



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ

ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ ΕΤΟΣ : 2012-13

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΘΕΜΑ : ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΦΩΤΙΑΣ ΣΕ ΟΔΙΚΕΣ ΣΗΡΑΓΓΕΣ ΜΕ
ΜΗΧΑΝΙΚΟ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΣΜΟ**

ΕΚΠΟΝΗΣΗ

ΜΙΚΡΩΝΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΔΙΠΛ/ΧΟΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ, MSC

ΕΠΙΒΛΕΨΗ

Δρ. ΦΟΥΝΤΗ ΜΑΡΙΑ

ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ ΣΧΟΛΗΣ ΜΗΧ/ΓΩΝ ΜΗΧ/ΚΩΝ

ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2013

ΑΘΗΝΑ



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ

ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ ΕΤΟΣ : 2012-13

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΘΕΜΑ : ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΦΩΤΙΑΣ ΣΕ ΟΔΙΚΕΣ ΣΗΡΑΓΓΕΣ ΜΕ
ΜΗΧΑΝΙΚΟ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΣΜΟ**

ΕΚΠΟΝΗΣΗ

ΜΙΚΡΩΝΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΔΙΠΛ/ΧΟΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ, MSC

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Δρ. Μ. Φούντη

Καθηγήτρια

Σχολής Μηχ/γων Μηχ/κών

.....

Δρ. Α.Γ. Μπουντουβής

Καθηγητής & Κοσμήτορας

Σχολής Χημικών Μηχ/κών

.....

Δρ. Χ. Κυρανούδης

Καθηγητής

Σχολής Χημικών Μηχ/κών

.....

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	1
Περίληψη	2
Abstract	6
1.....	8
1. Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	8
1.1 Τεχνολογία σήραγγων.....	8
1.2 Είδη αερισμού.....	14
1.3 Διαστασιολόγηση συστημάτων αερισμού.....	22
1.4 Επιλογή συστημάτων αερισμού στον ελλαδικό χώρο.....	23
2.....	27
2. Είδη πυρκαγιών & μοντελοποίηση.....	27
2.1 Πυρκαγιές σε οδικές σήραγγες.....	27
2.2 Απλοποιημένα μοντέλα πυρκαγιών	31
2.3 Βασικά μοντέλα.....	32
2.4 Πειράματα και προσομοιώσεις σε Η/Υ.....	38
2.5 Βασικά μεγέθη μοντελοποίησης πυρκαγιών.....	45
2.6 Κατηγορίες – διαστάσεις φλόγας	47
3.....	55
3. Το λογισμικό FDS.....	55
3.1 Δομή του λογισμικού FDS	55
3.2 Μαθηματικό μοντέλο.....	57
4.....	68
4. Πιστοποίηση FDS σε σήραγγα ορθογωνικής διατομής περιορισμένου μήκους.....	68
4.1 Γεωμετρία σήραγγας.....	68
4.2 Παραμετρική μελέτη.....	70
4.3 Οριακές Συνθήκες - Παραδοχές.....	71
4.4 Διαγράμματα θερμοκρασίας	73
4.5 Διαγράμματα συγκέντρωσης τοξικών ρύπων.....	74
4.6 Διαγράμματα παραμετρικής ανάλυσης εκπομπών τοξικών ρύπων	77
4.7 Συζήτηση – σχολιασμός	81

5.....	83
5. Πιστοποίηση FDS για μεγάλες σήραγγες	83
5.1 Γεωμετρία σήραγγας.....	83
5.2 Πειραματική διάταξη	84
5.3 Διακριτοποίηση – υπολογιστική διάταξη	86
5.4 Παραμετρική μελέτη.....	88
5.5 Αποτελέσματα.....	91
5.6 Ακρίβεια σχήματος - σύγκλιση.....	117
5.7 Συμπεράσματα - Σχολιασμός	121
6.....	125
6. Προσομοίωση FDS σε σήραγγα του ελλαδικού χώρου	125
6.1 Η Εγνατία Οδός	125
6.2 Οι σήραγγες της Εγνατίας Οδού	127
6.3 Γεωμετρία και εξοπλισμός σήραγγας	127
6.4 Σενάρια πυρκαγιάς.....	130
6.5 Διακριτοποίηση – υπολογιστική διάταξη	131
6.6 Παραμετρική μελέτη.....	132
6.7 Αποτελέσματα.....	134
6.8 Σύγκλιση	150
6.9 Συμπεράσματα - Σχολιασμός	153
7.....	156
7. Επίδραση φωτιάς – επικινδυνότητα.....	156
7.1 Βασικοί ορισμοί	156
7.2 Επίδραση στον άνθρωπο	157
7.2.1 Επίδραση θερμότητας.....	157
7.2.2 Επίδραση τοξικών ρύπων.....	161
7.2.3 Επίδραση μη-τοξικών ρύπων	163
7.3 Επίδραση στην κατασκευή.....	163
7.4 Αποτελέσματα επιφανειακής θερμοκρασίας.....	167
8.....	171
8. Διαδικασία Εκκένωσης.....	171

8.1	Εκκένωση με ίδια μέσα - αυτοδιάσωση	171
8.2	Το λογισμικό FDS+Evac	172
8.3	Μαθηματική περιγραφή - Βασικές παράμετροι.....	173
8.4	Διακριτοποίηση.....	177
8.5	Αποτελέσματα.....	179
8.6	Ανάλυση ευαισθησίας – Ακρίβεια	187
8.7	Συζήτηση – σχολιασμός	189
8.8	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	190
9.....		191
9.	Προσομοίωση μεγάλης φωτιάς με χρήση του λογισμικού PHOENICS.....	191
9.1	Δομή του λογισμικού PHOENICS.....	191
9.2	Μαθηματική περιγραφή.....	193
9.3	Γεωμετρία σήραγγας.....	195
9.4	Οριακές & Αρχικές συνθήκες	196
9.5	Διακριτοποίηση – υπολογιστική διάταξη	196
9.6	Τεχνικές υποχαλάρωσης.....	200
9.7	Παραμετρική μελέτη.....	201
9.8	Αποτελέσματα.....	203
9.9	Συμπεράσματα - Σχολιασμός	220
10.....		223
10.	Συμπεράσματα.....	223
11.....		226
	Βιβλιογραφία	226
Π-1.	Παράρτημα Ι.....	232
	Τεχνικά χαρακτηριστικά συστήματος διαμήκους αερισμού	232
Π-2.	Παράρτημα ΙΙ.....	237
	Αρχείο εισόδου FDS για προσομοίωση φωτιάς μικρής ισχύος σε μικρή σήραγγα.....	237
Π-3.	Παράρτημα ΙΙΙ.....	244
	Αρχείο εισόδου FDS για προσομοίωση φωτιάς μικρής ισχύος σε μεγάλη σήραγγα	244
Π-4.	Παράρτημα ΙV	251
	Αρχείο εισόδου FDS για προσομοίωση φωτιάς σε σήραγγα Εγνατίας Οδού	251

Π-5. Παράρτημα V	265
Προσάρτημα αρχείου εισόδου FDS + Evac για την εκκένωση χρηστών.....	265

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την Δρ. Φούντη Μαρία υπεύθυνη του Εργαστηρίου Ετερογενών Μιγμάτων και Συστημάτων Καύσης του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ για την ανάθεση της εργασίας και την ενθάρρυνση της.

Τον Δρ. Νικόλαο Χ. Μαρκάτο για την πολύτιμη βοήθεια του στη διαμόρφωση του αρχείου εισόδου στο λογισμικό PHOENICS που χρησιμοποιήθηκε συμπληρωματικά για τις ανάγκες της εργασίας

Επίσης τον Δρ. Κολαΐτη Διονύσιο μεταδιδακτορικό ερευνητή για την πολύτιμη βοήθεια του και τον χρόνο που αφιέρωσε στον καθορισμό των αρχείων εισόδου του λογισμικού FDS, στις διορθώσεις και στη συνολική καθοδήγηση του.

Επίσης ευχαριστώ πολύ τον συνάδελφο Καραλή Κωνσταντίνο Διπλ. Μηχανικό Μεταλλείων Υ.Δ, για την από κοινού εκπόνηση σημαντικού τμήματος της εργασίας στα πλαίσια του εξαμηνιαίου μαθήματος «Υπολογιστικές Μέθοδοι σε Πολυφασικά – Πολυσυστατικά – Αντιδρώντα Συστήματα» που διδάσκεται στο εαρινό ακαδημαϊκό εξάμηνο σπουδών του ΔΠΜΣ «Υπολογιστική Μηχανική» και την διάθεση σύγχρονων Η/Υ για την εκτέλεση των απαιτητικών προσομοιώσεων.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συναδέλφους μηχανικούς Ευάγγελο Γαρμπή και Κωνσταντίνο Καπελάνο της αναδόχου εταιρείας IONIOΣ ΑΕ για την ευκαιρία που μου έδωσαν να εργαστώ στο συναρπαστικό έργο κατασκευής της Εγνατίας Οδού στο τμήμα Γρεβενών – Μετσόβου και για την διάθεση των τεχνικών στοιχείων για τις επιμέρους ανάγκες της προσομοίωσης.

Η παρούσα εργασία αφιερώνεται στην οικογένεια μου και την σύντροφο μου Κωνσταντίνα.

Κ.Θ. Μικρώνης

Νοέμβριος 2013

Περίληψη

Η παρούσα εργασία παρουσιάζεται στα πλαίσια των απαιτήσεων για την απονομή Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης (ΜΔΕ) σύμφωνα με τον κανονισμό του ΔΠΜΣ «Υπολογιστική Μηχανική» του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Η εργασία πραγματεύεται τη εφαρμογή του λογισμικού υπολογιστικής ρευστοδυναμικής FDS για την περιγραφή των μεγεθών κατά τη χρονική εξέλιξη πυρκαγιάς σε οδικές σήραγγες υπό συνθήκες φυσικού και μηχανικού αερισμού.

Η εργασία αποτελείται από εννέα (9) Κεφάλαια και πέντε (5) Παραρτήματα. Η διάρθρωση των επιμέρους κεφαλαίων αποτελείται από :

Στο πρώτο κεφάλαιο, αναφέρονται καταρχήν επιγραμματικά η τεχνολογία διάνοιξης σιράγγων με μηχανικά μέσα, τα βασικά είδη συστημάτων αερισμού και του βασικού τεχνολογικού εξοπλισμού ασφαλείας των οδικών σιράγγων στο Διεθνή και Ευρωπαϊκό χώρο με βάση τους ευρωπαϊκούς κανονισμούς και τις κατευθυντήριες οδηγίες εγκεκριμένων οργανισμών όπως η Διεθνής Ένωση Οδοποιίας (PIARC).

Στο δεύτερο κεφάλαιο, γίνεται μια ιστορική αναδρομή στα κυριότερα οδικά ατυχήματα που έχουν συμβεί σε οδικές σήραγγες του ευρωπαϊκού δικτύου τα προηγούμενα 20 έτη, καθώς και βιβλιογραφική ανασκόπηση στα σημαντικότερα φυσικά μεγέθη και τη μαθηματική μοντελοποίηση τους με χρήση απλών προτύπων για την χρονική εξέλιξη της πυρκαγιάς στο εσωτερικό σιράγγων. Περιγράφεται μέσω αναλυτικών σχέσεων το γραμμικό, πολυωνυμικό και εκθετικό πρότυπο που υιοθετείται από επιμέρους εθνικές επιτροπές για την πρόβλεψη του θερμοκρασιακού πεδίου. Στη συνέχεια δίδονται πληροφορίες γύρω από τις σημαντικότερες ερευνητικές εργασίες σε πειραματικό και υπολογιστικό επίπεδο σε μοντέλα πλήρους κλίμακας (full scale) αλλά και υπό κλίμακα εντός εργαστηριακών διατάξεων (κυρίως σε αεροσήραγγες) για την μελέτη του φαινομένου έναυσης και διάδοσης της φωτιάς. Αναφέρονται τα βασικά λογισμικά υπολογιστικής ρευστοδυναμικής που βασίζονται σε μοντέλα μέσω εξισώσεων Reynolds (RANS) και προσομοίωσης μεγάλων δινών (Large Eddy Simulation - LES) για την ανάλυση και την πρόβλεψη των φαινομένων φωτιάς με τη βοήθεια H/Y.

Στο τρίτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η βασική δομή και οι επιμέρους δυνατότητες του λογισμικού FDS που χρησιμοποιείται για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας με χρήση του μοντέλου τύρβης Προσομοίωσης Μεγάλων Δινών. Ιδιαίτερη έμφαση δίδεται στη μαθηματική περιγραφή του αλγόριθμου επίλυσης καθώς και στις εξισώσεις διατήρησης, μοντέλου καύσης ακτινοβολίας και χημικών συστατικών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται το προς μοντελοποίηση πρόβλημα χρονικής εξέλιξης πυρκαγιάς μικρής ισχύος (1.6- 3.2 MW) σε πραγματική σήραγγα περιορισμένων διαστάσεων (88m) ορθογωνικής διατομής υπό συνθήκες φυσικού αερισμού. Δίδεται διεξοδικά η γεωμετρία, η διακριτοποίηση του πλέγματος και οι εφαρμοζόμενες οριακές συνθήκες, το κλάσμα ακτινοβολίας του μοντέλου εξέλιξης πυρκαγιάς και οι παραδοχές για τις εκπομπές παραγωγής τοξικών ρύπων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα της προσομοίωσης με πειραματικά και υπολογιστικά αποτελέσματα της βιβλιογραφίας. Τα μεγέθη που εξετάστηκαν αφορούν την χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης μονοξειδίου του άνθρακα (CO) κατά μήκος της σήραγγας και την σύγκριση με τις μετρήσεις από την βιβλιογραφική έρευνα των Hu et al. (2007). Στη συνέχεια αναφέρονται τα πιθανά αίτια για τις παρατηρούμενες αποκλίσεις, καθώς επίσης και προτάσεις για την περαιτέρω βελτίωση της πρόλεξης της προσομοίωσης

Στο πέμπτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται το προς μοντελοποίηση πρόβλημα χρονικής εξέλιξης πυρκαγιάς μικρής ισχύος (1.6- 3.2 MW) σε πραγματική σήραγγα μεγάλων διαστάσεων ημικυκλικής διατομής υπό συνθήκες μηχανικού αερισμού. Δίδεται διεξοδικά η τελική γεωμετρία, η διακριτοποίηση του πλέγματος και οι εφαρμοζόμενες οριακές συνθήκες, το κλάσμα ακτινοβολίας του μοντέλου εξέλιξης πυρκαγιάς. Με χρήση παραμετρικής μελέτης ως προς το μέγεθος του πλέγματος επίλυση, παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα της προσομοίωσης με βιβλιογραφικές αναφορές. Το μέγεθος που εξετάστηκε είναι η χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας κατά μήκος της σήραγγας και την σύγκριση με τις πειραματικές μετρήσεις και εμπειρικές σχέσεις από την βιβλιογραφική έρευνα των Hu et al. (2007). Στη συνέχεια αναφέρονται τα πιθανά αίτια για τις παρατηρούμενες αποκλίσεις, καθώς επίσης και προτάσεις για την περαιτέρω βελτίωση της πρόλεξης της προσομοίωσης

Στο έκτο κεφάλαιο, μετά την παραμετρική μελέτη πιστοποίησης του λογισμικού που προηγήθηκε στα προηγούμενα δυο κεφάλαια, χρησιμοποιείται το λογισμικό FDS για την πρόβλεψη του ροϊκού και θερμοκρασιακού πεδίου καθώς και της κατανομής συγκεντρώσεων κατά μήκος σήραγγας μεγάλων διαστάσεων που βρίσκεται στον Ελλαδικό χώρο υπό συνθήκες μηχανικού αερισμού με

διαδοχική ενεργοποίηση των ανεμιστήρων ώσης. Υιοθετώντας το απλό γραμμικό μοντέλο εξέλιξης σύμφωνα με τους Γαλλικούς Κανονισμούς επιλέγονται εναλλακτικά σενάρια για διάφορα μεγέθη πυρκαγιάς (30 – 150 MW) που αντιστοιχούν σε συγκρούσεις οχημάτων, φορτηγών και βυτιοφόρων στο εσωτερικό οδικών σηράγγων. Οι προλέξεις θερμοκρασίας στην οροφή και στο επίπεδο κυκλοφορίας συγκρίνονται με ημι-εμπειρικές σχέσεις της βιβλιογραφίας καθώς και με πειραματικές τιμές που έχουν παρατηρηθεί σε μετρήσεις πλήρους κλίμακας.

Στο έβδομο κεφάλαιο, αναφέρονται οι επιδράσεις της έκλυσης θερμότητας και τοξικών αέριων ρύπων στον άνθρωπο και στον τεχνολογικό εξοπλισμό της σήραγγας. Αρχικά επεξηγείται η επίδραση της θερμικής έντασης στον ανθρώπινο οργανισμό μέσω των μηχανισμών ακτινοβολίας και συναγωγής και τα κρίσιμα όρια έκθεσης με βάση οδηγίες και συστάσεις της Νομοθεσίας. Στη συνέχεια αναλύονται ανάλογα οι επιδράσεις των τοξικών αέριων ρύπων (κύρια του μονοξειδίου άνθρακα (CO)) μέσω της πρόσληψης από την αναπνευστική οδό. Δίδονται ο μηχανισμός μεταφοράς και απορρόφησης του στο αίμα και αποθήκευσης στα ζωτικά όργανα και στους περιφερειακούς ιστούς, οι οριακές τιμές έκθεσης. Τέλος αναφέρεται η επίδραση της θερμότητας στα δομικά μέρη της σήραγγας με βάση τη Ευρωπαϊκή Νομοθεσία, καθώς απαριθμούνται τα ανώτατα όρια θερμοκρασίας προκειμένου να μην υποστούν ανεπανόρθωτη βλάβη ή πιθανή κατάρρευση τα δομικά και μηχανολογικά μέρη της σήραγγας.

Στο όγδοο κεφάλαιο, προσομοιώνεται η εκκένωση της σήραγγας σε ένα υποθετικό σενάριο πυρκαγιάς με βάση το προσάρτημα του FDS+Evac. Αρχικά περιγράφεται το μαθηματικό μοντέλο των εξισώσεων κίνησης, των πιθανών συγκρούσεων μεταξύ των διαφορετικών χρηστών και τοιχωμάτων, και ο χρόνος αντίδρασης τους σε έκτακτα περιστατικά. Στη συνέχεια οι χρήστες κατατάσσονται σε επιμέρους κατηγορίες, καταστρώνεται υπολογιστικό πλέγμα, επιβάλλονται αντίστοιχες οριακές συνθήκες και εξετάζεται η ικανότητα διαφυγής υπό δυσμενείς συνθήκες μειωμένης ορατότητας και παρουσίας στρώματος καπνού, η έκθεση τους στις αυξημένες συγκεντρώσεις ρύπων και έντασης θερμικής ακτινοβολίας.

Στο ένατο κεφάλαιο, προσομοιώνεται φωτιά συνολικής ισχύος 30 – 50 MW με βάση το γραμμικό πρότυπο ανάπτυξης με τη βοήθεια του λογισμικού PHOENICS που βασίζεται στο μοντέλο τύρβης k-ε. Τα αποτελέσματα κατανομής ταχύτητας, θερμοκρασίας και ανυσμάτων ταχύτητας κατά μήκος και καθ' ύψος της σήραγγας συγκρίνονται με τις προλέξεις του λογισμικού FDS που αναλύθηκε διεξοδικά στο έκτο κεφάλαιο.

Στο δέκατο κεφάλαιο, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εκπόνηση της εργασίας καθώς και υποδείξεις για περαιτέρω εμβάθυνση και έρευνα με τη χρήση H/Y σε ειδικά θέματα.

Στο ενδέκατο κεφάλαιο, παρουσιάζεται ο κατάλογος των βιβλιογραφικών πηγών που χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας.

Στο Παράρτημα I, παρουσιάζονται τα τυπικά τεχνικά χαρακτηριστικά του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού διαμήκους εξαερισμού μιας οδικής σήραγγας στον Ελλαδικό χώρο (Εγνατία Οδός).

Στο Παράρτημα II, παρουσιάζεται το αρχείο εισόδου που χρησιμοποιήθηκε για την πιστοποίηση του λογισμικού FDS με πειραματικά αποτελέσματα σε σήραγγα μήκους 88m για μέγεθος πυρκαγιάς 0.75MW υπό συνθήκες φυσικού αερισμού

Στο Παράρτημα III, παρουσιάζεται το αρχείο εισόδου που χρησιμοποιήθηκε για την πιστοποίηση του λογισμικού FDS σε σήραγγα μήκους 1036.80m για μέγεθος πυρκαγιάς 1.8 – 3.2 MW υπό συνθήκες μηχανικού αερισμού.

Στο Παράρτημα IV παρουσιάζεται το αρχείο εισόδου FDS που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του πεδίου συγκέντρωσης και θερμοκρασίας κατά την χρονική εξέλιξης σεναρίου πυρκαγιάς σε οδική σήραγγα της Εγνατίας Οδού υπό συνθήκες μηχανικού αερισμού.

Στο Παράρτημα V παρουσιάζεται το προσάρτημα του αρχείου εισόδου FDS+Enac που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση εκκένωσης των χρηστών κατά το σενάριο διαφυγής τους

Αθήνα, Νοέμβριος 2013

Κ. Θ. Μικρώνης

Abstract

A numerical simulation of tunnel fire in large road tunnel using computational fluid dynamics (CFD) software has been presented in the Master Thesis dissertation. The dissertation is submitted as a partial fulfillment for the Master (Msc) Degree in Computational Mechanics awarded from National Technical University of Athens (NTUA).

Road tunnel fire accidents held in Trans European road network – mainly in Alpine routes – were responsible for many fatal casualties, injuries and deterioration in infrastructures. This cause triggered European Community to take action running EU Projects (EUREKA) and implement inspections and take precautions in order to strengthen road safety and minimize fatalities in future.

Fire growth in passenger car collision or Heavy Good Vehicle (HGV) trailers could be categorized using simple time curves such linear, quadratic and exponential model and imported in most commercial CFD packages. Tunnel fires using computational tools are well documented in vast literature in last two decades. Small and full scale experiments are held using various fire input sizes to capture most important fire characteristics such heat release rates (HRR), temperature and toxic gas concentration distribution, smoke stratification and critical velocities.

In the present study, the Fire Dynamics Simulator (FDS) developed and distributed by NIST has been selected for tunnel simulation. The initial goal is to validate the code using parametric study in small scale fire test. An 88.0m tunnel of rectangular cross sectional area has been selected. Temperature and concentration field measurements along tunnel ceiling are compared to FDS predictions for various cell sizes. A 0.75 MW fire spot was located near tunnel front.

The next step was to validate FDS in full scale experiments of 1.8 – 3.2 MW fire tests held in 1036m tunnel in Southern China. A forced ventilation strategy was activated that maintain stable local critical velocity of 0.6 – 1.0 m/s to avoid backlayering.

In the last step, a typical - semi-circular cross sectional area - 700m road tunnel in Egnatia Motorway in Northern Greece has been selected for fire and evacuation modeling using FDS. Temperature and concentration field have been computed for various fire sizes (30 – 100MW) in case of longitudinally forced ventilation strategy along tunnel axis. Due to lack of experimental measurements FDS predictions are compared to semi-empirical relation that adopted in most EU safety directives.

Occupant behavior is modeled using add-on tool +Evac. Evacuation route, exit velocity and interaction forces for each individual is selected according to literature. Coefficients that proof exit values taking into advance the reduced visibility and toxic gas concentration.

All above output results come from parametric CFD numerical simulation could be an invaluable tool for local authorities to evaluate existing tunnel safety and to take into account for upgrade or construction of new tunnels.

Dinos Mikronis

Athens,

November 2013

1

1. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

1.1 Τεχνολογία σιράγγων

Οι σήραγγες είναι υπόγεια έργα που χαρακτηρίζονται από σταθερή διατομή, συνήθως κυκλική ή πεταλοειδή. Εξυπηρετούν διάφορους σκοπούς όπως συγκοινωνιακές (οδικές, σιδηροδρομικές), αρδευτικές και βιομηχανικές (αγωγοί σε υδροηλεκτρικά φράγματα) εφαρμογές.

Η τεχνική κατασκευής λαμβάνοντας υπόψη τις σύγχρονες τεχνολογικές εξελίξεις βρίσκεται σε κρίσιμη καμπή και αποτελεί σημείο αναφοράς στα έργα Πολιτικού Μηχανικού. Από τη μία η απαίτηση για ασφαλέστερες συνθήκες λειτουργίας και συντήρησης, και από την άλλη η ανάγκη και γρηγορότερες και οικονομικότερες λύσεις έδωσαν νέα ώθηση στις εφαρμοζόμενες μεθόδους, που μπορούν να καταταγούν σε δυο μεγάλες κατηγορίες διάνοιξης :

- Με χρήση εκρηκτικών
- Με μηχανικά μέσα

Η απόφαση για την επιλογή της κάθε μεθόδου λαμβάνει υπόψη παράγοντες όπως τα γεωλογικά και πετρογραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης, η θέση (αστική / υπαίθρια) του έργου, ο διαθέσιμος ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός, η πρόσβαση σε δίκτυα Οργανισμών Κοινής Ωφέλειας (ΟΚΩ), η οργάνωση και εποπτεία των εργασιών, κ.τ.λ. Στη συνέχεια γίνεται μια σύντομη αναφορά στους κυριότερους τύπους διάνοιξης αναφέροντας επιγραμματικά το πεδίο εφαρμογής και τα πλεονεκτήματα / μειονεκτήματα της [3].

Διάνοξη με χρήση εκρηκτικών

Η χρήση εκρηκτικών έγκειται στην τοποθέτηση εκρηκτικών υλών εντός συγκεκριμένου καννάβου οπών (Εικόνα – 2), την σύνδεση και πυροδότηση τους για προσβολή του μετώπου. Το βήμα προσχώρησης ανά πυροδότησης ποικίλλει ανάλογα με την κατηγορία της βραχομάζας και κυμαίνεται από 1.0 – 4.0m σε κάθε φάση πυροδότησης.

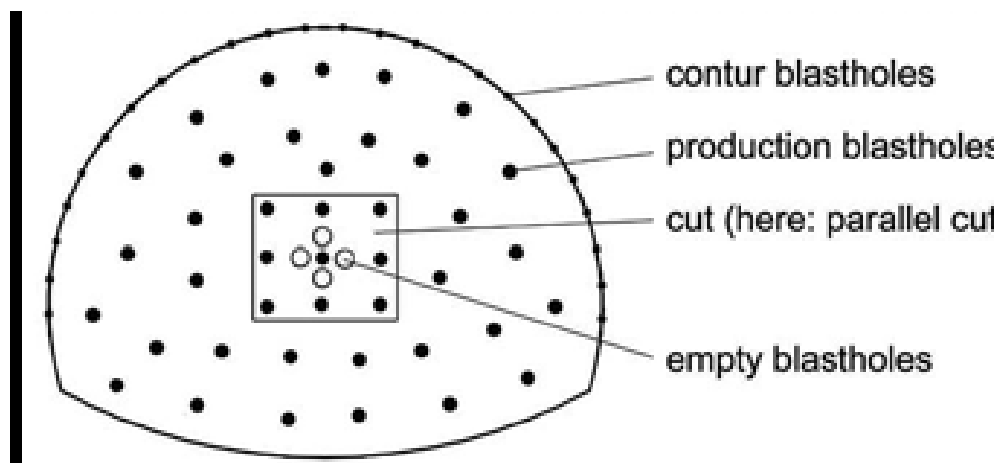
Μετά την καθαίρεση της διατομής από φερτά και χαλαρά υλικά, ακολουθούν μέτρα άμεσης υποστήριξης που περιλαμβάνουν την τοποθέτηση μεταλλικού πλέγματος, την εφαρμογή εκτοξευμένου σκυροδέματος (gunite), την κάθετη εφαρμογή ηλώσεων βράχου διαφόρων τύπων (αυτοεκτονούμενα, προεντεταμένα, με τσιμεντένεμα), την τοποθέτηση μεταλλικών δικτυωτών πλαισίων (lattice girder), δοκών προπορείας (fore polling).

Οι συνηθέστεροι χρησιμοποιούμενοι τύποι εκρηκτικών υλών είναι οι ζελατινοδυναμίτιδα με βάση το νιτρικό αμμώνιο και το TNT υπό μορφή φυσιγγίων (Εικόνα -1) και τα εκρηκτικά γαλακτώματα (emulsion explosion slurries).

Τα μέσα έναυσης [4] περιλαμβάνουν μη-ηλεκτρικούς πυροκροτητές με διαφορετικό χρόνο επιβράδυνσης, ακαριαία θρυαλλίδα με ισχυρή εκρηκτική ύλη PETN, βραδύκαυστη θρυαλλίδα ασφαλείας με επικάλυψη πυρίτιδας και κοινούς πυροκροτητές (καψύλια).



Εικόνα 1- Εκρηκτική ύλη υπό μορφή φυσιγγίων



Εικόνα 2 - Κάνναβος διάτρησης

Η εργασία διάτρησης του μετώπου πραγματοποιείται με τη βοήθεια ειδικού μηχανολογικού εξοπλισμού [2] (διατρητικά φορεία – βλέπε Εικόνα – 3), τα δε μέτρα υποστήριξης από αυτόματα τηλεχειριζόμενα φορεία εκτοξευμένου σκυροδέματος. Η καθαίρεση και μεταφορά χαλαρών τμημάτων γίνεται με τη βοήθεια συνήθους εξοπλισμού όπως αρθρωτών εκσκαφέων, προωθητών γαιών, ελαστιχοφόρων φορτωτών, και ανατρεπόμενων τετραζονικών φορτηγών.



Εικόνα 3 - Διατρητικό φορείο τύπου Jumbo [2]

Διάνοιξη με μηχανικά μέσα

Η διάνοιξη σιηράγγων χωρίς τη χρήση εκρηκτικών σύμφωνα με την παρούσα τεχνολογική εξέλιξη, περιλαμβάνει τρεις βασικούς τύπους μηχανών [1,3]:

- Μηχανές ολομέτωπης κοπής (Tunnel Boring Machines – TBM)
- Μηχανές σημειακής κοπής (Road Header)
- Μηχανές μικρής διαμέτρου (Microtunneling)

Οι μηχανές ολομέτωπης κοπής (TBM) (βλέπε Εικόνα – 4) και οι ασπίδες τους χρησιμοποιούνται για τη διάνοιξη μέσα από διαφορετικούς γεωλογικούς σχηματισμούς. Είναι το ίδιο αποτελεσματικές για σκληρά και χαλαρά εδάφη. Οι διάμετροι διάνοιξης κυμαίνονται από 1-15m ενώ οι ταχύτητες ανάλογα με τις γεωλογικές συνθήκες από μερικά cm έως και 130m/εβδομάδα.



Εικόνα 4 - Μηχάνημα Ολομέτωπης Κοπής

Για την κατασκευή σιηράγγων μεγάλης διαμέτρου χρησιμοποιούνται επίσης τα εξής συστήματα :

- Μηχανική διάτρηση όλης της διατομής με μηχανές ανοικτού τύπου, για σκληρά εδάφη
- Μηχανική διάτρηση όλης της διατομής με μηχανές απλής ή διπλής ασπίδας τηλεσκοπικού τύπου, για μαλακά εδάφη
- Μηχανική διάτρηση με οδηγητική σήραγγα (pilot tunnel)
- Μηχανική διάτρηση με απλό ή πολλαπλό μηχανήμα σημειακής κοπής

Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα των Μεθόδων

A. Μηχανήματα Ολομέτωπης Κοπής

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα είναι τα ακόλουθα :

- Η ταχύτητα προσχώρησης είναι μεγάλη, ιδιαίτερα σε μαλακά εδάφη
- Τα περιβάλλοντα πετρώματα καθώς και η προς εξόρυξη βραχομάζα παραμένουν αδιατάρακτα
- Δεν απαιτείται συνήθως πρόσθετη εργασία για τη περαιτέρω διαμόρφωση της διατομής εκσκαφής
- Απαιτείται λιγότερο προσωπικό ανά βάρδια
- Υπάρχει υψηλότερη ασφάλεια για τους εργαζόμενους κοντά στο μέτωπο εκσκαφής
- Η διαδικασία είναι πλήρως αυτοματοποιημένη και δεν υπάρχουν διακοπές για την εφαρμογή μέτρων υποστήριξης στον θόλο της στοάς.
- Υπάρχουν μειωμένες εκπομπές σκόνης και χαμηλό επίπεδο κραδασμών
- Υπάρχει καλύτερος προγραμματισμός για την πρόβλεψη ολοκλήρωσης του χρονοδιαγράμματος εργασιών

Από την άλλη μεριά τα βασικά μειονεκτήματα εφαρμογής της μεθόδου είναι :

- Η αρχική υψηλή επένδυση κεφαλαίου για τον (κατά παραγγελία) εξοπλισμό
- Ο μεγάλος χρόνος παράδοσης
- Η μικρή ευκινησία και ο μεγάλος χρόνος προετοιμασίας – εγκατάστασης
- Η χαμηλή ευελιξία σε μεταβαλλόμενες συνθήκες (αλλαγή πετρώματος / υδροφορία)
- Η χαμηλή απόδοση ή και αδυναμία εξόρυξης σε σκληρά πετρώματα
- Η σχετική μικρή υπολειμματική αξία και η χαμηλή τιμή μεταπώλησης μετά το πέρας των εργασιών.

Στο ελλαδικό χώρο μηχανήματα ολομέτωπης κοπής χρησιμοποιούνται στην κατασκευή σηράγγων του μητροπολιτικού σιδηροδρομικού δικτύου στην Αθήνα και στην Θεσσαλονίκη [5] εξαιτίας της φύσης του έργου, της σχεδόν κυκλικής διατομής, την αυτοματοποίηση κατασκευής υποδομής και

επιδομής (στρωτήρες, μεταλλικά πλαίσια), σιδηροδρομικές ράγες) και της υψηλής παραγωγικότητας σε σχετικά ομοιόμορφο ανάγλυφο. Αντίθετα η πλειοψηφία των οδικών σηράγγων (Εγνατία – Αττική Οδός) διανοίχτηκαν με χρήση εκρηκτικών εξαιτίας των μειωμένων απαιτήσεων σε ηλεκτρική ισχύ, του έντονου ανάγλυφου των ορεινών όγκων, της ημικυκλικής διατομής, αλλά και της αδυναμίας μεταφοράς εξαρτημάτων μεγάλων διαστάσεων και βάρους που απαιτούνται για την τελική συναρμολόγηση των Μηχανών Ολομέτωπης Κοπής.

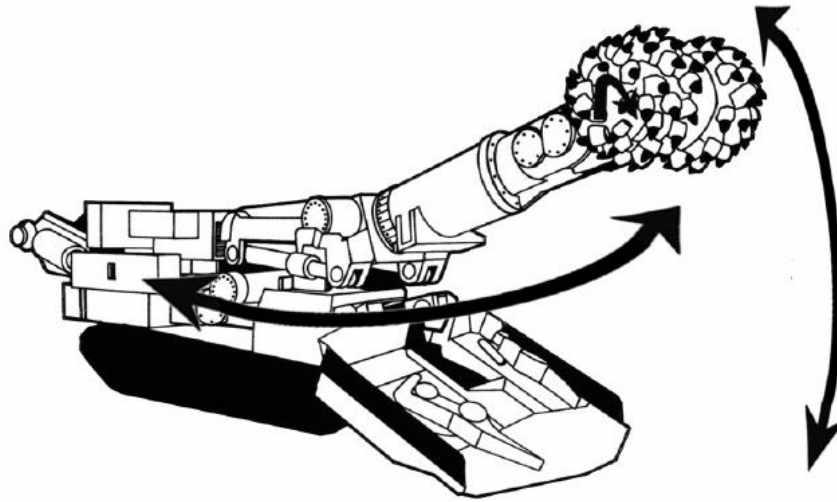
B. Μηχανήματα Σημειακής Κοπής (βλέπε Εικόνα – 5)

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα είναι τα ακόλουθα :

- Παρέχουν ευελιξία καθώς μπορούν να παράγουν σχετικά μεγάλη ποικιλία διατομών σε σχέση με τα TBM που παράγουν κυκλικές διατομές
- Προκαλεί μικρότερη διαταραχή του περιβάλλοντος πετρώματος (υπερκείμενες στρώσεις) σε σχέση με τη μέθοδο διάτρησης – ανατίναξης (drill & blast).
- Απαιτείται κλάσμα της επένδυσης κεφαλαίου (της τάξης του 15-30% του κόστους TBM) για την απόκτηση του εξοπλισμού
- Οι χρόνοι παράδοσης για καινούργιο μηχάνημα είναι της τάξης των 3-6 μηνών
- Είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν για διασταυρούμενες (συνδετήριες) σήραγγες

Από την άλλη μεριά τα βασικά μειονεκτήματα εφαρμογής της μεθόδου είναι :

- Ο χρόνος εκσκαφής είναι σημαντικά μεγαλύτερος σε σχέση τον αντίστοιχο του TBM
- Η επιφάνεια του μετώπου δεν παραμένει λεία κατά τη διάρκεια των εργασιών με αποτέλεσμα να απαιτείται πρόσθετη απόξεση για τη τελική διαμόρφωση
- Η εργασία είναι ασυνεχής με συνεχή παραγωγή σκόνης με επιβαρυμένη ατμόσφαιρα



Εικόνα 5 - Μηχάνημα Σημειακής Κοπής

1.2 Είδη αερισμού

Όλες οι οδικές σήραγγες απαιτούν αερισμό, που να ανταποκρίνεται τόσο σε συνθήκες ομαλής κυκλοφοριακής ροής, κυκλοφοριακής συμφόρησης αλλά και σε έκτακτες περιπτώσεις εκκένωσης και πυρκαγιάς. Ο αερισμός κρίνεται απαραίτητος βάσει Ευρωπαϊκής Νομοθεσίας [13] και κατευθυντήριων οδηγιών (Guidelines) [14-18] που εκπονήθηκαν από τις αντίστοιχες εθνικές επιτροπές των κρατών – μελών έτσι ώστε να απομακρύνουν τις εκπομπές ρύπων που προέρχονται από τα διερχόμενα οχήματα και να ρυθμίζουν τις συγκεντρώσεις εντός των επιτρεπόμενων ορίων. Παράλληλα σε έκτακτες περιπτώσεις να είναι σε θέση να εξασφαλίζει την ελάχιστη κρίσιμη ταχύτητα ώστε να απομακρύνεται ο καπνός και τα συγκεκριμένα ασφαλή επίπεδα ορατότητας προς τις εξόδους διαφυγής. Τα συστήματα αερισμού ανήκουν σε δυο μεγάλες κατηγορίες [6]:

- (α) Συστήματα φυσικού αερισμού
- (β) Συστήματα μηχανικού αερισμού

Ο φυσικός αερισμός κρίνεται καταλληλότερος για σήραγγες μικρού μήκους και χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου. Αντίθετα για μεγάλες σήραγγες με μέτριο / υψηλό κυκλοφοριακό φόρτο επιλέγεται ο μηχανικός αερισμός.

(α) Συστήματα φυσικού αερισμού

Η λειτουργία του συγκεκριμένου συστήματος βασίζεται πρωτίστως στις εκάστοτε μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν στο εξωτερικό περιβάλλον ώστε να επιτευχθούν οι ικανοποιητικές συνθήκες στο εσωτερικό της σήραγγας, σύμφωνα με τις προδιαγραφές της μελέτης.

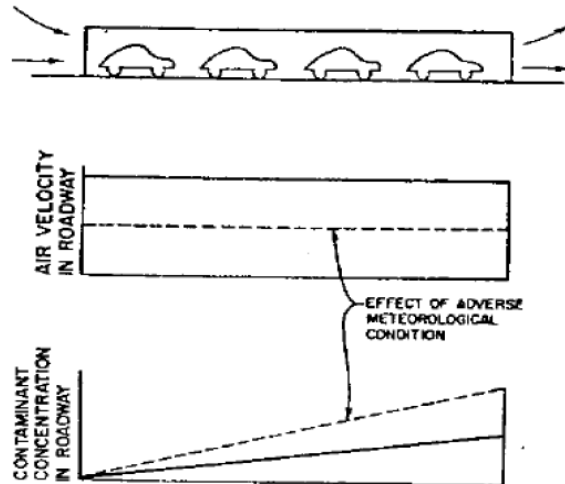
Οι πιο σημαντικές συνθήκες είναι η διαφορά πίεσης ανάμεσα στα δυο στόμια εισόδου και εξόδου εξαιτίας της υψομετρικής διαφοράς, είτε λόγω διαφοράς θερμοκρασίας είτε λόγω κίνησης ανέμου.

Επιπρόσθετα λόγω της κίνησης των οχημάτων στο εσωτερικό της, προκαλείται επιπλέον κίνηση του αέρα σύμφωνα με το φαινόμενο του εμβόλου.

Δυστυχώς όμως κανένα από τα παραπάνω φυσικά μεγέθη δεν είναι σταθερό ως προς το χρόνο. Έτσι λοιπόν είναι δυνατόν για παράδειγμα μία απότομη μεταβολή της ταχύτητας ή διεύθυνσης του ανέμου σε κάποιο από τα στόμια να ανατρέψει πλήρως τον σχεδιασμό στο εσωτερικό της σήραγγας. Επιπλέον δεν υπάρχει ταχεία απομάκρυνση του καπνού και των παραγόμενων τοξικών ρύπων σε περίπτωση πυρκαγιάς.

Το ολικό άθροισμα των πιέσεων θα πρέπει να υπερνικήσει την αντίσταση της σήραγγας, η οποία εξαρτάται από γεωμετρικούς παράγοντες (μήκος, συντελεστή τριβής στα τοιχώματα, υδραυλική ακτίνα) αλλά και θερμοφυσικούς παράγοντες (πυκνότητα αέρα, κτλ).

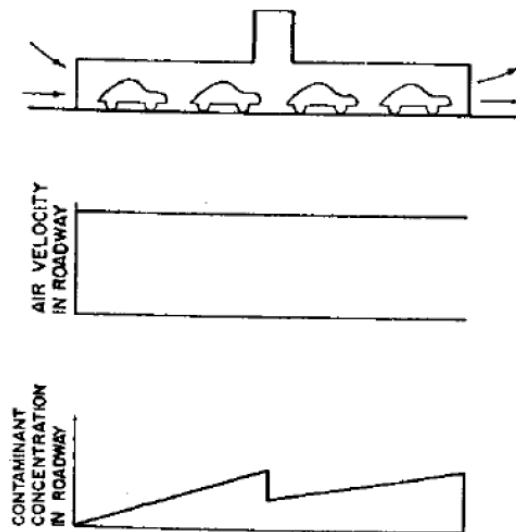
Η ροή αέρα σε ένα σύστημα φυσικού αερισμού μπορεί να είναι από το στόμιο εισόδου στο στόμιο εξόδου (portal – to – portal) (βλέπε Εικόνα – 6). Η περίπτωση αυτή απαντάται σε σήραγγες μονής κατεύθυνσης, ούτως ώστε να δημιουργείται μία σταθερή διαφορά πίεσης. Από την εικόνα επίσης συνάγεται ότι η ταχύτητα του αέρα στο εσωτερικό της σήραγγας διατηρείται σταθερή καθ' όλο το μήκος της. Αντίθετα η συγκέντρωση των ρύπων αυξάνει λαμβάνοντας τη μέγιστη τιμή της στο στόμιο εξόδου.



Εικόνα 6 - Σύστημα φυσικού αερισμού χωρίς αγωγό απαγωγής σε σήραγγα μονής κατεύθυνσης

Εναλλακτικά σε συστήματα φυσικού αερισμού χρησιμοποιείται ενδιάμεσος αγωγός απαγωγής (shaft) (βλέπε Εικόνα – 7). Η λύση αυτή είναι πιο κατάλληλη για σήραγγες διπλής κατεύθυνσης. Και σε αυτή την περίπτωση όμως η ροή του αέρα στο εσωτερικό εξαρτάται από τις εκάστοτε μετεωρολογικές συνθήκες.

Η κατασκευή περισσότερων ενδιάμεσων αγωγών απαγωγής επιφέρει περισσότερα μειονεκτήματα από πλεονεκτήματα, καθώς ο αέρας παγιδεύεται στα ενδιάμεσα τμήματα συσσωρεύοντας ρύπους και επιβαρύνοντας την ποιότητα αέρα.



Εικόνα 7 - Σύστημα φυσικού αερισμού με ενδιάμεσο αγωγό απαγωγής σε σήραγγα μονής κατεύθυνσης

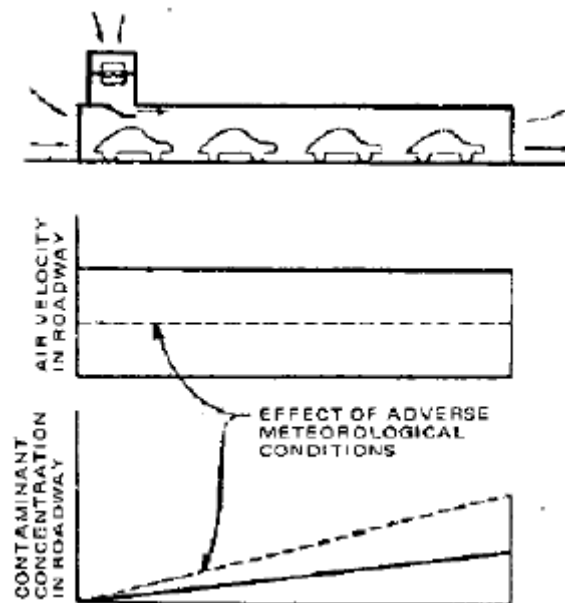
(β) Συστήματα Μηχανικού Αερισμού

Στα συστήματα μηχανικού αερισμού, οι ποσότητες των παραγόμενων ρύπων και η επιδιωκόμενη ποιότητα αέρα επιτυγχάνονται με τη βοήθεια μηχανολογικού εξοπλισμού αξονικών ή φυγοκεντρικών ανεμιστήρων, περιφερειακών συσκευών επιτήρησης, μέτρησης και ελέγχου. Τα σημαντικότερα είδη μηχανικού αερισμού είναι τα κάτωθι :

Διαμήκης αερισμός

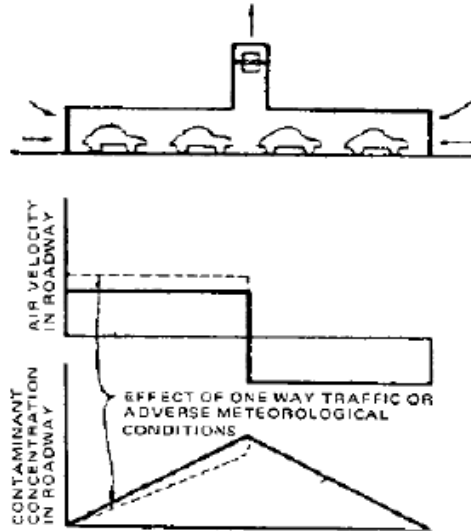
Κατά τον διαμήκη αερισμό, ο αέρας εισάγεται ή μεταφέρεται κατά μήκος της σήραγγας μέσω μηχανικών ανεμιστήρων σε συγκεκριμένες θέσεις.

Το παρακάτω σύστημα με παρεμβολή αγωγού απαγωγής κοντά στο στόμιο εισόδου (βλέπε Εικόνα – 8), εφαρμόζεται κυρίως σε σιδηροδρομικές και σε ορισμένες οδικές σήραγγες. Στη περίπτωση αυτή, ο αέρας εισάγεται από το στόμιο εισόδου και αναμιγνύεται με το αέρα που εισάγεται μέσω του φαινομένου του εμβόλου. Το συγκεκριμένο σύστημα είναι αποδοτικότερο για σήραγγες μονής κατεύθυνσης. Η ταχύτητα αέρα διατηρείται σταθερή καθ' όλο το μήκος στο εσωτερικό της και οι συγκεντρώσεις των ρύπων αυξάνονται μέχρι μέγιστης τιμής στο στόμιο εξόδου.



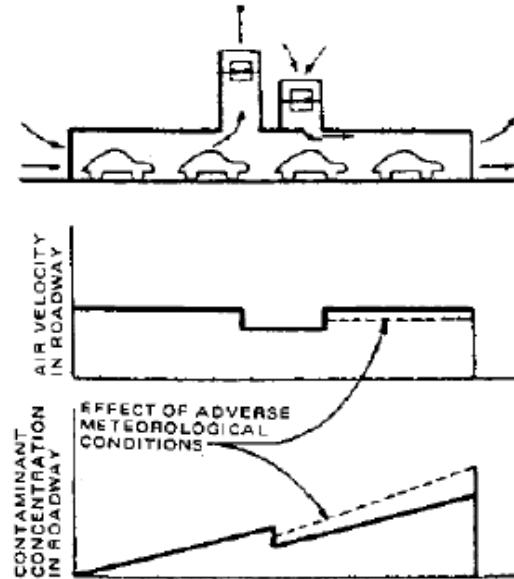
Εικόνα 8 - Σύστημα διαμήκους αερισμού με αγωγό απαγωγής στο στόμιο σε σήραγγα μονής κατεύθυνσης

Αντίστοιχα ο διαμήκης αερισμός με χρήση ενδιάμεσου αγωγού απαγωγής στο μέσο της σήραγγας (βλέπε Εικόνα – 9) ενδείκνυται για σήραγγες διπλής κατεύθυνσης. Στη περίπτωση αυτή ο ανεμιστήρας στο κεντρικό αγωγό (shaft) απάγει αέρα προς το περιβάλλον και ο αέρας εισέρχεται στο εσωτερικό της σήραγγας και από τα δύο στόμια εισόδου / εξόδου. Η υψηλότερη τιμή στη συγκέντρωση των αερίων ρύπων παρατηρείται στη θέση εγκατάστασης του αγωγού.



Εικόνα 9 - Σύστημα διαμήκους αερισμού με ενδιάμεσο αγωγό απαγωγής σε σήραγγα μονής κατεύθυνσης

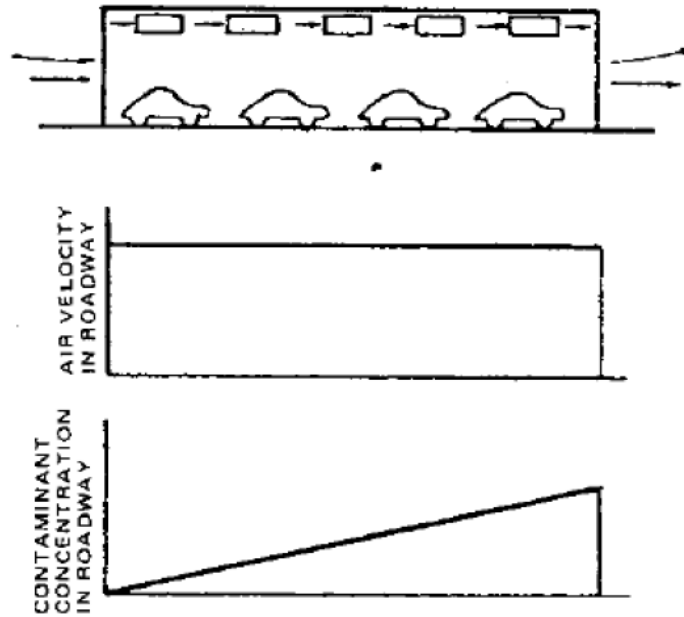
Κατά τον διαμήκη αερισμό σηράγγων με χρήση περισσότερων αγωγών απαγωγής στο εσωτερικό της σήραγγας θα δημιουργηθεί αρχικά η μείωση ρύπων στο δεύτερο μισό της σήραγγας καθώς αέρας θα εισέρχεται από το στόμιο εισόδου και θα εξέρχεται από το πρώτο shaft, ενώ ασταθή μετεωρολογικά φαινόμενα μπορούν να προκαλέσουν μείωση της ροής του αέρα και ενδεχομένως αύξηση των ρύπων στο δεύτερο μισό της (βλέπε Εικόνα – 10).



Εικόνα 10 - Σύστημα διαμήκους αερισμού με δυο ενδιάμεσους αγωγούς απαγωγής σε σήραγγα μόνης κατεύθυνσης

Τέλος η πιο δημοφιλής τεχνική διαμήκους αερισμού στις περισσότερες σύγχρονες σήραγγες στον ευρωπαϊκό και ελλαδικό χώρο γίνεται με χρήση ανεμιστήρων ώσης. Η τεχνική αυτή περιλαμβάνει τη τοποθέτηση κατάλληλα διαστασιοποιημένων ανεμιστήρων ώσης (jet-fans) κατά μήκος της σήραγγας. Σε ένα τέτοιο σύστημα οι ανεμιστήρες τοποθετούνται είτε στην οροφή είτε στις πλευρές της σήραγγας (βλέπε Εικόνα – 11).

Αποτελούν τον πιο οικονομικό τρόπο καθώς δεν απαιτούνται αεραγωγοί για την διασύνδεση καθ' όλο το μήκος της σήραγγας. Μειονέκτημα της μεθόδου είναι οι αυξημένες διαστάσεις της διατομής της σήραγγας και η διασπορά του καπνού στην οροφή καθ' όλο το μήκος της σήραγγας σε περίπτωση πυρκαγιάς. Για το σκοπό αυτό πρέπει να προβλεφθεί εξ αρχής μια ομοιόμορφη διανομή του αέρα.



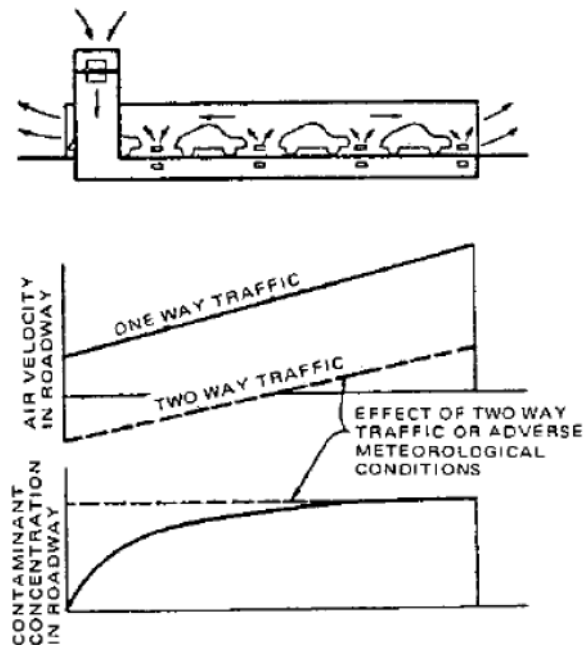
Εικόνα 11 - Σύστημα διαμήκους αερισμού με χρήση ανεμιστήρων ώσης

Ημι-εγκάρσιος αερισμός

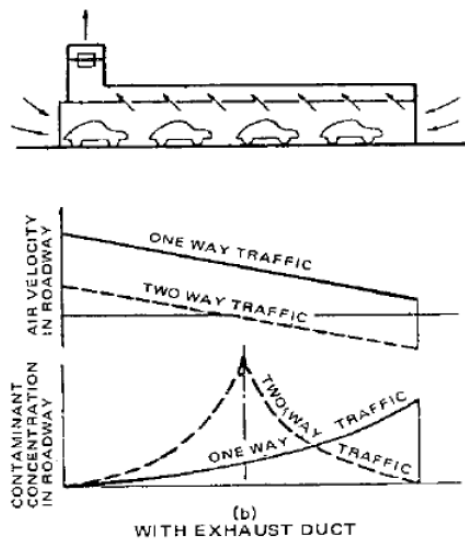
Το κύριο χαρακτηριστικό του ημι-εγκάρσιου αερισμού είναι η ομοιόμορφη διανομή αέρα στο εσωτερικό της σήραγγας. Η συγκεκριμένη διάταξη δημιουργεί ένα ομοιόμορφο επίπεδο συγκεντρώσεων μονοξειδίου του άνθρακα μιας και ο αέρας και οι ρύποι των οχημάτων εισέρχονται στη σήραγγα με τον ίδιο ρυθμό.

Η καλύτερη θέση για την εισαγωγή νεπού αέρα είναι στη στάθμη της εξάτμισης των οχημάτων ώστε να δημιουργούνται συνθήκες για την άμεση διάλυση των παραγόμενων ρύπων. Για να ολοκληρωθεί η διανομή αέρα, θα πρέπει να παραχθεί ένα επαρκές διαφορικό πίεσεων μεταξύ του αγωγού προσαγωγής (βλ. Εικόνα – 12) και του οδοστρώματος για την εξουδετέρωση της επίδρασης του φαινομένου εμβόλου και των μετεωρολογικών συνθηκών.

Το δίκτυο απόρριψης αέρα σε σύστημα ημι-εγκάρσιου αερισμού σε σήραγγα μονής κατεύθυνσης (βλ. Εικόνα – 13), θα προκαλέσει μέγιστη συγκέντρωση ρύπων στο στόμιο εξόδου. Σε σήραγγα διπλής κατεύθυνσης, θα δημιουργηθεί μια περιοχή μηδενικού νεπού αέρα στο μέσο της σήραγγας, η οποία θα συμβάλλει στη περαιτέρω μεγιστοποίηση της συγκέντρωσης ρύπων.



