισμού είναι ένα αναπόσπαστο κομμάτι σε όλες τις οδικές σήραγγας με σημαντικό μήκος. Χρησιμοποιείται, όπως αναφέρθηκε, σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας για τη μείωση της συγκέντρωσης των ρύπων από τα καυσαέρια των οχημάτων στα αποδεκτά επίπεδα βάσει της σχετικής νομοθεσίας και σε συνθήκες έκτακτης ανάγκης-πυρκαγιάς για τον εκκαπνισμό της σήραγγας. Είναι γεγονός ότι οι εκπομπές των ρύπων από τα οδικά οχήματα έχουν μειωθεί σημαντικά τις τελευταίες δεκαετίες [13], ωστόσο αυτή η λειτουργία του συστήματος αερισμού εξακολουθεί να είναι σημαντική και πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στο στάδιο του σχεδιασμού. Σε περίπτωση πυρκαγιάς ο αερισμός πρέπει να εξασφαλίζει ασφαλείς συνθήκες εκκένωσης της σήραγγας από τους οδηγούς και να διευκολύνει τις υπηρεσίες διάσωσης, ελέγχοντας την κατεύθυνση του καπνού με τον κατάλληλο τρόπο. Τα κυριότερα συστήματα είναι ο φυσικός και ο μηχανικός αερισμός.

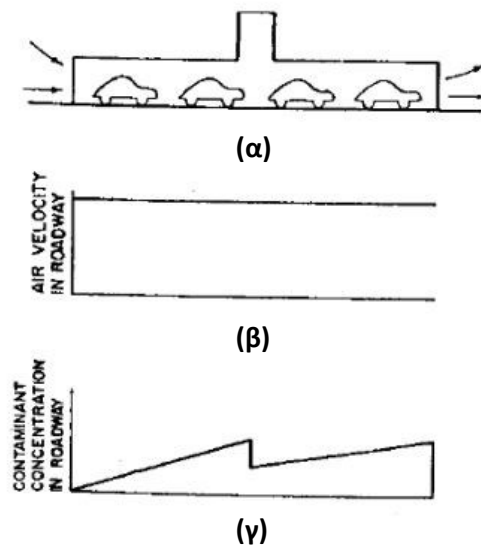
2.2 ΦΥΣΙΚΟΣ ΑΕΡΙΣΜΟΣ

Ο φυσικός αερισμός βασίζεται πρωτίστως στις μετεωρολογικές συνθήκες της περιοχής και στο φαινόμενο εμβόλου (piston effect) που προκαλείται από την κυκλοφορία των οχημάτων, και έχει ως αποτέλεσμα τη διατήρηση ικανοποιητικών περιβαλλοντικών συνθηκών εντός της σήραγγας. Η κύρια παράμετρος των μετεωρολογικών συνθηκών είναι η διαφορά πίεσης μεταξύ των στομιών εισόδου και εξόδου που προκαλείται από την υψομετρική διαφορά, τον άνεμο και την θερμοκρασία περιβάλλοντος. Όμως, καμία από τις παραπάνω παραμέτρους δεν παραμένει σταθερή. Η πίεση του φυσικού αερισμού πρέπει να είναι επαρκής ώστε να υπερνικήσει τις αντιστάσεις της εκάστοτε σήραγγας που εξαρτώνται από το μήκος της σήραγγας, τις τριβές στα τοιχώματα, την υδραυλική διάμετρο και την πυκνότητα του αέρα. Η αντίστοιχη σχηματική απεικόνιση παρουσιάζεται στο **Σχήμα 2** και παρατηρείται ότι η ταχύτητα του αέρα εντός της σήραγγας παραμένει σταθερή και το ποσοστό των ρυπαντών αυξάνεται με το μέγιστο να παρουσιάζεται στο στόμιο εξόδου. Στην περίπτωση που υπάρξει αλλαγή στις μετεωρολογικές συνθήκες, θα μειωθεί η ταχύτητα του αέρα και θα αυξηθεί η συγκέντρωση των ρύπων (διακεκομμένη γραμμή). Εάν η σήραγγα είναι διπλής κατεύθυνσης, θα υπάρξει περαιτέρω μείωση στην ταχύτητα του αέρα [14].



Σχήμα 2. Φυσικός αερισμός: (α) Σχηματική απεικόνιση, (β) ταχύτητα αέρα κατά μήκος της σήραγγας, (γ) ποσοστό ρυπαντών κατά μήκος της σήραγγας [14]

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται ο φυσικός αερισμός με χρήση φρέατος στο μέσον του μήκους της σήραγγας, διαμόρφωση που είναι κατάλληλη για σήραγγες διπλής κατεύθυνσης. Παρατηρείται ότι η ταχύτητα του αέρα παραμένει σταθερή σε όλο το μήκος της σήραγγας, ενώ η συγκέντρωση των ρύπων μειώνεται στο σημείο όπου είναι το φρέαρ. Η ορθή λειτουργία του αερισμού βασίζεται στο φαινόμενο της καμινάδας (chimney effect) που όμως εξαρτάται αντίστοιχα από τις θερμοκρασιακές διαφορές, την θερμοκρασία του πετρώματος, την ταχύτητα και κατεύθυνση του αέρα, καθώς και από το ύψος του φρέατος [14].



Σχήμα 3. Φυσικός αερισμός με φρέαρ: (α) Σχηματική απεικόνιση, (β) ταχύτητα αέρα κατά μήκος της σήραγγας, (γ) ποσοστό ρυπαντών κατά μήκος της σήραγγας [14]

2.3 ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΑΕΡΙΣΜΟΣ

Σε σήραγγες μεγάλου μήκους, ο μηχανικός αερισμός καθώς και τα φρέατα είναι αναγκαία για να διατηρήσουν χαμηλά και εντός ορίων τα επίπεδα συγκέντρωσης των επικίνδυνων ρύπων. Τα κυριότερα συστήματα μηχανικού αερισμού, όπου εφαρμόζονται και συνδυάζονται σε υπόγειες κατασκευές, είναι ο διαμήκης (longitudinal), ο ημι-εγκάρσιος (semi-transverse) και ο εγκάρσιος αερισμός (transverse). Το διαμήκες σύστημα αερισμού, κατευθύνει τον αέρα κατά μήκος της σήραγγας ενώ το εγκάρσιο σύστημα αερισμού κατευθύνει τον αέρα κάθετα στην κατεύθυνση της κυκλοφορίας.

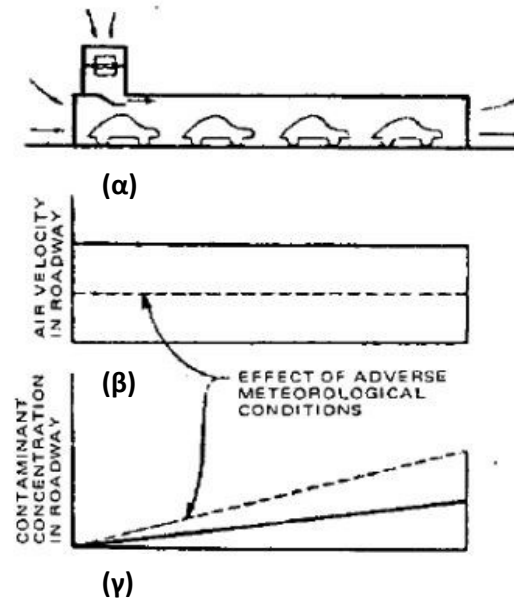
2.3.1 Διαμήκης αερισμός

Στον διαμήκη αερισμό ο αέρας εισάγεται και απομακρύνεται από τη σήραγγα από συγκεκριμένα σημεία, αναπτύσσοντας αυτήν την διαμήκη ροή κατά μήκος του άξονα.

Στο **Σχήμα 4** παρουσιάζεται ο διαμήκης αερισμός μέσω ενός ακροφυσίου τύπου Saccardo και παρατηρείται ότι ο αέρας εισάγεται από το στόμιο της σήραγγας, μέσω του φαινομένου του εμβόλου που προκαλούν τα οχήματα, και αναμιγνύεται με τον αέρα που εισάγεται από το "ακροφύσιο Saccardo". Σε αυτήν την περίπτωση, η ταχύτητα του αέρα παραμένει σταθερή σε όλο τον άξονα της σήραγγας, **Σχήμα 4(β)**, ενώ η συγκέντρωση των ρύπων αυξάνεται κατά μήκος της σήραγγας και φτάνει το μέγιστο του στο στόμιο εξόδου, **Σχήμα 4(γ)**. Δυσμενείς εξωτερικές μετεωρολογικές συνθήκες ενδέχεται να μειώσουν την ταχύτητα του αέρα και να αυξήσουν τη συγκέντρωση των ρύπων (διακεκομμένη γραμμή). Το συγκεκριμένο σύστημα εφαρμόζεται κυρίως σε διατομές μονής κατεύθυνσης [14].

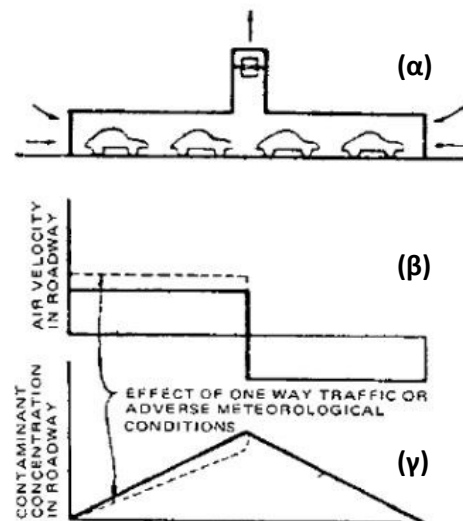
Σύμφωνα με τον A. G. Bendelius, 1999 [15], η χρήση του ακροφυσίου Saccardo έχει σημαντικά πλεονεκτήματα. Ορισμένα από αυτά είναι η μείωση του απαιτούμενου ύψους της σήραγγας, η μείωση στα κινούμενα σωματίδια που βρίσκονται εντός της σήραγγας, η συντήρηση της σήραγγας δίχως να εμποδίζεται η λειτουργία της σήραγγας και τέλος η μείωση του επιπέδου του θορύβου με ταυτόχρονη υψηλή απόδοση λειτουργίας των ανεμιστήρων.

Σε περίπτωση πυρκαγιάς, η εξαγωγή του καπνού γίνεται κατάντη της σήραγγας, στο στόμιο εξόδου με την κατάλληλη ρύθμιση της ταχύτητας των ανεμιστήρων στην κρίσιμη ταχύτητα, έτσι ώστε να είναι ελεγχόμενη η κατεύθυνση και η στρωμάτωση του. Επίσης, είναι προτιμότερο οι ανεμιστήρες jet και οι αγωγοί που εισάγουν αέρα, που βρίσκονται κοντά στη φωτιά, και ιδιαίτερα στην ανάντη πλευρά, να μην βρίσκονται σε λειτουργία καθώς είναι πιθανό να προκαλέσουν αποστρωμάτωση του καπνού [7].



Σχήμα 4. Διαμήκης αερισμός με εγχυτήρα: (α) Σχηματική απεικόνιση, (β) ταχύτητα αέρα κατά μήκος της σήραγγας, (γ) ποσοστό ρυπαντών κατά μήκος της σήραγγας [14]

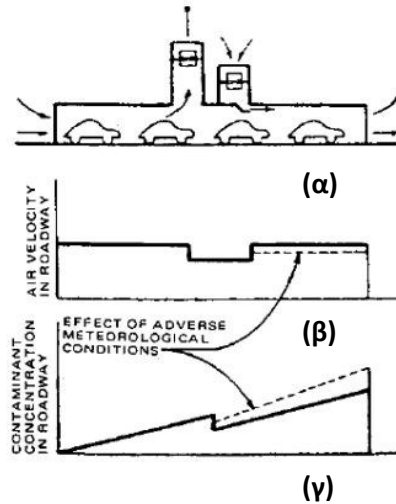
Ο διαμήκης αερισμός με παρεμβολή φρέατος (shaft) στο μέσον του μήκους της σήραγγας συνήθως λειτουργεί μζητικά. Σε σήραγγα διπλής κυκλοφορίας με κυκλοφοριακή συμφόρηση δημιουργείται ένα μέγιστο στο ποσοστό των ρυπαντών κοντά στο φρέαρ (βλ. **Σχήμα 5(γ)**). Ενδέχεται να υπάρξει αύξηση της ταχύτητας του αέρα και μείωση των ρύπων όταν η κυκλοφορία είναι μονής κατεύθυνσης ή σε δυσμενείς μετεωρολογικές συνθήκες (διακεκομμένη γραμμή) [14].



Σχήμα 5. Διαμήκης αερισμός με φρέαρ: (α) Σχηματική απεικόνιση, (β) ταχύτητα αέρα κατά μήκος της σήραγγας, (γ) ποσοστό ρυπαντών κατά μήκος της σήραγγας [14]

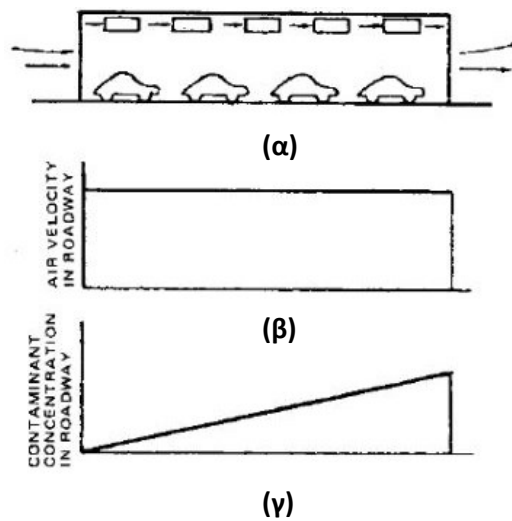
Στο **Σχήμα 6** παρουσιάζεται ο διαμήκης αερισμός με την χρήση δύο φρεάτων (shaft) στο μέσον του μήκους της σήραγγας και τα αντίστοιχα διαγράμματα της ταχύτητας του αέρα και της συγκέντρωσης

των ρυπαντών κατά μήκος της σήραγγας. Πιο συγκεκριμένα, το ένα φρέαρ εισάγει καθαρό αέρα ενώ το άλλο φρέαρ αναρροφά τον ρυπασμένο αέρα προς το περιβάλλον με τη χρήση ανεμιστήρων. Με αυτήν την λειτουργία, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 6(γ)**, μειώνεται το επίπεδο των ρύπων στο δεύτερο μισό της σήραγγας. Δυσμενείς μετεωρολογικές συνθήκες ενδέχεται να μειώσουν τη ροή του εισερχόμενου αέρα στη σήραγγα, και να αυξήσουν τους ρύπους στο δεύτερο μισό της (διακεκομμένη γραμμή) [14].



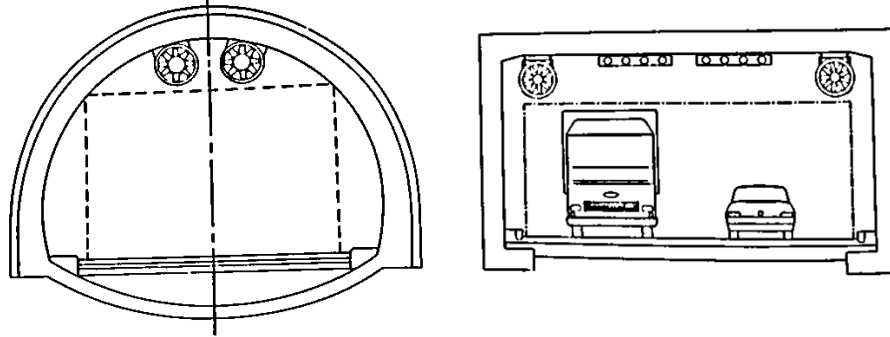
Σχήμα 6. Διαμήκης αερισμός με δύο φρέατα: (α) Σχηματική απεικόνιση, (β) ταχύτητα αέρα κατά μήκος της σήραγγας, (γ) ποσοστό ρυπαντών κατά μήκος της σήραγγας [14]

Ανεμιστήρες jet. Στο **Σχήμα 7** παρουσιάζεται ο διαμήκης αερισμός με τη χρήση ανεμιστήρων jet, όπου είναι τοποθετημένοι στην οροφή της σήραγγας, και εισάγουν τον καθαρό αέρα από το στόμιο της σήραγγας. Στο **Σχήμα 7(β)**, παρουσιάζεται η ταχύτητα του αέρα που παραμένει σταθερή κατά μήκος και στο **Σχήμα 7(γ)** φαίνεται η σταδιακή αύξηση της συγκέντρωσης των ρύπων με το μέγιστο ποσοστό να εμφανίζεται στο στόμιο εξόδου [14].



Σχήμα 7. Διαμήκης αερισμός: (α) Σχηματική απεικόνιση, (β) ταχύτητα αέρα κατά μήκος της σήραγγας, (γ) ποσοστό ρυπαντών κατά μήκος της σήραγγας [14]

Η χρήση των ανεμιστήρων jet στην οροφή της σήραγγας βασίζεται στην επιπρόσθετη ώθηση του αέρα με υψηλή ταχύτητα για την ενίσχυση της ροής εντός της σήραγγας. Οι ανεμιστήρες είναι συνήθως τοποθετημένοι σε ομάδες των δύο ή τριών, σε απόσταση κατά μήκος της σήραγγας περίπου 300 ft (100 m), όπως φαίνεται στο **Σχήμα 8** [14].



Σχήμα 8. Διαμήκης αερισμός με ανεμιστήρες [14]

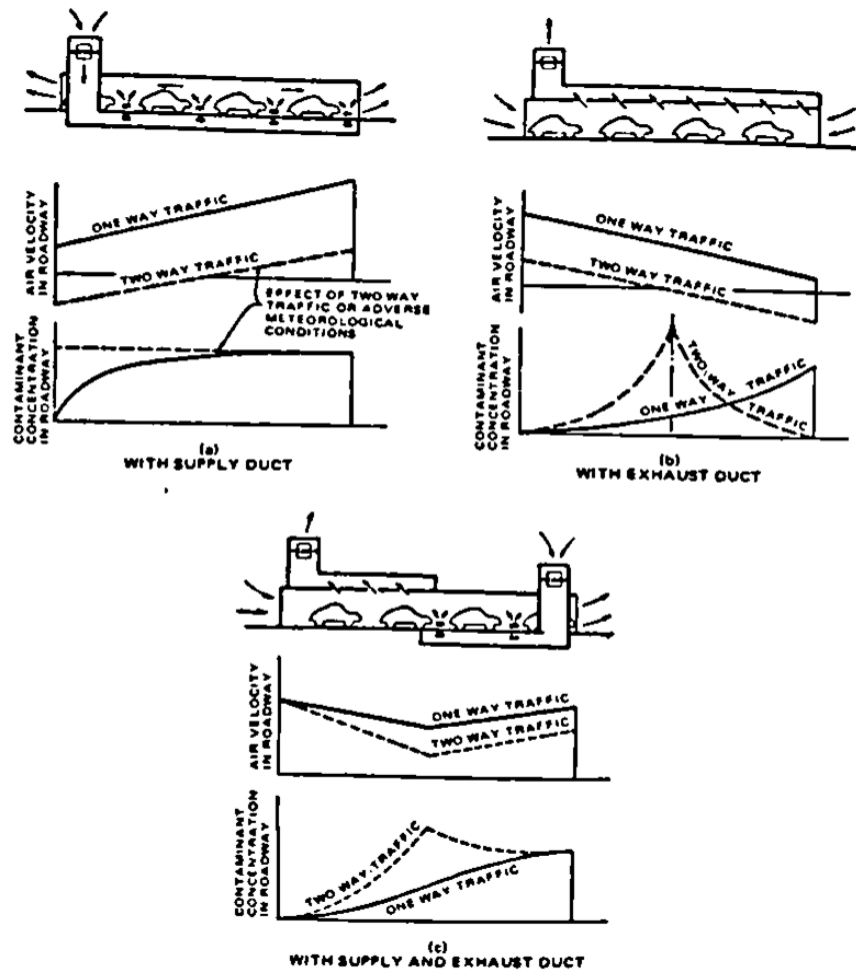
Σύμφωνα με την PIARC, το συγκεκριμένο σύστημα αερισμού είναι οικονομικό και εύκολο να εγκατασταθεί με μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα σε σήραγγες μονής κατεύθυνσης, όπου το φαινόμενο εμβόλου ενισχύει την ροή του αέρα. Ωστόσο, μπορεί να τοποθετηθεί και σε σήραγγες μιας οπής και διπλής κατεύθυνσης, εφόσον πραγματοποιηθεί πρώτα ανάλυση επικινδυνότητας. Τέλος είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη ότι η συγκέντρωση των ρύπων αυξάνεται με την μείωση της ροής του αέρα ή με την αύξηση του μήκους της σήραγγας [16].

2.3.2 Ημιεγκάρσιος αερισμός

Στο ημιεγκάρσιο σύστημα αερισμού η κυκλοφορία του αέρα γίνεται από τους αγωγούς του συστήματος αερισμού και από τα στόμια της σήραγγας και εφαρμόζεται σε σήραγγες με μήκος περίπου 9000 ft (2750 m). Βασικές παραδοχές σε αυτήν την περίπτωση είναι το είδος λειτουργίας του ανεμιστήρα και η θέση των αγωγών.

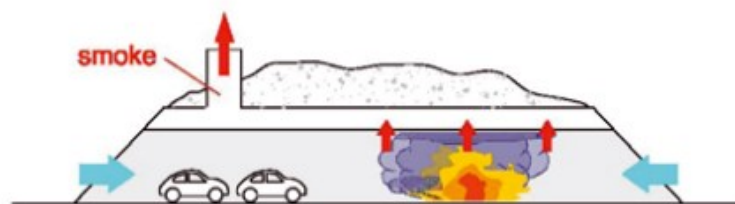
Στο **Σχήμα 9(α)** παρουσιάζεται η περίπτωση όπου ο ανεμιστήρας εισάγει αέρα στη σήραγγα, με τους αγωγούς της να βρίσκονται στο ύψος του οδοστρώματος. Παρατηρείται ότι για σήραγγα διπλής κατεύθυνσης, η κατανομή των ρύπων είναι ομοιόμορφη κατά μήκος της σήραγγας, ενώ για σήραγγα μονής κατεύθυνσης, θα αναπτυχθεί μια πρόσθετη διαμήκη ροή, από την κίνηση των οχημάτων, και θα μειωθεί το ποσοστό των ρυπαντών. Η καταλληλότερη θέση των αγωγών, για την εισαγωγή του καθαρού αέρα, είναι στο ύψος του οδοστρώματος για να επιτευχθεί η άμεση αραίωση των καυσαερίων. Στην περίπτωση όπου ο ανεμιστήρας εξάγει τον αέρα, σε μια σήραγγα μονής κατεύθυνσης, ο ρυπασμένος αέρας θα δημιουργήσει μια μέγιστη συγκέντρωση στο στόμιο εξόδου. Σε σήραγγα διπλής κατεύθυνσης θα δημιουργηθεί μια μέγιστη συγκέντρωση στο μέσον της σήραγγας (βλ. **Σχήμα 9(β)**) [14].

Τέλος, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 9(γ)**, υπάρχει και η περίπτωση του ημιεγκάρσιου συστήματος αερισμού όπου συνδυάζει το σύστημα εισαγωγής και εξαγωγής του αέρα, και εφαρμόζεται κυρίως σε σήραγγες διπλής κατεύθυνσης [14].



Σχήμα 9. Ημειγκάρσιος αερισμός με εισαγωγή αέρα [14]

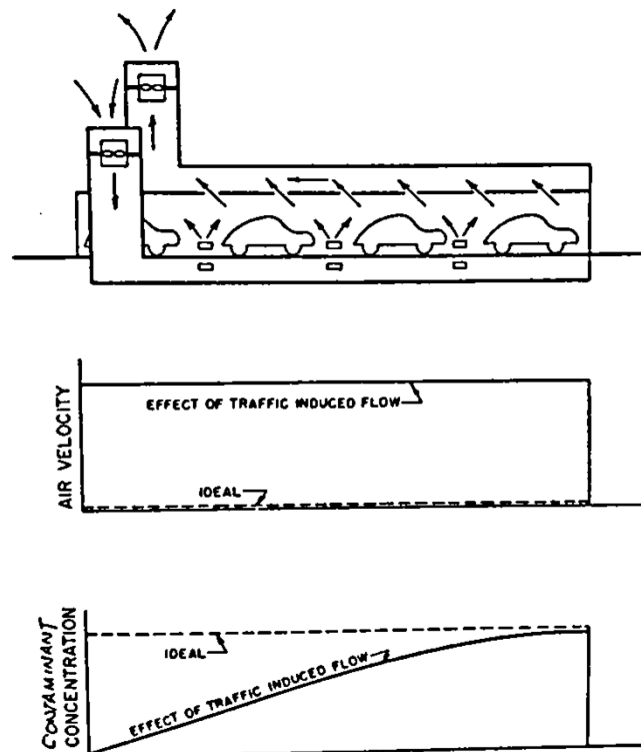
Σε περίπτωση πυρκαγιάς οι ανεμιστήρες ελέγχονται με τηλεχειρισμό και λειτουργούν όπως και στον εγκάρσιο αερισμό, δηλαδή εξάγουν τον καπνό σημειακά στη δυσμενέστερη θέση της σήραγγας (Σχήμα 10, κόκκινα βέλη). Η ροή απαγωγής στο σημείο αυτό, έχει ελάχιστο όγκο $120 \text{ m}^3/\text{s}$ ανά 300 m μήκους σήραγγας. Τα υπόλοιπα σημεία εξαγωγής του καπνού είναι κλειστά για να αποφευχθεί ο διασκορπισμός του καπνού εντός της σήραγγας. Η αποτελεσματικότητα εξαγωγής του καπνού αυξάνεται σημαντικά με έναν ελεγχόμενο διαμήκη αερισμό (π.χ. ανεμιστήρες), αποφεύγοντας έτσι την εκτεταμένη εξάπλωση του [17].



Σχήμα 10. Ημειγκάρσιος αερισμός σε περίπτωση πυρκαγιάς [17]

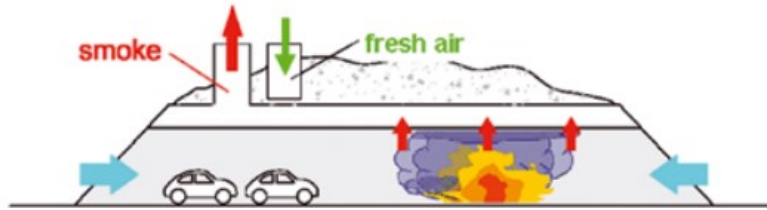
2.3.3 Εγκάρσιος αερισμός

Σε σήραγγες με μεγαλύτερο μήκος συνήθως τοποθετείται εγκάρσιο σύστημα αερισμού. Όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 11**, ο καθαρός αέρας εισάγεται μέσω αγωγών που συνήθως είναι τοποθετημένοι στο επίπεδο της ερυθράς με ομοιόμορφα ανοίγματα και εξάγεται από την οροφή της σήραγγας μέσω άλλων αγωγών. Με αυτό το σύστημα αερισμού δημιουργείται μια ομοιόμορφη πίεση όπου ενδεχομένως να την επηρεάσει το φαινόμενο του εμβόλου από την κίνηση των οχημάτων. Ο συγκεκριμένος μηχανισμός αερισμού δημιουργήθηκε για την Holland σήραγγα το 1924 [14].



Σχήμα 11. Εγκάρσιος αερισμός με ομοιόμορφη απαγωγή και εξαγωγή του αέρα [14]

Σε περίπτωση πυρκαγιάς η παροχή του καθαρού αέρα μειώνεται κατά μήκος της σήραγγας για να διατηρηθεί η στρωμάτωση του καπνού. Όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 12**, τα στόμια εξαγωγής του καπνού λειτουργούν μόνο στην περιοχή όπου έχει ξεσπάσει η πυρκαγιά (κόκκινα βέλη). Είναι σημαντικό να διασφαλιστεί ότι ο καπνός θα κατευθυνθεί στο σημείο απαγωγής, και δεν θα το προσπεράσει κατακλύζοντας το μήκος της σήραγγας. Η ροή απαγωγής, στο δυσμενέστερο σημείο της σήραγγας, έχει ελάχιστο όγκο 120 m³/s ανά 300 m μήκους σήραγγας. Οι υπόλοιποι αγωγοί παραμένουν κλειστοί, με τον καθαρό αέρα να εισάγεται πλέον από τα στόμια της σήραγγας (μπλε βέλη). Σε συγκεκριμένες περιπτώσεις, ο αγωγός που εισάγει τον καθαρό αέρα ενδέχεται να έχει αναστρέψιμο ανεμιστήρα έτσι ώστε να ενισχυθεί το σύστημα αερισμού της σήραγγας. Σε αντίθεση με τον διαμήκη αερισμό όπου εξάγει τον καπνό από το στόμιο της σήραγγας κατάντη της πυρκαγιάς, ο εγκάρσιος είναι σχεδιασμένος να εξάγει τον καπνό από την οροφή. Το εγκάρσιο σύστημα αερισμού είναι κατάλληλο για σήραγγες διπλής κατεύθυνσης, όπου υπάρχει περίπτωση οι οδηγοί των οχημάτων να βρίσκονται ανάντη και κατάντη της πυρκαγιάς [17].



Σχήμα 12. Εγκάρσιος αερισμός σε περίπτωση πυρκαγιάς [17]

2.4 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΥΠΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΕΡΙΣΜΟΥ

Οι βασικότεροι παράγοντες για την επιλογή του τύπου του συστήματος αερισμού σύμφωνα με τη διεύθυνση των οδικών σηράγγων (Δ13) και την Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων (ΓΓΔΕ) (2004) [18] είναι:

1. Τα χαρακτηριστικά τις σήραγγας. Αναφέρεται στη διατομή της σήραγγας, στο μήκος της, στο υψόμετρο της, στην κατά μήκος κλίση της, στις εγκαταστάσεις διαφυγής, στις κανονικές ή τις εξαιρετικά υψηλές ανεμοπιέσεις στα στόμια ή/και αποτελέσματα θερμικής άνωσης στη σήραγγα και τέλος στις λωρίδες προσπέλασης εισόδου/εξόδου.
2. Τα κυκλοφοριακά δεδομένα της περιοχής. Αναφέρεται στον τύπο της σήραγγας υπό συνθήκες κανονικής λειτουργίας (μονής ή διπλής κατεύθυνσης και εάν είναι μίας οπής ή δύο), στις ταχύτητες κυκλοφορίας των οχημάτων, στην μέγιστη ελεύθερη ροή κυκλοφορίας ανά ημέρα και στην κυκλοφοριακή συμφόρηση. Επίσης, πρέπει να ληφθεί υπόψιν το ποσοστό των επιβατικών οχημάτων με πετρελαιομηχανές, και οι αριθμοί και τα βάρη των φορτηγών οχημάτων υπό διάφορες συνθήκες κυκλοφορίας. Τέλος, πρέπει να εξεταστεί και η σήραγγα με κανονικά μονή κατεύθυνση που απαιτούνται, ανά περιστάσεις, να λειτουργήσουν με κυκλοφορία διπλής κατεύθυνσης.
3. Τα περιβαλλοντικά στοιχεία της σήραγγας. Δηλαδή τα επίπεδα των ρύπων, τις τοπικές τιμές συγκέντρωσης CO, NO_x, των σωματιδίων και τέλος τυχόν ειδικές απαιτήσεις για το κάθε έργο.
4. Ασφάλεια σε πυρκαγιά. Εξετάζεται η κυκλοφορία μονής κατεύθυνσης (με περιοδική επιτηρούμενη λειτουργία σε δύο κατευθύνσεις) ή διπλής, η πιθανή ή αποτρεπτή εξάπλωση καπνού σε ακινητοποιημένα οχήματα, οι εγκαταστάσεις διαφυγής για τους παγιδευμένους στη σήραγγα, τα διαθέσιμα μέσα για την παρακολούθηση του συστήματος και τέλος η μη λειτουργία εξοπλισμού του αερισμού λόγω της πυρκαγιάς.

Για υπεραστικές σήραγγες μήκους έως 500 m δεν προβλέπεται σύστημα αερισμού για καμία από τις δύο βασικές συνθήκες λειτουργίας. Η απομάκρυνση των ρύπων στην περίπτωση αυτή θεωρείται ότι πραγματοποιείται μέσω του φυσικού αερισμού. Υπολογίζονται οι εκπεμπόμενοι ρύποι σε συνθήκες αιχμής, δηλαδή στάσεως και πολύ πυκνής κυκλοφορίας με χαμηλές ταχύτητες (π.χ. 10 km/h), και σε περίπτωση οριακών συνθηκών ρύπων στις δυσμενέστερες κυκλοφοριακά συνθήκες και φόρτους, και εισάγονται μέτρα ρύθμισης της κυκλοφορίας κατά την χρήση της σήραγγας.

Για υπεραστικές σήραγγες μήκους άνω των 500 m προτείνεται αιτιολογημένα το σύστημα ή ο συνδυασμός των συστημάτων αερισμού που πληρούν τα ειδικά κριτήρια μελέτης του έργου και εξασφαλίζει τα μέγιστα τεchnοοικονομικά οφέλη. Για μήκη από 500 m έως και 3 km προτιμάται ο διαμήκης

αερισμός. Για σήραγγες άνω των 3 km θα γίνεται τεχνικοοικονομική αξιολόγηση όλων των συστημάτων αερισμού, συμπεριλαμβανομένου του διαμήκους, με χρήση ενδιάμεσων σταθμών εναλλαγής αέρα το πολύ ανά 3 km.

Στον **Πίνακα 2** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι περιοχές εφαρμογής των συστημάτων αερισμού [19].

Πίνακας 2. Περιοχές εφαρμογής των συστημάτων αερισμού [19]

	Μήκος σήραγγας σε km	
	Σήραγγα μιας οπής δύο κατευθύνσεων κυκλοφορίας	Σήραγγα 2 οπών μονής κατεύθυνσης κυκλοφορίας
Φυσικός αερισμός (με σήμανση κινδύνου για CO)	μέχρι 0.4	μέχρι 0.7
Διαμήκης αερισμός: <ul style="list-style-type: none"> • με ωστικούς ανεμιστήρες • και αγωγό αναρρόφησης 	μέχρι 2 μέχρι 4	μέχρι 4 μέχρι 6
Ημιεγκάρσιος αερισμός: <ul style="list-style-type: none"> • αναστρεφόμενος • ημιεγκάρσιος - εγκάρσιος 	από 0.7 από 1	από 2
Εγκάρσιος αερισμός	από 2	από 6

Στο πλαίσιο των συστημάτων εκκαπνισμού των σηράγγων μεγάλου μήκους (μεγαλύτερου από 3000 m) απαιτείται ορισμένες φορές η κατασκευή ειδικών φρεάτων, κεκλιμένων ή ακόμη και οριζόντιων στοών αερισμού εάν το επιτρέπουν οι επί τόπου μορφολογικές συνθήκες [20].

2.5 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΩΝ

2.5.1 Αξονικοί ανεμιστήρες

Στον διαμήκη αερισμό, συνήθως τοποθετούνται αξονικοί ανεμιστήρες ώσης (axial-flow fan) και εδράζονται στο θόλο της σήραγγας μέσω αντικραδασμικών βάσεων, ενώ είναι εξοπλισμένοι με ακουστικούς σιγαστήρες στην είσοδο και έξοδο τους. Η διάμετρος τους κυμαίνεται από 600 – 1500 mm, η ταχύτητα περιστροφής από 3000 – 750 rpm και η ισχύς του κινητήρα είναι από 5 – 60 kW. Η λειτουργία τους είναι πλήρως αναστρέψιμη, και παρέχουν την ίδια ώση και προς τις δύο κατευθύνσεις ροής του αέρα [7]. Όσον αφορά στην τοποθέτηση των ανεμιστήρων, η πιο οικονομική επιλογή είναι να τοποθετηθούν κοντά στα στόμια της σήραγγας. Όμως, κάτι τέτοιο μειώνει την αποδοτικότητα τους, συνεπώς ο πρώτος και ο τελευταίος ανεμιστήρας τοποθετούνται 80 – 100 m εντός της σήραγγας.

2.5.2 Ταχύτητα ανεμιστήρων

Σύμφωνα με τις Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων (ΟΜΟΕ, 2017) και της Permanent International Association of Road Congresses (PIARC, 1999), η μέγιστη επιτρεπόμενη κατά μήκος ταχύτητα ροής αέρα στη σήραγγα δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 8 m/s σε σήραγγες διπλής κατεύθυνσης, και 10 m/s σε σήραγγες μονής κατεύθυνσης. Είναι οικονομικά αποδοτικές και δεν ενοχλούν την κίνηση των οχημάτων και το προσωπικό που λειτουργεί εντός της σήραγγας.

Επίσης, ένα άλλο βασικό κριτήριο που επηρεάζει την λειτουργία και την απόδοση του συστήματος αερισμού είναι οι καιρικές συνθήκες στην περιοχή της σήραγγας. Συνεπώς, είναι βασικό να προσδιορίζεται η θερμοκρασία περιβάλλοντος και η ταχύτητα/ διεύθυνση ανέμου. Για αυτό, ως ελάχιστη ταχύτητα ανέμου λαμβάνονται υπόψη τα 5 m/s, εκτός αν ορισθεί κάτι διαφορετικό για την συγκεκριμένη σήραγγα [18] [21].

2.5.3 Αναστρεψιμότητα των ανεμιστήρων

Η αναστρεψιμότητα των ανεμιστήρων μπορεί να είναι αρκετά χρήσιμη σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης (π.χ. πυρκαγιά), ιδίως όταν η σήραγγα έχει εξόδους διαφυγής, πέραν των στομιών. Όμως, κατά τον σχεδιασμό της αναστροφής των ανεμιστήρων πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι μια τέτοια λειτουργία απαιτεί χρόνο (έως και 10 λεπτά), ανάλογα με το σύστημα αερισμού, την γεωμετρία της σήραγγας, τον τύπο των ανεμιστήρων που χρησιμοποιούνται κτλ. και δεν έχει την ίδια δύναμη ώσης. Για παράδειγμα, υπάρχουν ανεμιστήρες «jet fans» όπου κατά τη αντίστροφη λειτουργία η δύναμη ώσης μπορεί να είναι μικρότερη από το 50% της ονομαστικής [21].

2.5.4 Υπό συνθήκες θερμότητας

Ο εξοπλισμός του συστήματος αερισμού, καθώς καλείται να λειτουργήσει υπό συνθήκες θερμότητας και καπνού κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς, πρέπει να έχει ονομαστική αντοχή στους 250 °C για ελάχιστο χρονικό διάστημα μίας ώρας. Για να εξασφαλισθεί η ορθή και συνεχόμενη λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες, έχει σημασία το υλικό των λεπίδων του ανεμιστήρα και επιλέγεται ο χάλυβας καθώς η χρήση μιας κανονικής λεπίδας από αλουμίνιο θα αστοχήσει σε σύντομο χρονικό διάστημα. Επίσης, σύμφωνα με την PIARC, το μήκος των λεπίδων ενδέχεται να διαστέλλεται στις υψηλές θερμοκρασίες συνεπώς συνιστάται να διατηρείται μια σχετική απόσταση μεταξύ των λεπίδων και του αγωγού [21].

3 ΑΝΑΓΚΕΣ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΣΕ ΚΑΝΟΝΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Όπως αναφέρθηκε, η ανάγκη για μηχανικά μέσα αερισμού, καθώς και το είδος τους επηρεάζεται από τις εξής παραμέτρους:

- Το μήκος της σήραγγας
- Τον τύπο της σήραγγας (μονής ή διπλής κατευθύνσεως)
- Τις συνθήκες της σήραγγας (πιθανότητα μπουλιαρίσματος)
- Τον τύπο των οχημάτων

Μια υπόγεια κατασκευή χρειάζεται επαρκή ποσότητα καθαρού αέρα για να διασφαλίσει ασφάλεια και λειτουργικότητα. Για αυτόν τον λόγο το όριο ταχύτητας εντός των σηράγγων είναι μικρότερο, ώστε να μειώνονται και οι αντίστοιχες εκπομπές ρύπων. Οι εκπομπές αυτές είναι ρύποι αναφοράς από τα οχήματα σε οδικές σήραγγες και δεν πρέπει να υπερβαίνουν την μέγιστη αποδεκτή τιμή τους.

3.2 ΤΥΠΟΙ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

Ο ρυθμός εκπομπής των ρύπων εξαρτάται από τον αριθμό και τον τύπο των οχημάτων (επιβατικά, φορτηγά κτλ.), την ταχύτητα του οχήματος, την κλίση του οδοστρώματος και τις υπόλοιπες παραμέτρους που επηρεάζουν την ισχύ που απαιτείται για την κίνηση του οχήματος, όπως το βάρος [22]. Οι κρίσιμες εκπομπές των οχημάτων είναι το μονοξείδιο του άνθρακα CO, το διοξείδιο του άνθρακα CO₂, τα οξείδια του αζώτου NO_x, ο μόλυβδος Pb, ο υδρογονάνθρακας HC, το διοξείδιο του θείου SO₂, οι αλδεΐδες και τα αιωρούμενα σωματίδια. Υπάρχουν και άλλες εκπομπές αερίων που όμως δεν θεωρούνται κρίσιμες, καθώς δεν υπάρχουν σε μεγάλες ποσότητες. Παρακάτω θα αναλυθούν οι τρεις βασικότερες εκπομπές.

3.2.1 Μονοξείδιο του άνθρακα

Έχει αποδειχθεί ότι το μονοξείδιο του άνθρακα είναι ο βασικότερος ρύπος για την υγεία και ασφάλεια εντός της σήραγγας. Είναι αέριο άοσμο και προϊόν ατελούς καύσεως ανθρακούχων υλών, εκρηκτικών υλών, μηχανών εσωτερικής καύσης, κ.ά. Είναι αρκετά επικίνδυνο καθώς η εισπνοή του προκαλεί ελάττωση του οξυγόνου που μεταφέρει το αίμα στους ιστούς [19]. Στον **Πίνακα 3** παρουσιάζονται οι αντίστοιχες τιμές σχεδιασμού για διάφορες καταστάσεις κυκλοφορίας και τα όρια λειτουργίας της σήραγγας.

Πίνακας 3. Τιμές σχεδιασμού και λειτουργίας για το μονοξείδιο του άνθρακα CO [23]

Traffic situation	Design value	Operation condition	Operation limits
Free flowing peak traffic 50 – 100 km/h	70 ppm	Normal operation*	< 100 ppm
Daily congested traffic, stopped on all lanes	70 ppm	Planned maintenance work in a tunnel under traffic**	20 ppm
Exceptional congested traffic, stopped on all lanes	90 ppm	Threshold value for tunnel closure	200 ppm

* Intermediate set points and thresholds may be set at levels below the design values

** National workplace levels to be considered

3.2.2 Οξείδια του αζώτου

Όπως είναι γνωστό, το άζωτο σχηματίζει διάφορα οξείδια (N_2O , NO , NO_2 , N_2O_4 , N_2O_3 και N_2O_5), τα οποία με την εξαίρεση του N_2O , είναι τοξικά [19]. Στις σήραγγες εντοπίζονται τα οξείδια του αζώτου, που είναι το άθροισμα των NO και NO_2 . Η τοξική επίδραση αυτών των δύο είναι παρόμοια με τη διαφορά ότι το NO_2 είναι πιο τοξικό από το NO [14].

Μονοξείδιο του Αζώτου (NO). Είναι αέριο άχρωμο και άοσμο και σχηματίζεται κατά την καύση σε υψηλές θερμοκρασίες. Η ποσότητα του αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας της φωτιάς [14].

Διοξείδιο του Αζώτου (NO_2). Είναι ένα πορτοκαλί-κόκκινο-καφέ αέριο και οριακά αδιάλυτο. Έχει μια χαρακτηριστική μυρωδιά, η οποία είναι ερεθιστική και τοξική, και περίπου το 95% που εισπνέεται παραμένει στον οργανισμό του ανθρώπου. Συγκεντρώσεις που κυμαίνονται από 100-150 ppm¹ θεωρούνται επικίνδυνες για χρονική έκθεση 30-60 min. Επίσης, το διοξείδιο του αζώτου σε συνδυασμό με τον υδρογονάνθρακα και το ηλιακό φως μετατρέπονται σε αιθαλομίχλη και προκαλούν μείωση στην ορατότητα [14].

Σύμφωνα με την Permanent International Association of Road Congresses (PIARC), η τιμή του σχεδιασμού των αερίων NO_2 προτείνεται να έχει μια μέση συγκέντρωση 1.0 ppm (0.0001%) κατά μήκος της σήραγγας. Τα επίπεδα του NO_2 στις αστικές περιοχές εξαρτώνται από την εποχή, την θερμοκρασία, καθώς και από την ώρα της ημέρας. Σε περιοχή με υψηλή κίνηση, τα αποδεκτά επίπεδα μπορούν να ξεπεραστούν σε μικρό χρονικό διάστημα [23].

3.2.3 Αιωρούμενα σωματίδια

Τα αιωρούμενα σωματίδια παράγονται συνήθως από την ατελή καύση των υδρογονανθράκων, αλλά και από την φθορά των ελαστικών και των φρένων, και την τριβή των οχημάτων με το οδόστρωμα. Τείνουν να παραμένουν στον περιβάλλοντα χώρο και ένας από τους κινδύνους που έχουν είναι ότι απορροφούν αέρια, όπως το διοξείδιο του θείου και το οξείδιο του αζώτου, και μεταφέρονται στο αναπνευστικό σύστημα του ανθρώπου. Η παρουσία των αιωρούμενων σωματιδίων είναι η βασική αιτία του καπνού και της ομίχλης στις σήραγγες. Ο καπνός είναι ακόμα πυκνότερος όταν το ποσοστό των πετρελαιοκίνητων οχημάτων είναι υψηλό [14] [23]. Για την εκτίμηση της ορατότητας εφαρμόζεται ο κάτωθι τύπος [23]:

$$K = -\frac{1}{L} \times \ln \left(\frac{I}{I_0} \right)$$

(3.1)

Όπου,

I_0 : Ένταση του φωτός στην πηγή [-]

I : Ένταση του φωτός στον δέκτη [-]

L : Διάστημα μεταξύ πηγής και δέκτη [m]

K : Συντελεστής [m^{-1}]

Στον **Πίνακα 4** παρουσιάζονται οι συνθήκες ορατότητας, καθώς και οι τιμές του συντελεστή K . Πιο συγκεκριμένα, για $K = 0.003 m^{-1}$ η ατμόσφαιρα είναι ελαφρώς θολή, ενώ για $0.012 m^{-1}$ επικρατεί μια αρκετά αυξημένη νεφώδη κατάσταση, που δημιουργεί συνθήκες ανασφάλειας στους οδηγούς των οχημάτων.

Πίνακας 4. Συνθήκες ορατότητας και ο συντελεστής K [23]

Visibility condition	Extinction coefficient K
Slightly hazy	$0.003 m^{-1}$
Hazy	$0.007 m^{-1}$
Foggy	$0.009 m^{-1}$
Uncomfortable	$0.012 m^{-1}$

3.3 ΕΠΙΡΡΟΗ ΥΨΟΜΕΤΡΟΥ

Σε μεγαλύτερα υψόμετρα, η εκπομπή των ρύπων των οχημάτων αυξάνεται σημαντικά λόγω της μειωμένης ατμοσφαιρικής πίεσης. Η αύξηση της κατανάλωσης της βενζίνης, ανεξάρτητα από το βάρος του οχήματος, οδηγεί σε σημαντική αύξηση του μονοξειδίου του άνθρακα. Σχετικά με τα πετρελαιοκίνητα οχήματα, η μειωμένη πίεση του αέρα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση στην παραγωγή καπνού, ιδίως όταν οι κινητήρες δεν έχουν σωστή ρύθμιση και σωστές συνθήκες λειτουργίας [14].

3.4 ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΕΠΙΤΡΕΠΟΜΕΝΕΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ

Στον **Πίνακα 5** παρουσιάζονται οι μέγιστες επιτρεπόμενες συγκεντρώσεις για συνθήκες ελεύθερης ροής και για κυκλοφοριακή συμφόρηση σύμφωνα με την Οδηγία Μελετών Οδικών Έργων 2017 [18].

Πίνακας 5. Μέγιστη επιτρεπόμενη συγκέντρωση [18]

Ρύπος	Μέγιστη επιτρεπόμενη συγκέντρωση (μέσος όρος 5 λεπτών)
CO	100 ppm για συνθήκες ελεύθερης ροής
	150 ppm για κυκλοφοριακή συμφόρηση ή ακινητοποιημένη κυκλοφορία
Αιθάλη	0.005 m ⁻¹ για συνθήκες ελεύθερης ροής με μέση ταχύτητα άνω των 60 km/h
	0.007 m ⁻¹ για συνθήκες ελεύθερης ροής με μέση ταχύτητα κάτω των 60 km/h
	0.009 m ⁻¹ για κυκλοφοριακή συμφόρηση ή ακινητοποιημένη κυκλοφορία
NO _x	25 ppm για συνθήκες ελεύθερης ροής, κυκλοφοριακής συμφόρησης ή ακινητοποιημένης κυκλοφορίας

Στον Πίνακα 6 παρουσιάζονται οι βαθμίδες λειτουργίας του συστήματος αερισμού με τα αντίστοιχα επίπεδα των ρυπαντών (ΟΜΟΕ 2017, άρθρο 4) [18]. Όπως φαίνεται, το σύστημα του αερισμού ενεργοποιείται σταδιακά και διατηρείται στην κάθε βαθμίδα όσο απαιτείται, προκειμένου να εξασφαλιστεί ο σταθερός έλεγχος και η λειτουργία του συστήματος αερισμού. Για την αποτελεσματική παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα εντός της σήραγγας, και τον αποτελεσματικό έλεγχο του συστήματος αερισμού, τοποθετούνται κατ' ελάχιστον αισθητήρια CO και ορατότητας σε δύο θέσεις σε κάθε ζώνη αερισμού. Εάν κρίνεται απαραίτητη και η μέτρηση των επιπέδων NO_x, τότε τα αισθητήρια φέρουν και αισθητήρα NO_x. Σημειώνεται ότι ως ζώνη αερισμού εννοείται το τμήμα της σήραγγας με τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά και χαρακτηριστικά ροής αέρα.

Πίνακας 6. Βαθμίδες λειτουργίας και αντίστοιχα επίπεδα ρυπαντών [18]

Λειτουργία	Επίπεδα CO (ppm)	Επίπεδα Ορατότητας (ανά m)	Επίπεδα NO _x (Εφ' όσον μετρείται)
Βαθμίδα 1 ^η	40	0,004	-
Βαθμίδα 2 ^η	100	0,0075	-
Βαθμίδα 3 ^η	150	0,009	-
Προειδοποιητικό σήμα κινδύνου	200	0,010	25
Σήμα κινδύνου και κλείσιμο σήραγγας	> 250	> 0,012	> 30

3.5 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ ΤΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΣΤΗ ΣΗΡΑΓΓΑ

Σύμφωνα με την προδιαγραφή PIARC 2019R02EN [23], αρκετοί παράγοντες επηρεάζουν τα ποσοστά των ρύπων εντός της σήραγγας, συνεπώς είναι ορθό να αναλυθούν οι κυκλοφοριακές περιπτώσεις και να συνυπολογιστούν στον απαιτούμενο αερισμό της σήραγγας.

Οι κύριες κατηγορίες των οχημάτων είναι τα επιβατικά οχήματα PC¹ και τα ελαφρά επαγγελματικά οχήματα LVC², που χωρίζονται σε βενζινοκίνητα και πετρελαιοκίνητα, και τα βαρέα φορτηγά οχήματα HGV³, που είναι πετρελαιοκίνητα. Τα ελαφρά επαγγελματικά οχήματα αφορούν οχήματα με μάζα έως και 3,5 t, ενώ τα λεωφορεία και τα φορτηγά θεωρούνται βαρέα φορτηγά οχήματα με μάζα μεγαλύτερη των 3,5 t. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι οι εκπομπές των βαρέων οχημάτων εξαρτώνται από τη μάζα του οχήματος. Για τον υπολογισμό των εκπομπών απαιτείται να είναι γνωστός ο αριθμός των οχημάτων.