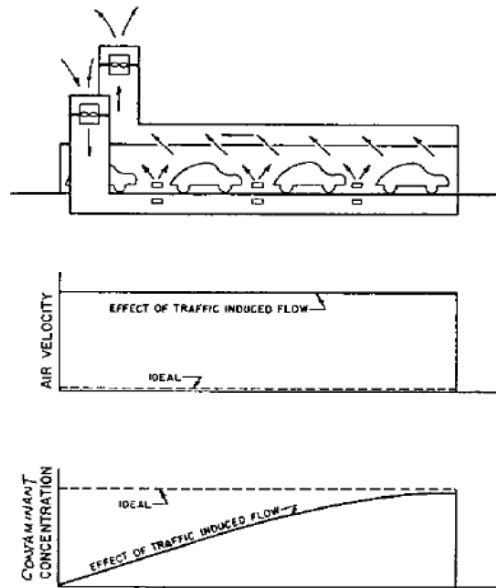
Εικόνα 12 - Σύστημα ημι-εγκάρσιου αερισμού - δίκτυο αγωγών προσαγωγής



Εικόνα 13 - Σύστημα ημι-εγκάρσιου αερισμού - δίκτυο αγωγών απαγωγής

Εγκάρσιος Αερισμός

Σε σήραγγες με μεγάλο μήκος ($> 1000\text{m}$) είναι δυνατόν να εγκατασταθεί σύστημα πλήρους εγκάρσιου αερισμού (βλ. Εικόνα – 14). Σε αυτό εφαρμόζονται αγωγοί προσαγωγής και απαγωγής αέρα καθ' όλο το μήκος της σήραγγας. Η προσαγωγή και απόρριψη του αέρα πραγματοποιείται μέσω των εγκατεστημένων shafts αντί των στομιών εισόδου και εξόδου όπως γίνεται στη περίπτωση του ημι-εγκάρσιου αερισμού



Εικόνα 14 - Σύστημα πλήρους εγκάρσιου αερισμού / εξαερισμού

1.3 Διαστασιολόγηση συστημάτων αερισμού

Η μεθοδολογία διαστασιολόγησης των συστημάτων μηχανικού αερισμού εξαρτάται από τους παρακάτω βασικούς παράγοντες [6,9]:

- Μήκος και διαστάσεις διατομής της σήραγγας
- Είδος κατεύθυνσης (μονής / διπλής)
- Εξυπηρετούμενη περιοχή (αστική / περιαστική / επαρχιακή)
- Όρια ποιότητας αέρα σύμφωνα με τη Νομοθεσία
- Αντιμετώπιση ομαλών και εκτάκτων περιστατικών (π.χ κυκλοφοριακή συμφόρηση, ατύχημα, πυρκαγιά)

Η διαδικασία υπολογισμού της ποσότητας του απαιτούμενου νωπού αέρα δίδεται από την σχέση 1.1:

$$Q = \frac{ML}{V} q(v, i, h, t) \frac{1}{C_{adm} - C_{amb}} \quad (1.1)$$

όπου :

Q ,	παροχή αέρα	[m ³ /s]
M ,	κυκλοφορία οχημάτων ανά ώρα	[αρ. οχημάτων / h]
L ,	μήκος σήραγγας	[m]
v ,	ταχύτητα οχήματος	[m/s]
q ,	εκπομπή ρύπων για κάθε όχημα	[kg/s]
i ,	εξάρτηση της εκπομπής συναρτήσει της κλίσης	[%]
h ,	εξάρτηση της εκπομπής συναρτήσει της κατηγορίας του οχήματος	
t ,	εξάρτηση της εκπομπής συναρτήσει του χρόνου	[sec]
C_{adm} ,	επιτρεπόμενη συγκέντρωση ρύπου βάσει νομοθεσίας και προδιαγραφών	[mg/m ³]
C_{amb} ,	συγκέντρωση ρύπου στον αέρα περιβάλλοντος	[mg/m ³]

Για την ορθή επιλογή και διαστασιολόγηση του εξοπλισμού και την πρόβλεψη του πεδίου συγκεντρώσεων σε κάθε σημείο στο εσωτερικό της σήραγγας χρησιμοποιούνται επικουρικά από εξειδικευμένα γραφεία συμβούλων μελετητών κατάλληλα υπολογιστικά εργαλεία διασποράς ρυπαντών βασισμένα είτε σε γκαουσιανά μοντέλα [7,8] όπου η πηγή ρύπου μοντελοποιείται γραμμικά είτε σε προχωρημένα μοντέλα πεδίου όπου επιλύονται αλγεβρικά οι διαφορικές εξισώσεις ροής.

1.4 Επιλογή συστημάτων αερισμού στον ελλαδικό χώρο

Για υπεραστικές σήραγγες μήκους έως 500m και για αστικές σήραγγες μήκους έως 250m, εν γένει δεν προβλέπεται σύστημα αερισμού ούτε για την κανονική λειτουργία ούτε για την περίπτωση έκτακτης ανάγκης. Η απομάκρυνση των ρύπων στην περίπτωση αυτή θεωρείται ότι εξασφαλίζεται από το φυσικό αερισμό. Οι ρύποι υπολογίζονται σε περίπτωση 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 με βάση

κατάλληλα μοντέλα που συσχετίζουν την παραγωγή τους με την ταχύτητα κυκλοφορίας ή αναμονής.

Για υπεραστικές σήραγγες μήκους άνω των 500m, το σύστημα ή ο συνδυασμός συστημάτων αερισμού θα πρέπει να ανταποκρίνεται σύμφωνα με τα ακόλουθα :

- Η θεώρηση του συστήματος θα γίνει κατά τα αρχικά στάδια της μελέτης[16-17]. Το προτεινόμενο σύστημα αερισμού θα πρέπει να τεκμηριώνεται και να υπολογίζεται από την ομάδα μελέτης σε συνεργασία με τους λοιπούς παράγοντες του έργου (οδοποιοί, γεωτεχνικοί, περιβαλλοντολόγοι κτλ.).
- Για μήκη από 500m μέχρι 3km προτιμάται ο διαμήκης αερισμός. Μελέτη και πρόταση άλλου συστήματος αερισμού πλην διαμήκους, δηλαδή ημι-εγκάρσιου ή εγκάρσιου ή συνδυασμού συστημάτων, μπορεί να εγκαθίσταται σε εξαιρετικές περιπτώσεις μετά από υποβολή και έγκριση - και με απόλυτη τεκμηρίωση της τεχνικοοικονομικής σκοπιμότητας – από τις αρμόδιες Υπηρεσίες του Κύριου του Έργου (ΚτΕ).
- Για σήραγγες άνω των 3km θα γίνεται τεχνικοοικονομική αξιολόγηση όλων των συστημάτων αερισμού συμπεριλαμβανομένου του διαμήκους με χρήση ενδιάμεσων σταθμών εναλλαγής αέρα το πολύ ανά 3 km.

Για αστικές σήραγγες μιάς κατευθύνσεως μήκους άνω των 250m και μέχρις 800 m μπορεί να χρησιμοποιηθεί σύστημα διαμήκους αερισμού υπό την προϋπόθεση ότι θα ληφθούν πρόσθετα μέτρα διαχείρισης του καπνού σε περίπτωση πυρκαγιάς εάν το μήκος της σήραγγας υπερβαίνει τα 500m (λόγω της πιθανότητας ακινητοποίησης οχημάτων, λόγω πυκνής κυκλοφορίας κατάντι του σημείου της πυρκαϊάς). Τα μέτρα αυτά περιλαμβάνουν κυρίως έλεγχο της ταχύτητας αέρος κατά την κατεύθυνση της κυκλοφορίας με ταχύτητα όχι μεγαλύτερη των 1.5m/sec επί 5min περίπου ώστε να δοθεί χρόνος για να απομακρυνθούν οι χρήστες των αυτοκινήτων. Οι ανωτέρω συνθήκες πρέπει να ερευνηθούν και μελετηθούν σχολαστικά από τον μελετητή.

Για αστικές σήραγγες μιας κατευθύνσεως μήκους άνω των 800m μπορεί να χρησιμοποιηθεί διαμήκης αερισμός για την απομάκρυνση των ρύπων υπό τις εξής δύο προϋποθέσεις :

Θα υπάρχει ανεξάρτητο σύστημα απαγωγής καπνού με φρέατα εκκαπνισμού εξοπλισμένα με ανεμιστήρες απαγωγής το πολύ ανά 800m.

Η συγκέντρωση των ρύπων στο στόμιο εξόδου και η διάχυσή τους στην ατμόσφαιρα είναι εντός των επιτρεπομένων ορίων από τις περιβαλλοντικές διατάξεις

Το συνολικό μήκος επομένως θα προκύψει από τους εκπεμπόμενους ρύπους υπό το μέγιστο κυκλοφοριακό φορτίο, λαμβάνοντας υπ' όψιν και την συχνότητα ακινητοποιημένων οχημάτων σε όλο το μήκος της σήραγγας.

Οίκοθεν νοείται ότι εάν τα φρέατα εκκαπνισμού μπορούν να αντικατασταθούν από φρέατα εναλλαγής αέρα στη σήραγγα (προσαγωγή νωπού και απαγωγή μολυσμένου αέρα ή/και απαγωγή καπνού), τότε ο διαμήκης αερισμός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μήκη που περιορίζονται μόνο από τους περιβαλλοντικούς όρους σημειακής φόρτισης της ατμόσφαιρας με ρύπους.

Για αστικές σήραγγες δύο κατευθύνσεων μήκους άνω των 250m η χρήση διαμήκους αερισμού για την απομάκρυνση του καπνού απαγορεύεται. Και τούτο λόγω της πιθανότητας ακινητοποιημένων οχημάτων σε όλο το μήκος της σήραγγας και κατά τις δύο κατευθύνσεις.

Η ποιότητα αέρα εντός της σήραγγας θα πρέπει να πληροί τις απαιτήσεις σύμφωνα με τον Πίνακα 1.1:

Πίνακας 1.1 – Όρια ποιότητας αέρα στο εσωτερικό σιράγγων

Ρύπος	Μέγιστη επιτρεπόμενη συγκέντρωση (μέσος όρος 5 λεπτών)
CO	70 ppm για συνθήκες ελεύθερης ροής 100 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 καθημερινή κυκλοφοριακή συμφόρηση ή ακινητοποιημένη κυκλοφορία 0.009/m ⁻¹ για κυκλοφοριακή συμφόρηση ή ακινητοποιημένη κυκλοφορία

Η σήραγγα θα κλείνει για την κυκλοφορία σε περίπτωση ανόδου είτε του επιπέδου CO πάνω από 250 ppm, είτε του συντελεστή ορατότητας πάνω από 0.012 m⁻¹, είτε του NO_x πάνω από 30 ppm. Όταν γίνονται εργασίες συντήρησης στη σήραγγα με διερχόμενη κυκλοφορία, η συγκέντρωση CO δεν θα υπερβαίνει τα 30 ppm και ο συντελεστής ορατότητας τα 0.003 m⁻¹.

Αντίστοιχα η λειτουργία υπό συνθήκες κανονικής ροής θα πραγματοποιείται με σταδιακή ενεργοποίηση των βαθμίδων των ανεμιστήρων σύμφωνα με τον Πίνακα 1.2 .

Πίνακας 1.2 – Λειτουργία αερισμού σε κανονικούς φόρτους

Βαθμίδες λειτουργίας	CO (ppm)	Ορατότητα (ανά m.)
1 ^η	20	0.003 Προγραμματισμένες εργασίες συντήρησης
2 ^η	70	0.005 Συνθήκες ελεύθερης ροής
3 ^η	70	0.007 Καθημερινή κυκλοφοριακή συμφόρηση
4 ^η	100	0.009 Κυκλοφοριακή συμφόρηση
5 ^η	150	0.009 Προειδοποιητικό σήμα κινδύνου
6 ^η	200	0.012 Σήμα κινδύνου και Κλείσιμο σήραγγας

Μέγιστη Ταχύτητα Αέρα στη Σήραγγα

Η μέγιστη επιτρεπόμενη κατά μήκος ταχύτητα ροής αέρα στη σήραγγα δεν θα υπερβαίνει τις παρακάτω τιμές [16] :

- 8 m/s σε σήραγγες διπλής κατεύθυνσης
- 10 m/s σε σήραγγες μονής κατεύθυνσης

2

2. Είδη πυρκαγιών & μοντελοποίηση

2.1 Πυρκαγιές σε οδικές σήραγγες

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων 15 ετών, σημειώθηκαν σημαντικά ατυχήματα στο εσωτερικό οδικών και σιδηροδρομικών σήραγγων στο διευρωπαϊκό οδικό δίκτυο [9-11]. Τα σημαντικότερα παρατίθενται περιληπτικά στους ακόλουθους πίνακες:

Ονοματολογία - Θέση
Σήραγγα Mont Blanc – Ιταλία / Γαλλία
Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά
Μήκος 11.0 km – κλίση 2.0 – 4.0 %
Σύντομο Ιστορικό
Στις 24/3/1999, σε κινούμενο φορτηγό (HGV) με φορτίο τρόφιμα (άλευρα και μαργαρίνη) ξέσπασε φωτιά πιθανόν από μηχανική βλάβη. Ο οδηγός ακινητοποίησε το όχημα και κατέβαλλε προσπάθεια κατάσβεσης με ίδια φορητά μέσα. Αυτό είχε όμως σαν αποτέλεσμα την ανάφλεξη του φορτίου της μαργαρίνης που μετατράπηκε σε εύφλεκτη μάζα που εξαπλώθηκε κατά μήκος της σήραγγας. Εξαιτίας τόσο της χαμηλής ορατότητας όσο και της αδυναμίας επί τόπου αναστροφής από τα υπόλοιπα οχήματα, είχε ως αποτέλεσμα 39 άτομα να χάσουν τη ζωή τους, κυρίως εξαιτίας των τοξικών εκπομπών καπνού. Συνολικά καταστράφηκαν περίπου 30 οχήματα. Ο συνολικός χρόνος κατάσβεσης από τις αρμόδιες ομάδες διάσωσης της πυρκαγιάς διήρκεσε περίπου 55h (βλέπε Εικόνα – 15)



Εικόνα 15- Η σήραγγα Mont Blanc στο σημείο του ατυχήματος (Associated Press)

Ονοματολογία - Θέση
Σήραγγα St. Gotthard – Ελβετία
Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά
Μήκος 16.9 km
Σύντομο Ιστορικό
<p>Στις 24/10/2001, κινούμενο φορτηγό (HGV) συγκρούστηκε με άλλο φορτηγό (HGV) που μετέφερε φορτίο ελαστικών και ανεφλέγη περίπου 1600m από την νότια είσοδο της σήραγγας. Η δομική επένδυση του θόλου της σήραγγας κατέρρευσε σε μήκος περίπου 250m. Οι θερμοκρασίες που σημειώθηκαν υπερέβησαν τους 1000 C κάνοντας απροσπέλαστη την πρόσβαση από τα αρμόδια συνεργεία. Η ένταση της φωτιάς εξαπλώθηκε σε συνολικά 23 οχήματα με αποτέλεσμα συνολικά έντεκα (11) άνθρωποι να χάσουν τη ζωή τους. Ο συνολικός χρόνος κατάσβεσης από τις αρμόδιες ομάδες διάσωσης της πυρκαγιάς διήρκεσε περίπου 2 ημέρες.</p>

Ονοματολογία - Θέση
Σήραγγα Μάγχης (Channel Tunnel) –Γαλλία / Ηνωμένο Βασίλειο
Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά
Μήκος 51.0 km
Σύντομο Ιστορικό
<p>Στις 18/11/1996, εμπορική αμαξοστοιχία κινούμενη με φορά από Γαλλία προς Ηνωμένο Βασίλειο, έπιασε φωτιά σε βαγόνι κίνησης με αρχική ένταση που εκτιμήθηκε στα 1.5 MW. Η αμαξοστοιχία συνέχισε την κίνηση της με κανονική ταχύτητα 120 km/h για περίπου 10min μέχρι όπου σταμάτησε σε έξοδο ασφαλείας, όπου διενέργησε αποτυχημένη απασφάλιση του φλεγόμενου βαγονιού. Η φωτιά μεταδόθηκε στα υπόλοιπα βαγόνια με αποτέλεσμα συνολικά 10 βαγόνια να ακτινοβολούν ~ 350 MW. Το προσωπικό και οι επιβάτες εγκατέλειψαν το όχημα και κατευθύνθηκαν προς τις εξόδους διαφυγής – και ορισμένοι από αυτούς προς τα πλησιέστερα Νοσοκομεία με αναπνευστικά προβλήματα – ενώ το προσωπικό ασφαλείας κατέβαλλε προσπάθειες κατάσβεσης για περίπου 7h.</p>

Ονοματολογία - Θέση
Σήραγγα Tauern – Αυστρία
Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά
Μήκος 6.4 km
Σύντομο Ιστορικό
<p>Στις 29/5/1999, κινούμενο φορτηγό (HGV) συγκρούστηκε με ακινητοποιημένη σειρά προπορευόμενων οχημάτων περίπου 800m πριν από την Βόρεια έξοδο. Οκτώ (8) άνθρωποι σκοτώθηκαν επί τόπου ως αποτέλεσμα της σύγκρουσης. Στη συνέχεια η φωτιά εξαπλώθηκε σε συνολικά 40 οχήματα (16 φορτηγά – 24 επιβατηγά ΙΧ) με αποτέλεσμα άλλοι τέσσερις (4) άνθρωποι να χάσουν τη ζωή τους. Το εγκάρσιο σύστημα εξαερισμού της σήραγγας λειτούργησε σωστά. Ο συνολικός χρόνος κατάσβεσης από τις αρμόδιες ομάδες διάσωσης της πυρκαγιάς διήρκεσε περίπου 15h (βλέπε Εικόνα – 16)</p>



Εικόνα 16 - Η σήραγγα Tauern στο σημείο του ατυχήματος

Ονοματολογία - Θέση
Σήραγγα Frejus – Ιταλία / Γαλλία
Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά
Μήκος 12.9 km
Σύντομο Ιστορικό
Στις 4/6/2005 κινούμενο φορτηγό (HGV) που μετέφερε φορτίο ελαστικών συγκρούστηκε με άλλα τρία (3) φορτηγά (HGV) και ανεφλέγη περίπου 1600m από την νότια είσοδο της σήραγγας. Η δομική επένδυση του θόλου της σήραγγας κατέρρευσε σε μήκος περίπου 250m. Οι θερμοκρασίες που σημειώθηκαν υπερέβησαν τους 1000 C κάνοντας απροσπέλαστη την πρόσβαση από τα αρμόδια συνεργεία με αποτέλεσμα συνολικά τέσσερις (4) άνθρωποι να χάσουν τη ζωή τους. Ο συνολικός χρόνος κατάσβεσης από τις αρμόδιες ομάδες διάσωσης της πυρκαγιάς διήρκεσε περίπου 2 ημέρες και η σήραγγα έκλεισε για περίπου 2 μήνες για τις απαραίτητες εργασίες αποκατάστασης.

Με βάση τα παραπάνω ευρήματα διαπιστώθηκαν από τις αρμόδιες εθνικές και ευρωπαϊκές τεχνικές επιτροπές (technical committees) ότι στις βασικότερες αιτίες πρόκλησης ατυχημάτων περιλαμβάνονται ο ανθρώπινος παράγοντας, το υπάρχον σύστημα ασφαλείας και εξαερισμού εκτάκτων περιστατικών, καθώς και ο συντονισμός των αρχών ασφαλείας.

Για το σκοπό αυτό η Ευρωπαϊκή Επιτροπή ανέλαβε δράσεις μέσω διευρωπαϊκών προγραμμάτων [12] και συνέταξε κατευθυντήριες οδηγίες [13] για την μείωση του κινδύνου στα οδικά και σιδηροδρομικά δίκτυα σήραγγων που υιοθετήθηκαν μέσω των κρατών μελών στην εθνική νομοθεσία [14,26].

Μέχρι τότε η ασφάλεια των σήραγγων βασιζόταν σε απλοποιημένα πρότυπα φωτιάς χαμηλής ισχύος με υποδιαστασιοποιημένα συστήματα αερισμού. Αντίθετα με τα δυστυχήματα που σημειώθηκαν, οι φωτιές προέρχονταν κατά κύριο λόγο με εμπλοκή βαρέων οχημάτων μεγάλης ισχύος (> 100 MW), είτε με μετάδοση της φωτιάς σε γειτονικά οχήματα. Τα εγκατεστημένα συστήματα – εγκάρσιου – αερισμού δεν κατάφεραν να απομακρύνουν τις υψηλές συγκεντρώσεις καπνού και τοξικών αερίων.

2.2 Απλοποιημένα μοντέλα πυρκαγιών

Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μελέτη των ατυχημάτων (βλέπε κεφάλαιο 2.1), οι εθνικές επιτροπές κατάστρωσαν βασικά πρότυπα εξέλιξης για τις πυρκαγιές που βασίζονται στην εμπλοκή τόσο επιβατηγών ΙΧ οχημάτων όσο και βαρέων φορτηγών (HGV). Οι καμπύλες εξέλιξης βασίζονται στη αλληλεπίδραση των καιόμενων υλικών, το είδος του καυσίμου και το μέγεθος του οχήματος. Για την σύγκρουση ΙΧ οχημάτων ή μικρών ημιφορτηγών έχει προταθεί από τεχνικές επιτροπές της Διεθνούς Ένωσης Οδοποιίας (PIARC) η καμπύλη ISO 834 για διάρκεια 60min, όπου περιγράφεται από τη σχέση 2.1 :

$$\Delta T(t) = 345 \log(8t + 1), \quad \text{όπου, } t, \text{ χρόνος σε min} \quad (2.1)$$

Αντίστοιχα για την περιγραφή συγκρούσεων με εμπλοκή βαρέων φορτηγών και βυτιοφόρων όπου ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας προσδιορίζεται κυρίως από την ποσότητα του καιόμενου καυσίμου, έχει προταθεί η καμπύλη υδρογονανθράκων (HC Curve) σύμφωνα με τη σχέση 2.2 :

$$\Delta T(t) = 1080 [1 - 0.325 \exp(-0.167t) - 0.675 \exp(-2.5t)] \quad \text{όπου, } t, \text{ χρόνος σε min} \quad (2.2)$$

2.3 Βασικά μοντέλα

Η περιγραφή της χρονικής εξέλιξης των πυρκαγιών σε οδικές σήραγγες υποβοηθείται με τη χρήση μαθηματικών προτύπων. Οι προτυποποιημένες πυρκαγιές προέρχονται από ευρωπαϊκές νόρμες και κατευθυντήριες οδηγίες των επιμέρους εθνικών επιτροπών[14,26]. Για την πλήρη περιγραφή τους έχουν προταθεί οι ακόλουθες φάσεις :

Φάση αρχικής ανάπτυξης - I :

Περιλαμβάνει την αρχική φάση ανάφλεξης από κάποιο φλεγόμενο αντικείμενο είτε ακτινοβολούσα πηγή και τη περίοδο διάδοσης στο όχημα ή σε γειτονικά οχήματα μέσω διαφόρων μηχανισμών (backdraft, flashover) ή ανάφλεξη προς μία σταθερή κατάσταση.

Φάση πλήρους ανάπτυξης - II :

Κατά τη φάση αυτή η πυρκαγιά διατηρείται σε σχετικά σταθερή κατάσταση όπου οι συνθήκες εξαρτώνται από τις παραμέτρους του αερισμού και τις φυσικοχημικές ιδιότητες του καίόμενου υλικού.

Φάση εξασθένησης - III :

Κατά τη φάση αυτή, η πυρκαγιά βρίσκεται σε ύφεση μέχρι πλήρους εξάλειψής της.

Για την ακριβή εφαρμογή και αναπαράσταση της πυρκαγιάς έχουν συσχετισθεί με πειραματικά αποτελέσματα μετρήσεων σε εργαστηριακά μοντέλα και μοντέλα πλήρους κλίμακας. Τα βασικότερα μοντέλα περιγραφής πυρκαγιών παρατίθενται στη συνέχεια.

2.3.1 Γραμμικό μοντέλο

Έχει αναπτυχθεί και προταθεί για την απλή περιγραφή της εξέλιξης πυρκαγιάς με βάση το γραμμικό πρότυπο ανάπτυξης και εξασθένησης σύμφωνα με τους Γαλλικούς Κανονισμούς[26-28] που είναι το ισχύον για την απλοποιημένη περιγραφή και στον ελλαδικό χώρο σύμφωνα με τις σχέσεις 2.3 – 2.5:

- Φάση αρχικής ανάπτυξης : $\dot{Q}(t) = a_{g,L}t$, $0 \leq t \leq t_{\max}$ [MW] (2.3)

- Φάση πλήρους ανάπτυξης : $\dot{Q}(t) = a_{g,L}t_{\max} = \dot{Q}_{\max}$, $t_{\max} < t < t_D$ [MW] (2.4)

- Φάση εξασθένησης : $\dot{Q}(t) = \dot{Q}_{\max} - a_{D,L}(t - t_D)$, $t_D < t < t_d$ [MW] (2.5)

Όπου,

$$t_{\max} = \frac{\dot{Q}_{\max}}{a_{g,L}}, \text{ ο απαιτούμενος χρόνος μέχρι την πλήρη ανάπτυξη} \quad [\text{sec}]$$

$$t_D = t_d - \sqrt{\frac{2}{a_{D,L}} \left(\frac{a_{g,L}}{2} t_{\max}^2 + \dot{Q}_{\max} (t_d - t_{\max}) - E_{tot} \right)}, \text{ ο χρόνος για την έναρξη εξασθένησης} \quad [\text{sec}]$$

t_d , η συνολική διάρκεια της πυρκαγιάς [sec]

$a_{g,L}$, γραμμικός συντελεστής κατά τη φάση ανάπτυξης [MW/s]

$a_{D,L}$, γραμμικός συντελεστής κατά τη φάση εξασθένησης [MW/s]

Για να εξετασθεί κάθε δυνατή περίπτωση σύγκρουσης τα προτυποποιημένα σενάρια πυρκαγιάς έχουν συνοψισθεί στις ακόλουθες εννέα κατηγορίες [26] :

- Σενάριο 1. Εμπλοκή σε φωτιά 1 – 2 επιβατηγών ΙΧ οχημάτων. Μέγιστος ρυθμός έκλυσης πυρκαγιάς $\dot{Q}_{\max} = 5 \text{ MW}$. Χαρακτηριστικοί χρόνοι $t_{\max} = 3 \text{ min}$, $t_D = 3 \text{ min}$, $t_d = 45 \text{ min}$
- Σενάριο 2. Εμπλοκή σε φωτιά 2 – 3 επιβατηγών ΙΧ οχημάτων ή μικρού ημιφορτηγού. Μέγιστος ρυθμός έκλυσης πυρκαγιάς $\dot{Q}_{\max} = 10 \text{ MW}$. Χαρακτηριστικοί χρόνοι $t_{\max} = 3 \text{ min}$, $t_D = 23 \text{ min}$, $t_d = 45 \text{ min}$
- Σενάριο 3. Εμπλοκή σε φωτιά ενός μεγάλου ημιφορτηγού, ή λεωφορείου ή πολλαπλών οχημάτων. Μέγιστος ρυθμός έκλυσης πυρκαγιάς $\dot{Q}_{\max} = 20 \text{ MW}$. Χαρακτηριστικοί χρόνοι $t_{\max} = 3 \text{ min}$, $t_D = 33 \text{ min}$, $t_d = 50 \text{ min}$
- Σενάριο 4. Εμπλοκή σε φωτιά ενός λεωφορείου ή κενού φορτηγού. Μέγιστος ρυθμός έκλυσης πυρκαγιάς $\dot{Q}_{\max} = 30 \text{ MW}$. Χαρακτηριστικοί χρόνοι $t_{\max} = 5 \text{ min}$, $t_D = 5 \text{ min}$, $t_d = 55 \text{ min}$
- Σενάριο 5. Εμπλοκή σε φωτιά ενός βαρέως φορτηγού με καύσιμο φορτίο. Μέγιστος ρυθμός έκλυσης πυρκαγιάς $\dot{Q}_{\max} = 50 \text{ MW}$. Χαρακτηριστικοί χρόνοι $t_{\max} = 5 \text{ min}$, $t_D = 65 \text{ min}$, $t_d = 80 \text{ min}$

- Σενάριο 6. Εμπλοκή σε φωτιά ενός βαρέως φορτηγού με καύσιμο φορτίο (~ 4 τόνοι). Μέγιστος ρυθμός έκλυσης πυρκαγιάς $\dot{Q}_{max} = 70$ MW. Χαρακτηριστικοί χρόνοι $t_{max} = 5$ min, $t_D = 55$ min, $t_d = 75$ min
- Σενάριο 7. Εμπλοκή σε φωτιά ενός βαρέως φορτηγού. Μέγιστος ρυθμός έκλυσης πυρκαγιάς $\dot{Q}_{max} = 100$ MW. Χαρακτηριστικοί χρόνοι $t_{max} = 10$ min, $t_D = 65$ min, $t_d = 85$ min
- Σενάριο 8. Εμπλοκή σε φωτιά ενός βαρέως φορτηγού με καύσιμο φορτίο (~ 10 τόνοι). Μέγιστος ρυθμός έκλυσης πυρκαγιάς $\dot{Q}_{max} = 150$ MW. Χαρακτηριστικοί χρόνοι $t_{max} = 10$ min, $t_D = 75$ min, $t_d = 100$ min
- Σενάριο 9. Εμπλοκή σε φωτιά πολλαπλών βαρέων οχημάτων, βυτιοφόρο με βενζίνη. Μέγιστος ρυθμός έκλυσης πυρκαγιάς $\dot{Q}_{max} = 200$ MW. Χαρακτηριστικοί χρόνοι $t_{max} = 15$ min, $t_D = 80$ min, $t_d = 100$ min

Τα σενάρια πυρκαγιάς δίδονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 2.1:

Πίνακας 2.1 – Συγκεντρωτικά στοιχεία σεναρίων πυρκαγιάς με βάση το γραμμικό πρότυπο

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

2.3.2 Πολυωνυμικό μοντέλο

Χάρη στο πολυωνυμικό μοντέλο, η καμπύλη εξέλιξης περιγράφεται με βάση αντίστοιχες πολυωνυμικές συναρτήσεις σύμφωνα με τις σχέσεις 2.6 – 2.8:

- Φάση αρχικής ανάπτυξης : $\dot{Q}(t) = a_{g,q} t^2$, $0 \leq t_{\max}$ [MW] (2.6)

- Φάση πλήρους ανάπτυξης : $\dot{Q}(t) = a_{g,q} t_{\max}^2 = \dot{Q}_{\max}$, $t_{\max} < t < t_D$ [MW] (2.7)

- Φάση εξασθένισης : $\dot{Q}(t) = \dot{Q}_{\max} e^{-a_{D,q}(t-t_D)}$, $t \geq t_D$ [MW] (2.8)

Όπου,

$$t_{\max} = \sqrt{\frac{\dot{Q}_{\max}}{a_{g,q}}}$$

, ο απαιτούμενος χρόνος μέχρι την πλήρη ανάπτυξη [sec]

$$t_D = \frac{x E_{tot}}{\dot{Q}_{\max}} + \frac{2}{3} t_{\max} - \frac{1}{a_{D,q}}$$

, ο χρόνος για την έναρξη εξασθένισης [sec]

t_d , η συνολική διάρκεια της πυρκαγιάς [sec]

$a_{g,q}$, πολυωνυμικός συντελεστής κατά τη φάση ανάπτυξης [MW/s]

$a_{D,q}$, πολυωνυμικός συντελεστής κατά τη φάση εξασθένισης [MW/s]

2.3.3 Εκθετικό μοντέλο

Τέλος με το εκθετικό μοντέλο είναι δυνατόν να αναπαρασταθεί συνολικά η χρονική εξέλιξη της πυρκαγιάς μέσω μιας μοναδικής εξίσωσης που περιγράφεται από τη σχέση 2.9

- $\dot{Q}(t) = \dot{Q}_{\max} n r (1 - e^{-kt})^{n-1} e^{-kt}$, $t \geq 0$ [MW] (2.9)

Όπου,

$$t_{\max} = \frac{\ln(n)}{k}$$

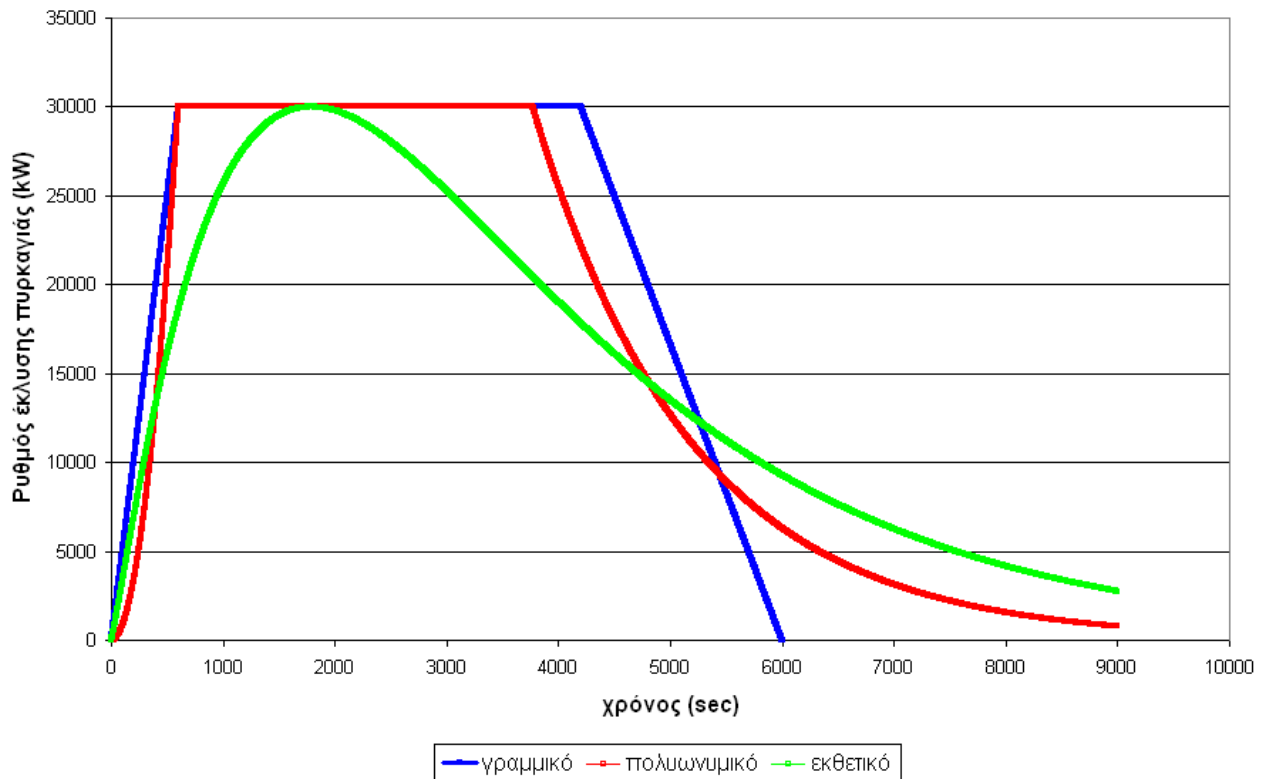
, ο απαιτούμενος χρόνος μέχρι την πλήρη ανάπτυξη [sec]

$$t_d = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{1}{1 - \beta_d^{1/n}} \right), \text{ η συνολική διάρκεια της πυρκαγιάς} \quad [\text{sec}]$$

$$k = \frac{\dot{Q}_{\max}}{E_{\text{tot}}} r, \quad r = (1 - 1/n)^{1-n}, \text{ συντελεστές του μοντέλου ανάλογα με την ισχύ.}$$

Στην παρακάτω Εικόνα – 17, παρατίθενται διαγραμματικά τα τρία (3) μοντέλα ανάπτυξης για τυπική φωτιά μέγιστης ισχύος 30 MW για χρόνο 9000 sec. Σημειώνεται σύμφωνα με το γραμμικό μοντέλο ανάπτυξης ο συνολικός χρόνος περιορίζεται στα 6000 sec για την ίδια έκλυση ισχύος.

Διάγραμμα ρυθμών έκλυσης θερμότητας για διάφορα πρότυπα ανάπτυξης



Εικόνα 17 - Διάγραμμα ρυθμών έκλυσης θερμότητας για διάφορα πρότυπα ανάπτυξης

Από την μορφή των καμπυλών διαπιστώνεται ότι για το εκθετικό μοντέλο δεν υπάρχει ικανός χρόνος παραμονής υπό μέγιστη ισχύ – παρά σχηματίζεται ένα μέγιστο σημείο. Για το λόγο αυτό έχει προταθεί από τον H. Ingason [28] εναλλακτικό μοντέλο με σκοπό την ελαφρά διαφοροποίηση της καμπύλης με βάση τη σχέση 2.10:

$$\dot{Q}(t) = \dot{Q}_{\max} \left(n_1 r_1 (1 - e^{-k_1 t})^{n_1 - 1} e^{-k_1 t} + n_2 r_2 (1 - e^{-k_2 t})^{n_2 - 1} e^{-k_2 t} \right) \quad \text{ο ρυθμός έκλυσης [MW/s]} \quad (2.10)$$

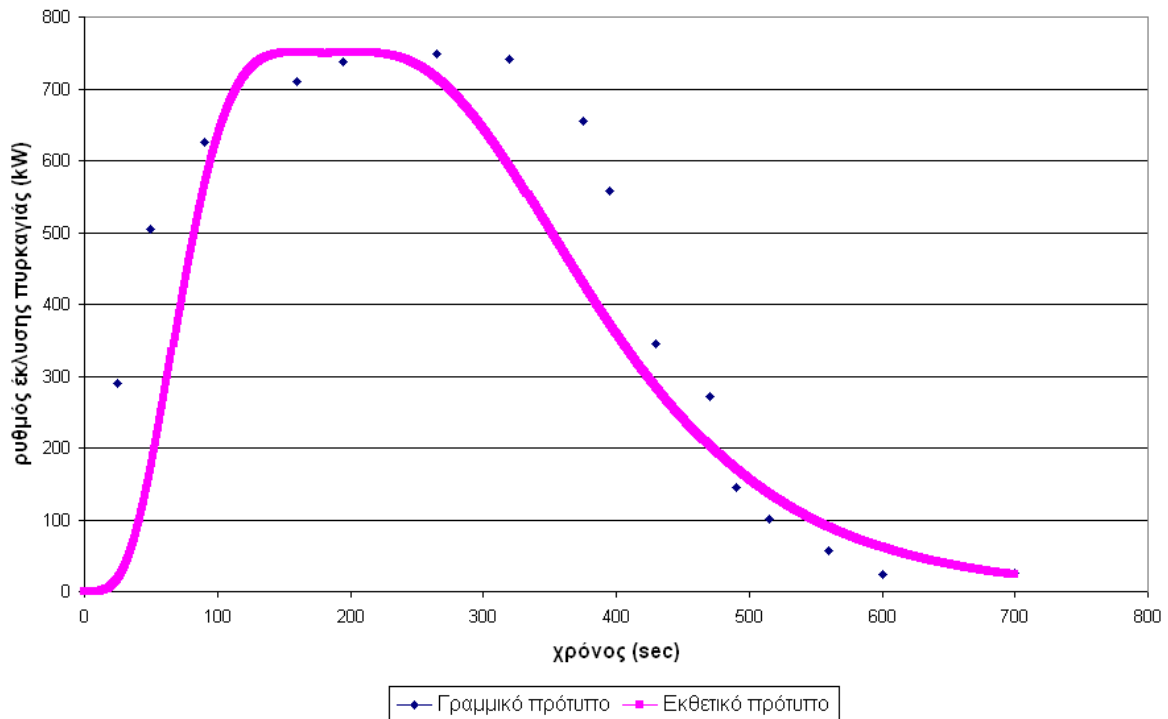
όπου :

$$E_{tot} = E_{tot,1} + E_{tot,2} = \dot{Q}_{\max} \left(\frac{r_1}{k_1} + \frac{r_2}{k_2} \right), \text{ η συνολικά εκλυόμενη ενέργεια} \quad [\text{MJ}]$$

$$k_1 = \frac{\dot{Q}_{\max}}{E_{tot}} (r_1 + n r_2), \quad k_2 = \frac{\dot{Q}_{\max}}{E_{tot}} \left(\frac{r_1}{n} + r_2 \right), \text{ συντελεστές του μοντέλου ανάλογα με την ισχύ}$$

Για την μελέτη πιστοποίησης της πυρκαγιάς (βλέπε κεφάλαιο 4) ισχύος $\dot{Q}_{\max} = 0.75 \text{ MW}$ χρησιμοποιήθηκαν γραμμικό και εκθετικό πρότυπο ανάπτυξης όπου η εκθετική καμπύλη προσαρμόστηκε σύμφωνα με τη δειγματοληψία της HRR, και οι συντελεστές k_1, k_2, r_1, r_2 επιλέχθηκαν τέτοιοι ώστε $(k_1, k_2, r_1, r_2) = (0.014, 0.0098, 2.33, 1.77)$. Η αντίστοιχη καμπύλη παριστάνεται στην Εικόνα – 18, μαζί με τις ενδιάμεσες τιμές της έκλυσης θερμότητας που απεικονίζονται με μπλε χρώμα.

Εκθετική κατανομή ρυθμού έκλυσης θερμότητας με δημιουργία ζώνης



Εικόνα 18 - Διάγραμμα εκθετικής κατανομής έκλυσης θερμότητας με δημιουργίας ζώνης (plateau) στο μέγιστο

2.4 Πειράματα και προσομοιώσεις σε H/Y

Χρησιμοποιώντας τα απλοποιημένα μοντέλα εξέλιξης της φωτιάς, στατιστικά στοιχεία ατυχημάτων και κυκλοφοριακούς φόρτους στους κύριους οδικούς άξονες, η ευρωπαϊκή επιτροπή σε συνεργασία με ερευνητικά ινστιτούτα κατέληξε σε δυο μεγάλες κατηγορίες για τη προσομοίωση και πρόβλεψη των φαινομένων που παρατηρούνται στο εσωτερικό σηράγγων.

Τα πιθανοτικά μοντέλα (QRAM, HAZOP), που βασίζονται σε δενδροειδή ανάλυση αποφάσεων (fault – tree analysis) των επιπτώσεων των συγκρούσεων [10] ανάλογα με την πιθανότητα των συμβάντων για κάθε σενάριο. Με βάση τα διαθέσιμα στατιστικά στοιχεία ατυχημάτων, υπολογίζονται οι εναλλακτικές πιθανότητες σύγκρουσης οχημάτων (IX – IX, IX – φορτηγό, πολλαπλές συγκρούσεις) και φύσης ατυχήματος (π.χ διαρροή, έκρηξη, σύγκρουση). Αντίστοιχα οι Carvel et al. [35] έχουν χρησιμοποιήσει τον ορισμό της δεσμευμένης πιθανότητας κατά Bayes για να υπολογίσουν την κατανομή και τη διασπορά των τιμών της HRR, κατά την πρόκληση φωτιάς στο εσωτερικό σήραγγας ανάλογα με τη κατανομή της ταχύτητας αερισμού όπως εφαρμόζεται στα διάφορα ευρωπαϊκά προγράμματα προσομοίωσης (EUREKA, CETU, VVT).

Τα μοντέλα προσομοίωσης που βασίζονται σε υπολογιστικά σενάρια και γεωμετρίες που δημιουργούνται με τη βοήθεια H/Y σε 1D/2D/3D διαστάσεις. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατόν να δημιουργηθούν εναλλακτικά σενάρια (What-if) για την μελέτη πλήθους παραγόντων δίχως να απαιτηθεί η διακοπή λειτουργίας της σήραγγας, να τεθεί σε κίνδυνο προσωπικό και εξοπλισμό κατά τη διεξαγωγή των πραγματικών επιτόπου πειραμάτων, να ληφθούν στοιχεία για πολλά μεγέθη από ένα τρέξιμο της προσομοίωσης, να απαιτηθεί προηγούμενη εγκατάσταση, διακρίβωση και συλλογή δεδομένων από μεγάλο πλήθος περιφερειακών αισθητήρων. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης υπόκεινται σε αριθμητικά σφάλματα διακριτοποίησης και αποκοπής των υπολογισμών και όχι σε άλλα σφάλματα όπως επαναληπτικότητα, ακρίβεια οργάνων, διαταραχές λόγω αλλαγής των περιβαλλοντικών συνθηκών, κλπ. Παράλληλα μπορεί να μελετηθεί η επίπτωση της έκλυσης θερμότητας στα δομικά στοιχεία της σήραγγας χωρίς να υποβληθεί η σήραγγα σε οποιαδήποτε δαπάνη αποκατάστασης. Ειδικότερα οι Reszka et al. [36] έχουν μελετήσει την επίπτωση της θερμοκρασίας τόσο στη τελική επένδυση από σκυρόδεμα του θόλου της σήραγγας όσο και στο μεταλλικό σκελετό (χάλυβας, αγκύρια) και εκτιμάται ο υπολειπόμενος χρόνος για πιθανή

κατάρρευση μέρους της σήραγγας λόγω της ακτινοβολούσας ισχύος για μεγέθη πυρκαγιάς 66 – 200 MW σε σύγκριση με απλοποιημένες ημι-εμπειρικές σχέσεις. Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι κοντά στο σημείο της φωτιάς (near field) η θερμοκρασία ήταν της τάξης των 1000 C – αρκετά υψηλότερη από την θερμοκρασία ασφαλείας έναντι κατάρρευσης των δομικών στοιχείων – προτού καν φθάσει στη μέγιστη τιμή της. Αντίθετα μακριά από τη φωτιά (far field) ο χρόνος για την πιθανή κατάρρευση των στοιχείων εξαρτάται από τον ρυθμό έκλυσης ανάλογα με την «υπογραφή» της φωτιάς. Ο ρυθμός θέρμανσης των δομικών στοιχείων επίσης διαπιστώθηκε ότι είναι αρκετές τάξεις μεγέθους χαμηλότερος από τον ρυθμό ανύψωσης της θερμοκρασίας των καυσαερίων κατά την κίνηση τους πλησίον της οροφής της σήραγγας.

Η θέση και η λειτουργία των ανεμιστήρων παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στη δημιουργία σταθερής ταχύτητας αερισμού κατά μήκος της σήραγγας, στη σταθεροποίηση του στρώματος καπνού στην οροφή της και την ταχεία απομάκρυνση των εμπλεκόμενων χρηστών. Η θέση τους υπαγορεύεται από κατευθυντήριες οδηγίες της PIARC, τις απαιτήσεις της εκάστοτε μελέτης, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και το κυκλοφοριακό φόρτο. Για περαιτέρω λεπτομέρειες για τα τεχνικά χαρακτηριστικά και την διασύνδεση με τις περιφερειακές μονάδες βλέπε Παράρτημα I. Η θέση και λειτουργία των ανεμιστήρων αποτέλεσε αντικείμενο προσομοίωσης με CFD. Οι Se et al. [37] μελέτησαν με το λογισμικό ANSYS CFX τη επίδραση της θέσης και της διαδοχής των ανεμιστήρων ώσης στην απομάκρυνση των απαερίων καύσης στη σήραγγα Memorial για ισχύ 5MW υπό την παρουσία εμποδίου που αντιστοιχεί στη ύπαρξη άλλων οχημάτων. Οι ανεμιστήρες χωρίστηκαν σε ομάδες των (4) και τοποθετήθηκαν στην οροφή σε μεταξύ τους απόσταση 70m. Η μοντελοποίηση της τύρβης έγινε με τη βοήθεια του προτύπου διατμητικών τάσεων - Shear Stress Transport (SST). Η ανάλυση ευαισθησίας της κατανομή αξονικής ταχύτητας ανάντι του σημείου πυρκαγιάς έδειξε ότι όταν οι ανεμιστήρες είναι σχετικά πλησίον της φωτιάς, η ταχύτητα επηρεάζεται κυρίως από τις δυνάμεις αδράνειας της παραγόμενης ώσης των ανεμιστήρων. Σε μεγαλύτερες αποστάσεις, η αδράνεια μειώνεται και αλληλεπιδρά με τις δυνάμεις άνωσης που παράγονται από τα θερμά απαέρια. Μέσω του παραπάνω μηχανισμού γίνεται ανακατανομή της ροής των απαερίων κατά μήκος της σήραγγας μειώνοντας περαιτέρω το μέτρο της ταχύτητας.

Η επίδραση της ακτίνας καμπυλότητας στη λειτουργία των ανεμιστήρων μελετήθηκε από τους Wang et al.[38] όπου μελετήθηκε το παραγόμενο πεδίο πιέσεων για διαφορετικά μεγέθη πλέγματος. Στη περίπτωση αυτή να σημειωθεί ότι η παραγόμενη γεωμετρία είναι καμπυλόγραμμη και πρέπει να

χρησιμοποιηθούν ειδικοί γεννήτορες οριόδετων (body-fitted) ή ορθογώνιων καμπυλόγραμμων συντεταγμένων. Διαπιστώθηκε εξάρτηση από τη γεωμετρία της ημικυκλικής σήραγγας και των αποστάσεων του εκάστοτε ζεύγους ανεμιστήρων σε αυτή – ιδίως η θέση τοποθέτησης πριν και μετά την ακτίνα στροφής. Η ασυμμετρία του πεδίου ροής (πίεση, ταχύτητα) που παράγεται από την ώση των ανεμιστήρων μεταβάλλεται με την μείωση του διακένου μεταξύ των είτε με αύξηση της απόστασης τους από τον εγκάρσιο άξονα συμμετρίας

Η μοντελοποίηση της φωτιάς στο εσωτερικό σήραγγας καθώς αποτελεί έντονα περίπλοκο φαινόμενο με παρουσία τύρβης πραγματοποιείται με τη βοήθεια των δυο σημαντικότερων προτύπων του k-ε και του LES.

Ειδικότερα η επίδραση του προτύπου k-ε έχει μελετηθεί από τους Merci and Van Maele [39] όπου εξετάστηκαν το βασικό (standard) και το αναθεωρημένο (RNG) στη μορφή του πλουμίου, στη διαστρωμάτωση καπνού και τη συγκέντρωση CO κοντά στο σημείο της πυρκαγιάς σε σύγκριση με το πρότυπο μεγάλων δινών (LES). Η έρευνα έδειξε ότι τα αποτελέσματα διαστρωμάτωσης της θερμοκρασίας καθ' ύψος της σήραγγας ήταν σε συμφωνία καθώς η πληροφορία από το ένα πρότυπο χρησίμευε για την ικανοποίηση των παραδοχών που εφαρμόστηκαν στα υπόλοιπα. Ιδιαίτερα στο πρότυπο LES τα αποτελέσματα ήταν αρκετά ευαίσθητα ως προς το μέγεθος του πλέγματος – απαιτήθηκε η χρήση αρκετά πυκνού πλέγματος της τάξης των μερικών cm. Η προσομοίωση έγινε σε εργαστηριακή σήραγγα περιορισμένων διαστάσεων εξαιτίας της παραδοχής μονοδιάστατης ροής καπνού. Και στις δυο περιπτώσεις διαπιστώθηκε ισχυρή εξάρτηση της κρίσιμης ταχύτητας αερισμού από τον ρυθμό έκλυσης θερμότητας. Οι τιμές της υπερεκτιμήθηκαν κατά την επίλυση του LES για μεγέθη φωτιάς της τάξης των 3. 0 - 30 kW.

Εναλλακτικά οι Migoya et al. [40] χρησιμοποίησαν ένα απλοποιημένο μοντέλο ζωνών και σύγκριναν τα αποτελέσματα σε απόσταση 10 – 50m κατάντι με αντίστοιχα ευρέως εμπορικών κωδίκων (Fluent, PHOENICS) με χρήση του μοντέλου k-ε και του αλγορίθμου SIMPLEST για συζευγμένη μεταφορά ροής – θερμότητας. Στη συνέχεια έγινε σύγκριση της κατανομής θερμοκρασίας κατά μήκος του κεντρικού άξονα συμμετρίας με διαθέσιμες πειραματικές μετρήσεις όπου έδειξε καλή συμφωνία σε όλο το μήκος της σήραγγας με τυχόν διαφορές να οφείλονται στην διαφορετική μοντελοποίηση του μηχανισμού ακτινοβολίας που παρέχει ο κάθε αλγόριθμος.

2.4.1 Μοντέλα πλήρους κλίμακας

Τα κυριότερα αριθμητικά πειράματα που έχουν εκτελεσθεί σε πραγματικές σήραγγες υπό πλήρη κλίμακα, δίδονται στη συνέχεια :

Ονοματολογία - Θέση
Σήραγγα Runehamar – Νορβηγία
Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά
Μήκος 1600m, πλάτος 9.0m, ύψος 6.0m, διατομή 47m ² , Κλίση : +0.5% (0 < L ₁ < 500m), +0.0% (500 < L ₂ < 700m), -1.0% (700m < L ₃ < 1600m)
Μεθοδολογία και μετρούμενα μεγέθη
Πραγματοποίηση μετρήσεων ρυθμού έκλυσης θερμότητας (HRR), πεδίου ταχύτητας, θερμοκρασίας και συγκέντρωσης ρύπων για περιπτώσεις πυρκαγιών από ανάφλεξη φορτηγού φορτωμένου με καύσιμη ύλη (ξύλινες παλέτες συσκευασίας) υπό συνθήκες διαμήκους αερισμού μέσω φορητών ανεμιστήρων επί ημιφορτηγού . Η ταχύτητα αερισμού κατά μήκος της σήραγγας ήταν της τάξης των 2.0 – 3.0m/s

Με βάση την παραπάνω συλλογή μετρήσεων έχει πραγματοποιηθεί πλήθος δημοσιευμένων εργασιών από ερευνητική ομάδα του Τεχνικού Ινστιτούτου της Σουηδίας (SP) όπου μελετήθηκε η επίδραση πλήθους φυσικών παραγόντων που επηρεάζουν το φαινόμενο όπως ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας [31], τα επίπεδα ανύψωσης θερμοκρασίας κατά μήκος της σήραγγας [20,32], η κρίσιμη ταχύτητα [22], η θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση [19,24] και η δημιουργία ανάστροφου ρεύματος καπνού [23]. Τα παραπάνω συσχετίστηκαν και με αριθμητικές προσομοιώσεις με το λογισμικό FDS (βλέπε Κεφάλαιο – 3) τόσο σε πλήρη κλίμακα [30] όσο και σε μερική κλίμακα σε εργαστηριακή διάταξη αεροσήραγγας καπνού [23,33]. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι για τις θέσεις (0 – 40m) ανάντι της φωτιάς ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας και τα επίπεδα θερμοκρασίας στην οροφή ήταν υπερεκτιμημένα κατά τους υπολογισμούς. Αντίθετα για τις θέσεις (0 – 350m) κατάντι της φωτιάς υπήρχε πολύ καλή συμφωνία τόσο στη θερμοκρασία όσο και στη θερμική ισχύ μέσω συναγωγής και ακτινοβολίας. Παράλληλα έγιναν συγκρίσεις με απομακρυσμένο σταθμό μέτρησης (+458m) όπου

διαπιστώθηκαν αρκετά μεγάλες διαφορές κατά ύψος της σήραγγας που οφείλονται στον μηχανισμό μετάδοσης θερμότητας μέσω ακτινοβολίας με τα γύρω τοιχώματα αφού ληφθεί υπόψη το μέγεθος της φωτιάς 66 – 202 MW, των συντελεστών εκπομπής αιθάλης και του μηχανισμού καύσης (σύνθεση καυσίμων, στάδια οξείδωσης).

Ονοματολογία - Θέση
Memorial Tunnel – West Virginia - ΗΠΑ
Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά
Μήκος 857m, ύψος 7.9m, κλίση +3.25%
Μεθοδολογία και μετρούμενα μεγέθη
Πραγματοποίηση μετρήσεων ρυθμού έκλυσης θερμότητας (HRR), πεδίου ταχύτητας, θερμοκρασίας και συγκέντρωσης ρύπων για περιπτώσεις πυρκαγιών, από εμπλοκή ΙΧ οχημάτων, μικρών ημιφορτηγών και βαρέων οχημάτων σε συνθήκες φυσικού, ημιεγκάρσιου, πλήρως εγκάρσιου και διαμήκους αερισμού

Τα πειράματα έχουν αξιολογηθεί από λογισμικά υπολογιστικής ρευστοδυναμικής σε συγκριτικές μελέτες πιστοποίησης με αριθμητικές τιμές από προσομοιώσεις που βασίζονται είτε στο μοντέλο τύρβης k-ε [68-69] είτε στο LES [47]. Ειδικότερα ο ρυθμός έκλυσης φωτιάς προσομοιώθηκε με επιμήκεις ανοικτές δεξαμενές γεμάτες με ελαφρύ ακάθαρτο πετρέλαιο ή μίγμα πετρελαίου / βενζίνης. Οι ανεμιστήρες τοποθετήθηκαν στο ένα άκρο της σήραγγας και ενεργοποιούνταν σε ομάδες των τριών, δημιουργώντας σταθερό προφίλ ταχύτητας κατά μήκος της σήραγγας. Με τη βοήθεια του λογισμικού PHOENICS και χρήση οριόδετου πλέγματος ώστε να προσεγγιστεί με ακρίβεια η καμπυλόγραμμη γεωμετρία της διατομής υπολογίστηκε το πεδίο ροής και θερμοκρασίας και έγιναν συγκρίσεις με μετρήσεις που διενεργήθηκαν με τη βοήθεια καταγραφικών οργάνων (data loggers) κατά μήκος της σήραγγας. Χρησιμοποιώντας συναρτήσεις τοίχου και εισάγοντας τους μηχανισμούς άνωσης και τραχύτητας προσομοιώθηκε με όσο το δυνατόν οι συνθήκες ροής. Από τα αποτελέσματα υπήρχε αρκετά καλή συμφωνία τόσο για τις περιπτώσεις μηχανικού και φυσικού αερισμού.

Ονοματολογία - Θέση
Second Benelux Tunnel – Ολλανδία
Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά
Μήκος ~ 900m, πλάτος 9.8m, ύψος 5.1m, κλίση (maximum) +4.40%
Μεθοδολογία και μετρούμενα μεγέθη
<p>Πραγματοποίηση μετρήσεων ρυθμού έκλυσης θερμότητας (HRR), πεδίου ταχύτητας, θερμοκρασίας και συγκέντρωσης ρύπων για περιπτώσεις πυρκαγιών από διαρροή καυσίμων (pool fires), από εμπλοκή ΙΧ οχημάτων, μικρών ημιφορητών με καύσιμη ύλη. Η ταχύτητα αερισμού κατά μήκος της σήραγγας ήταν της τάξης των 6.0 m/s. Δεδομένης της χρονολογίας διεξαγωγής των πειραμάτων (2001) και της μορφής της διατομής (επάλληλες σήραγγες κιβωτοειδούς μορφής) ο κυριότερος όγκος αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση των συστημάτων σήραγγων του οδικού δικτύου στην Ολλανδία.</p>

Ονοματολογία - Θέση
Howard Tunnel – Baltimore - ΗΠΑ
Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά
Μήκος 2.650m, ύψος ~ 5.0m, κλίση 0.80%
Μεθοδολογία και μετρούμενα μεγέθη
<p>Με βάση πραγματικό ατύχημα πυρκαγιάς που συνέβη στην σιδηροδρομική σήραγγα του Howard Street καταστρώθηκαν εναλλακτικά σενάρια προσομοίωσης [52] με βάση το πρόγραμμα FDS (βλέπε κεφάλαιο – 3) και εκτελέστηκαν από την NIST ως εργασία πιστοποίησης αλλά και ως νομική απόδειξη (witness proof test) της εξέλιξης του ατυχήματος. Μοντελοποιήθηκε η διαρροή του καυσίμου, η διασπορά του και μετάδοση της φωτιάς σε γειτονικά βαγόνια του συρμού, η επίδραση της θερμότητας στο εσωτερικό και τα δομικά μέρη της σήραγγας. Τα επίπεδα θερμοκρασίας που παρατηρήθηκαν ήταν της τάξης των 1100 C και η ροή θερμότητας της τάξης των 100 – 150 kW/m².</p>

Ονοματολογία - Θέση
Caldecott Tunnel – California - ΗΠΑ
Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά
Μήκος 1028.0m, ύψος ~ 5.2m, κλίση 0.50 – 4.00 %
Μεθοδολογία και μετρούμενα μεγέθη
<p>Με βάση πραγματικό ατύχημα πυρκαγιάς που συνέβη στην οδική σήραγγα του Caldecott καταστρώθηκαν εναλλακτικά σενάρια προσομοίωσης με βάση το πρόγραμμα FDS (βλέπε κεφάλαιο – 3) και εκτελέστηκαν από την NIST ως εργασία πιστοποίησης και προσομοίωσης της εξέλιξης του ατυχήματος [52] που συνέβη τον Απρίλιο 1982 – δεδομένου ότι αφορούσε σύγκρουση και διασπορά σε πολλαπλά οχήματα. Μοντελοποιήθηκε η διαρροή του καυσίμου, η διασπορά του και μετάδοση της φωτιάς σε γειτονικά οχήματα, η επίδραση της θερμότητας στο εσωτερικό και τα δομικά μέρη της σήραγγας. Η προσέγγιση έγινε με τα ίδια πρότυπα όπως και για την σιδηροδρομική σήραγγα Howard Street. Τα επίπεδα θερμοκρασίας που παρατηρήθηκαν σε απόσταση 40 – 120m κατάντι ήταν της τάξης των 1100 - 1250 C και η διαμήκης ταχύτητα των απαερίων της τάξης των 10.0 – 15.0 m/s. Η ισχύς πυρκαγιάς ήταν παρόμοια (300 MW) με αυτή που μετρήθηκε στη σήραγγα Runehamar στη Νορβηγία (200 MW) . Παρόλα αυτά τα αποτελέσματα για την εκτιμώμενη θερμοκρασία των τοιχωμάτων διέφεραν αρκετά. Διαπιστώθηκε ότι τα τοιχώματα της σήραγγας δεν θα άντεχαν σε τόσο υψηλές θερμοκρασίες συνέπεια των συνθηκών αερισμού και του υλικού επικάλυψης που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των πειραμάτων (κεραμικά πλακίδια) σε σχέση με το πυράντοχο κάλυμμα δοκιμών στην σήραγγα Runehamar. Αυτό είχε ως συνέπεια να δύνανται να παρατηρηθούν τοπικές ρηγματώσεις ή/και αποκολλήσεις (spalling) σε τμήματα του θόλου.</p>

2.4.2 Μοντέλα υπό κλίμακα

Με τη βοήθεια του αδιάστατου αριθμού Froude, μετριέται ο λόγος της φυσικής συναγωγής ως προς την εξαναγκασμένη συναγωγή. Οι κρίσιμος αριθμός Froude δίδεται από τη σχέση 2.11:

$$Fr_C = \frac{V}{\sqrt{gH}} \quad (2.11)$$

Με βάση τον αριθμό Froude που ορίστηκε έχουν πραγματοποιηθεί πειράματα προσομοίωσης πυρκαγιών υπό κλίμακα. Η σχέση της ισχύος πυρκαγιάς και την ταχύτητας αερισμού και στις δυο περιπτώσεις ,(M – Model, F-Full scale) δίδεται από τις κάτωθι σχέσεις 2.12 – 2.13:

$$\frac{Q_M}{Q_F} = \left(\frac{l_M}{l_F}\right)^{5/2}, \quad (2.12) \quad \frac{V_M}{V_F} = \left(\frac{l_M}{l_F}\right)^{1/2} \quad (2.13)$$

Με τον τρόπο αυτό μετριοούνται οι παράμετροι σχεδιασμού (κρίσιμη ταχύτητα, γεωμετρία σήραγγας, φόρτος, επίπεδα θερμοκρασίας, διασπορά καπνού επίδραση κίνησης οχημάτων) χωρίς να διακόπτεται η λειτουργία της. Παρόλα αυτά διαπιστώθηκε ότι για μεγάλη ισχύ πυρκαγιάς οι συσχετίσεις που προτάθηκαν αδυνατούσαν να προβλέψουν την ανύψωση θερμοκρασίας [15] καθώς η φλόγα και θερμά καυσαέρια ακτινοβολούν προς τα τοιχώματα και τα τοιχώματα στη συνέχεια εξαιτίας των περιορισμένων διαστάσεων μεταφέρουν την θερμότητα μέσω συναγωγής και ακτινοβολίας, ώστε το τελικό παραγόμενο ισοζύγιο να είναι πολλαπλάσιο σε σχέση με φωτιές στην ύπαιθρο ή σε άλλους ανοικτούς χώρους.

2.5 Βασικά μεγέθη μοντελοποίησης πυρκαγιών

Τα βασικά φυσικά μεγέθη στον υπολογισμό της πυρκαγιάς εξαρτώνται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της σήραγγας, το είδος του αερισμού, τις τοπικές συνθήκες. Οι σημαντικότερες παράμετροι είναι :

2.5.1 Αριθμός Richardson

Με τη βοήθεια του αδιάστατου αριθμού Richardson, μετριέται ο λόγος των δυνάμεων αδράνειας ως προς τις βαρυντικές δυνάμεις. Οι κρίσιμος αριθμός Richardson δίδεται από τη σχέση 2.14:

$$Ri_C = \frac{\Delta\rho g H}{\rho_f V_c^2} \quad (2.14)$$

2.5.2 Κρίσιμη ταχύτητα

Ως κρίσιμη ταχύτητα ορίζεται η ελάχιστη ταχύτητα που επιτυγχάνεται μέσω διαμήκους αερισμού στο εσωτερικό της σήραγγας για την οποία αποφεύγεται η αναστροφή καπνού ανάντι του σημείου πυρκαγιάς. Η εμπειρική σχέση για την κρίσιμη ταχύτητα που προτείνεται από τον Thomas [25] δίδεται από τη σχέση 2.15:

$$V_C = \left(\frac{g Q_C H}{\rho_0 c_p T_f A} \right)^{1/3}, \quad (2.15)$$

που ισχύει καθώς ο κρίσιμος αριθμός $Fr_C \rightarrow 1$

Η πιο δημοφιλής σχέση που έχει προταθεί από τον Kennedy et al. [25] έχει τη μορφή της εξίσωσης 2.16 :

$$V_C = K_1 K_g \left(\frac{g Q_C H}{\rho_0 c_p T_f A} \right)^{1/3} \quad (2.16)$$

όπου :

$K_1 = Fr_c^{1/3}$, όπου ο κρίσιμος αριθμός Fr_c κατά τον Kennedy λαμβάνεται ίσος με 4.5

$K_g = 1 + 0.0375(\text{grade})^{0.80}$, παράγοντας κλίσης, όπου η κλίση (grade) λαμβάνεται ως ποσοστό (%)

A, διατομή της σήραγγας	[m ²]
C _p , ειδική θερμοχωρητικότητα του αέρα	[kJ/kgC]
ρ, πυκνότητα αέρα σε κανονικές συνθήκες	[kg/m ³]
T _f , θερμοκρασία καυσαερίων	[C]

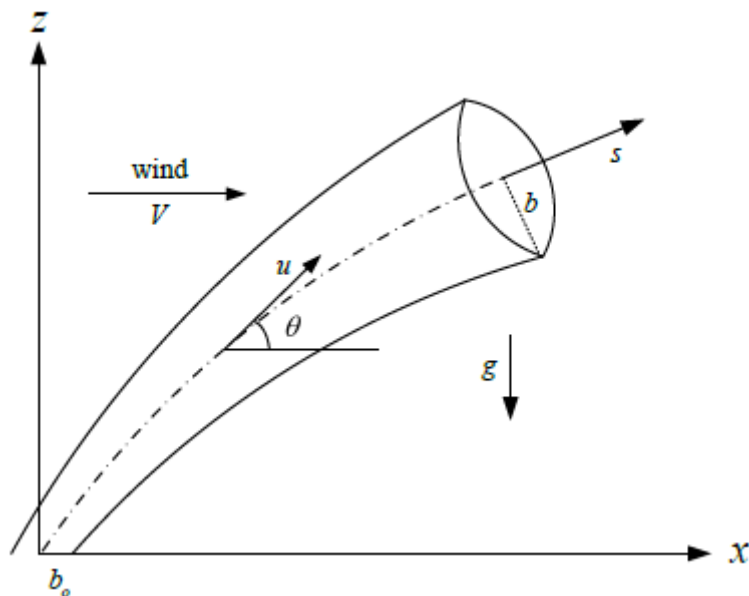
2.6 Κατηγορίες – διαστάσεις φλόγας

2.6.1 Γεωμετρικά μεγέθη πλουμίου

Η μελέτη του πλουμίου φωτιάς σε αεριζόμενη σήραγγα βασίζεται στις ακόλουθες παραδοχές [33] :

- Η διατομή του πλουμίου είναι κατά προσέγγιση κυκλική και η θερμοκρασία και ταχύτητα έχουν ομοιόμορφη κατανομή (top-hat).
- Η ακτίνα του πλουμίου είναι μικρή συγκριτικά με την ακτίνα καμπυλότητας.
- Οι μηχανισμοί διείδυσης αέρα (entrainment) εντός του πλουμίου είναι προσθετικοί. Ο πρώτος οφείλεται στη διαφορά μεταξύ της ταχύτητας u και της παράλληλης συνιστώσας $V\cos\theta$ προς το πλούμιο και ο δεύτερος στην κατακόρυφη συνιστώσα $V\sin\theta$.
- Ο καθαρός ρυθμός εισαγωγής αέρα είναι το γινόμενο ενός αδιάστατου συντελεστή επί τη περίμετρο της διατομής του πλουμίου και της αντίστοιχης διαφοράς ταχύτητας.
- Υπάρχουν επίσης οι δυο συντελεστές α, β που είναι ανεξάρτητοι της θέσης του πλουμίου.

Κατά τη κίνηση του πλουμίου, αρχικής ακτίνας b_0 εξαιτίας της επίδρασης του διαμήκη αερισμού, παρατηρείται απόκλιση της γεωμετρίας όπως φαίνεται στην Εικόνα – 19 :



Εικόνα 19 – Σκαρίφημα αλληλεπίδρασης πλουμίου φλόγας με διαμήκη αερισμό

Οι εξισώσεις διατήρησης που περιγράφουν το φαινόμενο δίδονται από τις σχέσεις 2.17 – 2.20:

Διατήρηση μάζας :

$$\frac{d}{d\xi}(B^2U) = 2B[a|U - V' \cos \theta| - |V' \sin \theta|] \quad (2.17)$$

Διατήρηση ορμής :

$$\pi \frac{d}{d\xi}(B^2U^2) = \frac{\sin \theta}{U} + \pi V' \cos \theta \frac{d}{d\xi}(B^2U) \quad (2.18)$$

$$\pi B^2 U^2 \frac{d\theta}{d\xi} = \frac{\cos \theta}{U} - \pi V' \sin \theta \frac{d}{d\xi}(B^2U) \quad (2.19)$$

Διατήρηση ενέργειας :

$$B^2 U \phi = \frac{1}{\pi} \frac{u^{*2}}{b_{f_0} g} \quad (2.20)$$

όπου οι αδιάστατες παράμετροι προσδιορίζονται ως :

- $B = b/b_{f_0}$, αδιάστατη ακτίνα πλουμίου
 $U = u/w^*$, αδιάστατη ταχύτητα πλουμίου
 $V' = V/w^*$, αδιάστατη ταχύτητα αερισμού
 $\phi = (T - T_0)/T_0$, αδιάστατη θερμοκρασία πλουμίου
 $\xi = s/b_{f_0}$, αδιάστατη θέση κατά μήκος της καμπύλης τροχιάς

όπου η χαρακτηριστική ταχύτητα του πλουμίου δίδεται από τη σχέση 2.20 :

$$w^* = \left(\frac{gQ}{b_{f_0} \rho_0 c_p T_0} \right)^{1/3} \quad (2.20)$$

2.6.2 Μοντελοποίηση πλουμίου φωτιάς σε αεριζόμενη σήραγγα

Για την πρόβλεψη του σημείου μέγιστης θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στην οροφή της σήραγγας χρησιμοποιούνται απλοποιημένα μοντέλα που βασίζονται στη προσθήκη ενός όρου «πηγής» για την αντιστάθμιση της διαφοράς ανάμεσα στη πραγματική πηγή φωτιάς και την ιδανική που αναπτύσσεται κατά την αξονοσυμμετρική διασπορά του πλουμίου σε ανοικτό πεδίο σύμφωνα με τη σχέση 2.21 :

$$m_{p0}(z) = 0.071Q_c^{1/3} z^{5/3} \quad (2.21)$$

όπου

$m_{p0}(z)$, ο ρυθμός διείσδυσης καπνού [kg/s]

Q_c , η μεταφερόμενη ισχύς μέσω συναγωγής [MW]

z , ύψος [m]

Ο ρυθμός διείσδυσης αέρα σε πυρκαγιές εντός σηράγγων είναι πολύ ισχυρότερος από αυτόν σε ανοικτό χώρο. Ο λόγος των παροχών μπορεί να εκφρασθεί σύμφωνα με τη σχέση 2.22

$$\frac{m_p(z)}{m_{p0}(z)} = C_k V' \quad (2.22)$$

όπου,

$m_p(z)$, μαζική παροχή καπνού σε δοσμένο ύψος στο εσωτερικό σήραγγας [kg/s]

$m_{p0}(z)$, μαζική παροχή καπνού σε ανοικτό χώρο για το ίδιο ύψος [kg/s]

C_k , εμπειρικός συντελεστής

Η επίδραση της ταχύτητας αερισμού στην κλίση της φλόγας δίδεται από τη σχέση 2.23

$$\sin \theta = \begin{cases} 1 & , V' \leq 0.19 \\ (5.26V')^{-3/5} & , V' > 0.19 \end{cases} \quad (2.23)$$

Παρατηρείται ότι όταν η ταχύτητα αερισμού είναι μικρή, η μορφή της φλόγας διατηρείται ακέραια με αμελητέα παραμόρφωση. Αντίστοιχα ο συντελεστής C_k δίδεται από τη σχέση 2.24

$$C_k = \begin{cases} 1/V' & , V' \leq 0.19 \\ 5.26 & , V' > 0.19 \end{cases} \quad (2.24)$$

Οπότε με αντικατάσταση λαμβάνεται η σχέση για τη μαζική παροχή :

$$m_p(z) = \begin{cases} 0.071 Q_c^{1/3} z^{5/3} & , V' \leq 0.19 \\ 0.3735 Q_c^{1/3} z^{5/3} V' & , V' > 0.19 \end{cases} \quad (2.25)$$

2.6.3 Μεγέθη πυρκαγιάς μικρής ισχύος

Θεωρώντας τη σήραγγα ως κυλινδρικό εναλλάκτη μπορεί να καταστρωθεί ένα ισοζύγιο ενέργειας, για τον υπολογισμό της μέσης ανύψωσης θερμοκρασίας του πλουμίου λόγω της πυρκαγιάς, σύμφωνα με τη σχέση 2.26:

$$\Delta T(z) = \frac{Q_c}{m_p(z)c_p} = \frac{(1-x_r)Q}{m_p(z)c_p} \quad (2.26)$$

όπου x_r , το ποσοστό ισχύος της πυρκαγιάς που εκπέμπεται υπό τη μορφή ακτινοβολίας

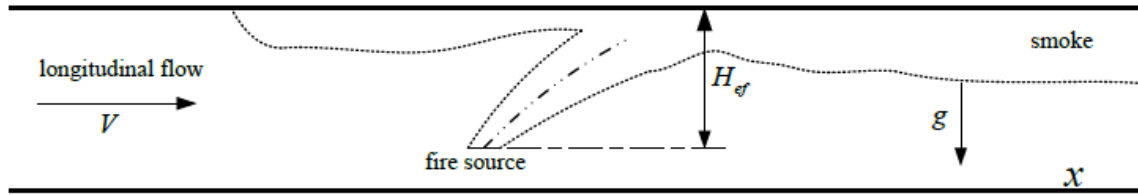
Η κατανομή της θερμοκρασίας κατά μήκος της σήραγγας σε οποιαδήποτε θέση και χρόνο, μπορεί να εκτιμηθεί προσεγγιστικά με βάση την απλοποιημένη εμπειρική σχέση (2.27) εφόσον η σήραγγα θεωρηθεί ως απλοποιημένο πρότυπο εναλλάκτη [24]:

$$T(x, t) = T_A + [T_s(0, t + x/u) - T_A] \exp\left(-\frac{kP}{m_p(z)c_p} x\right) \quad (2.27)$$

Οι Lonnermark και Ingason [27] παρατήρησαν ότι το πλάτος της σήραγγας παίζει πολύ μικρό ρόλο στη τελική θερμοκρασία που επιτυγχάνεται στην οροφή της σήραγγας με βάση πειράματα που εκτέλεσαν υπό κλίμακα [16]. Με τον τρόπο αυτό, η ανύψωση της θερμοκρασίας εκφράζεται με βάση τη σχέση 2.28 :

$$\Delta T_{\max} = C_T \Delta T(H_{ef}) \quad (2.28)$$

όπου H_{ef} το ενεργό ύψος σύμφωνα με την Εικόνα - 20



Εικόνα 20 – Προσδιορισμός του ενεργού ύψους σε επαρκώς αεριζόμενη σήραγγα

Όταν η ταχύτητα αερισμού είναι πολύ μικρή, το πλούμιο δεν καμπυλώνεται πολύ – παρά μόνο σε ένα βαθμό – ώστε η γωνία φλόγας να είναι κατά προσέγγιση κάθετη. Με βάση τις ανωτέρω παραδοχές λαμβάνεται η σχέση 2.29 :

$$\sin \phi = \frac{H_{ef}}{L_{traj}} = \begin{cases} 1 & , V' \leq 0.19 \\ k \left(\frac{gQ}{\rho_0 T_0 c_p V^3 b_{f_0}} \right)^{1/5} & , V' > 0.19 \end{cases} \quad (2.29)$$

όπου, k, συντελεστής που προκύπτει από πειραματικά δεδομένα

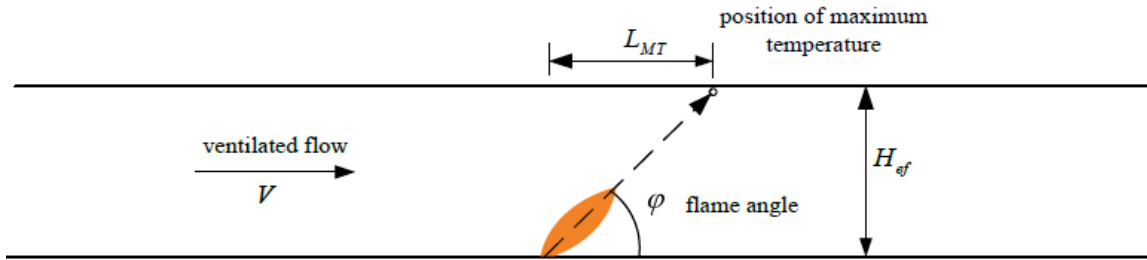
Μετασχηματίζοντας την παραπάνω εξίσωση λαμβάνεται η σχέση 2.30:

$$\sin \phi = \frac{H_{ef}}{L_{traj}} = \begin{cases} 1 & , V' \leq 0.19 \\ (5.26V')^{-3/5} & , V' > 0.19 \end{cases} \quad (2.30)$$

Η θέση μέγιστης θερμοκρασίας στην οροφή της σήραγγας δίδεται από την σχέση 2.31 με βάση τη γεωμετρία της Εικόνας - 21.

$$L_{MT} = H_{ef} \cot(\arcsin \theta) \quad (2.31)$$

όπου H_{ef} είναι το ενεργό ύψος, δηλαδή η κάθετη απόσταση ανάμεσα στην οροφή της σήραγγας και τη βάση της φλόγας.



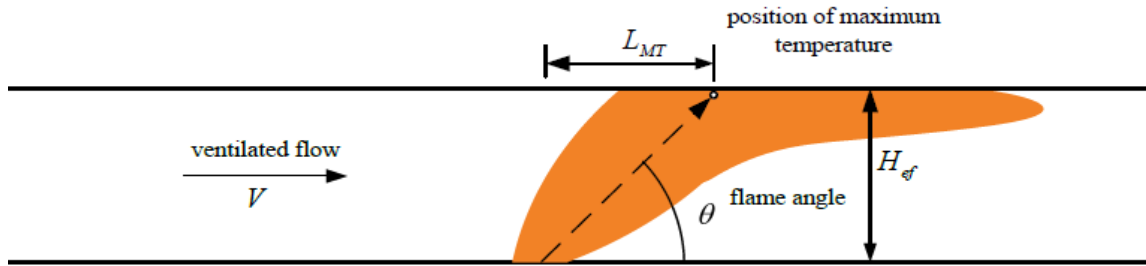
Εικόνα 21 – Προσδιορισμός των χαρακτηριστικών φλόγας και θέσης μέγιστης θερμοκρασίας για πυρκαγιά μικρής ισχύος

2.6.4 Μεγέθη πυρκαγιάς μεγάλης ισχύος

Για την περίπτωση όπου ξεσπά πυρκαγιά μεγάλης ισχύος, η φλόγα καταλαμβάνει όλο το ελεύθερο ύψος της σήραγγας. Στη περίπτωση αυτή η ανύψωση της θερμοκρασίας, προσδιορίζεται ουσιαστικά από τη θερμοκρασία φλόγας. Η εκτίμηση της μαζικής παροχής του πλουμίου είναι πολύ δύσκολη και η εκτίμηση της θερμοκρασίας δεν μπορεί να γίνει με βάση αναλυτικές θεωρίες. Η μέση ανύψωση μπορεί να εκτιμηθεί με βάση τη σχέση 2.32 :

$$\Delta T_{\max} = \begin{cases} 17.5 \frac{Q^{2/3}}{H_{ef}^{5/3}}, V' \leq 0.19 \\ \frac{Q}{Vb_{fo}^{1/3} H_{ef}^{5/3}}, V' > 0.19 \end{cases} \quad (2.32)$$

Η σχέση εφαρμόζεται σε ένα όγκο της ζώνης καύσης που αλληλεπιδρά με τα τοιχώματα της σήραγγας. Στη συνέχεια όπως αναφέρθηκε παραπάνω η ανύψωση θερμοκρασίας προσδιορίζεται από τη θερμοκρασία της φλόγας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να παρατηρούνται μεγάλες διαφορές στις πειραματικές μετρήσεις υπό πλήρη κλίμακα καθώς έχουν αναφερθεί θερμοκρασίες της τάξης των 800 – 1100 C (Runehamar tunnel) μέχρι και 1370 C (Memorial tunnel) ανάλογα με την ισχύ του σεναρίου. Η θέση της μέγιστης θερμοκρασίας στη οροφή της σήραγγας μπορεί να εκφρασθεί μέσω γεωμετρικών σχέσεων με βάση το σχήμα (Εικόνα – 22)



Εικόνα 22 - Προσδιορισμός των χαρακτηριστικών φλόγας και θέσης μέγιστης θερμοκρασίας για πυρκαγιά μεγάλης ισχύος

Όταν η ταχύτητα αερισμού είναι μικρή, τότε είναι δυνατόν να παρατηρηθεί αναστροφή του καπνού σε κάποιο μήκος ανάντι της ροής. Το αδιάστατο μήκος μπορεί να ορισθεί συναρτήσει του αριθμού Ri και της αδιάστατης ταχύτητας V^* , σύμφωνα με τη σχέση 2.33 :

$$L_b^* = \frac{L_b}{H} = \begin{cases} 18.5 \ln(0.81 Ri'^{1/3}) & , Q^* \leq 0.15 \\ 18.5 \ln(0.43/V^*) & , Q^* > 0.15 \end{cases} \quad (2.33)$$

Από την ανωτέρω σχέση διαπιστώνεται ότι για μεγάλα μεγέθη πυρκαγιών ($Q^* > 0.15$), το μήκος του στρώματος αναστροφής του καπνού (back-layering) είναι ανεξάρτητο του αριθμού Ri και εξαρτάται μόνο από τη ταχύτητα V^* . Ο τροποποιημένος αριθμός Ri' , η αδιάστατη ταχύτητα V^* , και ο αδιάστατος ρυθμός έκλυσης θερμότητας δίδονται από τις σχέσεις 2.34 – 2.36 :

$$Ri' = \frac{gQ}{\rho_o c_p T_o V_o^3 H}, \quad (2.34)$$

$$V^* = \frac{V}{\sqrt{gH}}, \quad (2.35)$$

$$Q^* = \frac{Q}{\rho_o c_p T_o g^{1/2} H^{5/2}} \quad (2.36)$$

Ο τροποποιημένος αριθμός Ri , δίδεται συναρτήσει της αδιάστατης ταχύτητας V^* , σύμφωνα με τη σχέση 2.37 :

$$Ri' = \frac{b_{f_0}}{H} V'^{-3} \quad (2.37)$$

Η κλίση της φλόγας, ανάλογα με την αδιάστατη ταχύτητα V' , δίδεται από την σχέση 2.38:

$$\sin \phi = \frac{H_{ef}}{L_{traj}} = \begin{cases} 1 & , V' \leq 0.19 \\ (5.26V')^{-3/5} & , V' > 0.19 \& Q^* \leq 0.15 \\ 0.25(b_{f_0} V'^3/H)^{-1/5} & , V' > 0.19 \& Q^* > 0.15 \end{cases} \quad (2.38)$$

Παρατηρείται ότι η κλίση της φλόγας μπορεί να χωρισθεί σε τρεις κύριες ζώνες :

- Ζώνη I, όπου η φλόγα είναι κατακόρυφη όταν η αδιάστατη ταχύτητα $V' \leq 0.19$
- Ζώνη II, όπου η κλίση της φλόγας μεταβάλλεται σύμφωνα με την V' υψωμένο στη δύναμη $3/5$,όταν ισχύει $V' \leq 0.19 \& Q^* \leq 0.15$
- Ζώνη III, όπου η κλίση της φλόγας είναι ανεξάρτητη του ρυθμού έκλυσης όταν $Q^* > 0.15$

3

3. Το λογισμικό FDS

3.1 Δομή του λογισμικού FDS

Το λογισμικό Fire Dynamics Simulator (F.D.S) αποτελείται από έναν κύριο κώδικα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής γραμμένο σε FORTRAN 90. Ο κώδικας είναι ελεύθερης πρόσβασης μέσω διαδικτύου (μέσω της ιστοσελίδα google.code.com) σε απευθείας εκτελέσιμη μορφή (αρχείο .exe) είτε ως πηγαίος κώδικας (αρχεία .for και βιβλιοθήκες υπορουτίνων / συναρτήσεων).

Η πρώτη έκδοση διατέθηκε περί τα μέσα του 2000. Έκτοτε έχουν αναπτυχθεί πέντε (5) κύριες εκδόσεις, επιπλέον αναβαθμίσεις και συντηρήσεις λογισμικού βάσει και των αυξανόμενων απαιτήσεων και αλληλεπίδρασης μεταξύ των χρηστών. Υπεύθυνη για την ανάπτυξη του κώδικα είναι η Εθνική Επιτροπή Προτύπων των ΗΠΑ (National Institute for Standard and Technology – NIST) σε συνεργασία με επαγγελματικούς φορείς στο εσωτερικό (Society of Fire Protection Engineers (SFPE), NFPA) και στο εξωτερικό (VTT Technical Research Centre of Finland) καθώς και με αναγνωρισμένα εργαστήρια Πανεπιστημίων και ερευνητικών κέντρων. Οι ενδιαφερόμενοι χρήστες αποκτούν την τελευταία διαθέσιμη έκδοση του λογισμικού μαζί με το απαραίτητο υλικό τεκμηρίωσης [41-42].

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

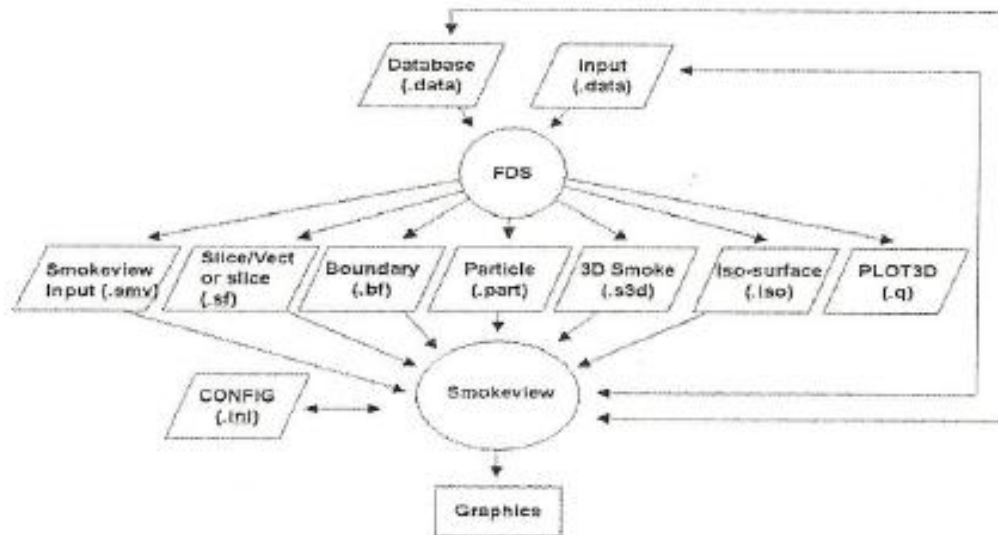
- μεταφορά θερμότητας και προϊόντων καύσης και καπνού λόγω φωτιάς υπό χαμηλή ταχύτητα
- Μεταφορά θερμότητας σε διαφασικές ροές αερίου / υγρού και αερίου / στερεού
- Πυρόλυση
- Ανάπτυξη και διάδοση φλόγας σε ανοικτές πυρκαγιές

- Ενεργοποίηση καταιονιστήρων και ανιχνευτών καπνού / θερμότητας σε περιπτώσεις πυρκαγιών σε κλειστούς χώρους (καταστήματα, υπόγειους χώρους στάθμευσης, εμπορικά κέντρα, κ.ά).

Το κύριο αρχείο εισόδου αποτελείται από επιμέρους τμήματα όπου δηλώνονται το χωρίο και το πλέγμα διακριτοποίησης, οι θερμοφυσικές ιδιότητες των υλικών, ο χρόνος επίλυσης, τυχόν εκλύσεις αερίων ή εισαγωγή στερεών σωματιδίων, μοντέλα καύσης, ακτινοβολίας και χημικής αντίδρασης, σημεία μέτρησης και αποθήκευσης παραμέτρων όπως θερμοκρασία και συγκεντρώσεις συστατικών, επίπεδα / τομές για την γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων. Διαγραμματικά η μορφή του αρχείου εισόδου που γράφεται υπό την μορφή κειμένου σε έναν κοινό επεξεργαστή είναι η ακόλουθη :

[	Επικεφαλίδα]
[	Σχόλια]
[	ορισμός πλέγματος]
[	ορισμός χρόνου επίλυσης]
[	ορισμός ιδιοτήτων υλικών]
[	ορισμός γεωμετρίας]
[	ορισμός συνοριακών συνθηκών]
[	ορισμός χαρακτηριστικών πυρκαγιάς]
[	ορισμός θέσεων για την αποθήκευση τιμών]
[	ορισμός θέσεων για την απεικόνιση αποτελεσμάτων]	
[	Σχόλια]
[	Τέλος]

Μετά την εκτέλεση της προσομοίωσης παράγονται αρχεία εξόδου που περιέχουν πληροφορίες για τα δεδομένα που μας ενδιαφέρουν. Τα δεδομένα εισάγονται στον μετεπεξεργαστή Smokeview προκειμένου να εξαχθούν ισοσταθμικές καμπύλες θερμοκρασίας, συγκέντρωσης, διανυσμάτων ταχυτήτων, τροχιές σωματιδίων με τη μέθοδο Lagrange, τιμές πίεσης, πυκνότητας, ρυθμού έκλυσης θερμότητας, μεταφορά θερμότητας μεταξύ τοιχωμάτων ή διακριτών φάσεων, επιμέρους συγκέντρωσης συστατικών συναρτήσει του χρόνου (βλέπε Εικόνα 23). Για περαιτέρω πληροφορίες, ο ενδιαφερόμενος χρήστης μπορεί να ανατρέξει στο τεχνικό εγχειρίδιο χρήσης.



Εικόνα 23 - Διάγραμμα δεδομένων εισόδου - εξόδου στο λογισμικό FDS / SmokeView

3.2 Μαθηματικό μοντέλο

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

Υδροδυναμικό μοντέλο

Ο κώδικας επιλύει μία ξεχωριστή μορφή των εξισώσεων Navier – Stokes κατάλληλη για χαμηλούς αριθμούς Ma, υπό την παρουσία φωτιάς με βάση τον αλγόριθμο πρόβλεψης – διόρθωσης (Predictor – Corrector) με διακριτοποίηση μέσω πεπερασμένων διαφορών με ακρίβεια δεύτερης τάξης στον

χώρο και το χρόνο. Σημειώνεται ότι το πλέγμα που χρησιμοποιείται παντού είναι ορθογώνιο καρτεσιανό. Οι εξισώσεις επίλυσης δίδονται από τις ακόλουθες σχέσεις 3.1 - 3.4 :

Διατήρηση Μάζας :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{u} = \dot{m}_b''' \quad (3.1)$$

Διατήρηση Ορμής :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{u}) + \nabla \cdot \rho \vec{u} \vec{u} + \nabla \cdot \vec{p} = \rho \vec{g} + \vec{f}_b + \nabla \cdot \tau_{ij} \quad (3.2)$$

όπου :

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

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

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

μ , δυναμικός συντελεστής ιξώδους

Διατήρηση ενέργειας :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h_s) + \nabla \cdot \rho h_s \vec{u} = \frac{Dp}{Dt} + \dot{q}''' - \dot{q}_b''' - \nabla \cdot \dot{q}'' + \varepsilon \quad (3.3)$$

όπου :

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

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

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

$$p = \frac{\rho R T}{W} \quad , \quad \text{η καταστατική εξίσωση}$$

Διατήρηση συστατικών :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_a) + \nabla \cdot \rho Y_a \vec{u} = \nabla \rho D_a \nabla Y_a + \dot{m}_a''' + \dot{m}_b''' \quad (3.4)$$

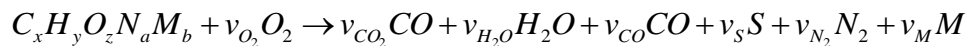
όπου :

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

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

Μοντέλο καύσης

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



Τα προϊόντα θεωρείται ότι δεν καταναλώνουν ποσότητες οξυγόνου κατά τον σχηματισμό τους. Αντίστοιχα, η παραγόμενη αιθάλη θεωρείται ως μίγμα άνθρακα και υδρογόνου, με τον στοιχειομετρικό συντελεστή να δίδεται από τη σχέση 3.5:

$$\nu_S = \frac{W_F}{W_S} y_S, \quad W_S = X_H W_H + (1 - X_H) W_C \quad (3.5)$$

Αντίστοιχα ο στοιχειομετρικός συντελεστής για το μονοξείδιο του άνθρακα δίδεται από τη σχέση 3.6:

$$\nu_{CO} = \frac{W_F}{W_{CO}} y_{CO} \quad (3.6)$$

Η έκφραση του γραμμομοριακού κλάσματος, Z , μπορεί να δοθεί ως γραμμικός συνδυασμός των κλασμάτων μάζας καυσίμου και οξειδωτικού, σύμφωνα με τη σχέση 3.7 :

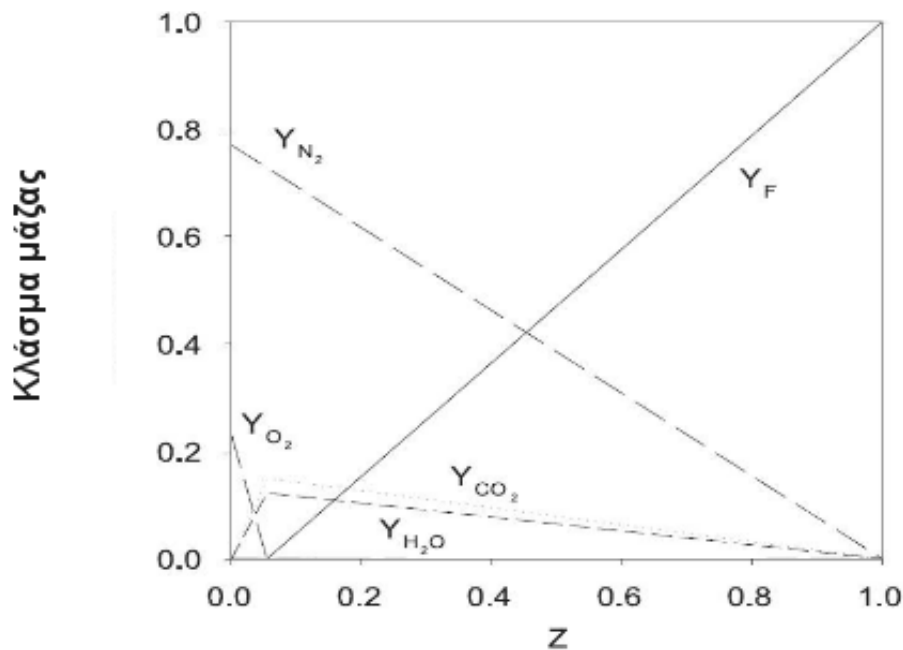
$$Z = \frac{sY_F + (Y_{O_2} - Y_{O_2}^\infty)}{sY_F^I + Y_{O_2}^\infty}; \quad s = \frac{\nu_{O_2}W_{O_2}}{\nu_F W_F}; \quad \nu_F = 1 \quad (3.7)$$

όπου το Y_F^I είναι το κλάσμα μάζας του καυσίμου στο ρεύμα των αντιδρώντων. Επίσης το γραμμομοριακό ποσοστό μίγματος μπορεί να οριστεί και με βάση το κλάσμα μάζας του καυσίμου και των προϊόντων καύσης σύμφωνα με τη σχέση 3.8 :

$$Z = \frac{1}{Y_F^I} \left(Y_F + \frac{W_F}{xW_{CO_2}} Y_{CO_2} + \frac{W_F}{xW_{CO}} Y_{CO} + \frac{W_F}{xW_S} Y_S \right), \quad (3.8)$$

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

Τιμές για τους στοιχειομετρικούς συντελεστές αιθάλης και μονοξειδίου μπορούν μέσω πειραματικών μετρήσεων κατά τη διάρκεια της καύσης. Τυπικό διάγραμμα για την μεταβολή των γραμμομοριακών κλασμάτων κατά τη καύση παριστάνεται για το μεθάνιο στην Εικόνα - 24 .



Εικόνα 24 - Διάγραμμα μεταβολής κλάσματος μάζας - γραμμομοριακών συστατικών μίγματος καύσης

Μοντέλο ακτινοβολίας

Η ένταση ακτινοβολίας επιλύεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων ελέγχου (Finite Control Volume – FVM) μέσω της σχέσης 3.9 :

$$\bar{\nabla} \bar{\Omega} I + \kappa I = \kappa \frac{\sigma T^4}{\pi} \quad (3.9)$$

Ο όρος πηγής στην εξίσωση διατήρησης ενέργειας υπολογίζεται μέσω διακριτής έκφρασης της απόκλισης της ακτινοβολούμενης ισχύος (radiative flux) σύμφωνα με τη σχέση 3.10:

$$-\nabla \cdot q_r = -\int_{4\pi} \nabla \Omega I d\Omega \approx \left(\sum_{l=1}^L w^l I^l - 4\sigma T^4 \right) \quad (3.10)$$

Όπου w^l , συντελεστής βαρύτητας και σ , η σταθερά Stefan – Boltzmann.

Για τις περιπτώσεις όπου το καύσιμο είναι μία επιφάνεια με κύρια χαρακτηριστικά ανάκλασης και εκπομπής, η οριακή συνθήκη ακτινοβολίας δίδεται από τη σχέση 3.11 :

$$I(r, w) = \frac{\varepsilon_w \sigma T_w^4}{\pi} + \frac{1 - \varepsilon_w}{\pi} \int_{n\Omega} |n\Omega| I(r_w, \Omega') d\Omega' \quad (3.11)$$

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

3.3 Αλγόριθμος επίλυσης

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

1) Υπολογισμός του «μέσου πεδίου» ταχύτητας \bar{u}^n

2) Εκτίμηση των παραμέτρων ρ , Y_α , \bar{p}^n για το επόμενο χρονικό βήμα χρησιμοποιώντας ρητό σχήμα Euler. Έτσι π.χ για τον υπολογισμό της πυκνότητας, χρησιμοποιείται η σχέση 3.12 :

$$\frac{\rho^* - \rho^n}{\Delta t} + \nabla \rho^n \bar{u}^n = 0 \quad (3.12)$$

3) Ανανέωση των τιμών ρ , Y_α στα όρια του πλέγματος

4) εφαρμογή των οριακών συνθηκών για τις τιμές των ρ , Y_α

5) Υπολογισμός της απόκλισης του πεδίου ταχύτητας $\nabla \bar{u}^n$

6) Επίλυση για την διαταραχή του πεδίου πίεσης μέσω της εξίσωσης Poisson σε κάθε επιμέρους κελί

$$\nabla^2 H^m = - \left[\frac{\nabla u^* - \nabla \bar{u}^n}{\Delta t} \right] - \nabla \bar{F}^n \quad (3.13)$$

7) Επίλυση της ταχύτητας στο επόμενο χρονικό βήμα σύμφωνα με τη σχέση 3.14

$$\frac{u^* - \bar{u}^n}{\Delta t} + \nabla \bar{F}^n + \nabla H^m = 0 \quad (3.14)$$

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

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

3.4 Μοντελοποίηση τύρβης

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

Ο χρόνος επίλυσης μέσω της τεχνικής DNS, όπου το πεδίο ροής επιλύεται για όλες τις κλίμακες μήκους και χρόνου είναι πολύ υψηλός και εξαρτάται από τον τοπικό (πλεγματοειδή) αριθμό Reynolds. Έχει βρει εφαρμογή σε εσωτερικές ροές ιδιαίτερα περιορισμένου μήκους ή σε σωλήνες μικρής διαμέτρου με χαμηλή ταχύτητα, όπου ακόμα και σε αυτές τις περιπτώσεις ο χρόνος κυμαίνεται από πολλές ώρες μέχρι μερικές ημέρες [45-46] σε συστοιχίες H/Y. Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται χρησιμοποιούνται για την πιστότητα και τις παραδοχές των μοντέλων τύρβης για την εκάστοτε εφαρμογή καθώς και της ακρίβειας των τυχόν πειραματικών μετρήσεων.

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

Ο ρυθμός καταστροφής (eddy dissipation) της τύρβης κατά τη μετατροπή της σε θερμότητα, προσεγγίζεται μέσω της σχέσης 3.15 [36-38]:

$$\varepsilon = \tau_{ij} \nabla u = \mu \left(2S_{ij} S_{ij} - \frac{2}{3} (\nabla u)^2 \right) \quad (3.15)$$

Ο συντελεστής τυρβώδους συνεκτικότητας κατά την ανάλυση του Smagorinsky δίδεται από τη σχέση 3.16

$$\mu_{LES} = \rho (C_s \Delta) \left(2\bar{S}_{ij} : \bar{S}_{ij} - \frac{2}{3} (\nabla \bar{u})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.16)$$

όπου

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

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

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

C_s , εμπειρική σταθερά

Σημειώνεται ότι οι αριθμοί Pr_t και Sc_t διατηρούνται σταθεροί κατά την διαδικασία επίλυσης

3.5 Πιστοποίηση F.D.S σε προσομοιώσεις φωτιάς σήραγγων

Με όσα αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους αλλά και στο κεφάλαιο 2 (§2.4), το λογισμικό FDS έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε εργασίες πιστοποίησης και σύγκρισης με πειραματικά δεδομένα καθώς και σε προσομοιώσεις πρόβλεψης ροϊκών μεγεθών ιδίως σε μεγάλες σήραγγες. Σε πιστοποίηση των αποτελεσμάτων υποβάλλονται και οι νέες εκδόσεις των προγραμμάτων από τα συνεργαζόμενα ινστιτούτα, όπου για περισσότερες πληροφορίες ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στον οδηγό πιστοποίησης του λογισμικού[38]. Τα τελευταία χρόνια οι σημαντικότερες εργασίες στον τομέα αυτό που συνεχίζονται ακόμα και σήμερα, επικεντρώνονται στα εξής :

Σήραγγα Runehamar

Εκτός από τις εργασίες του Τεχνικού Ινστιτούτου της Σουηδίας (SP), δημοσιευμένες εργασίες επάνω στα αποτελέσματα της σήραγγας Runehamar έχουν αναφερθεί και από τον M. K. Cheong [48] όπου η καύσιμη ύλη επί του ημιφορτηγού διακριτοποιήθηκε σε καρτεσιανό πλέγμα με χρήση κατάλληλων εντολών για τις ιδιότητες των υλικών και τις συνθήκες ροής, Στη συνέχεια μελετήθηκε το θερμοκρασιακό πεδίο και ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας (HRR) με χρήση κελιών της τάξης των 150 – 300 mm.

Σήραγγα Memorial

Δημοσιευμένες εργασίες πιστοποίησης του FDS έχουν πραγματοποιηθεί από τις αρχικές εκδόσεις του λογισμικού. Ο S. Cocharad [47] έχει συγκρίνει τα πειραματικά δεδομένα θερμοκρασίας σε διάφορες διατομές κατά μήκος της σήραγγας υπό τη επίδραση εγκάρσιου αερισμού με τα αποτελέσματα του FDS 2.0. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι θερμοκρασίες συσχετίζονται ικανοποιητικά με τις προσομοιώσεις τόσο κοντά στο σημείο της πυρκαγιάς όσο και στα δυο άκρα (Βόρειο – Νότιο) της σήραγγας.

Σήραγγα Caldecott

Μια από τις πρώτες εφαρμογές πιστοποίησης που έγιναν από την NIST [52] ήταν η συγκριτική αξιολόγηση των προλέξεων του FDS με τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα θερμοκρασίας κατά τη έναρξη φωτιάς λόγω διαρροής καυσίμου. Αξιολογήθηκε επίσης ο ρυθμός ανόδου της θερμοκρασίας ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο πρότυπο καύσιμο και η επίδραση της θερμοκρασίας στα δομικά μέρη της σήραγγας. Τα παρατηρούμενα επίπεδα ήταν της τάξης των 950 – 1100 °C.

Εφαρμογές σε άλλες σήραγγες

Ερευνητές από Πανεπιστήμια του Εξωτερικού (ιδίως στην Ν.Α Ασία) έχουν εφαρμόσει το FDS στη προσομοίωση καπνού, θερμοκρασίας και συγκέντρωσης ρύπων στο εσωτερικό σήραγγας σε περιπτώσεις διαμήκους αερισμού. Οι An Yong-lin et al. [49] κατέστρωσαν γεωμετρία σήραγγας και σενάρια πυρκαγιάς από 5 – 50 MW, όπου μελετήθηκε το ροϊκό και θερμοκρασιακό πεδίο κατά την ενεργοποίηση ή αστοχία των ανεμιστήρων ώσης.

Οι Truchot et al. [50] χρησιμοποίησαν έναν αλγόριθμο δυο βημάτων για τη μοντελοποίηση της καύσης σε ΙΧ επιβατηγό όχημα εξαιτίας της αλληλεπίδραση του υγρού καυσίμου με τα υλικά ταπετσαρίας της καμπίνας. Τα αποτελέσματα συσχετίστηκαν με πραγματικές μετρήσεις ανάντι και κατάντι του σημείου πυρκαγιάς σε τμήμα σήραγγας μήκους 1300m χρησιμοποιώντας περίπου 1900800 κελιά, χαρακτηριστικής διαμέτρου 20 cm πλησίον της φωτιάς.

Οι Chen και Leong [51] μελέτησαν τα στατιστικά χαρακτηριστικά της τυρβώδους διανομής καπνού (κατανομή, μέση τιμή, διασπορά αποτελεσμάτων) σε σήραγγα διαστάσεων 400m υπό την επίδραση

ομοιόμορφης ταχύτητας 3.0 m/s, με σκοπό να εξετάσουν τη ανάλυση ευαισθησίας των μετρήσεων με το τελικό μέγεθος του κελιού.

Παράλληλη έκδοση του FDS

Εκτός από τη συνήθη σειριακή έκδοση του λογισμικού, είναι διαθέσιμη και η παράλληλη έκδοση για συστοιχίες (cluster) επεξεργαστών ιδίως σε κέντρα Η/Υ πανεπιστημίων και ερευνητικών ιδρυμάτων. Η διασύνδεση των επεξεργαστών (CPU) γίνεται με την προσθήκη του λογισμικού επικοινωνίας MPI (Message Passage Interface). Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται σημαντική μείωση υπολογιστικού χρόνου αλλά επιπρόσθετα μπορούν να εκτελεστούν υπολογιστικά πειράματα με πολλαπλάσιο αριθμό κελιών μιας και η προσομοίωση με τη μέθοδο LES απαιτεί πολύ μικρό μέγεθος υπολογιστικού κελιού. Οι Weisenpacher et al. [45 – 46] εκτέλεσαν προσομοίωση φωτιάς σήραγγας μήκους 180m με ισχύ 10MW για συνολικό χρόνο 150sec. Εξετάστηκε η επίπτωση της διάσπασης του χωρίου σε ένα ή περισσότερα χωρία στα αποτελέσματα διασποράς καπνού και θερμοκρασιακού πεδίου κατά μήκος της σήραγγας.

Στα επόμενα κεφάλαια που ακολουθούν υιοθετήθηκε η παράλληλη επίλυση μέσω τριών (3) συστοιχιών Η/Υ με οκτώ επεξεργαστές (σειρά Intel i7) έκαστος χρησιμοποιώντας την έκδοση FDS_mpi v. 5.5.3 καθώς ο συνολικός αριθμός κόμβων του υπολογιστικού πλέγματος ήταν της τάξης των $5 - 10 \times 10^6$, προκειμένου τα αποτελέσματα να είναι ανεξάρτητα του πλέγματος και το σχήμα των κελιών να βρίσκεται πλησιέστερα στο κυβικό.

3.6 Μεθοδολογία πιστοποίησης FDS σε προσομοίωσης φωτιάς σε οδικές σήραγγες

Στα επόμενα τρία κεφάλαια θα εξετασθεί η ικανότητα του λογισμικού στον υπολογισμό του πεδίου ροής, θερμοκρασίας και συγκέντρωσης σε τμήμα ή ολόκληρη οδική σήραγγα υπό συνθήκες φυσικού ή μηχανικού αερισμού.

Στο κεφάλαιο (4) θα πιστοποιηθεί η νεότερη έκδοση 5.5.3 στην ικανότητα πρόλεξης πεδίου θερμοκρασίας και συγκέντρωσης για περίπτωση φωτιάς μικρής ισχύος 0.75 MW σε σήραγγα ορθογωνικής διατομής μήκους 88.0m με κλειστό άκρο εξόδου (μέτωπο). Τα αποτελέσματα της

προσομοίωσης θα συγκριθούν με πειραματικές μετρήσεις κατά μήκος της σήραγγας και διαθέσιμα στοιχεία από προηγούμενη έκδοση του λογισμικού (5.3.1).

Στο κεφάλαιο (5) θα διερευνηθεί η ικανότητα του λογισμικού να προλέξει το θερμοκρασιακό πεδίο κατά μήκος της οροφής σε περίπτωση φωτιάς μικρής ισχύος 1.8 – 3.2 MW σε σήραγγες ημικυκλικής διατομής μήκους 1036.80m – 3300.00m υπό συνθήκες μηχανικού αερισμού – καθώς θεωρήθηκε σταθερή ταχύτητα κατά μήκος της σήραγγας σε κάθε εκτέλεση.

Στο κεφάλαιο (6) λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα και συμπεράσματα των προηγούμενων κεφαλαίων, καθορίζονται οι παράμετροι εισόδου για την μελέτη του πεδίου ροής, συγκέντρωσης και θερμοκρασίας σε τυπική σήραγγα ημικυκλικής διατομής μήκους 700.0m από τον Ελλαδικό χώρο. Εξετάζεται πραγματικό σενάριο πυρκαγιάς μεγάλης ισχύος (30 – 100MW) με διαδοχική ενεργοποίηση του διαμήκους συστήματος αερισμού αποτελούμενο από ανεμιστήρες ώσης.

Τα αποτελέσματα συνέπεια απουσίας πειραματικών μετρήσεων συγκρίνονται με ημι-εμπειρικές σχέσεις της βιβλιογραφίας και μέγιστες τιμές που έχουν παρατηρηθεί σε πραγματικά πειράματα πλήρους κλίμακας.

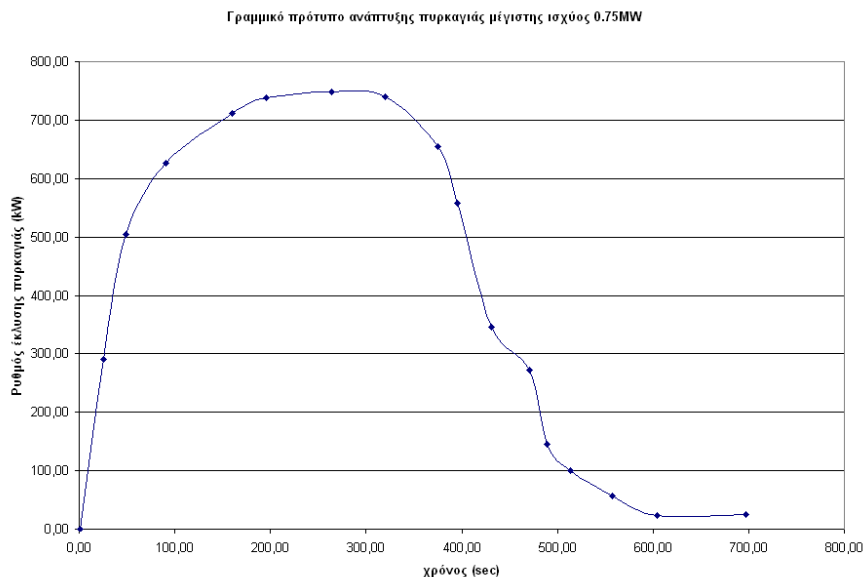
4

4. Πιστοποίηση FDS σε σήραγγα ορθογωνικής διατομής περιορισμένου μήκους

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει η πιστοποίηση του λογισμικού FDS (έκδοση 5.5.3) σε σήραγγα ορθογωνικής διατομής περιορισμένων διαστάσεων. Για τη συγκεκριμένη σήραγγα υπάρχουν δημοσιευμένα στοιχεία τόσο πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας και συγκέντρωσης CO όσο και προλέξεις του FDS από προηγούμενη έκδοση με συγκεκριμένη διάσταση πλέγματος από τους Hu et al.[53]. Αρχικά η σήραγγα προσομοιώθηκε στις διαστάσεις πλέγματος της δημοσίευσης και εν συνεχεία έγινε παραμετρική μελέτη διαφόρων παραγόντων που θεωρήθηκε ότι επηρεάζουν σημαντικά τα αποτελέσματα όπως η διάσταση του πλέγματος, το ποσοστό μετάδοσης θερμότητας μέσω ακτινοβολίας και το ποσοστό εκπομπής καπνού ανά kg καυσίμου. Λεπτομερέστερη περιγραφή δίδεται στις παραγράφους 4.1 – 4.2.