Για τον προσδιορισμό του μέγιστου δυνατού αριθμού οχημάτων μιας σήραγγας υπολογίζονται οι μονάδες επιβατικών οχημάτων PCU⁴. Αντιπροσωπεύουν ένα μέσο όχημα σύμφωνα με το μέγεθος και το σχήμα τους. Πιο συγκεκριμένα, ένα επιβατικό όχημα αντιστοιχεί σε μια μονάδα επιβατικού οχήματος PCU, ενώ ένα φορτηγό/ λεωφορείο αντιστοιχεί σε δύο μονάδες επιβατικών οχημάτων σε ομαλή κυκλοφορία και τρεις σε αργή κυκλοφορία και σε ανηφορικούς οδούς. Με βάση τα παραπάνω, ο αριθμός των αυτοκινήτων είναι ίσος με [23]:

$$D_{PCU} = D_{veh} \times [(1 - \alpha_{HGV}) + (\alpha_{HGV} \times f_{HGV})]$$

(3.2)

Όπου,

D_{PCU} : ο αριθμός των μονάδων επιβατικών οχημάτων PCU ανά χιλιόμετρο [pcu/km]

D_{veh} : ο αριθμός των οχημάτων ανά χιλιόμετρο [vehicles/km]

α_{HGV} : ποσοστό φορτηγών/ λεωφορείων [%]

f_{HGV} : ο αριθμός των HGV ανά PCU

Ταχύτητα κυκλοφορίας ≤ 10 km/h: $f_{HGV} = 3$

Ταχύτητα κυκλοφορίας > 10 km/h: $f_{HGV} = 2$

Στον **Πίνακα 7** παρουσιάζονται οι μέγιστες κυκλοφοριακές πυκνότητες για υπεραστικές και αστικές σήραγγες. Παρατηρείται ότι η μέγιστη κυκλοφοριακή πυκνότητα (PCU) εξαρτάται αρχικά από το φόρτο κυκλοφορίας, από την τοποθεσία της (αστική ή υπεραστική) και τέλος από το αν είναι μονής ή διπλής κατεύθυνσης. Ανεξάρτητα από τον τύπο της σήραγγας, η μέγιστη ταχύτητα ανά λωρίδα ανέρχεται στα 60 km/h. Για την εκτίμηση του ωριαίου φορτίου αιχμής επιλέγεται το 10% του μέσου ημερήσιου όγκου κίνησης.

Πίνακας 7. Μέγιστες κυκλοφοριακές πυκνότητες για υπεραστικές και αστικές σήραγγες [23]

		Average peak traffic density (PCU/km)			
		Traffic flow (PCU/h) per lane			
		RURAL TUNNEL			
		Unidirectional traffic		Bi-directional traffic	
	v [km/h]	PCU/km	PCU/h	PCU/km	PCU/h
Fluid traffic	60	30	1800	23	1400
Congested traffic	10	70	700-850	60	600
Standstill	0	150	-	150	-
		URBAN TUNNEL			
		Unidirectional traffic		Bi-directional traffic	
	v [km/h]	PCU/km	PCU/h	PCU/km	PCU/h
Fluid traffic	60	33	2000	25	1500
Congested traffic	10	100	1000	85	850
Standstill	0	165	-	165	-

Η κυκλοφοριακή συμφόρηση (ταχύτητα 10 km/h) και η στασιμότητα των οχημάτων (0 km/h) καθορίζουν τις απαιτήσεις της κανονικής λειτουργίας του αερισμού. Ωστόσο, σε σήραγγες με μεγαλύτερο μήκος, για να αποφευχθεί η υπερδιαστασιολόγηση σε ανεμιστήρες, προτείνεται η εφαρμογή του συστήματος ελέγχου της κυκλοφορίας των οχημάτων.

3.6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΑΕΡΑ

Η απαιτούμενη παροχή αέρα για την αραιώση των ρύπων, εξαρτάται από το ποσοστό συγκέντρωσής τους εντός της σήραγγας. Στον αριθμητή είναι η συνολική παραγωγή των ρυπαντών κατά μήκος της σήραγγας (G_{tun}), διαιρούμενη με την επιτρεπόμενη αλλαγή στις συγκεντρώσεις των ατμοσφαιρικών ρύπων ($C_{adm}-C_{amb}$). Η σχέση αυτή εκτιμάται ως εξής [23]:

$$Q = \frac{G_{tun}}{C_{adm} - C_{amb}}$$

(3.3)

Όπου,

Q: Απαιτούμενη παροχή καθαρού αέρα [m^3/s]

G_{tun} : Συνολική παραγωγή εκπομπών κατά μήκος της σήραγγας για τα αέρια [g/s]

C_{adm} : (admissible) Μέγιστο αποδεκτό επίπεδο συγκέντρωσης CO, NO_x [g/m^3]

C_{amb} : (ambient) Επίπεδο ρύπων στον καθαρό αέρα CO, NO_x (συνήθως λαμβάνεται ίσο με 0) [g/m^3]

Σημειώνεται ότι για τον υπολογισμό της απαιτούμενης ποσότητας νωπού αέρα λόγω NO_x γίνεται ο υπολογισμός των εκπομπών NO₂, καθώς το NO δεν θεωρείται τόσο επιβλαβές. Επίσης, σε αρκετές Ευρωπαϊκές χώρες γίνεται μια προσαύξηση 20-30 % της συνολικής παραγωγής εκπομπών NO₂ η οποία εξαρτάται από το ποσοστό πετρελαιοκίνητων οχημάτων και τον χρόνο παραμονής των εκπομπών NO_x εντός της σήραγγας [23].

Για τον υπολογισμό της απαιτούμενης παροχής αέρα Q [m^3/s], έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η απαιτούμενη ορατότητα, η συγκέντρωση C αντικαθίσταται με τον συντελεστή K στην σχέση (3.3) [23].

$$Q = \frac{G_{tun}}{K_{adm} - K_{amb}} \quad (3.4)$$

Q: Απαιτούμενη παροχή καθαρού αέρα [m^3/s]

G_{tun} : Συνολική παραγωγή εκπομπών κατά μήκος της σήραγγας για την ορατότητα [m^3/s]

K_{adm} : Μέγιστο αποδεκτό επίπεδο ορατότητας [g/m^3], (admissible)

K_{amb} : Επίπεδο ρύπων για την ορατότητα [g/m^3], (ambient)

Η συνολική παραγωγή ρυπαντών, από την κίνηση των οχημάτων υπολογίζεται σύμφωνα με την κάτωθι σχέση [23]:

$$G_{tun} = n_{veh} \times g_{fac} \quad (3.5)$$

Όπου,

n_{veh} : Αριθμός οχημάτων, κάθε κατηγορίας, ανά λωρίδα [-]

g_{fac} : Εκπομπή για CO , NO_x [$g/ (h. veh)$] και σωματίδια [$m^2/ (h. veh)$]

3.6.1 Υπολογισμός εκπομπών ρύπων

Η επιλογή των συντελεστών εκπομπής εξαρτάται από το είδος του καυσίμου (βενζίνη ή πετρέλαιο), την ταχύτητα κυκλοφορίας, την κλίση της σήραγγας, την χρονολογία του οχήματος και το υψόμετρο της σήραγγας. Μόνο για την κατηγορία των βαρέων οχημάτων, ενδεχομένως να επιλέγεται και ο συντελεστής που αφορά στη μάζα του οχήματος.

Για τον υπολογισμό των παραγοντικών εκπομπών g_{fac} είναι βασική η ποσόστωση της τεχνολογίας του στόλου οχημάτων. Στον **Πίνακα 8** παρουσιάζεται η ποσόστωση για το έτος 2018. Η κατηγορία του οχήματος επηρεάζει το ποσοστό των εκπομπών και είναι συναρτήσεως της ταχύτητας του οχήματος και της κλίσης του δρόμου. Η επιρροή του χρόνου, του βάρους του οχήματος και του υψομέτρου λαμβάνονται υπόψη μέσω των συντελεστών f_t , f_m και f_h . Για τα αιωρούμενα σωματίδια λαμβάνεται η αντίστοιχη εκπομπή μέσω του συντελεστή g_{non-ex} . Με βάσει τα παραπάνω, ο υπολογισμός των εκπομπών γίνεται σύμφωνα με την κάτωθι σχέση [23]:

$$g_{fac} = g_{cat} \times f_t \times f_m \times f_h + g_{non-ex} \quad (3.6)$$

Όπου,

g_{fac} : Εκπομπή για CO , NO_x [$g/ (h. veh)$] και σωματίδια [$m^2/ (h. veh)$], (factored)

g_{cat} : Κύριος συντελεστής εκπομπών ανά κατηγορία οχημάτων όπου είναι συναρτήσεως της ταχύτητας του οχήματος και της κλίσης της σήραγγας, (category)

f_t : Συντελεστής βελτίωσης της τεχνολογίας [-], (time)

f_m : Συντελεστής μάζας, ισχύει μόνο για τα βαρέα οχήματα [-], (mass)

f_h : Συντελεστής διόρθωσης υψομέτρου [-], (altitude)

g_{non-ex} : Αιωρούμενα σωματίδια [-], (non exhaust)

Πίνακας 8. Ποσοστωση της τεχνολογίας του στόλου οχημάτων για τον υπολογισμό των εκπομπών ρύπων για το έτος 2018 [23]

type	year	pre EU1	EU 1	EU 2	EU 3	EU 4	EU 5	EU 6
PC gasoline	2018	2.2%	2.3%	2.6%	2.1%	17.0%	35.7%	38.2%
PC Diesel		0.2%	1.3%	2.2%	5.9%	16.8%	36.0%	37.5%
LCV gasoline		5.7%	3.3%	2.4%	4.3%	15.9%	29.7%	38.9%
LCV Diesel		1.7%	1.7%	3.0%	8.3%	20.5%	33.6%	31.1%
HGV Diesel		0.8%	0.6%	1.6%	4.9%	3.1%	29.2%	59.8%

Οι τιμές των παραπάνω παραμέτρων λαμβάνονται από πίνακες που παρατίθενται στο Παράρτημα Α. Σημειώνεται ότι ανά κατηγορία οχημάτων υπάρχουν ορισμένες διαφοροποιήσεις.

f_h : Για το επιβατικό όχημα, ο συντελεστής διόρθωσης υψομέτρου παρουσιάζει τιμές για υψόμετρα +2000 m και άνω (Πίνακας Α- 19). Για υψόμετρα έως και +1000 m πάνω από τη στάθμη της θάλασσας, ο συντελεστής διόρθωσης υψομέτρου λαμβάνεται ίσος με 1,0, ενώ για υψόμετρα μεταξύ +1000 m και +2000 m ο συντελεστής προκύπτει μέσω γραμμικής παρεμβολής. Για τις κατηγορίες οχημάτων LCV και HGV, δεν υπάρχει συντελεστής διόρθωσης για υψόμετρα μέχρι και +2000 m [23].

g_{non-ex} : Ο συντελεστής των αιωρούμενων σωματιδίων για το ελαφρύ επαγγελματικό όχημα, λόγω έλλειψης δεδομένων, λαμβάνεται από τον Πίνακα Α- 21, που αφορά τα επιβατικά οχήματα.

f_m : Για τα βαρέα φορτηγά οχήματα, δίνονται οι συντελεστές μόνο για πετρελαιοκίνητα και αναφέρονται σε μια μέση μάζα οχήματος 23 t. Τα λεωφορεία μπορούν να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας την κατηγορία του βαρέως οχήματος με μειωμένο συντελεστή μάζας. Για παράδειγμα, η μάζα των 15 t απευθύνονται σε λεωφορεία και πούλμαν. Συνεπώς είναι σημαντικό οι τιμές να προσαρμόζονται σύμφωνα με τη μειωμένη μάζα [23].

3.6.2 Υπολογισμός αριθμού οχημάτων ανά κατηγορία

Ο αριθμός των οχημάτων ανά κατηγορία εξαρτάται από τον στόλο των οχημάτων, τις συνθήκες της κυκλοφορίας, το μήκος της σήραγγας και τον αριθμό των λωρίδων. Έτσι ισχύει ότι [23]:

$$n_{cat} = D \times L_{sec} \times \alpha_{cat} \quad (3.7)$$

Όπου,

n_{cat} : Αριθμός των οχημάτων ανά κατηγορία [-]

D : Κυκλοφοριακή πυκνότητα [veh/km]

L_{sec} : Μήκος σήραγγας [m]

α_{cat} : Ποσοστό κατηγορίας οχημάτων [%]

Η κυκλοφοριακή πυκνότητα υπολογίζεται σύμφωνα με την κάτωθι σχέση [23]:

$$D = \frac{q}{v}$$

(3.8)

Όπου,

q : Ωριαίο φορτίο [veh/h]

v : Ταχύτητα οχήματος [km/h]

3.7 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΤΩΣΗΣ ΠΙΕΣΗΣ

Στον διαμήκη αερισμό, για την κάλυψη της πτώσης πίεσης εντός της σήραγγας, χρησιμοποιούνται ανεμιστήρες αξονικού τύπου. Ο υπολογισμός της συνολικής πτώσης πίεσης εντός της σήραγγας, σε κανονική λειτουργία, είναι το άθροισμα της πτώσης πίεσης λόγω τριβών στα τοιχώματα και στα λοιπά εμπόδια της σήραγγας, λόγω των στομιών της σήραγγας, λόγω της κυκλοφορίας των οχημάτων και λόγω των μετεωρολογικών φαινομένων μεταξύ των δύο στομιών [24]:

$$\Delta P_{ολ} = \Delta P_{τριβών} + \Delta P_{στομιών} + \Delta P_{οχημάτων} + \Delta P_{μετ.φαιν.}$$

(3.9)

- Πτώση πίεσης λόγω τριβών στα τοιχώματα και στα λοιπά εμπόδια της σήραγγας ($\Delta P_{τριβών}$)

Η απώλεια πίεσης λόγω τριβών στα τοιχώματα και στα λοιπά εμπόδια της σήραγγας, είναι γραμμική απώλεια, λόγω του ότι διατηρεί έναν σταθερό ρυθμό πτώσης [25].

$$\Delta P_{τριβών} = \frac{1}{2} \times \rho_{air} \times V_T^2 \times \lambda \times \frac{L}{D_h}$$

(3.10)

Όπου,

$\Delta P_{τριβών}$: Πτώση πίεσης λόγω τριβών [Pa]

ρ_{air} : Πυκνότητα του αέρα (1,2 kg/m³ για T=20 ° C), [kg/m³]

V_T : Ταχύτητα του αέρα εντός της σήραγγας [m/s]

λ: Συντελεστής απωλειών τριβής (για σχετικά λείες επιφάνειες λαμβάνεται 0,015 ενώ για σχετικά τραχεία τοιχώματα λαμβάνεται 0,06) [-]

L: Μήκος σήραγγας [m]

D_h: Υδραυλική διάμετρος της διατομής της σήραγγας [m]

- Πτώση πίεσεως στα στόμια της σήραγγας ($\Delta P_{\text{στομιών}}$)

Η πτώση πίεσης στα στόμια της σήραγγας συμβαίνει καθώς ο αέρας εισέρχεται στη σήραγγα από άπειρο χώρο, και κατά την έξοδο του καταλήγει σε χώρο άπειρων διαστάσεων [25].

$$\Delta P_{\text{στομιών}} = \frac{1}{2} \times \rho_{\text{air}} \times V_T^2 \times (1 + \Sigma\zeta)$$

(3.11)

Όπου,

$\Delta P_{\text{στομιών}}$: Πτώση πίεσης [Pa]

ρ_{air} : Πυκνότητα του αέρα (1,2 kg/m³ για T=20 ° C), [kg/m³]

V_T : Ταχύτητα του αέρα εντός της σήραγγας [m/s]

$\Sigma\zeta$: Συνολικός συντελεστής τοπικών αντιστάσεων και εξαρτάται από το σχήμα διατομής της σήραγγας. Είναι 0.5 για μη στρογγυλεμένα άκρα εισόδου στη σήραγγα [-]

- Πτώση πίεσεως λόγω κυκλοφορίας οχημάτων ($\Delta P_{\text{οχημάτων}}$)

Η παρουσία του οχήματος, εντός της σήραγγας, προκαλεί μεταβολή στο πεδίο ροής γύρω από αυτό, και εν συνεχεία μεταβολή της στατικής πίεσης. Ο υπολογισμός της πτώσης πίεσης λόγω κυκλοφορίας των οχημάτων μεταβάλλεται ανάλογα με τον αέρα και την κατεύθυνση του οχήματος. Πιο συγκεκριμένα, το πρόσημο της σχετικής ταχύτητας θεωρείται αρνητικό όταν η κατεύθυνση της κίνησης των οχημάτων είναι ίδια με του αέρα, και θετικό όταν η κατεύθυνση της κίνησης των οχημάτων είναι αντίθετη με του αέρα ($V_T \pm V_{o\chi}$) [25].

$$\Delta P_{\text{οχημάτων}} = \frac{\rho_{\text{air}}}{2} \times \frac{A_{o\chi}}{A_t} \times D_{o\chi} \times C_D \times (V_T \pm V_{o\chi})^2$$

(3.12)

Όπου,

$\Delta P_{\text{οχημάτων}}$: Πτώση πίεσης [Pa]

ρ_{air} : Πυκνότητα του αέρα (1,2 kg/m³ για T=20 ° C), [kg/m³]

$A_{o\chi}$: Μετωπική επιφάνεια οχήματος [m²]

A_t : Ελεύθερη διατομή της σήραγγας [m²]

D_{οχ}: Πυκνότητα των οχημάτων

C_D: Συντελεστής αντιστάσεως οχημάτων (για επιβατικά οχήματα είναι 0.4 για κυκλοφοριακή συμφόρηση και 0.35 για κανονική ροή και για βαρέα φορτηγά είναι 1 για κυκλοφοριακή συμφόρηση και 0.8 για κανονική ροή) [-]

V_{οχ}: Ταχύτητα οχημάτων [m/s]

V_T: Ταχύτητα του αέρα εντός της σήραγγας [m/s]

- Πτώση πίεσεως λόγω μετεωρολογικών φαινομένων μεταξύ των δύο στομίων ($\Delta P_{\text{μετ.φαιν.}}$):

Η πτώση πίεσης λόγω μετεωρολογικών φαινομένων ($\Delta P_{\text{μετ.φαιν.}}$) είναι το άθροισμα της πτώσης πίεσης λόγω ανεμόπτωσης (ΔP_w), της θερμοκρασιακής διαφοράς (ΔP_T) και της βαρομετρικής πίεσης (ΔP_B).

$$\Delta P_{\text{μετ.φαιν.}} = \Delta P_w + \Delta P_T + \Delta P_B \quad (3.13)$$

Η πτώση πίεσης λόγω ανεμόπτωσης υπολογίζεται από τον κάτωθι τύπο (ΔP_w) [26]:

$$\Delta P_w = (\cos \varphi)^2 \times \frac{\rho_{\text{air}} \times v^2}{2} \quad (3.14)$$

Όπου,

φ: Γωνία προσπτώσεως ανέμου ως προς τον άξονα της σήραγγας [°]

v: Ταχύτητα ανέμου [m/s]

ρ_{air}: Πυκνότητα του αέρα (1,29 kg/m³ για T=0 ° C), [kg/m³]

Η πτώση λόγω διαφοράς θερμοκρασίας δίνεται από τον εξής τύπο (ΔP_T):

$$\Delta P_T = h \times \rho_{\text{air}} \times \frac{T_i - T_a}{273 + T_i} \quad (3.15)$$

Όπου,

h: Διαφορά υψομέτρου μεταξύ των εισόδων [m]

ρ_{air}: Πυκνότητα του αέρα (1,2 kg/m³ για T=20 ° C), [kg/m³]

T_i: Θερμοκρασία αέρα εντός σήραγγας [°]

T_a: Θερμοκρασία αέρα εκτός σήραγγας [°]

Η πτώση λόγω διαφοράς βαρομετρικής πίεσης δίνεται από τον τύπο (ΔP_B) :

$$\Delta P_B = (b_1 - b_2) \times 10^{-2}$$

(3.16)

Όπου,

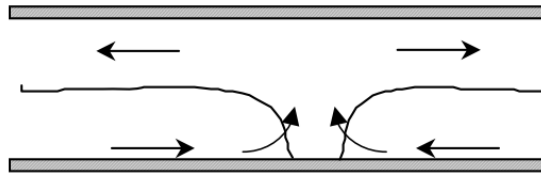
b₁: Βαρομετρική πίεση στην είσοδο της σήραγγας [hPa]

b₂: Βαρομετρική πίεση στην έξοδο της σήραγγας [hPa]

4 ΑΝΑΓΚΕΣ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΣΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η πυρκαγιά σε κλειστό χώρο διαφέρει σημαντικά από την περίπτωση ανοιχτού χώρου. Στο ύπαιθρο, ο καθαρός αέρας εισέρχεται από τα όρια της φωτιάς στο κέντρο της και έτσι επιτρέπει ανεμπόδιστα την ροή του καπνού. Στον κλειστό χώρο οι υψηλές θερμοκρασίες, που αναπτύσσονται γρήγορα, και η παραγωγή και συσσώρευση του καπνού διατηρούνται λόγω του περιορισμένου χώρου στην οροφή της σήραγγας. Αυτές οι συνθήκες οδηγούν στην μείωση της ορατότητας, την αύξηση των τοξικών αερίων και την ταχύτητα εξάπλωσης του καπνού και της πυρκαγιάς.



Σχήμα 13. Εξέλιξη καπνού σε σήραγγα με μηδενική κλίση και χωρίς σύστημα αερισμού [21]

4.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΩΤΙΑΣ

4.2.1 Θερμική Ισχύς (HRR)

Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας πυρκαγιάς (Fire Heat Release Rate ή HRR) είναι η ταχύτητα παραγωγής της θερμικής ενέργειας από μια πηγή (πυρκαγιά) εκφρασμένη σε MegaWatt (MW). Είναι ο κρισιμότερος παράγοντας καθώς προβλέπει την επικινδυνότητα της φωτιάς [27]. Στις περισσότερες πυρκαγιές, η απελευθέρωση της ενέργειας ποικίλει με τον χρόνο και αυτό μπορεί να εκφραστεί μέσω της παραβολικής σχέσης:

$$Q = \alpha \times t^2 = 1000 \times \left(\frac{t}{t_g}\right)^2$$

(4.1)

όπου,

Q: Θερμική ισχύς [KW]

α : Συντελεστής που εκφράζει το ρυθμό ανάπτυξης μιας φωτιάς [KW/s²]

t: Χρόνος [sec]

t_g : Χρόνος ανάπτυξης – growth [sec]

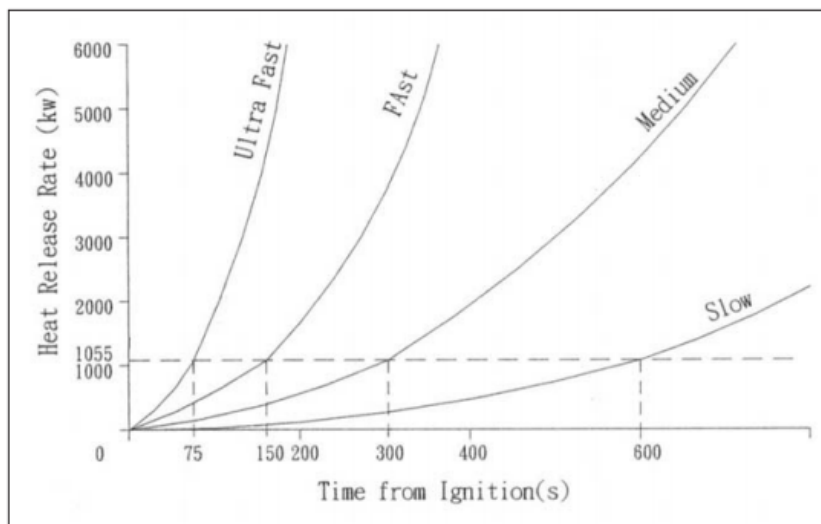
Πίνακας 9. Τιμές του συντελεστή ανάπτυξης α [11]

	Growth constant	Growth time
T-square fire	α (kW/s ²)	Tg (s)
Slow ^a	0.002931	600
Medium ^a	0.01127	300
Fast ^a	0.04689	150
Ultra-fast ^b	0.1878	75

^aConstants for these fire growth types based on data from NFPA204 (1991) and NFPA92B (1991).

^bConstants for the ultra-fast fire based on data from Nelson [4].

Στον Πίνακα 9 παρουσιάζονται οι τιμές της σταθεράς α (kW/m²), που αντιστοιχούν σε t-squared πυρκαγιές, για διάφορες περιπτώσεις ανάπτυξης της φωτιάς καθώς και ο χρόνος ανάπτυξης που απαιτείται σε κάθε περίπτωση προκειμένου ο ρυθμός απελευθέρωσης της θερμότητας να λάβει την τιμή 1055 KW. Στο Σχήμα 14 παρουσιάζεται το αντίστοιχο διάγραμμα.



Σχήμα 14. Ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας για διάφορες περιπτώσεις ανάπτυξης φωτιάς [11]

Ο αερισμός της σήραγγας έχει άμεση επίδραση στο μέγεθος της πυρκαγιάς, καθώς και στην ανάπτυξή της, και πρότείνει ο σχεδιασμός του αερισμού να γίνεται με βάση την θερμική ισχύ. Επίσης, παρέχει απαραίτητες πληροφορίες για τον σχεδιασμό του συστήματος πυρασφάλειας καθώς και του συστήματος αερισμού [28], [29]. Για την εκτίμηση της θερμικής ισχύος, συνήθως γίνεται η μέτρηση της κατανάλωσης του οξυγόνου στον απορροφητήρα του ανεμιστήρα [30].

Πίνακας 10. Ρυθμός απελευθέρωσης της θερμότητας με βάση τον τύπο του οχήματος [21]

Type	HRR (MW)
1 small passenger car	2,5
1 large passenger car	5
2-3 passenger cars	8
1 van	15
1 bus	20
1 lorry with burning goods (general case)	20-30

Σύμφωνα με την PIARC [21], ο ρυθμός απελευθέρωσης της θερμότητας εξαρτάται από τον τύπο του οχήματος, όπως φαίνεται στον **Πίνακα 10**. Πιο συγκεκριμένα, ένα επιβατικό όχημα έχει HRR στα 8 MW, ενώ ένα λεωφορείο έχει 20 MW. Σημειώνεται ότι τα μεγάλα φορτηγά, που μεταφέρουν εύφλεκτα καύσιμα, έχουν θερμική ισχύ 100-120 MW. Όταν ξεσπάσει η φωτιά, ο ρυθμός απελευθέρωσης της θερμότητας αυξάνεται ραγδαία μετά την ανάφλεξη και φτάνει το μέγιστο του τα πρώτα 10 με 20 λεπτά. Διατηρείται σε αυτό το υψηλό επίπεδο για ένα μικρό χρονικό διάστημα και ύστερα μειώνεται μονοτονικά [31], [4].

Το αντίστοιχο τυπικό διάγραμμα του ρυθμού απελευθέρωσης της θερμότητας συναρτήσει του χρόνου παρουσιάζεται στο **Σχήμα 15**. Ένα από τα βασικότερα χαρακτηριστικά της φωτιάς είναι ο συνολικός χρόνος που απαιτείται ώστε να σταματήσει να παράγεται η θερμότητα (HRR). Ο συνολικός χρόνος t_T χωρίζεται σε τέσσερις περιόδους:

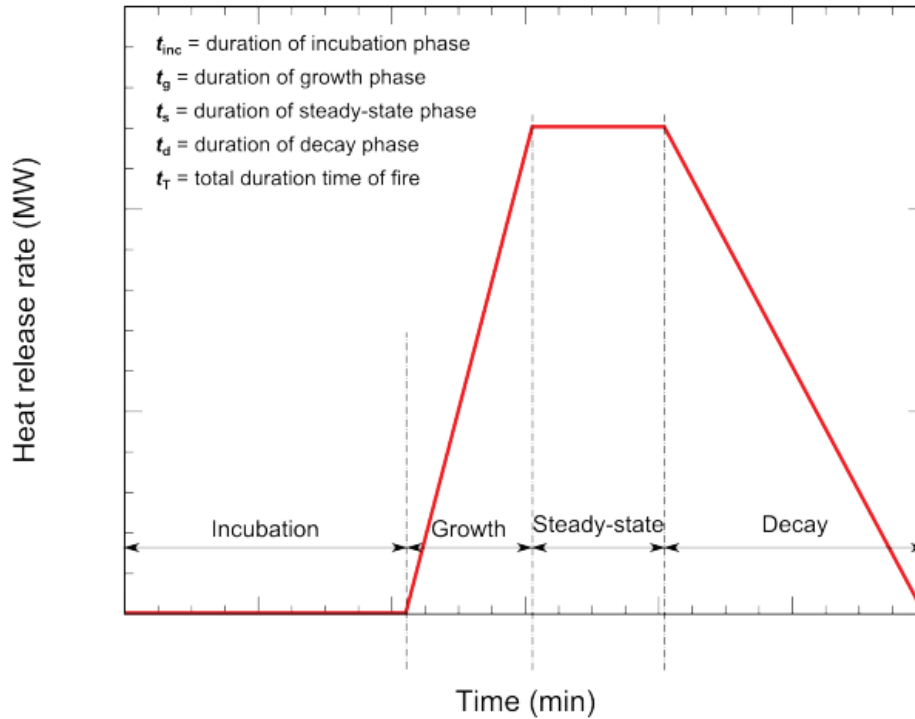
1. Η πρώτη περίοδος αναφέρεται στην περίοδο μεταξύ της ανάφλεξης και της παραγωγής της φλόγας t_{inc}^1 και αντιστοιχεί σε χαμηλό HRR.
2. Η δεύτερη περίοδος αναφέρεται στον χρόνο που απαιτείται για να εξαπλωθεί και να αναπτυχθεί η πυρκαγιά στο ανώτατο σημείο του HRR t_g^2 .
3. Η τρίτη περίοδος αναφέρεται στην χρονική περίοδο όπου ο μέγιστος ρυθμός απελευθέρωσης της θερμότητας διατηρείται σταθερός t_s^3 .
4. Τέλος η τέταρτη περίοδος αναφέρεται στον χρόνο όπου ο ρυθμός απελευθέρωσης της θερμότητας εισέρχεται στη φάση της εξασθένησης, t_d^4 .

t_{inc}^1 : incubation

t_g^2 : growth

t_s^3 : steady-state

t_d^4 : decay



Σχήμα 15. Τυπικό διάγραμμα ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας – χρόνου [32]

Με βάση τα παραπάνω, στον **Πίνακα 11** παρουσιάζονται οι ενδεικτικοί χρόνοι διάρκειας και το εύρος του μέγιστου ρυθμού απελευθέρωσης της θερμότητας ανά τύπο οχήματος. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, παρατηρήθηκε ότι η πυρκαγιά έχει έναν μέσο χρόνο επώασης $t_{inc} = 3-8$ min, ενώ ο χρόνος που απαιτείται για να εξαπλωθεί και να αναπτυχθεί στο ανώτατο σημείο του HRR είναι 4 – 15 min. Επίσης, ο χρόνος όπου η φωτιά διατηρείται σταθερή έχει μια τυπική διάρκεια 30-40 min, με ορισμένες να εκτείνονται έως και δύο ώρες. Ωστόσο, η πυρκαγιά σε πραγματικά δεδομένα ενδέχεται να έχει μεγαλύτερη διάρκεια λόγω της εξαπλώσεως της σε γειτονικά οχήματα [32]. Τέλος, έχει αποδειχθεί ότι ο διαμήκης αερισμός συμπεριφέρεται διαφορετικά όταν η πυρκαγιά αφορά σε επιβατικά οχήματα και διαφορετικά σε φορτηγά. Πιο συγκεκριμένα, όταν το όχημα είναι βαρέως τύπου εντείνεται ο ρυθμός απελευθέρωσης της θερμότητας εν συγκρίσει με ένα επιβατικό όχημα όπου επηρεάζεται σε μικρότερο βαθμό [28].

Πίνακας 11. Χρόνοι διάρκειας πυρκαγιάς και εύρος μέγιστου ρυθμού απελευθέρωσης της θερμότητας [32]

		t_{inc} (min)	t_c (min)	t_s (min)	t_d (min)	t_T (min)	Peak HRR (MW)
[18] à [20]	Vehicles	5	7	36	15	64	1.5 – 8
"	Wood cribs	4	9	62	2	77	9,5 – 27
Eureka [8] "	Heptane	0	46	35	17	98	12 – 13
"	Vans/Bus	3	5	48	41	97	6,1 – 28
Benelux [9]	Vans	5	4	12	9	30	16 – 26
Eureka [8]	HGV	8	4	30	15	57	130 – 320
Runehamar [11], [12]	HGV	3	7	30	13	53	69 – 201

Άλλη μια βασική παράμετρος είναι ο ρυθμός ροής του καπνού με βάση τον ρυθμό απελευθέρωσης της θερμότητας. Όπως φαίνεται στον **Πίνακα 12**, ένα επιβατικό όχημα έχει ρυθμό ροής καπνού περίπου στα 20 m³/s ενώ ένα βυτιοφόρο έχει 200-300 m³/s [33].

Πίνακας 12. Ρυθμός απελευθέρωσης της θερμότητας και ρυθμός ροής του καπνού για διαφορετικά σενάρια πυρκαγιών [33]

Fire type	Passenger car	Three passenger cars	Van-bus	Heavy goods vehicle	Petrol tanker
Total heat release rate (MW)	4	8	15	30	100
Smoke flow rate (m ³ /s)	20	30	50	80	200-300

Αξίζει να σημειωθεί ότι η θερμότητα που απελευθερώνεται κατά τη καύση ενός οχήματος, εντός της σήραγγας, μεταδίδεται μερικώς στο περιβάλλον έδαφος και το υπόλοιπο μεταφέρεται προς το στόμιο εξόδου μέσω του μηχανικού αερισμού. Ουσιαστικά, το έδαφος δρα ως ένας φυσικός μηχανισμός ψύξης (heat sink) και απορροφά την θερμότητα όταν η θερμοκρασία στον υπόγειο χώρο είναι υψηλότερη από αυτή του εδάφους [14].

4.2.2 Θερμοκρασία

Για την εκτίμηση της θερμοκρασίας έχουν γίνει οι παραδοχές ότι ο καπνός θα κατευθυνθεί σύμφωνα με τη ροή του ανέμου και ότι θα κατανεμηθεί ομοιόμορφα σε όλο το τμήμα κατάντη της σήραγγας. Με αυτές λοιπόν τις παραδοχές, η θερμοκρασία του καπνού μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με την κάτωθι σχέση [34]:

$$T_g(t) = T_o + \frac{0.7 \times Q(t)}{\mu \times \rho_o \times A \times C_p}$$

(4.2)

Όπου,

T_o: Αρχική θερμοκρασία στον υπόγειο χώρο [°C]

ρ_o: πυκνότητα του αέρα στον υπόγειο χώρο [kg/m³]

C_p: Ειδική θερμότητα του αέρα [KJ/°C]

A: Διατομή του υπόγειου χώρου [m²]

Q(t): Ρυθμός απελευθέρωσης της θερμότητας σε συγκεκριμένη χρονική περίοδο [MW]

Σημειώνεται ότι το 70 % στον αριθμητή της ανωτέρω σχέσης αντιστοιχεί στον ρυθμό απελευθέρωσης της θερμότητας που μεταφέρεται από τον καπνό, ενώ το υπόλοιπο 30 % διαδίδεται στο χώρο μέσω θερμικής ακτινοβολίας [35].

Η θερμοκρασία και η ταχύτητα του καπνού θα μειωθούν σταδιακά με την αύξηση της απόστασης από τη φωτιά και αυτό εκφράζεται από την σχέση [36]:

$$\Delta T = \Delta T_o \times \left(\frac{1}{2}\right)^{x/16.7}$$

(4.3)

Με βάσει την PIARC, έγιναν δύο δοκιμές στις σήραγγες Ofenegg της Ελβετίας το 1965 και Zwenberg της Αυστρίας, το 1974, και παρατηρήθηκε ότι οι μέγιστες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στην οροφή της σήραγγας κυμαίνονται από 800 °C–1200 °C [21]. Αυτό το συμπέρασμα επαληθεύτηκε και από το EUREKA project [4], που υλοποιήθηκε το 1995. Στον **Πίνακα 13** παρουσιάζεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας με τις μέγιστες αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες και τον αντίστοιχο ρυθμό έκλυσης της θερμότητας της φωτιάς. Στην περιοχή της φωτιάς ένα επιβατικό όχημα αναπτύσσει μέγιστη θερμοκρασία 400-500 °C και μέγιστη θερμική ισχύ 3-5 MW, ενώ τα φορτηγά βαρέως τύπου φτάνουν μέχρι και τους 1200 °C και μέγιστη θερμική ισχύ 100 MW.

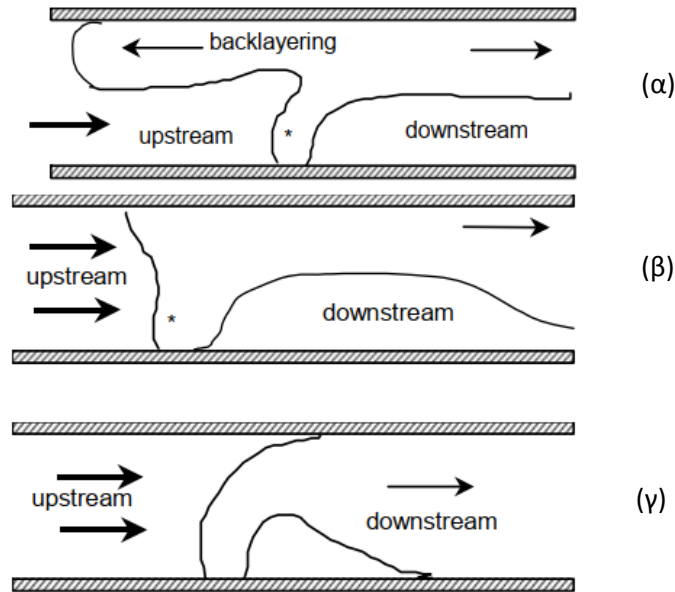
Πίνακας 13. Μέγιστες αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες και μέγιστη θερμική ισχύς [4]

Type of vehicle	Max. temperature [°C]	Max. calorific power release [MW]
Passenger car	400–500	3–5
Bus/lorry	700–800	15–20
Heavy goods vehicle (HGV) with burning goods (not petrol or other hazardous goods)	1000–1200	50–100
Railway coaches	800–900	15–20

4.3 BACKLAYERING

Το μήκος της ανάστροφης κίνησης του καπνού και των θερμών αερίων της πυρκαγιάς προς την αντίθετη κατεύθυνση της ροής του αερισμού ονομάζεται αντιστρωμάτωση «backlayering», και παρουσιάζεται στο **Σχήμα 16(α)**. Ουσιαστικά, όταν η ταχύτητα του αερισμού είναι μικρότερη από την καλούμενη κρίσιμη ταχύτητα (λεπτομέρειες δίνονται στην επόμενη ενότητα), ο καπνός εξαπλώνεται προς όλες τις κατευθύνσεις και θέτει σε κίνδυνο την ασφαλή διαφυγή των χρηστών από τη σήραγγα. Όταν η ταχύτητα του αερισμού είναι ίση με την κρίσιμη ταχύτητα (**Σχήμα 16 (β)**), ο καπνός κατευθύνεται προς τα κατάντη, διατηρεί την στρωματογραφία του και θεωρείται ότι παραμένει στη θέση εκδήλωσης της πυρκαγιάς. Είναι σημαντικό το στρώμα του καπνού να παραμένει σε ικανό ύψος για αρκετή ώρα, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα διαφυγής των επιβατών και από την κατεύθυνση ροής του αέρα. Σε αντίθεση, όταν η ταχύτητα του αερισμού είναι μεγαλύτερη από την κρίσιμη ταχύτητα, και μεν κατευθύνεται ο καπνός προς τα κατάντη, όμως υπάρχει ο κίνδυνος να διασπαστεί και να κατακλύσει το σύνολο της διατομής (**Σχήμα 16 (γ)**). Σε αυτές τις περιπτώσεις σταθεροποιείται η ροή του αέρα σε χαμηλές ταχύτητες, για τον έλεγχο του καπνού και της στρωμάτωσής του. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι αρκετές φορές η υψηλή ταχύτητα του αερισμού έχει αυξήσει τον ρυθμό απελευθέρωσης της θερμότητας καθώς η πυρκαγιά μεταδίδεται στα γειτονικά οχήματα [22], [23], [30].

Γενικότερα, οι κυριότερες παράμετροι που επηρεάζουν το μήκος της αντιστροφής είναι ο ρυθμός απελευθέρωσης της φωτιάς, το ύψος και πλάτος της σήραγγας, η διαμήκης ταχύτητα του αερισμού και τα χαρακτηριστικά περιβάλλοντος [37].



Σχήμα 16. Η επιρροή του διαμήκη αερισμού με την κρίσιμη ταχύτητα [21]

4.4 ΚΡΙΣΙΜΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ

Για τον έλεγχο του καπνού και την αποτροπή της ανάστροφης κίνησής του προς τα ανάντη επιβάλλεται η ανάπτυξη μιας επαρκώς μεγάλης διαμήκουσ ταχύτητας, που ονομάζεται κρίσιμη ταχύτητα. Συνεπώς, ως «κρίσιμη ταχύτητα» (critical velocity), ορίζεται η ελάχιστη ταχύτητα του αέρα των ανεμιστήρων που απαιτείται έτσι ώστε να αποτρέψει την εξάπλωση του καπνού και των θερμών αερίων προς όλες τις κατευθύνεις της σήραγγας [6]. Η κρίσιμη ταχύτητα υπολογίζεται από το σχέση [26]:

$$u_c = K_1 \times K_G \left(\frac{g \times H \times Q}{\rho \times c_p \times A \times T_f} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4.4)$$

Αντίστοιχα, η μέση θερμοκρασία αερίων στο σημείο της πυρκαγιάς εκτιμάται με τη βοήθεια της σχέσης [26]:

$$T_f = \left(\frac{Q}{\rho \times c_p \times A \times u_c} \right) + T \quad (4.5)$$

Όπου,

u_c : Κρίσιμη ταχύτητα [m/s]

A: Εμβαδόν διατομής σήραγγας [m^2]

T: Θερμοκρασία εισερχόμενου αέρα [K]

K₁: Αδιάστατη σταθερά, $K_1=0,606$ [-]

K_g: Συντελεστής κλίσης, βλ. **Σχήμα 17** [-]

g: Επιτάχυνση της βαρύτητας $9,81$ [m/s^2]

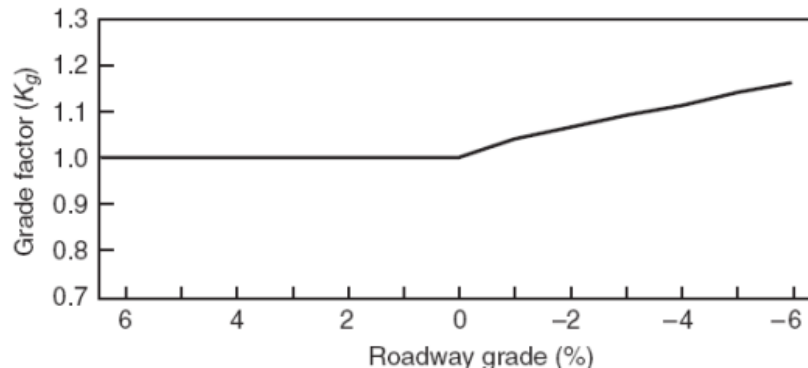
H: Ύψος της σήραγγας στο σημείο της πυρκαγιάς [m]

Q: Θερμική ισχύς πυρκαγιάς [KW]

ρ : Μέση πυκνότητα του αέρα [kg/m^3]

c_p : Ειδική θερμοχωρητικότητα του αέρα [KJ/kg K]

T_i: Μέση θερμοκρασία αερίων στο σημείο της πυρκαγιάς [K]

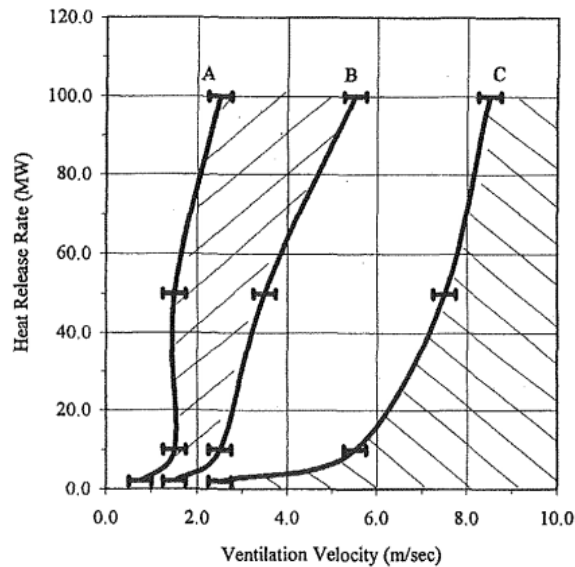


Σχήμα 17. Συσχέτιση K_g με την κατά μήκος κλίση της σήραγγας [1]

Το 2000, ο Chen [31] μελέτησε τη διάδοση του καπνού, κατά μήκος της σήραγγας, και αποτύπωσε το διάγραμμα του **Σχήματος 18**, που παρουσιάζει τον ρυθμό απελευθέρωσης της θερμότητας συναρτήσει της ταχύτητας αερισμού. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται τρεις καμπύλες οι οποίες χωρίζουν το διάγραμμα σε τέσσερις περιοχές με την κάθε περιοχή να αντιπροσωπεύει μια συγκεκριμένη κατάσταση αερισμού. Η περιοχή που βρίσκεται αριστερά από την καμπύλη A, αντιστοιχεί στην περίπτωση όπου η ταχύτητα του αερισμού είναι μικρή για να εμποδίσει την επιστροφή του καπνού. Η περιοχή που βρίσκεται ανάμεσα στην καμπύλη A και B, αφορά στην περίπτωση όπου δεν προκύπτει το φαινόμενο της επιστροφής του καπνού στην ανάντη πλευρά, ενώ στην κατάντη πλευρά ο καπνός διατηρεί μια ομαλή στρωμάτωση. Η περιοχή ανάμεσα στην καμπύλη B και C αντιστοιχεί στην περίπτωση όπου δεν υπάρχει ομαλή στρωμάτωση του καπνού κατάντη της πυρκαγιάς, και τέλος, η περιοχή δεξιά της καμπύλης C αφορά στην περίπτωση όπου ο καπνός έχει αναμιχθεί με τον καθαρό αέρα καθ' ύψος της διατομής της σήραγγας και κατευθύνεται προς την κατάντη πλευρά. Σημειώνεται ότι με βάση την PIARC, από δοκιμή που πραγματοποιήθηκε σε πραγματική κλίμακα στο Memorial Tunnel (MTFVTP), εκτιμήθηκε ότι η κρίσιμη ταχύτητα πρέπει να κυμαίνεται από 2,5-3 m/s για πυρκαγιές μεγέθους από 10

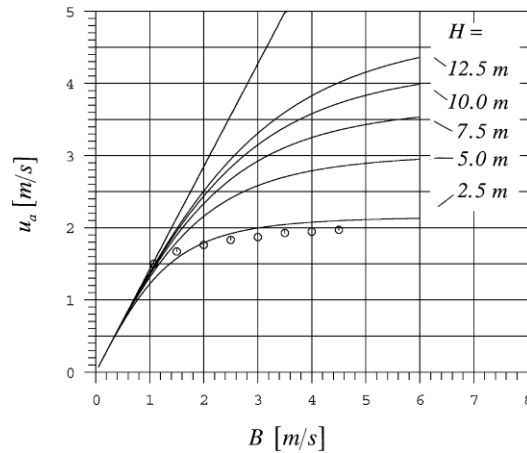
MW-100 MW [21]. Καθώς και οι δύο προτεινόμενες τιμές βρίσκονται μεταξύ των καμπυλών A και B, επιβεβαιώνεται η εκτίμηση της ασφαλούς περιοχής του διαγράμματος.

Αντίστοιχες αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν και τόνισαν τη σημασία της έντασης της ταχύτητας του αερισμού. Δηλαδή, οι υψηλές τιμές της ταχύτητας να μειώνουν τη θερμοκρασία του θερμού στρώματος, μέσω της ανάμιξής του με το κατώτερο ψυχρό στρώμα, αλλά θέτουν σε κίνδυνο τη ζωή των επιβατών καθώς η διατομή κατάντη της πυρκαγιάς κατακλύζεται από τον καπνό [9].



Σχήμα 18. Διάγραμμα ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας - ταχύτητας αερισμού με τις αντίστοιχες περιοχές [31]

Μια ακόμη παράμετρος που επηρεάζει την κρίσιμη ταχύτητα είναι το ύψος της σήραγγας καθώς επηρεάζει την ταχύτητα ανόδου του καπνού. Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 19**, με την αύξηση του ύψους της σήραγγας, αυξάνεται και η απαιτούμενη τιμή της κρίσιμης ταχύτητας. Τέλος, είναι γνωστό ότι η κρίσιμη ταχύτητα επηρεάζεται από τον ρυθμό απελευθέρωσης της θερμότητας της φωτιάς. Όμως, από έρευνες που έγιναν παρατηρήθηκε ότι σε υψηλές τιμές του ρυθμού απελευθέρωσης της φωτιάς, η κρίσιμη ταχύτητα δεν μεταβάλλεται και συγκλίνει ως προς μια σταθερή τιμή [38], [13], [37].



Σχήμα 19. Κρίσιμη ταχύτητα συναρτήσει του συντελεστή άνωσης για διαφορετικά ύψη της σήραγγας [38]

4.5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΤΩΣΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΛΟΓΩ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ

Ο υπολογισμός της συνολικής πτώσης πίεσης εντός της σήραγγας, σε έκτακτη λειτουργία, είναι το άθροισμα των εξής επί μέρους απωλειών πίεσης [24]:

$$\Delta P_{ολ} = \Delta P_{τριβών} + \Delta P_{στομιών} + \Delta P_{οχημάτων} + \Delta P_{μετ.φαιν.} + \Delta P_{φωτιάς}$$

(4.6)

Σημειώνεται ότι η πτώσης πίεσης λόγω τριβών στα τοιχώματα και στα λοιπά εμπόδια της σήραγγας ($\Delta P_{τριβών}$), λόγω των στομιών της σήραγγας ($\Delta P_{στομιών}$), λόγω της κυκλοφορίας των οχημάτων ($\Delta P_{οχημάτων}$) και λόγω των μετεωρολογικών φαινομένων μεταξύ των δύο στομιών ($\Delta P_{μετ.φαιν.}$) υπολογίζονται αντίστοιχα με τις συνθήκες κανονικής λειτουργίας, του υποκεφαλαίου 3.7, με την διαφορά ότι:

- $\rho_{airfire}$: είναι η πυκνότητα του αέρα στην σήραγγα σε περίπτωση πυρκαγιάς [$1,05 \text{ kg/m}^3$].
- V_T : είναι η ταχύτητα του αέρα εντός της σήραγγας σε περίπτωση πυρκαγιάς. Υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την κρίσιμη ταχύτητα με την πυκνότητα του αέρα πριν την φωτιά προς την πυκνότητα του αέρα κατά την διάρκεια της φωτιάς [$3,49 \text{ m/s}$].

Η πρόσθετη απώλεια πίεσης που προκαλείται από την πυρκαγιά λόγω φαινομένων στροβιλισμού στην περιοχή της φωτιάς είναι ($\Delta P_{φωτιάς}$) [39]:

$$\Delta P_{φωτιάς} = \frac{0,00009 \times Q \times 10^6}{V_T \times D_h^2}$$

(4.7)

Όπου,

$\Delta P_{φωτιάς}$: Πτώση πίεσης λόγω φαινομένων στροβιλισμού στην περιοχή της φωτιάς [Pa]

Q : Θερμική ισχύς πυρκαγιάς [W]

V_t: Ταχύτητα του αέρα εντός της σήραγγας πριν τη φωτιά [m/s]

D_h: Υδραυλική διάμετρος της διατομής της σήραγγας [m]

4.6 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΥΠΟΥ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΟΥ ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΩΝ

Ο αριθμός των ανεμιστήρων επιλέγεται βάσει της δυσμενέστερης κατάστασης που μπορεί να παρουσιαστεί κατά τη λειτουργία της οδικής σήραγγας, και αυτή είναι η περίπτωση της πυρκαγιάς. Απαιτείται μεγάλη παροχή αέρα για την απομάκρυνση του καπνού συγκριτικά με την περίπτωση της απαγωγής των τοξικών αερίων από τις εκπομπές των οχημάτων.

Ο υπολογισμός της απαιτούμενης συνολικής ώσης των ανεμιστήρων πραγματοποιείται με την ακόλουθη εξίσωση [40]:

$$Thrust = \Delta P_{ολ} \times A \quad (4.8)$$

Όπου,

Thrust: Απαιτούμενη ώση σήραγγας [N]

ΔP_{ολ}: Οι συνολικές απώλειες πίεσης μέσα στη σήραγγα λόγω πυρκαγιάς [Pa]

A: Διατομή σήραγγας [m²]

Αντίστοιχα, ο υπολογισμός της παρεχόμενης ώσης των ανεμιστήρων γίνεται με βάση τη σχέση [40]:

$$S = \rho_{air\ fire} \times Q_j \times (V_j - V_c) \times \eta \quad (4.9)$$

Όπου,

S: Ενεργός δύναμη ώσης ανεμιστήρων [N]

ρ_{air fire}: Πυκνότητα του αέρα στη σήραγγα [kg/m³]

Q_j: Παροχή του ανεμιστήρα [m³/s]

V_j: Ταχύτητα αέρα στην έξοδο του ανεμιστήρα [m/s]

V_c: Κρίσιμη ταχύτητα αέρα στη σήραγγα [m/s]

N: Συντελεστής βαθμού απόδοσης των ανεμιστήρων [-]

Συνεπώς, ο αριθμός των απαιτούμενων ανεμιστήρων υπολογίζεται ως:

$$z = \frac{Thrust}{S} \quad (4.10)$$

Σημειώνεται ότι για λόγους ασφαλείας, βάσει νομοθεσίας, τοποθετούνται 2 εφεδρικοί ανεμιστήρες [40]. Σχετικά με τη διαμήκη απόσταση των ανεμιστήρων, απαιτείται να είναι περίπου 10 υδραυλικές διαμέτρους. Σε αυτήν την ελάχιστη απόσταση δεν θα πρέπει να παρεμβάλλεται κάποιο εμπόδιο [41].

4.7 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΚΤΑΚΤΗΣ ΑΝΑΓΚΗΣ ΚΑΙ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΔΙΑΦΥΓΗΣ

Τα κριτήρια έκτακτης ανάγκης που σχετίζονται με τον αερισμό της σήραγγας αφορούν στη θερμοκρασία, την ταχύτητα και την ποιότητα του αέρα. Εφόσον καθοριστούν τα βασικά κριτήρια έκτακτης ανάγκης, απαιτείται ανάλυση ώστε να προσδιοριστούν οι περιοχές εντός της σήραγγας με θερμότητα και πώς το σύστημα του μηχανικού αερισμού συμβάλει στην απαγωγή αυτής της θερμότητας [14].

Θερμοκρασία του αέρα. Η έκθεση του ανθρώπου σε υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να είναι επιβλαβής. Σύμφωνα με την NFPA, το μηχανικό σύστημα αερισμού πρέπει να είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε η θερμοκρασία του αέρα να μην ξεπεράσει τους 60 ° C σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης. Αυτό το κριτήριο της θερμοκρασίας αφορά στο ύψος του ανθρώπου (στον ώμο ή στο κεφάλι) και όχι το επίπεδο της οροφής της σήραγγας. Ο Chen [31] ανέφερε ότι η εισπνοή ξηρού αέρα θερμοκρασίας μεγαλύτερη από 350 ° C και κανονικού αέρα θερμοκρασίας μεγαλύτερη από 204 ° C, ενδέχεται να οδηγήσει σε βλάβη στο αναπνευστικό σύστημα του ανθρώπου.

Ταχύτητα του αέρα. Υψηλή ταχύτητα του αέρα ενδέχεται να είναι αναγκαία για τον έλεγχο ή τον εκκαπνισμό της σήραγγας σε συνθήκες έκτακτης ανάγκης. Σε ορισμένες περιπτώσεις οι επιβάτες των οχημάτων της σήραγγας μπορεί να εκτεθούν σε αυτές τις υψηλές ταχύτητες, που όμως είναι χρήσιμο καθώς τους δίνει μια αίσθηση κατεύθυνσης και τους παρέχει περισσότερο καθαρό αέρα. Το αποδεκτό εύρος της ταχύτητας του αέρα, σε περίπτωση πυρκαγιάς, έχει ελάχιστη τιμή 2,54 m/s και μέγιστη τιμή 12,7 m/s. Γενικά, το μέγεθος της ταχύτητας του αέρα εντός της σήραγγας εξαρτάται από το μέγεθος της φωτιάς, και στη συνέχεια, από την απαιτούμενη ταχύτητα για τον έλεγχο της αντιστρωμάτωσης του καπνού. Εφόσον η αντιστρωμάτωση του καπνού έχει περιοριστεί τότε μπορεί να γίνει η εκκένωση των επιβατών με ασφάλεια [14].

Ποιότητα του αέρα. Η ποιότητα του αέρα κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς επιδεινώνεται γρήγορα καθώς η καύση παράγει καπναέρια, ορισμένα από τα οποία είναι τοξικά, ενώ όλα προκαλούν ερεθισμό στους επιβάτες των οχημάτων. Το μέγεθος και είδος των τοξικών αερίων εξαρτάται από το υλικό της καύσης. Σε κάθε περίπτωση, ο καλύτερος χειρισμός για την εξασφάλιση της ποιότητας του αέρα είναι ο μέγιστος ρυθμός παροχής του αέρα που απαιτείται για τον έλεγχο του καπνού, καθώς και η κατεύθυνση του αέρα ως προς την κατεύθυνση εκκένωσης του χώρου [14].

Σε αντίστοιχα συμπεράσματα έχουν καταλήξει οι Yuan et al. [42], και πέραν από τη θερμοκρασία του αέρα αναφέρουν ότι, για την ασφαλή εκκένωση των επιβατών από την σήραγγα, η ορατότητα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 10 m και η συγκέντρωση σε μονοξείδιο του άνθρακα (CO) να είναι μικρότερη είτε και ίση με 1500 ppm (**Πίνακας 14**).

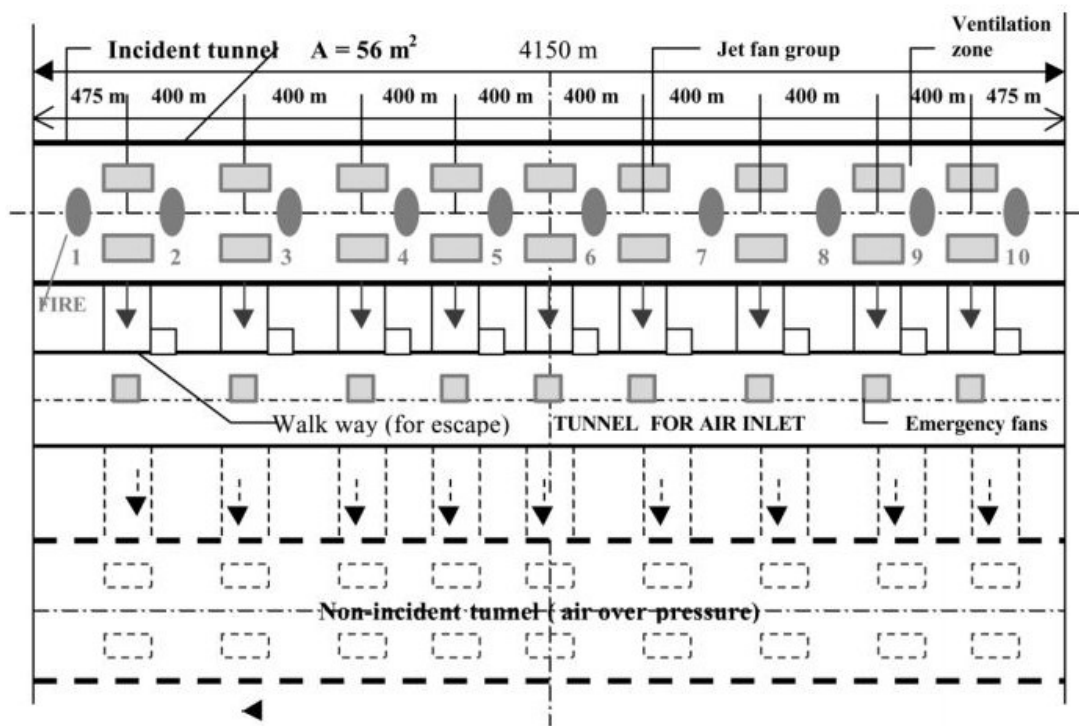
Πίνακας 14. Κριτήρια για την ασφαλή εκκένωση της σήραγγας [42]

index	criterion
Temperature at 2m (°C)	≤60
Visibility at 2m (m)	>10
CO concentration at 2m (ppm)	≤1500

Σύμφωνα με τις ΟΜΟΕ [18], οι εγκαταστάσεις διαφυγής έκτακτης ανάγκης αποτελούν θέσεις διαφυγής για τους χρήστες της σήραγγας, οι οποίοι εγκλωβίζονται μέσα στη σήραγγα κατά τη διάρκεια περιστατικού έκτακτης ανάγκης. Παρέχουν την δυνατότητα άμεσης προστασίας από τις υψηλές θερμοκρασίες ή/και τον καπνό που παράγονται από την πυρκαγιά. Για σήραγγες μονής κατεύθυνσης, κατάλληλη στοά διαφυγής είναι αυτή παράλληλη προς την κύρια σήραγγα καθώς και τα στόμια. Οι αποστάσεις μεταξύ των οδεύσεων διαφυγής έκτακτης ανάγκης πρέπει να είναι 350 με 400 m ανάλογα το μήκος της σήραγγας. Για αστικές σήραγγες, αναλόγως του φόρτου, μπορεί να είναι και μικρότερες.

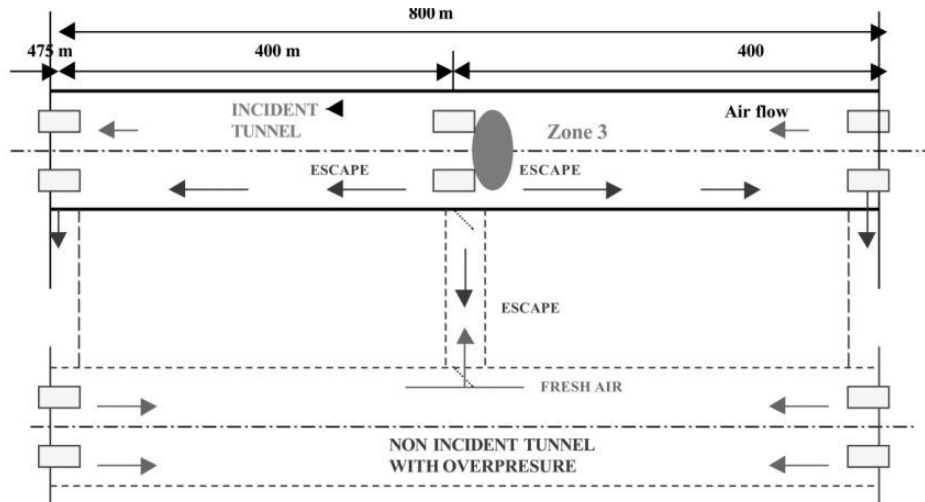
5 ΈΡΕΥΝΕΣ ΜΕ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Έχουν γίνει αρκετές δημοσιεύσεις σχετικά με τις υπολογιστικές αναλύσεις και την εκδήλωση πυρκαγιάς σε υπόγειο έργο. Μια από αυτές που παρουσιάζει ενδιαφέρον είναι του Modic [6], όπου εξέτασε την περίπτωση πυρκαγιάς σε οδική σήραγγα πριν και αφότου ενεργοποιήθηκε το σύστημα αερισμού. Αναλυτικότερα, το πρόγραμμα το οποίο χρησιμοποιήθηκε είναι το IDA Road Tunnel Ventilation και υπολογίζει την πίεση και ροή του αέρα, την θερμοκρασία καθώς και την περιεκτικότητα σε CO και NO_x. Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 20**, υπάρχουν δύο δίδυμες σήραγγες, παράλληλες μεταξύ τους και η προσομοίωση της πυρκαγιάς γίνεται στην άνω σήραγγα. Έχει μήκος 4150 m, είναι μονής κατεύθυνσης με διατομή 56 m². Οι αποστάσεις μεταξύ των εγκαταστάσεων διαφυγής έκτακτης ανάγκης, είναι ανά 400 m. Το σύστημα αερισμού είναι ημιεγκάρσιο και αποτελείται από 10 ζώνες.

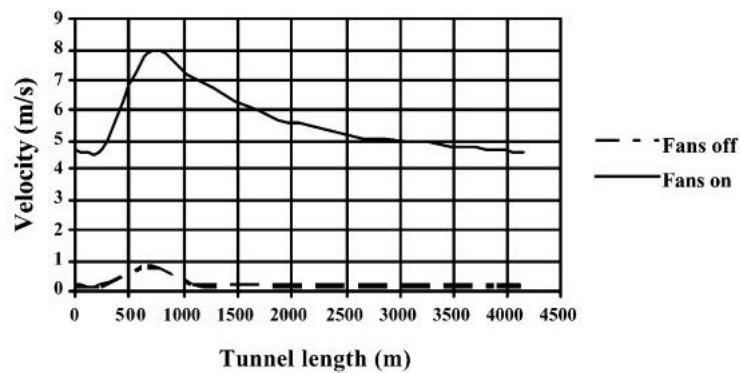


Σχήμα 20. Κάτοψη της σήραγγας [6]

Τα αποτελέσματα που θα παρουσιαστούν αναφέρονται στην ζώνη 3 της σήραγγας (βλ. **Σχήμα 21**). Από το **Σχήμα 22** παρατηρείται ότι όσο οι ανεμιστήρες δεν είναι σε λειτουργία η μέγιστη ταχύτητα του αέρα που αναπτύσσεται είναι μικρότερη από 1 m/s. Σύμφωνα όμως με τον Pucher [6], όπου είχε δημοσιεύσει την σχέση μεταξύ της ταχύτητας του αέρα και του χρόνου όπου ο καπνός διατηρείται στρωματοποιημένος (βλ. **Σχήμα 23**), παρατηρείται ότι για ταχύτητα του αέρα 1 m/s ο καπνός παραμένει περίπου 8 λεπτά στην οροφή της σήραγγας. Ο χρόνος αυτός είναι αρκετός ώστε να εκκενωθεί η σήραγγα με ασφάλεια.

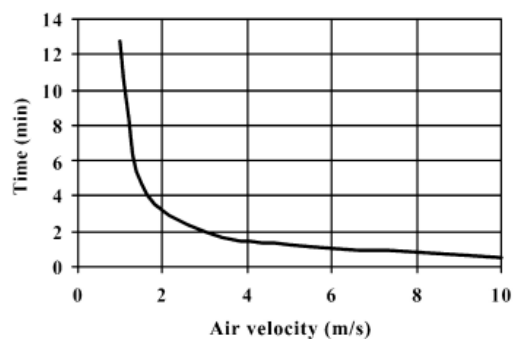


Σχήμα 21. Πυρκαγιά στη ζώνη 3 [6]



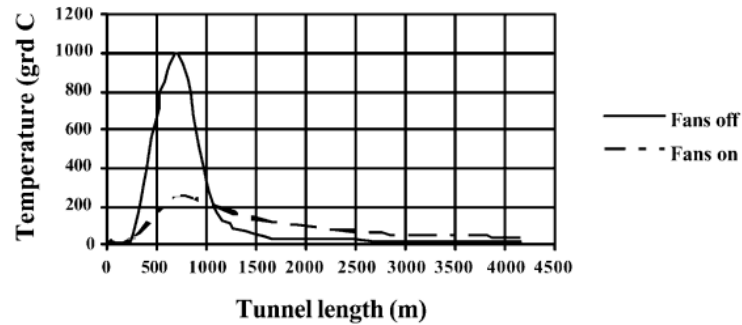
Σχήμα 22. Πυρκαγιά στη ζώνη 3 - ταχύτητα του αέρα [6]

Σχήμα 1.

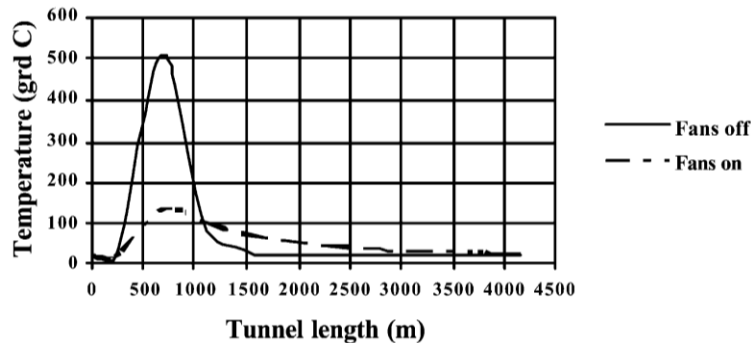


Σχήμα 23. Χρόνος όπου ο καπνός παραμένει στρωματοποιημένος στην οροφή της σήραγγας συναρτήσει της ταχύτητας του αέρα (Pucher, 1999)

Στο **Σχήμα 24** παρουσιάζεται αντίστοιχα η θερμοκρασία του αέρα και στο **Σχήμα 25** η θερμοκρασία του τοίχου στη ζώνη 3. Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι εφόσον ενεργοποιούνται οι ανεμιστήρες, με ταχύτητα περίπου 3,6 m/s, μειώνεται η θερμοκρασία του αέρα αλλά και η θερμοκρασία του τοίχου της διατομής.

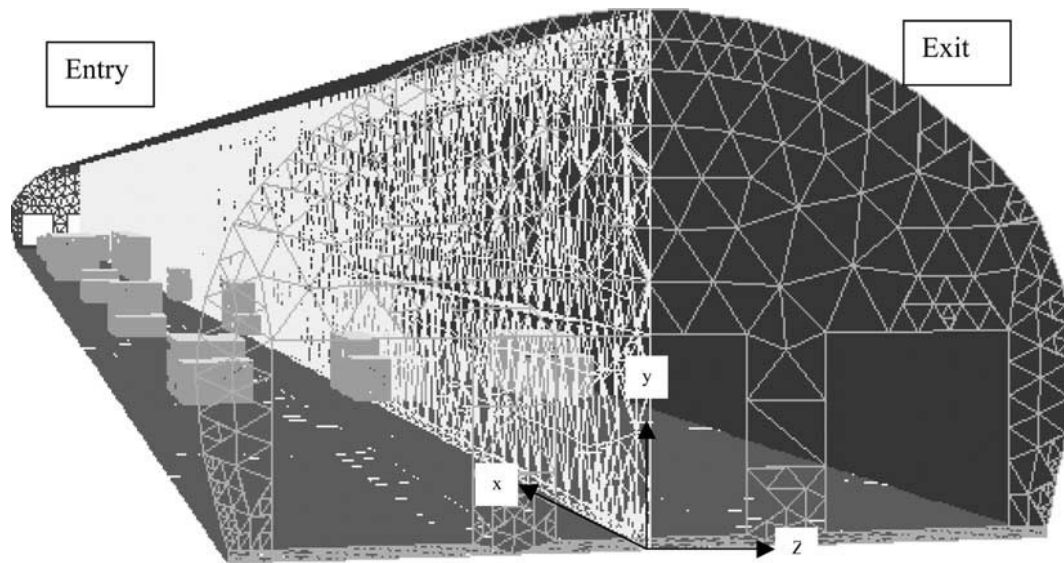


Σχήμα 24. Πυρκαγιά στη ζώνη 3 - θερμοκρασία αέρα [6]



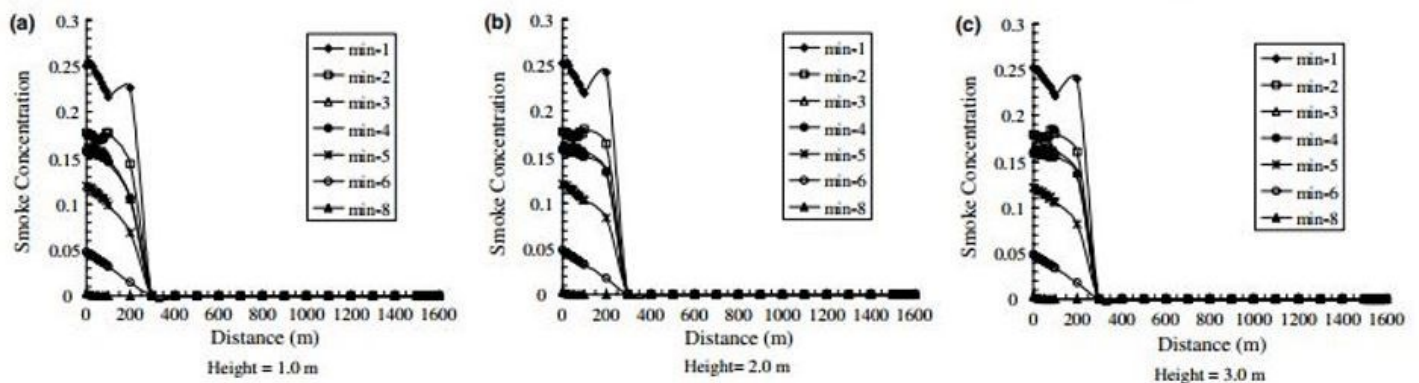
Σχήμα 25. Πυρκαγιά στη ζώνη 3 - θερμοκρασία τοίχου [6]

Πιο πρόσφατα οι Bari et al. [8] εξέτασαν τις επιπτώσεις ενός φλεγόμενου οχήματος εντός της σήραγγας και τα επίπεδα ρύπανσης που προκλήθηκαν από την κυκλοφοριακή συμφόρηση. Για τις αναλύσεις χρησιμοποιήθηκε πρόγραμμα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) FLUENT 6.0. Όσον αφορά στα χαρακτηριστικά της σήραγγας, έχει μήκος 1600 m, ύψος 7 m και πλάτος 12 m. Οι συνοριακές συνθήκες στα στόμια της σήραγγας προσδιορίστηκαν ανοιχτές που δηλώνει ένα παθητικό άνοιγμα προς το περιβάλλον με θερμοκρασία 20 °C (βλ. **Σχήμα 26**). Αποτελείται από τρεις λωρίδες, μονής κατεύθυνσης και έχει 12 αναστρέψιμους ανεμιστήρες στην οροφή της σήραγγας. Η διάμετρος του κάθε ανεμιστήρα είναι 1,8 m και παρέχει 80 m³/s αέρα. Η κύρια είσοδος του καθαρού αέρα πραγματοποιείται από έναν κεντρικό σταθμό αποτελούμενος από 4 αξονικούς ανεμιστήρες με παροχή 140 m³/s όπου είναι τοποθετημένος 200 m από την έξοδο της σήραγγας και ο αέρας εξέρχεται από έναν αγωγό τοποθετημένος στην οροφή. Το φλεγόμενο φορτηγό όχημα είναι τοποθετημένο 265 m από την έξοδο της σήραγγας και θεωρείται ότι απελευθέρωσε μια ισοδύναμη ενέργεια καύσης 500 λίτρων ντίζελ σε 6 min. Η μέση θερμική ισχύς είναι 44,4 MW και με γραμμική αύξηση 10 sec, μεταξύ 10 sec και 240 sec παρέμεινε σταθερή και εξασθένησε σε 120 sec. Επίσης, έγινε η παραδοχή ότι οι μηχανές των οχημάτων παρέμειναν ανοιχτές, όπως συνέβη στο περιστατικό του Hong Kong (Chow and Li [5]).



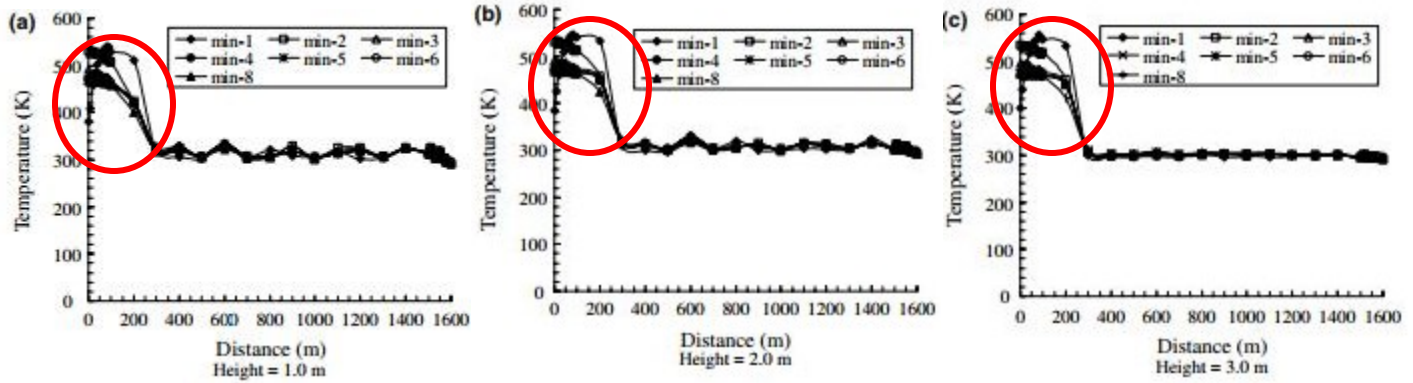
Σχήμα 26. Προσομοίωση διατομής σήραγγας [8]

Καθώς η διατομή είναι συμμετρική, τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται αναφέρονται στο ήμισυ του μοντέλου. Στο Σχήμα 27 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις καπνού σε τρία διαφορετικά ύψη και φαίνεται ότι ανεξάρτητα από το ύψος, οι ανεμιστήρες λειτούργησαν ικανοποιητικά καθώς ο καπνός κατευθύνθηκε προς το στόμιο εξόδου όπου δεν υπήρχαν οχήματα ή/και επιβάτες.



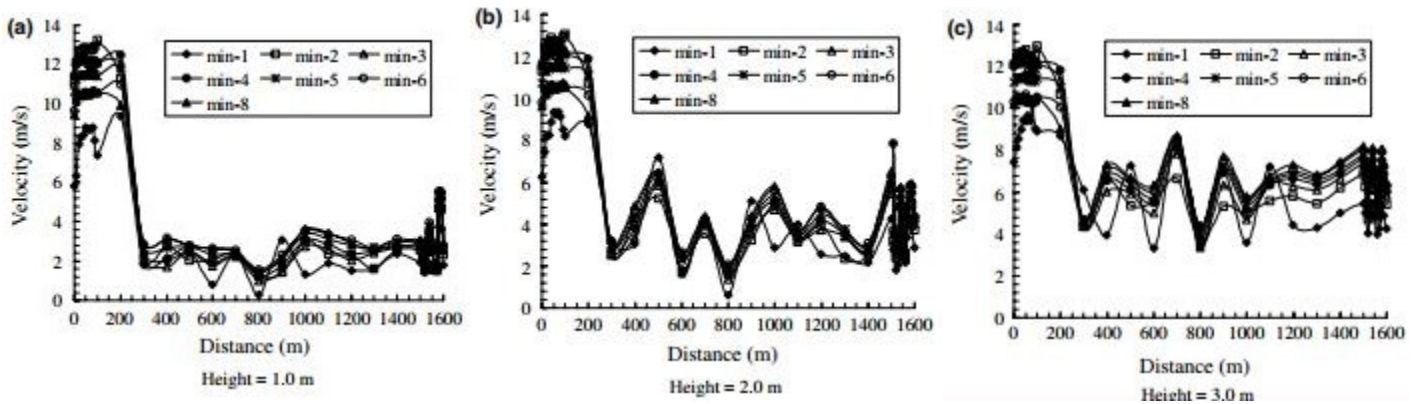
Σχήμα 27. Συγκέντρωση καπνού σε διάφορα ύψη μεταξύ της μέσης και δεξιάς λωρίδας (α) $h=1\text{ m}$ (β) $h=2\text{ m}$ και (γ) $h=3\text{ m}$ [8]

Το Σχήμα 28 δείχνει την διακύμανση των θερμοκρασιών στο εσωτερικό της σήραγγας και παρατηρείται ότι ανάντη της φωτιάς, η θερμοκρασία κυμαίνεται μεταξύ $55\text{-}250\text{ }^\circ\text{C}$, ένα εύρος αρκετά υψηλό και κρίσιμο για τον άνθρωπο. Ωστόσο στην υπόλοιπη σήραγγα η θερμοκρασία ήταν περίπου στους $30\text{ }^\circ\text{C}$.



Σχήμα 28. Διακυμάνσεις θερμοκρασίας σε διάφορα ύψη μεταξύ της μέσης και δεξιάς λωρίδας (α) $h=1$ m (β) $h=2$ m και (γ) $h=3$ m [8]

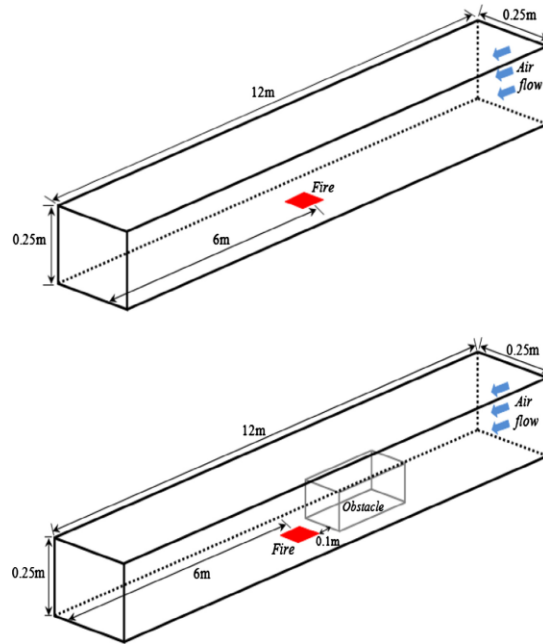
Στο Σχήμα 29 παρουσιάζεται το μέγεθος της ταχύτητας του αέρα σε διάφορα ύψη κατά μήκος της σήραγγας. Παρατηρείται η σημαντική αύξηση της ταχύτητας του αέρα κατάντη της φωτιάς (8-13 m/s) σε αντίθεση με την υπόλοιπη σήραγγα που είχε ταχύτητα 2-6 m/s. Τέλος, συμπεραίνεται ότι οι συγκεντρώσεις σε O_2 , CO_2 και CO ήταν αρκετά κρίσιμες καθώς κυμαίνονται στα 0,12-0,15, 0,08-0,11 και 0,0006-0,0014 μετά τα πρώτα 8min πυρκαγιάς. Συνεπώς, είναι σημαντικό να σβήνουν οι μηχανές των οχημάτων και να εκκενώνεται η σήραγγα άμεσα.



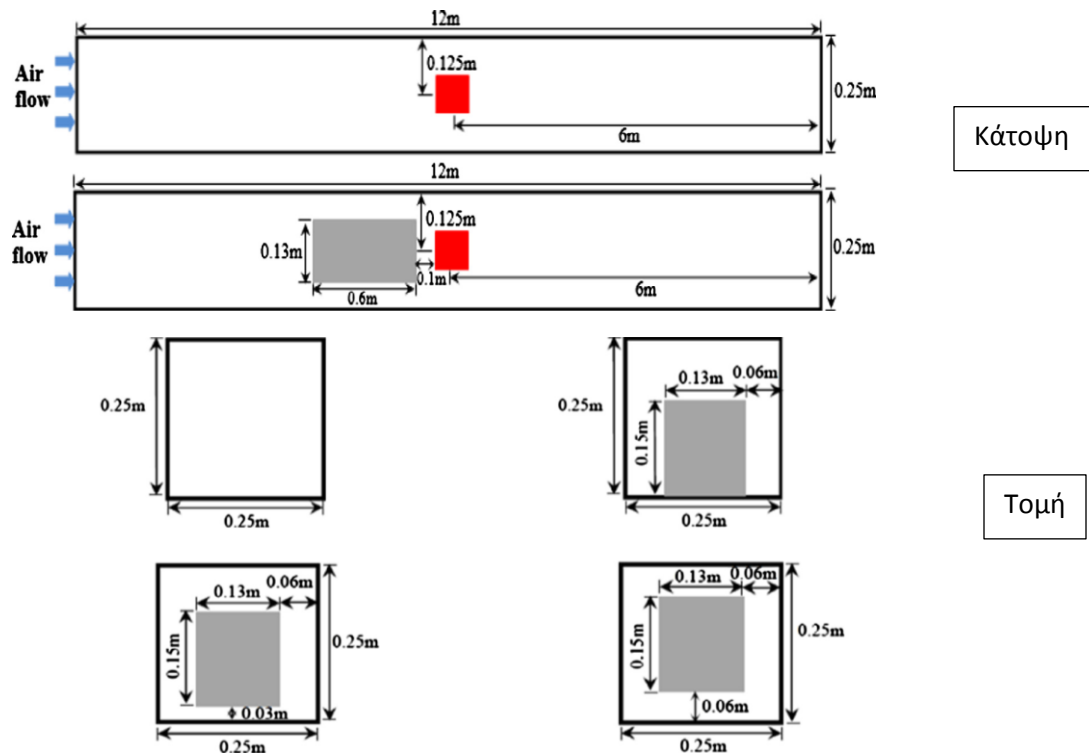
Σχήμα 29. Μέγεθος της ταχύτητας σε διάφορα ύψη μεταξύ της μέσης και δεξιάς λωρίδας (α) $h=1$ m (β) $h=2$ m και (γ) $h=3$ m [8]

Για την επίδραση της κρίσιμης ταχύτητας και του μήκους του επιστροφής του καπνού (backlayering) στην ύπαρξη εμποδίου σε περίπτωση πυρκαγιάς, ίσως η πιο πλήρης έρευνα είναι αυτή των Gannouni et al. [7]. Η προσομοίωση έγινε μέσω του προγράμματος NIST Fire Dynamic Simulator FDS και όπως φαίνεται στο Σχήμα 30 το μήκος της σήραγγας είναι 12 m με διαστάσεις 0,25 m x 0,25 m. Οι συνοριακές συνθήκες στα στόμια της σήραγγας προσδιορίστηκαν ανοιχτές που δηλώνει ένα παθητικό άνοιγμα προς το περιβάλλον. Το σύστημα αερισμού είναι διαμήκες σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20 ° C και εισάγεται από το στόμιο εισόδου της σήραγγας. Η πυρκαγιά τοποθετήθηκε στο μέσον της σήραγγας, στο ύψος του δαπέδου με θερμική ισχύ από 0,7 έως 16,7 kW. Το εμπόδιο τοποθετήθηκε ανάντη της φωτιάς σε απόσταση 0,1 m και είχε μήκος 0,6 m, πλάτος 0,13 m και ύψος 0,15 m. Εξετάστηκαν

τρία διαφορετικά σενάρια με μεταβλητή την απόσταση του εμποδίου σε σχέση με το δάπεδο και παρουσιάζονται στο **Σχήμα 31**.

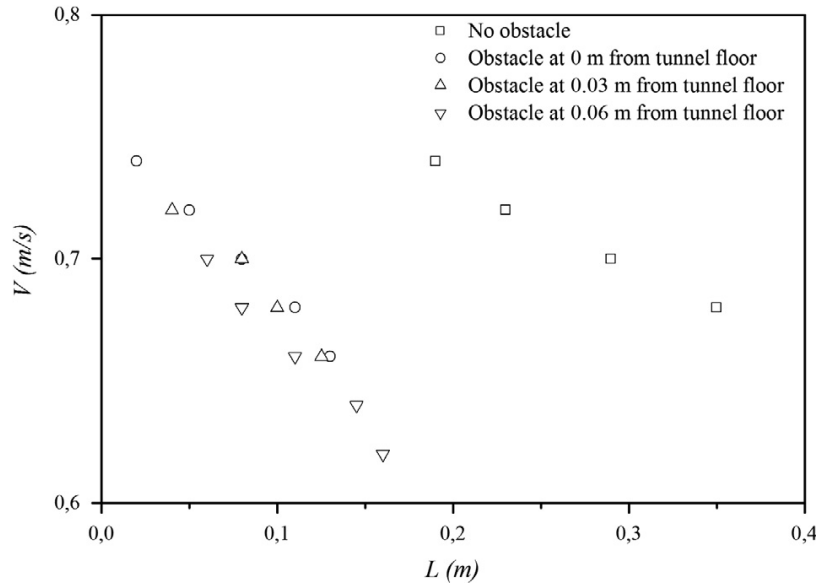


Σχήμα 30. Προσομοίωση διατομής σήραγγας [7]

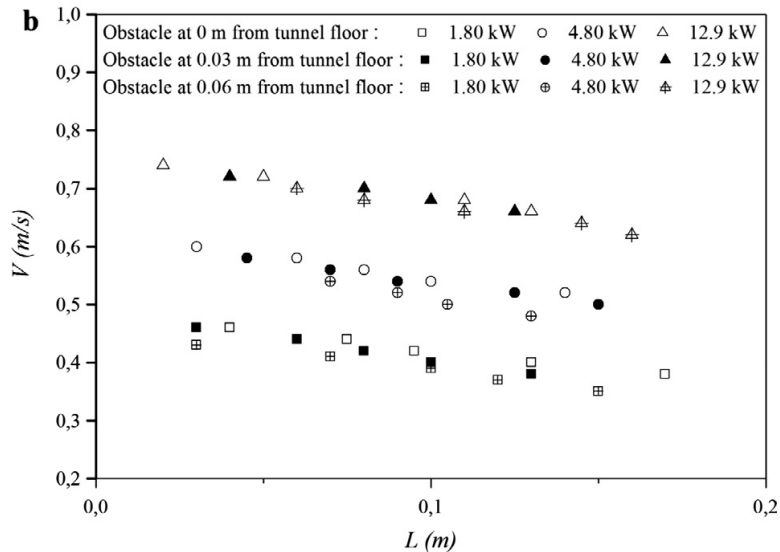


Σχήμα 31. Σχηματική απεικόνιση του εμποδίου και της πυρκαγιάς: (α) χωρίς κανένα εμπόδιο, (β) με εμπόδιο στα 0 m από το δάπεδο της σήραγγας, (γ) με εμπόδιο στα 0.03 m από το δάπεδο της σήραγγας, (δ) με εμπόδιο στα 0.06 m από το δάπεδο της σήραγγας [7]

Πρόέκυψε ότι η ύπαρξη του εμποδίου μείωσε σημαντικά το μήκος επιστροφής του καπνού συγκριτικά με την ανάλυση όπου δεν υπήρχε εμπόδιο ανάντη της φωτιάς (βλ. **Σχήμα 32**). Τέλος από το **Σχήμα 33** παρατηρείται ότι η κρίσιμη ταχύτητα του αερισμού αυξήθηκε με την αύξηση της θερμικής ισχύος.



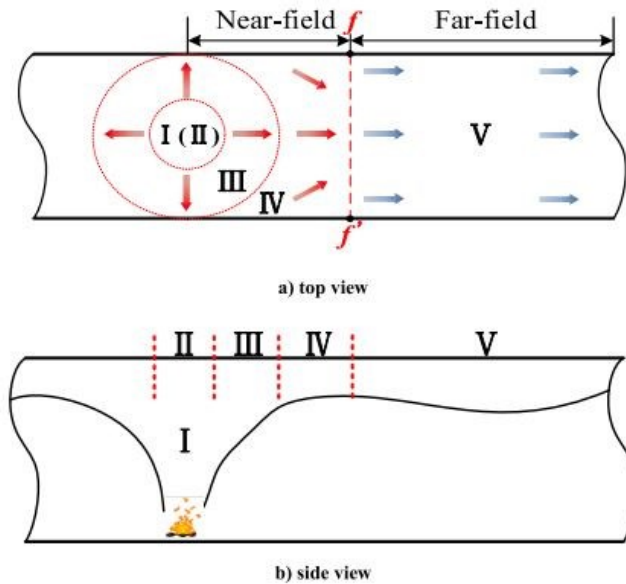
Σχήμα 32. Μήκος επιστροφής του καπνού συναρτήσει της ταχύτητας του αερισμού με και χωρίς εμπόδιο για πυρκαγιά 12.9kW [7]



Σχήμα 33. Μεταβολή της ταχύτητας αερισμού συναρτήσει του μήκους επιστροφής του καπνού με την ύπαρξη εμποδίου [7]

Μια άλλη έρευνα που παρουσιάζει ενδιαφέρον είναι των Wang et al. [43], όπου πραγματοποίησαν μια σειρά αναλύσεων για τη διερεύνηση του μήκους της περιοχής του κοντινού πεδίου (near field) του καπνού σε περίπτωση πυρκαγιάς. Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 34**, ολόκληρο το πεδίο καπνού χωρίζεται σε 5 περιοχές. Οι πρώτες τέσσερις περιοχές (I, II, III, IV) μπορούν να θεωρηθούν

το κοντινό πεδίο (near field) όπου ο καπνός λόγω της θερμικής άνωσης ανέρχεται στην οροφή τη σήραγγας και στη συνέχεια παρουσιάζει μια ασταθή τρισδιάστατη ροή. Η πέμπτη περιοχή (V) θεωρείται το μακρινό πεδίο (far field) όπου παρουσιάζεται μια μονοδιάστατη ροή καθώς ο καπνός σχηματίζει μια σχετικά σταθερή ροή στον διαμήκη άξονα της σήραγγας.



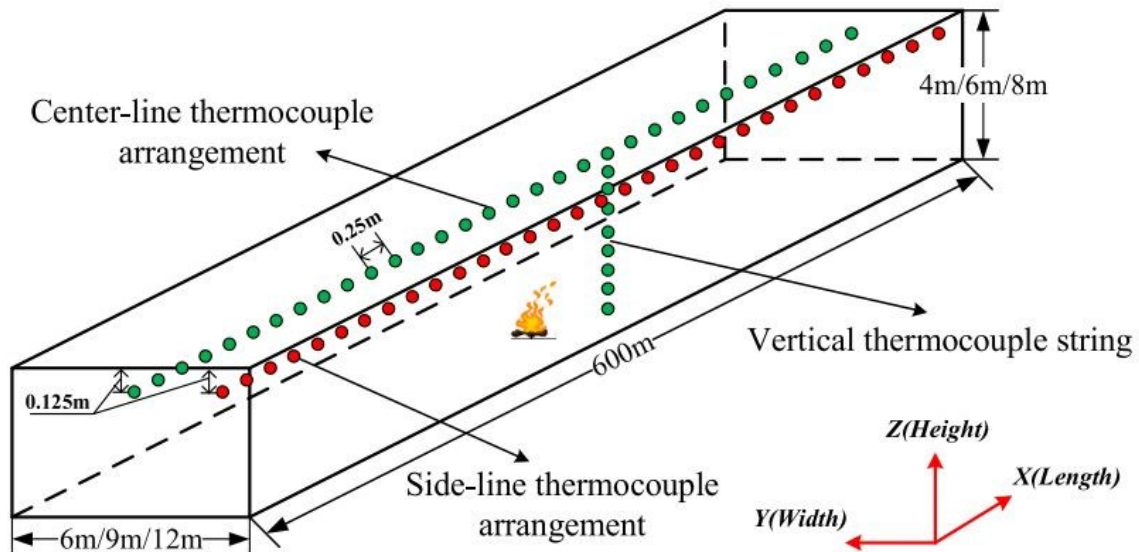
Σχήμα 34. Διαδικασία εξάπλωσης του καπνού εντός της σήραγγας (α) κάτοψη (β) πλάγια όψη [43]

Για τη συγκεκριμένη έρευνα χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας FDS και πραγματοποιήθηκαν 27 υπολογιστικές προσομοιώσεις οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 15.

Πίνακας 15. Σενάρια προσομοίωσης [43]

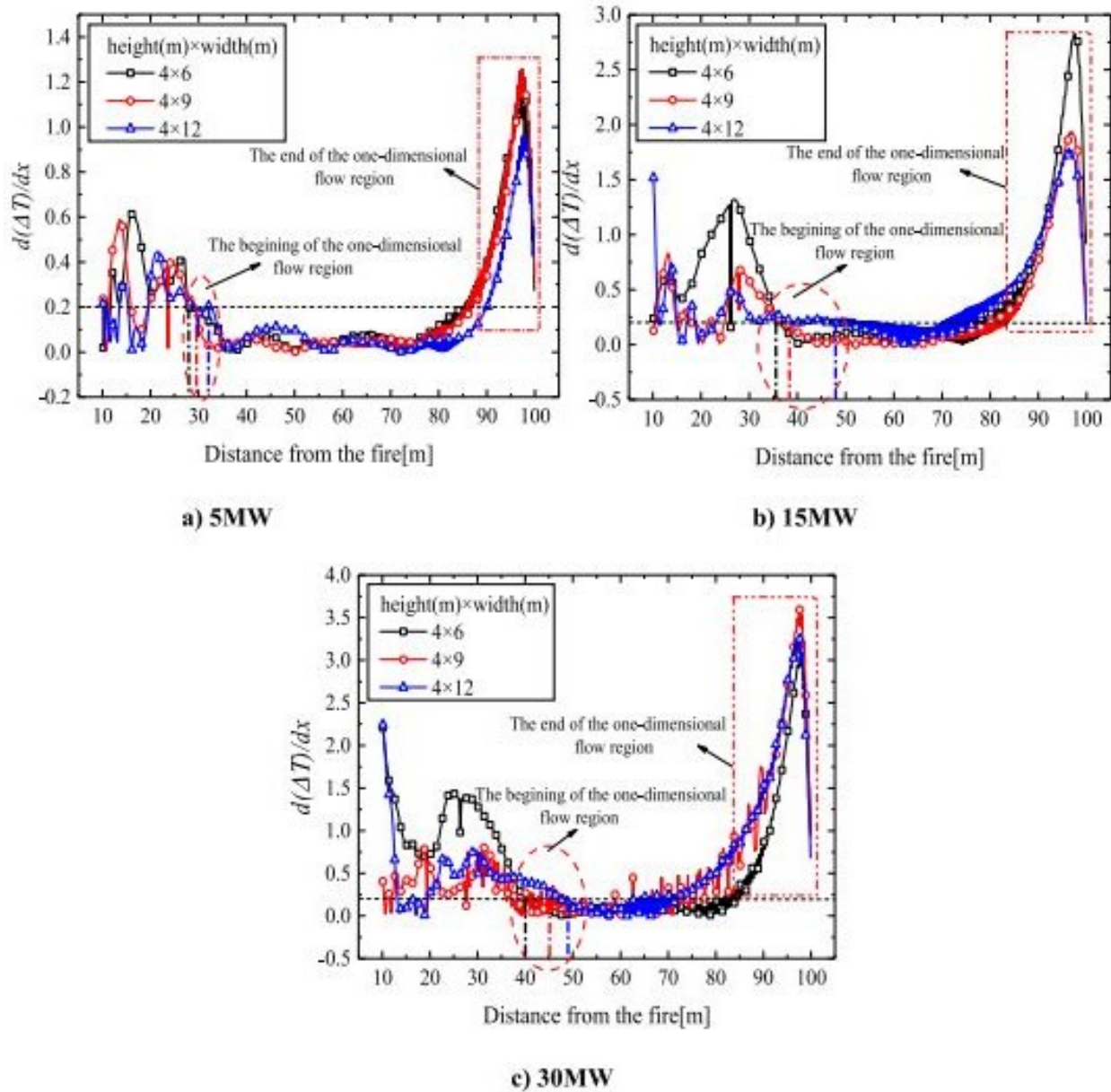
Data sets	Heat release rate [MW]	Tunnel width [m]	Tunnel height [m]
1-9	5	6	4/6/8
		9	4/6/8
		12	4/6/8
10-18	15	6	4/6/8
		9	4/6/8
		12	4/6/8
19-27	30	6	4/6/8
		9	4/6/8
		12	4/6/8

Στο Σχήμα 35 παρουσιάζεται η προσομοίωση της σήραγγας με συνολικό μήκος 600 m και με τις διαστάσεις της διατομής να μεταβάλλονται σύμφωνα με τον Πίνακα 15. Η φωτιά είναι τοποθετημένη στο ύψος του οδοστρώματος, στο μέσον της σήραγγας και έχει διαστάσεις 10 m x 2,5 m και για τα τρία σενάρια του HRR. Οι συνοριακές συνθήκες στα στόμια της σήραγγας προσδιορίστηκαν ανοιχτές, που δηλώνει ένα παθητικό άνοιγμα προς το περιβάλλον, και η αρχική θερμοκρασία εντός της σήραγγας είναι 20 ° C.

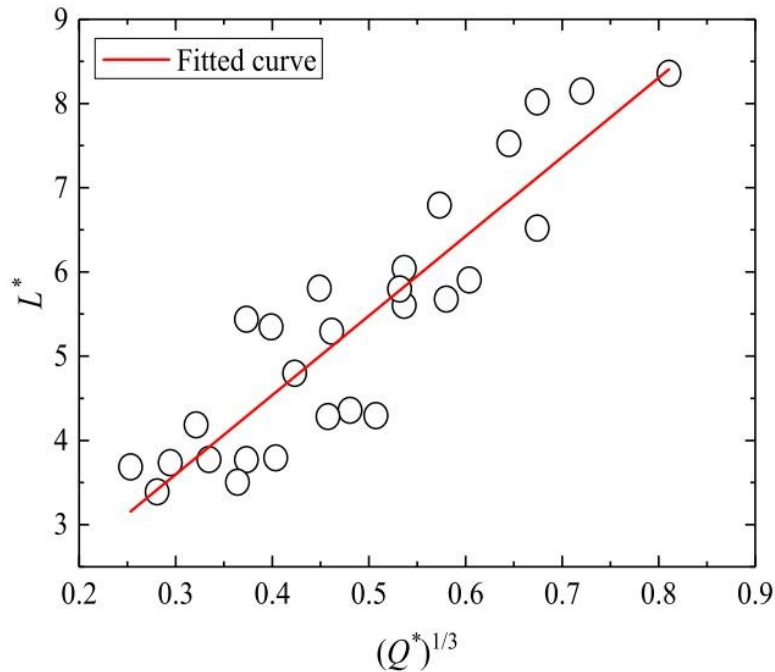


Σχήμα 35. Προσομοίωση της σήραγγας [43]

Από τις αναλύσεις, οι Wang et al. [43] πρότειναν ότι όταν η ταχύτητα του αέρα και η θερμοκρασία δεν παρουσιάζουν σημαντικές διακυμάνσεις, και στον διαμήκη άξονα η διαφορά της θερμοκρασίας στο μέσον της σήραγγας (centerline) με τα πλευρικά όρια της σήραγγας (sideline) είναι μικρότερη από $0,20^{\circ}\text{C}$, να είναι το κριτήριο για τον καθορισμό του σημείου εκκίνησης της περιοχής της μονοδιάστατης ροής. Το αντίστοιχο διάγραμμα παρουσιάζεται στο **Σχήμα 36**, και για τις τρεις περιπτώσεις του HRR, και παρατηρείται ότι η συγκεκριμένη σταθερή περιοχή διατηρείται περίπου μέχρι και 70 m από την φωτιά. Ύστερα, η κίνηση εξάπλωσης του καπνού διαταράσσεται από τον ατμοσφαιρικό αέρα καθώς βρίσκεται κοντά στην περιοχή του στομίου και παύει να ισχύει η μονοδιάστατη ροή. Επίσης συμπέραναν ότι το μήκος του κοντινού πεδίου (near field) αυξάνεται γραμμικά όσο αυξάνεται ο ρυθμός απελευθέρωσης της θερμότητας (βλ. **Σχήμα 37**).

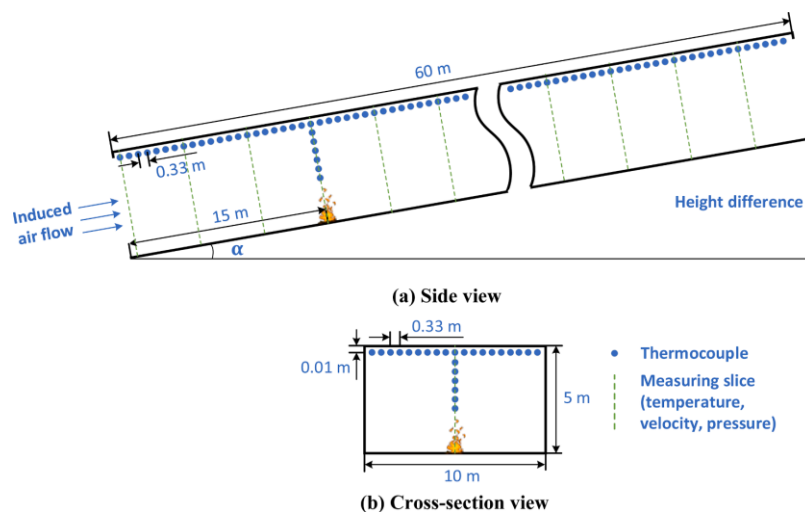


Σχήμα 36. Προσδιορισμός της έναρξης της μονοδιάστατης ροής για θερμική ισχύ: (α) 5 MW (β) 15 MW (γ) 30 MW [43]



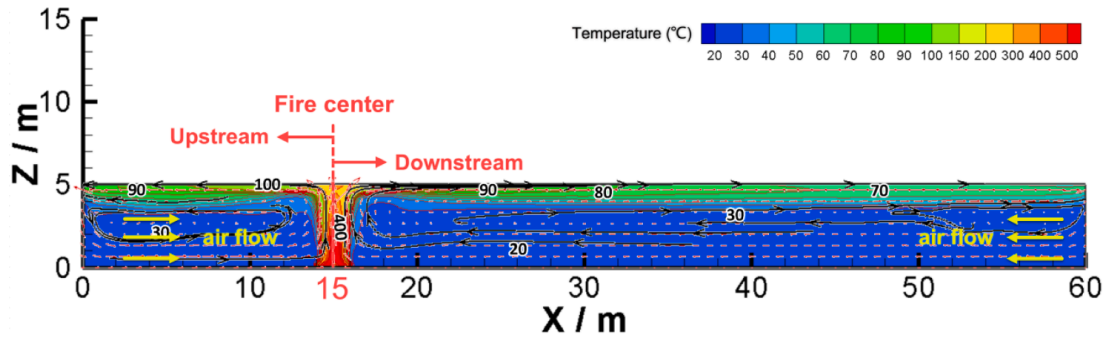
Σχήμα 37. Σχέση μεταξύ του αδιάστατου μήκους της κοντινής περιοχής με τον αδιάστατο ρυθμό απελευθέρωσης της φωτιάς [43]

Τέλος, οι Gao et al. [10] πραγματοποίησαν μια σειρά από αναλύσεις για την περίπτωση πυρκαγιάς εντός της σήραγγας με φυσικό αερισμό και μεταβλητή την κλίσης της σήραγγας. Αναλυτικότερα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 38, το μήκος της σήραγγας είναι 60 m, με πλάτος 10 m και ύψος 5 m. Οι συνοριακές συνθήκες στα στόμια της σήραγγας προσδιορίστηκαν ανοιχτές που δηλώνει ένα παθητικό άνοιγμα προς το περιβάλλον. Οι αναλύσεις έγιναν για κλίσεις 0%, 3%, 5%, 7%, 10%, 12% και 15%. Η πυρκαγιά τοποθετήθηκε 15 m από το αριστερό στόμιο της σήραγγας με θερμική ισχύ από 0,5 MW έως 3 MW, δηλαδή όσο ένα μέσο επιβατικό όχημα. Η διατομή της σήραγγας είναι από σκυρόδεμα και η θερμοκρασία περιβάλλοντος 20 ° C.