4.1 Γεωμετρία σήραγγας

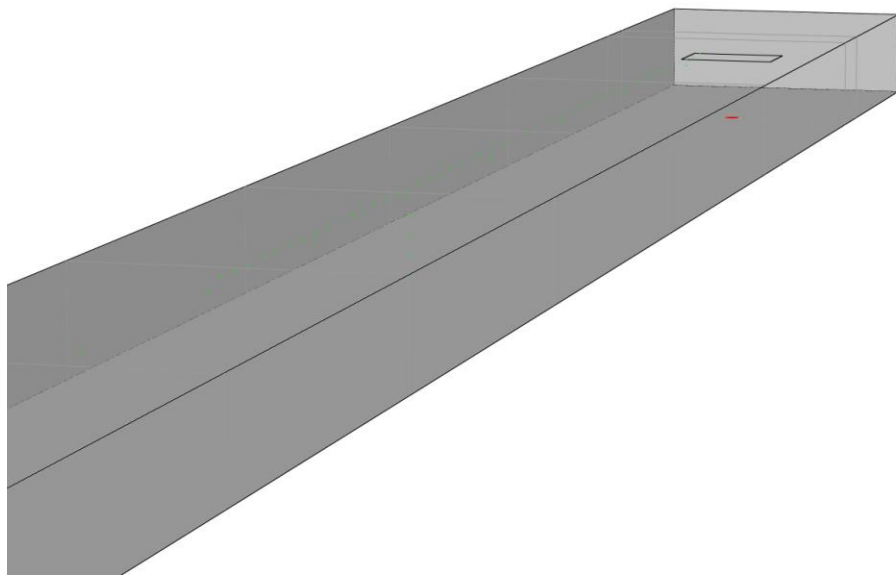
Για το συγκεκριμένο πρόβλημα επιλέχθηκε σήραγγα ορθογωνικής διατομής ($L=88\text{m}$, $W=8\text{m}$, $H=2.70\text{m}$). Το σημείο πυρκαγιάς μέγιστης ισχύος 0.75 MW καθορίστηκε κατά τον διαμήκη άξονα ($y = 4$) με διαστάσεις 0.40×0.40 στο σημείο $x = 79\text{m}$ με τη βοήθεια της εντολής HRRPUA. Η χρονική εξέλιξη με βάση το γραμμικό (βλέπε Εικόνα – 25) και εκθετικό πρότυπο (βλέπε κεφάλαιο 2) πραγματοποιήθηκε μέσω των εντολών RAMP. Επάνω από το σημείο όπου ξεσπά η πυρκαγιά, τοποθετήθηκε λαμαρίνα διαστάσεων $2.0\text{m} \times 3.0\text{m}$, με τυπικό πάχος 3mm για την προστασία του εξοπλισμού και του δομικού μέρους της σήραγγας.



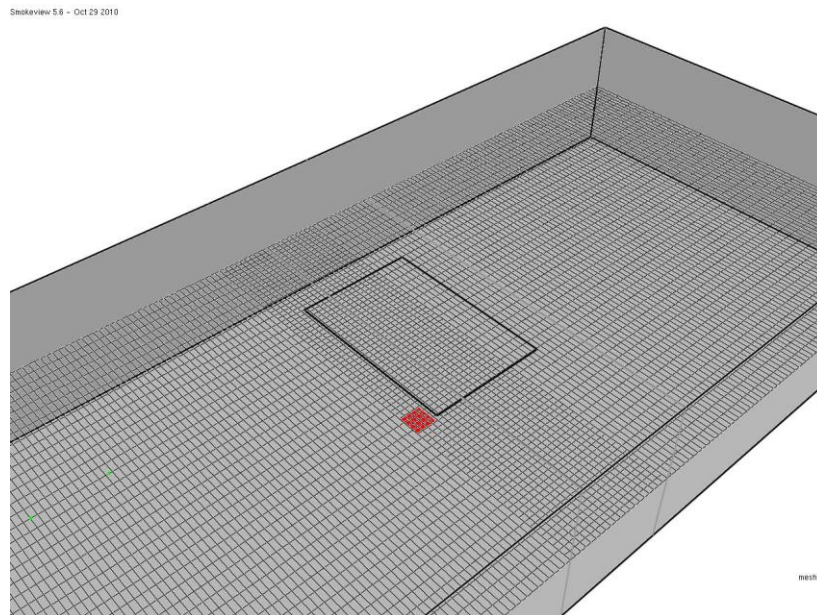
Εικόνα 25 - Διάγραμμα γραμμικής κατανομής έκλυσης θερμότητας για την μελέτη πιστοποίησης

Κατά μήκος της σήραγγας τοποθετήθηκαν αισθητήρια θερμοκρασίας και συγκέντρωσης CO με διάστημα 1.0-2.0m ανάλογα με τη απόσταση από το σημείο της πυρκαγιάς. Η τυπική μορφή της γεωμετρίας και του χρησιμοποιούμενου πλέγματος παρατίθεται στην Εικόνα - 26, όπου διακρίνεται η χαλύβδινη λαμαρίνα, το σημείο πυρκαγιάς και η τοπική πύκνωση γύρω από αυτή.

00000003-04.02.2019



00000003-04.02.2019



Εικόνα 26 - Γεωμετρία και πλέγμα διακριτοποίησης [x-z] σήραγγας πλησίον του σημείου πυρκαγιάς

4.2 Παραμετρική μελέτη

Για την ακριβέστερη μοντελοποίηση της καύσης μέσω του FDS, καταστρώθηκαν εναλλακτικά σενάρια παραμετρικής μελέτης. Στα σενάρια μελετήθηκαν διεξοδικά τόσο φυσικά μεγέθη όπως η επίδραση του ρυθμού έκλυσης πυρκαγιάς, το ποσοστό ακτινοβολίας και ρυθμού έκλυσης ρύπων όσο και αριθμητικά όπως το μέγεθος του πλέγματος επάνω στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων επικεντρώθηκαν αποκλειστικά στην κατανομή της θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης CO κατά μήκος της σήραγγας καθώς και στην εγκάρσια διατομή σε απόσταση 39m από το σημείο της πυρκαγιάς, σύμφωνα με όσα μελετήθηκαν από την εργασία των L.H. Hu et al. [53]. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν τόσο με τα διαθέσιμα υπολογιστικά και πειραματικά αποτελέσματα.

Τα σενάρια της παραμετρικής ανάλυσης που εκτελέστηκαν δίδονται στον πίνακα 4.1 :

Πίνακας 4.1 – Βασικές περιπτώσεις παραμετρικής ανάλυσης

a/a case	Καμπύλη ανάπτυξης HRR	Κλάσμα ακτινοβολίας	Μέγεθος πλέγματος
Case - 1	γραμμική	0.30	65 x 40 x 27
Case - 2	γραμμική	0.35	65 x 40 x 27
Case - 3	εκθετική	0.30	65 x 40 x 27
Case - 4	γραμμική	0.30	130 x 40 x 27
Case - 5	γραμμική	0.30	65 x 40 x 54
Case - 6	γραμμική	0.30	130 x 40 x 54

Εν συνεχεία εξετάστηκαν παραμετρικά ο συντελεστής της εκπομπής μονοξειδίου άνθρακα (CO-YIELD) υποθέτοντας γραμμική ανάπτυξη ρυθμού έκλυσης πυρκαγιάς και μέγεθος πλέγματος 130 x 40 x 54 σύμφωνα με τις τιμές του Πίνακα 4.2. Να σημειωθεί ότι η σήραγγα χωρίστηκε σε επτά (7) τμήματα και το μέγεθος πλέγματος 65x40x27 χρησιμοποιήθηκε στα περισσότερα από αυτά. Η εκτέλεση των προσομοιώσεων πραγματοποιήθηκε με διαχωρισμό των επιμέρους περιοχών σε κάθε CPU.

Πίνακας 4.2 – Περιπτώσεις παραμετρικής ανάλυσης συντελεστή εκπομπής CO

a/a case	Καμπύλη ανάπτυξης HRR	Κλάσμα ακτινοβολίας	CO_YIELD
Case - 7	γραμμική	0.30	0.030
Case - 8	γραμμική	0.30	0.035
Case - 9	γραμμική	0.30	0.040

4.3 Οριακές Συνθήκες - Παραδοχές

Από την έκδοση 5.0 το λογισμικό FDS δεν περιλαμβάνει ενσωματωμένη βιβλιοθήκη υλικών και τα χρησιμοποιούμενα υλικά εισάγονται στη γεωμετρία από τον χρήστη. Στη συγκεκριμένη περίπτωση οι θερμοφυσικές ιδιότητες των υλικών που εισήχθησαν παρατίθενται στους πίνακες 4.3 – 4.4 :

Πίνακας 4.3 – Θερμοφυσικές ιδιότητες τσιμέντου

ιδιότητα – τιμή	Είδος υλικού : Τσιμέντο
Πυκνότητα (ρ)	2100 [kg/m ³]
Θερμική αγωγιμότητα (k)	1.0 [W/mK]
Ειδική θερμοχωρητικότητα (C_p)	0.88 [kJ/kgK]

Πίνακας 4.4 – Θερμοφυσικές ιδιότητες γάλυβα

ιδιότητα – τιμή	Είδος υλικού : γάλυβας
Πυκνότητα (ρ)	7850 [kg/m ³]
Θερμική αγωγιμότητα (k)	0.48 – 0.30 [για T= 20 – 677 °C]
Ειδική θερμοχωρητικότητα (C_p)	0.45 – 0.85 [για T= 20 – 677 °C]

Το τσιμέντο χρησιμοποιήθηκε ως υλικό επικάλυψης για την τσιμεντένια επένδυση του θόλου της σήραγγας, ενώ ο γάλυβας ως υλικό κατασκευής μεταλλικής λαμαρίνας διαστάσεων 2.0m x 3.0m που τοποθετήθηκε σε ύψος 2m από το σημείο της πυρκαγιάς (fire spot), σύμφωνα με γεωμετρία της εργασίας [53].

Η εκπομπή του CO καθορίστηκε ανάλογα με την εκπομπή αιθάλης (SOOT_YIELD) που με τη σειρά της καθορίζεται από το μέγεθος της πυρκαγιάς. Έτσι για την παρούσα εργασία, σύμφωνα και με την υπόδειξη των Koulu and Faeth [54] το ποσοστό εκπομπής CO καθορίστηκε σταθερά σε 0.37 kg CO/kg soot. Αντίστοιχα οι Hu et al. [53] προτείνουν ως ποσοστό εκπομπής αιθάλης ίση με 0.10 kg soot / kg fuel σύμφωνα με όσα ορίζονται στην βάση δεδομένων της παλαιότερης έκδοσης.

Το ένα άκρο της σήραγγας ($x = 88.0\text{m}$) πλησίον της πυρκαγιάς ήταν κλειστό ενώ το αντίστοιχο άκρο εισόδου ($x=0.0\text{ m}$) ήταν ελεύθερο στον αέρα.

Η αρχική θερμοκρασία αέρα στο εσωτερικό της σήραγγας καθορίστηκε στους 28.0 C. Επιπρόσθετα καθώς η σήραγγα δεν διέθετε σύστημα αερισμού, δεν καθορίστηκαν αρχικές τιμές για την ταχύτητα.

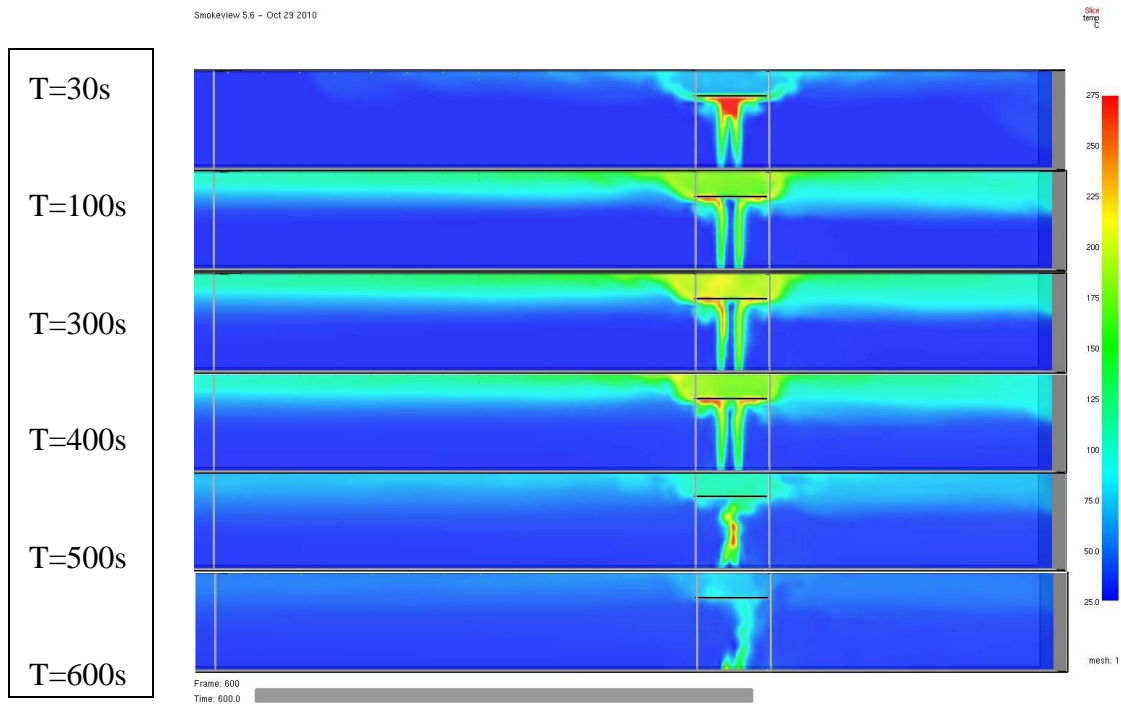
Τα σενάρια εκτελέστηκαν σε τυπικό H/Y Pentium i7 με 4GB RAM για χρόνο 600sec. Ο χρόνος εκτέλεσης κυμαινόταν από 8 – 36h ανάλογα με την πυκνότητα του πλέγματος.

Για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν σημεία αποθήκευσης θερμοκρασίας και συγκέντρωσης CO ανά 1.0m περίπου και το λογισμικό SMOKEVIEW για την γραφική απεικόνιση στη διαμήκη και εγκάρσια διεύθυνση της χρονικής εξέλιξης της θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης.

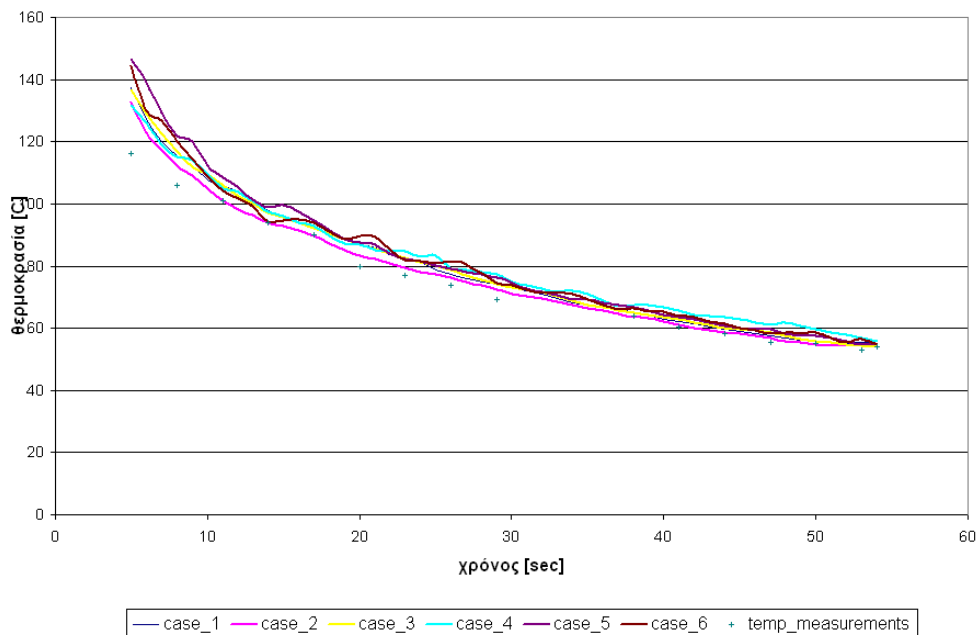
Με βάση τα αποτελέσματα της παραμετρικής μελέτης κατασκευάστηκαν χρονικά διαγράμματα και στη συνέχεια συγκρίθηκαν με αντίστοιχα δημοσιευμένα των Hu et al. [53]. Για περισσότερες πληροφορίες και σχολιασμό γύρω από τα αποτελέσματα βλέπε στη συνέχεια το Κεφάλαιο – 5.

4.4 Διαγράμματα θερμοκρασίας

Στα ακόλουθα διαγράμματα (Εικόνες 27 - 28) παρουσιάζονται η χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας υπό μορφή γραφικών και διαγραμμάτων κατά μήκος της σήραγγας



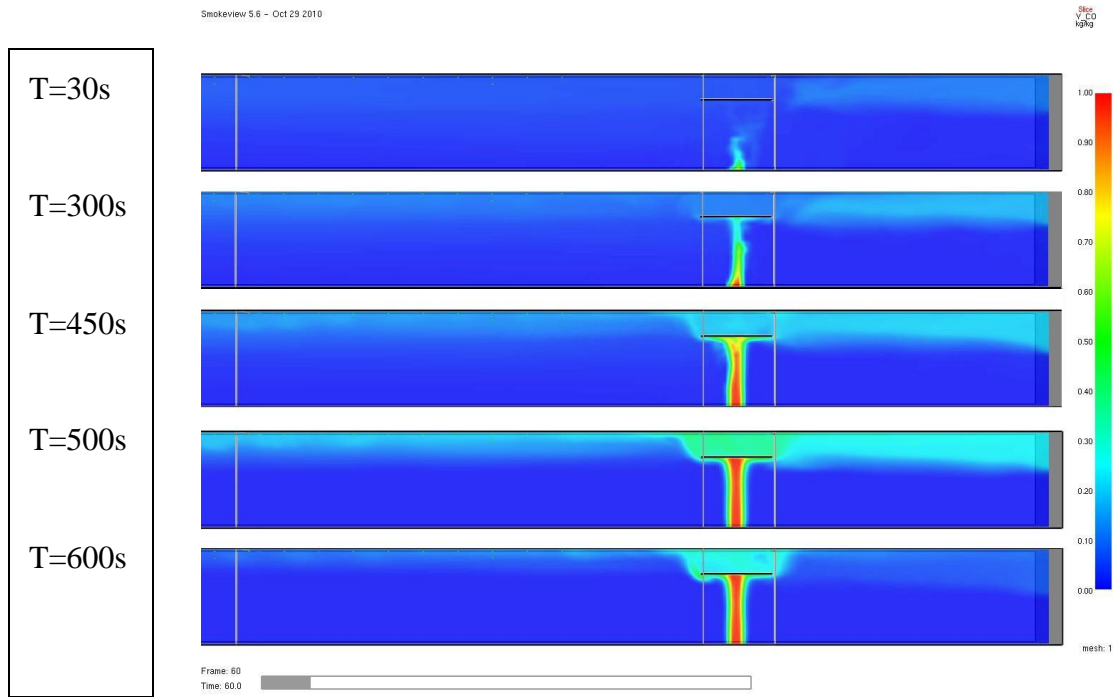
Εικόνα 27 – Τυπική χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας στο σημείο πυρκαγιάς σε $t = 30 / 100 / 300 / 400 / 500 / 600 \text{ sec}$



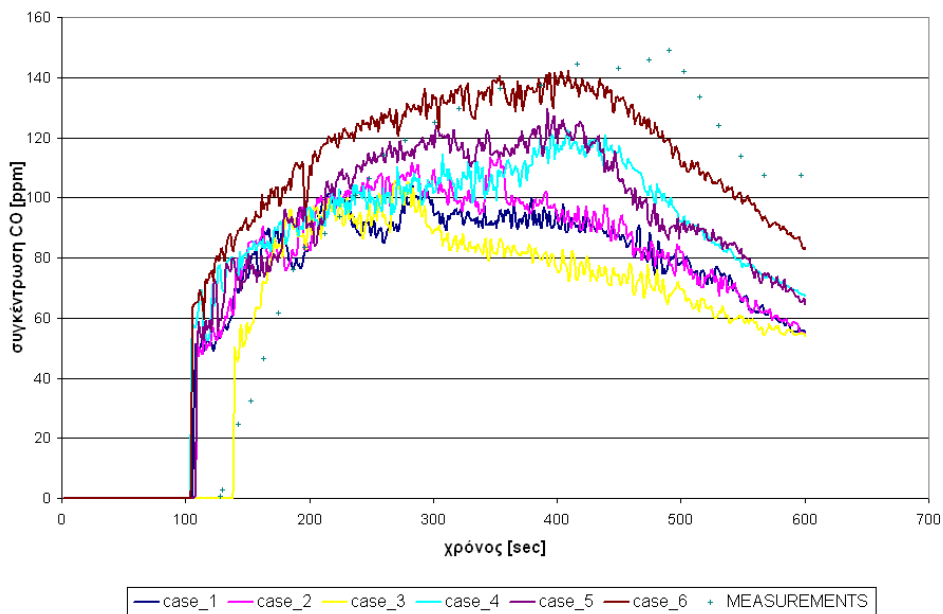
Εικόνα 28 - Διάγραμμα χρονικής εξέλιξης θερμοκρασίας κατά μήκος της σήραγγας

4.5 Διαγράμματα συγκέντρωσης τοξικών ρύπων

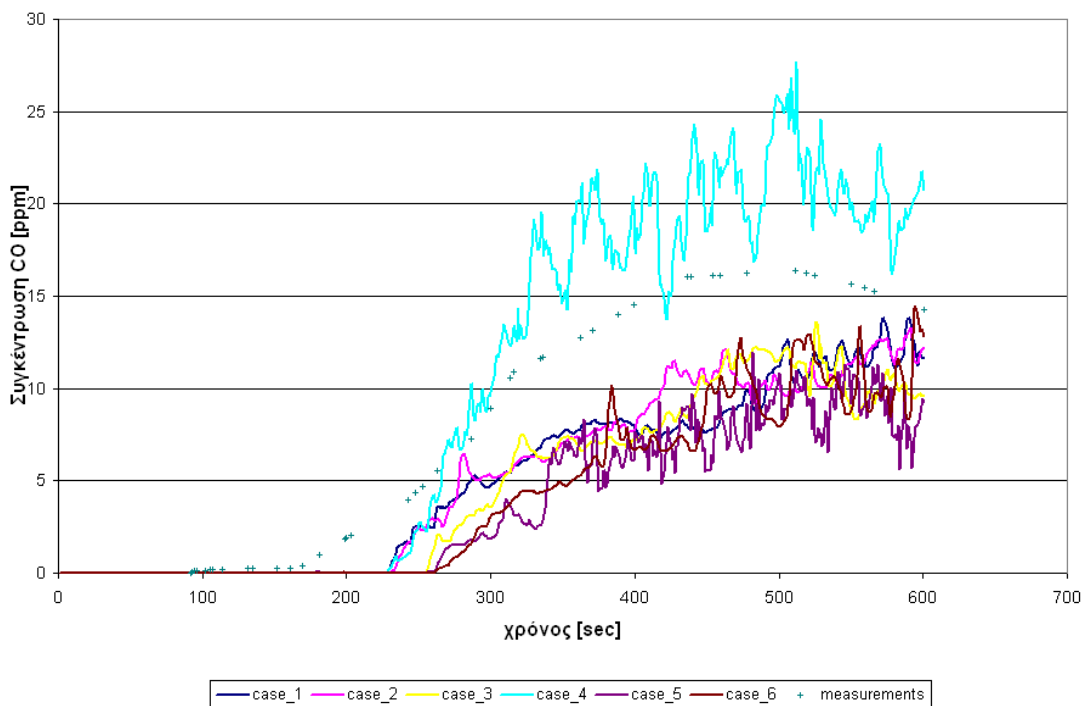
Στα ακόλουθα διαγράμματα (Εικόνες 29 - 35) παρουσιάζονται η χρονική εξέλιξη της συγκέντρωσης CO σε απόσταση 39m από το σημείο πυρκαγιάς σε διάφορα σημεία καθ' ύψος της διατομής.



Εικόνα 29 - Τυπική χρονική εξέλιξη της συγκέντρωσης CO στο σημείο πυρκαγιάς σε t = 60 /300/450/500/600 sec



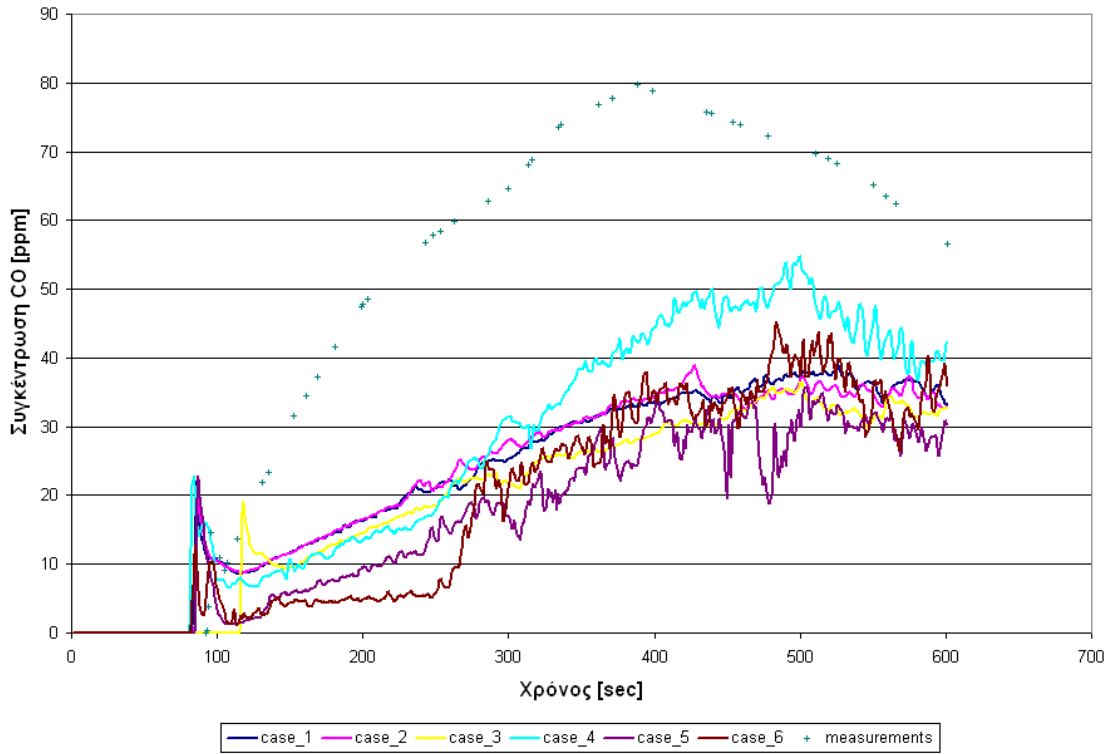
Εικόνα 30 – Σύγκριση προλέξεων συγκέντρωσης CO σε ύψος 2.25m από τα δάπεδο της σήραγγας σε απόσταση x = 55m από το σημείο της πυρκαγιάς



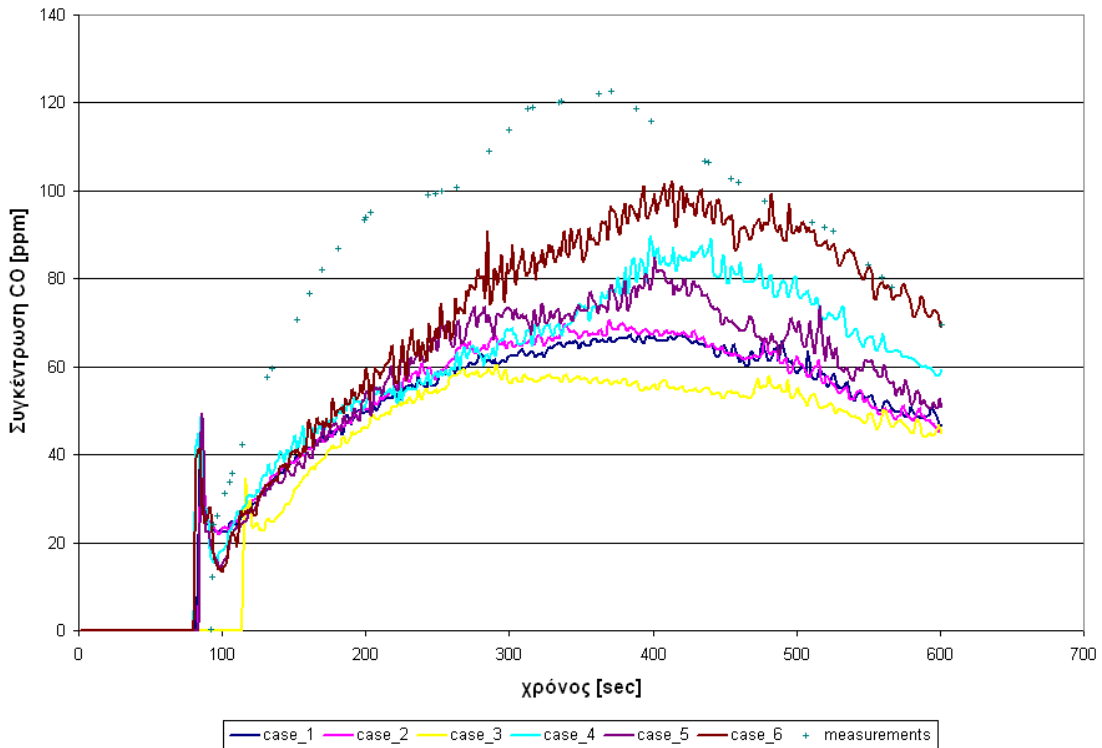
Εικόνα 31 - Διάγραμμα χρονικής εξέλιξης συγκέντρωσης CO σε ύψος 0.45m από τα δάπεδο της σήραγγας



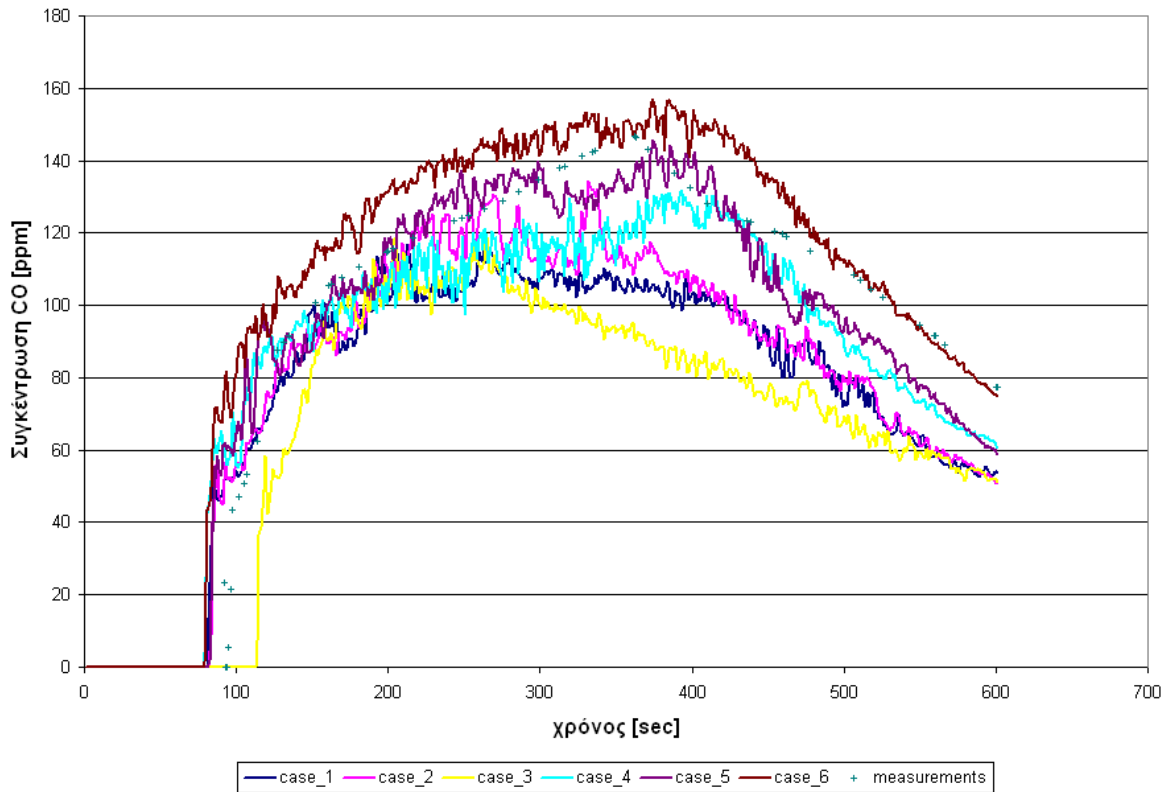
Εικόνα 32 – Διάγραμμα χρονικής εξέλιξης συγκέντρωσης CO σε ύψος 0.95m από τα δάπεδο της σήραγγας



Εικόνα 33 - Διάγραμμα χρονικής εξέλιξης συγκέντρωσης CO σε ύψος 1.45m από τα δάπεδο της σήραγγας



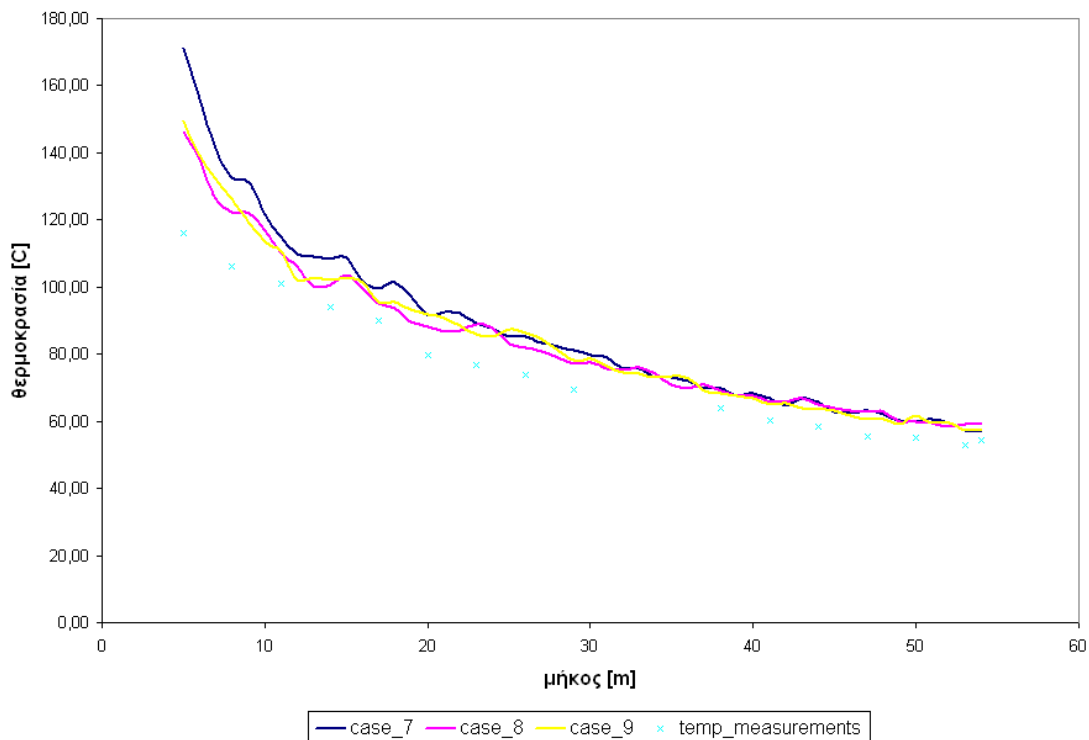
Εικόνα 34 - Διάγραμμα χρονικής εξέλιξης συγκέντρωσης CO σε ύψος 1.95m από τα δάπεδο της σήραγγας



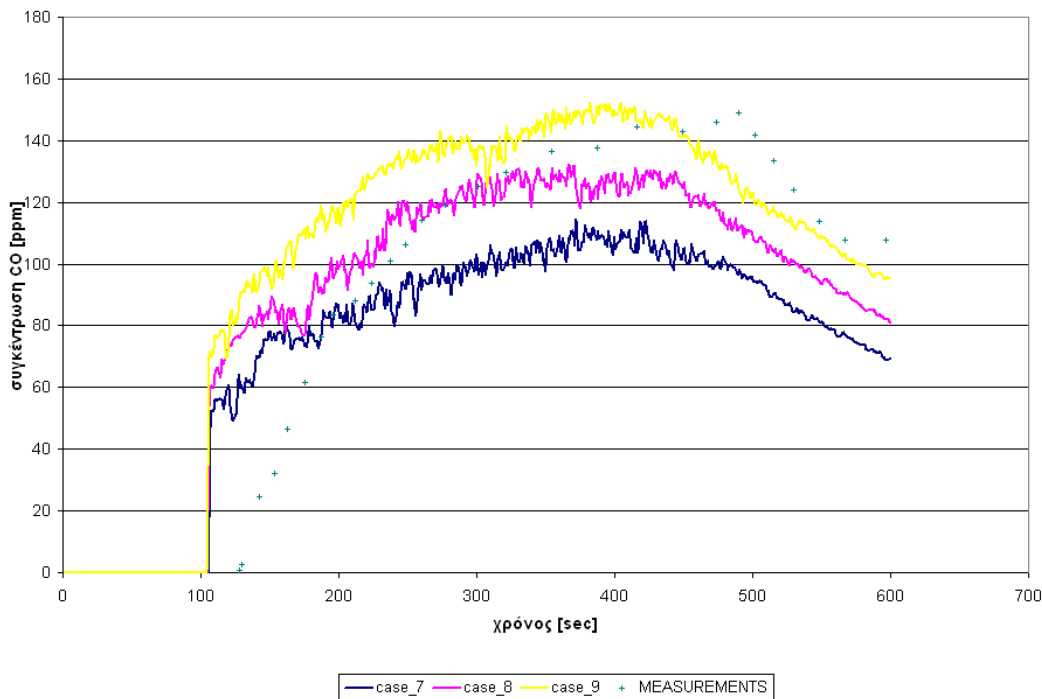
Εικόνα 35 - Διάγραμμα χρονικής εξέλιξης συγκέντρωσης CO σε ύψος 2.45m από τα δάπεδο της σήραγγας

4.6 Διαγράμματα παραμετρικής ανάλυσης εκπομπών τοξικών ρύπων

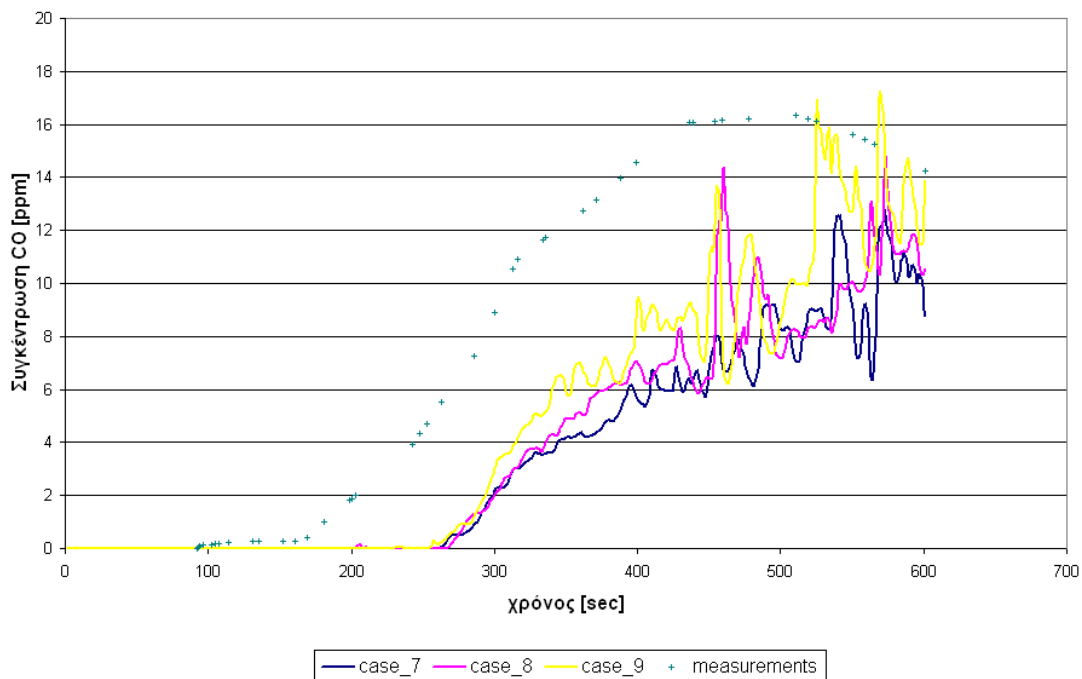
Στα ακόλουθα διαγράμματα (Εικόνες 36 - 42) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης εκπομπής μονοξειδίου για διάφορες τιμές του συντελεστή εκπομπής CO_YIELD.



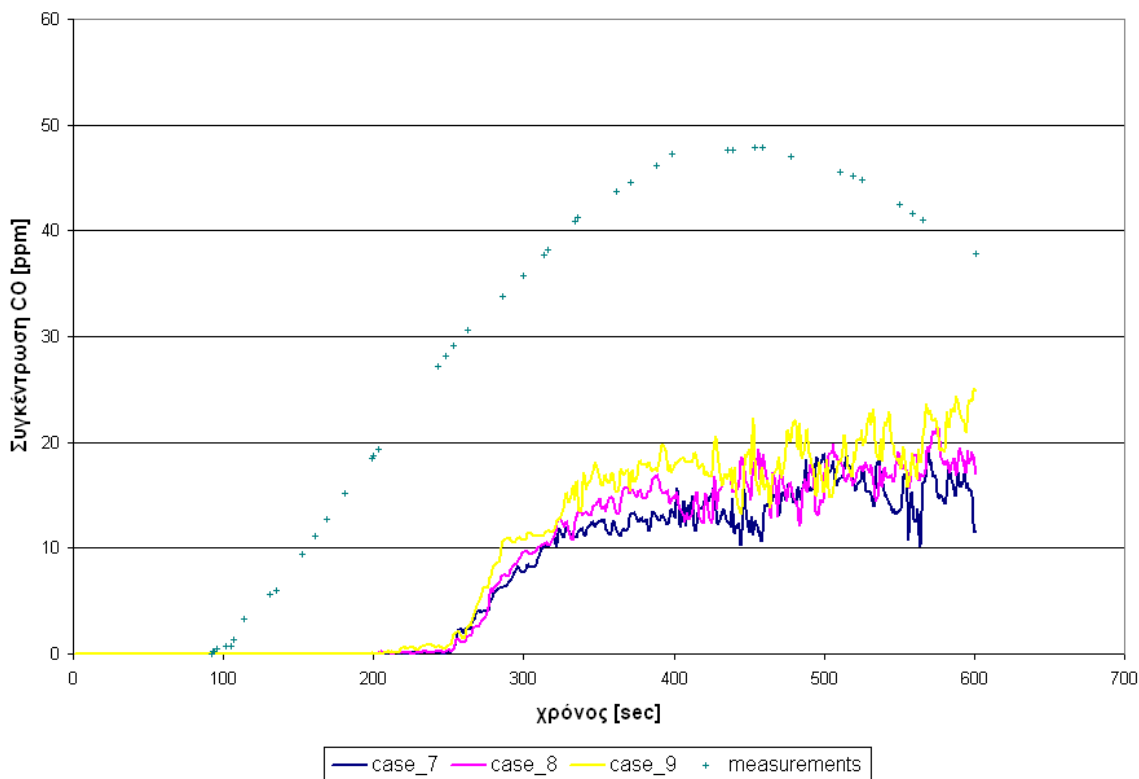
Εικόνα 36 - Διάγραμμα χρονικής εξέλιξης θερμοκρασίας κατά μήκος της σήραγγας



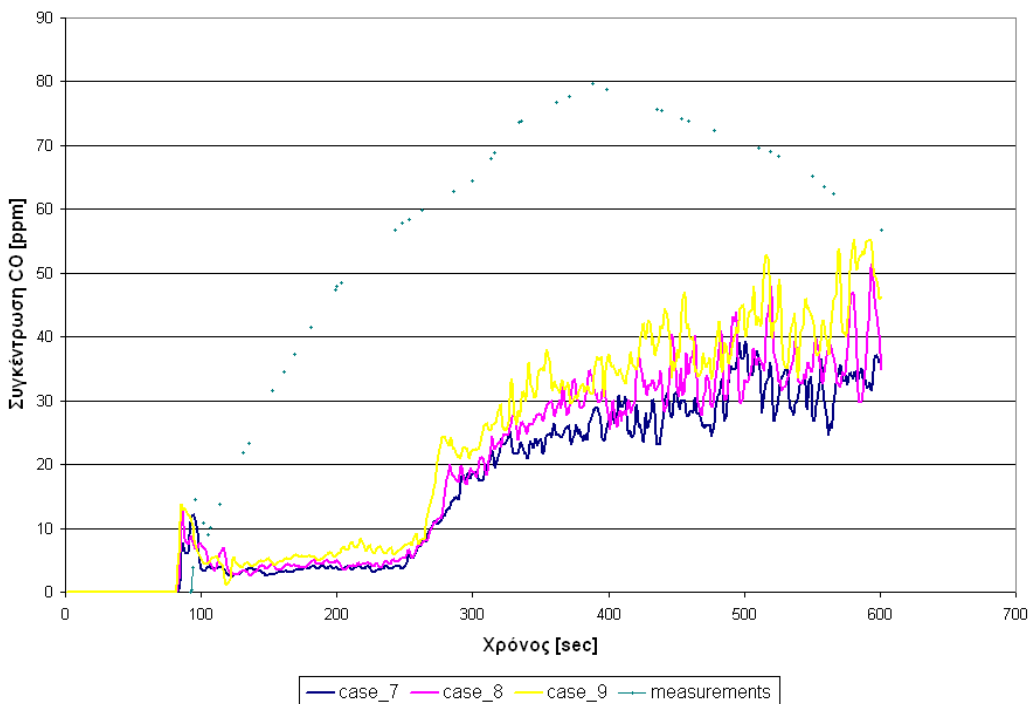
Εικόνα 37 - Σύγκριση προλέξεων συγκέντρωσης CO σε ύψος 2.25m από τα δάπεδο της σήραγγας σε απόσταση $x = 55m$ από το σημείο της πυρκαγιάς



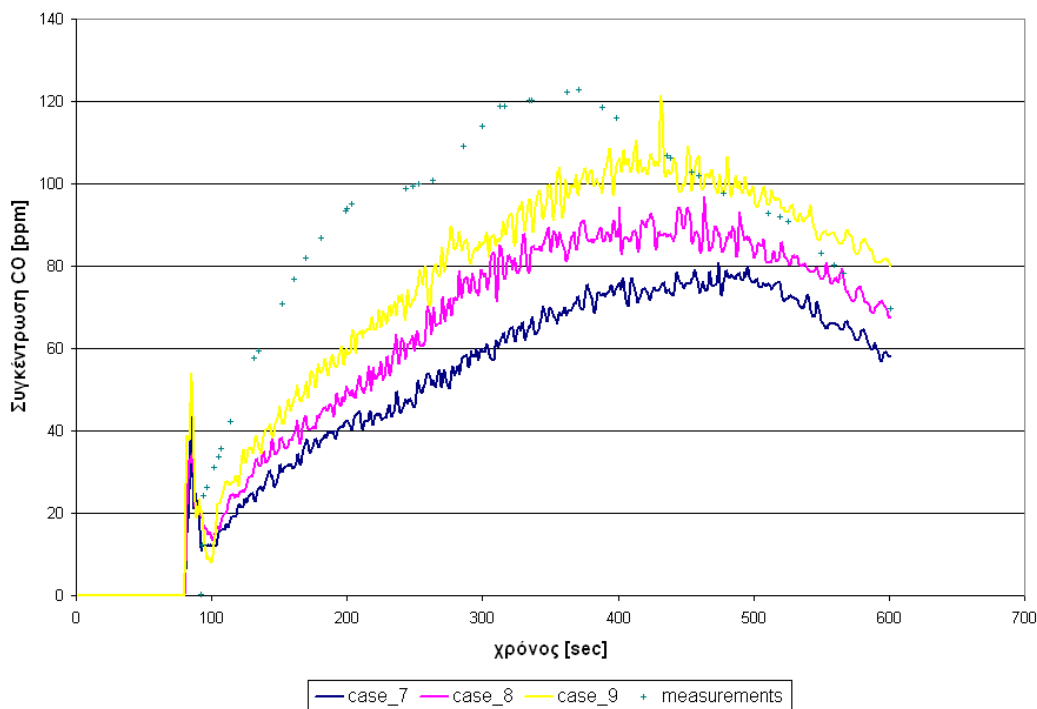
Εικόνα 38 - Διάγραμμα χρονικής εξέλιξης συγκέντρωσης CO σε ύψος 0.45m από τα δάπεδο της σήραγγας



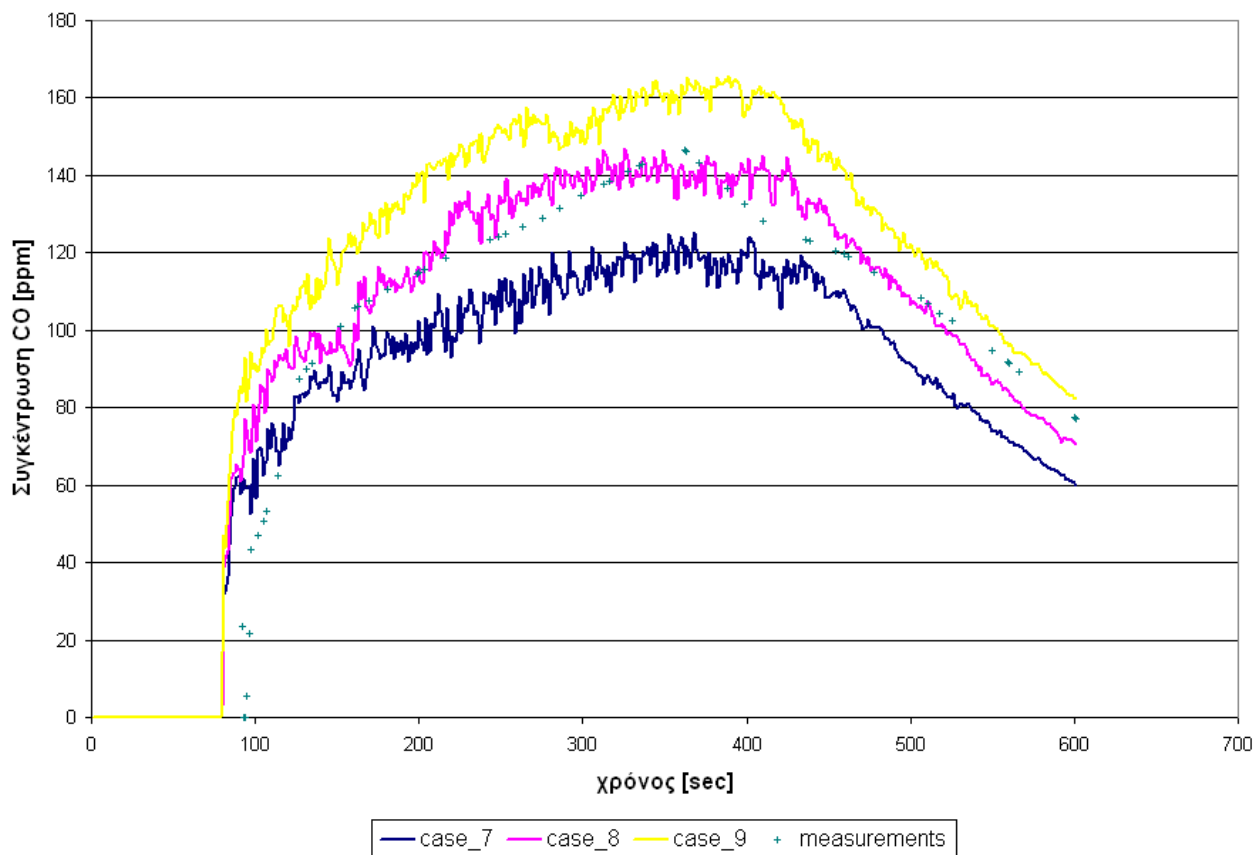
Εικόνα 39 - Διάγραμμα χρονικής εξέλιξης συγκέντρωσης CO σε ύψος 0.95m από τα δάπεδο της σήραγγας



Εικόνα 40 - Διάγραμμα χρονικής εξέλιξης συγκέντρωσης CO σε ύψος 1.45m από τα δάπεδο της σήραγγας



Εικόνα 41 - Διάγραμμα χρονικής εξέλιξης συγκέντρωσης CO σε ύψος 1.95m από τα δάπεδο της σήραγγας



Εικόνα 42 - Διάγραμμα χρονικής εξέλιξης συγκέντρωσης CO σε ύψος 2.45m από τα δάπεδο της σήραγγας

4.7 Συζήτηση – σχολιασμός

Από τα παραπάνω διαγράμματα και γραφήματα – εικόνες, βρισκόμαστε σε θέση να εξάγουμε ορισμένα συμπεράσματα αναφορικά με τη πιστοποίηση της προσομοίωσης με το λογισμικό FDS και την ικανότητα των προλέξεων με τα πειραματικά και υπολογιστικά αποτελέσματα της εργασίας των L.H. Hu et al. [53], τα σημαντικότερα εκ των οποίων παρατίθενται ακολούθως :

1. Η νεότερη έκδοση του λογισμικού FDS 5.5.3 κατάφερε να προλέξει με ικανοποιητική ακρίβεια την χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης CO κατά μήκος της σήραγγας. Τυχόν αποκλίσεις από τις πειραματικές μετρήσεις [53] πιθανόν να οφείλονται σε :
 - Ελαφρώς διαφοροποιημένη αναπαράσταση της πραγματικής γεωμετρίας σε σχέση με την υπολογιστική, καθώς δεν προσομοιώθηκε το στρώμα γύψου που χρησιμοποιήθηκε ως επικάλυψη της οροφής.

- Σφάλματα διακριτικής ικανότητας (resolution) της ανάγνωσης του ρυθμού εξέλιξης της πυρκαγιάς από την πρωτότυπη εργασία [53] που εισήχθησαν ως χρονικός ρυθμός ανόδου της ισχύος μέσω των εντολών HRRPUA και RAMP [37] στη παρούσα γεωμετρία. Σημειώνεται ότι σύμφωνα με τα προγράμματα πιστοποίησης του FDS [37] που έχουν αναληφθεί από επιμέρους φορείς το σφάλμα κυμαίνεται από 10% - 20% μιας και η διεργασία της καύσης είναι αρκετά πιο πολύπλοκη από την μαθηματική περιγραφή και προσομοίωση που επιχειρείται μέσω του λογισμικού.
 - Σφάλματα διακρίβωσης και επαναληπτικότητας οργάνων μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν για συλλογή και καταγραφή δεδομένων στην αρχική εργασία. Ειδικότερα για τις μετρήσεις συγκέντρωσης CO όπου τα δεδομένα ελήφθησαν αρκετά μακριά (~ 55m μακριά από το σημείο της πυρκαγιάς) με τη μέθοδο της σκέδασης, η αβεβαιότητα των μετρήσεων θεωρείται αρκετά σημαντική.
2. Το πλέγμα διαστάσεων 130 x 40 x 54 με γραμμική ανάπτυξη πυρκαγιάς έδωσε συγκριτικά τα καλύτερα αποτελέσματα που βρίσκονταν πλησιέστερα προς τις αντίστοιχες μετρήσεις καθ' όλη τη διάρκεια της εξέλιξης των 600 sec. Η διακριτοποίηση κατά τον άξονα z είναι πιο σημαντική παράμετρος σε σχέση με την διακριτοποίηση στους άλλους άξονες x,y.
 3. Το ποσοστό ακτινοβολίας (RF) που χρησιμοποιήθηκε 30-35% δεν έδωσε σημαντική διαφοροποίηση στα τελικά αποτελέσματα και έρχεται σε συμφωνία με ανάλογες μελέτες που καταδεικνύουν τη χρήση του RF μεταξύ 20-40% ανάλογα με τη ισχύ της πυρκαγιάς.
 4. Το γραμμικό πρότυπο ανάπτυξης με μικρά βήματα και αλλαγές της κλίσης περιέγραψε καλύτερα την χρονική εξέλιξη του φαινομένου σε σχέση με το εκθετικό.

5

5. Πιστοποίηση FDS για μεγάλες σήραγγες

Σε συνέχεια της συγκριτικής ανάλυσης των πειραματικών μετρήσεων και των αποτελεσμάτων του FDS που παρουσιάστηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο, θα εξετασθεί η ικανότητα του FDS να προλέξει την κατανομή κρίσιμων μεγεθών όπως θερμοκρασίας, συγκέντρωσης καπνού και CO κατά μήκος μεγάλης σήραγγας. Η μεθοδολογία περιλαμβάνει τη σύγκριση με αντίστοιχα δημοσιευμένα πειραματικά δεδομένα, χωρίς να έχει γίνει ταυτόχρονη υπολογιστική προσομοίωση μέσω FDS από ερευνητικές ομάδες.

5.1 Γεωμετρία σήραγγας

Για το συγκεκριμένο πρόβλημα επιλέχθηκαν τέσσερις (4) σήραγγες που βρίσκονται σε επαρχίες της Ν. Κίνας σύμφωνα με την ερευνητική εργασία των Hu et al [55]. Ο σκοπός είναι να μετρηθεί η διανομή του θερμικού στρώματος καπνού κατά μήκος της οροφής, και να προσδιορισθεί έμμεσα η εκλυόμενη ισχύς στο σημείο πυρκαγιάς. Η πρώτη σήραγγα διαθέτει ορθογωνική ενώ οι υπόλοιπες τρεις διαθέτουν ημικυκλική διατομή, οι διαστάσεις των οποίων δίδονται στις Εικόνες 43 - 44 :



5.2 Πειραματική διάταξη

Τα υπόλοιπα γεωμετρικά στοιχεία και τα χαρακτηριστικά της πυρκαγιάς ανάλογα με τη εκάστοτε πειραματική δοκιμή περιλαμβάνονται στον Πίνακα 5.1. Τα βασικά μεγέθη που επηρεάζουν την κατανομή του θερμικού στρώματος καπνού είναι οι διαστάσεις και ισχύς πυρκαγιάς, η ταχύτητα αερισμού και οι διαστάσεις της διατομής.