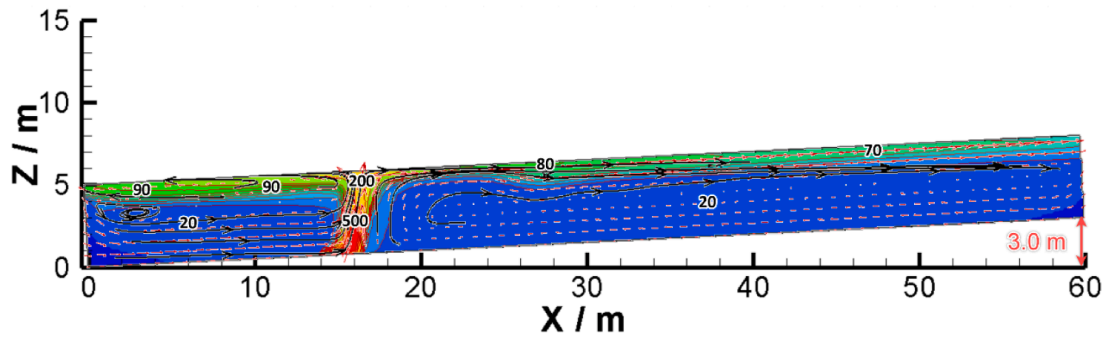


Σχήμα 38. Διαστάσεις της σήραγγας (α) όψη (β) τομή [10]

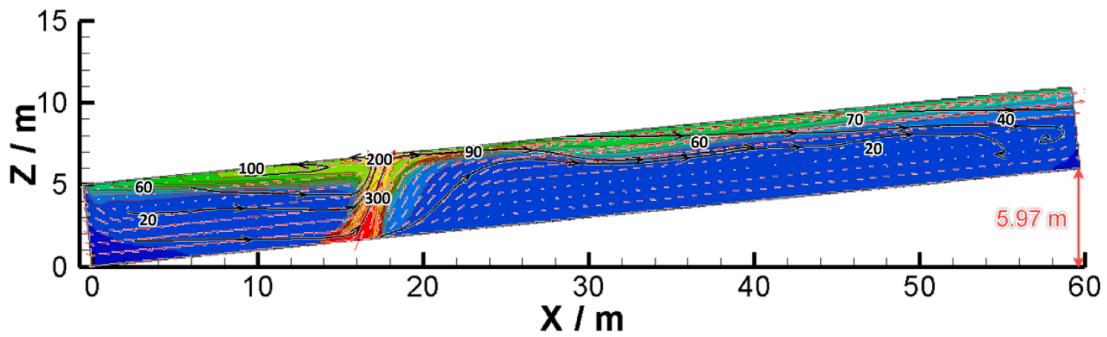
Στο **Σχήμα 39** φαίνονται οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στη σήραγγα για κλίσεις 0%, 5%, 10% και 15% για θερμική ισχύ $HRR=3$ MW. Αρχικά, από το **Σχήμα 39(α)** παρατηρήθηκε ότι λόγω της θερμικής άνωσης ο καπνός, στην περιοχή της πυρκαγιάς, οδηγείται στην οροφή της σήραγγας και εξαπλώνεται κατά μήκος. Αντίθετα, στην περίπτωση της σήραγγας με κλίση (βλ. **Σχήμα 39(β), (γ), (δ)**), λόγω του ότι υπάρχει υψομετρική διαφορά μεταξύ των στομιών και θερμοκρασιακή διαφορά εντός και εκτός της σήραγγας, δημιουργείται το φαινόμενο καμινάδας (chimney effect) όπου ο θερμός αέρας κινείται στην οροφή σύμφωνα με την θετική κλίση της σήραγγας. Φαίνεται λοιπόν ότι όσο μεγαλύτερες είναι αυτές οι διαφορές τόσο εντονότερο είναι το φαινόμενο της καμινάδας και η ροή του αέρα που εισέρχεται εντός της σήραγγας. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση κλίσης 15% όπου η ροή του αέρα είναι τόσο μεγάλη όπου ο καπνός δεν μπορεί να βγει από την κατάντη πλευρά της πυρκαγιάς.



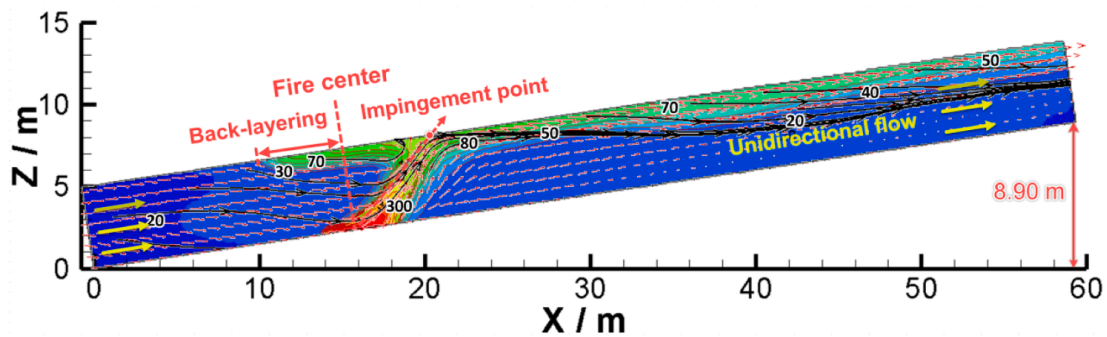
(a) Slope of 0% (horizontal tunnel)



(b) Slope of 5%



(c) Slope of 10%

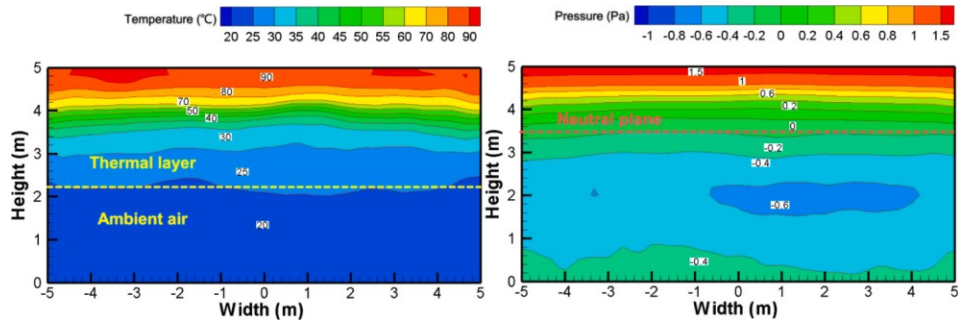


(d) Slope of 15%

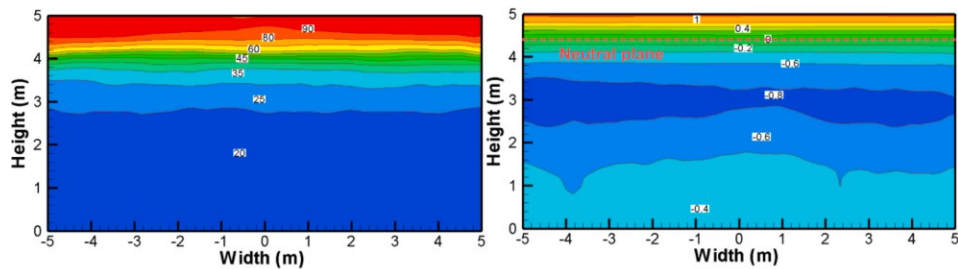
Σχήμα 39. Θερμική ροή συναρτήσει της κλίσης της σήραγγας (HRR = 3 MW) [10]

Στο Σχήμα 40 παρουσιάζεται η τομή της σήραγγας ανάντη της πυρκαγιάς (HRR = 3 MW) και τα αντίστοιχα αποτελέσματα σε θερμοκρασία και πιέσεις. Οι μηδενικές πιέσεις (0 Pa) αντιστοιχούν στην

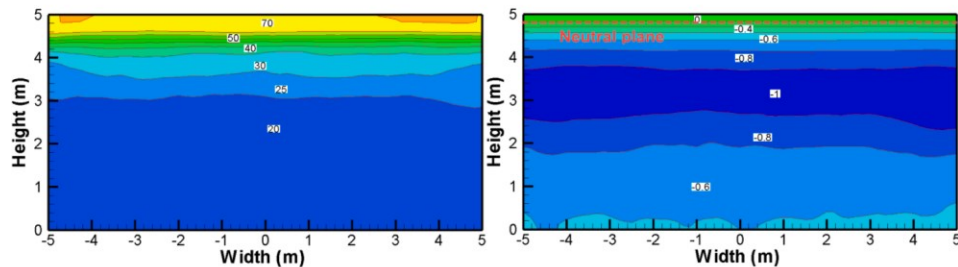
ουδέτερη περιοχή (ή ζώνη), η θετική πίεση (>0 Pa) υποδηλώνει την εκκένωση του καπνού και η αρνητική πίεση (<0 Pa) ότι θα εισέρχεται καθαρός αέρας. Από τα αποτελέσματα συμπεραίνεται ότι με την αύξηση της κλίσης της σήραγγας σταδιακά οι θετικές πιέσεις περιορίζονται καθ' ύψος της διατομής και μηδενίζονται για κλίση 15%.



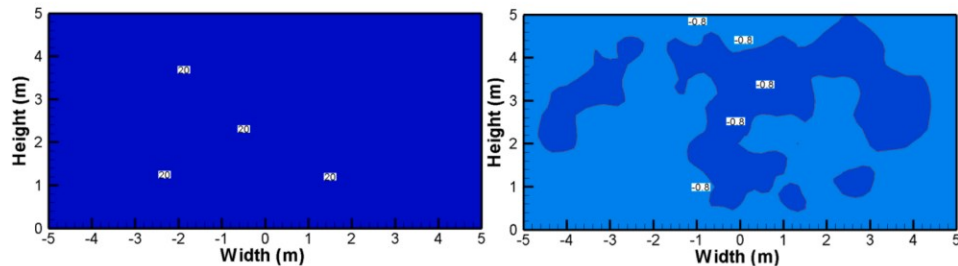
(a) Slope of 0% (horizontal tunnel)



(b) Slope of 5%



(c) Slope of 10%

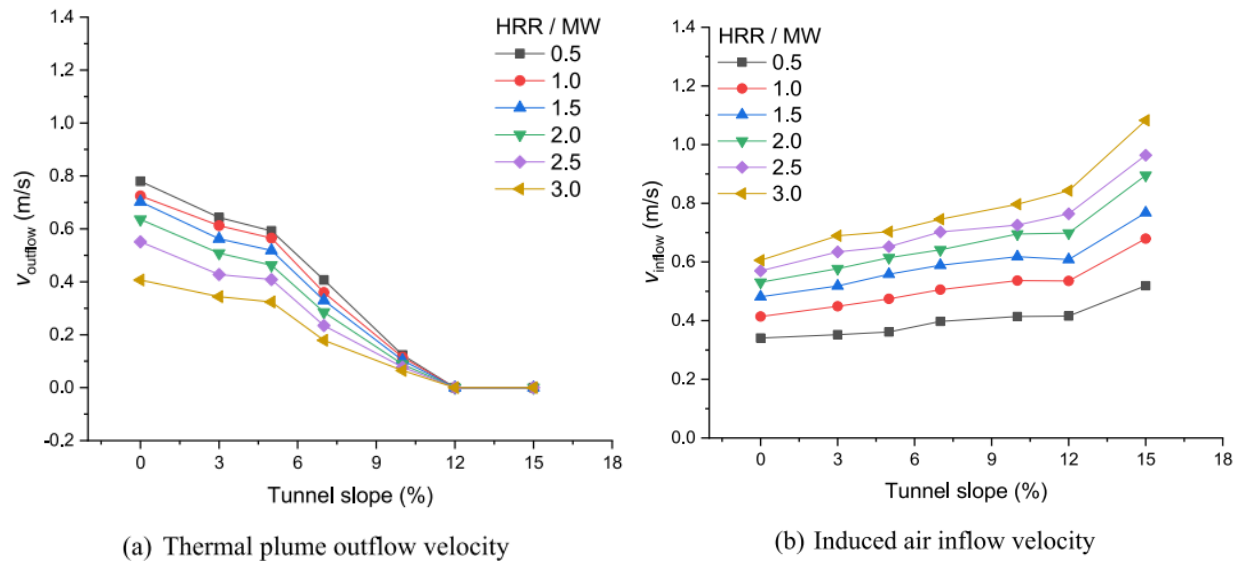


(d) Slope of 15%

Σχήμα 40. Θερμοκρασία και πιέσεις ανάντη της πυρκαγιάς ($HRR = 3MW$) [10]

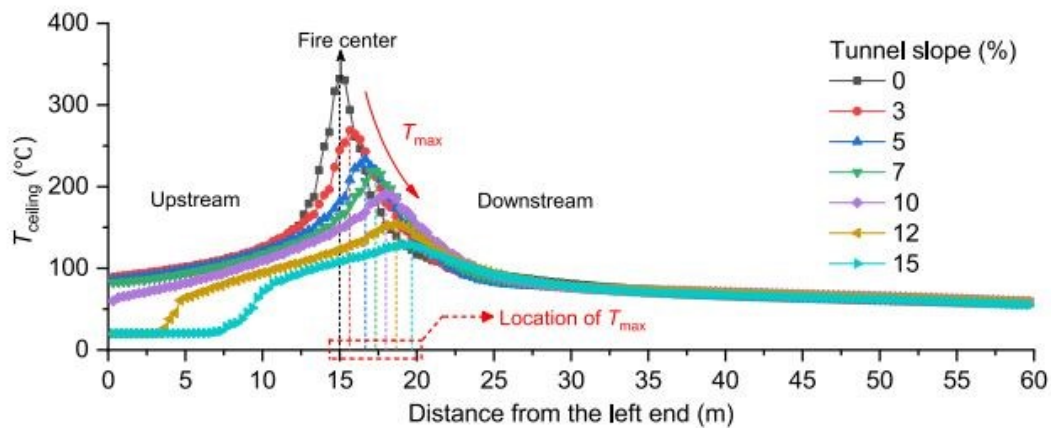
Σύμφωνα με το προφίλ των πιέσεων οι ερευνητές κατέληξαν ότι, ανεξάρτητα από το μέγεθος της θερμικής ισχύος, η ταχύτητα με την οποία εξέρχεται ο καπνός ($V_{outflow}$) μειώνεται όσο αυξάνεται η κλίση,

ενώ όταν η κλίση είναι από 12% και άνω, δεν εξέρχεται καθόλου ο καπνός από την σήραγγα (βλ. **Σχήμα 41(α)**). Σε αντίθεση με την ταχύτητα εξόδου, η ταχύτητα εισόδου (V_{inlet}), όπως φαίνεται στο **Σχήμα 41(β)**, αυξάνεται με την αύξηση της κλίσης της σήραγγας.



Σχήμα 41. Επίδραση της κλίσης της σήραγγας συναρτήσει (α) ταχύτητα εξόδου καπνού (β) ταχύτητα εισόδου καθαρού αέρα [10]

Τέλος, παρατήρησαν ότι για την περίπτωση της σήραγγας με μηδενική κλίση η κατανομή της θερμοκρασίας ανάντη και κατόντη της φωτιάς είναι συμμετρική. Όμως όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 42**, με την αύξηση της κλίση, καθώς εισέρχεται αέρας από την ανάντη πλευρά, ο θερμός αέρας μετατοπίζεται προς τα κατόντη και η μέγιστη θερμοκρασία (T_{max}) μειώνεται.



Σχήμα 42. Διαμήκης κατανομή της θερμοκρασία στην οροφή της σήραγγας για διάφορες κλίσεις ($HRR = 3 \text{ MW}$) [10]

6 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Σκοπός της μελέτης είναι να επιλεγεί ο τύπος και ο απαιτούμενος αριθμός των ανεμιστήρων μιας οδικής σήραγγας. Πιο συγκεκριμένα, η επιλογή του τύπου του ανεμιστήρα γίνεται σύμφωνα με την απαιτούμενη παροχή σε νωπό αέρα, ενώ ο υπολογισμός του αριθμού των ανεμιστήρων γίνεται σύμφωνα με την μεγαλύτερη απώλεια πίεσης, και αφορούν στις δυσμενέστερες συνθήκες που μπορούν να προκύψουν. Τα δεδομένα της μελέτης είναι από την τελική έκθεση του έργου «Προκαταρκτική διερεύνηση και σχεδιασμός από το Μετσόβιο Κέντρο Διεπιστημονικής Έρευνας οδικής σήραγγας μεταξύ των οικισμών Θεοδωριάνων – Μελισσουργών» [44].

Πιο αναλυτικά, η σήραγγα βρίσκεται σε υπεραστική περιοχή, με κυκλοφοριακό φόρτο τα 1000 οχήματα ανά κατεύθυνση, εκ των οποίων το 80% είναι επιβατικά και το 20% βαρέα οχήματα. Το ωριαίο φορτίο αιχμής είναι 150 οχήματα ανά ώρα και ανά κατεύθυνση. Τα χαρακτηριστικά της σήραγγας και των οχημάτων παρουσιάζονται στον **Πίνακα 16**, ενώ η ποσόστωση των οχημάτων κυκλοφορίας παρουσιάζεται στον **Πίνακα 17**.

Πίνακας 16. Χαρακτηριστικά σήραγγας και οχημάτων

Μήκος σήραγγας (m)	1500	Υψόμετρο εισόδου (m)	1360
Κλίση κατεύθυνσης (%)	+2	Υψόμετρο εξόδου (m)	1400
Διατομή σήραγγας (m²)	55,72	Μετωπική επιφάνεια ελαφρών οχημάτων (m²)	3,5
Περίμετρος σήραγγας (m)	28,66	Μετωπική επιφάνεια βαρέων οχημάτων (m²)	7
Ύψος σήραγγας (m)	6,23	Συντελεστής αεροδυναμικής αντίστασης ελαφρών οχημάτων	0,4
Υδραυλική διάμετρος (m)	7,78	Συντελεστής αεροδυναμικής αντίστασης βαρέων οχημάτων	1

Πίνακας 17. Ποσόστωση οχημάτων κυκλοφορίας

Τύπος Οχήματος	%	Κινητήρας	%
Επιβατικά (PC)	80	Gasoline	45
		Diesel	35
Βαρέα (HGV)	20	Diesel	20

6.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΩΝ ΚΑΙ ΠΥΚΝΟΤΗΤΩΝ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ

Καθώς είναι γνωστό το ωριαίο φορτίο αιχμής για 60 km/h, υπολογίζεται το ωριαίο φορτίο αιχμής για κάθε κατηγορία οχήματος και κάθε κατεύθυνση ξεχωριστά (βλ. **Πίνακα 18**).

Πίνακας 18. Ωριαίο φορτίο αιχμής

ΕΜΗΚ 2000	Ωριαίο φορτίο αιχμής (60km/h)	Επιβατικά οχήματα	Βαρέα οχήματα	Επιβατικά οχήματα (1pcu/veh)	Βαρέα οχήματα (3pcu/veh)	Ωριαίο φορτίο αιχμής - pcu (60km/h)
veh/day	veh/h	%	%	pcu/h	pcu/h	pcu/h
1000	150	80	20	120	90	210

Ο υπολογισμός φορτίων και πυκνοτήτων για την ταχύτητα 0 km/h λαμβάνεται από τον **Πίνακα 7**. Συνεπώς, με βάση την ποσόστωση των οχημάτων κυκλοφορίας ανά κατηγορία, υπολογίζεται το κυκλοφοριακό φορτίο για τις δύο κατηγορίες ταχυτήτων, 0 km/h και 60 km/h, και παρουσιάζονται στον **Πίνακα 19**.

Πίνακας 19. Υπολογισμός κυκλοφοριακού φορτίου

Ταχύτητα	ΜΕΑ ¹			ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ (pcu/lane)			ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ (veh/lane)			
	Φορτίο	Πυκνότητα	Σύνολο	Επιβατικά		Βαρέα	Επιβατικά		Βαρέα	Σύνολο
V (km/h)	pcu/h per lane	pcu/km per lane	pcu per lane in tunnel	PC _{gas}	PC _{diesel}	HGV	PC _{gas}	PC _{diesel}	HGV	PC+HGV
0	-	150	225	101,25	78,75	45	101,25	78,75	15	195
60	210	3,5	5,25	2,36	1,84	1,05	2,36	1,84	0,35	4,55

6.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΦΡΕΣΚΟΥ ΑΕΡΑ

Ο υπολογισμός της παροχής του φρέσκου αέρα για την αραιώση των ρύπων γίνεται σύμφωνα με τη σχέση (3.3), για το CO και το NO₂, ενώ για τα αιωρούμενα σωματίδια εφαρμόζεται η σχέση (3.4). Πιο συγκεκριμένα, για την εκτίμηση των συντελεστών των παραπάνω σχέσεων χρησιμοποιούνται οι ακόλουθοι πίνακες από το ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α:

- Για την εκτίμηση των εκπομπών CO, NO_x και PM, για κάθε κατηγορία οχημάτων και τύπο καυσίμων, χρησιμοποιούνται οι **Πίνακες Α-1** έως τον **Πίνακα Α-15**.
- Για τον συντελεστή βελτίωσης της τεχνολογίας, για κάθε κατηγορία οχήματος ξεχωριστά, χρησιμοποιείται ο **Πίνακας Α- 16**, **Πίνακας Α- 17** και **Πίνακας Α- 18**.
- Για τη διόρθωση υψομέτρου εφαρμόζεται ο **Πίνακας Α- 19**.
- Για την εκτίμηση του συντελεστή βάρους χρησιμοποιείται ο **Πίνακας Α- 20**.
- Για την εκτίμηση εκπομπών παραγόμενων σωματιδίων άλλου τύπου, χρησιμοποιούνται ο **Πίνακας Α- 21** και ο **Πίνακας Α- 22**.

Για τους αντίστοιχους υπολογισμούς, εκτιμήθηκε ότι η πυκνότητα του CO είναι περίπου $\rho_{CO}=1,2$ kg/m³ και του NO₂ περίπου $\rho_{NO_2}=1,9$ kg/m³. Με βάση αυτά, στον **Πίνακα 20** παρουσιάζεται η απαιτούμενη παροχή του αέρα για ταχύτητα οχημάτων 0 km/h, ενώ στον **Πίνακα 21** η απαιτούμενη παροχή του αέρα για ταχύτητα οχημάτων 60 km/h. Από τους πίνακες παρατηρείται ότι η μέγιστη απαιτούμενη παροχή νωπού αέρα αφορά στην περίπτωση του NO₂ και με τα οχήματα να είναι στάσιμα (0 km/h). Συνεπώς, για το σύνολο της σήραγγας απαιτείται $Q_{NO_2}^{tot} = 2 \times 16,7 \text{ m}^3/\text{s} = 33,4 \text{ m}^3/\text{s}$.

Πίνακας 20. Απαιτούμενη παροχή νωπού αέρα για ταχύτητα 0 km/h

Ταχύτητα (km/h)	$Q_{CO}(\text{m}^3/\text{s})$	$Q_{NO_2}(\text{m}^3/\text{s})$	$G_{PM}(\text{m}^3/\text{s})$
0 (-2%)	2,81	16,7	2,36
0 (+2%)	2,81	16,7	2,36

Πίνακας 21. Απαιτούμενη παροχή νωπού αέρα για ταχύτητα 60 km/h

Ταχύτητα (km/h)	$Q_{CO}(\text{m}^3/\text{s})$	$Q_{NO_2}(\text{m}^3/\text{s})$	$G_{PM}(\text{m}^3/\text{s})$
60 (-2%)	0,18	1,6	2,79
60 (+2%)	0,36	3,98	3,16

6.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΤΩΣΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΕΝΤΟΣ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ

Για τον υπολογισμό της πτώσης πίεσης εντός της σήραγγας, σε κανονική λειτουργία, εφαρμόζονται οι σχέσεις (3.9) - (3.16) του υποκεφαλαίου 3.7, και γίνονται οι εξής παραδοχές:

- Η πυκνότητα του αέρα θεωρείται $\rho=1,2$ kg/m³.
- Η ταχύτητα του αέρα εντός της σήραγγας ισούται με 0,6 m/s για ταχύτητα οχημάτων 0 km/h, και 0,14m/s για ταχύτητα οχημάτων 60 km/h.
- Ο συντελεστής απωλειών τριβής είναι $\lambda=0,03$.
- Ο συνολικός συντελεστής τοπικών αντιστάσεων είναι $\zeta=0,5$.
- Ο συντελεστής αντιστάσεως οχημάτων C_D είναι 0,4 για κυκλοφοριακή συμφόρηση και 0,35 για κανονική ροή στα επιβατικά, και 1 για κυκλοφοριακή συμφόρηση και 0,8 για κανονική ροή στα βαρέα.
- Η γωνία προσπτώσεως του ανέμου ως προς τον άξονα της σήραγγας εκλήφθηκε μηδενική, $\phi=0$.
- Η ταχύτητα του ανέμου λαμβάνεται 6 m/s.
- Η πτώση πίεσης λόγω βαρομετρικής πίεσης (ΔP_B) θεωρείται αμελητέα, καθώς η σήραγγα έχει σχετικά μικρή υψομετρική διαφορά μεταξύ των στομιών.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, στον **Πίνακα 22** παρουσιάζεται η πτώση πίεσης εντός της σήραγγας, και για τις δύο περιπτώσεις ταχυτήτων των οχημάτων.

Πίνακας 22. Πτώση πίεσης εντός της σήραγγας σε κανονική λειτουργία

Ταχύτητα	0 (km/h)	60 (km/h)
Απαιτούμενη παροχή (m ³ /s)	33,3	8
Ταχύτητα αέρα (m/s)	0,6	0,14
ΔΡ λόγω τριβών (Pa)	1,24	0,07
ΔΡ λόγω σχημάτων (Pa)	1,96	52,38
ΔΡ στομίων (Pa)	0,322	0,018
ΔΡ_Μ λόγω μετεωρολογικών φαινομένων (Pa)	26,98	26,98
Συνολικό ΔΡ (Pa)	30,5	79,45

6.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΥΠΟ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ

Η κρίσιμη ταχύτητα του αέρα υπολογίζεται για μια θερμική ισχύ πυρκαγιάς 50 MW, και σύμφωνα με τις σχέσεις (4.4) και (4.5) έχουμε $V_c=3,05$ m/s. Όσον αφορά στον υπολογισμό της πτώσης πίεσης λόγω πυρκαγιάς, εφαρμόζεται η (4.6) του υποκεφαλαίου 4.5, και έγιναν οι παραδοχές ότι η ταχύτητα του αέρα, αμέσως πριν τη φωτιά, είναι 0,6 m/s και η πυκνότητα του αέρα είναι $\rho=1,05$ kg/m³. Στον Πίνακα 23 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι απώλειες πίεσης εντός της σήραγγας στο σενάριο της πυρκαγιάς.

Πίνακας 23. Πτώση πίεσης εντός της σήραγγας στην περίπτωση πυρκαγιάς

Ταχύτητα	0 (km/h)
Ταχύτητα αέρα (m/s)	0,6
ΔΡ λόγω τριβών (Pa)	36,9
ΔΡ λόγω πυρκαγιάς (Pa)	124,35
ΔΡ λόγω σχημάτων (Pa)	70,9
ΔΡ στομίων (Pa)	9,57
ΔΡ_Μ λόγω μετεωρολογικών φαινομένων (Pa)	32,82
Συνολικό ΔΡ (Pa)	274,2

6.5 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΥΠΟΥ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΟΥ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΩΝ ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΩΝ

Για να επιτευχθεί ένας σωστός αερισμός εντός της σήραγγας, ο προσδιορισμός του τύπου και του αριθμού των απαιτούμενων ανεμιστήρων γίνεται με βάση τις απαιτήσεις στην παροχή του νωπού αέρα για την αραίωση των ρυπαντών, και την πτώση πίεσης σε συνθήκες πυρκαγιάς. Για να εξασφαλισθούν οι συνθήκες ασφαλείας, η διαστασιολόγηση αφορά στο δυσμενέστερο σενάριο, δηλαδή της πυρκαγιάς. Συνεπώς, η παροχή νωπού αέρα που έχει υπολογιστεί ($33,8 \text{ m}^3/\text{s}$), θα πρέπει να κινείται με ταχύτητα μεγαλύτερη της κρίσιμης ταχύτητας, $V_c=3,05 \text{ m/s}$, και να υπερνικηθεί η υπολογισμένη πτώση πίεσης, $\Delta P=274,2 \text{ Pa}$.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, επιλέγεται ο αξονικός ανεμιστήρας ώσης (jet fan) τύπου JZR 12-55/4 πλήρους αναστρέψιμης λειτουργίας, της εταιρείας Zitron, με τεχνικά χαρακτηριστικά:

- Παροχή $Q=40,4 \text{ m}^3/\text{s}$
- Ταχύτητα αέρα στην έξοδο του ανεμιστήρα $V_j=35,7 \text{ m/s}$
- Ονομαστική ώση $T=1663 \text{ N}$
- Ισχύς κινητήρα $P=55 \text{ kW}$
- Διάμετρος πτερωτής $D=1200 \text{ mm}$

Ο υπολογισμός της απαιτούμενης ώσης στη σήραγγα υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$\text{Thrust} = \Delta P_{\text{ολ}} \times A = 274,2 \text{ Pa} \times 55,72 \text{ m}^2 = 15276 \text{ N}$$

Η απαιτούμενη ώση των ανεμιστήρων είναι:

$$S = \rho_{\text{air_fire}} \times Q_j \times (V_j - V_c) \times n = 1,05 \text{ kg/m}^3 \times 40,4 \text{ m}^3/\text{s} \times (35,7 - 3,05) \text{ m/s} \times 0,85 = 1177 \text{ N}$$

Επομένως, για την κάλυψη της απαιτούμενης ώσης εντός της σήραγγας απαιτούνται:

$$z = \frac{\text{Thrust}}{S} = 13 \text{ ανεμιστήρες}$$

Λόγω νομοθεσίας, είναι απαραίτητη η επιπρόσθετη τοποθέτηση 2 εφεδρικών ανεμιστήρων. Συνεπώς, ο τελικός αριθμός ανεμιστήρων είναι 15 και τοποθετούνται ανά 100 m, με εξαίρεση την περιοχή των στομιών που τοποθετούνται στα 50 m.

Στον **Πίνακα 24** παρουσιάζονται τα βασικότερα χαρακτηριστικά της σήραγγας, του συστήματος αερισμού, των περιβαλλοντικών συνθηκών και των κυκλοφοριακών συνθηκών. Σημειώνεται ότι στις αναλύσεις, το στόμιο εισόδου θεωρείται στην περιοχή ανάντη της πυρκαγιάς και το στόμιο εξόδου στην περιοχή κατάντη της πυρκαγιάς.

Πίνακας 24. Βασικότερα χαρακτηριστικά σήραγγας

Σχεδιαστικά χαρακτηριστικά σήραγγας	Διπλής κατεύθυνσης - μονής οπής	
	Συνολικό μήκος	1500 m
	Διατομή σήραγγας	55,72 m ²
	Περίμετρος σήραγγας	28,66 m
	Ύψος σήραγγας	6,23 m
	Υδραυλική διάμετρος	7,78 m
	Κλίση	+2%
	Αριθμός διακοπών κυκλοφορίας	2
	Απαιτούμενος χρόνος διακοπής κυκλοφορίας	2,5 min
Μηχανικό σύστημα αερισμού	Συνολικός αριθμός ανεμιστήρων	15
	Εγκάρσιος αριθμός ανεμιστήρων	1
	Προοδευτική λειτουργία	
	Χρόνος έναρξης συστήματος αερισμού μετά τον εντοπισμό της πυρκαγιάς	2,5min
Περιβαλλοντικές συνθήκες	Θερμοκρασία περιβάλλοντος	0° C
	Υψόμετρο εισόδου	1360 m
	Υψόμετρο εξόδου	1400 m
Κυκλοφοριακές συνθήκες	Ωριαίο φορτίο	150 veh/h
	Ποσοστό HGVs	20%

7 ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Αρχικά, η διερεύνηση της πυρκαγιάς στην υπό διερεύνηση σήραγγα, πραγματοποιείται σε μια διάσταση μέσω του λογισμικού CAMATT 2.20 (CALcul Mono-dimensionnel Anisotherme Transitoire en Tunnel). Το συγκεκριμένο λογισμικό χρησιμοποιείται για τον σχεδιασμό του συστήματος αερισμού σηράγγων (διαμήκη, εγκάρσιο, ημιεγκάρσιο ή συνδυασμός αυτών) και προσομοιώνει καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, όπως η φωτιά και η κυκλοφοριακή συμφόρηση που προκαλείται από αυτήν. Επίσης, δίνεται η δυνατότητα υπολογισμού της κατανομής των ρύπων σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας.

7.1 ΣΗΜΑΝΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

Στις αριθμητικές προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, βασικές παράμετροι του προβλήματος που διερευνήθηκαν ήταν η θέση της πυρκαγιάς και το μέγεθος της φωτιάς. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα δεδομένα που εισήχθησαν στο πρόγραμμα. Πιο συγκεκριμένα, στον **Πίνακα 25** παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της σήραγγας, και στον **Πίνακα 26** τα χαρακτηριστικά των ανεμιστήρων. Στον **Πίνακα 27** παρουσιάζονται οι παράμετροι της κυκλοφορίας, και στον **Πίνακα 28** τα χαρακτηριστικά περιβάλλοντος της σήραγγας.

Πίνακας 25. Χαρακτηριστικά σήραγγας

Length (m)	Cross-section area (m ²)	Perimeter (m)	Slope (%)	Friction coefficient
1500	55,72	28,66	+2	0,03

Πίνακας 26. Χαρακτηριστικά ανεμιστήρων

Number of jet fans	Unit free-field thrust (N)	Jet velocity (m/s)	Efficiency	Max. working temperature (°C)	Reference density (kg/m ³)	Tunnel Cross-section area (m ²)	Cross-sect. area at jet fans (m ²)
15	1663	35,7	0,85	250	1,2	55,72	55,72

Πίνακας 27. Παράμετροι για την κυκλοφορία

Proportion of HGVs (%)	Sigma_CX for HGVs (m ²)	Sigma_CX for cars (m ²)	Distance between stopped vehicles (m)	Pollutant emissions (g/h/km)			Traffic entering tunnel	
				CO	NO ₂	PM	Nominal speed (km/h)	Nominal flux (V/h)
20	7	3,5	10	1131,4	800,2	79,6	60	150

Πίνακας 28. Χαρακτηριστικά περιβάλλοντος σήραγγας

Average altitude (m)	Ambient air temperature (°C)
+1380	20

Όσον αφορά στις εξωτερικές πιέσεις, έχει εισαχθεί η πτώση πίεσης λόγω ανεμόπτωσης, κάθετα στο στόμιο εξόδου της σήραγγας. Η βαρομετρική πίεση παρατηρείται μόνο σε μεγάλες διαφορές ύψους ή σε ύπαρξη διαφορετικών κλιματικών συνθηκών μεταξύ των στομιών, συνεπώς θεωρείται αμελητέα στην υπό εξέταση σήραγγα [24]. Οπότε, η πτώση πίεσης λόγω ανεμόπτωσης είναι $\Delta P_M=21,6$ Pa.

Σχετικά με τη προσομοίωση της φωτιάς, το πρόγραμμα παρέχει 12 κατηγορίες φωτιών αναφοράς, παραμετροποιημένες και έτοιμες για χρήση. Ωστόσο, τα τρία σενάρια που επιλέχθηκαν έγιναν κυρίως σύμφωνα με τις προτυποποιημένες πυρκαγιές της ΔΑΣ [1], για τη σεναριακή ανάλυση της επικινδυνότητας, και παρουσιάζονται στον Πίνακα 29. Οι θέσεις της εκδήλωσης πυρκαγιάς που αναλύθηκαν ήταν δύο. Αρχικά στο μέσον της σήραγγας, που σύμφωνα με μελέτες που έχουν γίνει, θεωρείται από τις πιο κρίσιμες [45], και η δεύτερη σε απόσταση 100 m πριν από την έξοδο της σήραγγας, για τον κατωφερή κλάδο, που με βάση την Εγνατία Οδό Α.Ε. [46], προκύπτουν αρκετά δυσμενέστερες συνθήκες λόγω του φαινομένου της καμινάδας.

Πίνακας 29. Σενάρια μονοδιάστατης ανάλυσης

Type of fire	HRR (MW)	t_g (sec)	t_d (sec)	t_T (sec)
2-3 επιβατικά οχήματα ή μικρό ημιφορηγό	15	180	1380	2700
HGV-10 t χαμηλής καύσης	30	300	300	3300
Φορηγό με καύσιμο φορτίο	50	300	3900	4800

Όπου,

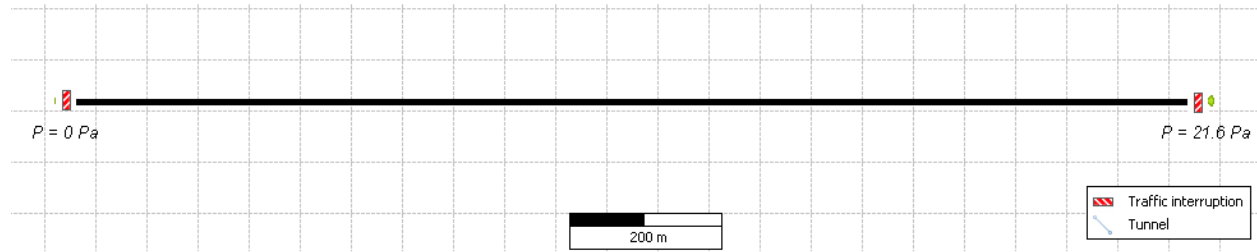
t_g : ο χρόνος που η HRR φτάνει στο μέγιστο [sec]

t_d : ο χρόνος που η HRR εισέρχεται στη φάση εξασθένησης [sec]

t_T : η συνολική χρονική διάρκεια της πυρκαγιάς [sec]

HRR: ρυθμός απελευθέρωσης της θερμότητας [MW]

Τέλος, θεωρείται ότι η πυρκαγιά ξεσπάει μετά από 10 sec, και γίνεται αντιληπτή από τις κάμερες CCTV μετά από 155 sec (2,58 min). Ταυτόχρονα, κλείνει η σήραγγα και ενεργοποιείται ο αερισμός έκτακτης ανάγκης, ωστόσο χρειάζονται άλλα 85 sec (1,5 min περίπου) για να φτάσουν οι ανεμιστήρες τη μέγιστη απόδοσή τους [47]. Στο **Σχήμα 43** παρουσιάζεται η προσομοίωση της εξεταζόμενης σήραγγας.

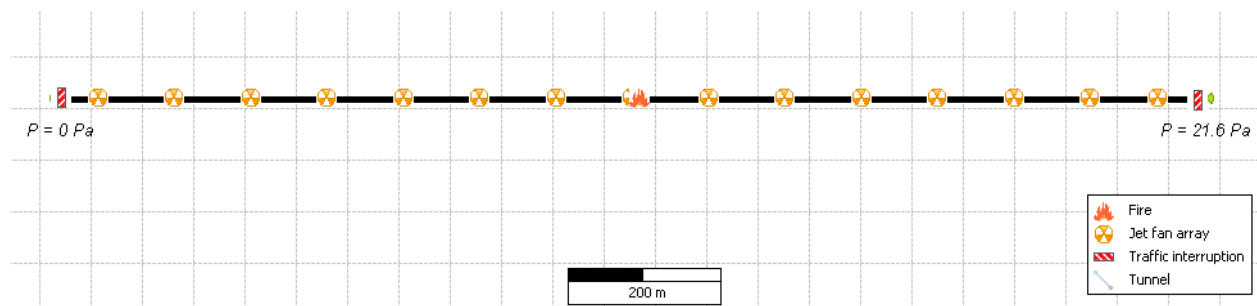


Σχήμα 43. Προσομοίωση σήραγγας μέσω Camatt

7.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

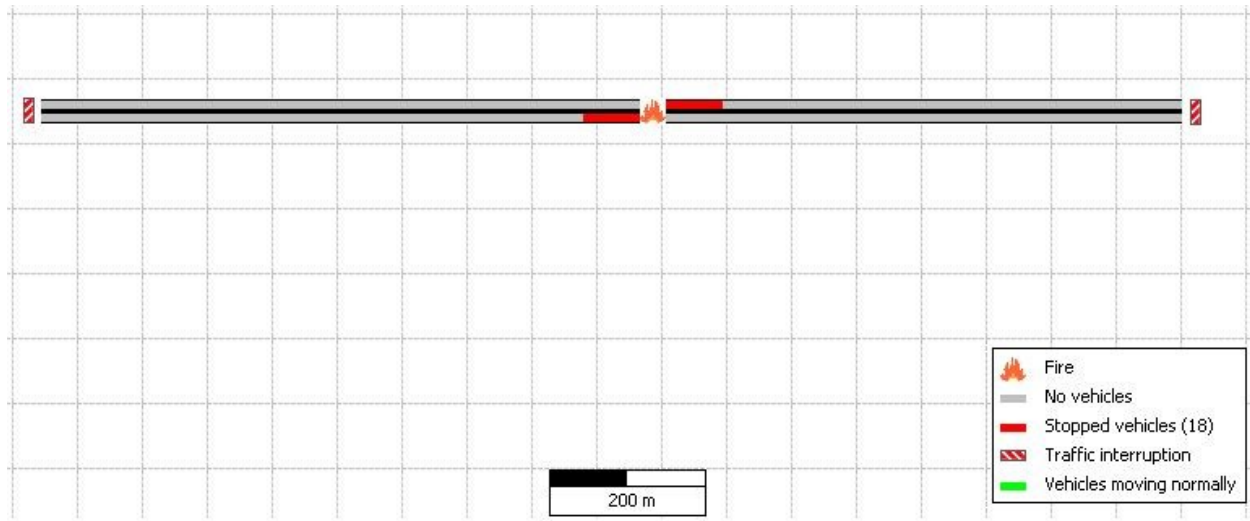
7.2.1 Φωτιά στο μέσον της σήραγγας

Στο **Σχήμα 44** παρουσιάζεται η προσομοίωση της σήραγγας με την φωτιά να ξεσπάει στο μέσον της.



Σχήμα 44. Προσομοίωση φωτιάς στο μέσον της σήραγγας

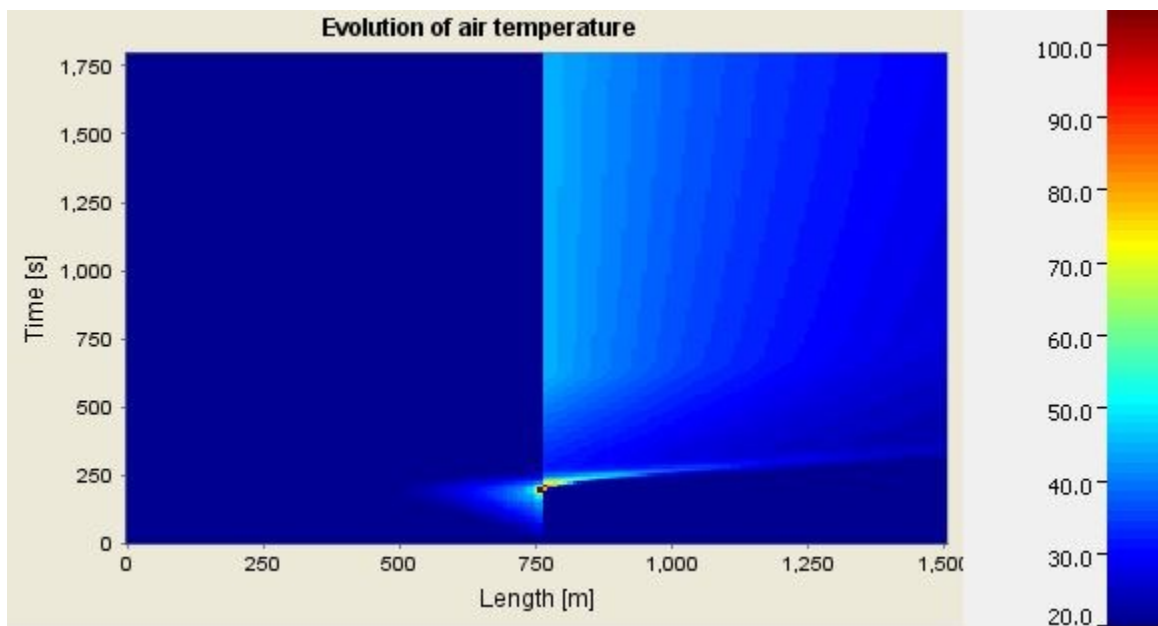
Ανεξάρτητα από το μέγεθος της θερμικής ισχύος, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 45**, δημιουργείται μια κυκλοφοριακή συμφόρηση μήκους περίπου 70 m εκατέρωθεν της φωτιάς, με συνολικό αριθμό οχημάτων 18, δηλαδή 9 οχήματα ανάντη και κατάντη της φωτιάς.



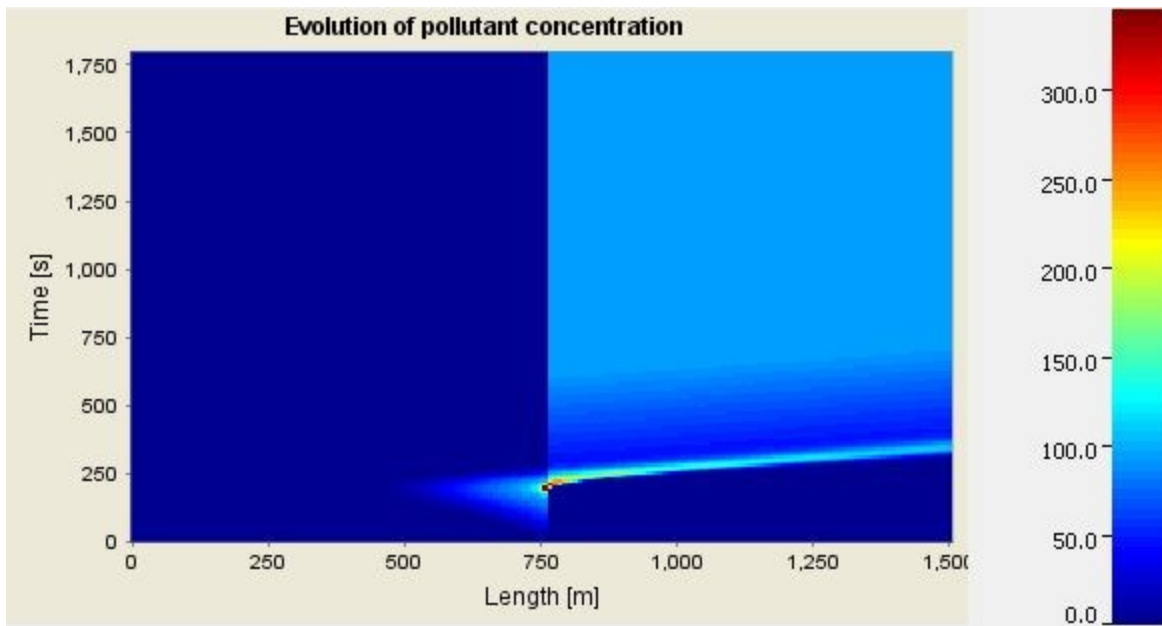
Σχήμα 45. Κυκλοφοριακή συμφόρηση με πυρκαγιά στο μέσον της σήραγγας

7.2.1.1 Θερμική ισχύς 15 MW

Αρχικά, αναλύεται το σενάριο όπου δύο μεγάλα επιβατικά οχήματα και ένα μικρό συγκρούονται και προκαλείται φωτιά με θερμική ισχύ 15 MW. Στο **Σχήμα 46** παρουσιάζεται η κατανομή της θερμοκρασίας του αέρα και στο **Σχήμα 47** παρουσιάζεται η κατανομή των ρυπογόνων ουσιών. Από το **Σχήμα 47** παρατηρείται το φαινόμενο της αναστροφής του καπνού, περίπου 300 m ανάντη της φωτιάς.

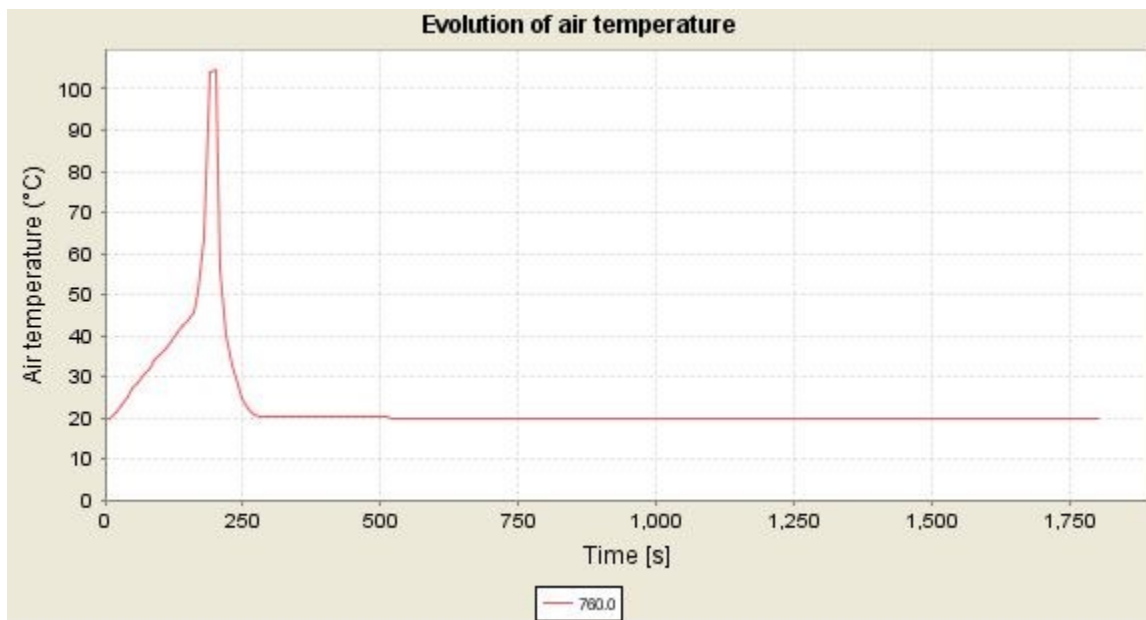


Σχήμα 46. Κατανομή της θερμοκρασίας του αέρα για φωτιά στο μέσον με HRR=15 MW



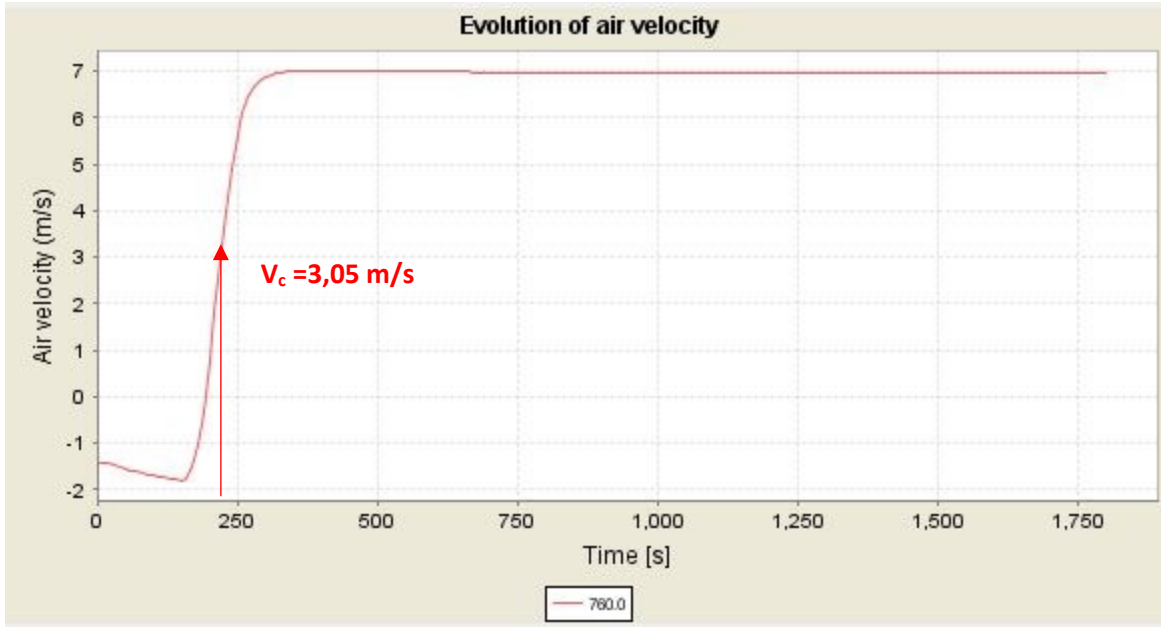
Σχήμα 47. Κατανομή των ρυπογόνων ουσιών για φωτιά στο μέσον με $HRR=15\text{ MW}$

Στο **Σχήμα 48** παρουσιάζεται η θερμοκρασία του αέρα κατά τη διάρκεια της ανάλυσης για το σημείο όπου έχει ξεσπάσει η πυρκαγιά, $x=760\text{ m}$. Παρατηρείται ότι η μέγιστη θερμοκρασία είναι στους $104\text{ }^\circ\text{C}$ στα 200 sec (3,33 min), και δεν επηρεάζεται η λειτουργία των γειτονικών ανεμιστήρων.



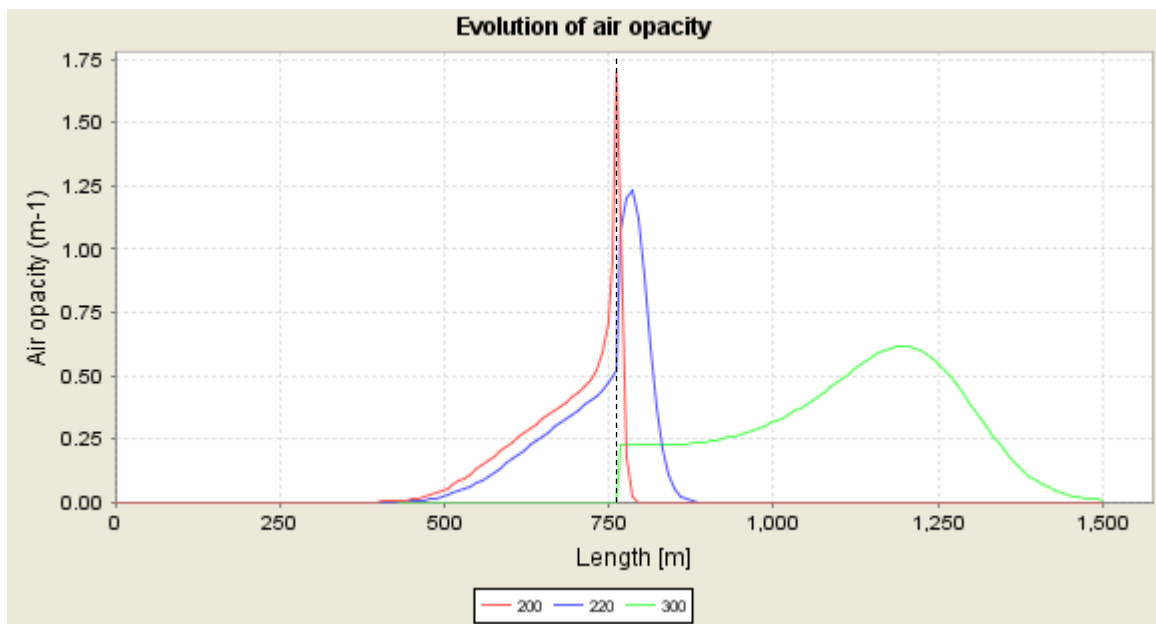
Σχήμα 48. Θερμοκρασία του αέρα εντός της σήραγγας για $x=760\text{ m}$ και $HRR=15\text{ MW}$

Στο **Σχήμα 49** παρουσιάζεται η ταχύτητα του αέρα στη θέση της πυρκαγιάς, δηλαδή για $x=760\text{ m}$, συναρτήσει του χρόνου της ανάλυσης. Η κρίσιμη ταχύτητα, $V_c=3,05\text{ m/s}$, εντοπίζεται περίπου στα 220 sec (3,7 min), και αυξάνεται μέχρι τα 7 m/s .



Σχήμα 49. Ταχύτητα αέρα εντός της σήραγγας για $x=760 \text{ m}$ και $HRR=15 \text{ MW}$

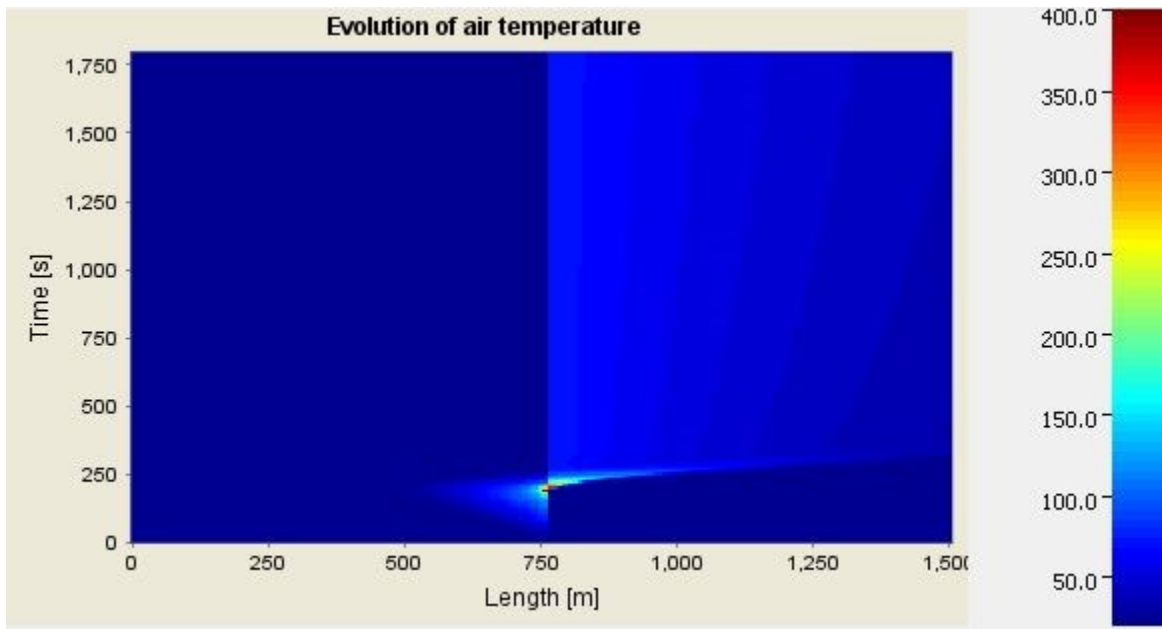
Τέλος, στο **Σχήμα 50** παρουσιάζεται η ορατότητα του αέρα κατά μήκος της σήραγγας σε τρεις διαφορετικές χρονικές στιγμές $t=200 \text{ sec}$, $t=220 \text{ sec}$ και $t=300 \text{ sec}$. Από το συγκεκριμένο διάγραμμα αξίζει να παρατηρηθεί ότι για $t=200 \text{ sec}$ (3,3 min), που η ταχύτητα είναι αρκετά μικρότερη από την κρίσιμη ταχύτητα (βλ. **Σχήμα 49**), παρατηρείται το φαινόμενο της αναστροφής. Όσο προσεγγίζεται η κρίσιμη ταχύτητα, $t=220 \text{ sec}$, μειώνεται και τέλος, για $t=300 \text{ sec}$ (5 min), παρατηρείται ότι στα 760 m η ταχύτητα του αέρα έχει ξεπεράσει την κρίσιμη, καθώς είναι σχεδόν 7 m/s, και το φαινόμενο της αντιστροφής έχει μηδενιστεί στην ανάντη πλευρά της φωτιάς.



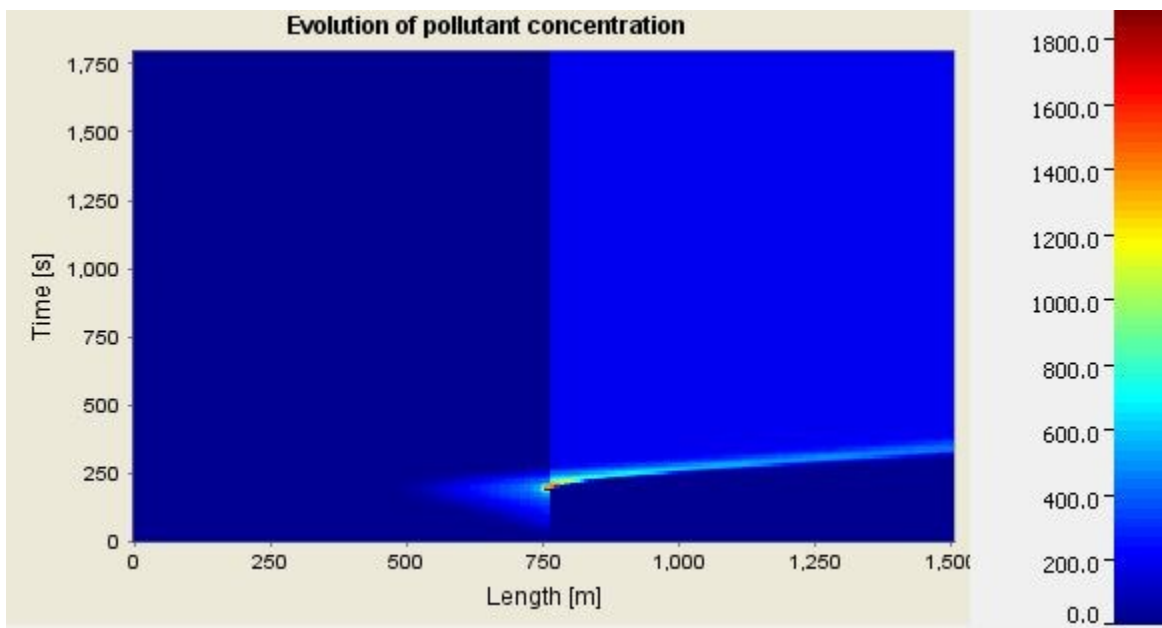
Σχήμα 50. Ορατότητα κατά μήκος της σήραγγας για $t=200 \text{ sec}$, $t=220 \text{ sec}$, $t=300 \text{ sec}$ και $HRR=15 \text{ MW}$

7.2.1.2 Θερμική ισχύς 30 MW

Ύστερα, εξετάζεται το σενάριο όπου στη φωτιά εμπλέκεται ένα λεωφορείο ή ένα κενό βαρέως τύπου φορτηγό, με θερμική ισχύ τα 30 MW. Στο **Σχήμα 51** παρουσιάζεται η κατανομή της θερμοκρασίας του αέρα και στο **Σχήμα 52** παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις των ρυπογόνων ουσιών. Παρατηρείται ότι μέχρι να ενεργοποιηθούν οι ανεμιστήρες και να φτάσουν τη μέγιστη απόδοσή τους, δημιουργείται το φαινόμενο της αναστροφής του καπνού 285 m ανάντη της φωτιάς.

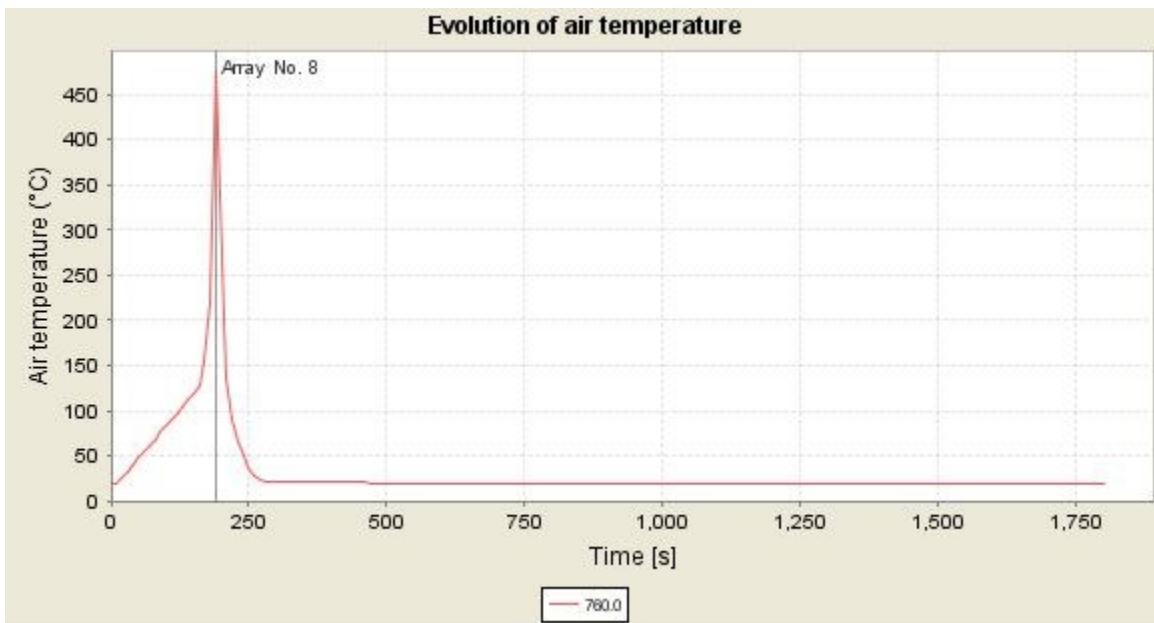


Σχήμα 51. Κατανομή της θερμοκρασίας του αέρα για φωτιά στο μέσον με HRR=30 MW



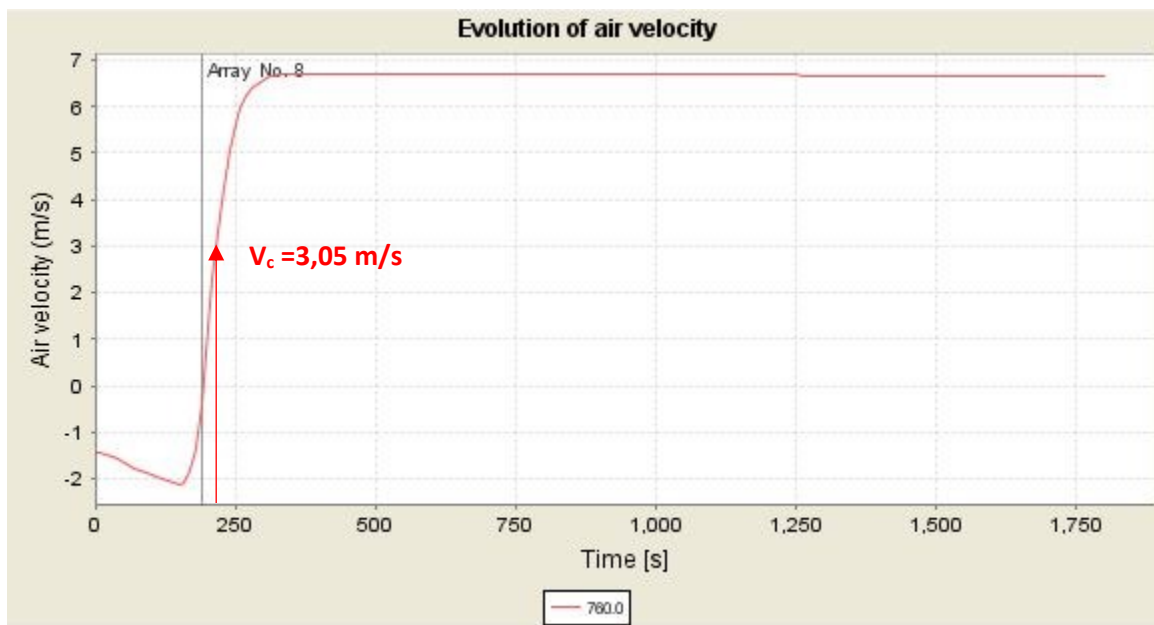
Σχήμα 52. Κατανομή των ρυπογόνων ουσιών για φωτιά στο μέσον με HRR=30 MW

Στο **Σχήμα 53** παρουσιάζεται η θερμοκρασία του αέρα κατά τη διάρκεια της ανάλυσης για το σημείο που έχει ξεσπάσει η πυρκαγιά, δηλαδή στα 760 m. Παρατηρείται ότι η μέγιστη θερμοκρασία ανέρχεται τους 475 °C στα 190 sec, και επηρεάζεται η λειτουργία του ανεμιστήρα No. 8.



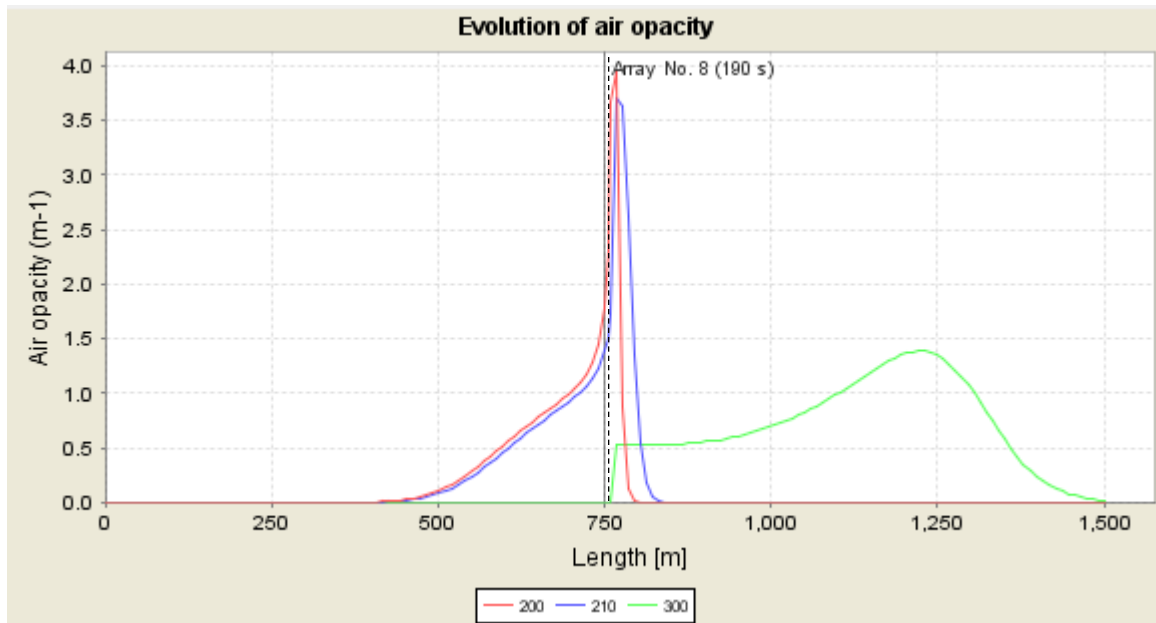
Σχήμα 53. Θερμοκρασία εντός της σήραγγας για $x=760\text{ m}$ και $HRR=30\text{ MW}$

Στο **Σχήμα 54** παρουσιάζεται η ταχύτητα του αέρα στη θέση της πυρκαγιάς, δηλαδή για $x=760\text{ m}$, συναρτήσει του χρόνου της ανάλυσης. Η κρίσιμη ταχύτητα, $V_c=3,05\text{ m/s}$, εντοπίζεται περίπου στα 210 sec, και αυξάνεται μέχρι τα 6,7 m/s.



Σχήμα 54. Ταχύτητα αέρα εντός της σήραγγας για $x=760\text{ m}$ και $HRR=30\text{ MW}$

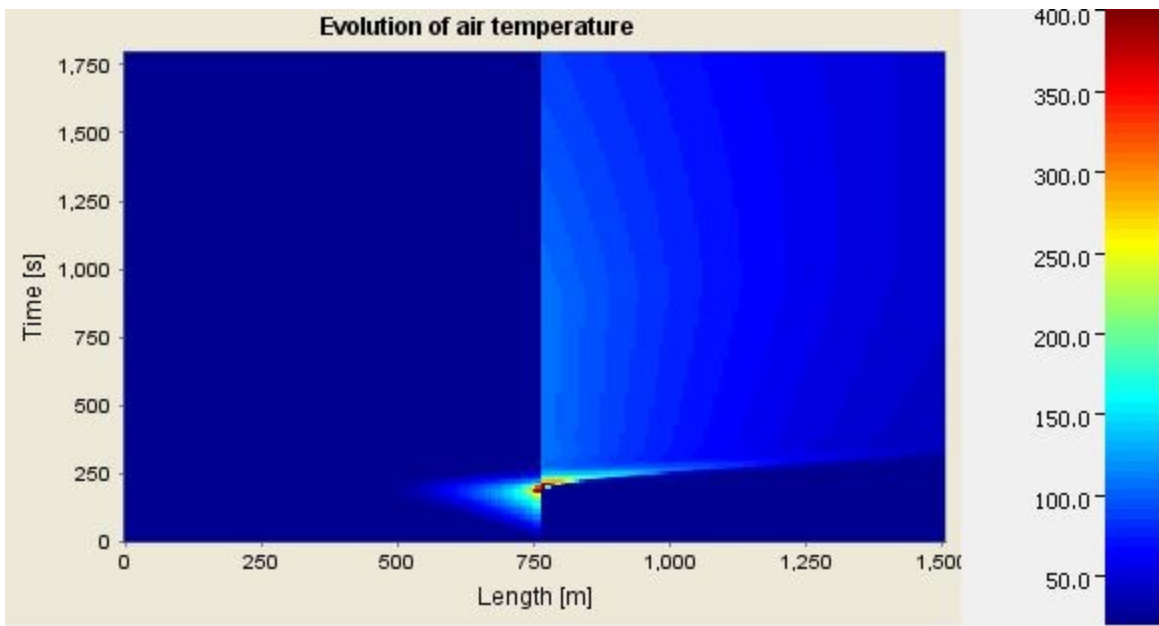
Αντίστοιχα, στο **Σχήμα 55** παρουσιάζεται η ορατότητα του αέρα κατά μήκος της σήραγγας σε τρεις διαφορετικές χρονικές στιγμές $t=200$ sec, $t=210$ sec και $t=300$ sec. Από το συγκεκριμένο διάγραμμα αξίζει να παρατηρηθεί ότι για $t=200$ sec, που η ταχύτητα είναι μικρότερη από την κρίσιμη ταχύτητα (βλ. **Σχήμα 54**), παρατηρείται έντονα το φαινόμενο της αντιστροφής ανάντη της φωτιάς. Σταδιακά, για $t=210$ sec, που η ταχύτητα είναι σχεδόν ίση με την κρίσιμη ταχύτητα, το φαινόμενο της αντιστροφής αρχίζει και μειώνεται μέχρις ότου τα $t=300$ sec, που το φαινόμενο της αντιστροφής έχει μηδενιστεί.



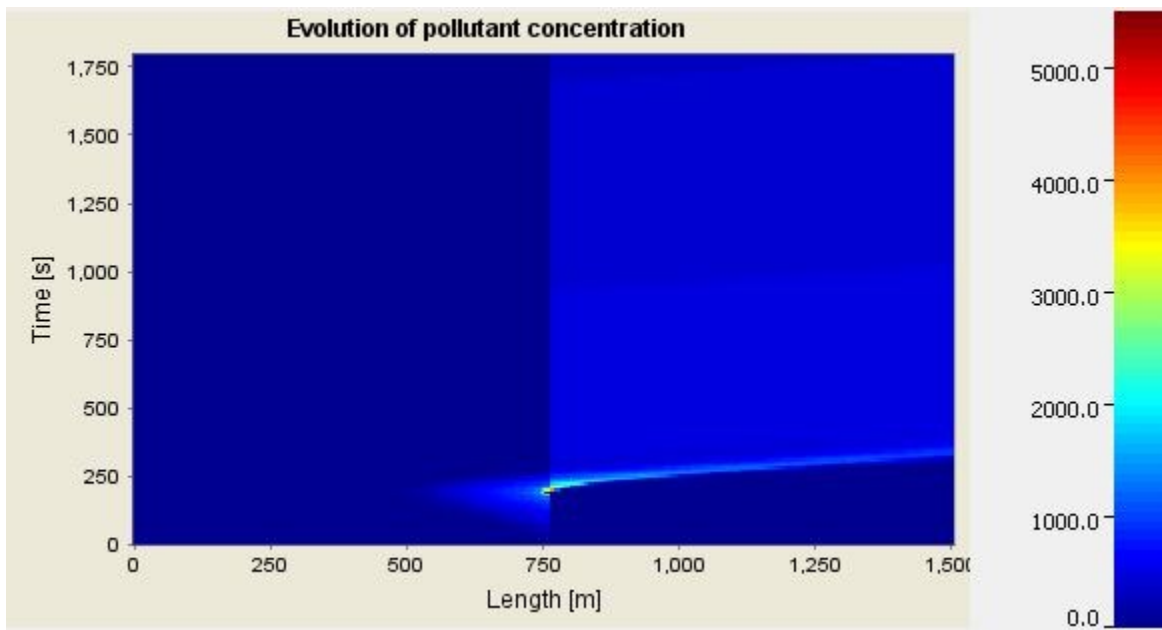
Σχήμα 55. Ορατότητα κατά μήκος της σήραγγας για $t=200$ sec, $t=210$ sec, $t=300$ sec και $HRR=30$ MW

7.2.1.3 Θερμική ισχύς 50 MW

Τέλος, εξετάζεται το σενάριο όπου στη φωτιά εμπλέκεται ένα φορτηγό με καύσιμο φορτίο και θερμική ισχύ τα 50 MW. Στο **Σχήμα 56** παρουσιάζεται η κατανομή της θερμοκρασίας του αέρα και στο **Σχήμα 57** παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις των ρυπογόνων ουσιών. Παρατηρείται ότι μέχρι να ενεργοποιηθούν οι ανεμιστήρες, και να φτάσουν τη μέγιστη απόδοσή τους, δημιουργείται το φαινόμενο της αναστροφής του καπνού 270 m ανάντη της φωτιάς.

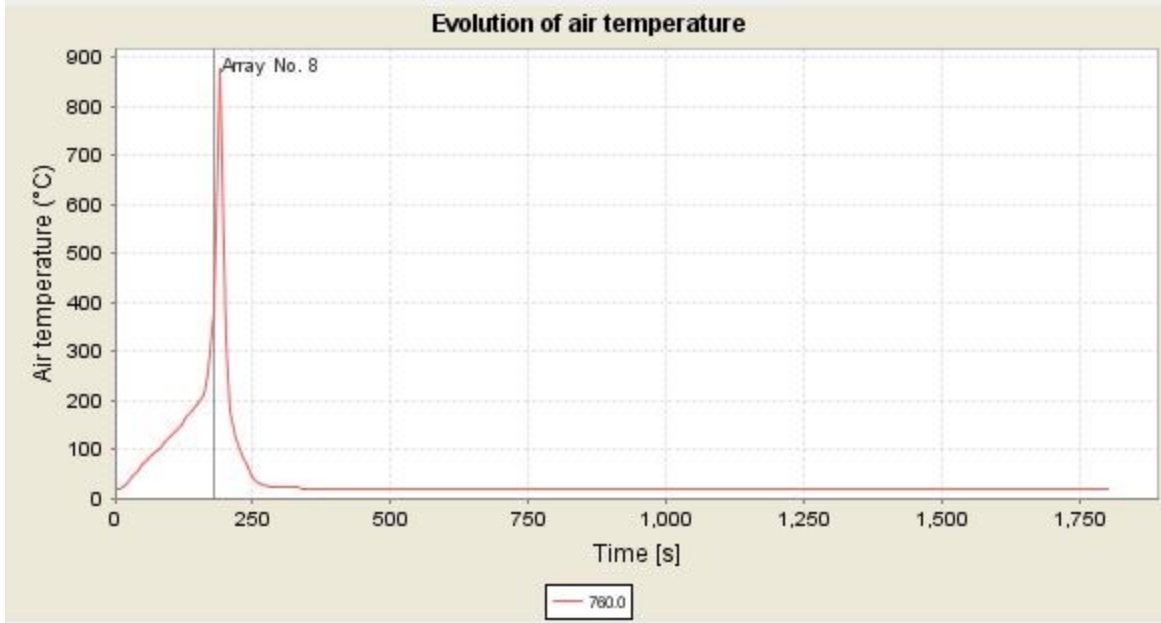


Σχήμα 56. Κατανομή της θερμοκρασίας του αέρα για φωτιά στο μέσον με HRR=50 MW



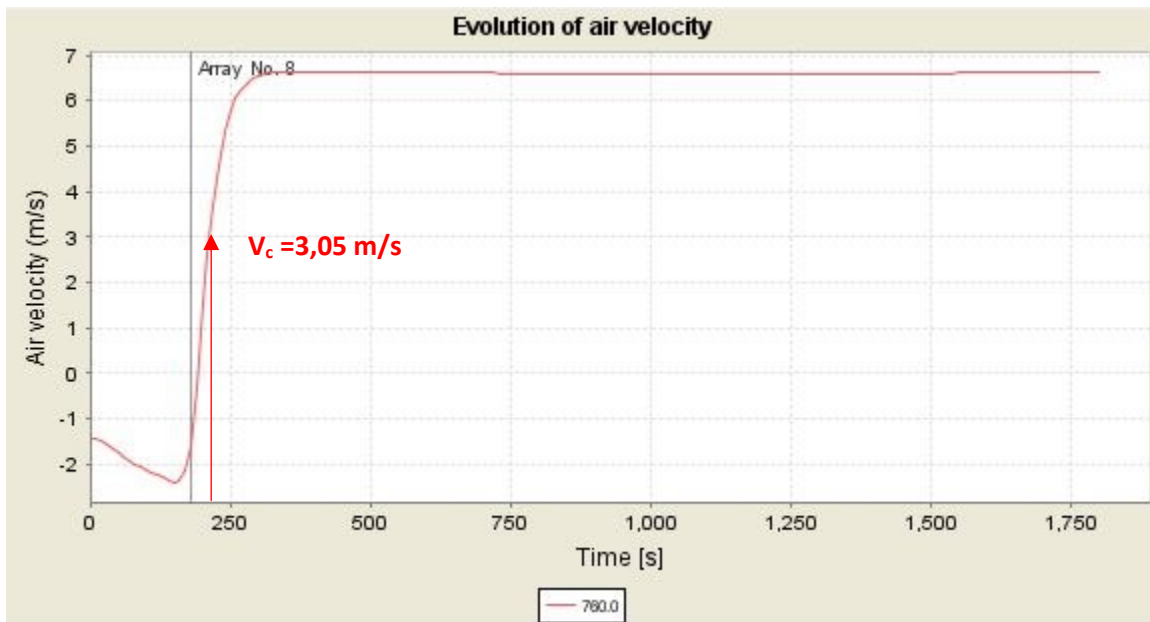
Σχήμα 57. Κατανομή των ρυπογόνων ουσιών για φωτιά στο μέσον με HRR=50 MW

Στο Σχήμα 58 παρουσιάζεται η θερμοκρασία του αέρα κατά τη διάρκεια της ανάλυσης για το σημείο όπου έχει ξεσπάσει η πυρκαγιά, δηλαδή στα 760 m. Παρατηρείται ότι η μέγιστη θερμοκρασία ανέρχεται τους 875 ° C στα 190 sec, και επηρεάζεται η λειτουργία του γειτονικού ανεμιστήρα No. 8.



Σχήμα 58. Θερμοκρασία εντός της σήραγγας για $x=760\text{ m}$ και $HRR=50\text{ MW}$

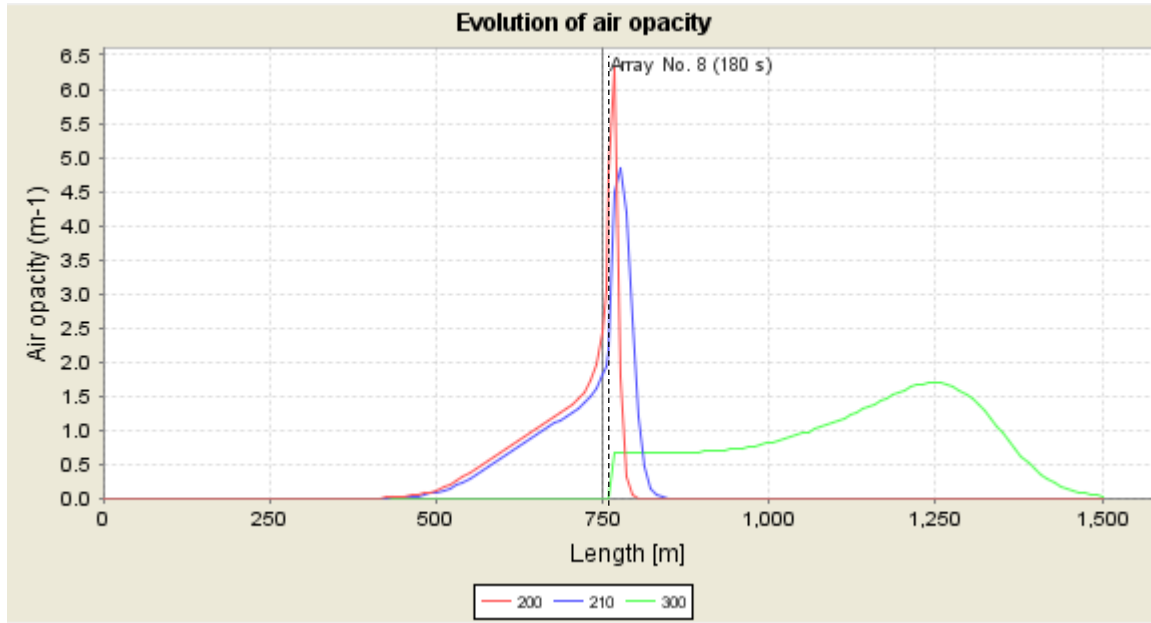
Παρακάτω παρουσιάζεται η ταχύτητα του αέρα στη θέση της πυρκαγιάς, δηλαδή για $x=760\text{ m}$, συναρτήσει του χρόνου της ανάλυσης. Η κρίσιμη ταχύτητα, $V_c=3,05\text{ m/s}$, εντοπίζεται στα 210 sec, και αυξάνεται μέχρι τα 6.6 m/s.



Σχήμα 59. Ταχύτητα αέρα εντός της σήραγγας για $x=760\text{ m}$ και $HRR=50\text{ MW}$

Τέλος, στο **Σχήμα 60** παρουσιάζεται η ορατότητα του αέρα κατά μήκος της σήραγγας σε τρεις διαφορετικές χρονικές στιγμές $t=200\text{ sec}$, $t=210\text{ sec}$ και $t=300\text{ sec}$. Από το συγκεκριμένο διάγραμμα αξίζει να παρατηρηθεί ότι για $t=200\text{ sec}$, που η ταχύτητα είναι μικρότερη από την κρίσιμη ταχύτητα, παρατηρείται έντονα το φαινόμενο της αντιστροφής ανάντη της φωτιάς. Για $t=210\text{ sec}$, που η ταχύτητα

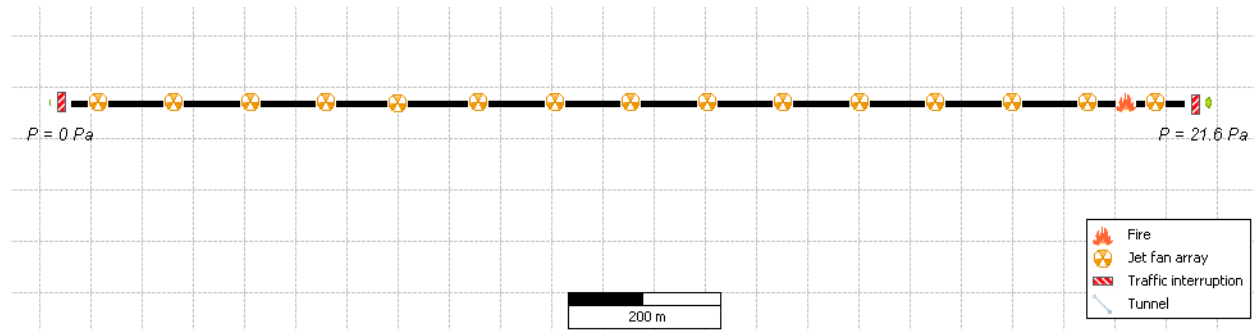
είναι σχεδόν ίση με την κρίσιμη ταχύτητα, το φαινόμενο της αντιστροφής σταδιακά μειώνεται και τέλος, για $t=300$ sec, το φαινόμενο της αντιστροφής έχει μηδενιστεί στην ανάντη πλευρά της σήραγγας.



Σχήμα 60. Ορατότητα κατά μήκος της σήραγγας για $t=200$ sec, $t=210$ sec, $t=300$ sec και $HRR=50$ MW

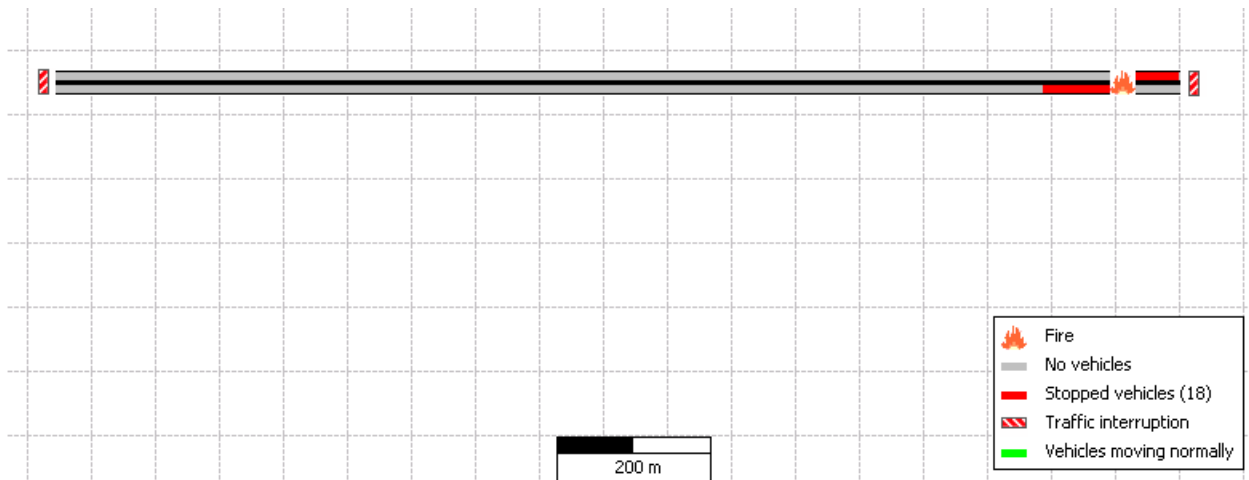
7.2.2 Φωτιά 100 m από το στόμιο εξόδου

Στο Σχήμα 61 παρουσιάζεται η προσομοίωση της σήραγγας, με την φωτιά να ξεσπάει 100 m πριν από το στόμιο εξόδου.



Σχήμα 61. Προσομοίωση φωτιάς κοντά στο στόμιο εξόδου

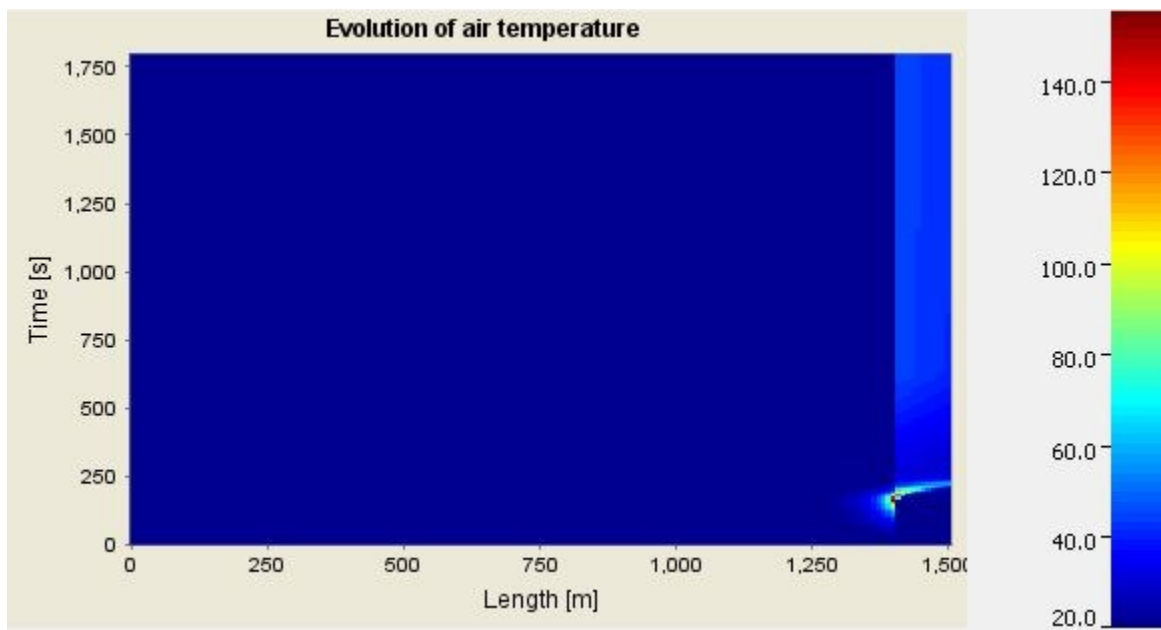
Ανεξάρτητα από το μέγεθος της θερμικής ισχύος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 62, δημιουργείται μια κυκλοφοριακή συμφόρηση, εντός της σήραγγας, με συνολικά 18 οχήματα.



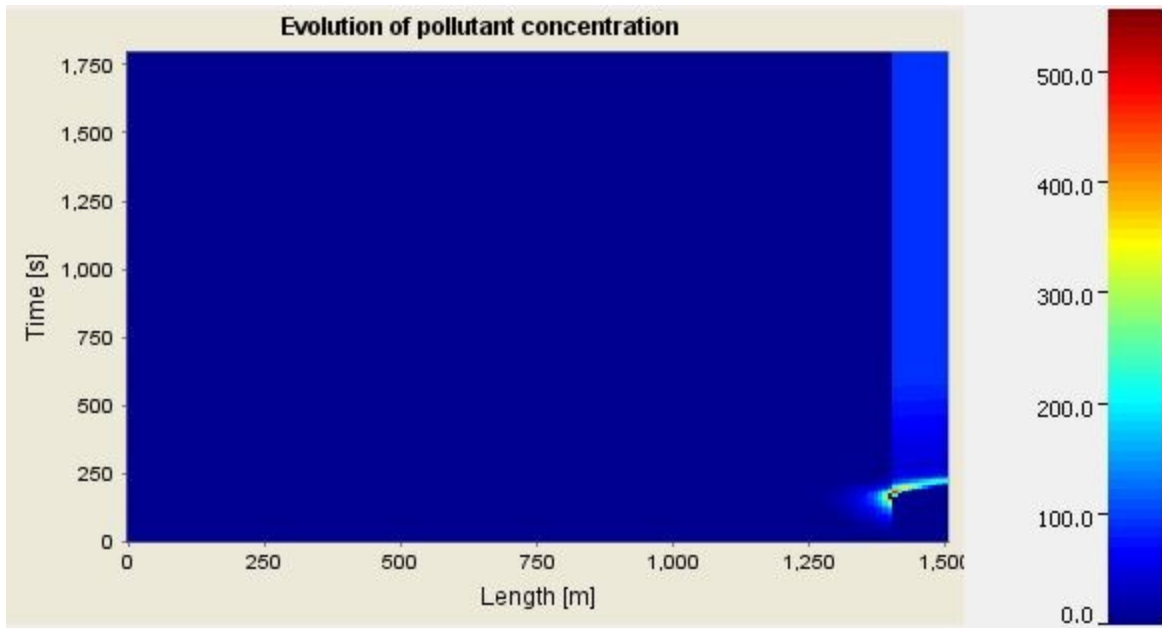
Σχήμα 62. Κυκλοφοριακή συμφόρηση με πυρκαγιά κοντά στο στόμιο εξόδου

7.2.2.1 Θερμική ισχύς 15 MW

Όπως και στην περίπτωση όπου η φωτιά ξέσπασε στο μέσον της σήραγγας, και εδώ αναλύθηκε το σενάριο όπου δύο μεγάλα επιβατικά οχήματα και ένα μικρό, συγκρούονται και προκαλείται φωτιά, με θερμική ισχύ 15 MW. Στο **Σχήμα 63** παρουσιάζεται η κατανομή της θερμοκρασίας του αέρα και στο **Σχήμα 64** παρουσιάζεται η κατανομή των ρυπογόνων ουσιών. Από το **Σχήμα 64** παρατηρείται το φαινόμενο της αναστροφής του καπνού, 130 m ανάντη της φωτιάς.

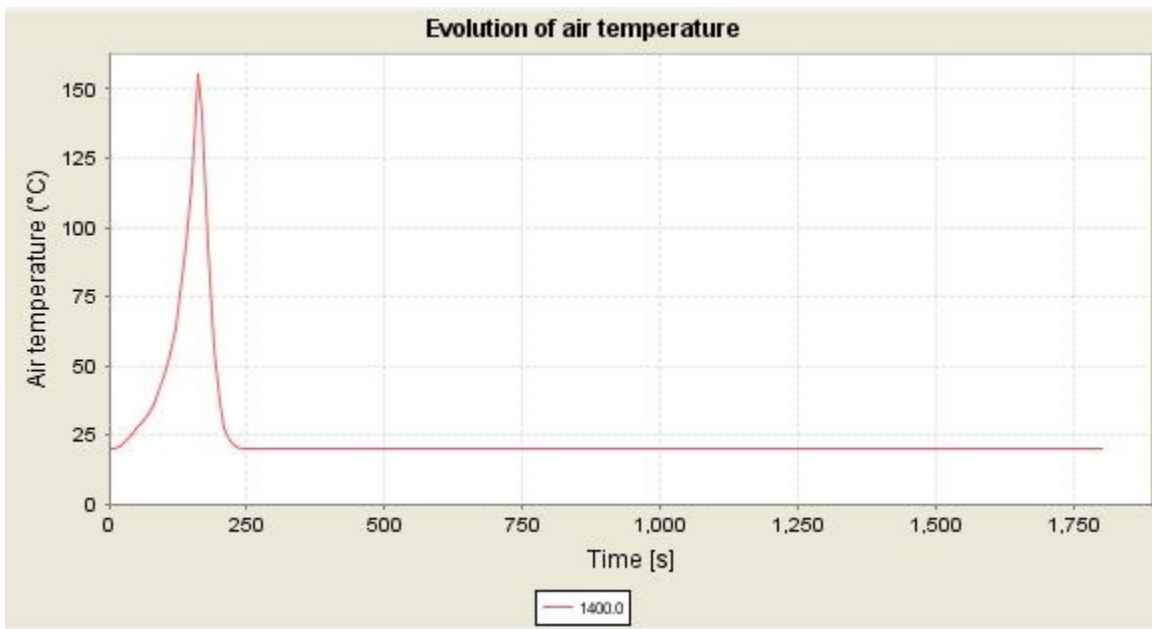


Σχήμα 63. Κατανομή της θερμοκρασίας του αέρα για φωτιά κοντά στο στόμιο εξόδου με HRR=15 MW



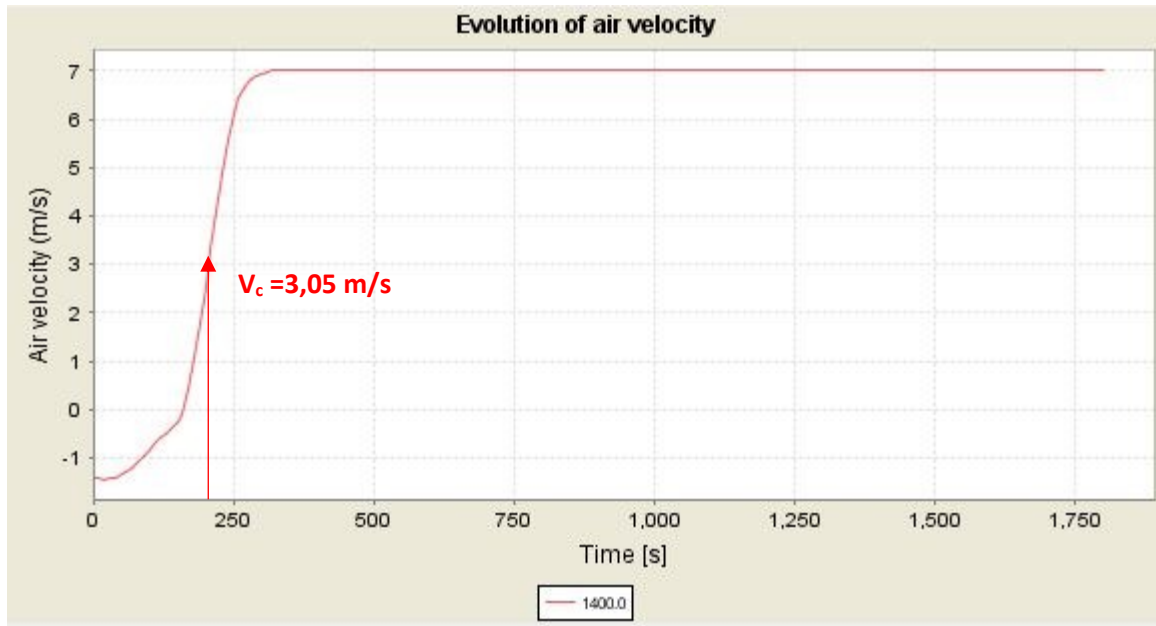
Σχήμα 64. Κατανομή των ρυπογόνων ουσιών για φωτιά κοντά στο στόμιο εξόδου με $HRR=15\text{ MW}$

Στο Σχήμα 65 παρουσιάζεται η θερμοκρασία του αέρα κατά τη διάρκεια της ανάλυσης για το σημείο όπου έχει ξεσπάσει η πυρκαγιά, $x=1400\text{ m}$. Η μέγιστη θερμοκρασία είναι στους $155\text{ }^\circ\text{C}$ στα 160 sec, και δεν επηρεάζεται η λειτουργία των γειτονικών ανεμιστήρων.



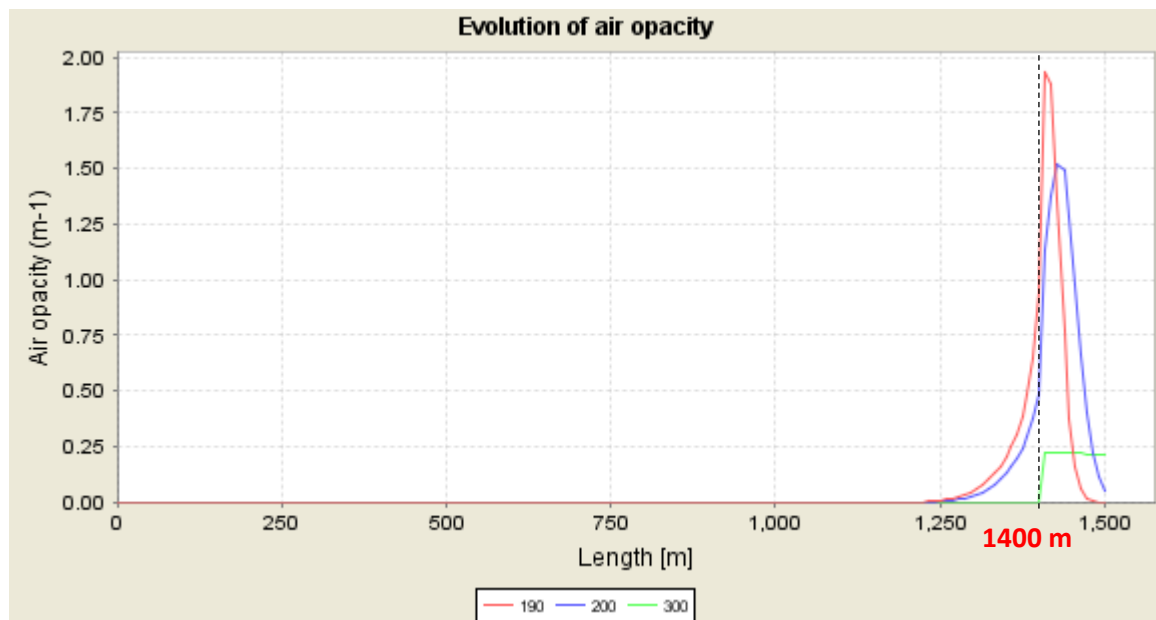
Σχήμα 65. Θερμοκρασία εντός της σήραγγας για $x=1400\text{ m}$ και $HRR=15\text{ MW}$

Στο Σχήμα 66 παρουσιάζεται η ταχύτητα του αέρα στη θέση της πυρκαγιάς συναρτήσει του χρόνου της ανάλυσης. Η κρίσιμη ταχύτητα, $V_c=3,05\text{ m/s}$, εντοπίζεται κοντά στα 200 sec, και αυξάνεται μέχρι τα 7 m/s.