Πίνακας 5.1 – Βασικά μεγέθη πειραματικών δοκιμών μικρής πυρκαγιάς σε οδικές σήραγγες

α/α	Μήκος [m]	Κλίση	Πειραματική Δοκιμή	Διαστάσεις πυρκαγιάς [m ²]	Ισχύς πυρκαγιάς [MW]	Ύψος φλόγας [m]	Εξωτερική θερμοκρασία [°C]
Tunnel_2	2727	1.09%	Test_3	1.00	1.80	0.20	20.0
			Test_4	2.00	3.20	0.20	20.0
			Test_5	2.00	2.50	0.20	20.0
Tunnel_3	3270	1.29%	Test_6	1.00	1.80	1.70	17.5
			Test_7	1.00	1.80	0.20	17.5
			Test_8	2.00	3.20	0.20	17.5
Tunnel_4	1032	2.1%	Test_9	1.00	1.80	1.70	21.5
			Test_10	1.00	1.80	0.20	22.0
			Test_11	2.00	3.20	0.20	25.0
			Test_12	2.00	3.20	0.20	24.0

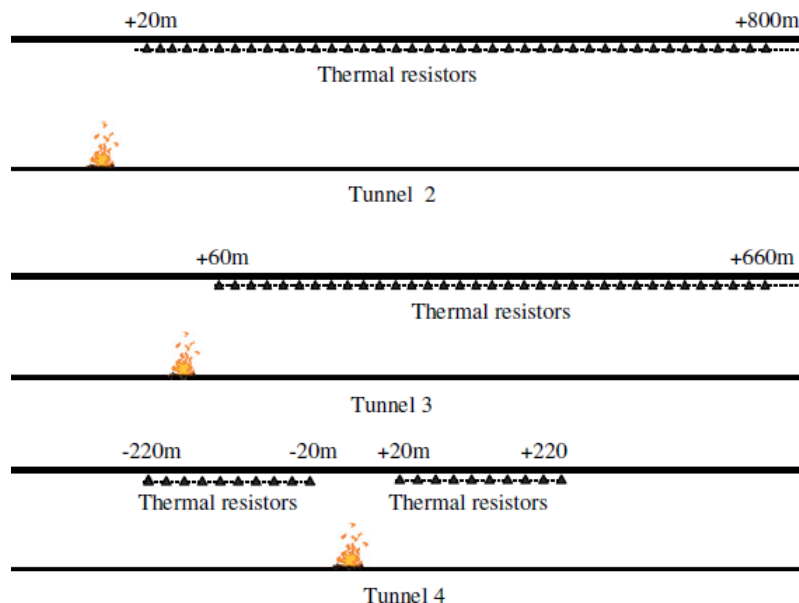
Η διάσταση της κάθε πυρκαγιάς περιελάμβανε σκάφες ορθογωνικής διατομής διαστάσεων 1m x 1m που περιείχαν καύσιμο ελαφρού ακάθαρτου πετρελαίου (diesel) είτε βενζίνης (gasoline). Το σημείο έναυσης για την κάθε σήραγγα ήταν στα 700m (Tunnel_2), 1500m (Tunnel_3), 500m (Tunnel_4). Εντός των σηράγγων υπάρχει εγκατεστημένο σύστημα διαμήκους αερισμού που

ενεργοποιήθηκε απευθείας μετά την έναρξη της δοκιμαστικής φωτιάς, αποτελούμενο από αξονικούς ανεμιστήρες ώσης (jet fans) με μεταβλητό εύρος στροφών. Ο κάθε ανεμιστήρας οδηγούνταν από ρυθμιστή συχνότητας (inverter).

Η ταχύτητα μετρήθηκε πειραματικά με τη βοήθεια ανεμόμετρου θερμού νήματος σε απόσταση 8-13 m από το σημείο της πυρκαγιάς και σε χρόνο 3min μετά την έναυση. Το ύψος μέτρησης καθορίστηκε στα 2.0m για το Tunnel_2, και στα 1.60m για τα 3,4. Παρατηρήθηκε ότι υπήρχε μια σχετικά ομαλή διακύμανση της μετρούμενης ταχύτητας γύρω από μια μέση τιμή κατά τη διάρκεια εξέλιξης του φαινομένου.

Για τη συλλογή πειραματικών στοιχείων γύρω από τη διανομή του καπνού κατά μήκος της οροφής της σήραγγας χρησιμοποιήθηκαν θερμοστοιχεία σε απόσταση 0.10m (Tunnel_2) και 0.30m (Tunnel_3/4) από την οροφή, σε μεταξύ τους απόσταση 20m (βλέπε Εικόνα -45). Με τον τρόπο αυτό καθορίστηκε η διάταξη σε κάθε σήραγγα ανάντι και κατάντι του σημείου πυρκαγιάς, σύμφωνα με :

- Σε απόσταση +20m έως +800m για την σήραγγα 2
- Σε απόσταση +60m έως +660m για την σήραγγα 3
- Σε απόσταση -220m έως -20m και +20m έως +220m για την σήραγγα 4



Εικόνα 45 - Πειραματική διάταξη θερμοστοιχείων κατά μήκος της σήραγγας ανάντι και κατάντι του σημείου πυρκαγιάς

5.3 Διακριτοποίηση – υπολογιστική διάταξη

Η γεωμετρία της κάθε σήραγγας μαζί με την αντίστοιχη πειραματική διάταξη που περιγράφηκε παραπάνω, εισήχθηκε μέσω αρχείου εισόδου στο λογισμικό FDS. Τα βασικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν η άσφαλτος και το τσιμέντο ως υλικό επικάλυψης για το δάπεδο και την επένδυση του θόλου της σήραγγας.

Για την προσομοίωση των θερμοστοιχείων χρησιμοποιήθηκαν σημειακά στοιχεία ανά 20m ανάλογα με την εξεταζόμενη σήραγγα. Τα σημεία αποθηκεύουν διαδοχικές τιμές θερμοκρασίας προκειμένου να γίνει μετεπεξεργασία και απεικόνιση των αποτελεσμάτων μέσω του λογισμικού SMOKEVIEW στη διαμήκη και εγκάρσια διεύθυνση της σήραγγας.

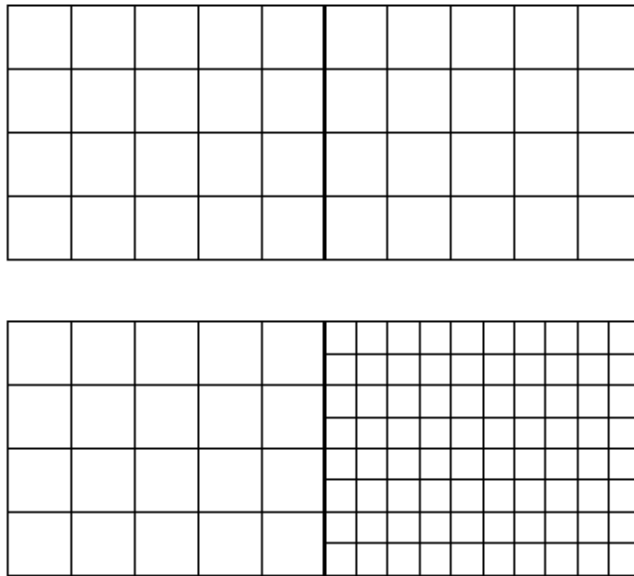
Κατά την εξέταση των πειραματικών μετρήσεων διαπιστώθηκε ότι σε μήκος 250-300m ανάντι και κατάντι οι θερμοκρασίες στην οροφή παραμένουν στα επίπεδα της εξωτερικής. Για το λόγο αυτό το υπολογιστικό χωρίο χωρίστηκε με διάφορους τρόπους με σκοπό να εξετασθούν όσο το δυνατόν περισσότερα εναλλακτικά σενάρια (βλέπε και § 5.4). Ο επικρατέστερος τρόπος διακριτοποίησης του υπολογιστικού χωρίου σε οκτώ (8) τμήματα που το κάθε τμήμα αποδόθηκε σε ξεχωριστό επεξεργαστή.

Καθώς το σημείο πυρκαγιάς ήταν στο κέντρο της σήραγγας σε ύψος 0.20 – 1.70m ανάλογα με την περίπτωση και τα θερμοστοιχεία τοποθετήθηκαν κοντά στην οροφή, με τη χρήση του πρώτου τρόπου διακριτοποίησης το χωρίο διαχωρίστηκε σε δυο τμήματα ύψους (0.00m – 1.70m) και (1.70m – 7.20m). Δεδομένου ότι η κίνηση του καπνού ανάντι και κατάντι συμβαίνει κοντά στην οροφή, δεν αναμένεται σημαντική διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων καθώς το πλέγμα κοντά στο δάπεδο της σήραγγας δεν επηρεάζει σημαντικά τις μετρήσεις θερμοκρασίας της οροφής καθώς οι κύριες επιδράσεις (εκτός της φωτιάς) προέρχονται από τα γειτονικά καμπυλόγραμμα τοιχώματα. Αντίθετα για ύψος τοποθέτησης φωτιάς στα 0.20m υιοθετήθηκε η δεύτερη διάταξη όπου το χωρίο διακριτοποιήθηκε σε οκτώ (8) ισομήκη διαστήματα (βλέπε Εικόνα – 47).

Ανάλογα με την εξεταζόμενη περίπτωση εφαρμόστηκε τοπική πύκνωση καταρχήν κοντά στο σημείο της φωτιάς και κατ' επέκταση σε διάστημα ανάντι και κατάντι όπου ήταν διαθέσιμες οι πειραματικές μετρήσεις.

Η πύκνωση εφαρμόζεται σύμφωνα με τις οδηγίες του εγχειριδίου. Το κριτήριο επιλογής επιτρέπει μόνο την τοπική πύκνωση σε καρτεσιανές συντεταγμένες υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχουν κοινοί

κόμβοι σε γειτονικά κελιά στο διαχωριστικό σύνορο (διεπιφάνεια) των δυο πλεγμάτων (αραιό – πυκνό) (βλέπε Εικόνα - 46).



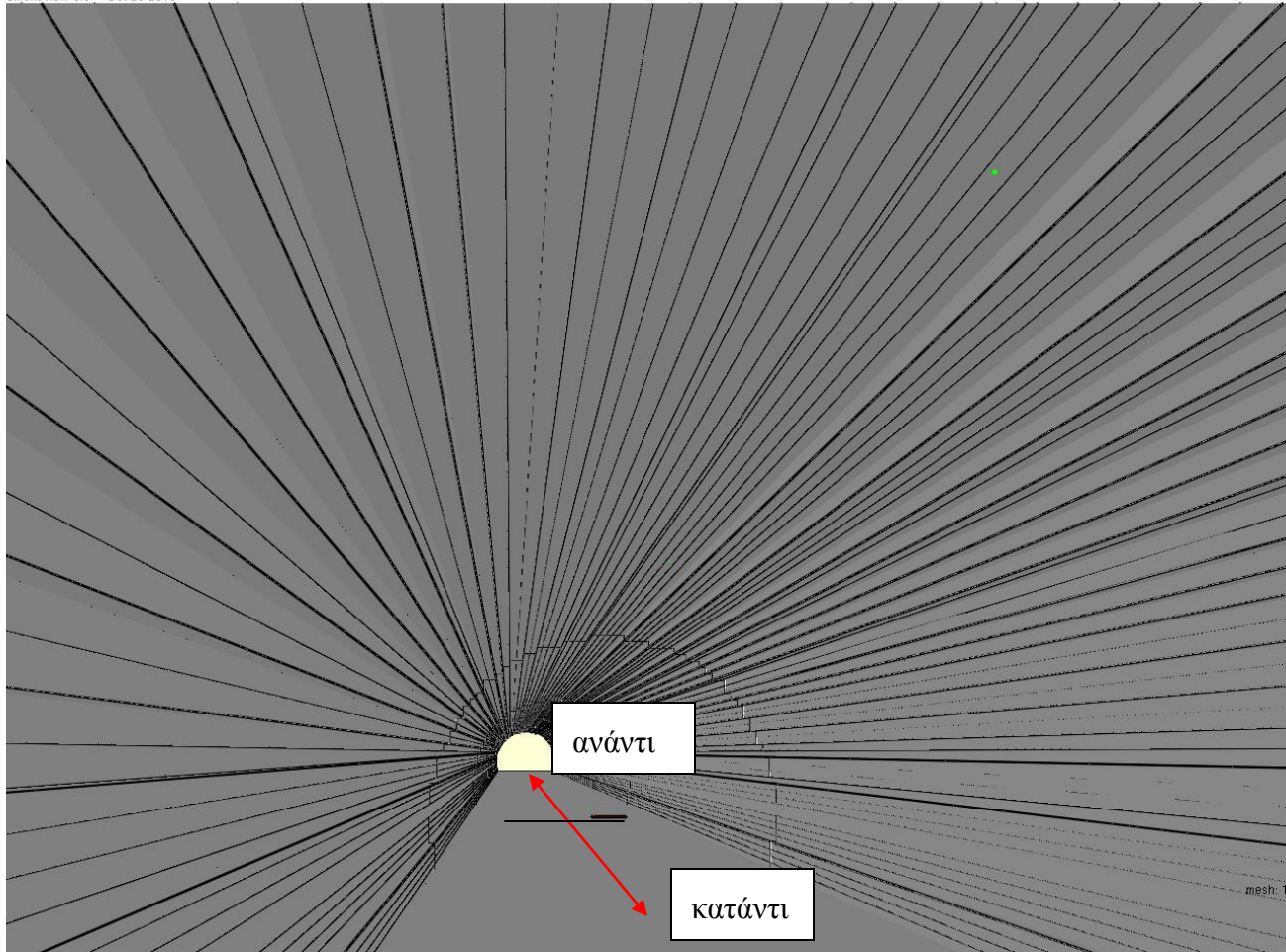
Εικόνα 46 - Κριτήριο ορθής χωρικής διακριτοποίησης

Οι οριακές συνθήκες περιελάμβαναν την εισαγωγή της διαμήκουσ ταχύτητας στο ένα άκρο της ($x = 0.0m$) και ελεύθερη εκροή στο άλλο. Η αρχική θερμοκρασία αέρα στο εσωτερικό της σήραγγας καθορίστηκε σύμφωνα με τον πίνακα 5.1

Τα σενάρια εκτελέστηκαν σε τυπικό H/Y Pentium i7 με 4-8GB RAM για χρόνο 600sec. Αρχικά καθορίστηκε επαρκής χρόνος ώστε να ενεργοποιηθεί ο διαμήκης αερισμός και να επιτευχθεί ομοιόμορφη ταχύτητα αέρα σε όλο το μήκος της σήραγγας ανάλογα με το σενάριο. Ο συνολικός χρόνος εκτέλεσης (χρόνος αερισμού + χρόνος εξέλιξης πυρκαγιάς) κυμαινόταν από 20 - 180h ανάλογα με την πυκνότητα του πλέγματος.

Με βάση τα αποτελέσματα της παραμετρικής μελέτης κατασκευάστηκαν χρονικά διαγράμματα και στη συνέχεια συγκρίθηκαν με αντίστοιχα δημοσιευμένα των Hu et al. [55].

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Εικόνα 47 - Διακριτοποίηση γεωμετρίας και θέση πυρκαγιάς στο εσωτερικό της σήραγγας

5.4 Παραμετρική μελέτη

Για να εξετασθεί η ικανότητα πρόλεξης του FDS στα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα και να βρεθεί η καλύτερη προσαρμογή, εκτελέσθηκε παραμετρική ανάλυση για κάθε πειραματική δοκιμή σε κάθε σήραγγα.

Από την ανάλυση που προηγήθηκε διαπιστώθηκε ότι τα κρίσιμα μεγέθη κατά την υπολογιστική ανάλυση στην υπό-κλίμακα σήραγγα ήταν η καμπύλης ανάπτυξης, το κλάσμα ακτινοβολίας και το μέγεθος πλέγματος.

Τα αποτελέσματα της προηγούμενης ανάλυσης χρησιμοποιήθηκαν για την παραμετρική μελέτη του παρόντος μιας και ορίσθηκαν γραμμική καμπύλη ανάπτυξης (HRR), σταθερό ποσοστό ισχύος μέσω ακτινοβολίας = 0.30. Συνεπώς η παράμετρος που μεταβλήθηκε ήταν το μέγεθος του πλέγματος, σύμφωνα με τους Πίνακες 5.2 – 5.5 ανάλογα με την γεωμετρία της σήραγγας

Πίνακας 5.2 – Βασικά μεγέθη παραμετρικών δοκιμών μικρής πυρκαγιάς - Tunnel 2 / test - 3

a/a case	Μήκος/ τμήμα σήραγγας	Κλάσμα ακτινοβολίας	Μέγεθος πλέγματος
Case – 2.1	2720.00m	0.30	340 x 30 x 36 / core
Case – 2.2	2720.00m	0.30	340 x 30 x 18 / core
Case – 2.3	2720.00m	0.30	340 x 36 x 24 / core

a/a case	Μήκος/ τμήμα σήραγγας	Κλάσμα ακτινοβολίας	Μέγεθος πλέγματος
Case – 2.4	900m (100 + 800)	0.30	900 x 30 x 36
Case – 2.5	900m (100 + 800)	0.30	450 x 60 x 36
Case – 2.6	900m (100 + 800)	0.30	900 x 30 x 18

Πίνακας 5.3 – Βασικά μεγέθη παραμετρικών δοκιμών μικρής πυρκαγιάς - Tunnel 3 / test - 6

a/a case	Μήκος/ τμήμα σήραγγας	Κλάσμα ακτινοβολίας	Μέγεθος πλέγματος
Case – 3.1	3200.00m	0.30	400 x 27 x 36 / core
Case – 3.2	3200.00m	0.30	400 x 27 x 18 / core
Case – 3.3	3200.00m	0.30	200 x 54 x 36 / core
a/a case	Μήκος/ τμήμα σήραγγας	Κλάσμα ακτινοβολίας	Μέγεθος πλέγματος
Case – 3.4	864m (150+ 714)	0.30	216 x 27 x 36 / core
Case – 3.5	864m (150+ 714)	0.30	216 x 54 x 36 / core
Case – 3.6	864m (150+ 714)	0.30	216 x 54 x 18 / core

a/a case	Μήκος/ τμήμα σήραγγας	Κλάσμα ακτινοβολίας	Μέγεθος πλέγματος
Case – 3.7	864m (150+ 714)	0.30	864 x 27 x 36
Case – 3.8	864m (150+ 714)	0.30	864 x 27 x 18
Case – 3.9	864m (150+ 714)	0.30	432 x 54 x 36

Πίνακας 5.4 – Βασικά μεγέθη παραμετρικών δοκιμών μικρής πυρκαγιάς - Tunnel 4 / test - 9

a/a case	Μήκος/ τμήμα σήραγγας	Κλάσμα ακτινοβολίας	Μέγεθος πλέγματος
Case – 4.1	1036.80m	0.30	324 x 27 x 36 / core
Case – 4.2	1036.80m	0.30	324 x 27 x 18 / core
Case – 4.3	1036.80m	0.30	324 x 54 x 36 / core
a/a case	Μήκος/ τμήμα σήραγγας	Κλάσμα ακτινοβολίας	Μέγεθος πλέγματος
Case – 4.4	480m (240 + 240)	0.30	960 x 27 x 18
Case – 4.5	480m (240 + 240)	0.30	480 x 27 x 18
Case – 4.6	480m (240 + 240)	0.30	480 x 27 x 36
Case – 4.7	480m (240 + 240)	0.30	150 x 54 x 36 / core

Πίνακας 5.5 – Βασικά μεγέθη παραμετρικών δοκιμών μικρής πυρκαγιάς - Tunnel 4 / test - 12

a/a case	Μήκος/ τμήμα σήραγγας	Κλάσμα ακτινοβολίας	Μέγεθος πλέγματος
Case – 4.7	480m (240 + 240)	0.30	480 x 27 x 36
Case – 4.8	480m (240 + 240)	0.30	960 x 27 x 36
Case – 4.9	480m (240 + 240)	0.30	480 x 54 x 36

Σημείωση :

Στις όλες τις ανωτέρω περιπτώσεις, τα επιμέρους τμήματα (π.χ 240m+240m) σήραγγας όπου έγινε η προσομοίωση αναφέρονται αντίστοιχα στο ανάντι και κατόντι τμήμα από το σημείο έναυσης της πυρκαγιάς.

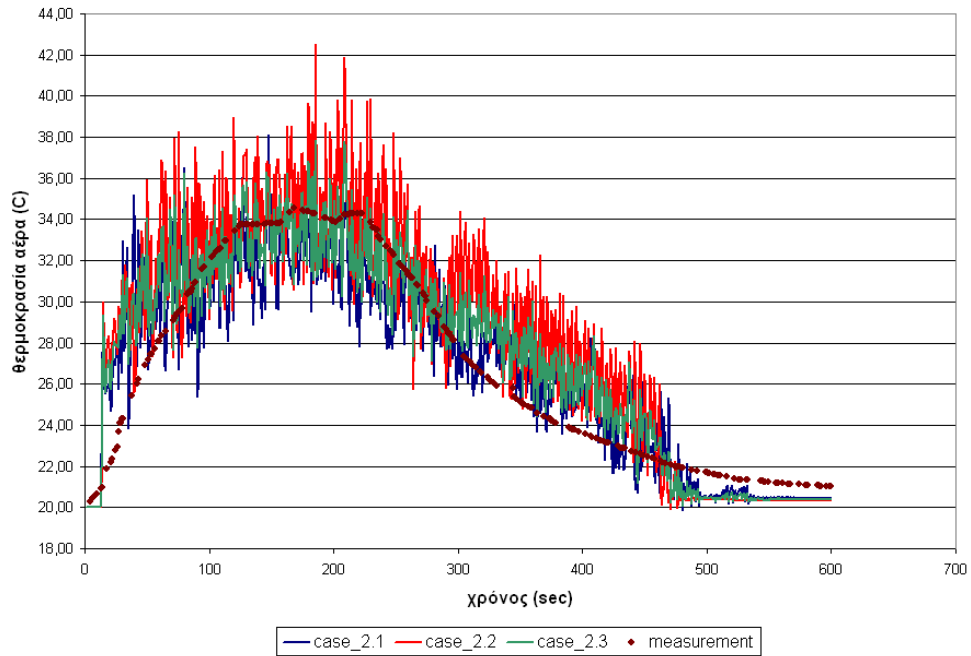
5.5 Αποτελέσματα

Στη συνέχεια δίδονται τα αποτελέσματα για την χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας των προλέξεων του FDS και των διαθέσιμων πειραματικών μετρήσεων στην οροφή της σήραγγας. Πιο συγκεκριμένα αναπαρίσταται τα αποτελέσματα των προλέξεων FDS και των μετρήσεων :

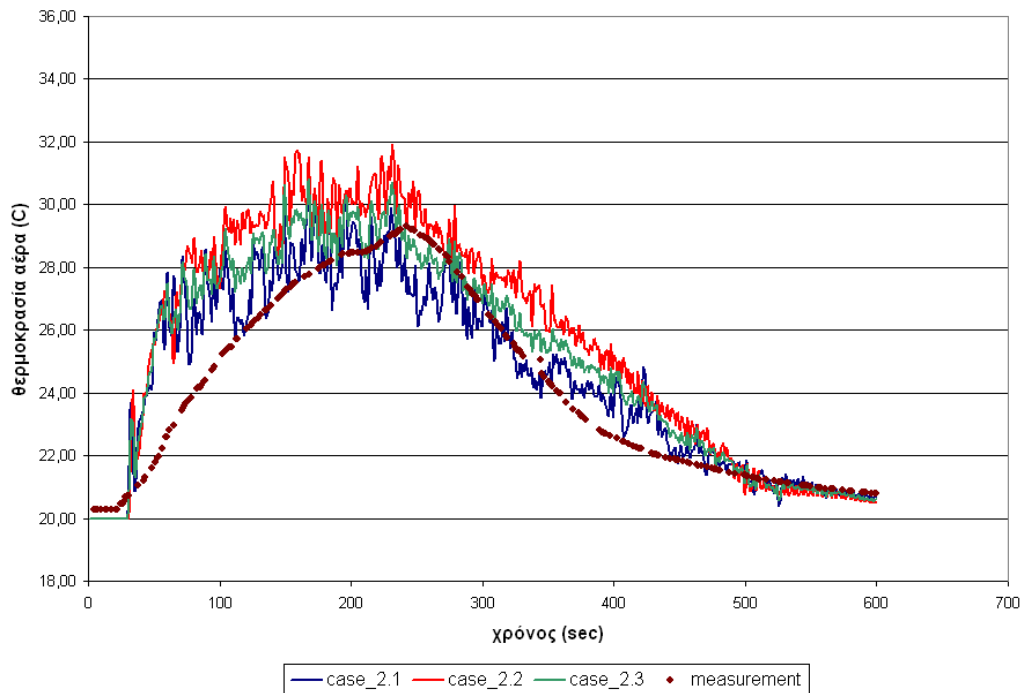
- Σε αποστάσεις 20 – 80 – 160 – 240 – 320 – 400 – 480 – 560 - 640 – 720 – 800m για την περίπτωση του Tunnel_2 / test_3 τόσο για πλήρες μήκος (2720.00m / Case_2.1/2.2/2.3) (βλέπε Εικόνες 48 - 58) όσο και κοντά στο σημείο έναυσης (Case_2.4/2.5/2.6) (Εικόνες 60 - 70)
- Σε αποστάσεις 20 – 80 – 160 – 240 – 320 – 400 – 480 – 560 - 640 – 720 – 800m για την περίπτωση του Tunnel_3 / test_6 κοντά στο σημείο έναυσης (Case_3.4/3.5/3.6) (Εικόνες 71 - 78)
- Σε αποστάσεις 20 – 80 – 160 – 240 – 320 – 400 – 480 – 560 - 640 – 720 – 800m για την περίπτωση του Tunnel_4 / test_9 τόσο για πλήρες μήκος (1036.80m / Case_4.1/4.2/4.3) (Εικόνες 80 - 87) όσο και κοντά στο σημείο έναυσης (Case_4.4/4.5/4.6/4.7) (Εικόνες 88 - 95)

Επίσης δίδονται υπό μορφή εικόνων η χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας με βάση την προσομοίωση του FDS κατά μήκος της σήραγγας για την περίπτωση του Tunnel_2/test_3 (Εικόνα – 59), Tunnel_3/test_6 (Εικόνα - 79) και Tunnel_4/test_9 (Εικόνα - 96)

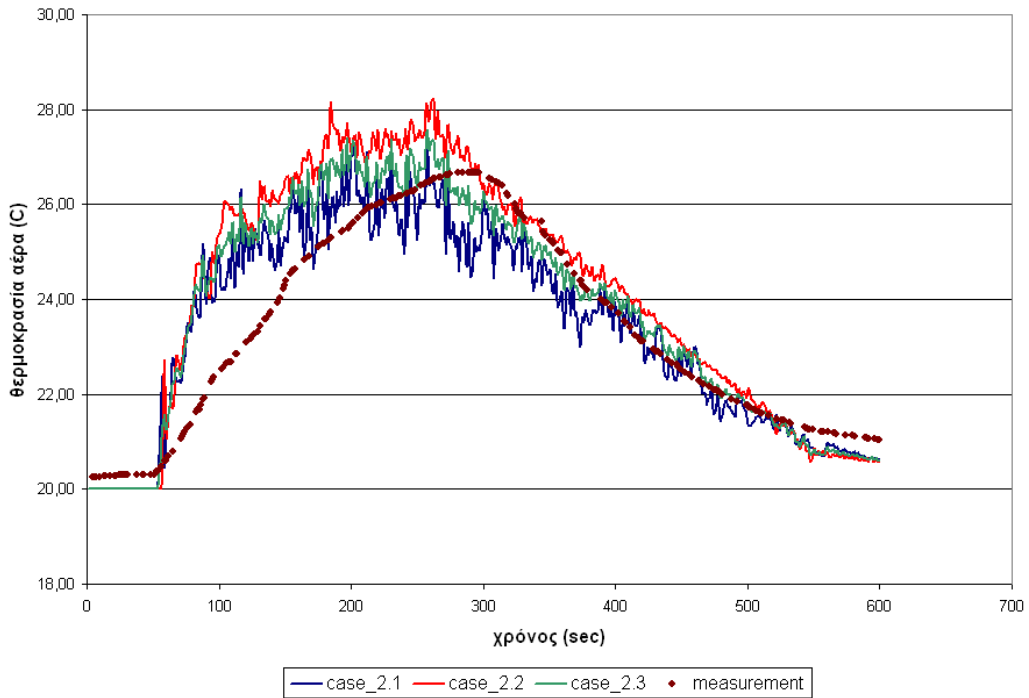
Tunnel 2 test 3



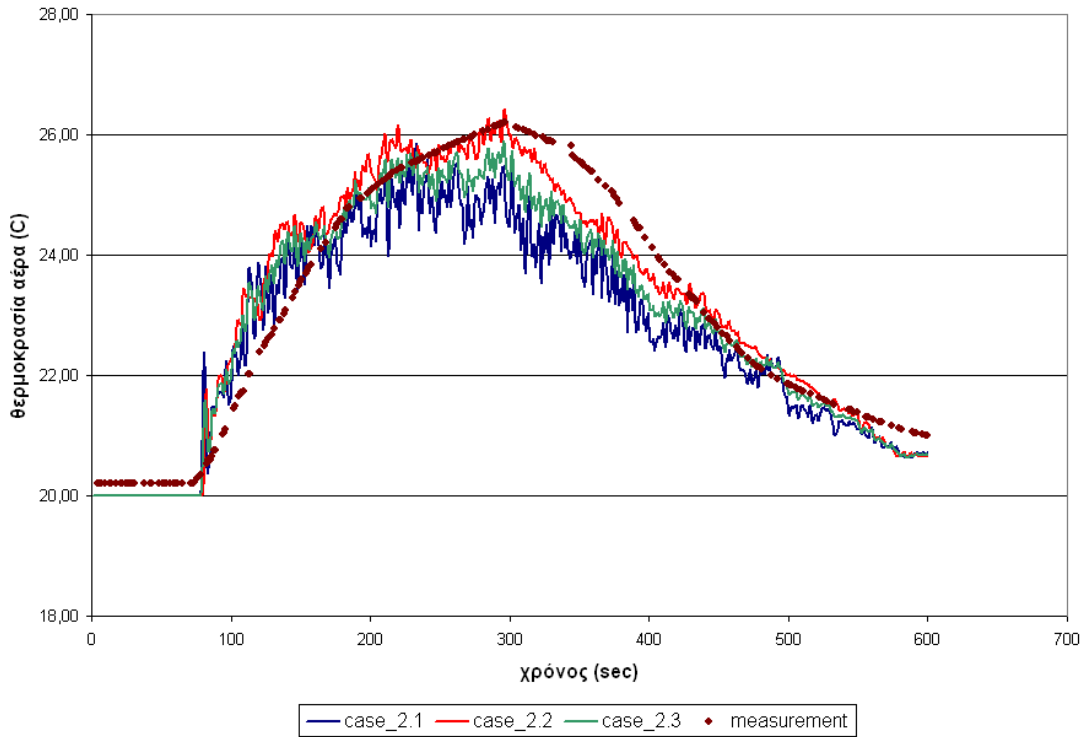
Εικόνα 48 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS και πειραματικών μετρήσεων για tunnel_2_test_3 σε απόσταση 20m κατόντι του σημείου πυρκαγιάς (cases_2.1/2.2/2.3)



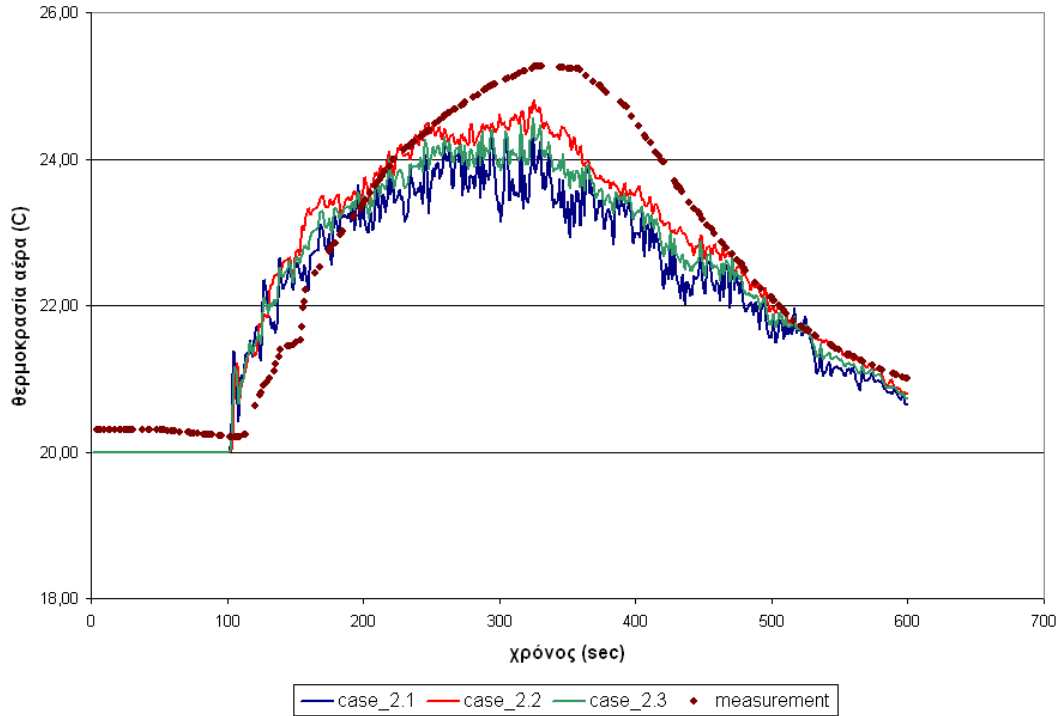
Εικόνα 49 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS και πειραματικών μετρήσεων για tunnel_2_test_3 σε απόσταση 80m κατόντι του σημείου πυρκαγιάς (cases_2.1/2.2/2.3)



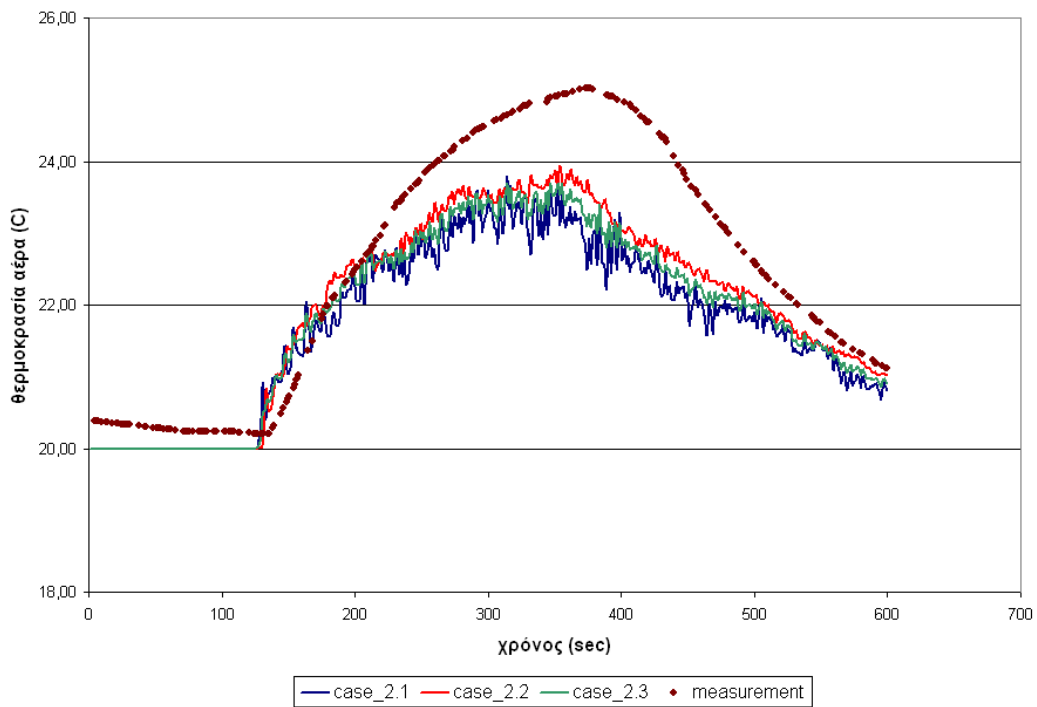
Εικόνα 50 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS και πειραματικών μετρήσεων για tunnel_2_test_3 σε απόσταση 160m κατόντι του σημείου πυρκαγιάς (cases_2.1/2.2/2.3)



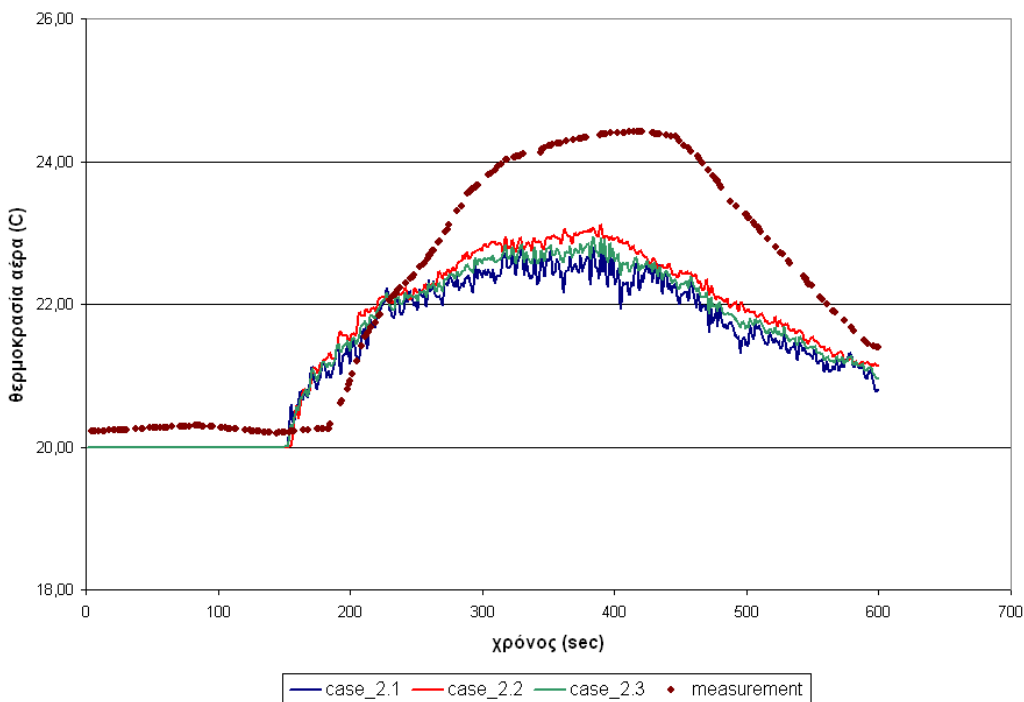
Εικόνα 51 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS και πειραματικών μετρήσεων για tunnel_2_test_3 σε απόσταση 240m κατόντι του σημείου πυρκαγιάς (cases_2.1/2.2/2.3)



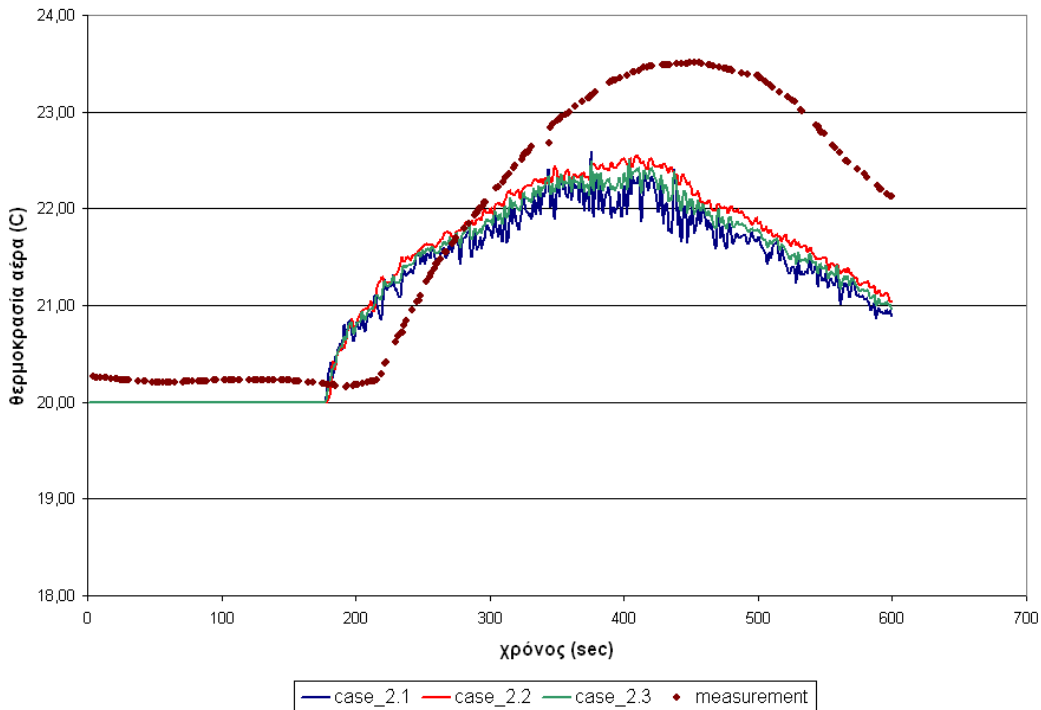
Εικόνα 52 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS και πειραματικών μετρήσεων για tunnel_2_test_3 σε απόσταση 320m κατόντι του σημείου πυρκαγιάς (cases_2.1/2.2/2.3)



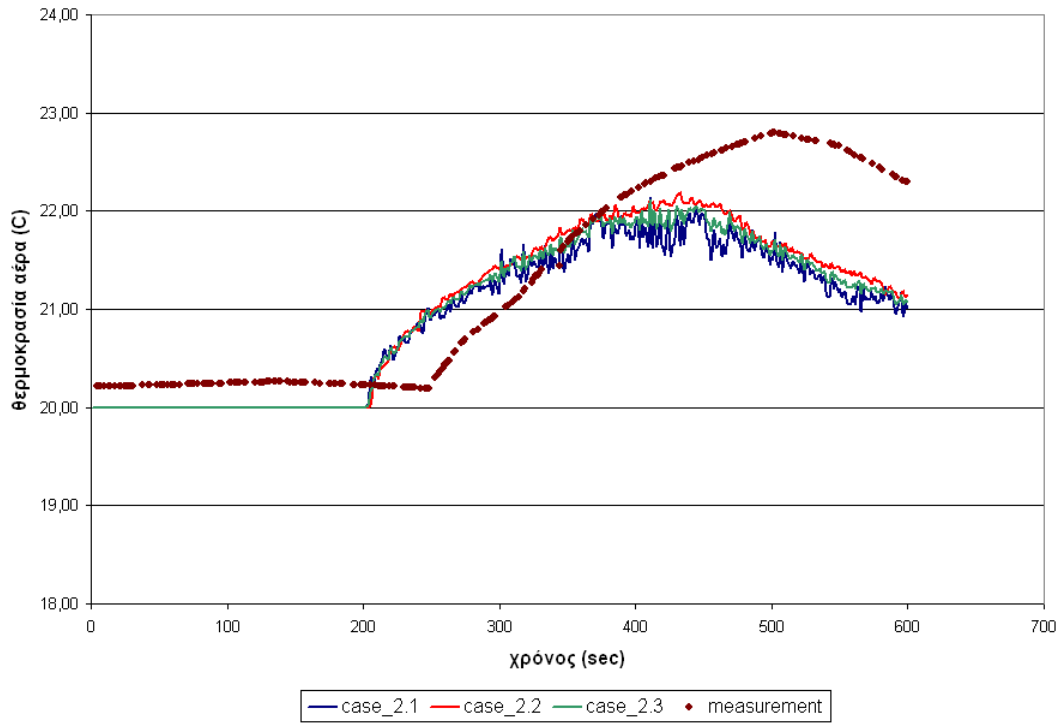
Εικόνα 53 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS και πειραματικών μετρήσεων για tunnel_2_test_3 σε απόσταση 400m κατόντι του σημείου πυρκαγιάς (cases_2.1/2.2/2.3)



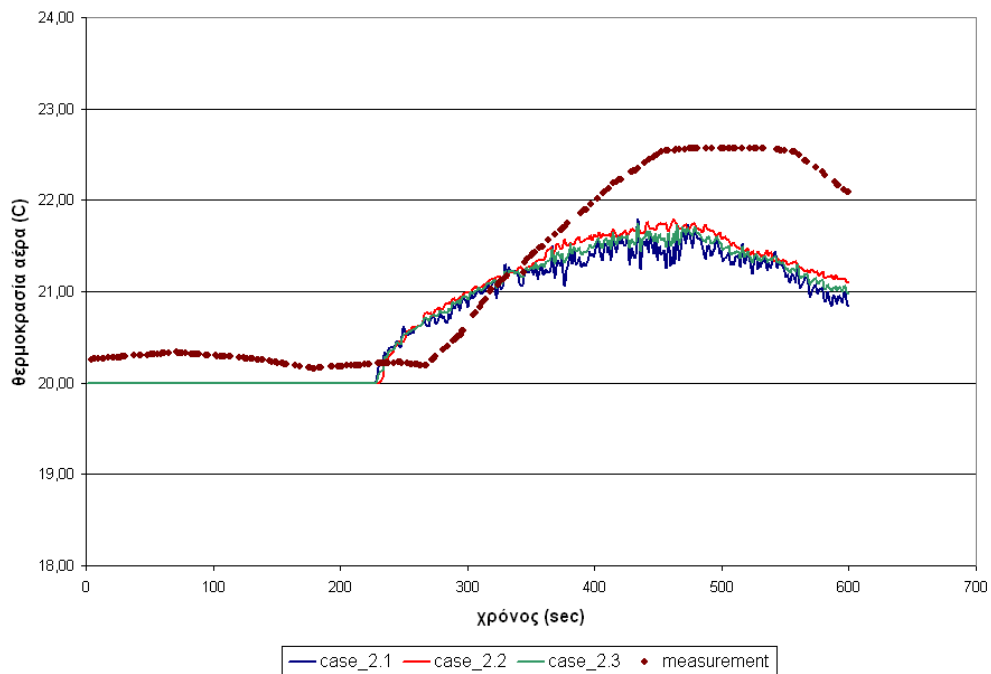
Εικόνα 54 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS και πειραματικών μετρήσεων για tunnel_2_test_3 σε απόσταση 480m κατάντι του σημείου πυρκαγιάς (cases_2.1/2.2/2.3)



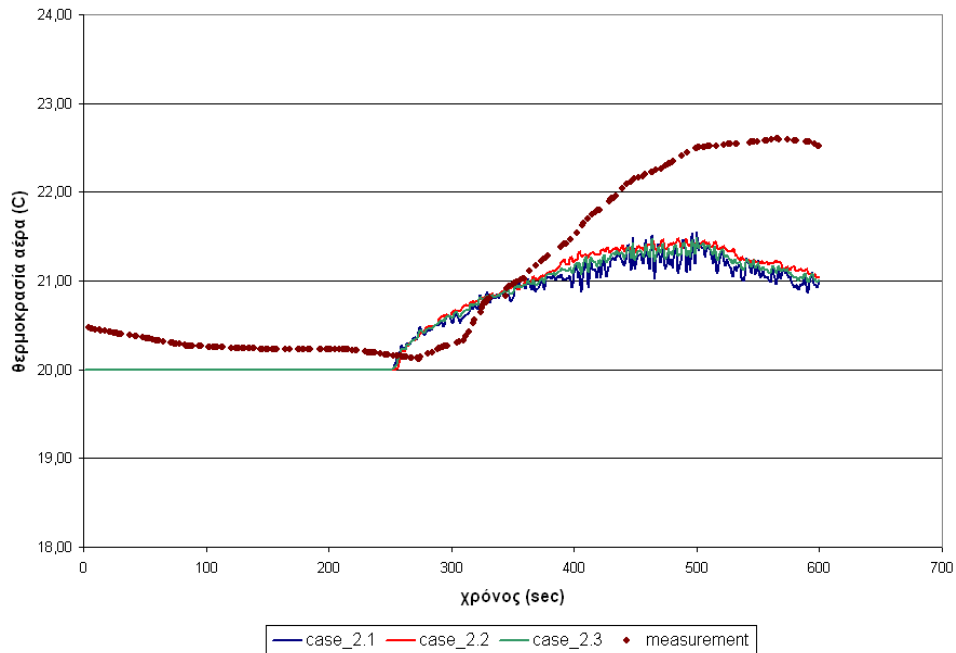
Εικόνα 55 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS και πειραματικών μετρήσεων για tunnel_2_test_3 σε απόσταση 560m κατάντι του σημείου πυρκαγιάς (cases_2.1/2.2/2.3)



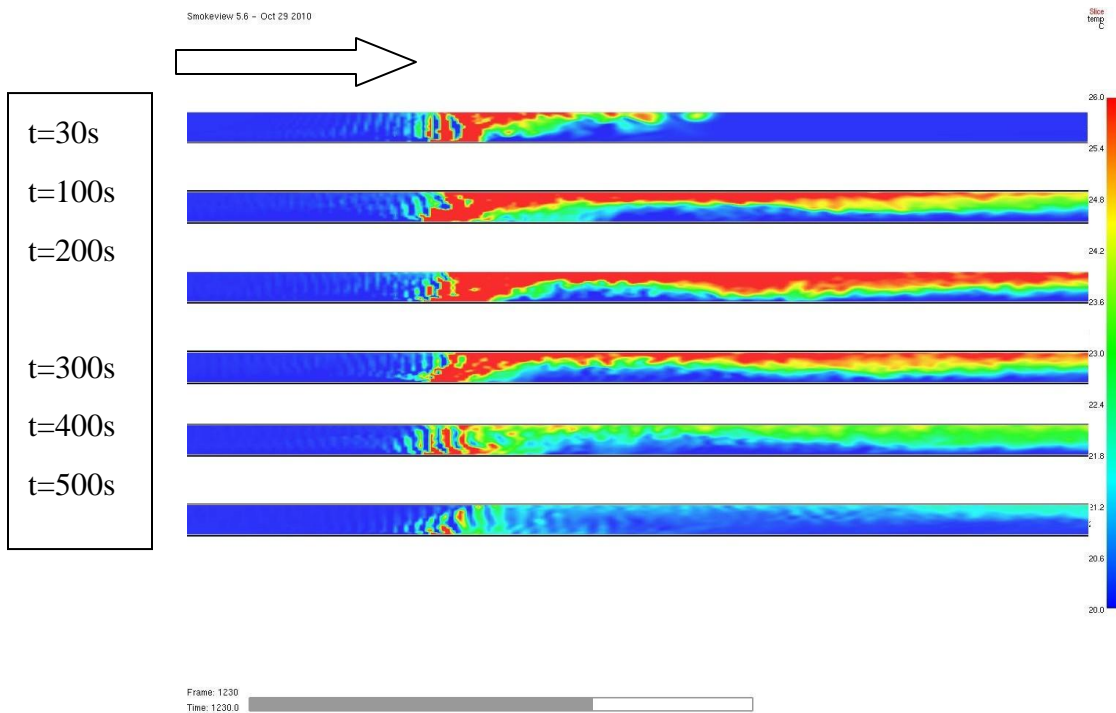
Εικόνα 56 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS και πειραματικών μετρήσεων για tunnel_2_test_3 σε απόσταση 640m κατόντι του σημείου πυρκαγιάς (cases_2.1/2.2/2.3)



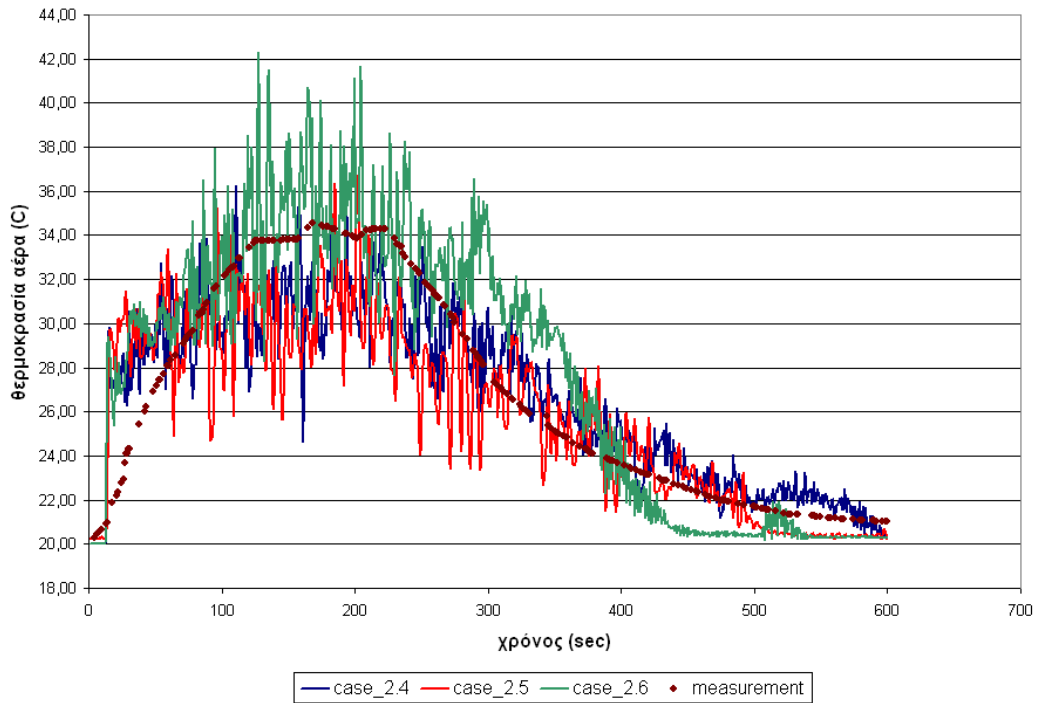
Εικόνα 57 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS και πειραματικών μετρήσεων για tunnel_2_test_3 σε απόσταση 720m κατόντι του σημείου πυρκαγιάς (cases_2.1/2.2/2.3)



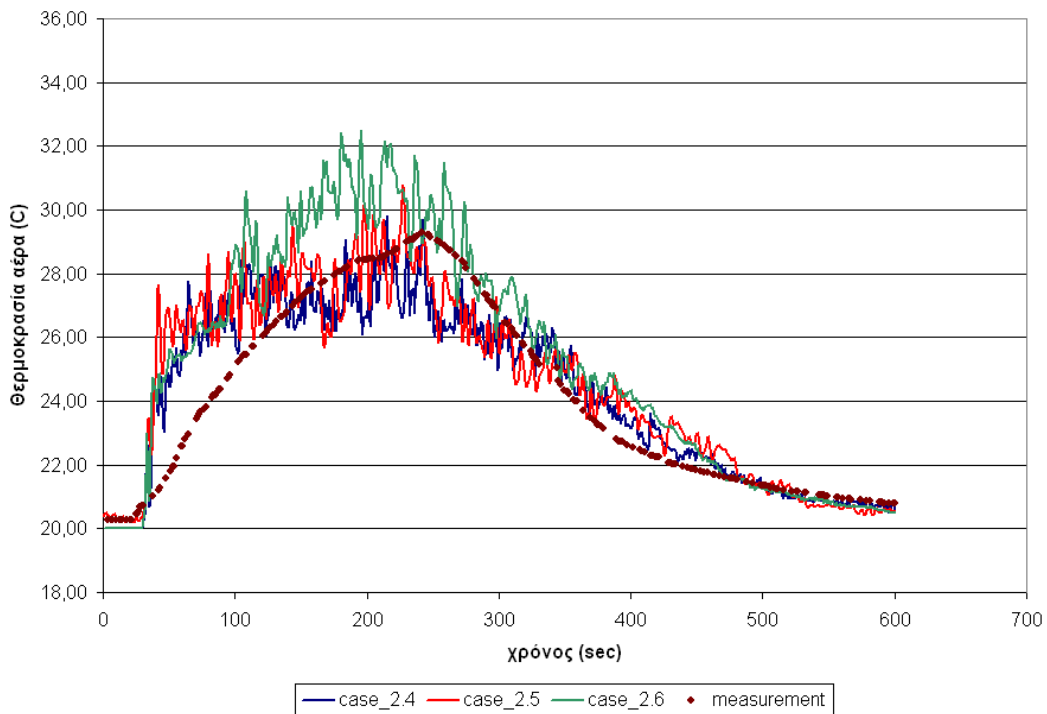
Εικόνα 58 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS και πειραματικών μετρήσεων για tunnel_2_test_3 σε απόσταση 800m κατάντι του σημείου πυρκαγιάς (cases_2.1/2.2/2.3)



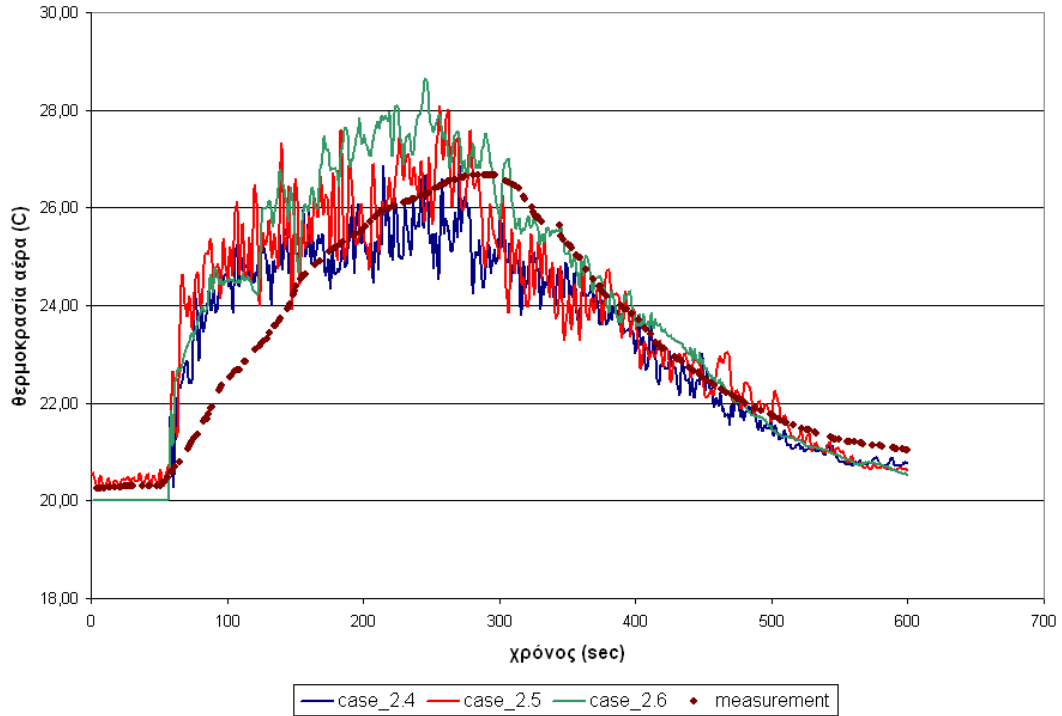
Εικόνα 59 – Απεικόνιση της χρονικής εξέλιξης της πυρκαγιάς για t = 30/100/200/300/400/500 sec μετά την έναυση για tunnel_2/test_3