Σχήμα 66. Ταχύτητα αέρα εντός της σήραγγας για $x=1400 \text{ m}$ και $HRR=15 \text{ MW}$

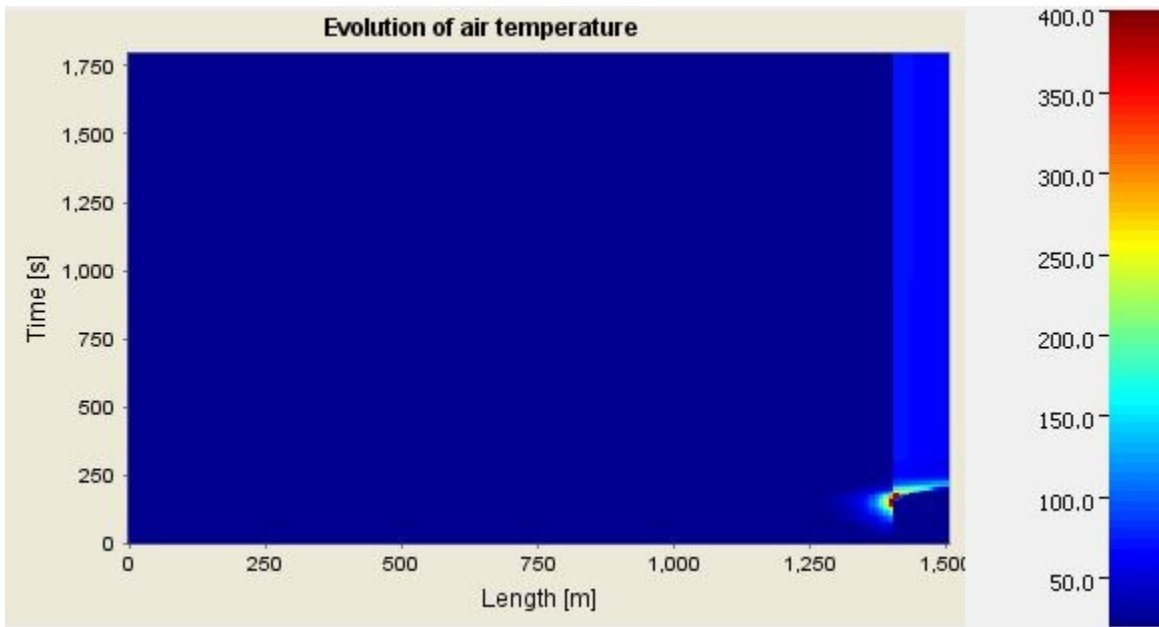
Τέλος, στο **Σχήμα 67** παρουσιάζεται η ορατότητα του αέρα κατά μήκος της σήραγγας σε τρεις διαφορετικές χρονικές στιγμές $t=190 \text{ sec}$, $t=200 \text{ sec}$ και $t=300 \text{ sec}$. Από το συγκεκριμένο διάγραμμα αξίζει να παρατηρηθεί ότι στα 1400 m και για $t=190 \text{ sec}$, που η ταχύτητα είναι μικρότερη από την κρίσιμη ταχύτητα (βλ. **Σχήμα 66**), παρατηρείται έντονα το φαινόμενο της αντιστροφής του καπνού ανάντη της φωτιά. Για $t=200 \text{ sec}$, που η ταχύτητα είναι σχεδόν ίση με την κρίσιμη ταχύτητα, το φαινόμενο της αντιστροφής μειώνεται στην ανάντη πλευρά και αυξάνεται προς τα κατάντη. Τέλος, για $t=300 \text{ sec}$ που η ταχύτητα είναι 7 m/s , το φαινόμενο της αντιστροφής έχει μηδενιστεί.



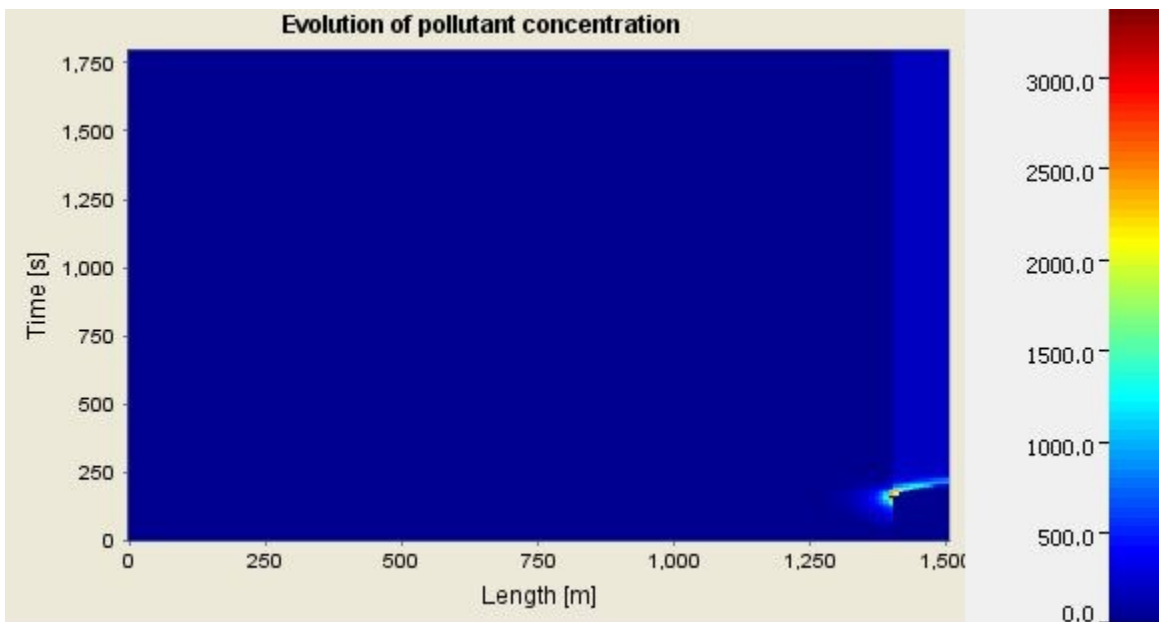
Σχήμα 67. Ορατότητα κατά μήκος της σήραγγας για $t=190 \text{ sec}$, $t=200 \text{ sec}$, $t=300 \text{ sec}$ και $HRR=15 \text{ MW}$

7.2.2.2 Θερμική ισχύς 30 MW

Η επόμενη ανάλυση αφορά στο ρυθμό απελευθέρωσης της θερμότητας 30 MW. Στο **Σχήμα 68** παρουσιάζεται η κατανομή της θερμοκρασίας του αέρα και στο **Σχήμα 69** παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις των ρυπογόνων ουσιών. Παρατηρείται ότι μέχρι να ενεργοποιηθούν οι ανεμιστήρες και φτάσουν τη μέγιστη απόδοσή τους (κοντά στα 240 sec), δημιουργείται το φαινόμενο της αναστροφής του καπνού 110 m ανάντη της φωτιάς. Εφόσον οι ανεμιστήρες φτάσουν τη μέγιστη απόδοσή τους, δεν παρατηρείται το φαινόμενο της αντιστροφής.

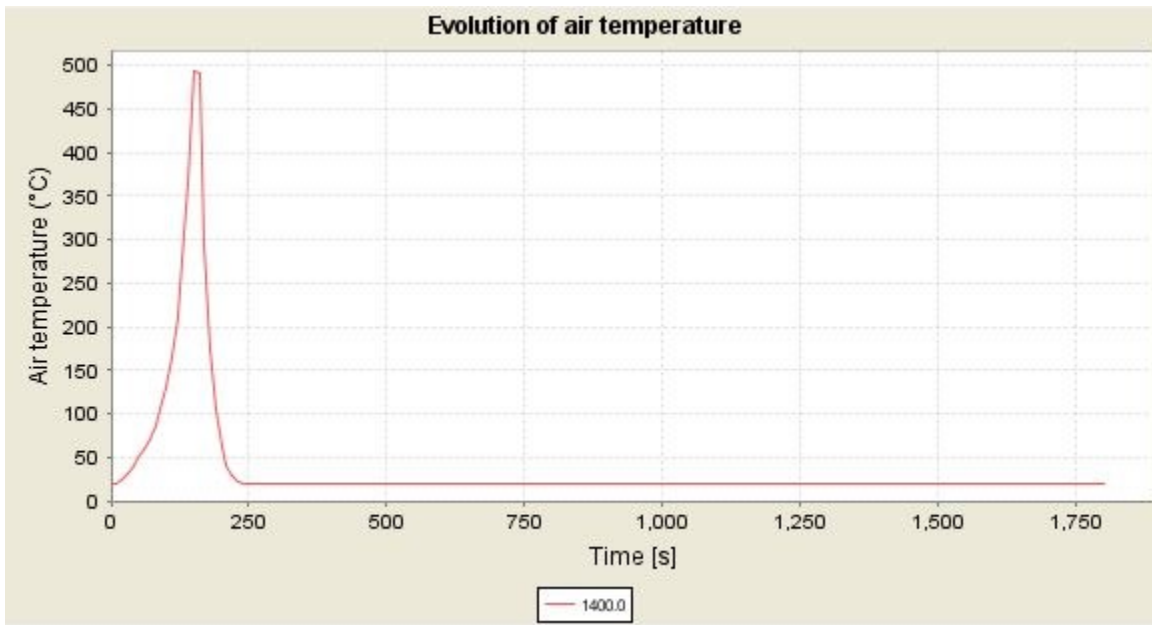


Σχήμα 68. Κατανομή της θερμοκρασίας του αέρα για φωτιά κοντά στο στόμιο εισόδου με HRR=30 MW



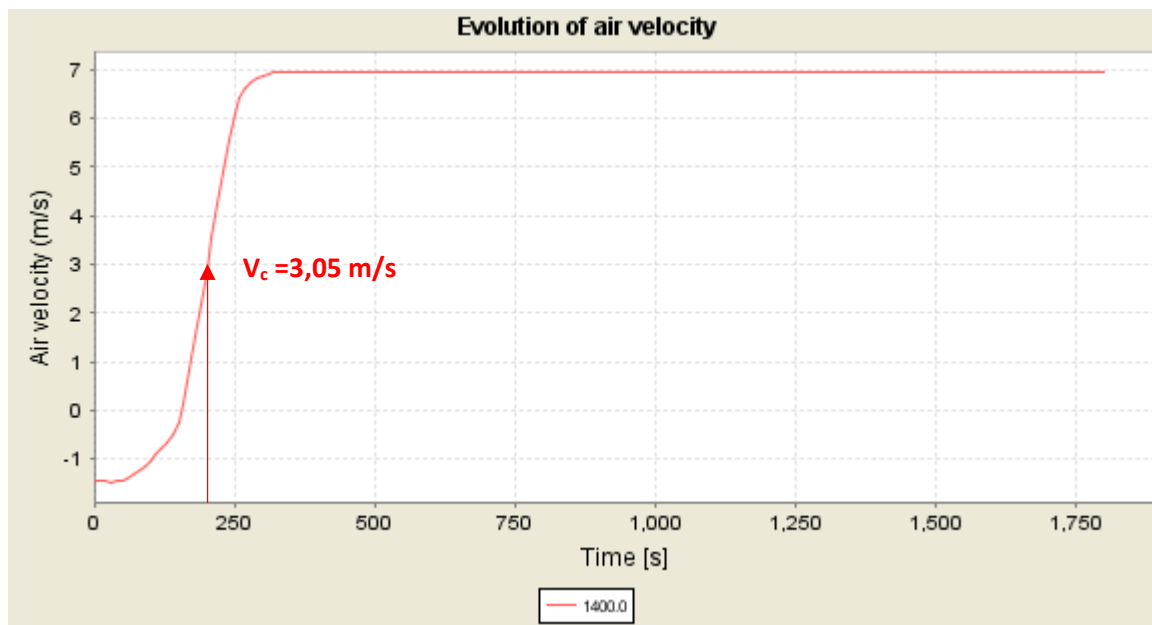
Σχήμα 69. Κατανομή των ρυπογόνων ουσιών για φωτιά κοντά στο στόμιο εισόδου με HRR=30 MW

Στο **Σχήμα 70** παρουσιάζεται η θερμοκρασία του αέρα κατά τη διάρκεια της ανάλυσης για το σημείο όπου έχει ξεσπάσει η πυρκαγιά, δηλαδή για $x=1400$ m. Παρατηρείται ότι η μέγιστη θερμοκρασία φτάνει τους 492 °C στα 160 sec, και δεν επηρεάζεται η λειτουργία των γειτονικών ανεμιστήρων.



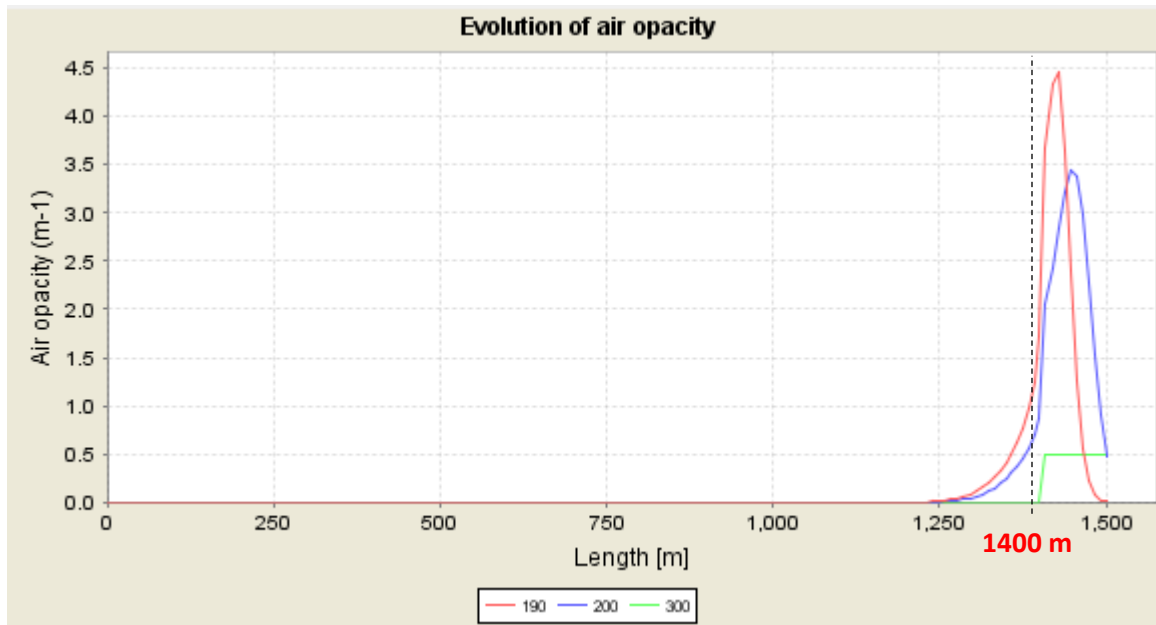
Σχήμα 70. Θερμοκρασία εντός της σήραγγας για $x=1400$ m και $HRR=30$ MW

Στο **Σχήμα 71** παρουσιάζεται η ταχύτητα του αέρα στη θέση της πυρκαγιάς, δηλαδή για $x=1400$ m, συναρτήσει του χρόνου της ανάλυσης. Η κρίσιμη ταχύτητα, $V_c=3,05$ m/s, εντοπίζεται κοντά στα 200 sec, και αυξάνεται μέχρι τα 7 m/s.



Σχήμα 71. Ταχύτητα αέρα εντός της σήραγγας για $x=1400$ m και $HRR=30$ MW

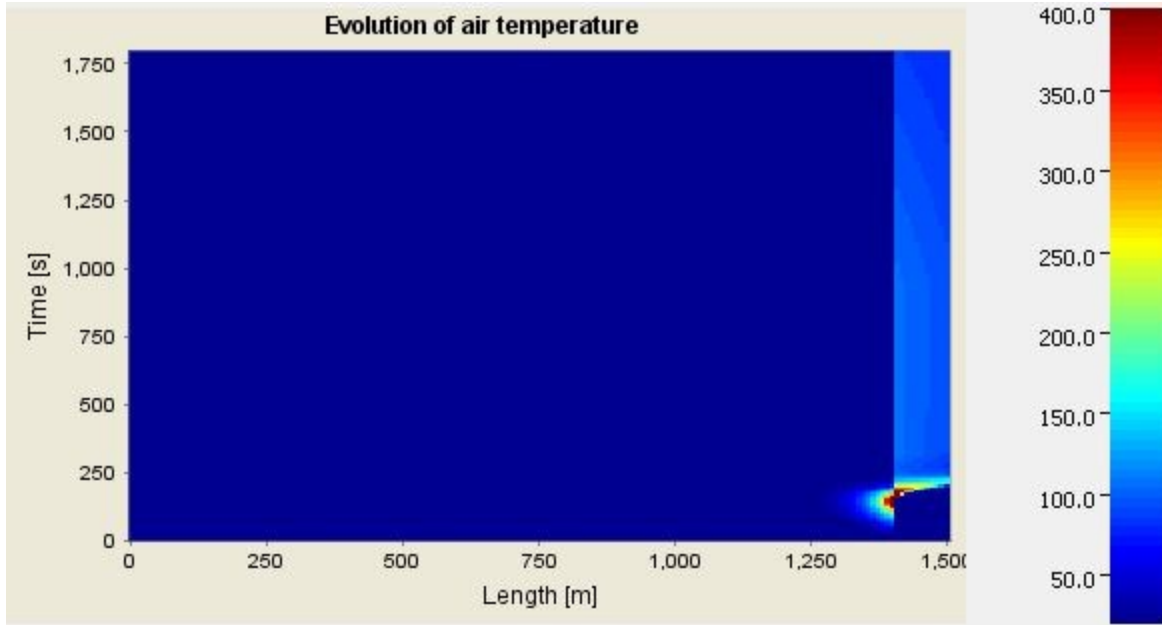
Αντίστοιχα με προηγουμένως, στο **Σχήμα 72** παρουσιάζεται η ορατότητα του αέρα κατά μήκος της σήραγγας σε τρεις διαφορετικές χρονικές στιγμές $t=190$ sec, $t=200$ sec και $t=300$ sec. Από το συγκεκριμένο διάγραμμα αξίζει να παρατηρηθεί ότι στα 1400 m και για $t=190$ sec, που η ταχύτητα είναι μικρότερη από την κρίσιμη ταχύτητα (βλ. **Σχήμα 71**), παρατηρείται το φαινόμενο της αντιστροφής ανάντη της φωτιάς. Για $t=200$ sec, που η ταχύτητα είναι σχεδόν ίση με την κρίσιμη ταχύτητα, το φαινόμενο της αντιστροφής μειώνεται και τέλος, για $t=300$ sec, το φαινόμενο της αντιστροφής έχει μηδενιστεί.



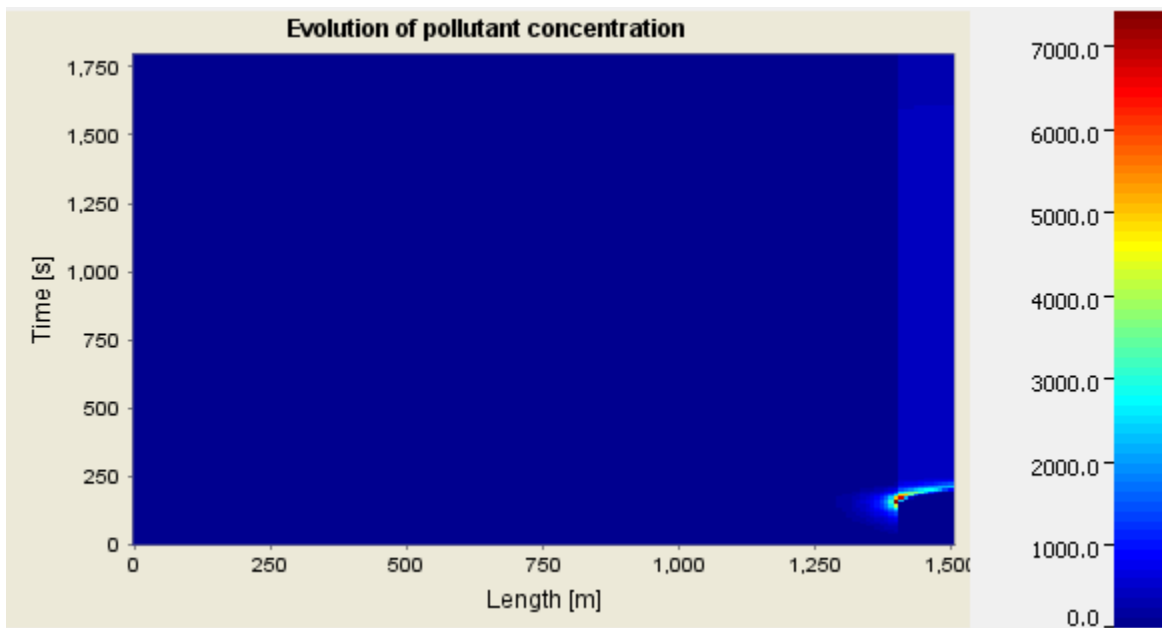
Σχήμα 72. Ορατότητα κατά μήκος της σήραγγας για $t=190$ sec, $t=200$ sec, $t=300$ sec και $HRR=30$ MW

7.2.2.3 Θερμική Ισχύς 50 MW

Η τελευταία ανάλυση αφορά στο ρυθμό απελευθέρωσης της θερμότητας των 50 MW. Στο **Σχήμα 73** παρουσιάζεται η κατανομή της θερμοκρασίας του αέρα και στο **Σχήμα 74** παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις των ρυπογόνων ουσιών. Παρατηρείται ότι μέχρι να ενεργοποιηθούν οι ανεμιστήρες, και να φτάσουν τη μέγιστη απόδοσή τους (κοντά στα 240 sec), δημιουργείται το φαινόμενο της αντιστροφής, 110 m ανάντη της φωτιάς.

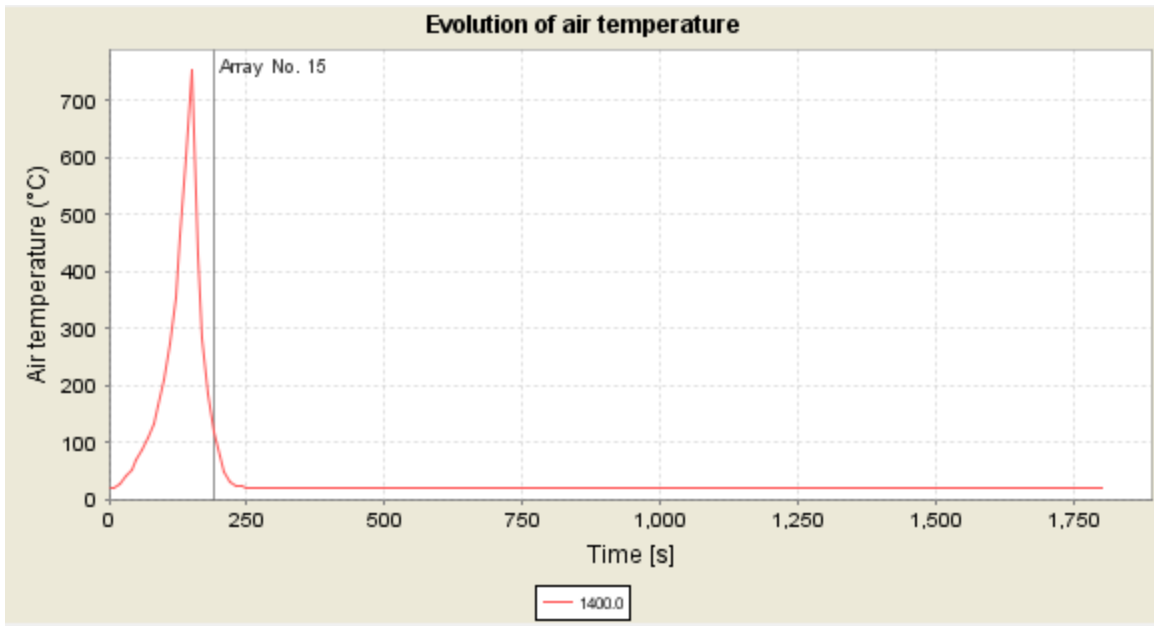


Σχήμα 73. Κατανομή της θερμοκρασίας του αέρα για φωτιά κοντά στο στόμιο εξόδου με HRR=50 MW



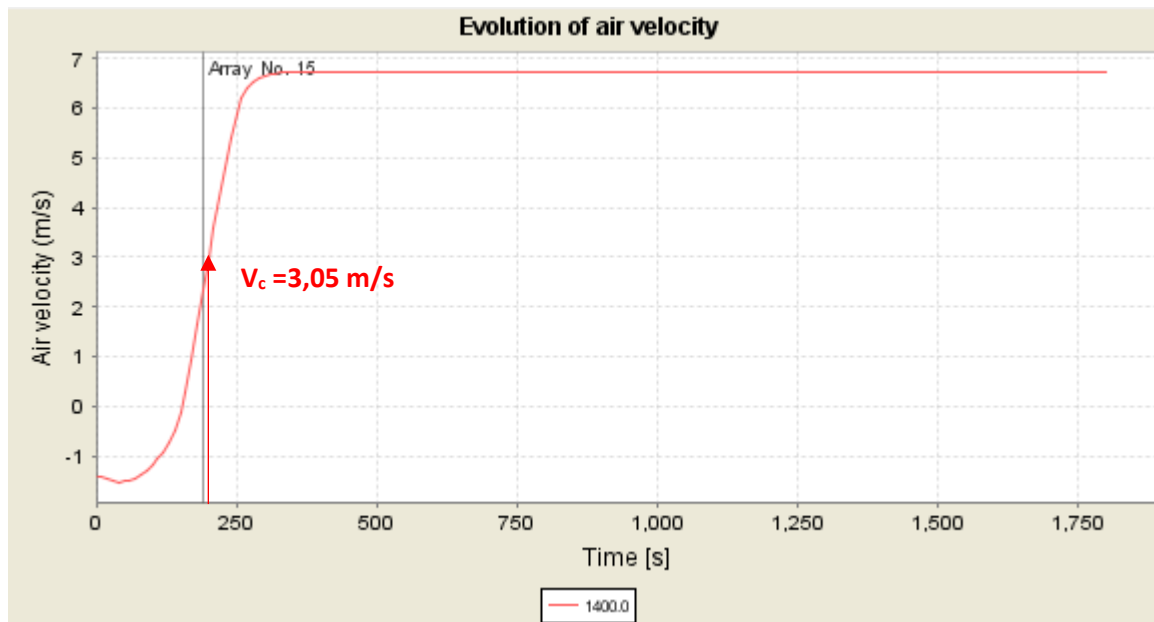
Σχήμα 74. Κατανομή των ρυπογόνων ουσιών για φωτιά κοντά στο στόμιο εξόδου με HRR=50 MW

Στο Σχήμα 75 παρουσιάζεται η θερμοκρασία του αέρα κατά τη διάρκεια της ανάλυσης για το σημείο όπου έχει ξεσπάσει η πυρκαγιά, δηλαδή για $x=1400$ m. Παρατηρείται ότι η μέγιστη θερμοκρασία φτάνει τους 753°C στα 150 sec, και επηρεάζεται η λειτουργία του γειτονικού ανεμιστήρα No. 15.



Σχήμα 75. Θερμοκρασία εντός της σήραγγας για $x=1400$ m και $HRR=50$ MW

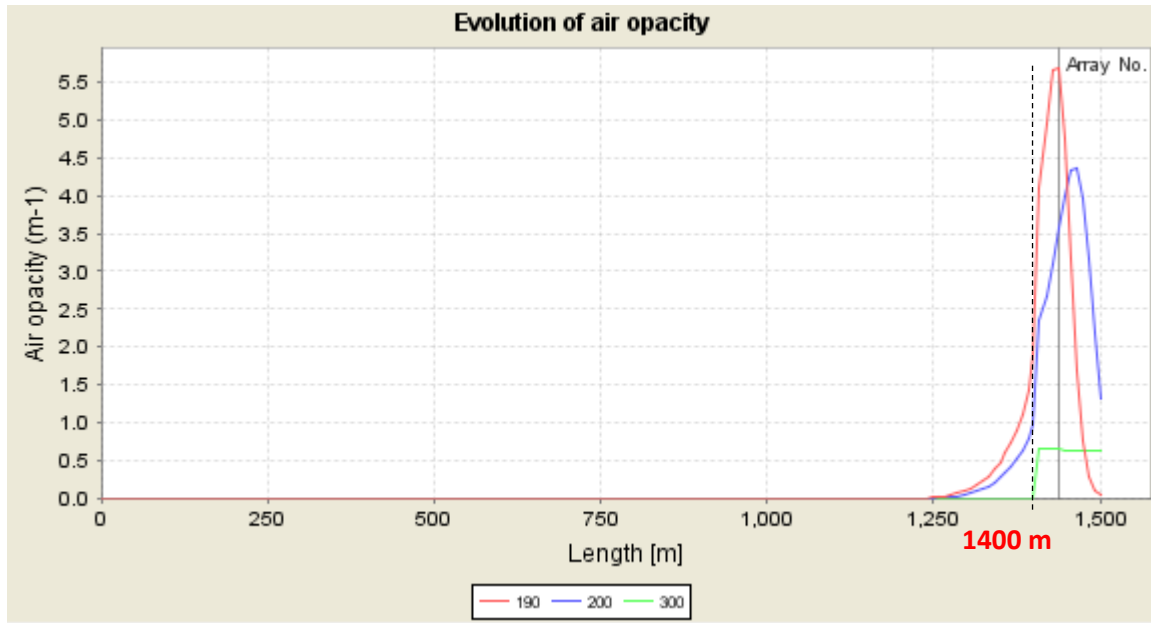
Ύστερα, στο **Σχήμα 76** παρουσιάζεται η ταχύτητα του αέρα στη θέση της πυρκαγιάς συναρτήσει του χρόνου της ανάλυσης. Η κρίσιμη ταχύτητα, $V_c=3,05$ m/s, εντοπίζεται κοντά στα 200 sec, και αυξάνεται μέχρι τα 6,7 m/s.



Σχήμα 76. Ταχύτητα αέρα εντός της σήραγγας για $x=1400$ m και $HRR=50$ MW

Τέλος, στο **Σχήμα 77** παρουσιάζεται η ορατότητα του αέρα κατά μήκος της σήραγγας σε τρεις διαφορετικές χρονικές στιγμές $t=190$ sec, $t=200$ sec και $t=300$ sec. Από το συγκεκριμένο διάγραμμα αξίζει να παρατηρηθεί ότι στα 1400 m και για $t=190$ sec, που η ταχύτητα είναι μικρότερη από την κρίσιμη, φαίνεται έντονα το φαινόμενο της αναστροφής του καπνού ανάντη της φωτιά. Για $t=200$ sec, που η

ταχύτητα είναι σχεδόν ίση με την κρίσιμη ταχύτητα, το φαινόμενο της αντιστροφής μειώνεται και τέλος για $t=300$ sec, το φαινόμενο της αντιστροφής έχει μηδενιστεί.



Σχήμα 77. Ορατότητα κατά μήκος της σήραγγας για $t=190$ sec, $t=200$ sec, $t=300$ sec και $HRR=50$ MW

8 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

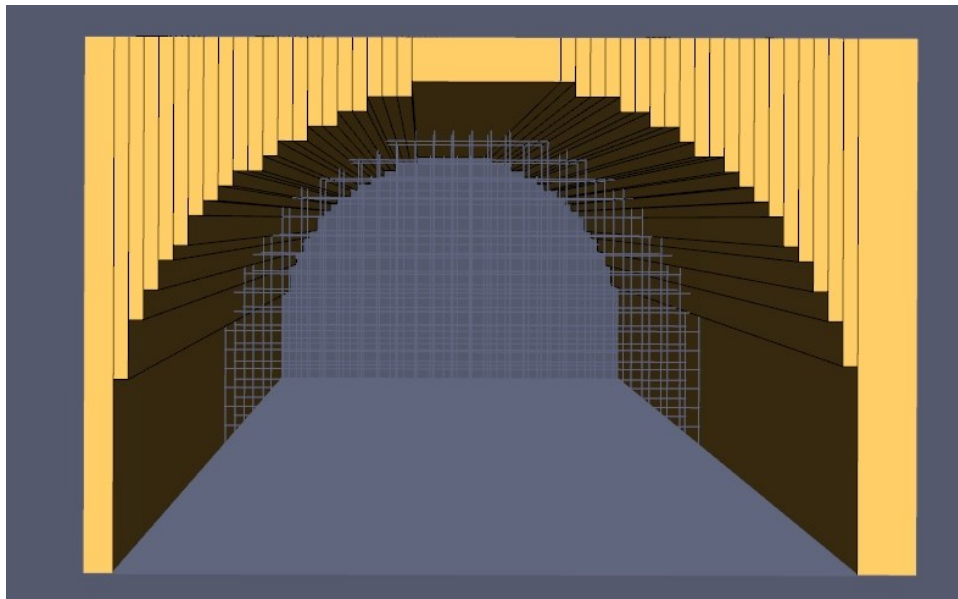
Σε συνέχεια της μονοδιάστατης ανάλυσης, στο παρόν κεφάλαιο, αναλύονται τα αντίστοιχα σενάρια, σε τρεις διαστάσεις, μέσω του λογισμικού Pyrosim. Το λογισμικό Pyrosim είναι ένα γραφικό περιβάλλον το οποίο υποστηρίζει και τρέχει ο κώδικας FDS (Fire Dynamic Simulation) του NIST (National Institute of Standards and Technology). Ο κώδικας FDS είναι ένα μοντέλο υπολογιστικής δυναμικής ρευστών (Computational Fluid Dynamics) και χρησιμοποιείται στη βιομηχανία των αεροσκαφών για περισσότερο από 30 χρόνια. Γίνεται η χρήση των πεπερασμένων στοιχείων για την επίλυση προβλημάτων σε τρεις διαστάσεις σύμφωνα με τις αριθμητικές εξισώσεις ροής Navier-Stokes, και χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της εξάπλωσης του καπνού και για τον διαθέσιμο χρόνο ασφαλούς εξόδου κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς. Επίσης, παρουσιάζει αποτελέσματα σχετικά με τις συγκεντρώσεις καπνού και άλλων παραγόντων καύσης, καθώς επίσης και τα προφίλ θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς [13].

8.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ

Αρχικώς θα παρουσιαστεί η προσομοίωση της σήραγγας και έπειτα οι κάρναβοι προσομοίωσης.

8.1.1 Σήραγγα

Η διατομή της σήραγγας έχει πεταλοειδές σχήμα, όμως στη παρούσα ανάλυση η προσομοίωση έγινε πολυγωνική, χάριν απλοποίησης (βλ. **Σχήμα 78**).



Σχήμα 78. Διατομή σήραγγας μέσω Pyrosim

Για την προσομοίωση της κλίσης της σήραγγας, διατηρήθηκε ο οριζόντιος κάρναβος και εφαρμόστηκε θετική κλίση 2% προς τα κατόντη, μέσω της στροφής του διανύσματος της επιτάχυνσης της βαρύτητας. Δηλαδή, στις αναλύσεις αυτές, η επιτάχυνση της βαρύτητας έχει συνιστώσες:

$$g_x = 9,81 \times \sin a$$

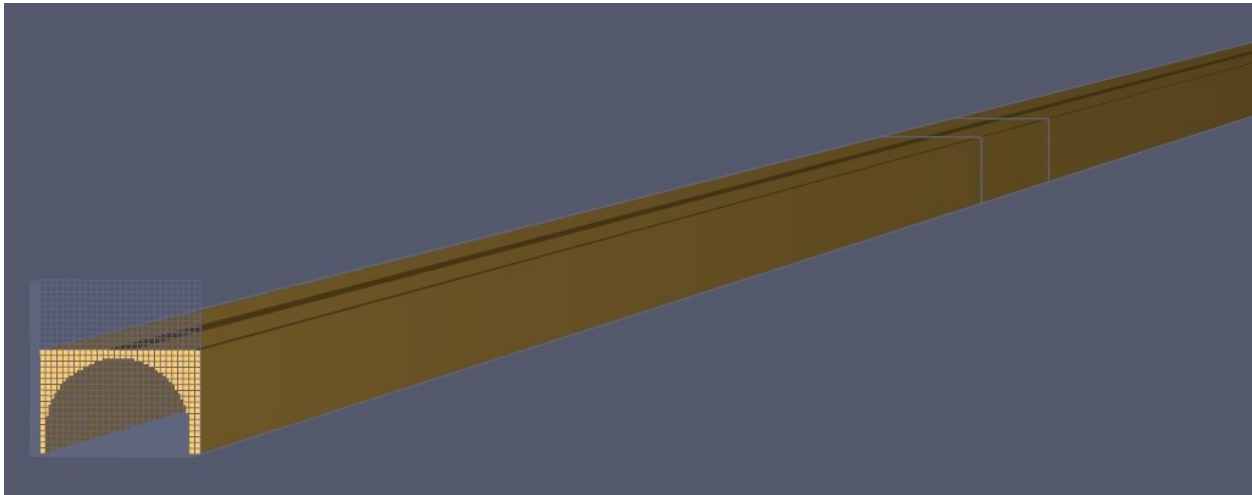
$$g_z = 9,81 \times \cos a$$

όπου $a=1,1458^\circ$

8.1.2 Κάνναβος

Η διαμόρφωση του καννάβου έγινε έτσι ώστε τα στοιχεία, 50 m εκατέρωθεν της φωτιάς, να έχουν διαστάσεις 0,4 m x 0,4 m και μετά το πέρασ των 50 m, το πλάτος των στοιχείων να αυξηθούν σε 0,4 m x 0,8 m.

Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 79**, στα στόμια της σήραγγας προσομοιώθηκε ένας κάνναβος, σε μορφή καμινάδας, με ύψος περίπου 5 m πάνω από τη στέψη της σήραγγας, για τον έλεγχο της ορθής εξαγωγής του καπνού από τη σήραγγα.



Σχήμα 79. Λεπτομέρεια καννάβου στο στόμιο εισόδου της σήραγγας

8.2 ΣΗΜΑΝΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

Πριν ξεσπάει η πυρκαγιά, και ενεργοποιηθεί ο έκτακτος μηχανικός αερισμός, η ταχύτητα του αέρα εντός της σήραγγας, λόγω μετεωρολογικών συνθηκών, πρέπει να έχει προσομοιωθεί, καθώς επηρεάζει την κατεύθυνση του καπνού και την τελική απαιτούμενη ώση των ανεμιστήρων. Σύμφωνα με τις οδηγίες του FDS [48], σε ορισμένες περιπτώσεις, είναι προτιμότερο για την προσομοίωση του αέρα, να εισάγεται μια διαφορά πίεσης στα στόμια της σήραγγας, και όχι μια ταχύτητα. Συνεπώς, για τον εντοπισμό αυτής της χρονικής στιγμής, πραγματοποιήθηκε η ανάλυση με υπολογισμένη τη δυναμική πίεση και εφαρμοσμένη στο στόμιο εξόδου, με θετικό πρόσημο. Το θετικό πρόσημο ερμηνεύει τη δημιουργία μιας αντίστασης στην κίνηση του αέρα, την οποία πρέπει να υπερνικήσουν οι ανεμιστήρες.

$$\Delta P = \frac{1}{2} \times \rho \times u^2 = 21,6 \text{ Pa}$$

Όπου,

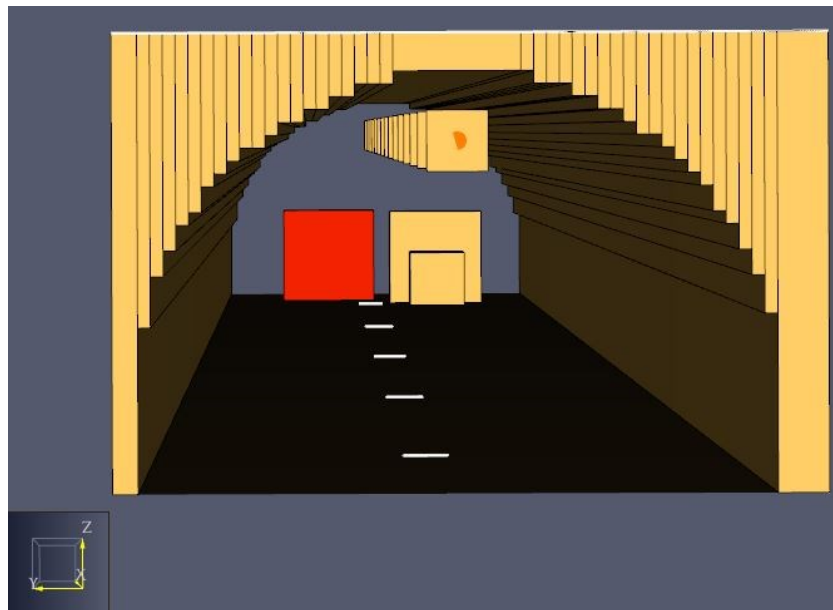
ρ : 1,29 kg/m³ για T=0 °C

u: ταχύτητα ανέμου m/s (λαμβάνεται 6 m/s)

Στον **Πίνακα 30** παρουσιάζονται τα δεδομένα προσομοίωσης των ανεμιστήρων και στο **Σχήμα 80** η όψη της σήραγγας, με τους ανεμιστήρες αναρτημένους στην οροφή και τα σταθμευμένα οχήματα στο βάθος. Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα της κυκλοφοριακής συμφόρησης από την μονοδιάστατη ανάλυση, προσομοιώθηκαν, στην τρισδιάστατη ανάλυση, σε κάθε λωρίδα, με ποσοστό 20% βαρέα και 80% επιβατικά οχήματα. Η απόσταση μεταξύ των επιβατικών οχημάτων είναι 6 m και των φορτηγών οχημάτων 2 m. Η συνολική κυκλοφοριακή συμφόρηση εκατέρωθεν της φωτιάς είναι 77 m.

Πίνακας 30. Χαρακτηριστικά ανεμιστήρων

Number of jet fans	Volume flow rate (m ³ /s)	Diameter (m)
15	40,4	1,2



Σχήμα 80. Όψη σήραγγας

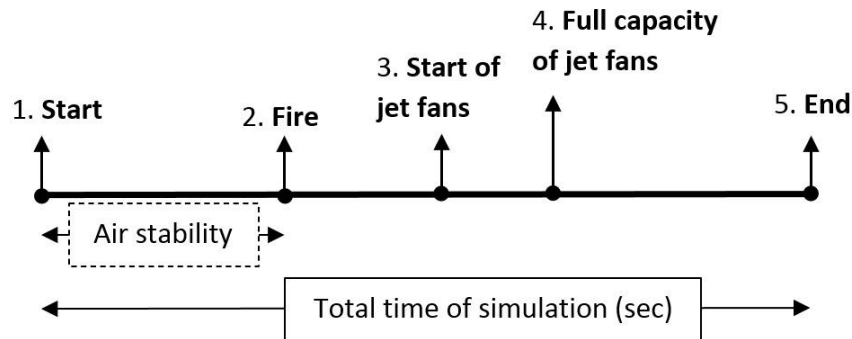
Στον **Πίνακα 31** παρουσιάζονται οι διαστάσεις προσομοίωσης των οχημάτων, επιβατικών και βαρέων.

Πίνακας 31. Διαστάσεις επιβατικών και φορτηγών οχημάτων

Vehicle dimensions			
	Height (m)	Width (m)	Length (m)
Cars	1,7	1,75	3
HGVs	3	3	8

Για την προσομοίωση της φωτιάς, ορίζεται ο ρυθμός απελευθέρωσης της θερμότητας, καθώς είναι η απλούστερη και πιο συχνά χρησιμοποιούμενη προσέγγιση [49]. Συγκεκριμένα, ορίζεται μια αντίδραση (reaction), η οποία εκτός από το καύσιμο, εκφράζει και την θερμότητα της καύσης. Εφόσον οριστεί η αντίδραση και ο ρυθμός απελευθέρωσης της θερμότητας HRR, το καύσιμο απελευθερώνεται από την επιφάνεια, αναμιγνύεται με τον αέρα και αντιδρά, σχηματίζοντας τα προϊόντα καύσης. Στην παρούσα ανάλυση έχει επιλεγεί η αντίδραση “POLYURETHANE_GM27”, καθώς κατά την καύση του παράγεται πυκνότερος καπνός.

Στο **Σχήμα 81** παρουσιάζεται το χρονοδιάγραμμα των εκάστοτε προσομοιώσεων. Αρχικά, για την σταθεροποίηση της ταχύτητας του αέρα (air stability) λόγω ανεμοπιέσεως, χρειάζονται περίπου 300 sec. Επόμενο στάδιο είναι η έναρξη της φωτιάς, όπου θεωρείται ότι χρειάζονται περίπου 2,5 min (150 sec) για να γίνει αντιληπτή από τις κάμερες CCTV και να ενεργοποιηθούν οι ανεμιστήρες, και άλλα 1,5 min (85 sec) περίπου για να φτάσουν τη μέγιστη απόδοσή τους. Σημειώνεται ότι, πριν από κάθε σενάριο, εντοπίζονται οι περιοχές όπου η θερμοκρασία ξεπερνάει τους 250 ° C και απενεργοποιούνται οι ανεμιστήρες, για να είμαστε υπέρ της ασφαλείας. Κατά την προσομοίωση, εξετάζεται η χωρική και χρονική μεταβολή του καπνού και της θερμοκρασίας κατά μήκος της σήραγγας. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων που παρουσιάζονται παρακάτω, είναι από το μέσον της σήραγγας.

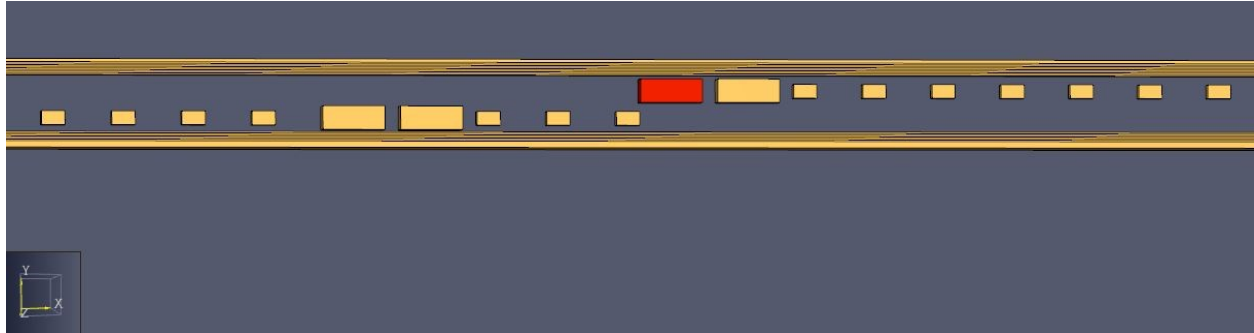


Σχήμα 81. Βήματα τρισδιάστατης ανάλυσης

8.3 ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

8.3.1 Φωτιά στο μέσον

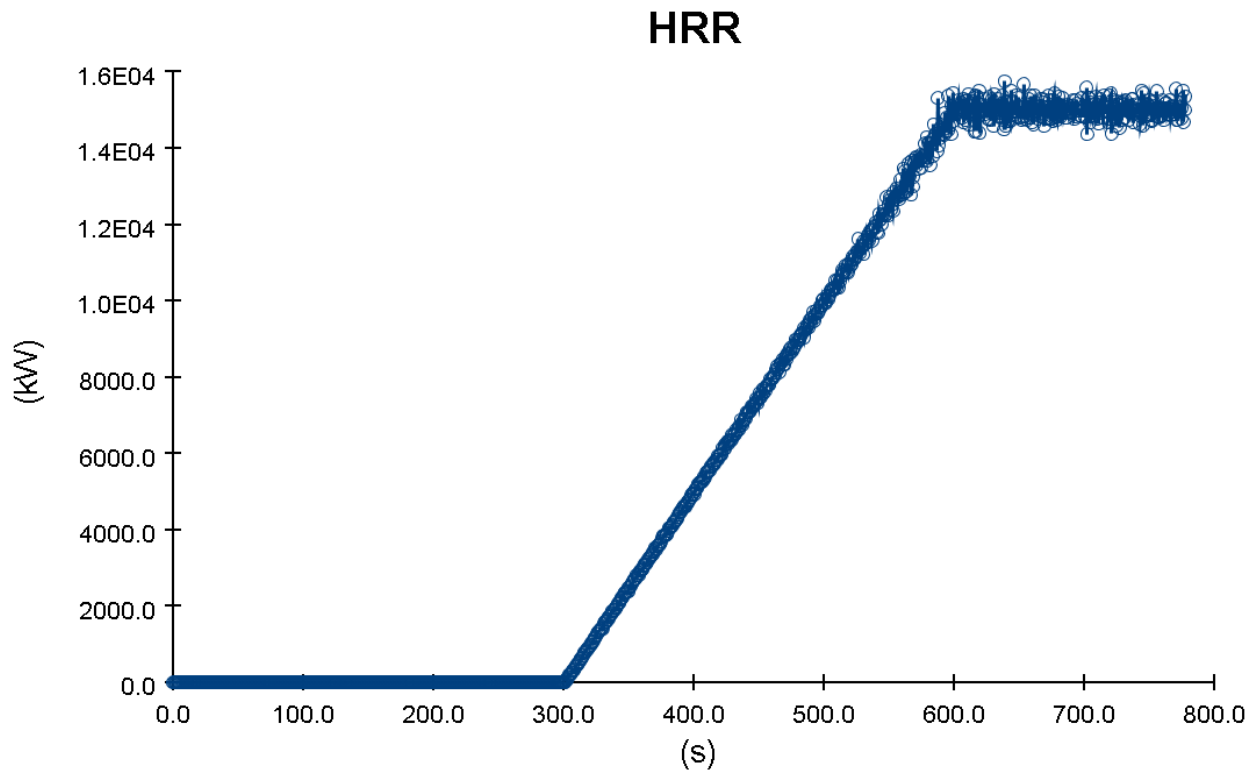
Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 82**, αρχικά αναλύεται η περίπτωση που η φωτιά ξεσπάει στο μέσον της σήραγγας (κόκκινο χρώμα) με την αντίστοιχη κυκλοφοριακή συμφόρηση.



Σχήμα 82. Κάτοψη σήραγγας με φωτιά στο μέσον της

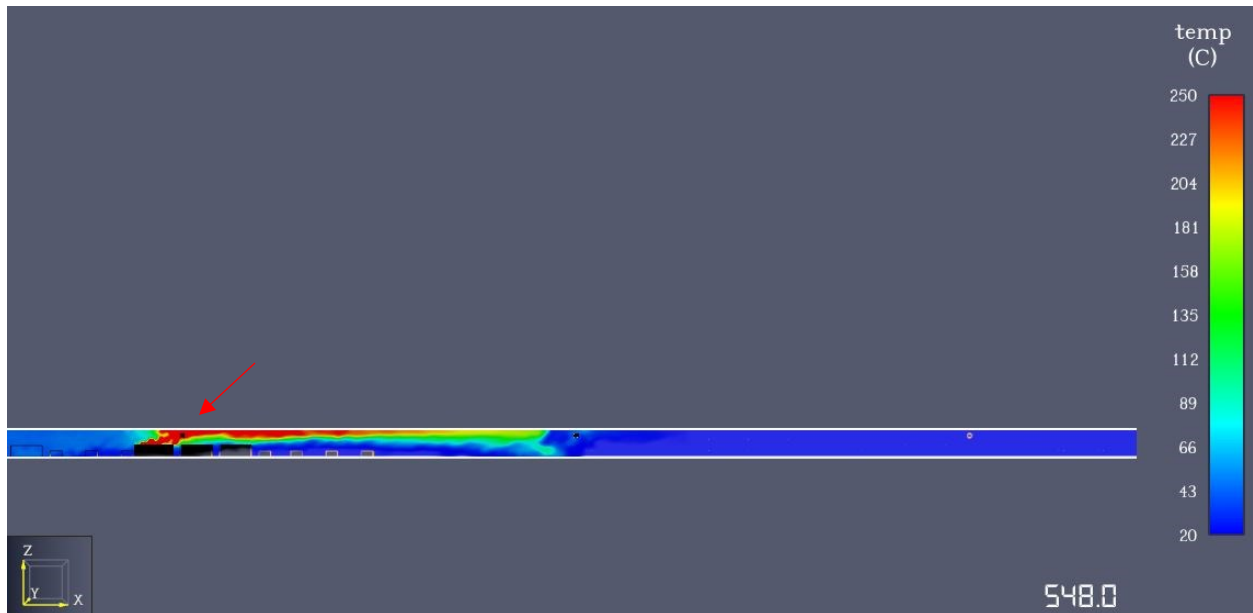
8.3.1.1 Θερμική Ισχύς 15 MW

Το πρώτο σενάριο που αναλύεται είναι η περίπτωση σύγκρουσης δύο μεγάλων επιβατικών οχημάτων και ενός μικρού, με θερμική ισχύ τα 15 MW. Στο Σχήμα 83 φαίνεται η ανάπτυξη του ρυθμού απελευθέρωσης της θερμότητας συναρτήσει του χρόνου της ανάλυσης. Παρατηρείται ότι η καμπύλη είναι γραμμική και φτάνει το μέγιστο της κοντά στα $t=600$ sec.