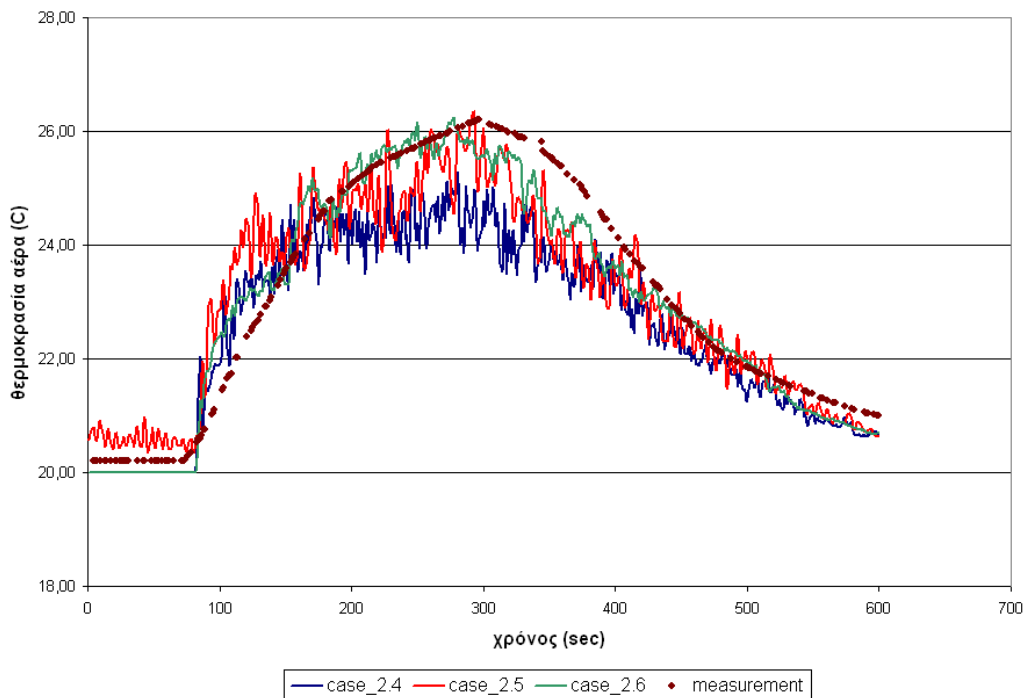
Εικόνα 60 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS και πειραματικών μετρήσεων για tunnel_2_test_3 σε απόσταση 20m κατόντι του σημείου πυρκαγιάς (cases_2.4/2.5/2.6)



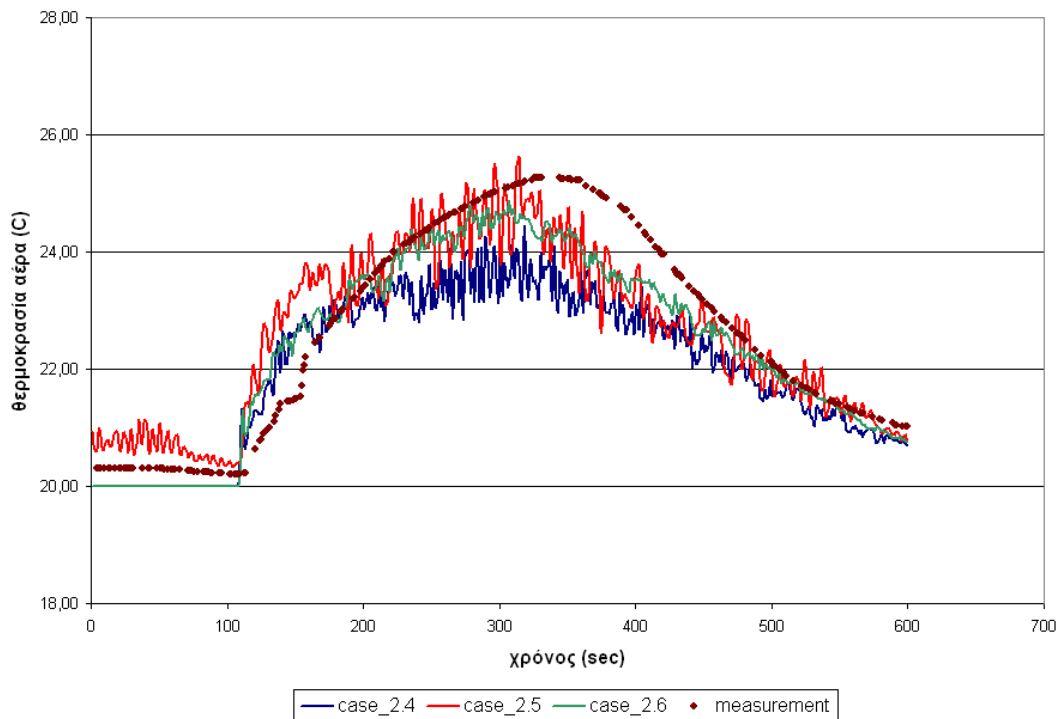
Εικόνα 61 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS και πειραματικών μετρήσεων για tunnel_2_test_3 σε απόσταση 80m κατόντι του σημείου πυρκαγιάς (cases_2.4/2.5/2.6)



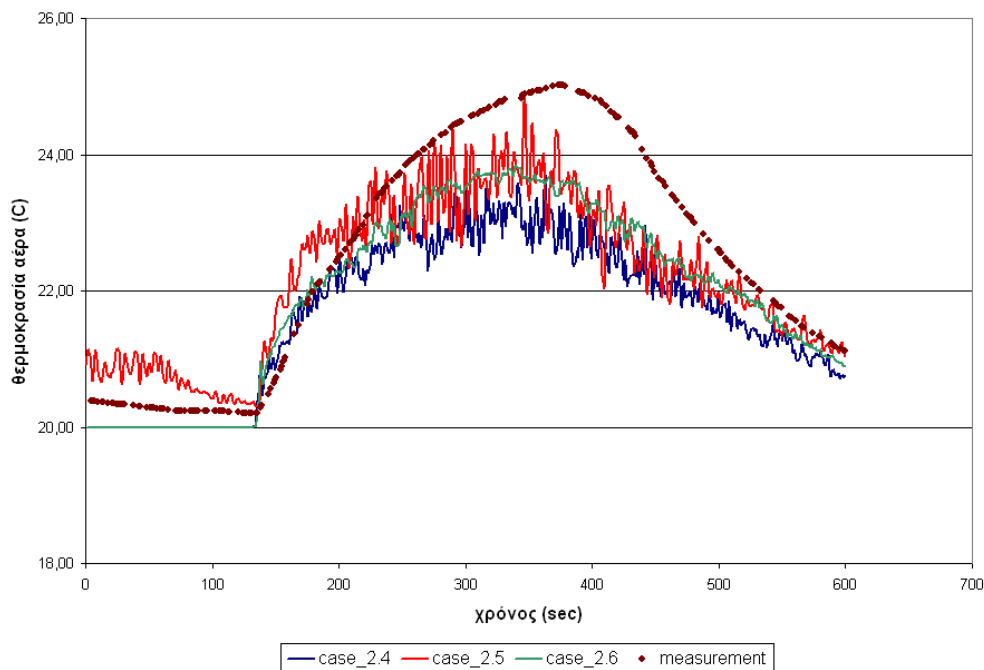
Εικόνα 62 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS και πειραματικών μετρήσεων για tunnel_2_test_3 σε απόσταση 160m κατάντι του σημείου πυρκαγιάς (cases_2.4/2.5/2.6)



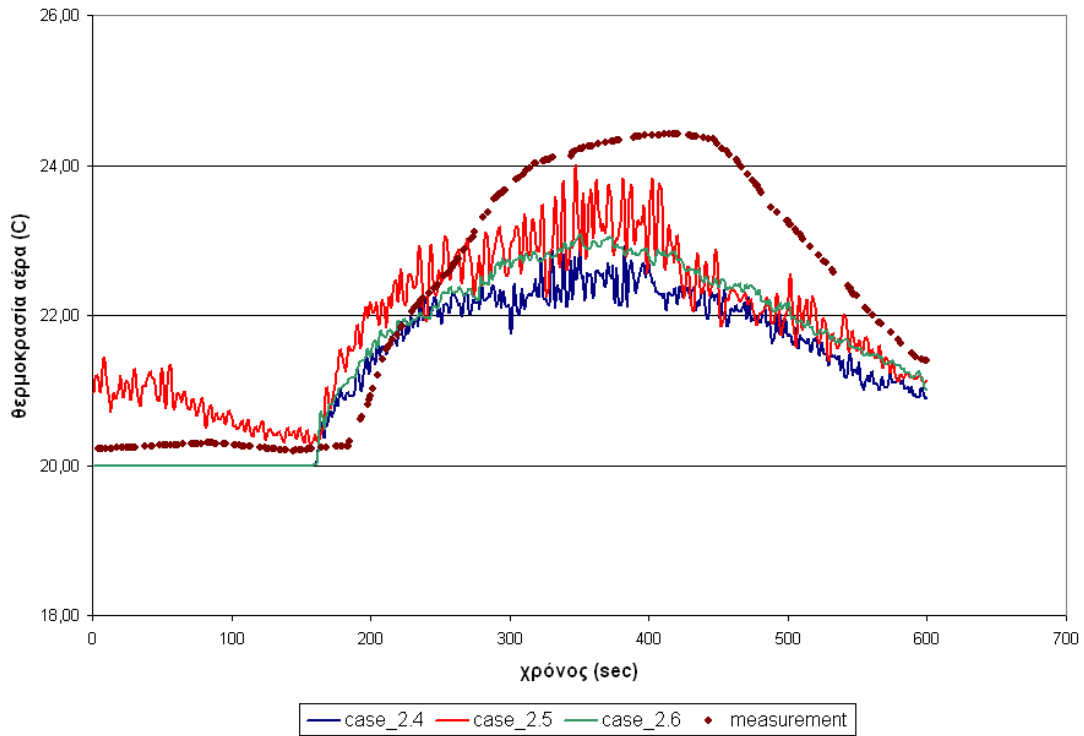
Εικόνα 63 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS και πειραματικών μετρήσεων για tunnel_2_test_3 σε απόσταση 240m κατάντι του σημείου πυρκαγιάς (cases_2.4/2.5/2.6)



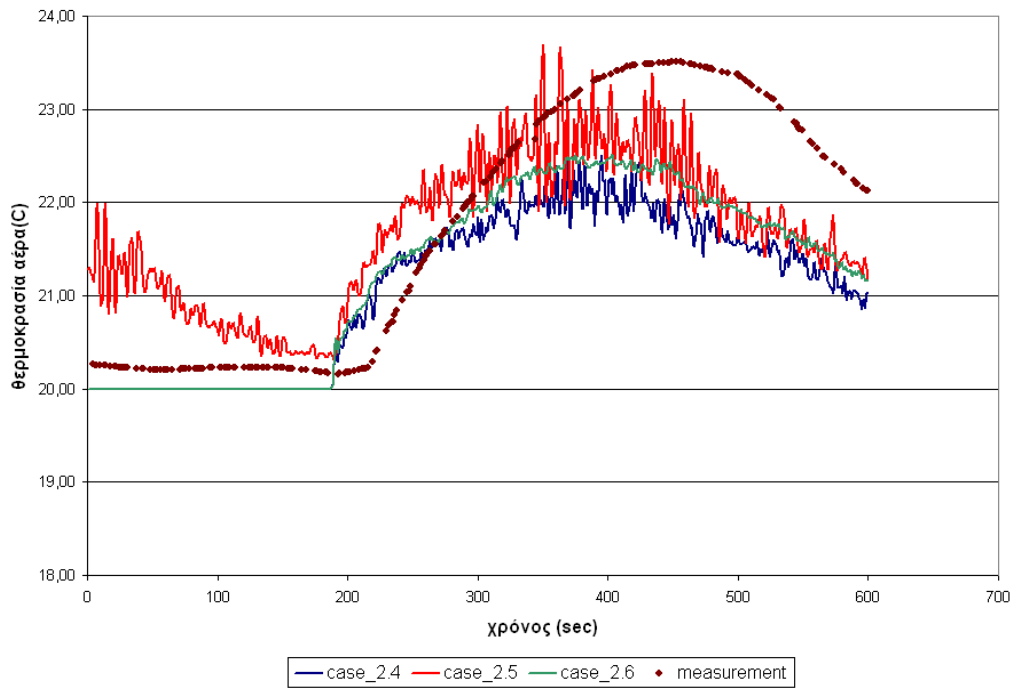
Εικόνα 64 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS και πειραματικών μετρήσεων για tunnel_2_test_3 σε απόσταση 320m κατάντι του σημείου πυρκαγιάς (cases_2.4/2.5/2.6)



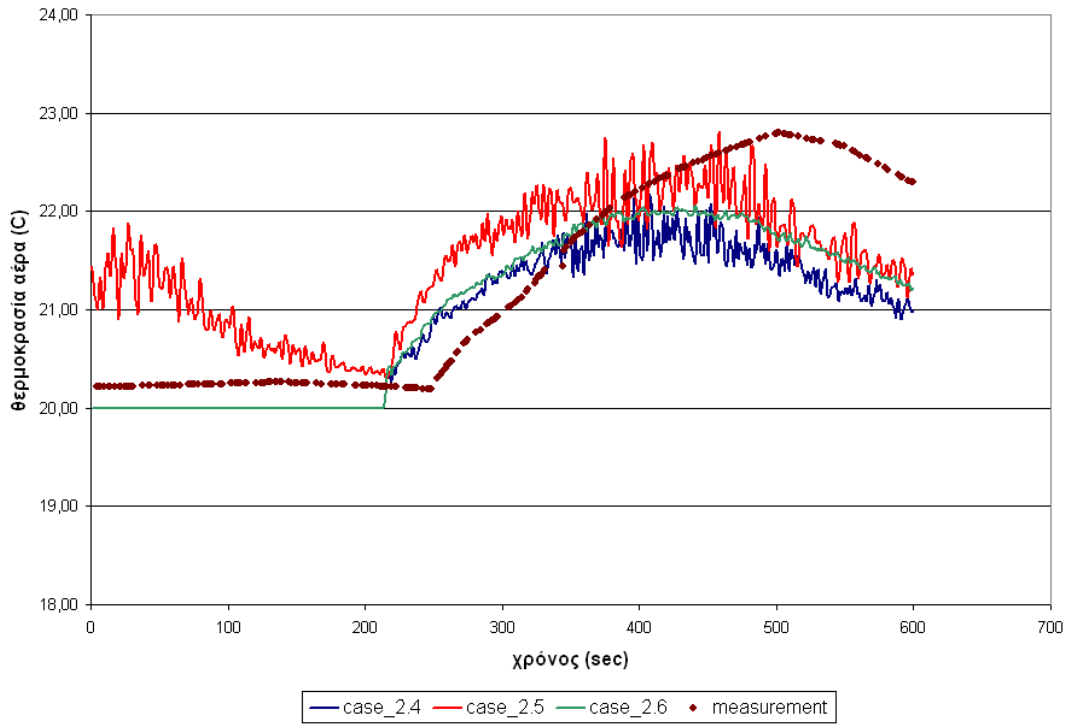
Εικόνα 65 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS και πειραματικών μετρήσεων για tunnel_2_test_3 σε απόσταση 400m κατάντι του σημείου πυρκαγιάς (cases_2.4/2.5/2.6)



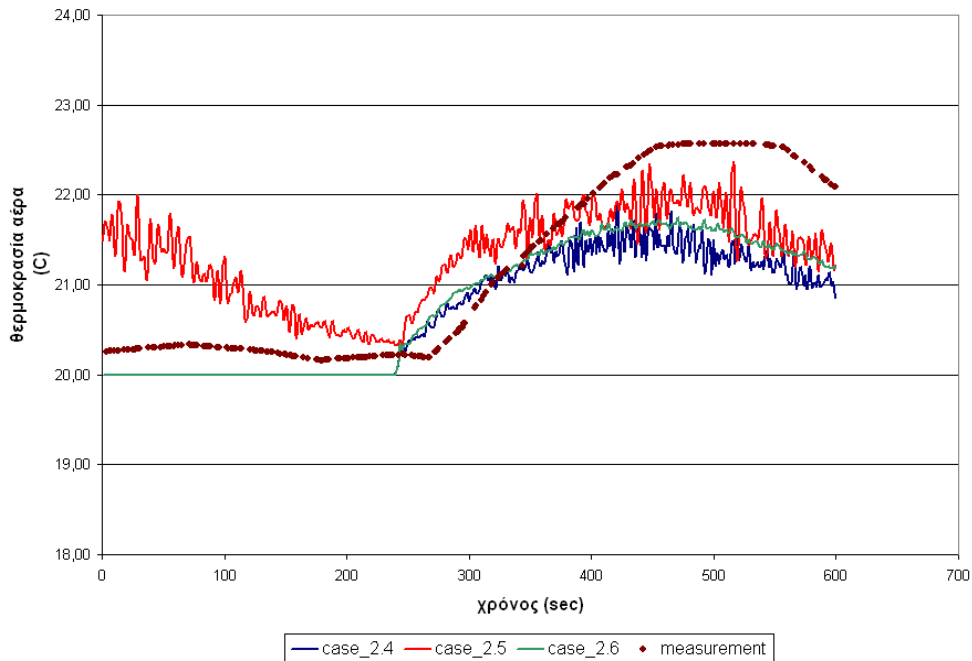
Εικόνα 66 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS και πειραματικών μετρήσεων για tunnel_2_test_3 σε απόσταση 480m κατάντι του σημείου πυρκαγιάς (cases_2.4/2.5/2.6)



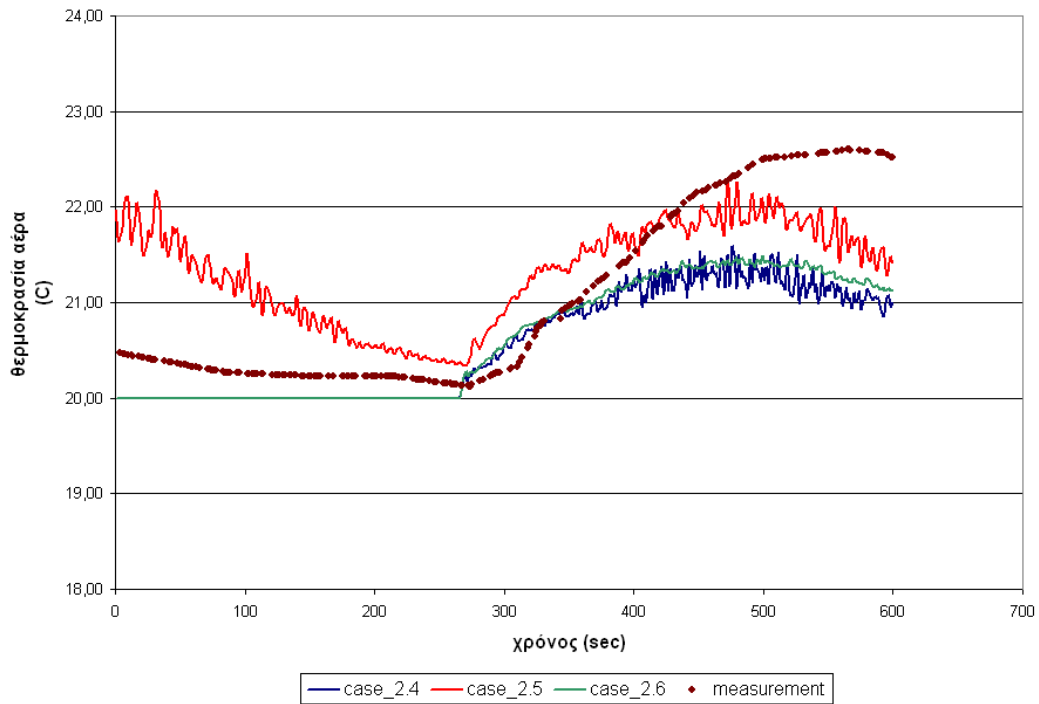
Εικόνα 67 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS και πειραματικών μετρήσεων για tunnel_2_test_3 σε απόσταση 560m κατάντι του σημείου πυρκαγιάς (cases_2.4/2.5/2.6)



Εικόνα 68 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS και πειραματικών μετρήσεων για tunnel_2_test_3 σε απόσταση 640m κατάντι του σημείου πυρκαγιάς (cases_2.4/2.5/2.6)

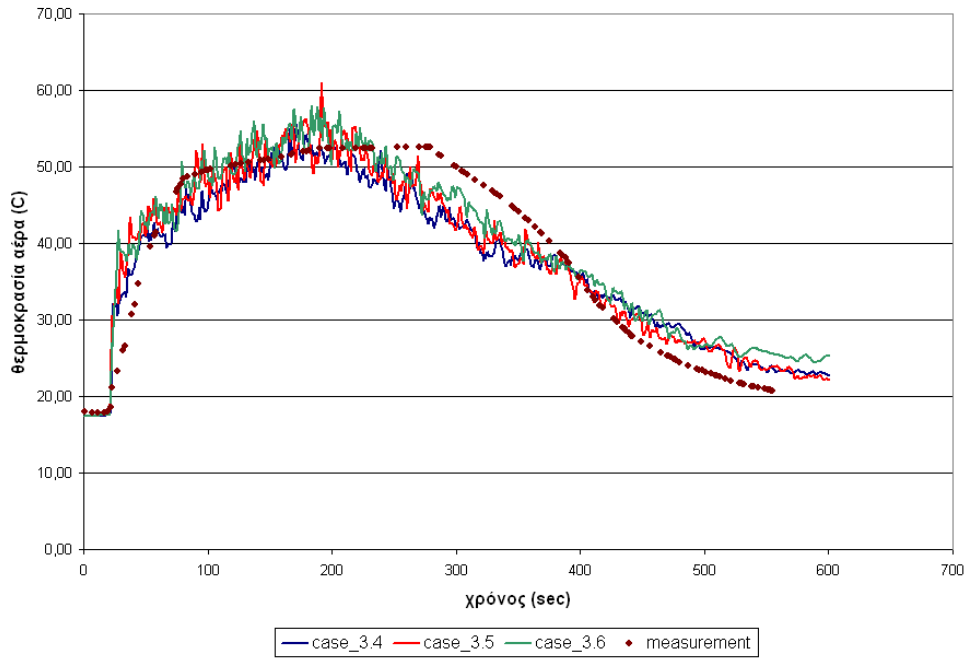


Εικόνα 69 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS και πειραματικών μετρήσεων για tunnel_2_test_3 σε απόσταση 720m κατάντι του σημείου πυρκαγιάς (cases_2.4/2.5/2.6)

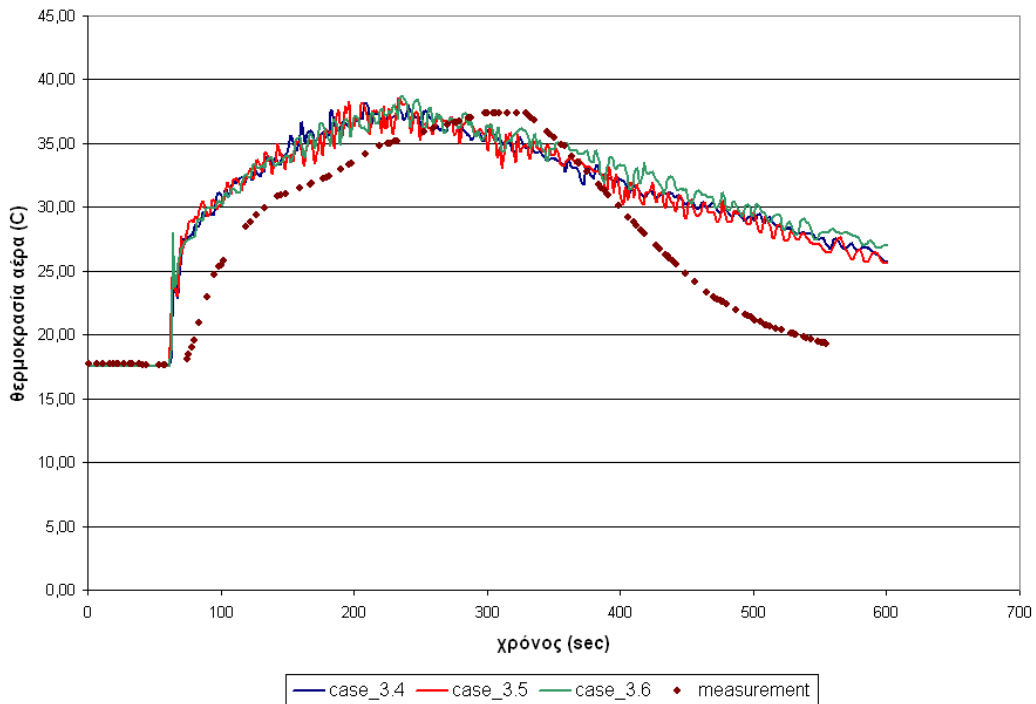


Εικόνα 70 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS και πειραματικών μετρήσεων για tunnel_2_test_3 σε απόσταση 800m κατάντι του σημείου πυρκαγιάς (cases_2.4/2.5/2.6)

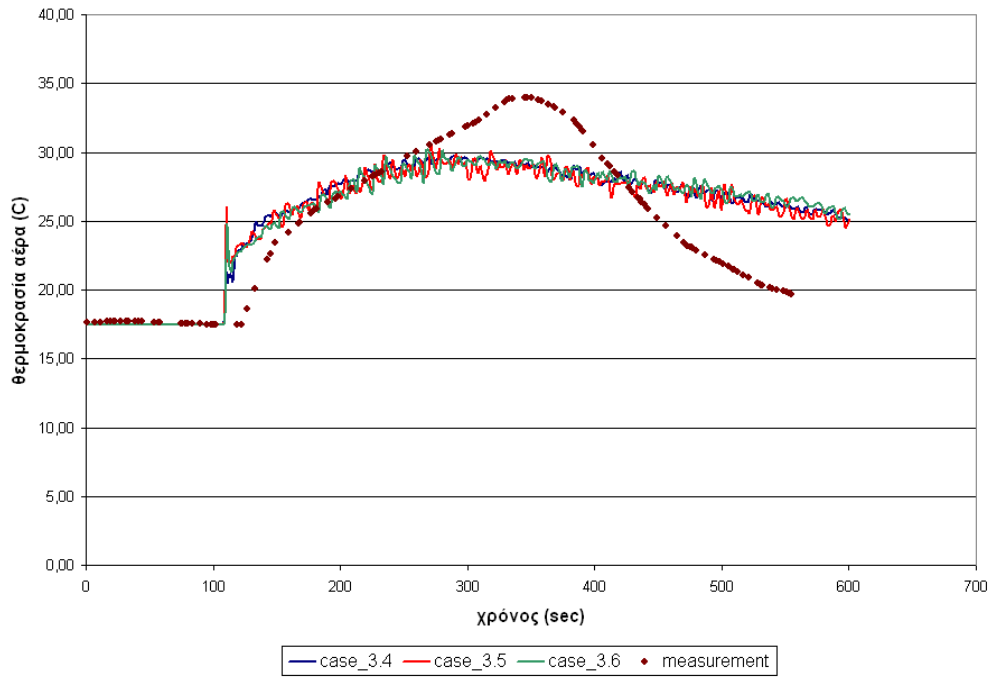
Tunnel 3 test 6



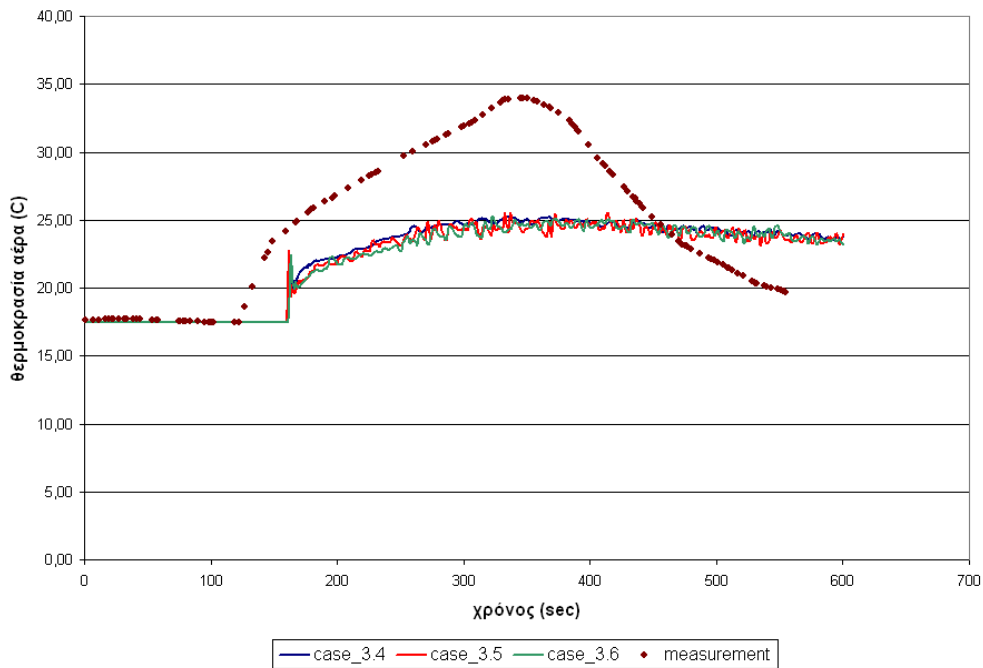
Εικόνα 71 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS και πειραματικών μετρήσεων για tunnel_3_test_6 σε απόσταση 30m κατόντι του σημείου πυρκαγιάς (cases_3.4/3.5/3.6)



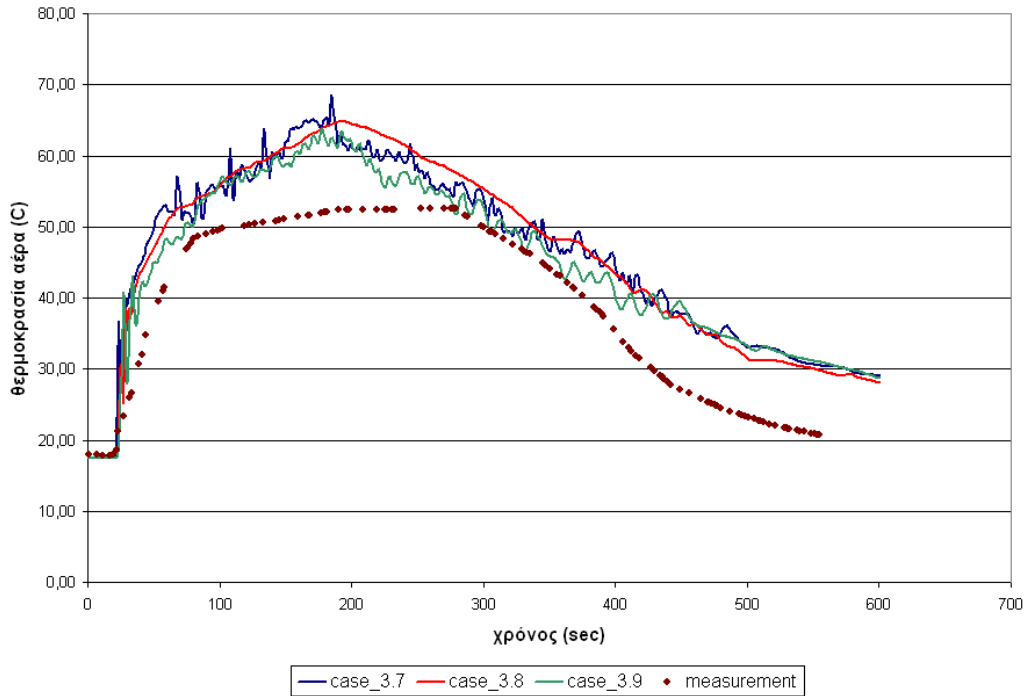
Εικόνα 72 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS και πειραματικών μετρήσεων για tunnel_3_test_6 σε απόσταση 90m κατόντι του σημείου πυρκαγιάς (cases_3.4/3.5/3.6)



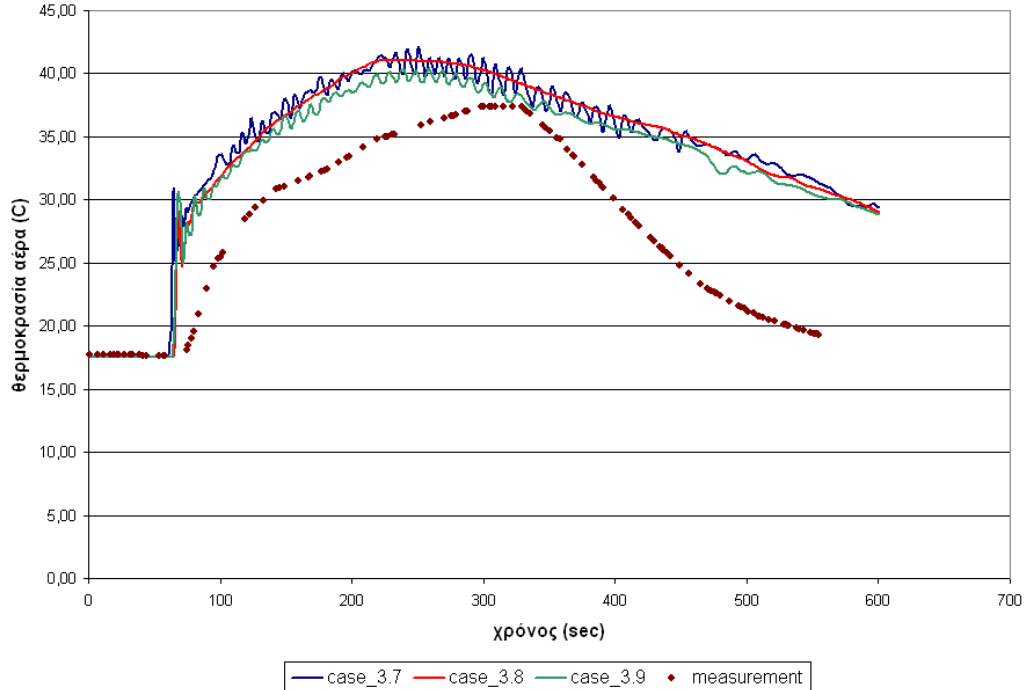
Εικόνα 73 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS και πειραματικών μετρήσεων για tunnel_3_test_6 σε απόσταση 150m κατάντι του σημείου πυρκαγιάς (cases_3.4/3.5/3.6)



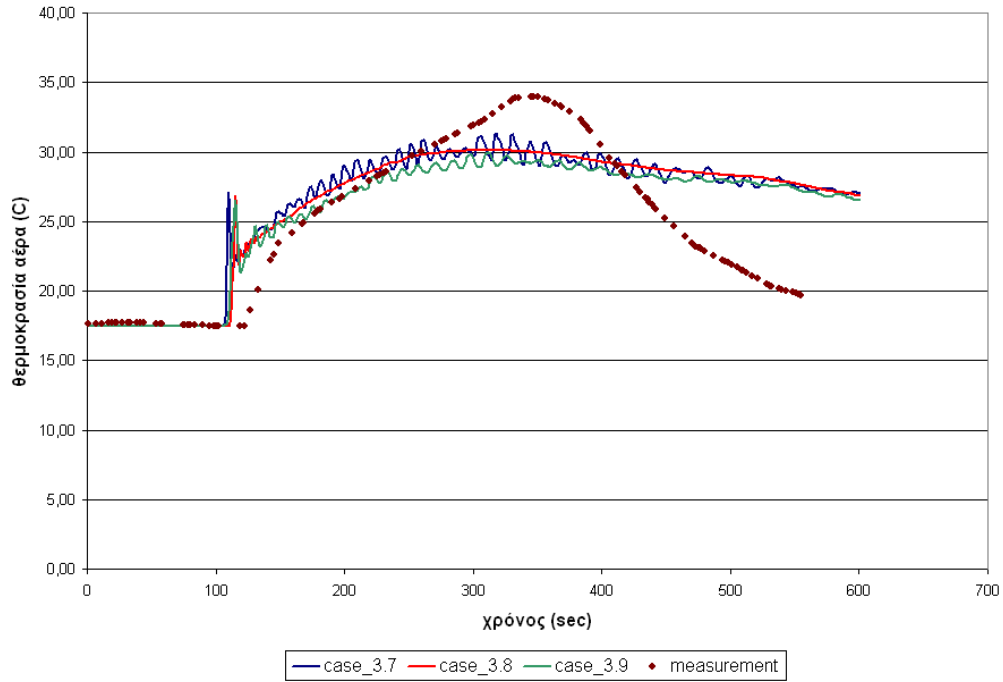
Εικόνα 74 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS και πειραματικών μετρήσεων για tunnel_3_test_6 σε απόσταση 210m κατάντι του σημείου πυρκαγιάς (cases_3.4/3.5/3.6)



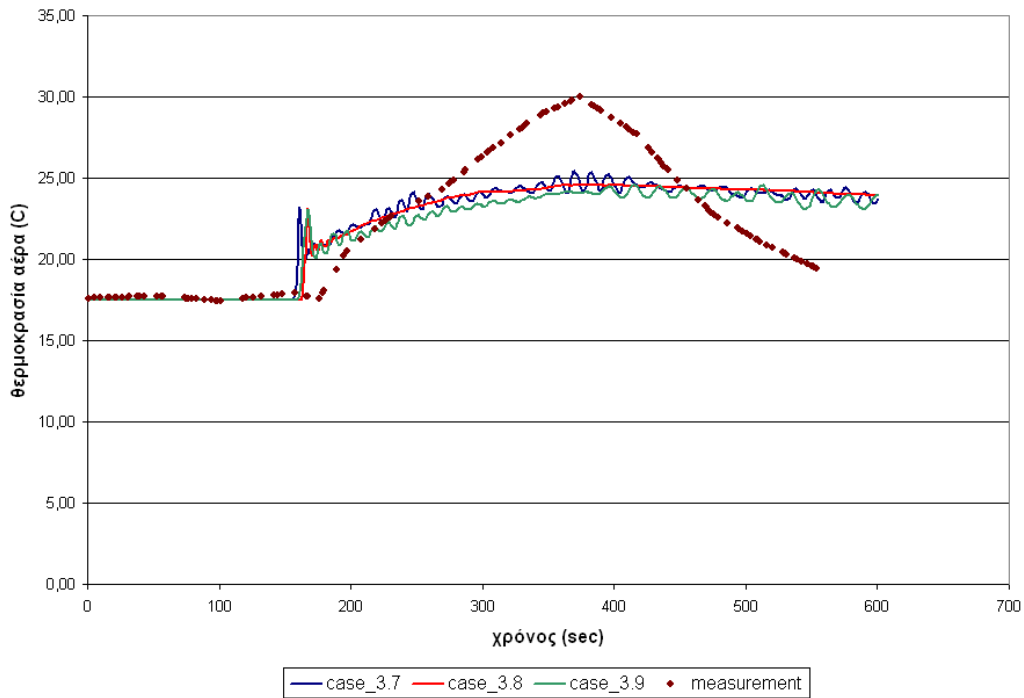
Εικόνα 75 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS και πειραματικών μετρήσεων για tunnel_3_test_6 σε απόσταση 30m κατόντι του σημείου πυρκαγιάς (cases_3.7/3.8/3.9)



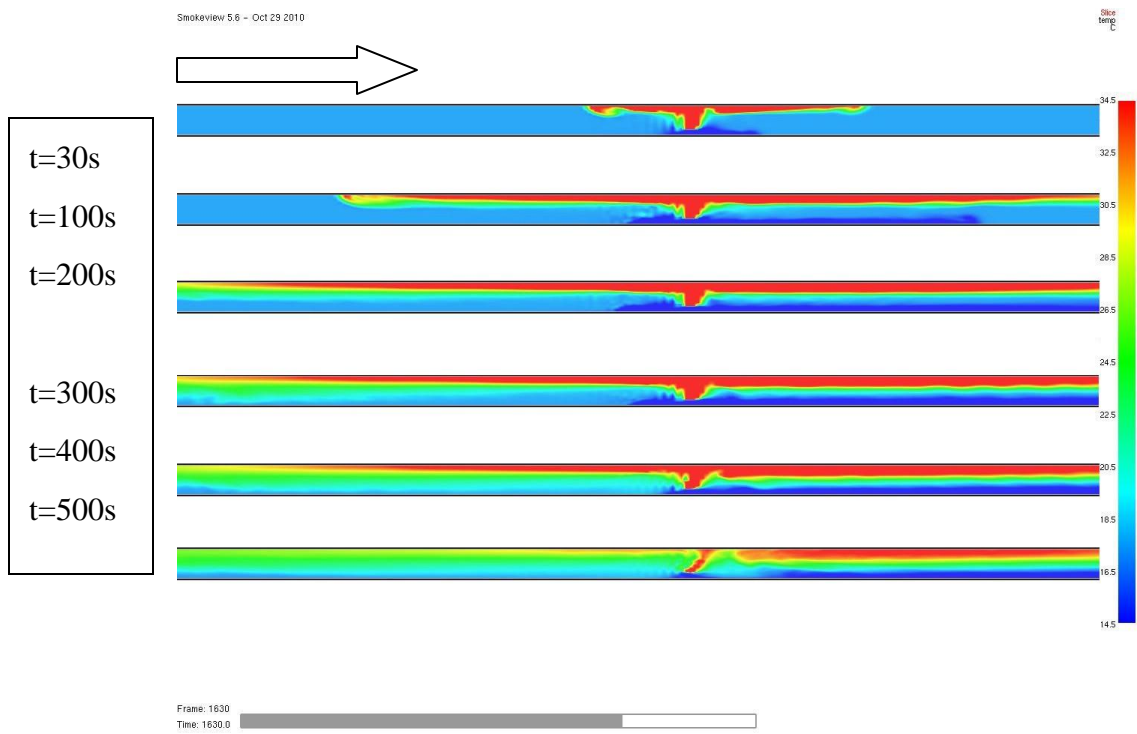
Εικόνα 76 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS και πειραματικών μετρήσεων για tunnel_3_test_6 σε απόσταση 90m κατόντι του σημείου πυρκαγιάς (cases_3.7/3.8/3.9)



Εικόνα 77 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS και πειραματικών μετρήσεων για tunnel_3_test_6 σε απόσταση 150m κατάντι του σημείου πυρκαγιάς (cases_3.7/3.8/3.9)

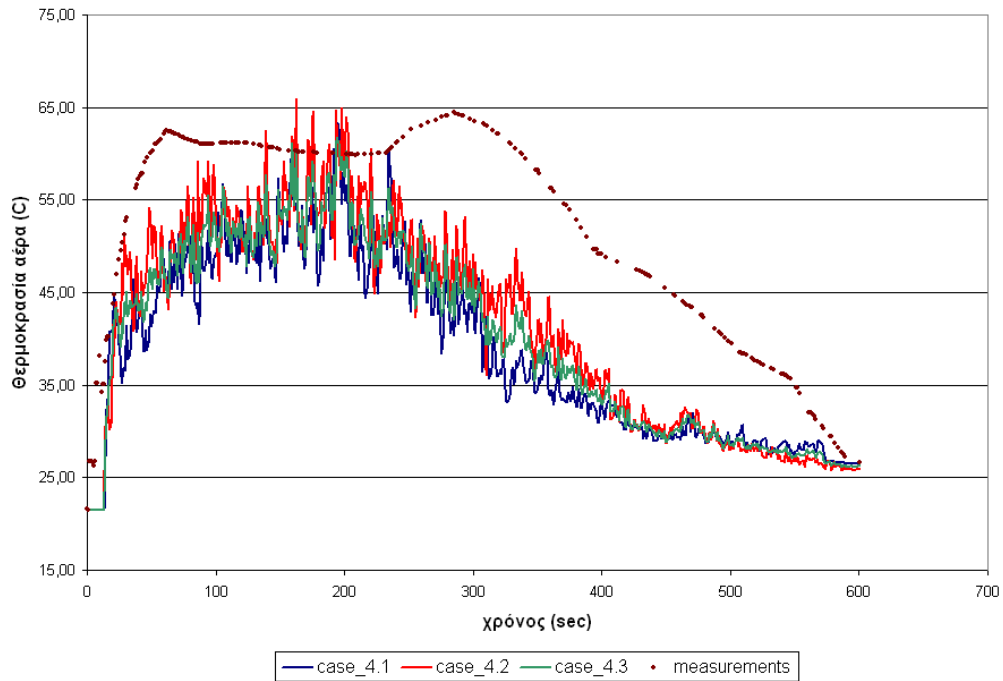


Εικόνα 78 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS και πειραματικών μετρήσεων για tunnel_3_test_6 σε απόσταση 210m κατάντι του σημείου πυρκαγιάς (cases_3.7/3.8/3.9)

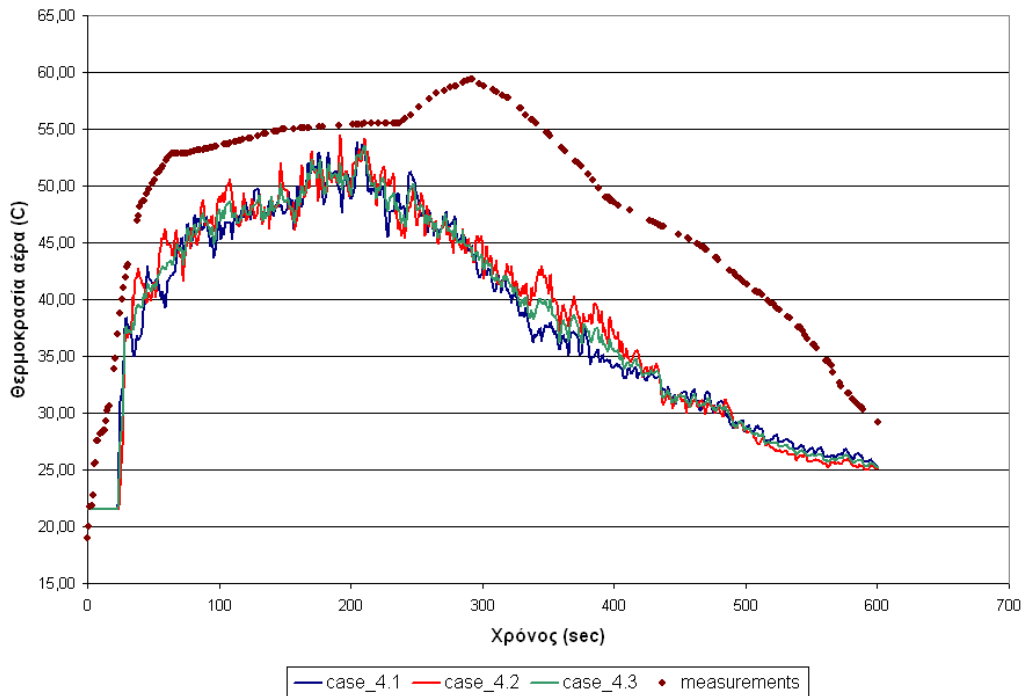


Εικόνα 79 - Απεικόνιση της χρονικής εξέλιξης της πυρκαγιάς για $t = 30/100/200/300/400/500$ sec μετά την έναυση για tunnel_3/test_6

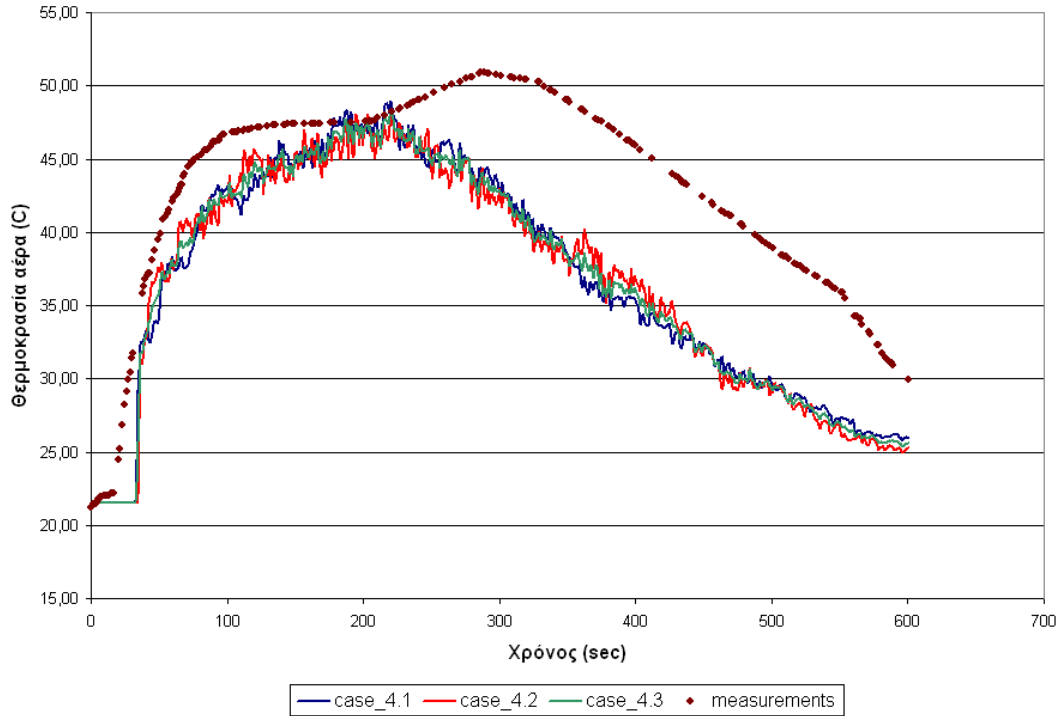
Tunnel 4 test 9



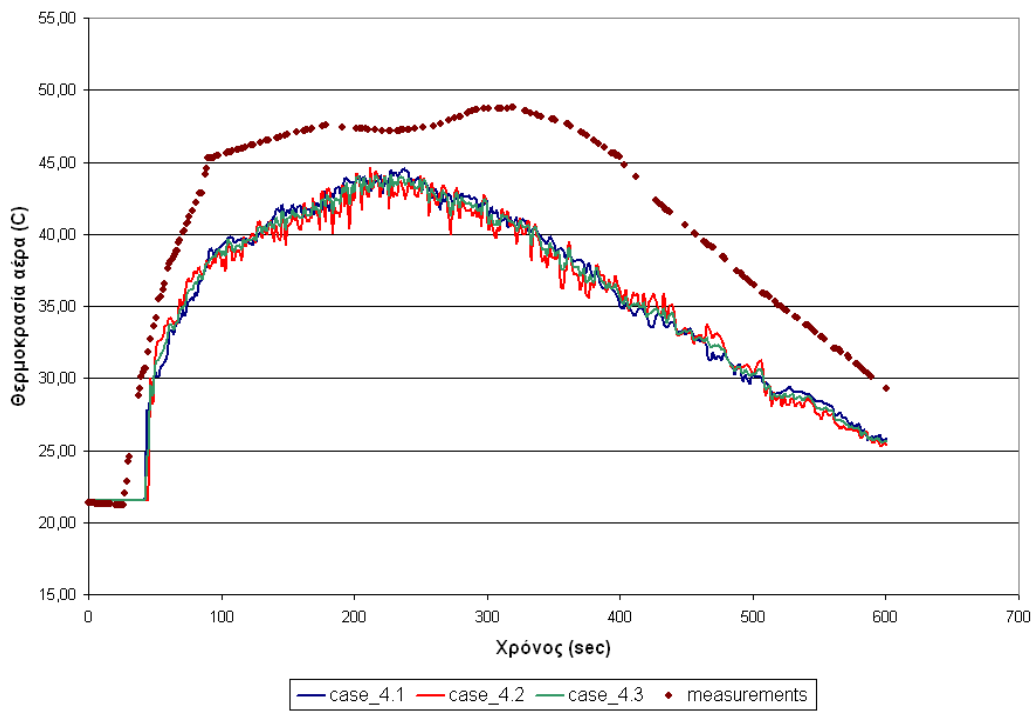
Εικόνα 80 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS και πειραματικών μετρήσεων για tunnel_4_test_9 σε απόσταση 20m κατόντι του σημείου πυρκαγιάς (cases_4.1/4.2/4.3)



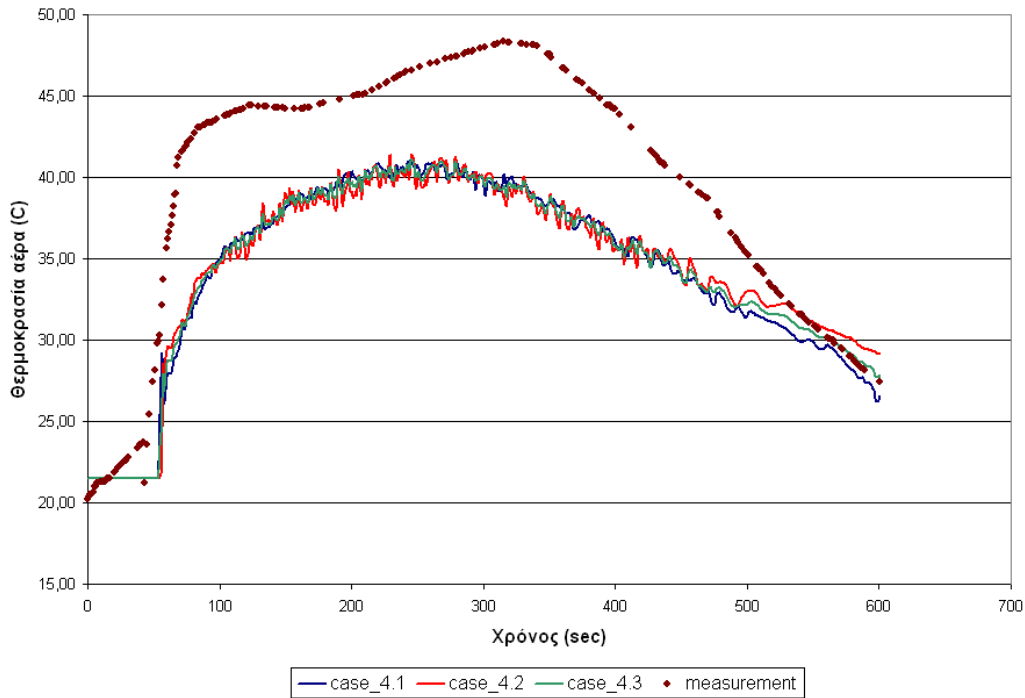
Εικόνα 81 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS και πειραματικών μετρήσεων για tunnel_4_test_9 σε απόσταση 40m κατόντι του σημείου πυρκαγιάς (cases_4.1/4.2/4.3)



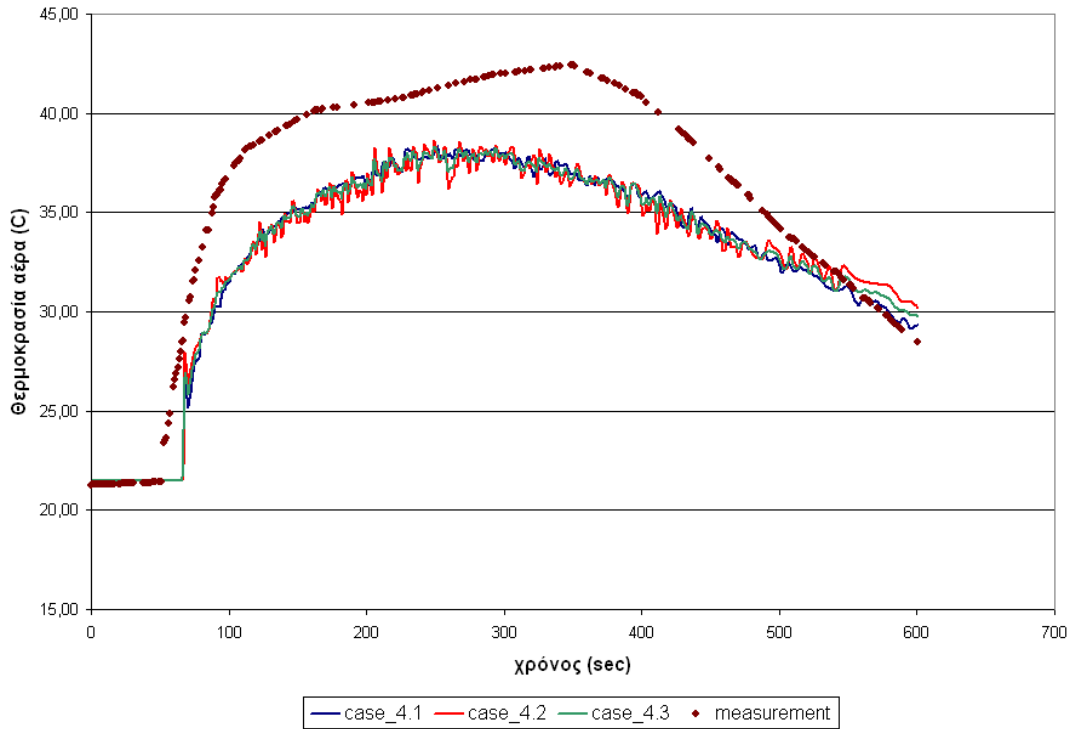
Εικόνα 82 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS και πειραματικών μετρήσεων για tunnel_4_test_9 σε απόσταση 60m κατόντι του σημείου πυρκαγιάς (cases_4.1/4.2/4.3)



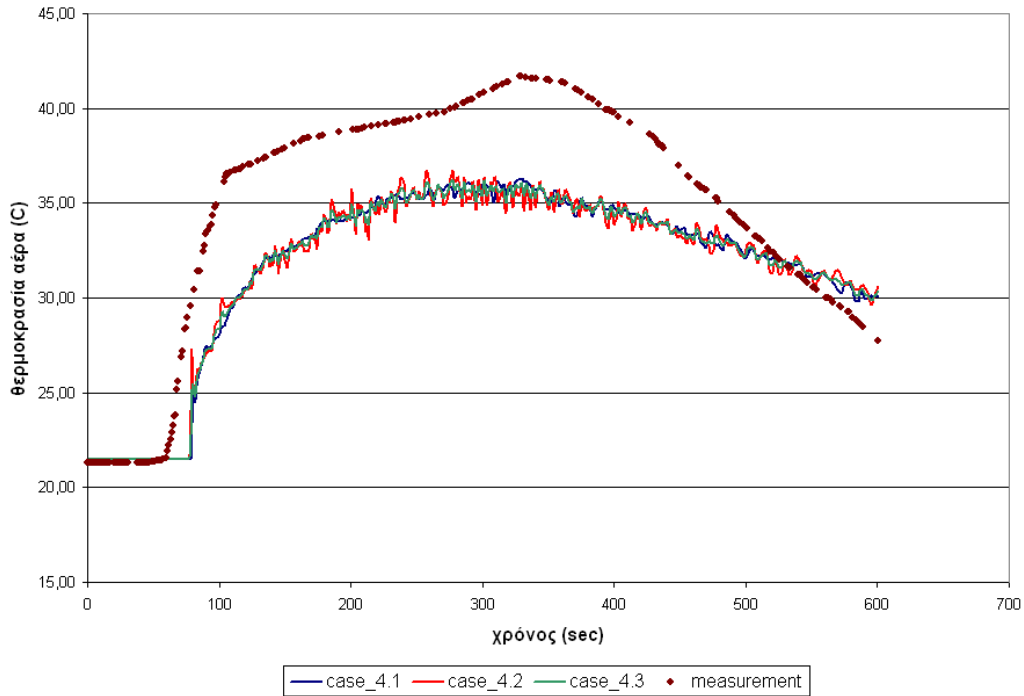
Εικόνα 83 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS και πειραματικών μετρήσεων για tunnel_4_test_9 σε απόσταση 80m κατόντι του σημείου πυρκαγιάς (cases_4.1/4.2/4.3)



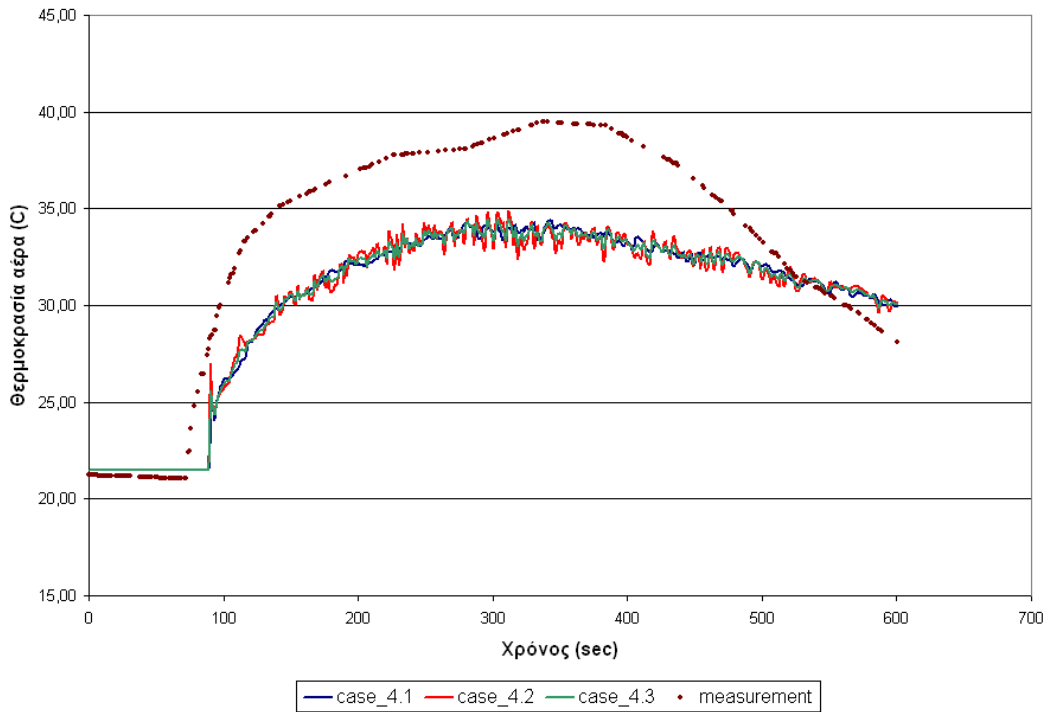
Εικόνα 84 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS και πειραματικών μετρήσεων για tunnel_4_test_9 σε απόσταση 100m κατάντι του σημείου πυρκαγιάς (cases_4.1/4.2/4.3)



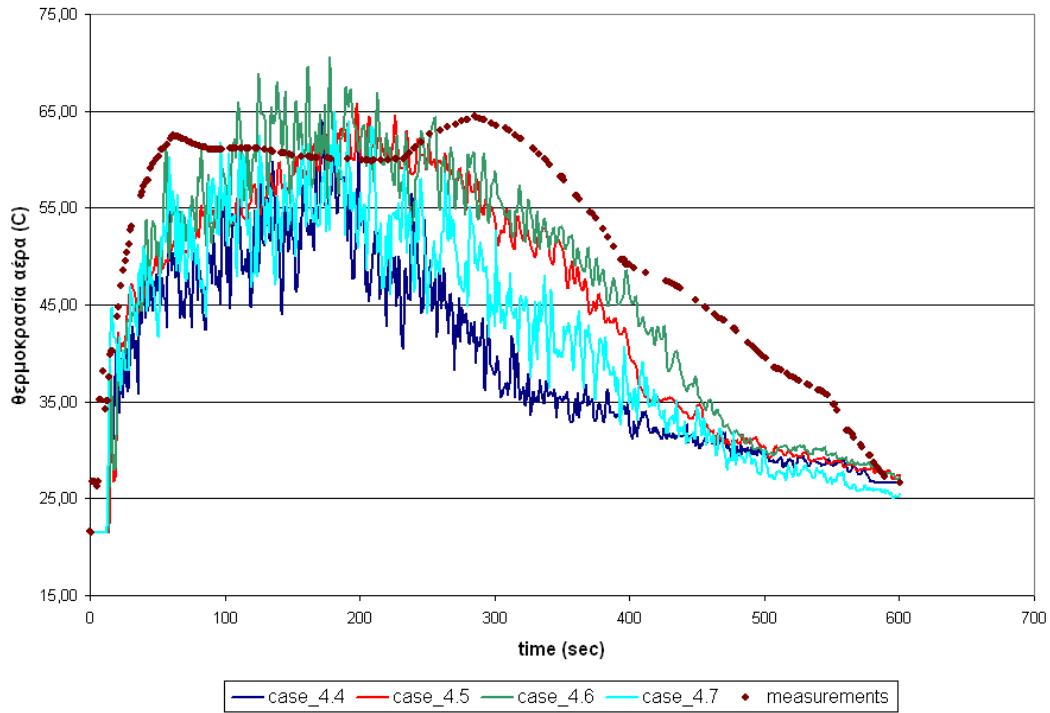
Εικόνα 85 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS και πειραματικών μετρήσεων για tunnel_4_test_9 σε απόσταση 120m κατάντι του σημείου πυρκαγιάς (cases_4.1/4.2/4.3)



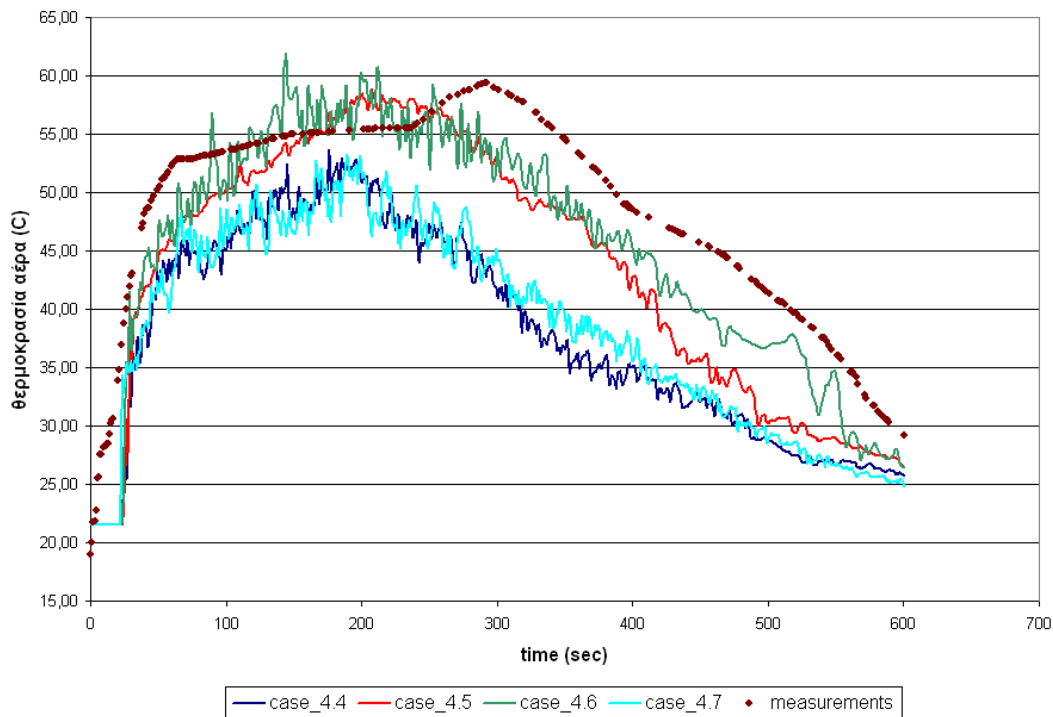
Εικόνα 86 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS και πειραματικών μετρήσεων για tunnel_4_test_9 σε απόσταση 140m κατάντι του σημείου πυρκαγιάς (cases_4.1/4.2/4.3)



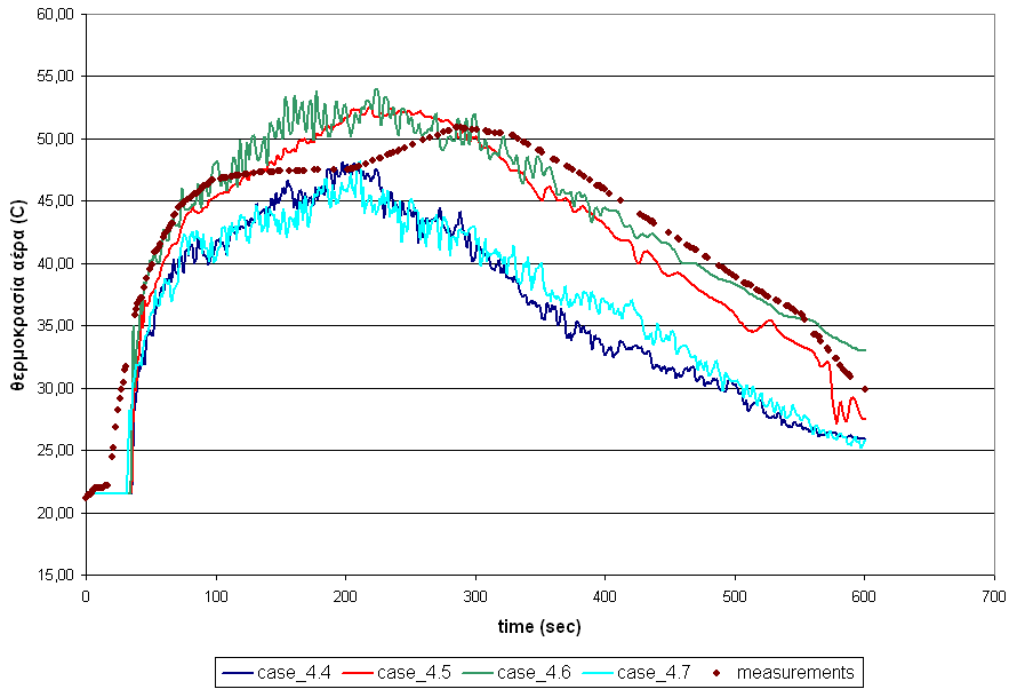
Εικόνα 87 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS και πειραματικών μετρήσεων για tunnel_4_test_9 σε απόσταση 160m κατάντι του σημείου πυρκαγιάς (cases_4.1/4.2/4.3)



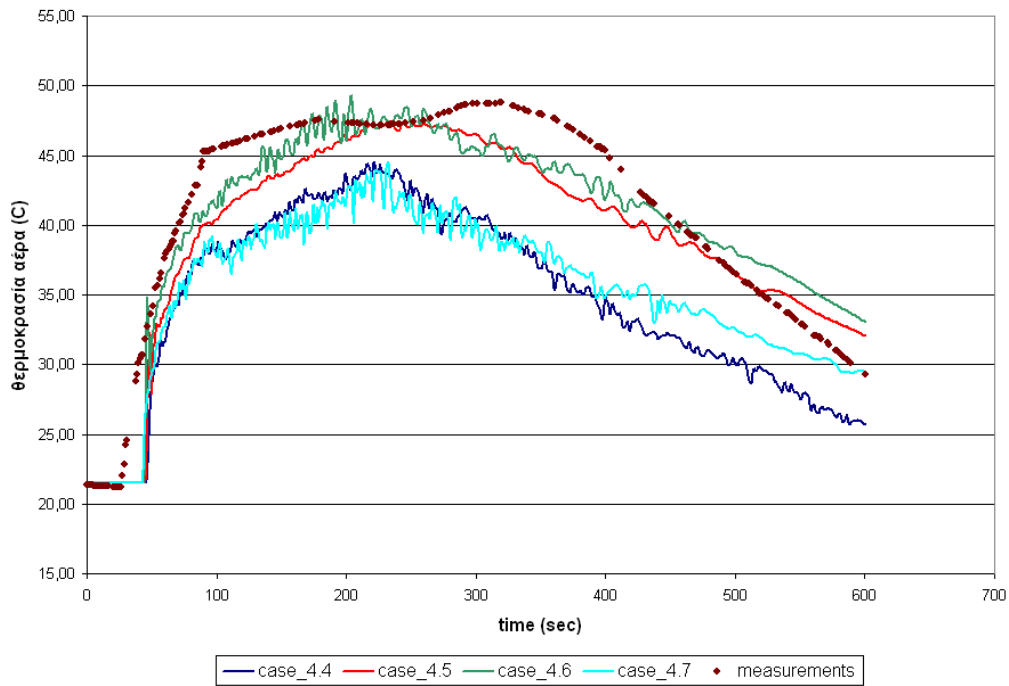
Εικόνα 88 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS και πειραματικών μετρήσεων για tunnel_4_test_9 σε απόσταση 20m κατόντι του σημείου πυρκαγιάς (cases_4.4/4.5/4.6/4.7)



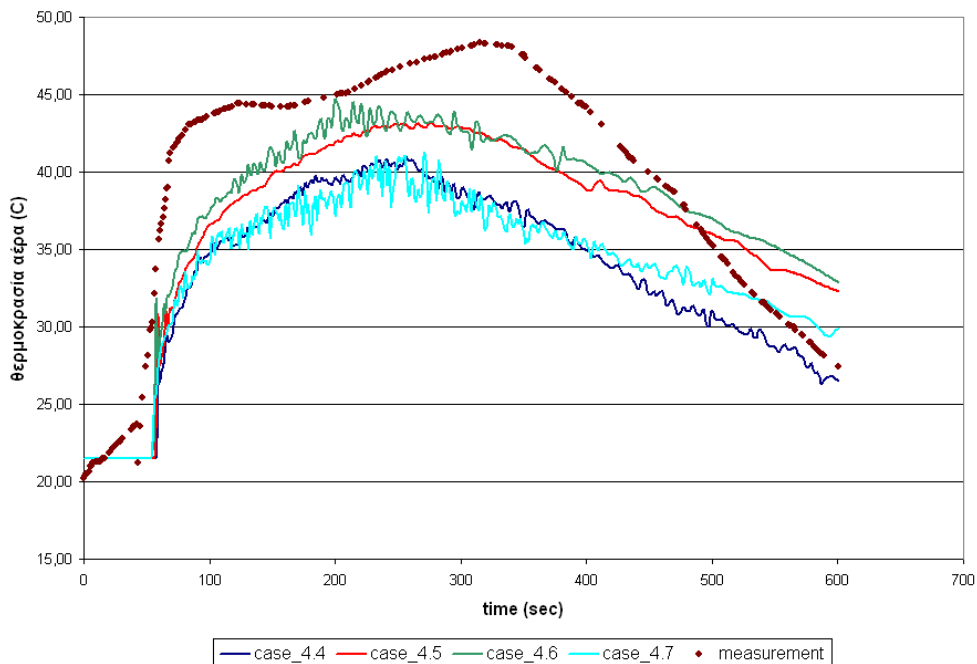
Εικόνα 89 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS και πειραματικών μετρήσεων για tunnel_4_test_9 σε απόσταση 40m κατόντι του σημείου πυρκαγιάς (cases_4.4/4.5/4.6/4.7)



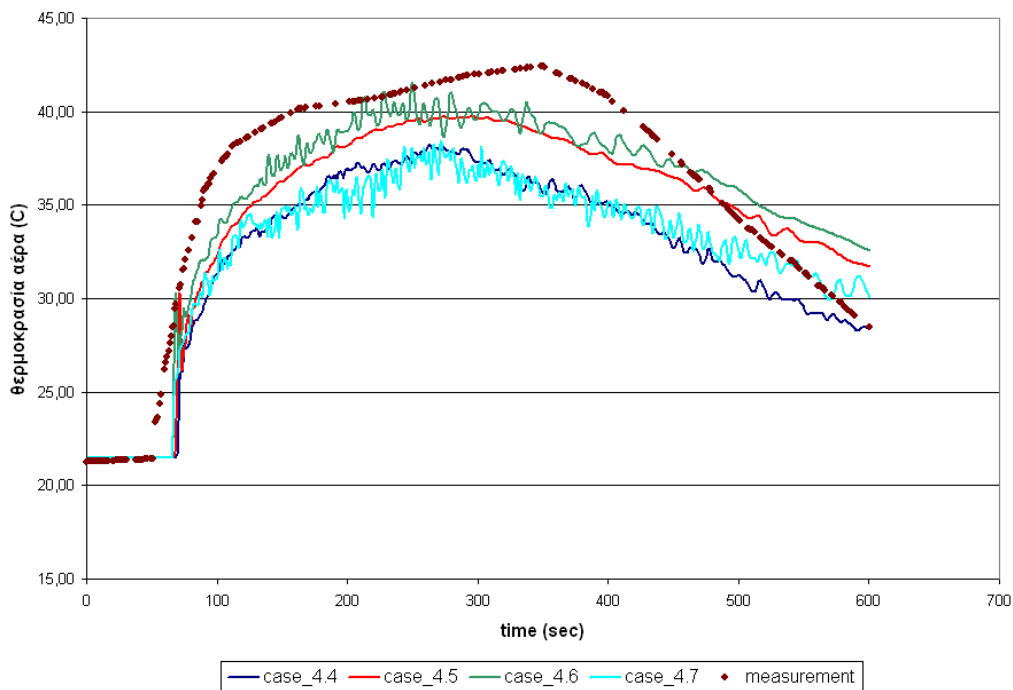
Εικόνα 90 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS και πειραματικών μετρήσεων για tunnel_4_test_9 σε απόσταση 60m κατάντι του σημείου πυρκαγιάς (cases_4.4/4.5/4.6/4.7)



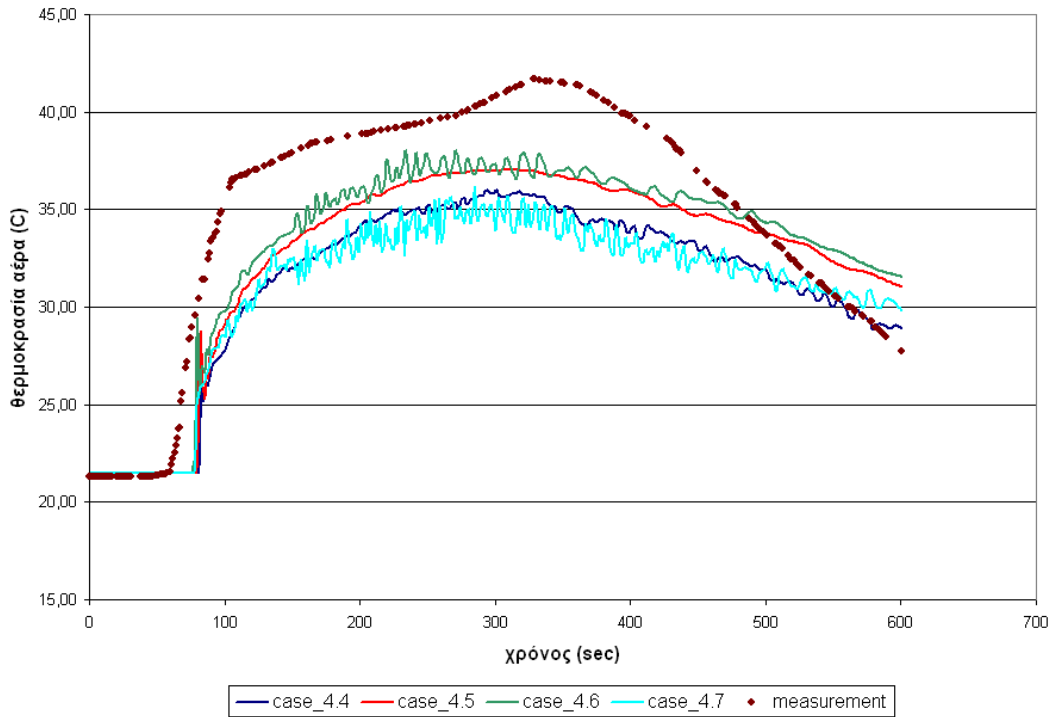
Εικόνα 91 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS και πειραματικών μετρήσεων για tunnel_4_test_9 σε απόσταση 80m κατάντι του σημείου πυρκαγιάς (cases_4.4/4.5/4.6/4.7)



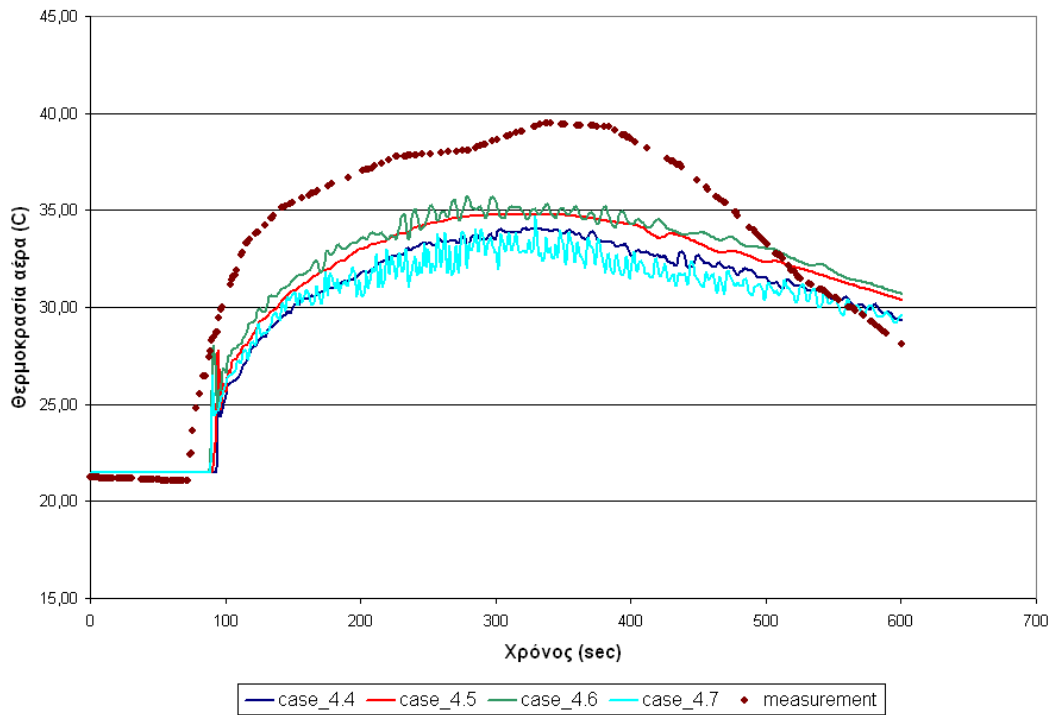
Εικόνα 92 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS και πειραματικών μετρήσεων για tunnel_4_test_9 σε απόσταση 100m κατάντι του σημείου πυρκαγιάς (cases_4.4/4.5/4.6/4.7)



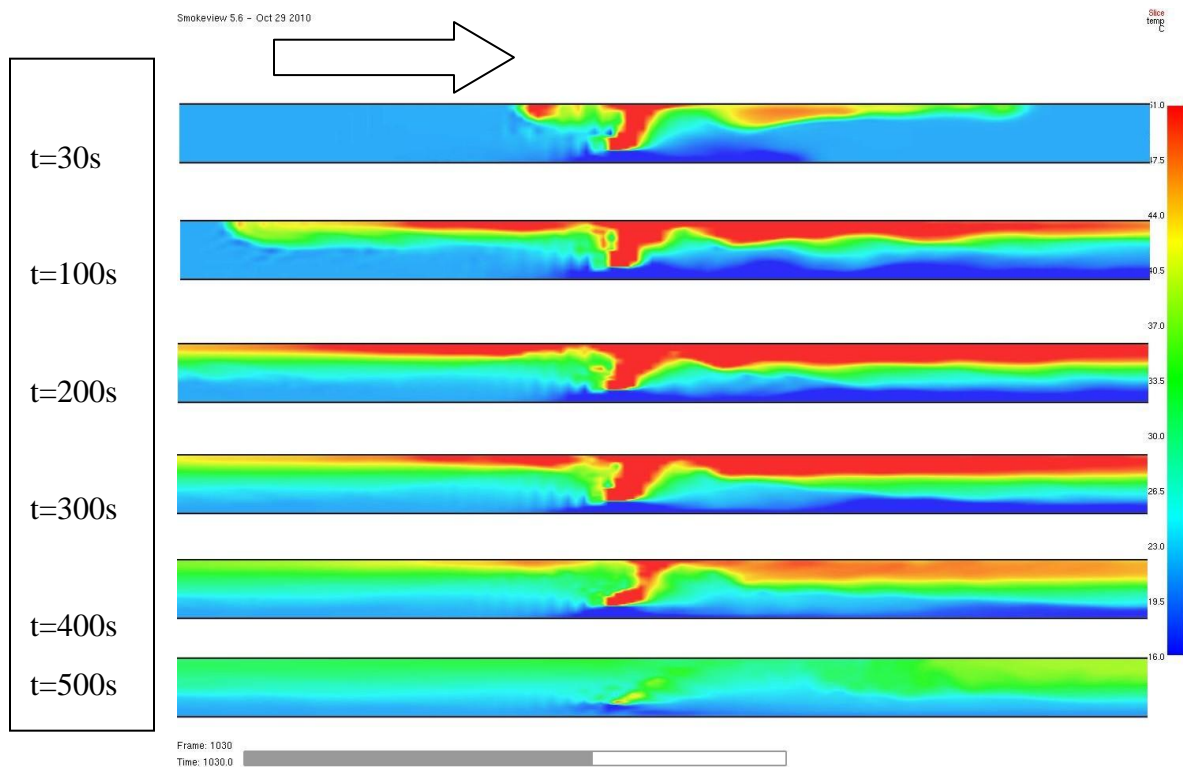
Εικόνα 93 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS και πειραματικών μετρήσεων για tunnel_4_test_9 σε απόσταση 120m κατάντι του σημείου πυρκαγιάς (cases_4.4/4.5/4.6/4.7)



Εικόνα 94 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS και πειραματικών μετρήσεων για tunnel_4_test_9 σε απόσταση 140m κατάντι του σημείου πυρκαγιάς (cases_4.4/4.5/4.6/4.7)



Εικόνα 95 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS και πειραματικών μετρήσεων για tunnel_4_test_9 σε απόσταση 160m κατάντι του σημείου πυρκαγιάς (cases_4.4/4.5/4.6/4.7)

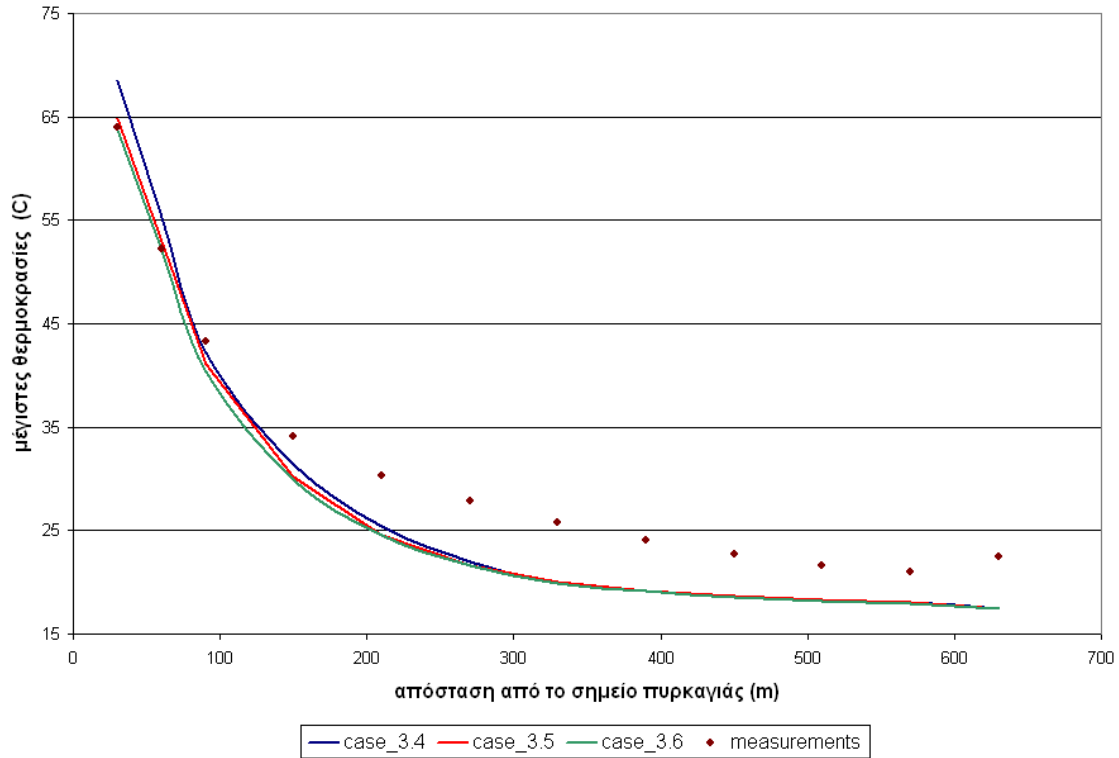


Εικόνα 96 - Απεικόνιση της χρονικής εξέλιξης της πυρκαγιάς για $t = 30/100/200/300/400/500$ sec μετά την έναυση της πυρκαγιάς για tunnel_4/test_9

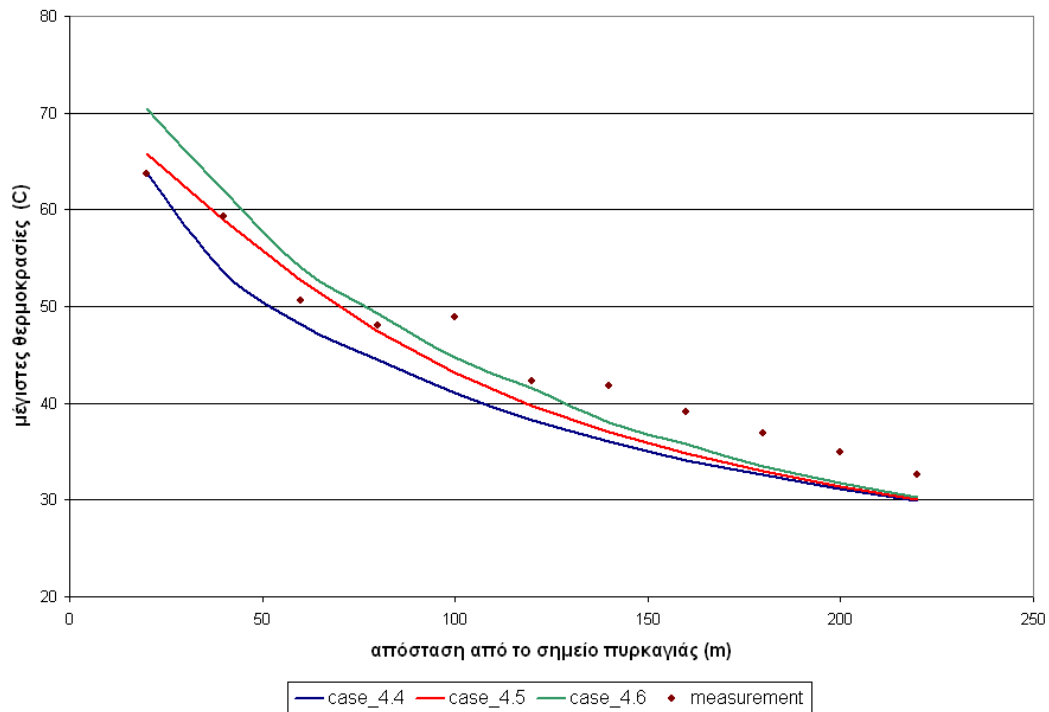
5.6 Ακρίβεια σχήματος - σύγκλιση

Για να αξιολογηθεί η ικανότητα της πρόλεξης του FDS συγκεντρώθηκαν οι μέγιστες τιμές της θερμοκρασίας κατά μήκος της σήραγγας και συγκρίθηκαν με τις μετρούμενες τιμές όπως αποτυπώνονται στην εργασία των L.Hu et al. [55]. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις Εικόνες 97 - 98 για τις περιπτώσεις tunnel_3/test_6 και tunnel_4/test_9.

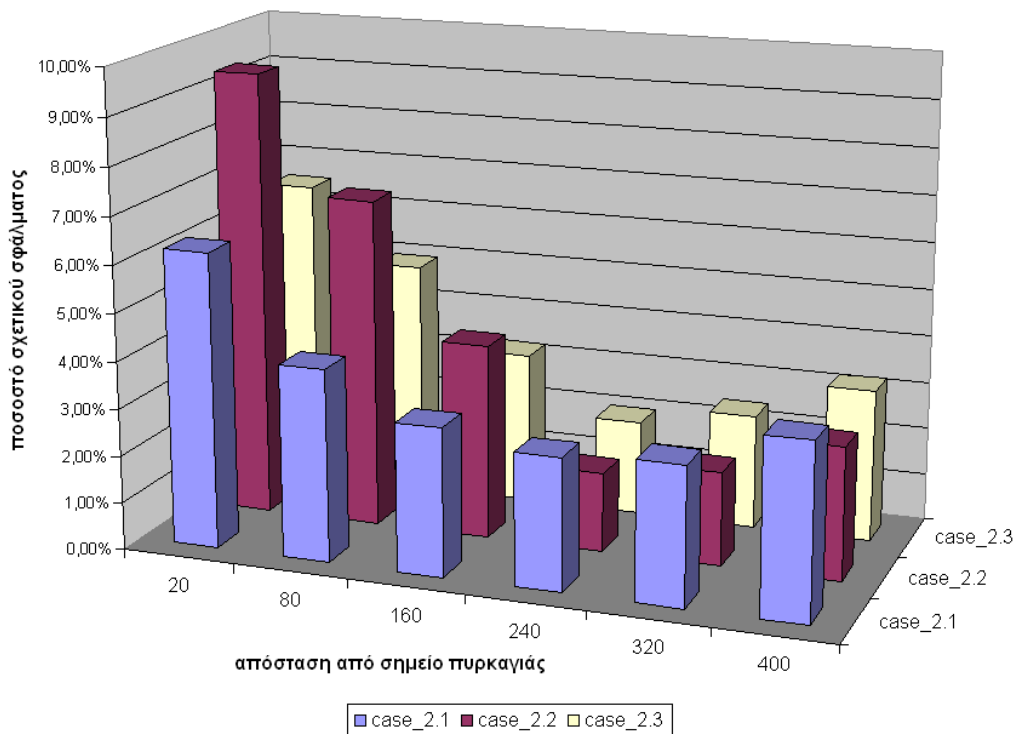
Στη συνέχεια δίδονται υπό μορφή διαγραμμάτων (Εικόνες 99 - 103) το σχετικό σφάλμα της ικανότητας πρόλεξης του FDS συναρτήσει της απόστασης από το σημείο πυρκαγιάς. Για την κατασκευή των διαγραμμάτων συγκεντρώθηκαν οι προλέξεις και οι διαθέσιμες πειραματικές μετρήσεις σε κάθε χρονική στιγμή καθ' όλη τη διάρκεια του φαινομένου και εξήχθησαν οι μέσοι όροι για συγκεκριμένες αποστάσεις από τη πυρκαγιά.



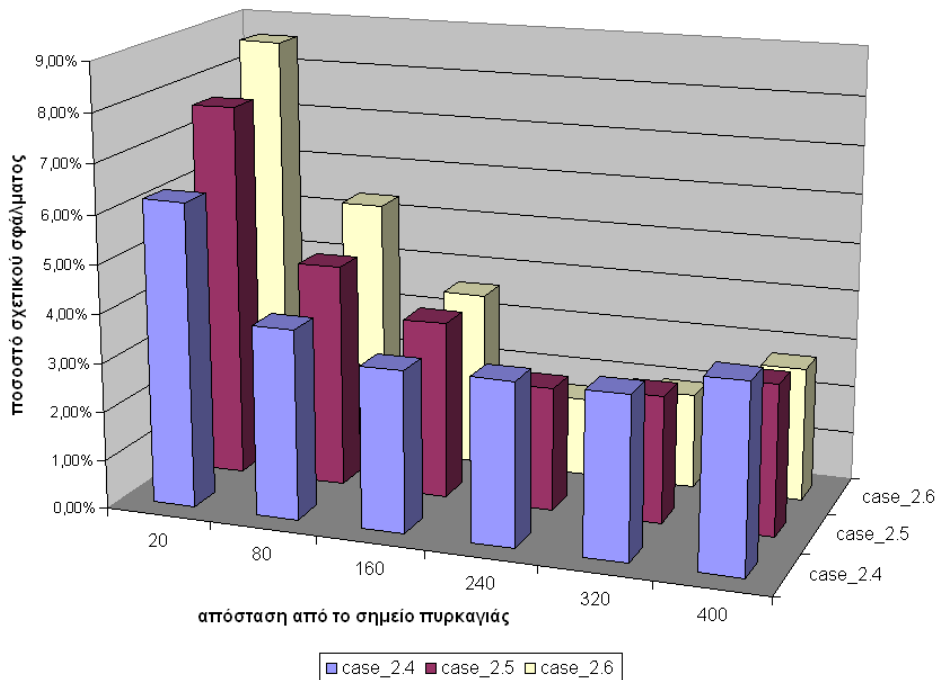
Εικόνα 97 – Διάγραμμα μέγιστων θερμοκρασιών – απόστασης κατά μήκος της σήραγγας για tunnel_3/test_6



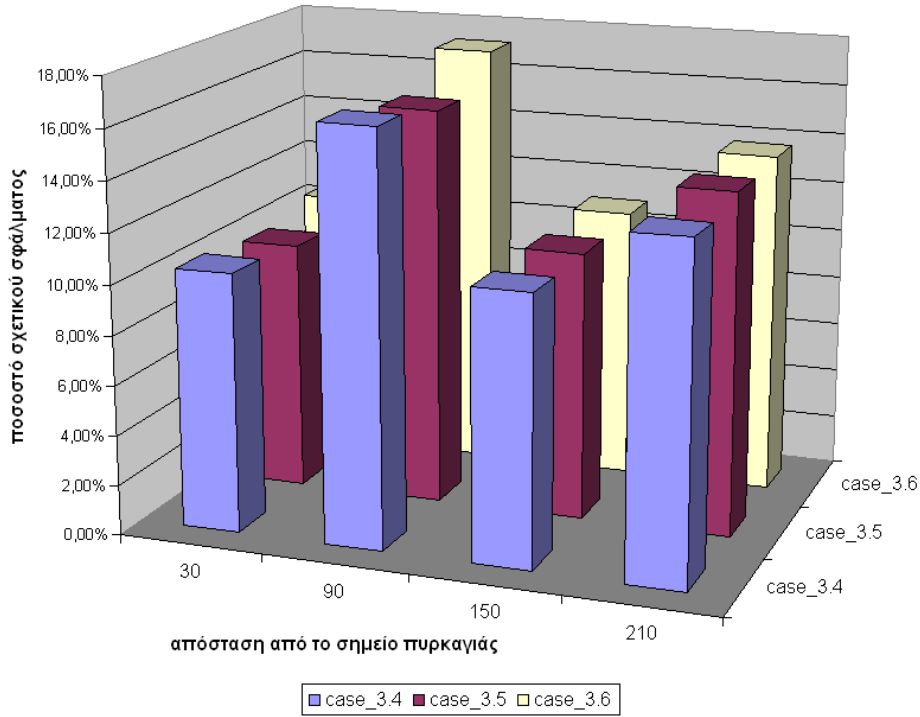
Εικόνα 98 - Διάγραμμα μέγιστων θερμοκρασιών – απόστασης κατά μήκος της σήραγγας για tunnel_4/test_9



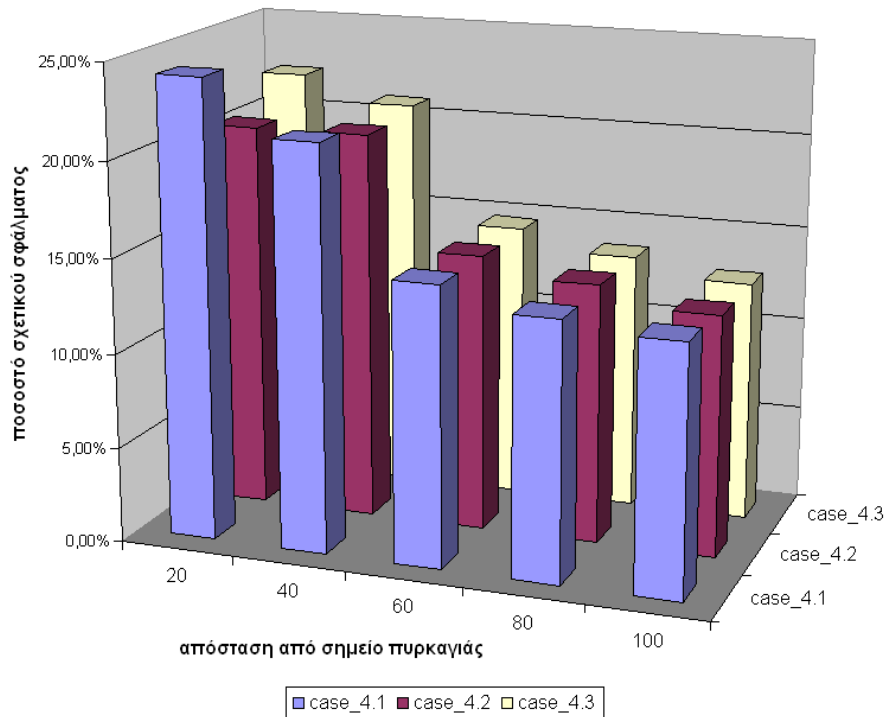
Εικόνα 99 - Διάγραμμα κατανομής σχετικού σφάλματος προλέξεων FDS συναρτήσει της απόστασης από το σημείο πυρκαγιάς για Tunnel_2/test_3 (case_2.1/2.2/2.3)



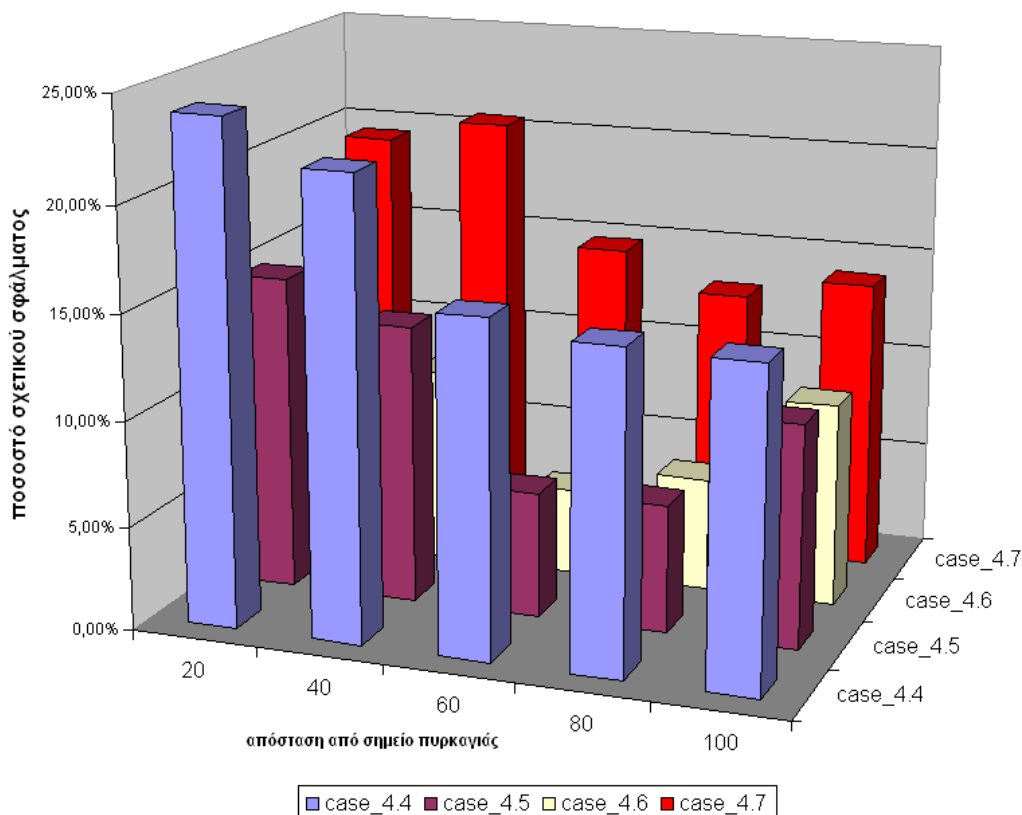
Εικόνα 100 - Διάγραμμα κατανομής σχετικού σφάλματος προλέξεων FDS συναρτήσει της απόστασης από το σημείο πυρκαγιάς για Tunnel_2/test_3 (case_2.4/2.5/2.6)



Εικόνα 101 - Διάγραμμα κατανομής σχετικού σφάλματος προλέξεων FDS συναρτήσει της απόστασης από το σημείο πυρκαγιάς για Tunnel_3/test_6 (case_3.4/3.5/3.6)



Εικόνα 102 - Διάγραμμα κατανομής σχετικού σφάλματος προλέξεων FDS συναρτήσει της απόστασης από το σημείο πυρκαγιάς για Tunnel_4/test_9 (case_4.1/4.2/4.3)



Εικόνα 103 - Διάγραμμα κατανομής σχετικού σφάλματος προλέξεων FDS συναρτήσει της απόστασης από το σημείο πυρκαγιάς για Tunnel_4/test_9 (case_4.4/4.5/4.6/4.7)

5.7 Συμπεράσματα - Σχολιασμός

Από την μορφή των παραπάνω διαγραμμάτων μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα αναφορικά με την ικανότητα πρόλεξης του μοντέλου, τα σημαντικότερα εκ των οποίων παρατίθενται στη συνέχεια :

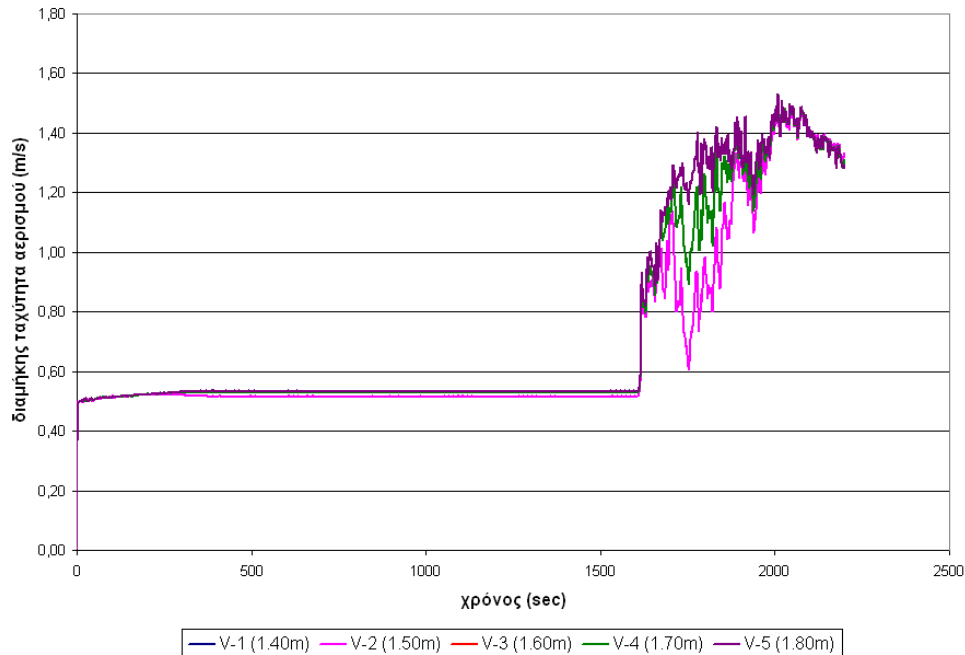
Tunnel 2/test 3

- Το λογισμικό FDS κατάφερε να προλέξει με επιτυχία την χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας τόσο σε πλήρες μήκος όσο και σε τμήμα της σήραγγας κοντά στο σημείο πυρκαγιάς για τα μήκη 20 – 80 – 160 – 240 – 320m. Αντίθετα για μεγαλύτερα μήκη 400 – 800m οι τιμές θερμοκρασίας που υπολογίστηκαν ήταν υποεκτιμημένες σε σχέση με τις πειραματικές μετρήσεις.

- Η καθ' ύψος (0.0 – 7.2m) κατάντι κατανομή της θερμοκρασίας κατά μήκος της σήραγγας ήταν σχετικά διαστρωματωμένη και δεν παρατηρήθηκε σημαντική ανάμιξη μεταξύ διαδοχικών στρωμάτων καθ' όλη τη χρονική εξέλιξη του φαινομένου (Εικόνα - 59)
- Δεν παρατηρήθηκε σημαντικό τμήμα αναστροφής του καπνού (backlayering) ανάντι του σημείου πυρκαγιάς (Εικόνα - 59)
- Υπάρχει ικανοποιητική ακρίβεια καθώς η απόκλιση των προλέξεων από τις πειραματικές μετρήσεις κυμάνθηκε κατά μέγιστη τιμή εντός εύρους 2.50 – 9.50% (βλέπε Εικόνα - 99) για πλήρες μήκος και εντός εύρους 1.60 – 8.50% (βλέπε Εικόνα - 100) για τμήμα 200m. Οι παραπάνω αποκλίσεις βρίσκονται εντός του συνήθους περιθωρίου $\pm 20\%$ που προδιαγράφεται από τον Οδηγό Χρήσης και Πιστοποίησης του λογισμικού FDS.
- Τυχόν αποκλίσεις πιθανότατα να οφείλονται στην υστέρηση της ταχύτητας αερισμού καθώς μετά την έναρξη της πυρκαγιάς παρατηρήθηκε έντονη διακύμανση καθώς τα στρώματα του αέρα επιβραδύνονταν από την παρουσία καπνού.

Tunnel 3/test 6

- Το λογισμικό FDS κατάφερε να προλέξει με επιτυχία την χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας σε τμήμα της σήραγγας κοντά στο σημείο πυρκαγιάς για τα μήκη 30 – 90m. Αντίθετα για μεγαλύτερα μήκη 150 – 210m οι τιμές θερμοκρασίας που υπολογίστηκαν ήταν υποεκτιμημένες σε σχέση με τις πειραματικές μετρήσεις.
- Η καθ' ύψος (0.0 – 7.2m) κατάντι κατανομή της θερμοκρασίας κατά μήκος της σήραγγας ήταν σχετικά διαστρωματωμένη και δεν παρατηρήθηκε σημαντική ανάμιξη μεταξύ διαδοχικών στρωμάτων καθ' όλη τη χρονική εξέλιξη του φαινομένου (Εικόνα - 79)
- Παρατηρήθηκε σημαντικό τμήμα αναστροφής του καπνού (backlayering) ανάντι του σημείου πυρκαγιάς (Εικόνα - 79) το πάχος του οποίου είναι συγκρίσιμο με το κατάντι τμήμα.
- Υπάρχει ικανοποιητική ακρίβεια καθώς η απόκλιση των προλέξεων από τις πειραματικές μετρήσεις κυμάνθηκε κατά μέγιστη τιμή εντός εύρους 10.00 – 18.00% (βλέπε Εικόνα - 101) για τμήμα 200m.
- Τυχόν αποκλίσεις πιθανότατα να οφείλονται στην υστέρηση της ταχύτητας αερισμού καθώς μετά την έναρξη της πυρκαγιάς παρατηρήθηκε έντονη διακύμανση καθώς τα στρώματα του αέρα επιβραδύνονταν από την παρουσία καπνού (Εικόνα - 104).

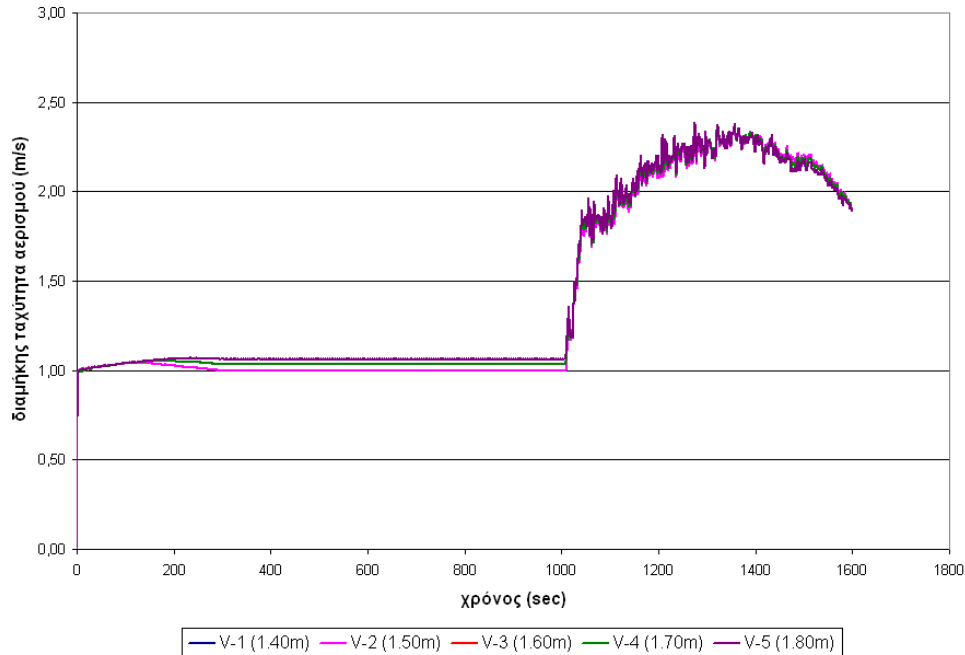


Εικόνα 104 – Χρονική εξέλιξη διαμήκους ταχύτητας αερισμού για την περίπτωση tunnel_3/test_6

Tunnel 4/test 9

- Το λογισμικό FDS κατάφερε να προλέξει με επιτυχία την χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας τόσο σε πλήρες μήκος (1036.80m) όσο και σε τμήμα της σήραγγας κοντά στο σημείο πυρκαγιάς για τα μήκη 20 – 40 – 60 – 80m. Αντίθετα για μεγαλύτερα μήκη 100 – 120 – 140 – 160m οι τιμές θερμοκρασίας που υπολογίστηκαν ήταν υποεκτιμημένες σε σχέση με τις πειραματικές μετρήσεις.
- Η καθ' ύψος (0.0 – 7.2m) κατάντι κατανομή της θερμοκρασίας κατά μήκος της σήραγγας ήταν σχετικά διαστρωματωμένη και δεν παρατηρήθηκε σημαντική ανάμιξη μεταξύ διαδοχικών στρωμάτων καθ' όλη τη χρονική εξέλιξη του φαινομένου (Εικόνα - 96)
- Παρατηρήθηκε σημαντικό τμήμα αναστροφής του καπνού (backlayering) ανάντι του σημείου πυρκαγιάς (Εικόνα - 96) το πάχος του οποίου είναι συγκρίσιμο με το κατάντι τμήμα (όμως σημαντικά μικρότερο από την περίπτωση του tunnel_3/test_6)
- Υπάρχει ικανοποιητική ακρίβεια καθώς η απόκλιση των προλέξεων από τις πειραματικές μετρήσεις κυμάνθηκε κατά μέγιστη τιμή εντός εύρους 12.00 – 24.00% (βλέπε Εικόνα - 102) για πλήρες μήκος και εντός εύρους 6.00 – 24.00% (βλέπε Εικόνα - 103) για τμήμα 200m.