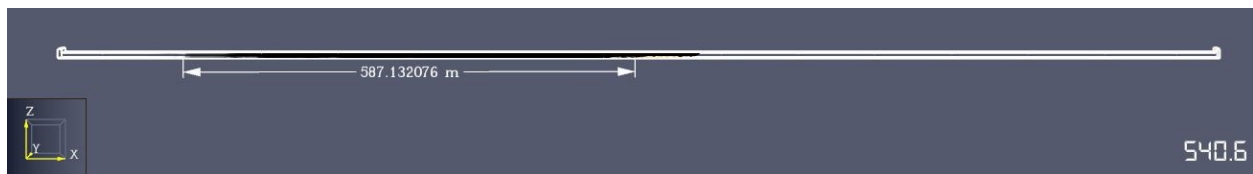
Σχήμα 83. Ρυθμός απελευθέρωσης της θερμότητας, $HRR=15$ MW, συναρτήσει του χρόνου της ανάλυσης

Η μέγιστη θερμοκρασία που αναπτύχθηκε στη σήραγγα είναι οι 450 °C, και όπως φαίνεται στο Σχήμα 84, βγήκε εκτός λειτουργίας ο ανεμιστήρας No. 8. Υπενθυμίζεται ότι για να είναι η ανάλυση υπέρ της ασφαλείας, ο ανεμιστήρας απενεργοποιήθηκε από την αρχή της ανάλυσης.

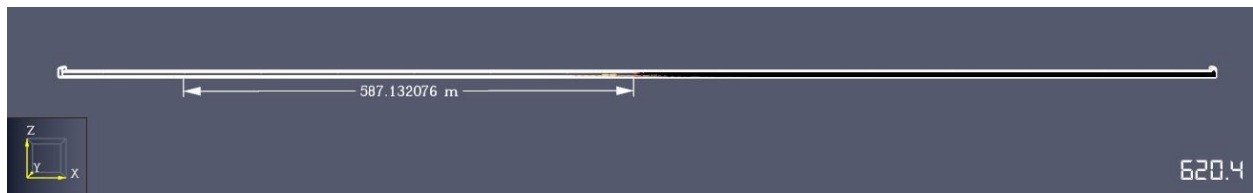


Σχήμα 84. Επιρροή της θερμοκρασίας στον ανεμιστήρα Νο. 8, για φωτιά στο μέσον και HRR=15 MW

Στο **Σχήμα 85** παρουσιάζεται το μήκος της αναστροφής του καπνού, και παρατηρείται ότι φτάνει τα 587 m ανάντη της φωτιάς, 4 min (240 sec) αφού ξέσπασε η φωτιά. Το φαινόμενο της αναστροφής του καπνού μηδενίζεται μετά από περίπου 2,7 min (165 sec) ενεργοποίησης των ανεμιστήρων (βλ. **Σχήμα 86**).

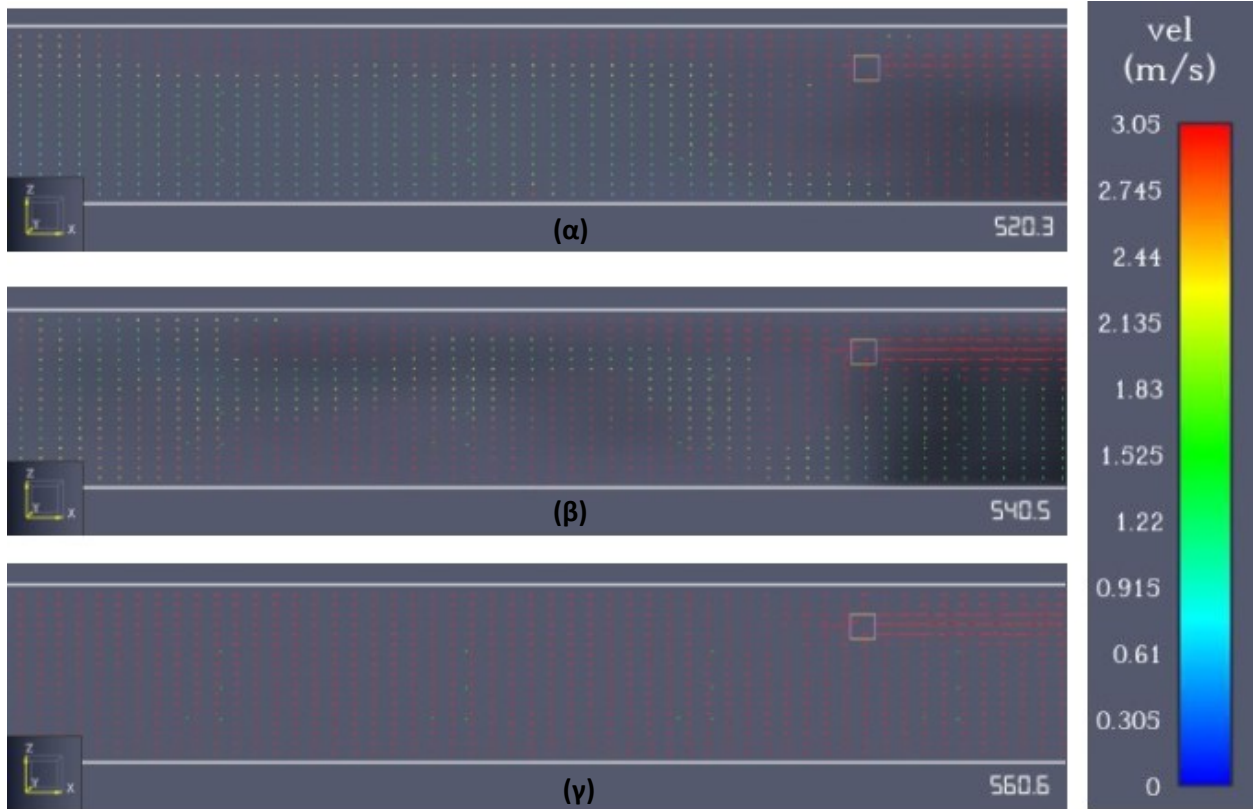


Σχήμα 85. Φαινόμενο αναστροφής του καπνού για φωτιά στο μέσον της σήραγγας με HRR=15 MW



Σχήμα 86. Μηδενισμός του φαινομένου της αναστροφής του καπνού για φωτιά στο μέσον της σήραγγας με HRR=15 MW

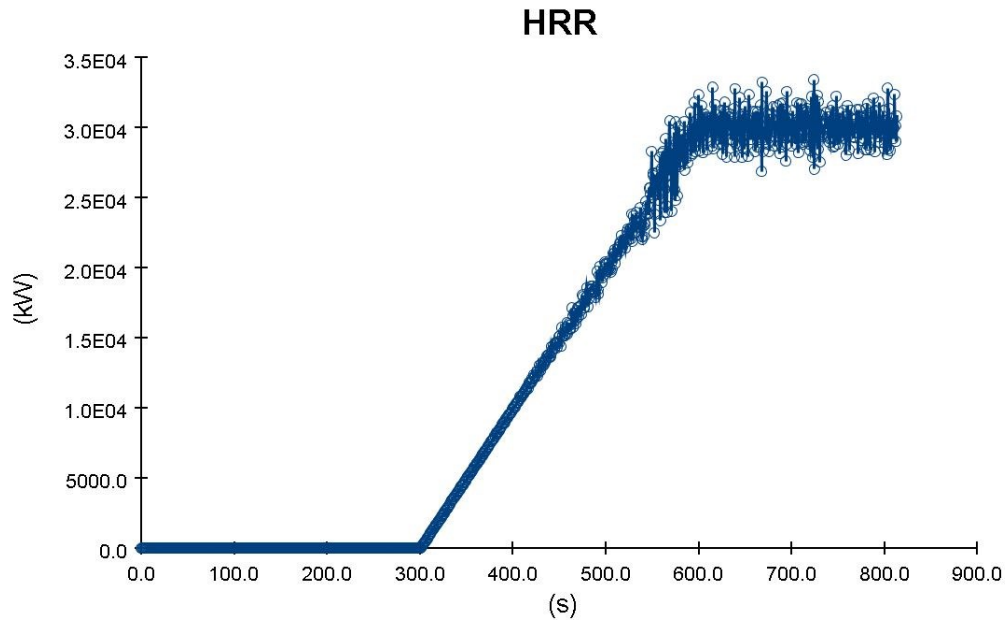
Στο **Σχήμα 87** παρουσιάζεται το διάγραμμα της ταχύτητας, σε τρία διαφορετικά στιγμιότυπα, για το σημείο που το backlayering φτάνει το μέγιστο μήκος του. Παρατηρείται αρχικά ότι ο καπνός συνεχίζει να εξελίσσεται προς τα ανάντη καθώς η ταχύτητα του αέρα είναι μικρότερη από την κρίσιμη ταχύτητα, 3,05 m/s (βλ. **Σχήμα 87(α)**). Το backlayering σταματάει να εξελίσσεται κοντά στα 540 sec, όταν η ταχύτητα του αέρα γίνει ίση και μεγαλύτερη από την κρίσιμη ταχύτητα (βλ. **Σχήμα 87(β)**) και υποχωρεί όταν αυτή η ταχύτητα κατακλίσει το μεγαλύτερο ποσοστό της διατομής της σήραγγας (βλ. **Σχήμα 87(γ)**).



Σχήμα 87. Διανύσματα ταχύτητας για: (α) 520 sec (β) 540 sec (γ) 560 sec στο σημείο που μεγιστοποιείται το backlayering για $HR=15$ MW και φωτιά στο μέσον της σήραγγας

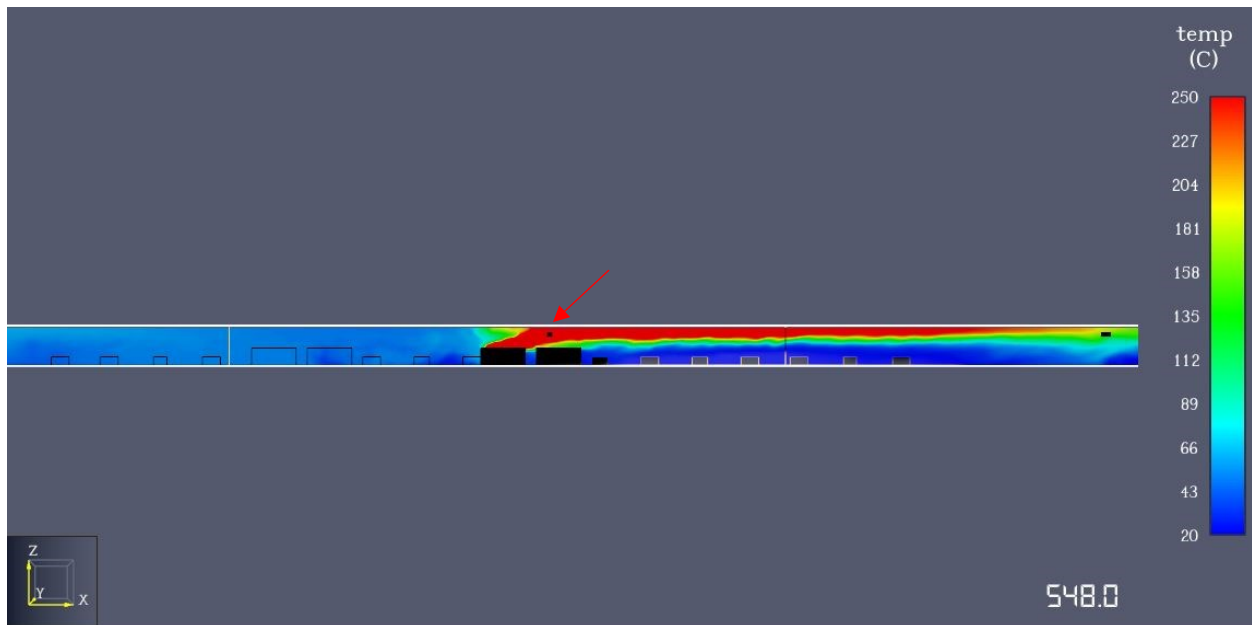
8.3.1.2 Θερμική Ισχύς 30 MW

Ύστερα, αναλύεται το σενάριο που στη φωτιά εμπλέκεται ένα λεωφορείο ή ένα κενό βαρέως τύπου φορτηγό, με θερμική ισχύ 30 MW. Στο **Σχήμα 88** παρουσιάζεται η ανάπτυξη του ρυθμού απελευθέρωσης της θερμότητας συναρτήσει του χρόνου της ανάλυσης. Η καμπύλη είναι γραμμική και φτάνει το μέγιστο της περίπου στα $t=600$ sec.



Σχήμα 88. Ρυθμός απελευθέρωσης της θερμότητας, $HRR=30\text{ MW}$, συναρτήσει του χρόνου της ανάλυσης

Η μέγιστη θερμοκρασία που αναπτύχθηκε στη σήραγγα είναι κοντά στους $550\text{ }^{\circ}\text{C}$, και από το μέγεθος της βγήκε εκτός λειτουργίας ο ανεμιστήρας No. 8, καθώς η θερμοκρασία ξεπέρασε την ονομαστική αντοχή τους, $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ (βλ. Σχήμα 89).

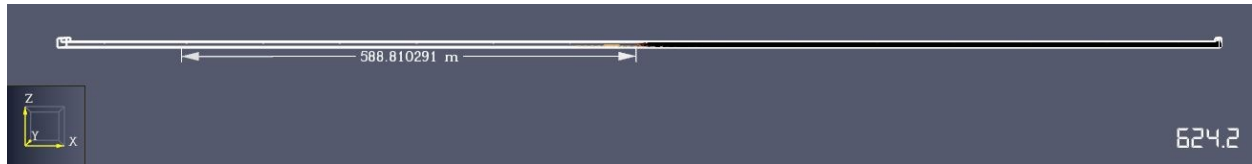


Σχήμα 89. Επιρροή της θερμοκρασίας στον ανεμιστήρα No. 8, για φωτιά στο μέσον και $HRR=30\text{ MW}$

Στο Σχήμα 90 παρουσιάζεται το μήκος της αναστροφής του καπνού, και παρατηρείται ότι φτάνει τα 589 m ανάντη της φωτιάς, 4 min (240 sec) αφότου ξέσπασε η φωτιά. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 91, το φαινόμενο της αναστροφής μηδενίζεται μετά από 2,8 min (169 sec) ενεργοποίησης των ανεμιστήρων.

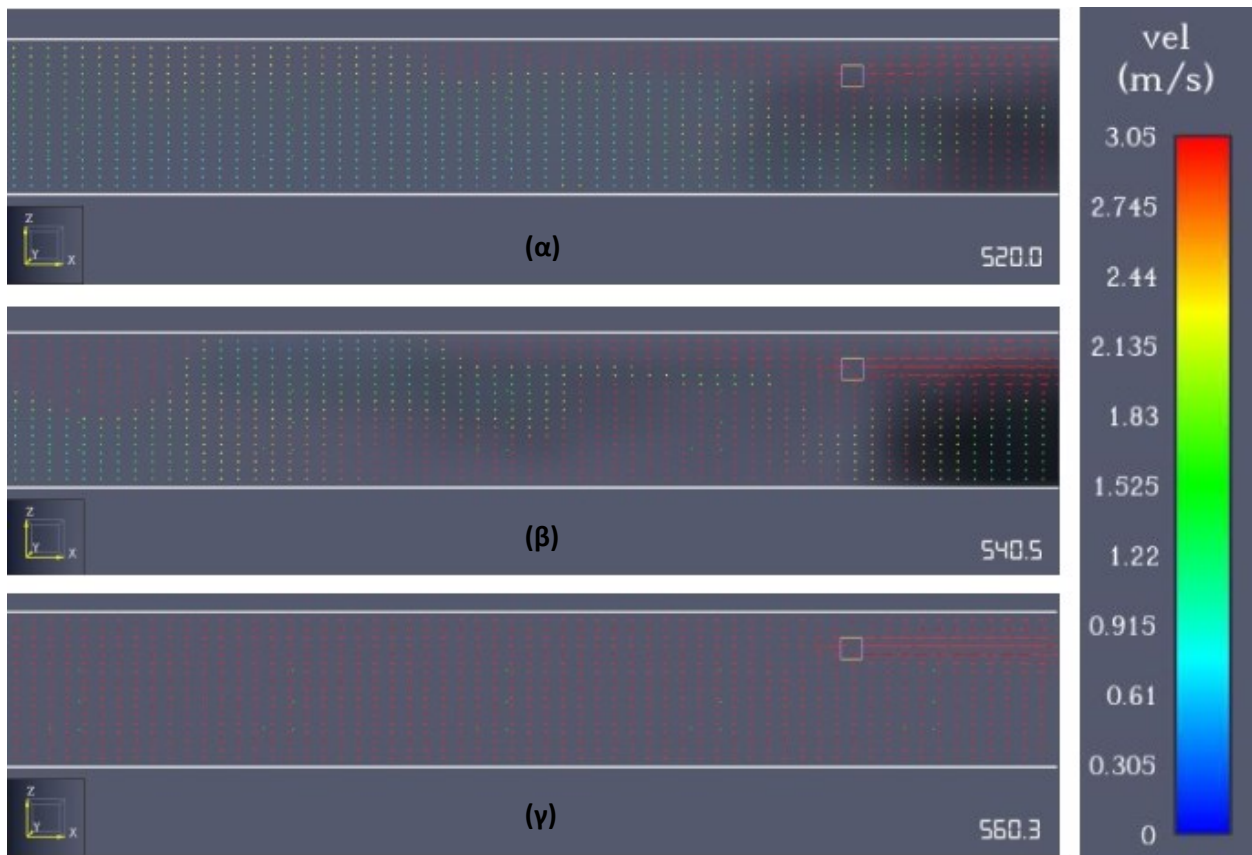


Σχήμα 90. Φαινόμενο αναστροφής του καπνού για φωτιά στο μέσον της σήραγγας με $HRR=30\text{ MW}$



Σχήμα 91. Μηδενισμός του φαινομένου της αναστροφής του καπνού για φωτιά στο μέσον της σήραγγας με $HRR=30\text{ MW}$

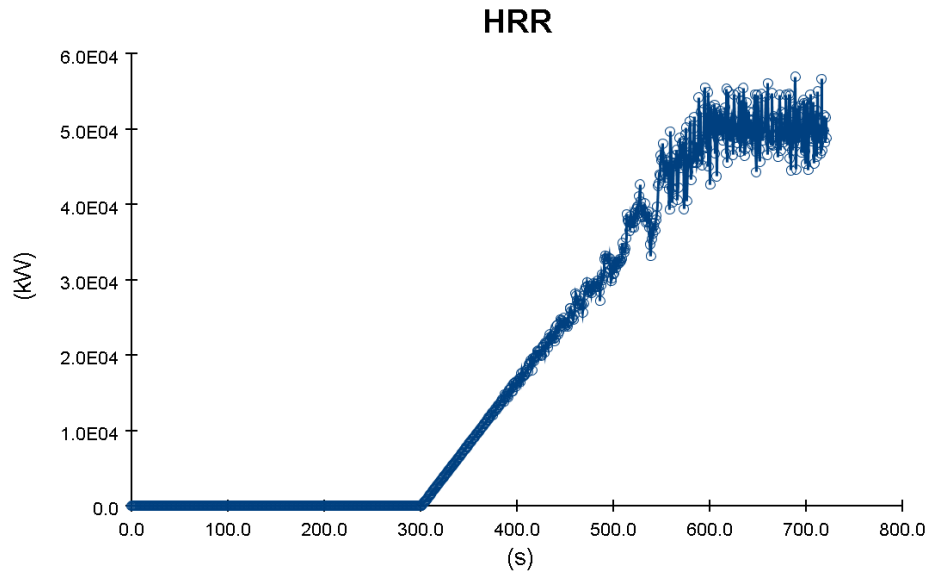
Το **Σχήμα 92** παρουσιάζει το διάνυσμα της ταχύτητας, σε τρία διαφορετικά στιγμιότυπα, για το σημείο όπου το backlayering φτάνει το μέγιστο μήκος του, κατά μήκος της σήραγγας. Ο καπνός συνεχίζει να εξελίσσεται προς τα ανάντη καθώς η ταχύτητα του αέρα είναι μικρότερη από την κρίσιμη ταχύτητα, $3,05\text{ m/s}$ (βλ. **Σχήμα 92(α)**). Το backlayering σταματάει να εξελίσσεται κοντά στα 540 sec , όταν η ταχύτητα του αέρα γίνει ίση και μεγαλύτερη από την κρίσιμη ταχύτητα (βλ. **Σχήμα 92(β)**), και υποχωρεί όταν αυτή η ταχύτητα κατακλίσει το μεγαλύτερο ποσοστό της διατομής της σήραγγας (βλ. **Σχήμα 92(γ)**).



Σχήμα 92. Διανύσματα ταχύτητας για: (α) 520 sec (β) 540 sec (γ) 560 sec στο σημείο που μεγιστοποιείται το backlayering για $HR=30\text{ MW}$ και φωτιά στο μέσον της σήραγγας

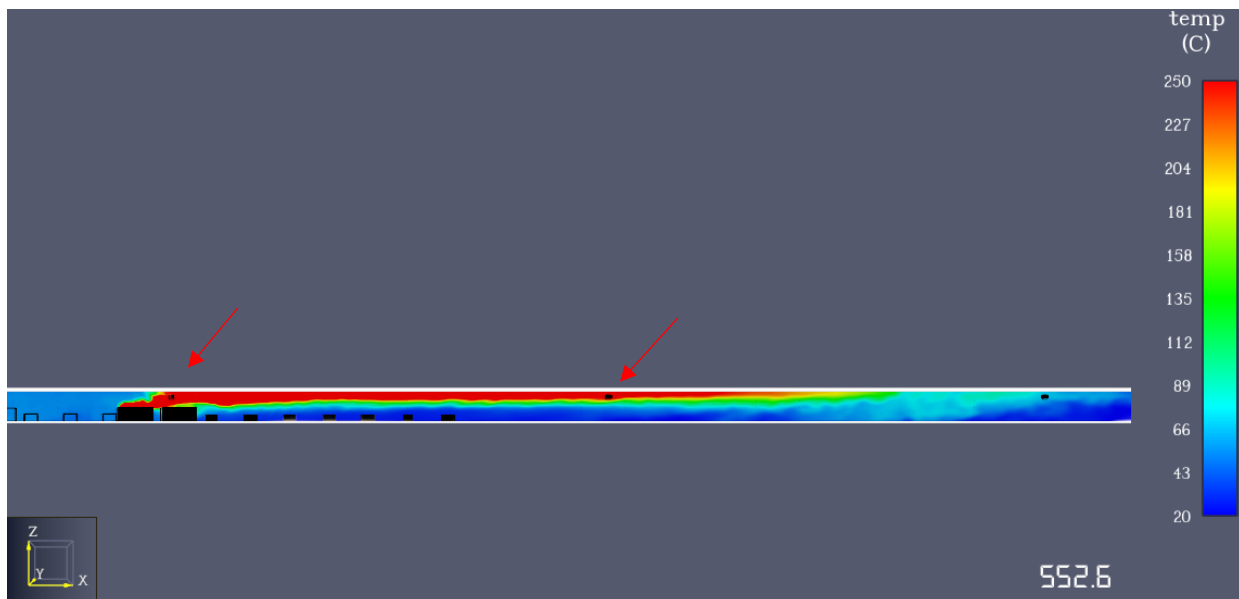
8.3.1.3 Θερμική Ισχύς 50 MW

Στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο αναλύεται το σενάριο όπου στη φωτιά εμπλέκεται ένα φορτηγό με καύσιμο φορτίο και θερμική ισχύ τα 50 MW. Στο **Σχήμα 93** παρουσιάζεται η ανάπτυξη του ρυθμού απελευθέρωσης της θερμότητας συναρτήσει του χρόνου της ανάλυσης. Παρατηρείται ότι η καμπύλη είναι γραμμική και φτάνει το μέγιστο της περίπου στα $t=600$ sec.



Σχήμα 93. Ρυθμός απελευθέρωσης της θερμότητας, $HRR=50$ MW, συναρτήσει του χρόνου της ανάλυσης

Η μέγιστη θερμοκρασία που αναπτύχθηκε στη σήραγγα είναι κοντά στους 850 °C, και από το μέγεθός της, βγήκαν εκτός λειτουργίας οι ανεμιστήρες No. 8 και No. 9, καθώς η θερμοκρασία ξεπέρασε την ονομαστική τους αντοχή, 250 °C (βλ. **Σχήμα 94**).

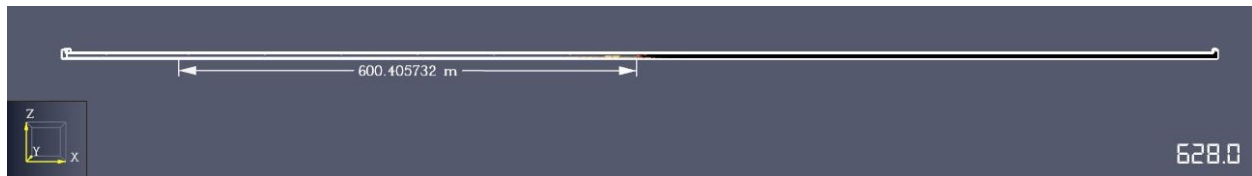


Σχήμα 94. Επιρροή της θερμοκρασίας στους ανεμιστήρες No. 8 και No. 9, για φωτιά στο μέσον και $HRR=50$ MW

Στο **Σχήμα 95** παρουσιάζεται το μήκος της αναστροφής του καπνού, και παρατηρείται ότι φτάνει τα 600 m ανάντη της φωτιάς, 4 min (240 sec) αφού ξέσπασε η φωτιά. Στο **Σχήμα 96**, το φαινόμενο της αντιστροφής μηδενίζεται μετά από 2,8 min (173 sec) ενεργοποίησης των ανεμιστήρων.

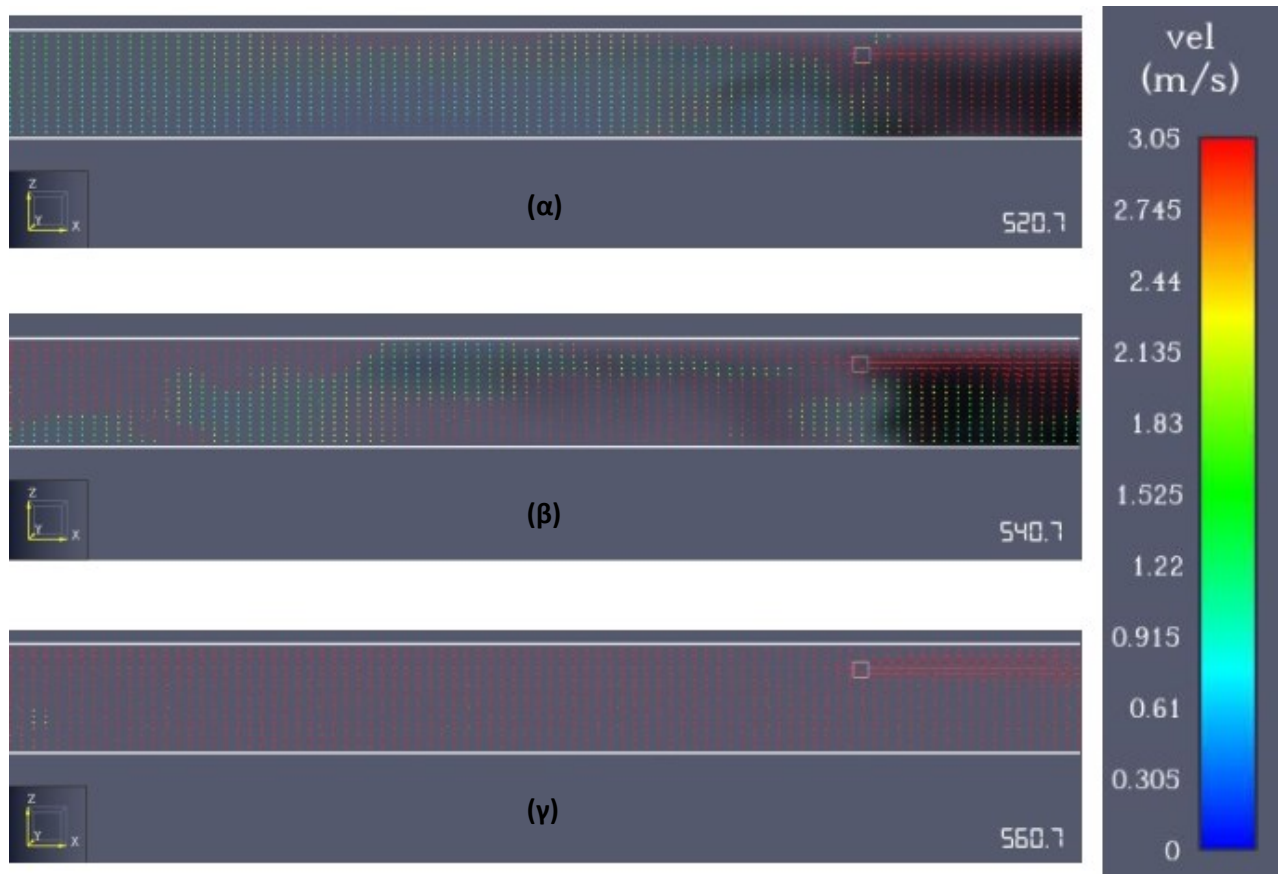


Σχήμα 95. Φαινόμενο αναστροφής του καπνού για φωτιά στο μέσον της σήραγγας με $HRR=50\text{ MW}$



Σχήμα 96. Μηδενισμός του φαινομένου της αναστροφής του καπνού για φωτιά στο μέσον της σήραγγας με $HRR=50\text{ MW}$

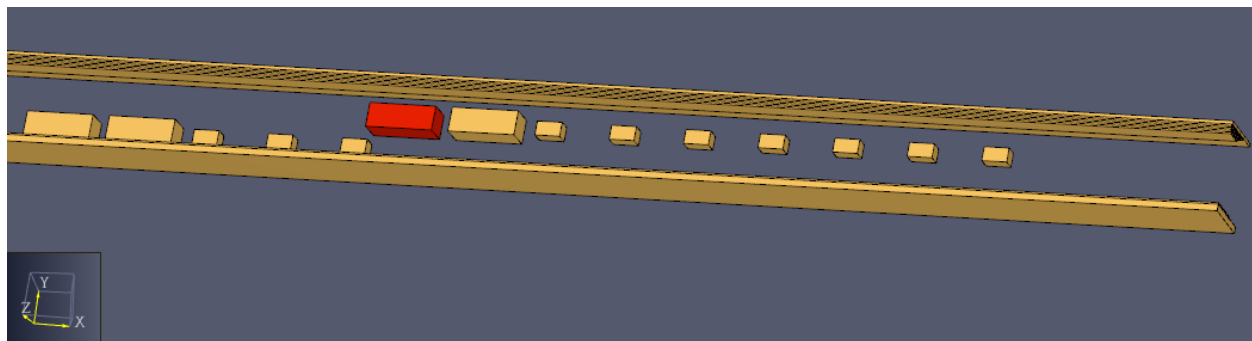
Στο **Σχήμα 97** παρουσιάζει το διάνυσμα της ταχύτητας, σε τρία διαφορετικά στιγμιότυπα, για το σημείο όπου το backlayering φτάνει το μέγιστο μήκος του, κατά μήκος της σήραγγας. Φαίνεται ότι ο καπνός συνεχίζει να εξελίσσεται προς τα ανάντη καθώς η ταχύτητα του αέρα είναι μικρότερη από την κρίσιμη ταχύτητα, 3,05 m/s (βλ. **Σχήμα 97(α)**). Το backlayering σταματάει να εξελίσσεται κοντά στα 540 sec, όταν η ταχύτητα του αέρα γίνει ίση και μεγαλύτερη από την κρίσιμη ταχύτητα (βλ. **Σχήμα 97(β)**), και υποχωρεί όταν αυτή η ταχύτητα κατακλίσει το μεγαλύτερο ποσοστό της διατομής της σήραγγας (βλ. **Σχήμα 97(γ)**).



Σχήμα 97. Διανύσματα ταχύτητας για: (α) 520 sec (β) 540 sec (γ) 560 sec στο σημείο που μεγιστοποιείται το backlayering για HR=50 MW και φωτιά στο μέσον της σήραγγας

8.3.2 Φωτιά 100 m από το στόμιο εξόδου

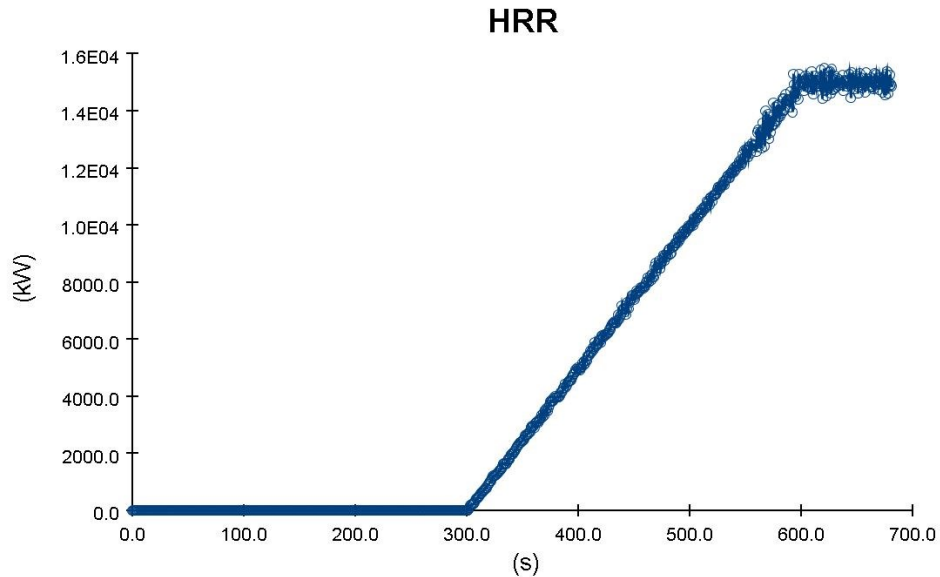
Στο παρακάτω υποκεφάλαιο αναλύεται η περίπτωση που η φωτιά ξεσπάει 100 m πριν από το στόμιο εξόδου. Στο **Σχήμα 98** παρουσιάζεται η προκαλούμενη κυκλοφοριακή συμφόρηση, και με κόκκινο συμβολίζεται το φορτηγό όχημα που έχει ξεσπάσει η πυρκαγιά.



Σχήμα 98. Κάτοψη σήραγγας με φωτιά 100 m από το στόμιο εξόδου

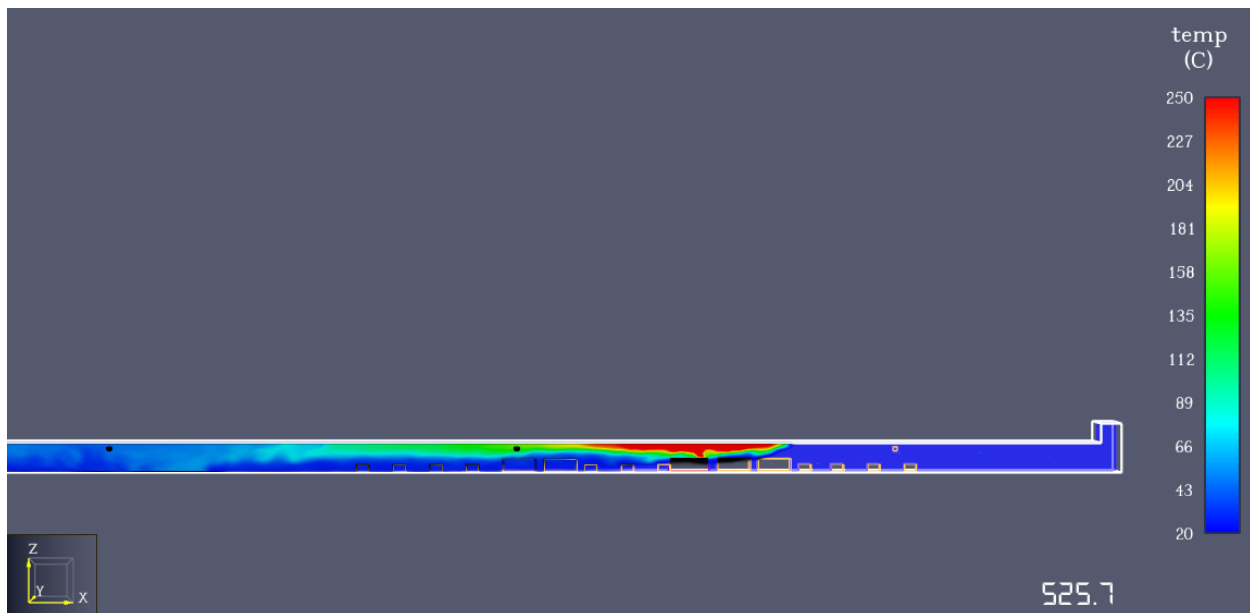
8.3.2.1 Θερμική Ισχύς 15 MW

Το πρώτο σενάριο που εξετάζεται είναι η περίπτωση σύγκρουσης δύο μεγάλων επιβατικών οχημάτων και ενός μικρού. Αποτέλεσμα αυτού είναι μια πυρκαγιά με θερμική ισχύ τα 15 MW, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 99**.



Σχήμα 99. Ρυθμός απελευθέρωσης της θερμότητας, $HRR=15\text{ MW}$, συναρτήσε του χρόνου της ανάλυσης

Η μέγιστη θερμοκρασία που αναπτύχθηκε εντός της σήραγγας είναι οι $270\text{ }^{\circ}\text{C}$, και όπως φαίνεται στο **Σχήμα 100**, δεν επηρεάστηκε η λειτουργία των γειτονικών ανεμιστήρων.



Σχήμα 100. Θερμοκρασία εντός της σήραγγας για φωτιά $HRR=15\text{ MW}$, 100 m από το στόμιο εξόδου

Στο **Σχήμα 101** παρουσιάζεται το μήκος της αναστροφής του καπνού, και παρατηρείται ότι φτάνει τα 584 m ανάντη της φωτιάς, 3,8 min (230 sec) αφού ξέσπασε η φωτιά. Στο **Σχήμα 102**, φαίνεται

ότι το φαινόμενο της αναστροφής του καπνού μηδενίζεται μετά από 2,7 min (167 sec) ενεργοποίησης των ανεμιστήρων.

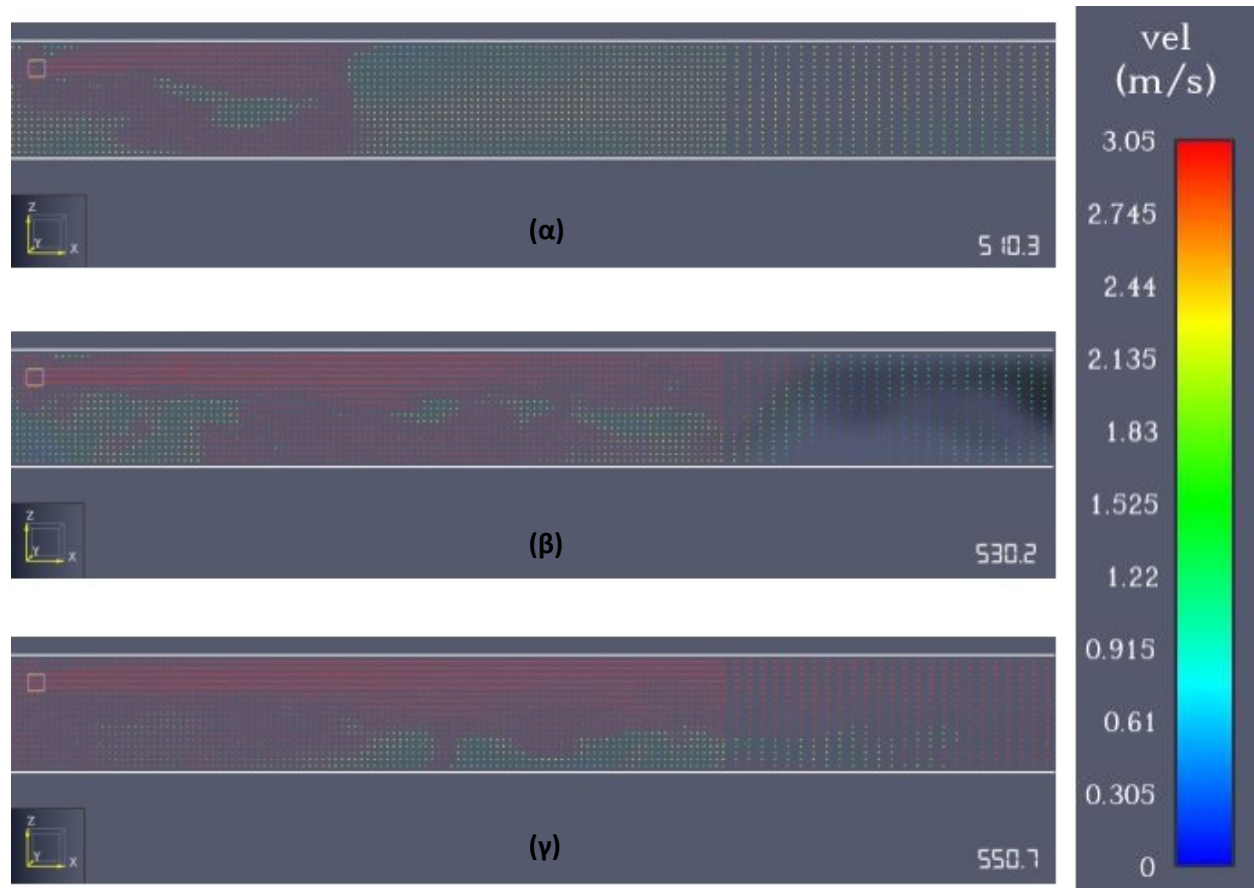


Σχήμα 101. Φαινόμενο αναστροφής του καπνού για φωτιά 100 m από το στόμιο εξόδου της σήραγγας με $HRR=15\text{ MW}$



Σχήμα 102. Μηδενισμός του φαινομένου της αναστροφής του καπνού για φωτιά 100 m από το στόμιο εξόδου της σήραγγας με $HRR=15\text{ MW}$

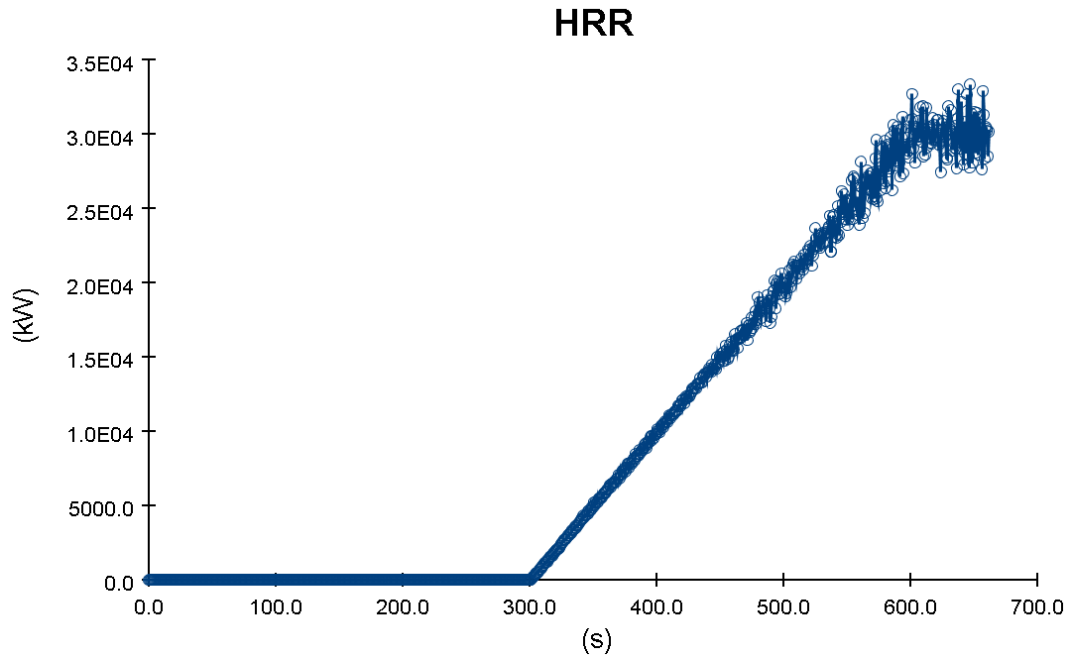
Το **Σχήμα 103** παρουσιάζει το διάνυσμα της ταχύτητας, σε τρία διαφορετικά στιγμιότυπα, για το σημείο όπου το backlayering φτάνει το μέγιστο μήκος του, κατά μήκος της σήραγγας. Ο καπνός συνεχίζει να εξελίσσεται προς τα ανάντη καθώς η ταχύτητα του αέρα είναι μικρότερη από την κρίσιμη ταχύτητα, 3,05 m/s (βλ. **Σχήμα 103(α)**). Το backlayering σταματάει να εξελίσσεται κοντά στα 530 sec, όταν η ταχύτητα του αέρα γίνει ίση και μεγαλύτερη από την κρίσιμη ταχύτητα (βλ. **Σχήμα 103(β)**) και υποχωρεί όταν αυτή η ταχύτητα κατακλίσει το μεγαλύτερο ποσοστό της διατομής της σήραγγας (βλ. **Σχήμα 103(γ)**).



Σχήμα 103. Διανύσματα ταχύτητας για: (α) 510 sec (β) 530 sec (γ) 550 sec στο σημείο που μεγιστοποιείται το backlayering για $HR=15 MW$ και φωτιά κοντά στο στόμιο εξόδου

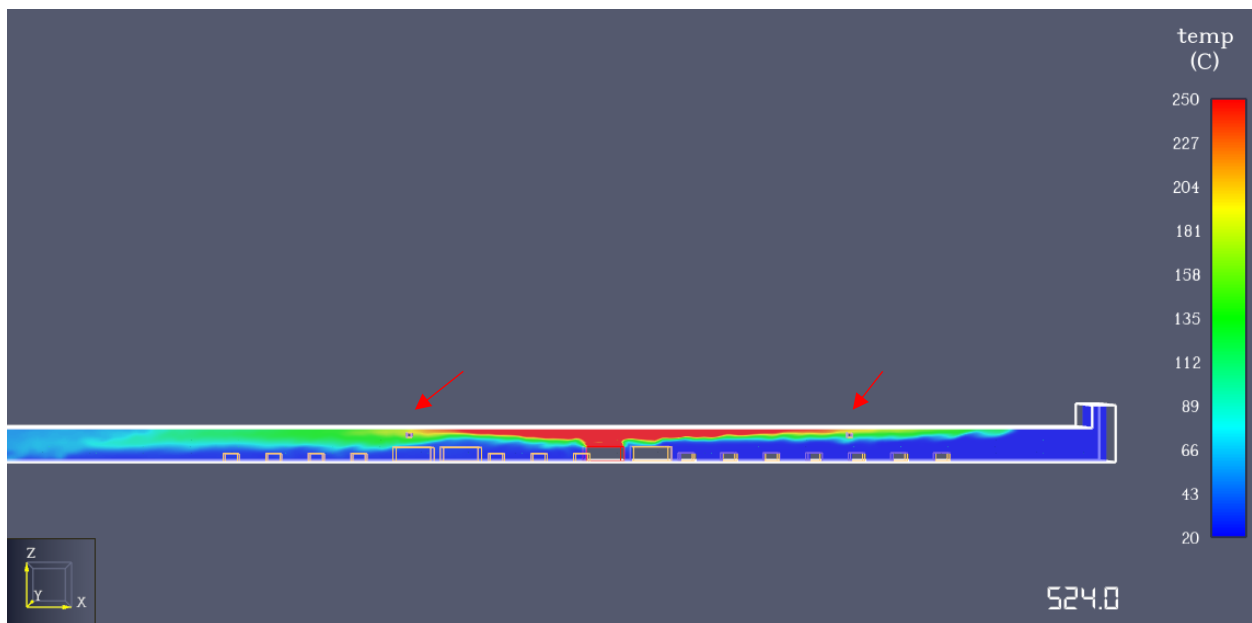
8.3.2.2 Θερμική Ισχύς 30 MW

Επόμενη ανάλυση αφορά στην εμπλοκή ενός λεωφορείου ή ενός κενού βαρέως τύπου φορτηγού, με θερμική ισχύ 30 MW. Στο **Σχήμα 104** παρουσιάζεται η ανάπτυξη του ρυθμού απελευθέρωσης της θερμότητας συναρτήσει του χρόνου της ανάλυσης, με την καμπύλη να είναι γραμμική και να φτάνει το μέγιστο της κοντά στα $t=600$ sec.



Σχήμα 104. Ρυθμός απελευθέρωσης της θερμότητας, $HRR=30\text{ MW}$, συναρτήσεσι του χρόνου της ανάλυσης

Η μέγιστη θερμοκρασία που αναπτύχθηκε εντός της σήραγγας είναι κοντά στους $500\text{ }^{\circ}\text{C}$, και όπως φαίνεται στο **Σχήμα 105** επηρεάστηκε η λειτουργία των γειτονικών ανεμιστήρων No. 14 και No. 15.



Σχήμα 105. Θερμοκρασία εντός της σήραγγας για φωτιά $HRR=30\text{ MW}$, 100 m από το στόμιο εξόδου

Στο **Σχήμα 106** παρουσιάζεται το μήκος της αναστροφής του καπνού, και παρατηρείται ότι φτάνει τα 585 m ανάντη της φωτιάς, 3,8 min (230 sec) αφού ξέσπασε η φωτιά. Στο **Σχήμα 107**, φαίνεται ότι το φαινόμενο της αναστροφής του καπνού μηδενίζεται μετά από 2,8 min (171 sec) ενεργοποίησης των ανεμιστήρων.

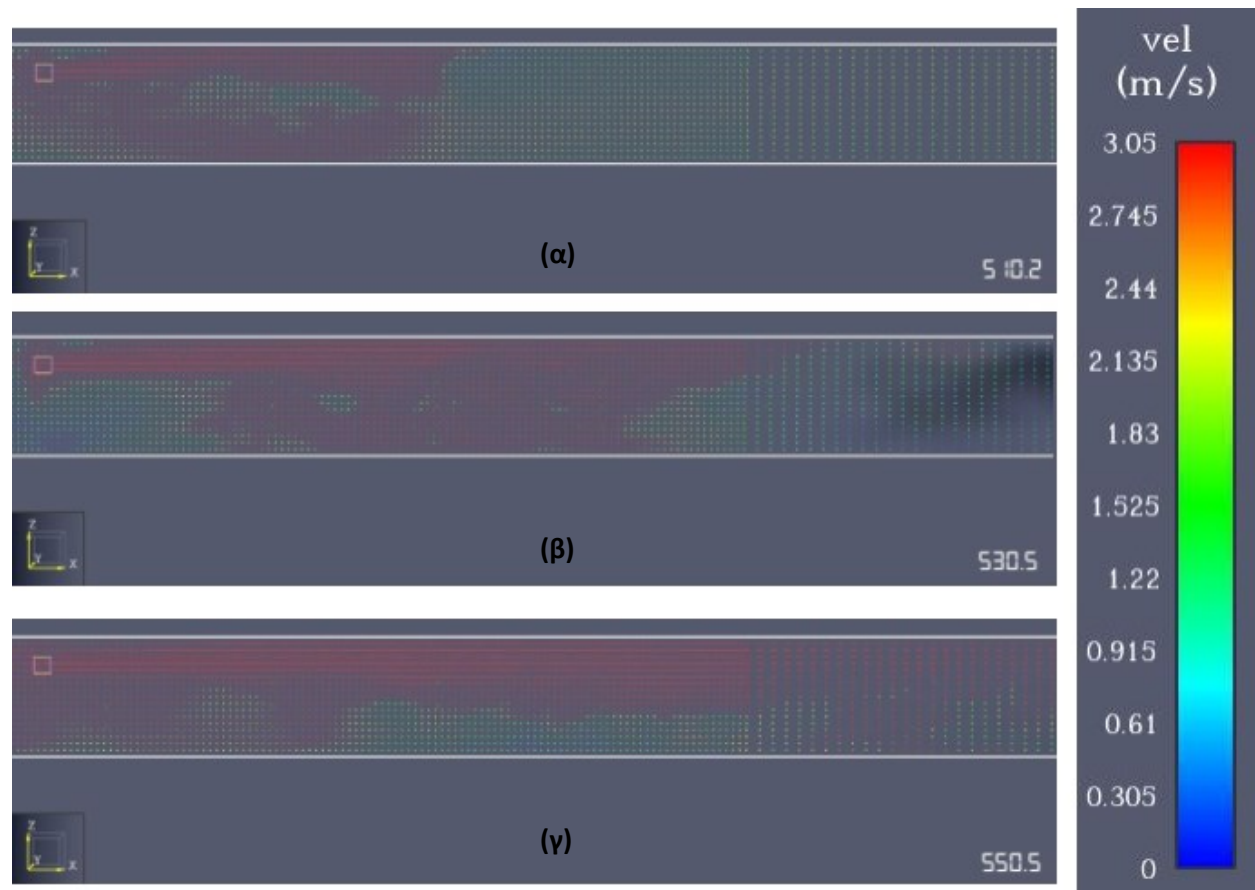


Σχήμα 106. Φαινόμενο αναστροφής του καπνού για φωτιά 100 m από το στόμιο εξόδου της σήραγγας με $HRR=30\text{ MW}$



Σχήμα 107. Μηδενισμός του φαινομένου της αναστροφής του καπνού για φωτιά 100 m από το στόμιο εξόδου της σήραγγας με $HRR=30\text{ MW}$

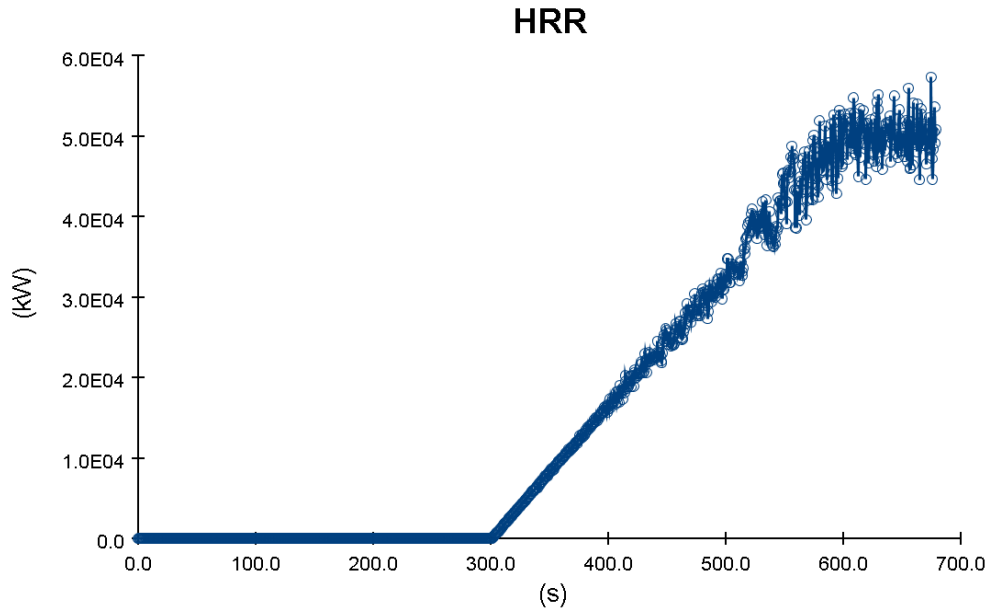
Το **Σχήμα 108** παρουσιάζει το διάνυσμα της ταχύτητας, σε τρία διαφορετικά στιγμιότυπα, για το σημείο όπου το backlayering φτάνει το μέγιστο μήκος του, κατά μήκος της σήραγγας. Φαίνεται ότι ο καπνός συνεχίζει να εξελίσσεται προς τα ανάντη καθώς η ταχύτητα του αέρα είναι μικρότερη από την κρίσιμη ταχύτητα, 3,05 m/s (βλ. **Σχήμα 108(α)**). Το backlayering σταματάει να εξελίσσεται κοντά στα 530 sec, όταν η ταχύτητα του αέρα γίνει ίση και μεγαλύτερη από την κρίσιμη ταχύτητα (βλ. **Σχήμα 108(β)**) και υποχωρεί όταν αυτή η ταχύτητα καταλάβει το μεγαλύτερο ποσοστό της διατομής της σήραγγας (βλ. **Σχήμα 108(γ)**).



Σχήμα 108. Διανύσματα ταχύτητας για: (α) 510 sec (β) 530 sec (γ) 550 sec στο σημείο που μεγιστοποιείται το backlayering για $HR=30\text{ MW}$ και φωτιά κοντά στο στόμιο εξόδου

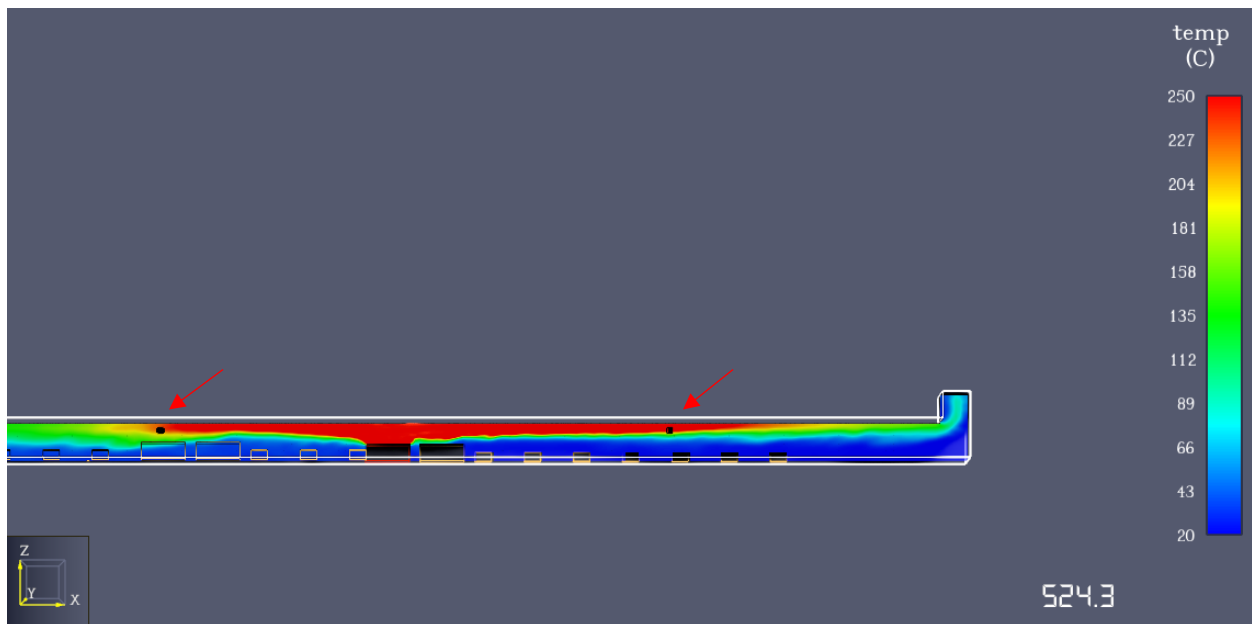
8.3.2.3 Θερμική Ισχύς 50 MW

Τελευταία ανάλυση αφορά στη φωτιά στην οποία εμπλέκεται ένα φορτηγό με καύσιμο φορτίο και θερμική ισχύ τα 50 MW. Πιο συγκεκριμένα, στο **Σχήμα 109** παρουσιάζεται η ανάπτυξη του ρυθμού απελευθέρωσης της θερμότητας συναρτήσει του χρόνου της ανάλυσης, με την καμπύλη να είναι γραμμική και να φτάνει το μέγιστο της κοντά στα $t=600\text{ sec}$.



Σχήμα 109. Ρυθμός απελευθέρωσης της θερμότητας, $HRR=50\text{ MW}$, συναρτήσει του χρόνου της ανάλυσης

Η μέγιστη θερμοκρασία που αναπτύχθηκε εντός της σήραγγας είναι κοντά στους $750\text{ }^{\circ}\text{C}$, και όπως φαίνεται στο **Σχήμα 110**, επηρεάστηκε η λειτουργία των γειτονικών ανεμιστήρων No. 14 και No. 15.



Σχήμα 110. Θερμοκρασία εντός της σήραγγας για φωτιά $HRR=50\text{ MW}$, 100 m από το στόμιο εξόδου

Στο **Σχήμα 111** παρουσιάζεται το μήκος της αναστροφής του καπνού, και παρατηρείται ότι φτάνει τα 594 m ανάντη της φωτιάς, 3,8 min (230 sec) αφού ξέσπασε η φωτιά. Στο **Σχήμα 112** φαίνεται ότι το φαινόμενο της αναστροφής του καπνού μηδενίζεται μετά από 2,8 min (173 sec) ενεργοποίησης των ανεμιστήρων.

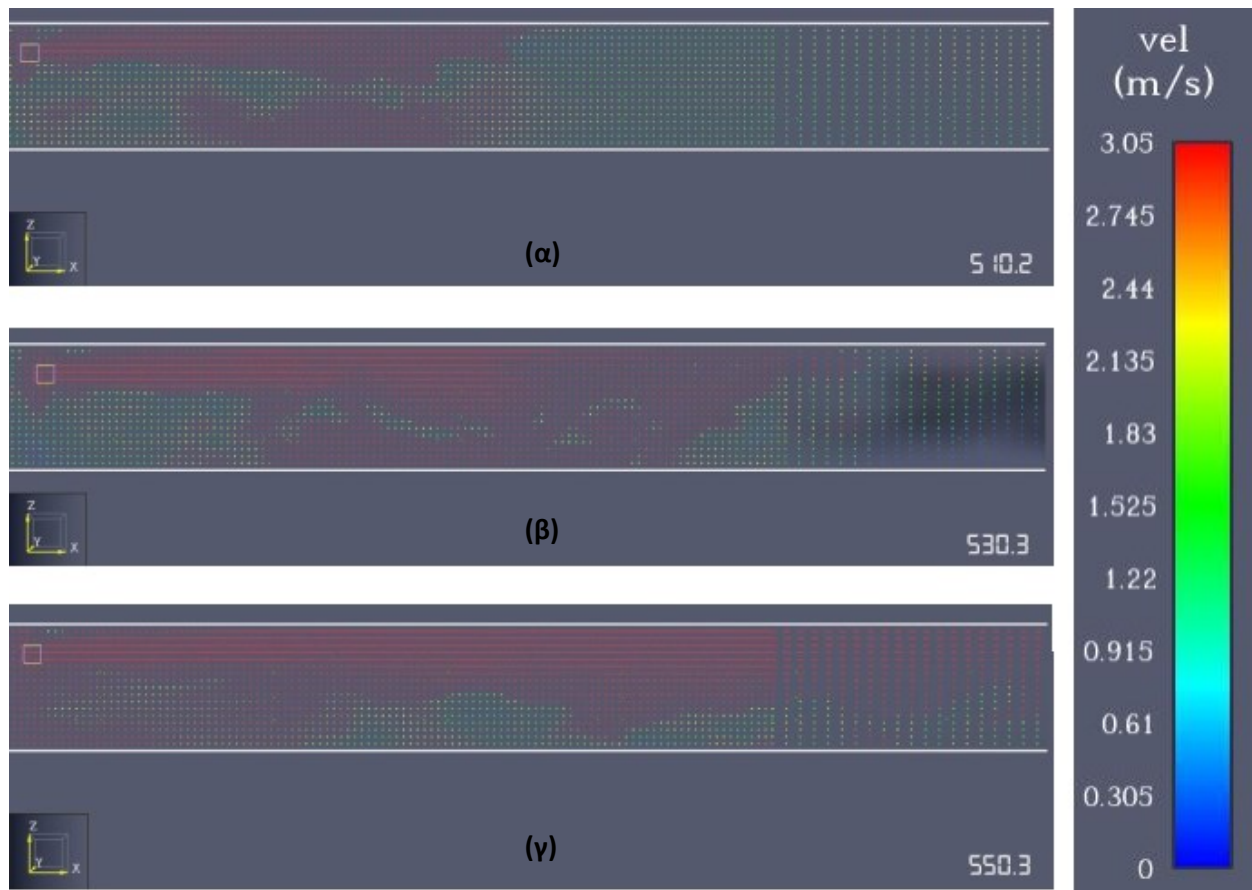


Σχήμα 111. Φαινόμενο αναστροφής του καπνού για φωτιά 100 m από το στόμιο εξόδου της σήραγγας με $HRR=50\text{ MW}$



Σχήμα 112. Μηδενισμός του φαινομένου της αναστροφής του καπνού για φωτιά 100 m από το στόμιο εξόδου της σήραγγας με $HRR=50\text{ MW}$

Στο **Σχήμα 113** παρουσιάζεται το διάγραμμα της ταχύτητας, σε τρία διαφορετικά στιγμιότυπα, στο σημείο όπου το backlayering φτάνει το μέγιστο μήκος του, κατά μήκος της σήραγγας. Παρατηρείται ότι μέχρι η ταχύτητα του αέρα των ανεμιστήρων να προσεγγίσει την κρίσιμη ταχύτητα, 3,05 m/s, ο καπνός συνεχίζει να εξελίσσεται προς τα ανάντη (βλ. **Σχήμα 113(α)**). Το backlayering σταματάει να εξελίσσεται κοντά στα 530 sec, όταν η ταχύτητα του αέρα γίνει ίση και μεγαλύτερη από την κρίσιμη ταχύτητα (βλ. **Σχήμα 113(β)**) και υποχωρεί όταν το μεγαλύτερο ποσοστό της διατομής της σήραγγας έχει αυτήν την ταχύτητα (βλ. **Σχήμα 113(γ)**).



Σχήμα 113. Διανύσματα ταχύτητας για: (α) 510 sec (β) 530 sec (γ) 550 sec στο σημείο που μεγιστοποιείται το backlayering για HR=50 MW και φωτιά κοντά στο στόμιο εξόδου

9 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

9.1 ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία ασχολήθηκε με το διαμήκες σύστημα αερισμού μιας οδικής σήραγγας, στην περίπτωση εκδήλωσης πυρκαγιάς λόγω αυτοκινητιστικού ατυχήματος. Στόχος είναι η διερεύνηση του μήκους αναστροφής του καπνού, και της κρίσιμης ταχύτητας του αέρα των ανεμιστήρων, με σκοπό την εξασφάλιση της ελεγχόμενης κατεύθυνσης του καπνού της πυρκαγιάς εντός της σήραγγας. Το σύνολο των αναλύσεων προσομοιώθηκε σε μια διάσταση, μέσω του λογισμικού Camatt 2.20, και σε τρεις διαστάσεις, μέσω του λογισμικού Pyrosim.

Τα προβλήματα που προκύπτουν από την εκδήλωση της πυρκαγιάς σε ένα υπόγειο έργο είναι μεγάλα. Κυρίως λόγω των χαρακτηριστικών της καύσης των οχημάτων και της διάρκειας της φωτιάς, τα οποία οδηγούν στην συγκέντρωση καπνού και στην ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών. Η εγκατάσταση του κατάλληλου συστήματος αερισμού, περιορίζει την εξάπλωση του καπνού κατά μήκος της σήραγγας και την κατευθύνει προς την έξοδο. Κατά αυτόν τον τρόπο, διατηρούνται οι έξοδοι διαφυγής καθαροί από καπναέρια και μειώνεται η θερμότητα του εισπνεόμενου αέρα. Τα σενάρια των αναλύσεων διαφοροποιήθηκαν ως προς τη θερμική ισχύ, την τοποθεσία της φωτιάς καθώς και την κρίσιμη ταχύτητα του αέρα των ανεμιστήρων.

Τα βασικότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από την εργασία είναι τα ακόλουθα:

- ❖ Αρχικά, το διαμήκες σύστημα αερισμού λειτούργησε ικανοποιητικά για το σύνολο των αναλύσεων. Συγκεκριμένα, η αναστροφή του καπνού περιορίστηκε και ελέγχθηκε από την στιγμή που ενεργοποιήθηκαν οι ανεμιστήρες, ακόμα στις αναλύσεις που βγήκαν εκτός λειτουργίας ορισμένοι ανεμιστήρες από την ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών.
- ❖ Στην μονοδιάστατη ανάλυση, παρατηρείται ότι η θέση της πυρκαγιάς, σε σχέση με το στόμιο, επηρεάζει το μήκος του backlayering. Συγκεκριμένα, όσο πιο μακριά είναι η θέση της πυρκαγιάς από τα στόμια της σήραγγας, τόσο περισσότερο εκτείνεται η αντιστροφή του καπνού.
- ❖ Στις τρισδιάστατες αναλύσεις παρατηρήθηκε ότι όσο αυξάνεται ο ρυθμός ανάπτυξης της θερμότητας, αυξάνεται το μήκος του καπνού προς την κατάντη πλευρά, την χρονική στιγμή που το backlayering είναι μέγιστο.
- ❖ Γενικά, στις τρισδιάστατες αναλύσεις το backlayering είναι μεγαλύτερο, καθώς γίνεται ταυτόχρονη κίνηση του καπνού και προς τις δύο κατευθύνσεις της σήραγγας. Σε αντίθεση στις μονοδιάστατες αναλύσεις, ο καπνός γυρνάει μόλις η μέση ταχύτητα αλλάξει πρόσημο.
- ❖ Δεν μπορεί να γίνει άμεση σύγκριση των προγραμμάτων, καθώς η προσομοίωση της φωτιάς γίνεται με διαφορετικό τρόπο. Συγκεκριμένα, στην μονοδιάστατη ανάλυση, ο τύπος της φωτιάς είναι έτοιμος και παραμετροποιημένος από το πρόγραμμα και επιλέγεται το είδος του ατυχήματος. Αντιθέτως, στην τρισδιάστατη ανάλυση ορίζεται μια αντίδραση και ο ρυθμός απελευθέρωσης της θερμότητας και όταν αναμιχθεί με τον αέρα, αντιδρά και σχηματίζει τα προϊόντα καύσης.

- ❖ Στην τρισδιάστατη ανάλυση παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η θερμική ισχύς, αυξάνεται και ο χρόνος που απαιτείται για να μηδενιστεί το φαινόμενο backlayering.
- ❖ Ο αριθμός των ανεμιστήρων που βγήκαν εκτός λειτουργίας διαφέρουν ανά τύπο ανάλυσης, 1D και 3D, συνεπώς δεν άμεσα συγκρίσιμα τα αποτελέσματα των δύο προγραμμάτων.

Συμπερασματικά, ο μηχανικός αερισμός της σήραγγας λειτούργησε ικανοποιητικά και στις τρεις περιπτώσεις πυρκαγιάς, καθώς περιορίστηκε η εξάπλωση του καπνού. Ωστόσο, στα μονοδιάστατα προσομοιώματα οι παράμετροι της φωτιάς θεωρούνται ομοιόμορφες και ομοιογενείς καθ' ύψος της διατομής, και υστερούν στην ανάδειξη του φαινομένου της στρωμάτωσης του καπνού. Για αυτόν τον λόγο, κρίνεται αναγκαία η τρισδιάστατη προσομοίωση, ώστε να μπορούν να προσαρμοστούν με μεγαλύτερη αντικειμενικότητα οι πραγματικές συνθήκες [46].

9.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Για την περαιτέρω διερεύνηση του αντικειμένου της παρούσας έρευνας, προτείνονται τα κάτωθι:

- Παρακολούθηση της συγκέντρωσης (ppm) του φαινομένου αντιστροφής του καπνού και ο χρόνος που απαιτείται για τους επιβάτες να φτάσουν στην έξοδο διαφυγής.
- Προσομοίωση και μελέτη του Ventilation On Demand (VOD) σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης, καθώς η χρήση του έχει σημειώσει σημαντική μείωση στην κατανάλωση της ενέργειας που απαιτείται.

10 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Διοικητική Αρχή Σηράγγων, “Μέθοδος ανάλυσης επικινδυνότητας οδικών σηράγγων χωρίς εμπλοκή οχημάτων που μεταφέρουν επικίνδυνα εμπορεύματα.- Σεναριακή προσέγγιση,” 2007, [Online]. Available: https://www.eesy.gr/uploads/1/2/2/2/12220305/%CE%94%CE%91%CE%A3_8.pdf
- [2] Επικ. Καθ. Β. Μαρίνος and Καθ. Α. Μπενάρδος, “Σήραγγες της Ελλάδας.” NTUA, MSc Design and Construction of Underground Works, 2023.
- [3] X. Zhang *et al.*, “Perspectives of big experimental database and artificial intelligence in tunnel fire research,” *Tunn. Undergr. Space Technol.*, vol. 108, p. 103691, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.tust.2020.103691.
- [4] A. Haack, “Fire protection in traffic tunnels: General aspects and results of the EUREKA project,” *Tunn. Undergr. Space Technol.*, vol. 13, no. 4, pp. 377–381, Oct. 1998, doi: 10.1016/S0886-7798(98)00080-7.
- [5] W. K. Chow and J. S. M. Li, “Case study: vehicle fire in a cross-harbour tunnel in Hong Kong,” *Tunn. Undergr. Space Technol.*, vol. 16, no. 1, pp. 23–30, Jan. 2001, doi: 10.1016/S0886-7798(01)00026-8.
- [6] J. Modic, “Fire simulation in road tunnels,” *Tunn. Undergr. Space Technol.*, vol. 18, no. 5, pp. 525–530, Nov. 2003, doi: 10.1016/S0886-7798(03)00069-5.
- [7] S. Gannouni and R. B. Maad, “Numerical study of the effect of blockage on critical velocity and backlayering length in longitudinally ventilated tunnel fires,” *Tunn. Undergr. Space Technol.*, vol. 48, pp. 147–155, Apr. 2015, doi: 10.1016/j.tust.2015.03.003.
- [8] S. Bari and J. Naser, “Simulation of smoke from a burning vehicle and pollution levels caused by traffic jam in a road tunnel,” *Tunn. Undergr. Space Technol.*, vol. 20, no. 3, pp. 281–290, May 2005, doi: 10.1016/j.tust.2004.09.002.
- [9] K. Brahim, M. Bouteraa, A. Elcafsi, and B. Ali, “Control of Smoke Flow in a Tunnel,” *J. Appl. Fluid Mech.*, vol. 6, pp. 49–60, Jan. 2013.
- [10] Z. Gao, L. Li, C. Sun, W. Zhong, and C. Yan, “Effect of longitudinal slope on the smoke propagation and ceiling temperature characterization in sloping tunnel fires under natural ventilation | Elsevier Enhanced Reader,” Jan. 18, 2022. <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0886779822000360?token=48B1769732E294FC6D9B3C0F49ECD09D0E7B43E022CD71F9B8F823AA583D3F2AE7232BBF00A88149A4798AFE85565491&originRegion=eu-west-1&originCreation=20221007141049> (accessed Oct. 07, 2022).
- [11] K.-C. Tsai, H.-H. Chen, and S.-K. Lee, “Critical ventilation velocity for multi-source tunnel fires,” *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 98, no. 10, pp. 650–660, Oct. 2010, doi: 10.1016/j.jweia.2010.06.006.
- [12] Y. Z. Li, B. Lei, and H. Ingason, “Study of critical velocity and backlayering length in longitudinally ventilated tunnel fires,” *Fire Saf. J.*, vol. 45, no. 6, pp. 361–370, Nov. 2010, doi: 10.1016/j.firesaf.2010.07.003.
- [13] *10th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*. Professional Engineering Publishing, 2000.
- [14] J. Bickel O., T. Kuesel R., and King H. Elwyn, *Tunnel Engineering Handbook*, Second Edition. 1996.
- [15] A. G. Bendelius, “„Tunnel Ventilation“ in „Tunnel Engineering Handbook“,” 1999.
- [16] World Road Association (PIARC), Technical Committee 5 Road Tunnels, “Systems and equipment for fire and smoke control in road tunnels,” 2007, p. 344. [Online]. Available: <https://www.piarc.org/en/order-library/5425-en->

- Systems%20and%20equipment%20for%20fire%20and%20smoke%20control%20in%20road%20tunnels
- [17] PIARC Technical Committee 3.3 Road Tunnel Operation, “Road Tunnels: Operational Strategies for Emergency Ventilation,” 2011. [Online]. Available: https://www.eesy.gr/uploads/1/2/2/2/12220305/%CE%94%CE%91%CE%A3_14.pdf
- [18] Β. Μερεντίτης, “Σχέδιο οδηγιών συντάξεως μελετών, τεύχος σηράγγων έργα Η/Μ και φωτισμού υπαιθρίων οδικών σηράγγων.” 2004. [Online]. Available: <https://www.e-archimedes.gr/latest/item/3565->
- [19] Α. Μπενάρδος and Δ. Δαμίγος, “Αερισμός σηράγγων και υπογείων έργων – Σημειώσεις,” in *Αερισμός Σηράγγων και Υπογείων Έργων - Σημειώσεις*, Αθήνα: ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ, 2016.
- [20] Ν. Καζίλης, “ΟΙ ΣΗΡΑΓΓΕΣ ΤΗΣ ΕΓΝΑΤΙΑΣ ΟΔΟΥ.” “ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ ΑΕ” & Ε.Ε.Σ.Υ.Ε., 15-16/10/99. [Online]. Available: https://www.eesy.gr/uploads/1/2/2/2/12220305/doc_6.pdf
- [21] World Road Association (PIARC), Technical Committee 5 Road Tunnels, “Fire and smoke control in road tunnels,” 1999, p. 290. [Online]. Available: <https://www.piarc.org/en/order-library/3854-en-Fire%20and%20Smoke%20Control%20in%20Road%20Tunnels>
- [22] W. K. Chow and J. S. M. Li, “Safety requirement and regulations reviews on ventilation and fire for tunnels in the Hong Kong Special Administrative Region,” *Tunn. Undergr. Space Technol.*, vol. 14, no. 1, pp. 13–21, Jan. 1999, doi: 10.1016/S0886-7798(99)00009-7.
- [23] World Road Association (PIARC), Technical Committee D.5 Road Tunnels, “Road Tunnels: Vehicle Emissions and Air Demand for Ventilation,” 2019. [Online]. Available: <https://www.piarc.org/en/order-library/30189-en-Road%20Tunnels:%20Vehicle%20Emissions%20and%20Air%20Demand%20for%20Ventilation.htm>
- [24] Obermeyer, “Ολοκλήρωση μελετών βελτίωσης οδικού άξονα Λαμία-Ιτέα_Αντίρριο στο τμήμα Μπράλος-Άμφισσα.” 2015.
- [25] Δημήτριος Μαθιουλάκης (Καθηγητής), Ιωάννης Αναγνωστόπουλος (Καθηγητής), and Βασίλειος Ριζιώτης (Επ. Καθηγητής), *Εφαρμοσμένη Ρευστομηχανική (Σημειώσεις)*. Αθήνα: ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ, ΣΧΗΜΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ, ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ, 2019.
- [26] Θεοφίλης Ιωάννης, *Εγκαταστάσεις εξαερισμού σε σήραγγες*. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2002.
- [27] V. Babrauskas and R. D. Peacock, “Heat release rate: The single most important variable in fire hazard,” *Fire Saf. J.*, vol. 18, no. 3, pp. 255–272, Jan. 1992, doi: 10.1016/0379-7112(92)90019-9.
- [28] R. O. Carvel, A. N. Beard, and P. W. Jowitt, “The influence of longitudinal ventilation systems on fires in tunnels,” *Tunn. Undergr. Space Technol.*, vol. 16, no. 1, pp. 3–21, Jan. 2001, doi: 10.1016/S0886-7798(01)00025-6.
- [29] R. Carvel, A. Beard, P. Jowitt, and D. D. Drysdale, “The Influence of Tunnel Geometry and Ventilation on the Heat Release Rate of a Fire,” *Fire Technol.*, vol. 40, pp. 5–26, Jan. 2004, doi: 10.1023/B:FIRE.0000003313.97677.c5.
- [30] K. Yoon J., *A Study of the Heat Release Rate of Tunnel Fires and the Interaction between Suppression and Longitudinal Air Flows in Tunnels*. Ottawa-Carleton Institute of Civil and Environmental Engineering, 2011. [Online]. Available: https://curve.carleton.ca/system/files/etd/5dac7591-944d-4c18-8590-d617c2188ed7/etd_pdf/1efc5e9f9a3b51e8fd66398c958b18b9/ko-astudyoftheheatreleaserateoftunnelfiresand.pdf
- [31] F. Chen, “Smoke propagation in road tunnels,” pp. 207–218, Aug. 2000.
- [32] World Road Association (PIARC), Technical Committee 3.3 Road Tunnel Operation, “Design Fire Characteristics for Road Tunnels,” 2017.

- [33] A. (Member P. Bendelius and P. (Assosiated C. Brinckerhoff, “The latest PIARC Road Tunnel Fire and Smoke Control Publications,” 2004. [Online]. Available: <https://www.piarc.org/ressources/publications/4/5473,RR324-052.pdf>
- [34] M. Persson, “Quantitative Risk Analysis Procedure for the Fire Evacuation of a Road Tunnel—An Illustrative Example,” Jan. 2002.
- [35] H. Koseki and H. Hayasaka, “Estimation of Thermal Balance in Heptane Pool Fire,” *J. Fire Sci.*, vol. 7, pp. 237–250, Jul. 1989, doi: 10.1177/073490418900700402.
- [36] J. Bailey, G. Forney, P. Tatem, and W. Jones, “Development and Validation of Corridor Flow Submodel for CFAST,” *J. Fire Prot. Eng. - J FIRE PROT ENG*, vol. 12, pp. 139–161, Aug. 2002, doi: 10.1177/10423910260620473.
- [37] R. K. Haddad, C. Maluk, E. Reda, and Z. Harun, “Critical Velocity and Backlayering Conditions in Rail Tunnel Fires: State-of-the-Art Review,” *J. Combust.*, vol. 2019, p. e3510245, May 2019, doi: 10.1155/2019/3510245.
- [38] J. P. Kunsch, “Simple model for control of fire gases in a ventilated tunnel,” *Fire Saf. J.*, vol. 37, no. 1, pp. 67–81, Feb. 2002, doi: 10.1016/S0379-7112(01)00020-0.
- [39] Μαργαρίτου Μαρία, *Μελέτη διαμήκους αερισμού οδικής σήραγγας σύμφωνα με ευρωπαϊκά και διεθνή πρότυπα*. Αθήνα: ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ, ΣΧΗΜΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ, ΤΟΜΕΑΣ ΠΡΕΥΣΤΩΝ, 2010.
- [40] Κουρκούμπας Δημήτριος-Σωτήριος, *Εξαερισμός οδικών σηράγγων και σχετικά μοντέλα πυρκαγιών-Εφαρμογή στη σήραγγα του Αγ. Ηλία*. Αθήνα: ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ, ΣΧΗΜΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ, ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ, 2007.
- [41] Committee on Road Tunnels, “Vehicle Emissions, Air Demand, Environment, Longitudinal Ventilation,” 1995, p. 85. [Online]. Available: <https://www.piarc.org/en/order-library/4476-en-Road%20Tunnels:%20Vehicle%20Emissions%20and%20Air%20Demand%20for%20Ventilation>
- [42] Y. Jian-ping, Z. Fang, Z. Tang, and S. Jia-yun, “Performance-Based Fire Safety Assessment of City Underwater Tunnel,” *Procedia Eng.*, vol. 11, pp. 86–90, Dec. 2011, doi: 10.1016/j.proeng.2011.04.631.
- [43] “Numerical Investigation on the length of the near-field region of smoke flow in tunnel fires | Elsevier Enhanced Reader.” <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2214157X21007474?token=D786F4780C79E86557A900CF4119143233ED786B462B97B67A01247FEA63414376F4551F281AF1191F6D993D7E04576C&originRegion=eu-west-1&originCreation=20221115120235> (accessed Nov. 15, 2022).
- [44] *Τελική εκθεση έργου: “Προκαταρκτική διερεύνηση και σχεδιασμός από το Μετσόβιο Κέντρο Διεπιστημονικής Έρευνας οδικής σήραγγας μεταξύ των οικισμών Θεοδωριάνων - Μελλισουργών.”* Αθήνα: ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ, Μετσόβιο Κέντρο Διεπιστημονικής Έρευνας, 2022.
- [45] Panagiotis N. Ntzeremes, “Developing a quantitative fire risk assessment method for critical infrastructures: The case of road tunnels,” National Technical University of Athens, Athens, 2019.
- [46] ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ Α.Ε., “‘Εκπόνηση αναλύσεων τρισδιάστατης προσομοίωσης σεναρίων φωτιάς σε σήραγγες της Εγνατίας Οδού’ -Κωδικός Αναφοράς 5908-,” 2020, [Online]. Available: https://www.egnatia.eu/wp-content/uploads/2021/01/02_5908_sow.pdf
- [47] Κωνσταντάρας Γεώργιος, *Ανάλυση επικινδυνότητας οδικής σήραγγας σε ατύχημα με ύπαρξη πυρκαγιάς μεγάλης ισχύος*. ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ, ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ, ΤΟΜΕΑΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ & ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ, 2013.
- [48] Kevin McGrattan, S. Hostikka, McDermott Randall, Floyd Jason, Weinschenk Craig, and Overholt Kristopher, *Fire Dynamic Simulator_ User’s Guide*, Sixth Edition. NIST Special Publication 1019, 2014.
- [49] Thnunderhead Engineering, “Burner Fire.” Pyrosim, Apr. 2015.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Πίνακες Εκπομπών Ρύπων Οχημάτων σύμφωνα με την ΡΙΑΡC 2019R02EN [23]

Πίνακας Α- 1. Εκπομπές CO για επιβατικά βενζινοκίνητα οχήματα έτους αναφοράς 2018

PC Gasoline CO [g/h] 2018							
	Gradient [%]						
v [km/h]	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4
10	7.7	8.8	9.7	11.0	12.0	14.1	16.6
20	8.4	10.2	12.6	15.5	22.7	35.4	50.2
30	7.7	9.3	11.1	13.7	17.3	22.8	31.1
40	8.3	10.3	12.9	16.4	22.3	33.2	48.9
50	8.9	11.8	14.0	18.2	23.8	33.1	46.7
60	8.5	11.4	13.3	18.2	25.3	37.8	59.2
70	9.9	13.3	17.9	25.6	36.4	60.4	109.0
80	12.5	16.2	21.1	31.0	49.8	89.1	166.2
90	11.7	15.7	22.7	35.6	67.5	146.1	264.3
100	15.5	20.9	31.6	50.4	85.9	209.4	415.7
110	26.7	33.2	47.4	78.1	148.6	326.2	791.2
120	47.2	54.9	74.1	130.7	259.8	604.4	1506.2
130	85.3	106.2	142.2	236.6	504.3	1318.7	2568.7

Πίνακας Α- 2. Εκπομπές NO_x για επιβατικά βενζινοκίνητα οχήματα έτους αναφοράς 2018

PC Gasoline NO _x [g/h] 2018							
	Gradient [%]						
v [km/h]	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
10	1.2	1.3	1.6	1.8	2.1	2.3	2.6
20	1.3	1.6	2.0	2.4	2.9	3.4	4.2
30	1.3	1.6	2.1	2.7	3.4	4.3	5.4
40	1.4	1.8	2.4	3.1	4.1	5.1	6.2
50	1.3	1.7	2.3	3.2	4.3	5.5	7.1
60	1.3	1.8	2.5	3.6	5.1	6.9	8.6
70	1.3	1.9	2.7	4.0	5.9	8.3	10.1
80	1.4	2.1	3.2	5.2	7.4	9.8	12.3
90	1.6	2.4	3.7	6.4	9.9	11.8	14.6
100	1.9	3.0	4.4	7.7	12.1	15.3	17.8
110	2.6	3.8	6.0	9.2	13.9	18.3	22.5
120	3.4	5.0	8.2	12.2	16.3	21.7	26.4
130	4.4	7.2	13.0	17.9	19.8	24.7	29.7

Πίνακας Α- 3. Εκπομπές καπνού και σωματιδίων για επιβατικά βενζινοκίνητα οχήματα έτους αναφοράς 2018

PC Gasoline Opacity exhaust [m ² /h] 2018							
	Gradient [%]						
v [km/h]	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2
20	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3
30	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4
40	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5
50	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4	0.6
60	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4	0.6	0.9
70	0.2	0.2	0.3	0.3	0.5	0.9	1.5
80	0.2	0.3	0.3	0.5	0.8	1.3	2.4
90	0.3	0.3	0.3	0.6	1.2	2.1	3.8
100	0.5	0.3	0.4	0.7	1.5	2.9	4.9
110	0.7	0.6	0.7	1.1	2.0	3.7	6.2
120	1.0	0.9	1.3	2.0	3.3	5.0	8.0
130	1.3	1.6	2.3	3.7	5.8	7.9	10.4

Πίνακας Α- 4. Εκπομπές CO για επιβατικά πετρελαιοκίνητα οχήματα έτους αναφοράς 2018

PC Diesel CO [g/h] 2018							
	Gradient [%]						
v [km/h]	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
10	0.8	0.9	1.1	1.3	1.5	1.8	2.0
20	0.9	1.0	1.3	2.8	3.3	3.6	4.1
30	0.9	1.2	1.4	2.4	3.0	3.5	3.9
40	0.9	1.2	1.4	2.0	2.7	3.2	3.7
50	1.0	1.1	1.4	1.8	2.6	3.1	3.6
60	1.0	1.1	1.2	1.6	2.4	3.0	3.6
70	1.0	1.1	1.2	1.6	2.1	2.8	3.4
80	0.9	1.1	1.2	1.6	2.1	2.4	3.2
90	0.9	1.0	1.2	1.5	1.9	2.1	2.9
100	1.0	1.1	1.2	1.3	1.6	1.9	2.7
110	1.2	1.2	1.2	1.4	1.5	1.7	2.5
120	1.3	1.3	1.2	1.4	1.8	2.0	2.8
130	1.4	1.4	1.2	1.4	2.0	2.4	2.9

Πίνακας Α- 5. Εκπομπές NO_x για επιβατικά πετρελαιοκίνητα οχήματα έτους αναφοράς 2018

PC Diesel NO _x [g/h] 2018							
	Gradient [%]						
v [km/h]	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
10	7.7	9.0	10.3	12.2	14.5	16.9	19.9
20	7.9	9.5	11.6	14.7	18.4	23.1	28.4
30	8.0	10.1	12.8	17.3	22.4	29.3	36.9
40	8.0	10.2	13.5	19.0	25.8	34.8	45.8
50	8.0	10.4	14.2	20.6	29.2	40.2	54.7
60	8.4	11.3	16.2	23.9	35.2	51.0	71.6
70	8.7	12.4	18.7	28.9	43.6	63.0	87.8
80	7.6	11.9	20.0	34.0	56.7	88.8	126.6
90	8.3	13.3	24.5	43.9	70.0	108.6	171.6
100	9.6	14.2	27.0	50.9	86.7	131.1	204.2
110	13.3	21.9	37.9	68.5	114.3	178.8	247.4
120	19.3	32.4	53.2	86.2	142.7	239.2	316.1
130	25.4	47.9	77.1	120.9	191.6	291.5	373.4

Πίνακας Α- 6. Εκπομπές καπνού και σωματιδίων για επιβατικά πετρελαιοκίνητα οχήματα έτους αναφοράς 2018

PC Diesel Opacity exhaust [m ² /h] 2018							
	Gradient [%]						
v [km/h]	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
10	1.1	1.2	1.3	1.5	1.6	1.8	2.0
20	1.1	1.3	1.5	1.8	2.0	2.3	2.7
30	1.1	1.4	1.6	2.0	2.3	2.7	3.1
40	1.2	1.4	1.8	2.3	2.8	3.4	4.0
50	1.2	1.5	2.0	2.7	3.4	4.2	4.8
60	1.3	1.6	2.1	2.8	3.8	4.9	6.0
70	1.3	1.8	2.5	3.2	4.3	5.3	7.0
80	1.3	1.9	2.8	3.8	5.3	6.6	8.6
90	1.5	2.2	3.2	4.6	6.5	8.2	9.7
100	2.0	2.6	3.8	5.6	7.6	9.4	10.6
110	2.7	3.5	4.7	6.6	8.9	10.5	11.7
120	3.4	4.6	6.3	7.9	9.6	11.2	12.5
130	4.3	6.2	8.1	9.9	11.1	12.6	14.1

Πίνακας Α- 7. Εκπομπές CO για ελαφρύ επαγγελματικό βενζινοκίνητο όχημα έτους αναφοράς 2018

LCV Gasoline CO [g/h] 2018							
v [km/h]	Gradient [%]						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8
10	35.3	38.1	41.7	45.5	50.2	55.9	61.8
20	35.9	40.1	46.8	51.7	58.3	67.8	83.4
30	36.5	42.2	51.9	57.9	66.5	79.7	105.1
40	37.8	43.2	57.4	67.8	86.2	116.5	123.2
50	39.5	44.2	57.6	70.0	90.0	124.0	141.3
60	40.8	47.1	61.2	69.3	93.8	131.6	204.7
70	44.0	51.8	71.9	90.8	126.5	193.5	381.1
80	52.1	61.6	81.3	98.3	164.5	272.5	645.7
90	52.3	67.8	99.1	118.4	237.1	581.9	1380.3
100	68.8	94.8	137.0	148.0	329.6	953.7	2194.7
110	108.9	150.0	203.1	238.1	609.9	1709.1	3479.0
120	174.1	240.8	323.1	468.3	1164.6	2709.5	4329.6
130	246.5	329.6	514.5	1073.3	2406.5	3959.4	4641.6

Πίνακας Α- 8. Εκπομπές NO_x για ελαφρύ επαγγελματικό βενζινοκίνητο όχημα έτους αναφοράς 2018

LCV Gasoline NO _x [g/h] 2018							
v [km/h]	Gradient [%]						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
10	1.7	2.1	2.7	3.4	4.3	5.4	6.4
20	1.8	2.2	3.0	4.7	6.2	8.8	10.4
30	1.9	2.1	3.1	5.7	8.0	10.7	13.1
40	1.8	2.0	3.3	6.0	9.1	12.7	16.1
50	1.4	1.6	3.6	6.0	9.9	14.2	18.7
60	0.9	1.7	3.9	7.5	12.3	14.7	21.2
70	0.8	1.9	4.7	9.1	14.6	18.1	24.3
80	0.7	2.0	5.7	12.3	19.1	21.6	25.5
90	1.1	2.7	7.8	15.2	23.6	24.7	26.8
100	2.0	3.9	10.1	19.2	27.9	27.8	27.9
110	3.4	6.7	15.2	26.8	33.0	30.9	28.9
120	4.5	9.8	21.6	33.8	36.1	32.1	29.8
130	5.9	13.5	26.6	36.2	36.7	32.7	30.8

Πίνακας Α- 9. Εκπομπές καπνού και σωματιδίων για ελαφρύ επαγγελματικό βενζινοκίνητο όχημα έτους αναφοράς 2018

LCV Gasoline Opacity exhaust [m ² /h] 2018							
	Gradient [%]						
v [km/h]	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2
20	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5
30	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.5	0.8
40	0.1	0.1	0.1	0.2	0.4	0.9	1.1
50	0.1	0.1	0.2	0.2	0.4	0.8	1.5
60	0.1	0.1	0.2	0.3	0.6	1.2	2.4
70	0.2	0.2	0.3	0.6	1.2	2.4	5.1
80	0.5	0.5	0.7	0.9	2.0	4.3	9.6
90	0.8	0.9	1.0	1.2	3.1	7.1	13.6
100	1.1	1.2	1.4	2.0	5.2	9.5	18.8
110	1.4	1.8	2.2	3.9	7.3	14.6	26.1
120	1.7	2.3	3.0	5.2	9.4	22.0	32.7
130	2.3	2.9	3.9	6.5	13.8	30.2	40.4

Πίνακας Α- 10. Εκπομπές CO για ελαφρύ επαγγελματικό πετρελαιοκίνητο όχημα έτους αναφοράς 2018

LCV Diesel CO [g/h] 2018							
	Gradient [%]						
v [km/h]	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
10	0.9	1.0	1.2	1.5	1.6	1.8	2.1
20	1.0	1.2	1.5	1.8	1.9	2.1	2.3
30	1.0	1.3	1.6	2.0	2.2	2.4	2.6
40	1.1	1.3	1.7	2.0	2.3	2.5	2.9
50	1.1	1.4	1.7	2.1	2.5	2.8	3.0
60	1.0	1.4	1.7	2.1	2.7	3.0	3.4
70	1.1	1.6	1.8	2.3	3.0	3.3	3.8
80	1.4	1.7	1.9	2.5	3.3	3.6	4.2
90	1.7	2.0	2.1	2.6	3.5	3.9	5.1
100	2.0	2.3	2.2	2.8	3.9	4.6	5.7
110	2.4	2.6	2.5	3.0	4.4	5.4	6.2
120	2.8	3.0	3.4	4.2	5.4	6.0	6.6
130	2.9	3.6	4.2	5.1	6.0	6.4	6.8

Πίνακας Α- 11. Εκπομπές NO_x για ελαφρύ επαγγελματικό πετρελαιοκίνητο όχημα έτους αναφοράς 2018

LCV Diesel NO _x [g/h] 2018							
	Gradient [%]						
v [km/h]	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8
10	5.2	6.0	7.3	9.0	11.3	13.7	16.0
20	5.3	6.6	8.7	11.7	15.9	27.7	34.9
30	5.4	7.2	10.1	14.4	20.4	34.0	44.6
40	4.9	6.9	10.2	15.7	23.8	40.2	54.3
50	4.5	6.5	10.4	17.1	27.2	41.4	58.6
60	4.0	7.7	10.7	18.5	37.9	57.5	81.5
70	4.5	9.0	16.6	29.6	48.6	73.6	104.4
80	4.9	9.4	20.0	43.2	75.6	108.6	146.2
90	8.5	15.8	30.4	58.0	102.4	144.9	181.8
100	12.2	23.8	43.1	76.3	122.2	169.6	210.5
110	20.1	40.2	68.9	110.5	156.2	199.6	235.1
120	32.8	62.3	101.1	147.1	192.1	227.7	252.9
130	54.7	92.5	136.9	183.3	224.2	245.3	258.7

Πίνακας Α- 12. Εκπομπές καπνού και σωματιδίων για ελαφρύ επαγγελματικό πετρελαιοκίνητο όχημα έτους αναφοράς 2018

LCV Diesel Opacity exhaust [m ² /h] 2018							
	Gradient [%]						
v [km/h]	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
10	1.8	2.0	2.2	2.6	2.9	3.3	3.6
20	2.0	2.3	2.8	3.3	3.8	4.6	5.5
30	2.0	2.3	2.9	3.5	4.7	5.9	7.0
40	2.1	2.8	3.3	4.2	5.4	7.2	8.5
50	2.0	2.7	3.7	4.8	6.1	8.8	9.4
60	2.3	3.0	4.2	5.9	7.2	10.5	11.9
70	2.5	3.3	4.6	6.9	9.8	12.2	14.3
80	3.9	4.6	6.4	9.1	12.3	14.8	17.3
90	5.7	6.7	8.3	11.3	14.6	17.4	20.4
100	7.7	9.1	11.0	13.3	16.5	19.8	22.7
110	9.2	11.1	13.2	16.0	19.0	22.3	25.1
120	10.8	13.2	15.5	18.0	21.5	24.8	26.9
130	12.0	14.7	17.2	20.5	24.2	26.7	27.6

Πίνακας Α- 13. Εκπομπές CO για βαρύ φορτηγό πετρελαιοκίνητο όχημα έτους αναφοράς 2018

HGV Diesel CO [g/h] 2018							
	Gradient [%]						
v [km/h]	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8
10	11.7	14.1	17.3	21.0	24.3	28.0	31.3
20	10.0	11.4	17.8	22.3	26.2	30.6	35.2
30	8.7	10.1	18.3	23.9	30.6	37.8	42.3
40	5.8	8.7	18.8	26.9	37.3	48.1	55.1
50	4.1	6.2	19.3	29.4	43.2	56.8	64.8
60	3.5	6.1	19.8	34.9	53.3	62.3	67.7
70	3.6	6.1	20.3	40.3	63.1	67.8	70.6
80	3.6	6.1	20.7	45.8	73.3	77.2	76.6
90	3.6	6.1	22.2	47.0	75.7	83.1	82.4
100	3.6	6.1	22.3	49.6	78.1	88.6	88.0

Πίνακας Α- 14. Εκπομπές NO_x για βαρύ φορτηγό πετρελαιοκίνητο όχημα έτους αναφοράς 2018

HGV Diesel NO _x [g/h] 2018							
	Gradient [%]						
v [km/h]	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	14.4	14.4	14.4	14.4	14.4	14.4	14.4
10	54.2	65.7	77.2	86.5	92.7	98.4	103.8
20	41.0	55.3	76.2	88.7	98.8	104.1	111.7
30	32.4	48.5	75.2	92.7	103.1	111.0	127.6
40	23.9	41.6	69.3	105.3	119.2	141.2	174.9
50	20.0	33.1	64.2	111.8	129.8	167.1	211.7
60	16.2	24.5	62.2	122.9	182.0	247.5	301.9
70	12.3	16.3	57.5	134.0	234.2	328.0	392.1
80	12.3	16.3	57.5	145.1	286.5	408.4	482.3
90	12.3	16.3	57.5	146.6	294.6	419.5	485.4
100	12.3	16.3	57.5	151.7	304.6	428.6	488.5

Πίνακας Α- 15. Εκπομπές καπνού και σωματιδίων για βαρύ φορτηγό πετρελαιοκίνητο όχημα έτους αναφοράς 2018

HGV Diesel Opacity exhaust [m ² /h] 2018							
v [km/h]	Gradient [%]						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
10	4.3	4.9	5.6	6.3	7.1	7.9	8.6
20	3.7	4.3	5.6	6.5	7.4	8.5	9.6
30	3.5	4.1	5.6	6.8	8.4	9.9	11.3
40	3.3	3.9	5.8	8.0	10.5	12.9	15.0
50	3.1	3.7	5.8	8.6	11.9	14.9	17.5
60	3.1	3.7	6.0	9.3	14.3	19.3	22.6
70	3.1	3.8	6.3	10.1	16.7	23.6	27.7
80	3.3	3.7	6.6	12.3	19.4	28.0	32.8
90	3.5	3.9	6.6	14.4	21.7	28.5	33.1
100	3.5	3.9	6.8	15.0	23.0	29.4	33.3

Πίνακας Α- 16. Συντελεστής βελτίωσης της τεχνολογίας για επιβατικά οχήματα

f _t	CO		NO _x		Opacity	
	Gasoline	Diesel	Gasoline	Diesel	Gasoline	Diesel
2018	1	1	1	1	1	1
2020	0.91	0.92	0.85	0.87	0.98	0.76
2025	0.78	0.80	0.62	0.51	0.95	0.44
2030	0.71	0.74	0.50	0.32	0.93	0.33
2035	0.69	0.72	0.46	0.26	0.92	0.31

Πίνακας Α- 17. Συντελεστής βελτίωσης της τεχνολογίας για ελαφρύ επαγγελματικό όχημα

f _t	CO		NO _x		Opacity	
	Gasoline	Diesel	Gasoline	Diesel	Gasoline	Diesel
LCV						
2018	1	1	1	1	1	1
2020	0.80	0.77	0.70	0.82	0.92	0.75
2025	0.57	0.43	0.32	0.49	0.82	0.38
2030	0.49	0.26	0.20	0.34	0.79	0.21
2035	0.48	0.25	0.19	0.29	0.78	0.17

Πίνακας Α- 18. Συντελεστής βελτίωσης της τεχνολογίας για βαρύ φορτηγό όχημα

Year	CO	NO _x	Opacity
2018	1	1	1
2020	0.89	0.71	0.96
2025	0.76	0.34	0.92
2030	0.72	0.22	0.91
2035	0.72	0.22	0.91

Πίνακας Α- 19. Συντελεστής διόρθωσης υψομέτρου για επιβατικά οχήματα

f _h	CO		NO _x		Opacity
	Gasoline	Diesel	Gasoline	Diesel	Diesel
2018	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0
2020	1.6	1.0	1.0	1.0	1.0
2025 and later	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

Πίνακας Α- 20. Συντελεστής βάρους για βαρύ φορτηγό όχημα

Type	CO	NO _x	Opacity
15 t (e.g. single lorry, bus)	0.9	0.9	0.9
23 t (average)*	1.0	1.0	1.0
32 t (Lorry-trailer combination/semitrailer)	1.2	1.2	1.2
* average consists of 21% single lorries and 79% truck/trailer or semi-trailer combinations			

Πίνακας Α- 21. Εκπομπές παραγόμενων σωματιδίων άλλου τύπου για επιβατικά οχήματα

PC Opacity non-exhaust [m ² /h]		
v [km/h]	Bi-directional	Unidirectional
0	0	0
10	1.1	0.7
20	2.2	1.3
30	3.4	2.0
40	4.5	2.6
50	5.6	3.3
60	6.7	3.9
70	7.8	4.6
80	9.0	5.3
90	10.1	5.9
100	11.2	6.6
110	12.3	7.2
120	13.4	7.9
130	14.6	8.6

Πίνακας Α- 22. Εκπομπές παραγόμενων σωματιδίων άλλου τύπου για βαρύ φορτηγό όχημα

HGV Opacity non-exhaust [m²/h]		
v [km/h]	Bi-directional	Unidirectional
0	0	0
10	5.1	4.4
20	10.1	8.8
30	15.2	13.3
40	20.2	17.7
50	25.3	22.1
60	30.3	26.5
70	35.4	30.9
80	40.4	35.3
90	45.5	39.8
100	50.6	44.2