- Τυχόν αποκλίσεις πιθανότατα να οφείλονται στην υστέρηση της ταχύτητας αερισμού καθώς μετά την έναρξη της πυρκαγιάς παρατηρήθηκε έντονη διακύμανση καθώς τα στρώματα του αέρα επιβραδύνονταν από την παρουσία καπνού (Εικόνα - 105).



Εικόνα 105 - Χρονική εξέλιξη διαμήκουσ ταχύτητας αερισμού για την περίπτωση tunnel_9/test_12

Γενικές Παρατηρήσεις

- Το κρίσιμο μέγεθος πλέγματος που επηρέασε τη μορφή της καμπύλης ήταν κατά τον άξονα z. Διαπιστώθηκε ότι τα 36 πλεγματικά σημεία με μέγεθος κελιού 0.20m έδωσαν αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα. Αντίθετα οι διαστάσεις στους άλλους δυο άξονες (x,y) δεν επηρέασαν σημαντικά τη μορφή της καμπύλης.
- Για ταχύτητα αερισμού 1.0 m/s (tunnel_4/test_9) επιτεύχθηκε σχετικά ομοιογενές θερμικό στρώμα και η κατανομή της ταχύτητας ήταν ομοιόμορφη κατά όλη τη διατομή (βλέπε Εικόνα - 96). Αντίθετα για ταχύτητα 0.50 m/s (tunnel_3/test_6) και θεωρώντας τα υπόλοιπα μεγέθη σταθερά η κατανομή της ταχύτητας κατά ύψος της διατομής παρουσίασε έντονες διακυμάνσεις (βλέπε Εικόνα - 79).
- Οι προσομοιώσεις σε μικρότερα μήκη σήραγγας (200m) έδωσαν βελτιωμένα αποτελέσματα αναφορικά με την ακρίβεια καθώς υπήρχε καλύτερος έλεγχος της οριακής συνθήκης της διαμήκουσ ταχύτητας στο στόμιο εισόδου και μικρότερη αβεβαιότητα γύρω από την διακυμαινόμενη τιμή της μετά την έναυση της πυρκαγιάς.

6

6. Προσομοίωση FDS σε σήραγγα του ελλαδικού χώρου

Κατόπιν των εργασιών πιστοποίησης του λογισμικού FDS σε υπό κλίμακα & πλήρεις σήραγγες με δοκιμαστικές πυρκαγιές με ισχύ της τάξης του 1-2 MW που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, γίνεται σαφές ότι το συγκεκριμένο λογισμικό μπορεί να θεωρηθεί ως ένα αξιόπιστο εργαλείο για την μελέτη διάδοσης φωτιάς στο εσωτερικό σηράγγων λαμβάνοντας υπόψη ένα εύλογο εύρος υπολογιστικού σφάλματος.

Εκτός από τις δοκιμαστικές φωτιές μικρής ισχύος που διενεργούνται κατά κύριο λόγο για την δοκιμή αποδοχής των εγκατεστημένων συστημάτων ενεργητικής πυροπροστασίας, οι περισσότερες καταστροφικές πυρκαγιές έχουν ισχύ αρκετών MW, όπως διαπιστώθηκε από την ιστορική αναδρομή του κεφαλαίου 2 και την προτυποποίηση των πυρκαγιών.

Στη συνέχεια θα γίνει χρήση του FDS για την προσομοίωση της χρονικής εξέλιξης της πυρκαγιάς στο εσωτερικό τυπικής οδικής σήραγγας της Εγνατίας Οδού.

6.1 Η Εγνατία Οδός

Η Εγνατία Οδός είναι ο μεγαλύτερος και πιο σύγχρονος αυτοκινητόδρομος της χώρας με μήκος 670 km περίπου. Εκτείνεται από το λιμάνι της Ηγουμενίτσας στην Ήπειρο έως τον συνοριακό σταθμό των Κήπων στον Ν. Έβρου. Διασχίζει έντεκα (11) πρωτεύουσες νομών στην Β. Ελλάδα, πολλές μικρότερες πόλεις και οικισμούς. Ο διεθνής κωδικός είναι Α2 και αποτελεί τμήμα του διευρωπαϊκού άξονα Ε90 (Πορτογαλία – Ισπανία – Ιταλία – Ελλάδα – Τουρκία). Αποτελείται από δίδυμους ξεχωριστούς κλάδους με δυο κύριες λωρίδες και λωρίδα έκτακτης ανάγκης (ΛΕΑ) ανά κατεύθυνση συνολικού πλάτους 22.0m. Στο κέντρο υπάρχει διαχωριστική νησίδα τύπου New Jersey. Η μέγιστη

επιτρεπόμενη ταχύτητα είναι τα 130 km/h στην ανοικτή οδοποιία που περιορίζεται ανά τμήματα εντός των σηράγγων.

Διασταυρώνεται με τους υπόλοιπους κύριους οδικούς άξονες στην Ελλάδα (ΠΑΘΕ) και με τους μεθοριακούς σταθμούς μέσω του δικτύου κάθετων αξόνων. Σύμφωνα με το χρονοδιάγραμμα του έργου έχει ολοκληρωθεί η κύρια διαδρομή και μεγάλο μέρος των κάθετων αξόνων. Σε ορισμένα τμήματα των κάθετων αξόνων κυρίως στην Αν. και Δυτ. Μακεδονία βρίσκεται σε εξέλιξη η παράδοση επιμέρους τμημάτων (Εικόνα – 106). Η πρόοδος και επιπτώσεις του έργου στην τοπική κοινωνία, οικονομία και περιβάλλον αποτυπώνεται από την ανεξάρτητη Υπηρεσία του Παρατηρητηρίου της Εγνατίας Οδού [16]



Εικόνα 106- Χάρτης Εγνατίας Οδού και κάθετων αξόνων

6.2 Οι σήραγγες της Εγνατίας Οδού

Εξαιτίας του έντονου γεωλογικού ανάγλυφου, των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών χλωρίδας και πανίδας σε πολλά οικοσυστήματα της Ελλάδας, της υψηλής αισθητικής αξίας δάση κυρίως στην οροσειρά της Πίνδου και την αυστηρή απαίτηση τήρησης των περιβαλλοντικών όρων, απαιτήθηκε η κατασκευή 73 οδικών σηράγγων κατά μήκος του δρόμου με συνολικό μήκος 50 km που αντιστοιχεί περίπου στο 7% του συνολικού μήκους με κόστος όσο το 30% του συνόλου του έργου.

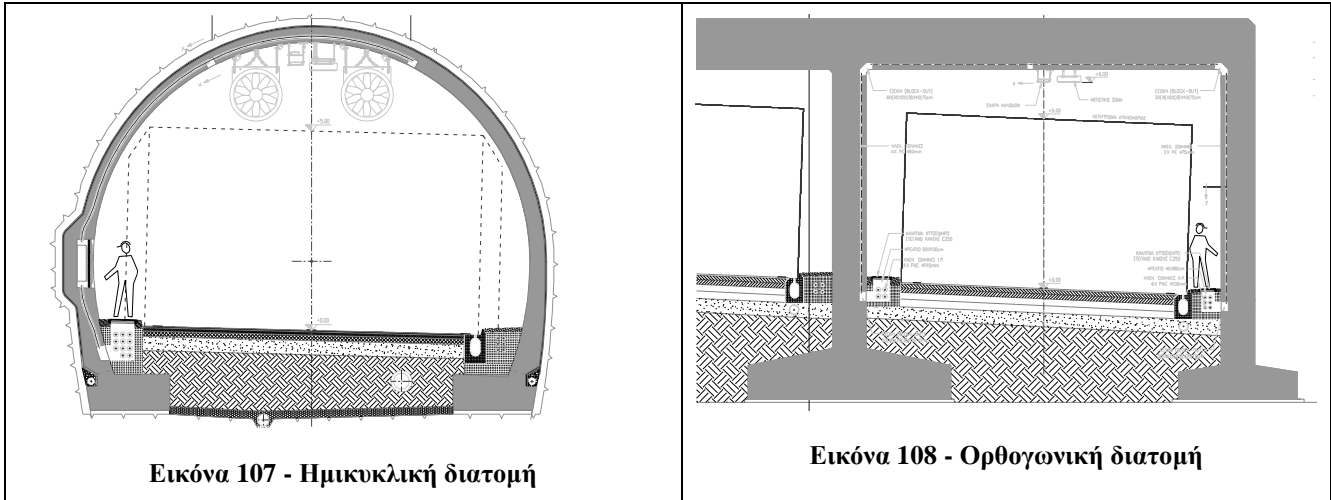
Οι περισσότερες οδικές σήραγγες που κατασκευάστηκαν με την μέθοδο της διάτρησης και ανατίναξης (drill & blast) βρίσκονται στην περιοχή της Δ. Μακεδονίας και Ηπείρου. Οι σημαντικότερες από αυτές είναι :

- Σήραγγα Δρίσκου (4600m / κλάδο)
- Σήραγγα Μετσόβου (3500m / κλάδο)
- Σήραγγα Δωδώνης (3360m / κλάδο)
- Σήραγγα Καστανιάς (Σ10) (2225m / κλάδο)
- Σήραγγα Ανήλιου (2100m / κλάδο)

6.3 Γεωμετρία και εξοπλισμός σήραγγας

Ο γεωμετρικός σχεδιασμός των σηράγγων στον ελληνικό χώρο σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς [16 - 18] εξαρτάται από τον εξυπηρετούμενο κυκλοφοριακό φόρτο, το είδος της οδού (εντός / εκτός πόλης), τα γεωλογικά χαρακτηριστικά (κλίση, ανάγλυφο, υπερκείμενες στρώσεις) της περιοχής μελέτης. Οι τυπικότερες διατομές που απαντώνται στις περισσότερες σήραγγες του ελλαδικού χώρου είναι η ημικυκλική (Εικόνα - 107) και η ορθογωνική (Εικόνα - 108). Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής σε σήραγγα της Εγνατίας Οδού είναι :

- Πλάτος οδοστρώματος : 8.50 m με 2 x 3.75m λωρίδες κυκλοφορίας
- Πλάτος διατομής χρήσης : 10.50m
- Ύψος περιτυπώματος οχήματος : 5.00m
- Ακτίνα εσωραχίου : 5.50m



Η σήραγγα που χρησιμοποιήθηκε για προσομοίωση πυρκαγιάς είναι η Σήραγγα Βενέτικου στη περιοχή του Ν. Γρεβενών. Ανήκει στο υποτμήμα 4.1.3s της Εγνατίας Οδού «Παναγιάς – Γρεβενών». Αποτελείται από δίδυμους κλάδους μονής κατεύθυνσης (Μέτσοβο – Γρεβενά) σε προσανατολισμό Ανατολής – Δύσης. Η διατομή του κάθε κλάδου είναι τυπική σχεδόν ημικυκλική με ακτίνα 5.40m και συνολικό ύψος 7.2 m. Το μήκος θεωρήθηκε κατά προσέγγιση ίσο με 702m για κάθε κλάδο.

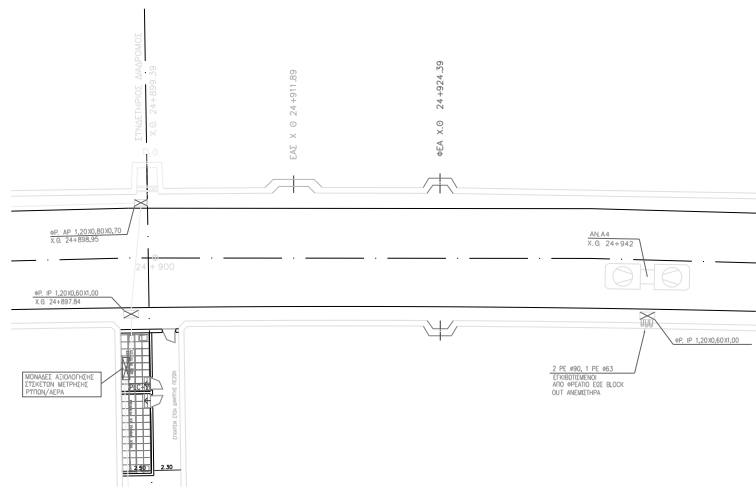
Ο μηχανικός αερισμός επιτυγχάνεται με τη βοήθεια αξονικών ανεμιστήρων ώσης που είναι τοποθετημένοι στην οροφή της σήραγγας επάνω από το περιτύπωμα κυκλοφορίας. Για τις ανάγκες της μελέτης προσομοιώθηκε μόνο ο ένας κλάδος που περιλαμβάνει συνολικά έξι (6) ανεμιστήρες. Οι διαδοχικές αποστάσεις τοποθέτησης από το ελεύθερο στόμιο δίδονται στον Πίνακα 6.1:

Πίνακας 6.1 – Θέσεις εγκατάστασης ανεμιστήρων ώσης

AN-1	AN-2	AN-3	AN-4	AN-5	AN-6
130m	220m	310m	400m	490m	580m

Η πυρκαγιά, θεωρείται ότι ξεσπά στο κέντρο της σήραγγας (350m), ώστε να αποτελεί και την δυσμενέστερη περίπτωση ως προς τον χρόνο εκκένωσης προς τις εξόδους διαφυγής δηλαδή το ανοικτό στόμιο και την συνδετήρια σήραγγα (βλέπε Εικόνα 109). Η διαμήκης ταχύτητα αερισμού που επιτυγχάνεται μέσω των ανεμιστήρων ήταν της τάξης των 3.0 m/s σύμφωνα με τις οδηγίες

σύνταξης μελετών Εγνατίας Οδού (ΟΣΜΕΟ) και τις συστάσεις σχεδιασμού της Διεθνούς Ένωσης Οδοποιίας (PIARC).



Εικόνα 109 - Λεπτομέρεια τοποθέτησης ανεμιστήρα ώσης κοντά σε συνδετήρια σήραγγα

Σύμφωνα με το σενάριο αερισμού σε έκτακτες περιπτώσεις, οι ανεμιστήρες ενεργοποιούνται με αρχική υστέρηση 30 sec ως νεκρό χρόνο αναγνώρισης του συμβάντος και εν συνεχεία διαδοχικά ανά 5 sec, ενεργοποιώντας αρχικά αυτόν που βρίσκεται πιο απομακρυσμένα προς το ελεύθερο άκρο, με σκοπό να επιτευχθεί μονοδιάστατη κατεύθυνση ροής αέρα στο εσωτερικό της. Οι αντίστοιχοι χρόνοι ενεργοποίησης δίδονται στον Πίνακα 6.2:

Πίνακας 6.2 – Χρόνοι ενεργοποίησης ανεμιστήρων ώσης

AN-1	AN-2	AN-3	AN-4	AN-5	AN-6
30sec	40sec	50sec	55sec	45sec	35sec

Τα σενάρια εκτελέστηκαν σε τυπικό H/Y Pentium i7 με 4GB RAM για χρονικό διάστημα σύμφωνα με τον Πίνακα – 6.3. Ο χρόνος εκτέλεσης κυμαινόταν από 30-150h ανάλογα με την πυκνότητα του πλέγματος.

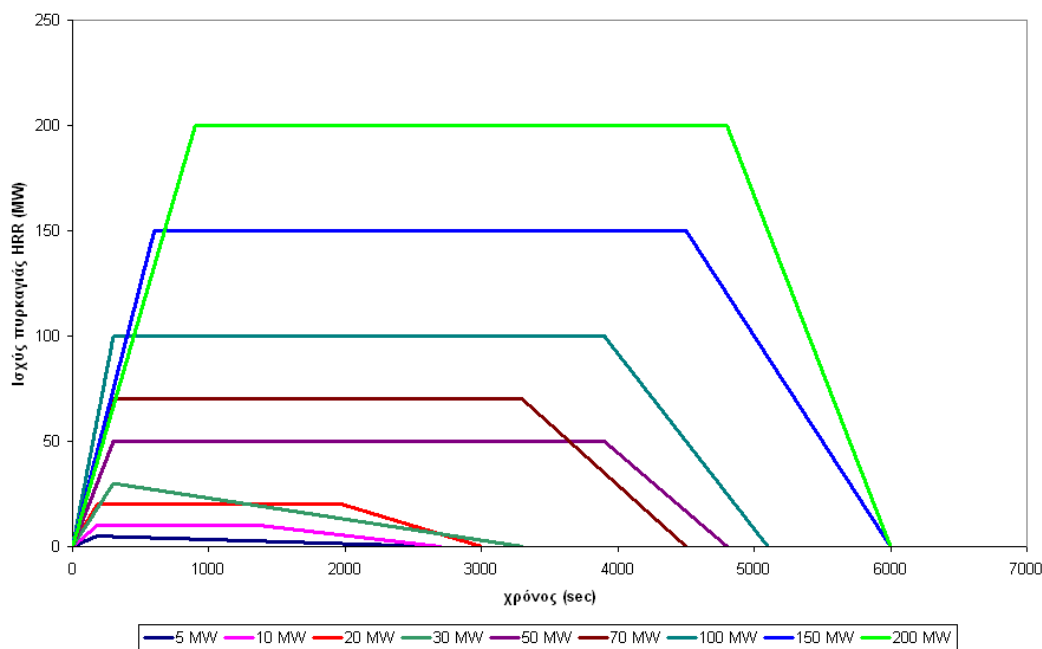
6.4 Σενάρια πυρκαγιάς

Τα βασικά μεγέθη που μελετήθηκαν ανάλογα με την ισχύ της πυρκαγιάς ήταν η κατανομή της θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης καπνού και CO κατά μήκος της σήραγγας. Η έκταση της πυρκαγιάς (fire spot) θεωρήθηκε ίση με 20m² που αντιστοιχεί περίπου στην καλυπτόμενη επιφάνεια οδοστρώματος από 2 ΙΧ ή ένα φορτηγό για μεγαλύτερη ισχύ, σύμφωνα με τα σενάρια του γραμμικού μοντέλου ανάπτυξης, σύμφωνα με τον πίνακα και την Εικόνα - 110 με βάση το γραμμικό πρότυπο εξέλιξης.

Πίνακας 6.3 – Βασικά σενάρια χρονικής εξέλιξης πυρκαγιάς

Μήκος [m]	Κλίση	Σενάρια αερισμού	Διαστάσεις πυρκαγιάς [m ²]	Ισχύς πυρκαγιάς [MW]	Συνολικός χρόνος [sec]	Εξωτερική θερμοκρασία [°C]
700.0	-	Case_A	20.00	30.0	3300	20.0
		Case_B	20.00	50.0	4800	20.0
		Case_C	20.00	100.0	5100	20.0

Διάγραμμα χρονικής εξέλιξης πυρκαγιάς με βάση το γραμμικό μοντέλο ανάπτυξης



Εικόνα 110 - Γραμμικά μοντέλα εξέλιξης πυρκαγιάς [5 - 200 MW]

Από τη μορφή της οικογένειας καμπυλών παρατηρείται υψηλότερη κλίση του ρυθμού έκλυσης για μεγάλες ισχύος (> 50 MW) πυρκαγιάς, που απαντάται σε καύση υδρογονανθράκων. Με άλλα λόγια παρά το γεγονός ότι σε φωτιές βαρέων οχημάτων (HGV) είναι δυνατόν να περιλαμβάνουν αρκετούς τύπους καύσιμης ύλης (πλαστικό, ξυλεία, υλικά συσκευασίας), ο κύριος ρυθμός έκλυσης θερμότητας προέρχεται από το ίδιο το καύσιμο που απαντάται σε μεγάλες ποσότητες.

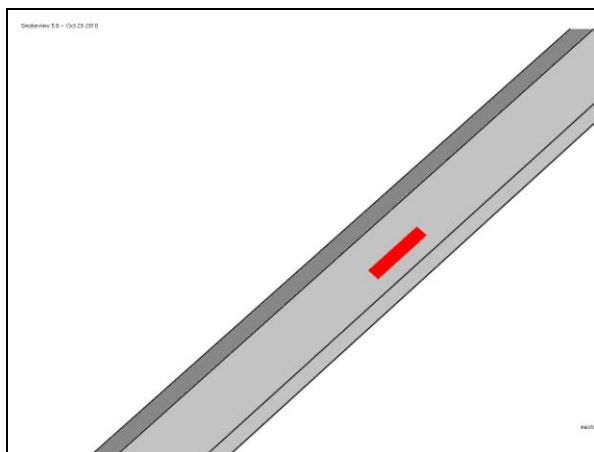
6.5 Διακριτοποίηση – υπολογιστική διάταξη

Η γεωμετρία της κάθε σήραγγας μαζί με την αντίστοιχη πειραματική διάταξη που περιγράφηκε παραπάνω, εισήχθηκε μέσω αρχείου εισόδου στο λογισμικό FDS.

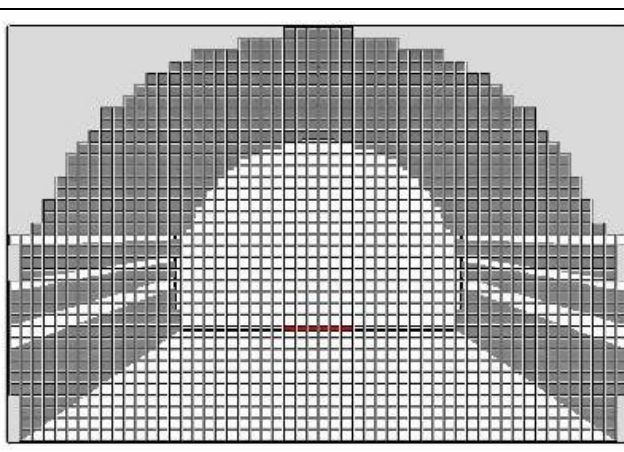
Τα βασικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν το τσιμέντο ως υλικό επικάλυψης για την επένδυση του θόλου της σήραγγας και χάλυβας για τα κελύφη και τους ηχοαπορροφητήρων των ανεμιστήρων ώσης, σύμφωνα με τις ιδιότητες που αναφέρθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια πιστοποίησης.

Για τον υπολογισμό της κατανομής θερμοκρασίας και συγκέντρωσης τοποθετήθηκαν κατά τον διαμήκη άξονα συμμετρίας στο επίπεδο της οροφής και του επιπέδου κυκλοφορίας εικονικά «θερμοστοιχεία» και «καταγραφικά» των μεταβλητών σύμφωνα με την εντολή DEVC.

Οι οριακές συνθήκες στα στόμια εισόδου και εξόδου περιελάμβαναν εισαγωγή της διαμήκουσ ταχύτητας (3.0 m/s) και ελεύθερη ροή αέρα αντίστοιχα σε κανονικές συνθήκες ($T_{amb} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 1 atm). Η τυπική γεωμετρία και η θέση των ανεμιστήρων διαμήκουσ αερισμού δίδεται στις εικόνες 111 - 112 :



Εικόνα 111 – Θέση πυρκαγιάς κατά μήκος της σήραγγας



Εικόνα 112 – Τυπικός κάρναβος διακριτοποίησης της διατομής

6.6 Παραμετρική μελέτη

Για να εξετασθεί η ικανότητα πρόλεξης του FDS εκτελέστηκε παραμετρική ανάλυση για κάθε σενάριο αερισμού ανάλογα με την εκάστοτε ισχύ πυρκαγιάς (30 – 50 – 100 MW). Σκοπός της ανάλυσης ήταν η ανεξαρτησία των αποτελεσμάτων από το μέγεθος του πλέγματος και των λοιπών υπολογιστικών παραμέτρων δεδομένης της απουσίας των πειραματικών μετρήσεων.

Από την ανάλυση που προηγήθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια διαπιστώθηκε ότι τα κρίσιμα μεγέθη κατά την υπολογιστική ανάλυση στην υπό-κλίμακα σήραγγα ήταν η καμπύλης ανάπτυξης, το κλάσμα ακτινοβολίας και το μέγεθος πλέγματος. Τα προηγούμενα αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν για την παραμετρική μελέτη του παρόντος μιας και ορίστηκαν γραμμική καμπύλη ανάπτυξης (HRR), σταθερό ποσοστό εκπομπής CO = 0.037 kg/kg καυσίμου καθώς και σταθερό ποσοστό ισχύος μέσω ακτινοβολίας = 0.30. Συνεπώς η παράμετρος που μεταβλήθηκε ήταν το μέγεθος του πλέγματος, σύμφωνα με την κρίσιμη διάμετρο πυρκαγιάς όπως υπολογίστηκε από την εξ. 2.27 του κεφαλαίου – 2 και δίδονται τους Πίνακες 6.4 – 6.6

Πίνακας 6.4 – Παραμετρική ανάλυση χρονικής εξέλιξης πυρκαγιάς ισχύος 30MW

a/a case	Καμπύλη ανάπτυξης HRR	Κλάσμα ακτινοβολίας	Τμήμα σήραγγας	Μέγεθος πλέγματος
Case – 1	γραμμική	0.30	702m	702 x 27 x 36
Case – 2	γραμμική	0.30	702m	702 x 22 x 36
Case – 3	γραμμική	0.30	702m	702 x 44 x 28
Case – 4	γραμμική	0.30	702m	225 x 54 x 36 (x8)
Case – 5	γραμμική	0.30	702m	225 x 27 x 36 (x8)
Case – 6	γραμμική	0.30	702m	180 x 54 x 36 (x8)
Case – 7	γραμμική	0.30	702m	351 x 22 x 14
Case – 8	γραμμική	0.30	702m	351 x 11 x 7
Case – 9	γραμμική	0.30	702m	1404 x 22 x 14
Case – 10	γραμμική	0.30	200m	200 x 27 x 36
Case – 11	γραμμική	0.30	200m	200 x 54 x 36
Case – 12	γραμμική	0.30	200m	200 x 44 x 28

Πίνακας 6.5– Παραμετρική ανάλυση χρονικής εξέλιξης πυρκαγιάς ισχύος 50MW

a/a case	Καμπύλη ανάπτυξης HRR	Κλάσμα ακτινοβολίας	Τμήμα σήραγγας	Μέγεθος πλέγματος
Case – 1	γραμμική	0.30	702m	351 x 11 x 7
Case – 2	γραμμική	0.30	702m	351 x 22 x 14
Case – 3	γραμμική	0.30	702m	351 x 44 x 28
Case – 4	γραμμική	0.30	702m	702 x 44 x 28
Case – 5	γραμμική	0.30	702m	702 x 27 x 36
Case – 6	εκθετική	0.30	200m	200 x 27 x 36
Case – 7	εκθετική	0.30	200m	200 x 54 x 36
Case – 8	εκθετική	0.30	200m	200 x 44 x 28

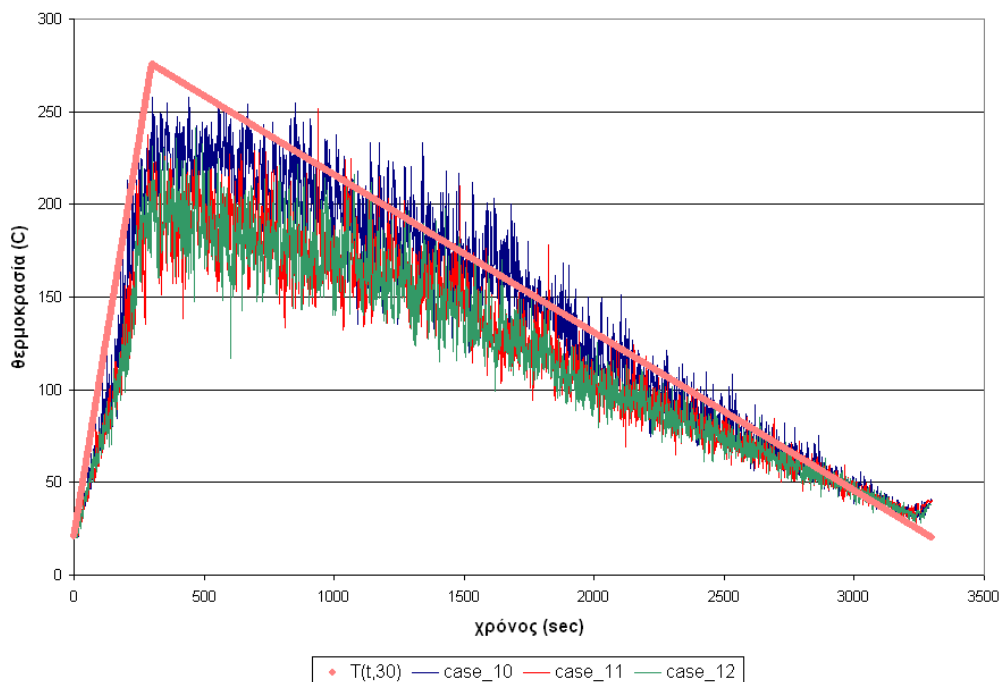
Πίνακας 6.6 – Παραμετρική ανάλυση χρονικής εξέλιξης πυρκαγιάς ισχύος 100MW

a/a case	Καμπύλη ανάπτυξης HRR	Κλάσμα ακτινοβολίας	Τμήμα σήραγγας	Μέγεθος πλέγματος
Case – 1	γραμμική	0.30	702m	351 x 11 x 7
Case – 2	γραμμική	0.30	702m	351 x 22 x 14
Case – 3	γραμμική	0.30	702m	351 x 44 x 28
Case – 4	γραμμική	0.30	200m	200 x 27 x 36
Case – 5	γραμμική	0.30	200m	200 x 54 x 36
Case – 6	γραμμική	0.30	200m	200 x 44 x 28
Case – 7	εκθετική	0.30	200m	200 x 27 x 36
Case – 8	εκθετική	0.30	200m	200 x 54 x 36
Case – 9	εκθετική	0.30	200m	200 x 44 x 28

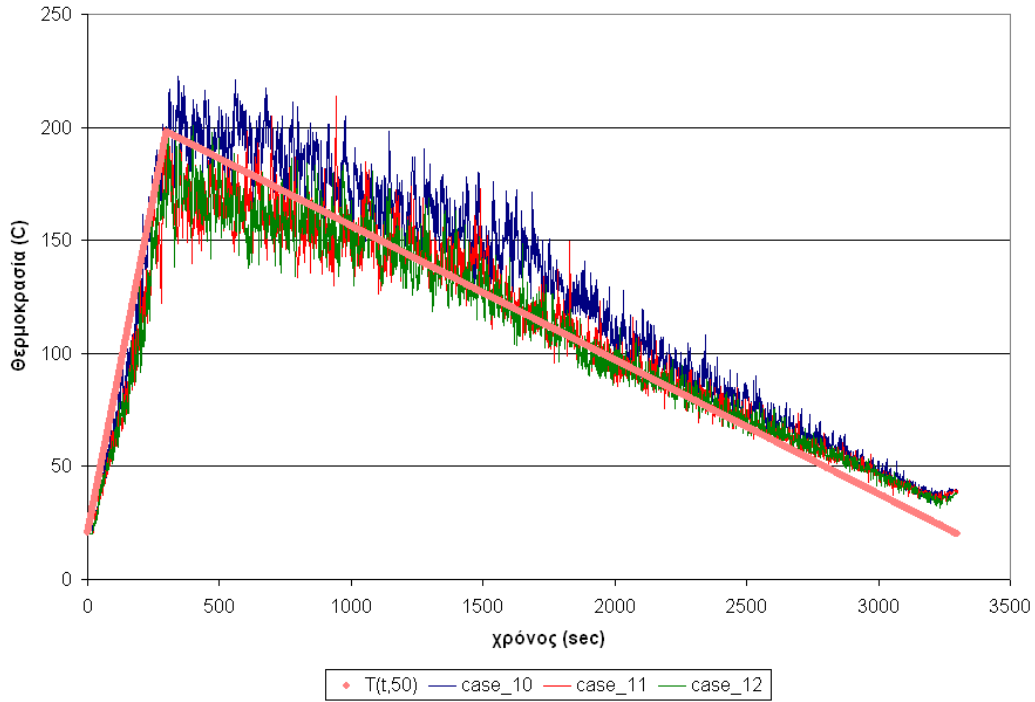
6.7 Αποτελέσματα

Εξετάσθηκε είτε το συνολικό μήκος της σήραγγας (702m) είτε τμήμα 200m (100m + 100m) ανάντι και κατάντι του σημείου πυρκαγιάς. Αντί της διαδοχικής ενεργοποίησης των ανεμιστήρων όπως σύμφωνα με το σενάριο αερισμού που αναπτύχθηκε στην παράγραφο 6.3 θεωρήθηκε ταχύτητα μηχανικού αερισμού ίση με 3.0 m/s κατά μήκος της σήραγγας σύμφωνα με τις απαιτήσεις σχεδιασμού. Η θεώρηση αυτή διατηρήθηκε ορθή καθώς παρατηρήθηκαν μεγάλες μεταβολές στο πεδίο πιέσεων και ταχύτητας κατά την ενεργοποίηση των ανεμιστήρων που είχαν ως αποτέλεσμα την απόκλιση της αλγορίθμου μετά από 60 sec από την έναρξη του φαινομένου.

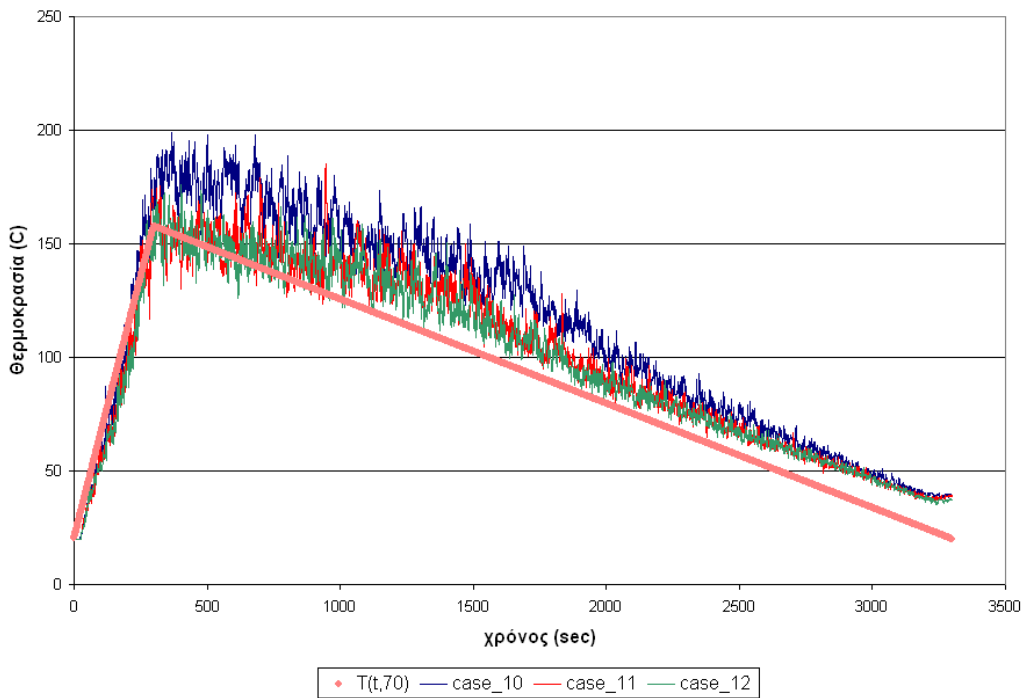
Ανάντι του σημείου πυρκαγιάς μελετήθηκε η δημιουργία, σταθερότητα και ικανότητα διασποράς ρεύματος αναστροφής (backlayering). Οι τιμές της θερμοκρασίας στα σημεία κατάντι του σημείου πυρκαγιάς συγκρίθηκαν με την ημιεμπειρική σχέση (2.27) που προτείνεται από τη βιβλιογραφία με βάση το απλοποιημένο μοντέλο εναλλάκτη κατά μήκος της σήραγγας. Στη συνέχεια δίδονται τα αποτελέσματα εξέλιξης της θερμοκρασίας υπό μορφή διαγραμμάτων για διαφορετικά μεγέθη πλέγματος σε αποστάσεις 10 – 30 – 50 – 100m κατάντι του σημείου της πυρκαγιάς (Εικόνες 113 - 115).



Εικόνα 113 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS – ημιεμπειρικής σχέσης για την χρονική εξέλιξη θερμοκρασίας αέρα στην οροφή της σήραγγας σε απόσταση 30m κατάντι του σημείου πυρκαγιάς 30MW



Εικόνα 114 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS – ημιεμπειρικής σχέσης για την χρονική εξέλιξη θερμοκρασίας αέρα στην οροφή της σήραγγας σε απόσταση 50m κατάντι του σημείου πυρκαγιάς 30MW



Εικόνα 115 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS – ημιεμπειρικής σχέσης για την χρονική εξέλιξη θερμοκρασίας αέρα στην οροφή της σήραγγας σε απόσταση 70m κατάντι του σημείου πυρκαγιάς 30MW

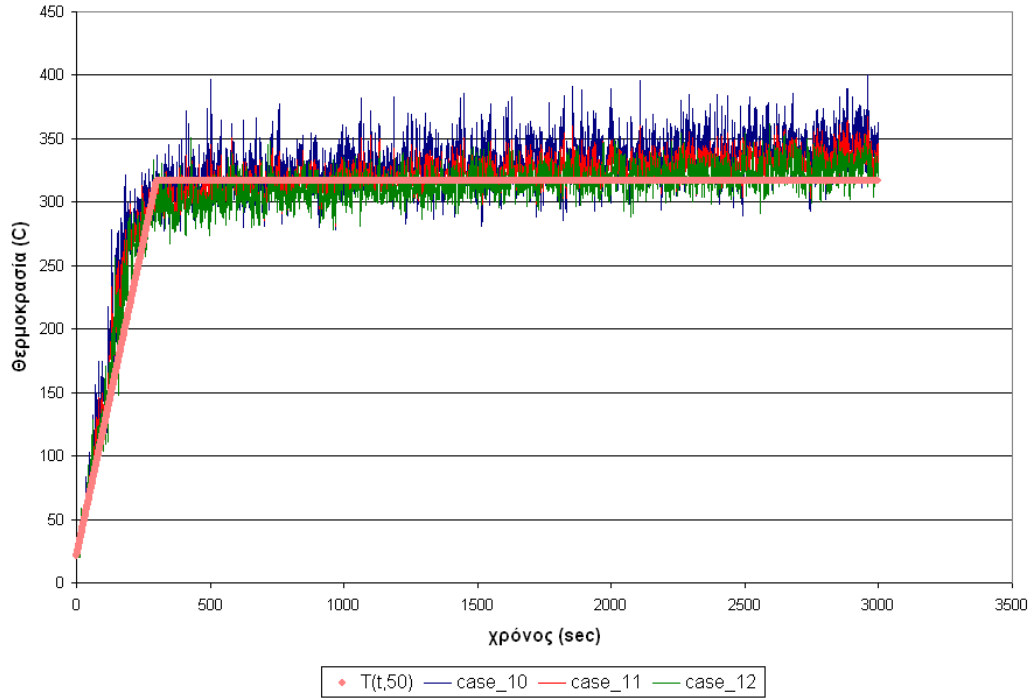
Για μεγαλύτερα μεγέθη πυρκαγιάς (50 – 100 MW) οι τιμές της θερμοκρασίας συγκρίνονται επίσης με τις εμπειρικές σχέσεις (2.1) και (2.2) που έχουν προταθεί για την περιγραφή φωτιών υδρογονανθράκων μικρής και μεγάλης ισχύος από την PIARC. Συγκεκριμένα η σχέση 2.1 έχει προταθεί για την πρόβλεψη θερμοκρασίας σε φωτιές μικρής ισχύος (σύγκρουση οχημάτων – λεωφορείων – ελαφρών φορτηγών) ενώ η σχέση 2.2 για φωτιές μεγάλης ισχύος (οχήματα που μεταφέρουν μη-επικίνδυνα φορτία ή καύσιμα).

Για το σκοπό αυτό, εκτός από το γραμμικό πρότυπο, έγιναν προσομοιώσεις υιοθετώντας το εκθετικό πρότυπο ανάπτυξης σύμφωνα με τη τροποποιημένη σχέση 6.1

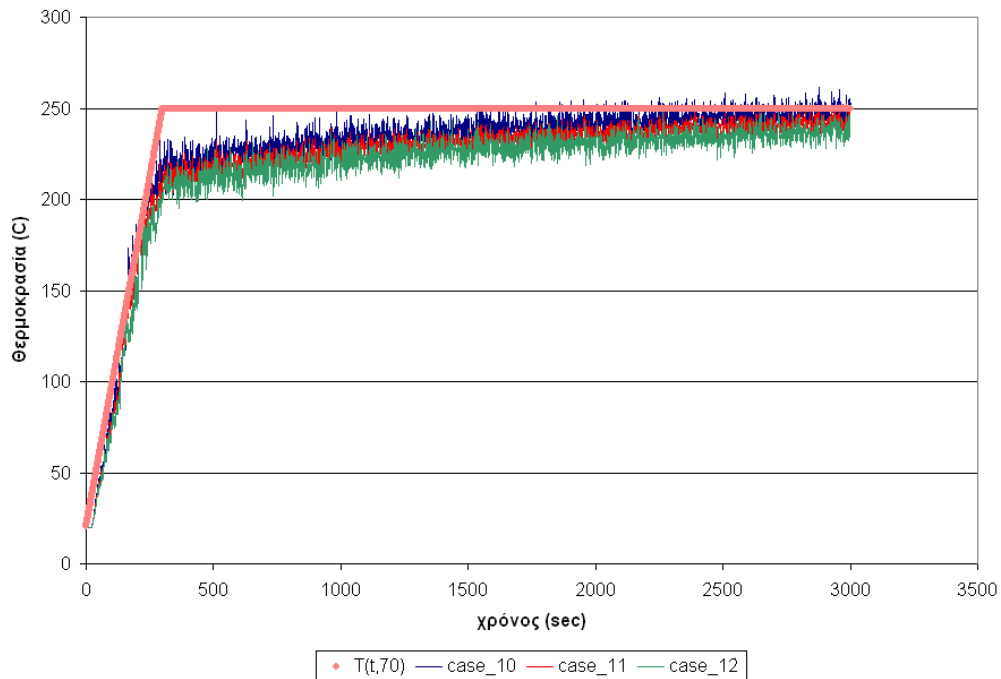
$$Q(t) = Q_{\max} \left(n_1 r_1 (1 - e^{-k_1 t})^{n_1 - 1} e^{-k_1 t} + n_2 r_2 (1 - e^{-k_2 t})^{n_2 - 1} e^{-k_2 t} \right) \quad (6.1)$$

με τιμές παραμέτρων $n_1 = 1.50$, $n_2 = 4.757$, $r_1 = 1.654$, $r_2 = 1.53$, $k_1 = 0.000922$, $k_2 = 0.000636$

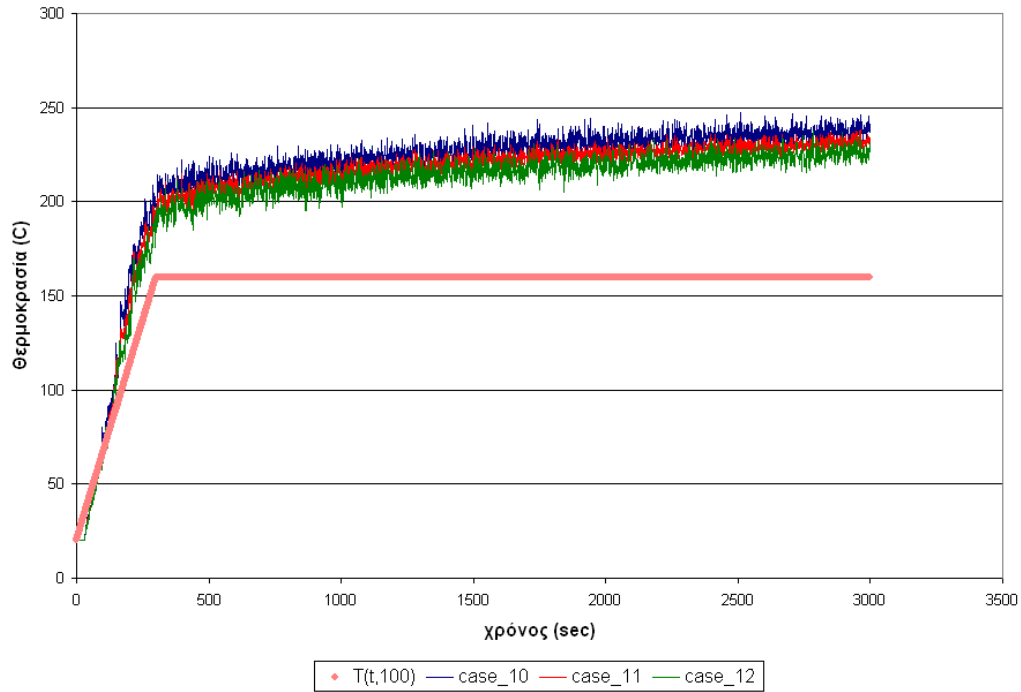
Η μορφή της καμπύλης επιτρέπει ταχεία ανάπτυξη και διατήρηση ζώνης μέγιστων τιμών (plateau) κατά την εξέλιξη της πυρκαγιάς που απαντάται σε φωτιές υδρογονανθράκων σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [27-28]. Αρχικά έγινε σύγκριση της θερμοκρασίας κατά μήκος της σήραγγας σε αποστάσεις 50-70-100m με βάση το γραμμικό πρότυπο (Εικόνες 116 - 118) για $Q=50\text{MW}$ και εν συνεχεία για το εκθετικό πρότυπο και τις αντίστοιχες καμπύλες ISO-834 και HC Curve για $Q = 50-100\text{MW}$ (Εικόνες 119 - 126)



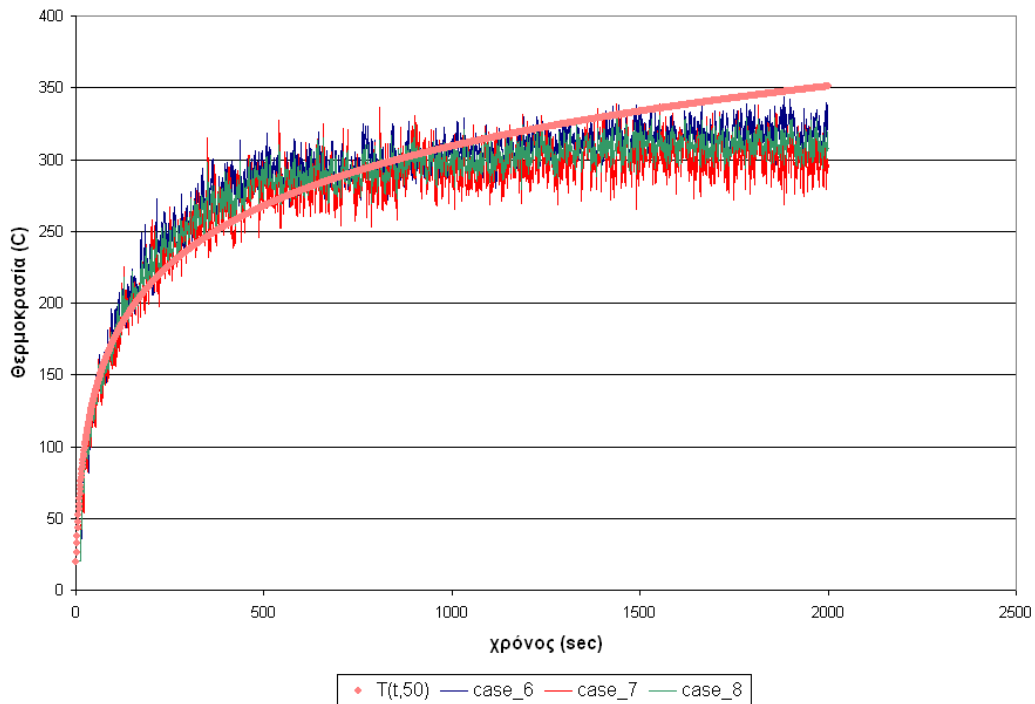
Εικόνα 116 – Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS – ημιεμπειρικής σχέσης για την χρονική εξέλιξη θερμοκρασίας αέρα στην οροφή της σήραγγας σε απόσταση 50m κατάντι του σημείου πυρκαγιάς 50MW



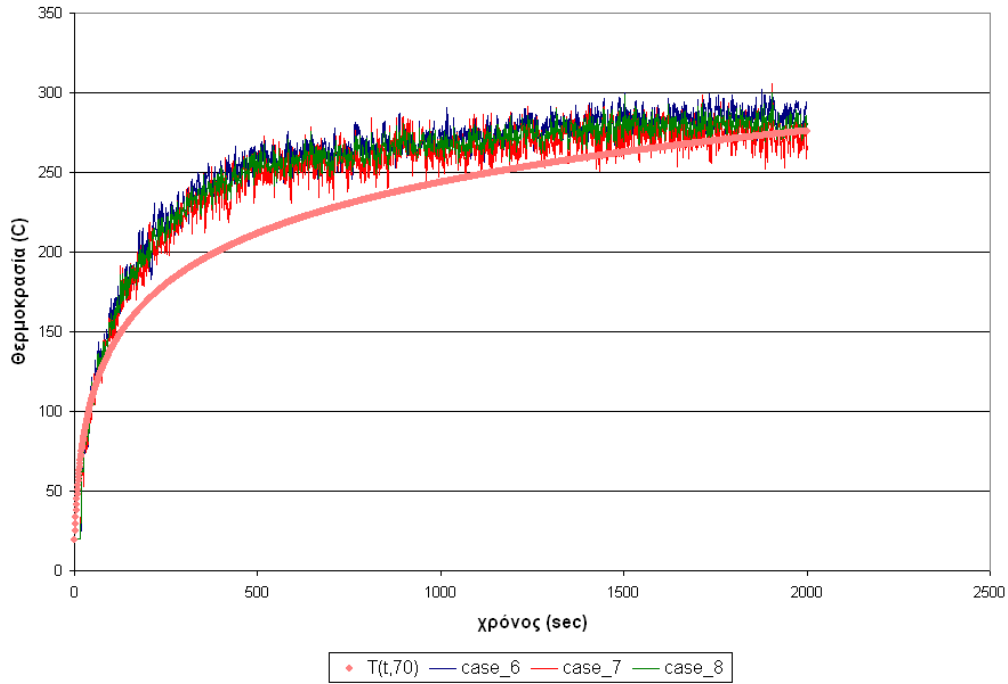
Εικόνα 117 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS – ημιεμπειρικής σχέσης για την χρονική εξέλιξη θερμοκρασίας αέρα στην οροφή της σήραγγας σε απόσταση 70m κατάντι του σημείου πυρκαγιάς 50MW



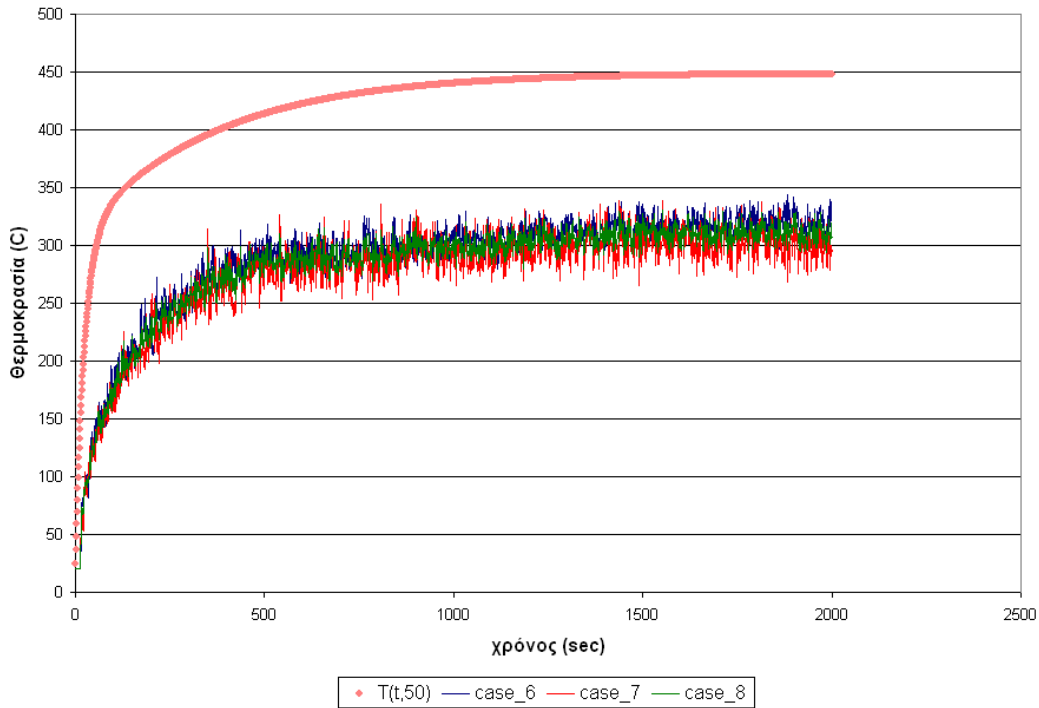
Εικόνα 118 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS – ημιεμπειρικής σχέσης για την χρονική εξέλιξη θερμοκρασίας αέρα στην οροφή της σήραγγας σε απόσταση 100m κατόντι του σημείου πυρκαγιάς 50MW



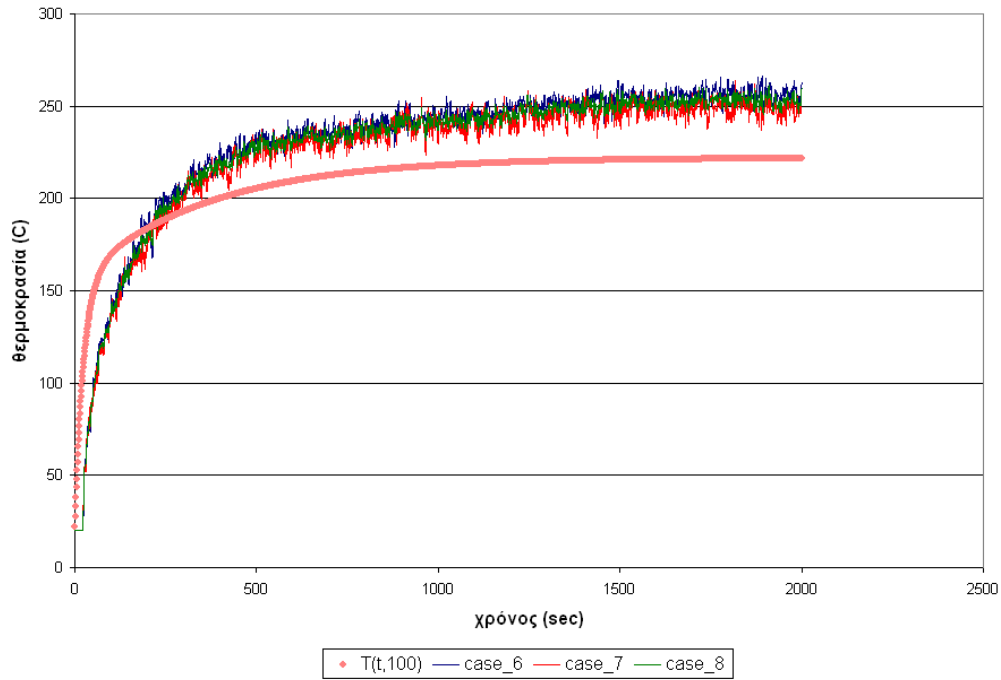
Εικόνα 119 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS – καμπύλης ISO-834 για την χρονική εξέλιξη θερμοκρασίας αέρα στην οροφή της σήραγγας σε απόσταση 50m κατόντι του σημείου πυρκαγιάς 50MW



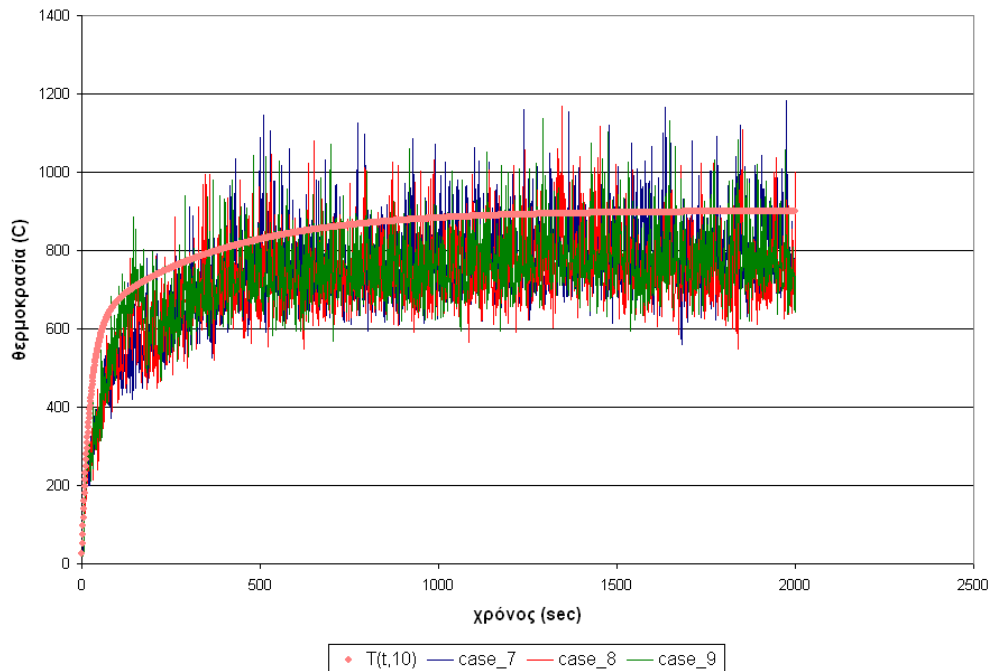
Εικόνα 120 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS – καμπύλης ISO-834 για την χρονική εξέλιξη θερμοκρασίας αέρα στην οροφή της σήραγγας σε απόσταση 70m κατόντι του σημείου πυρκαγιάς 50MW



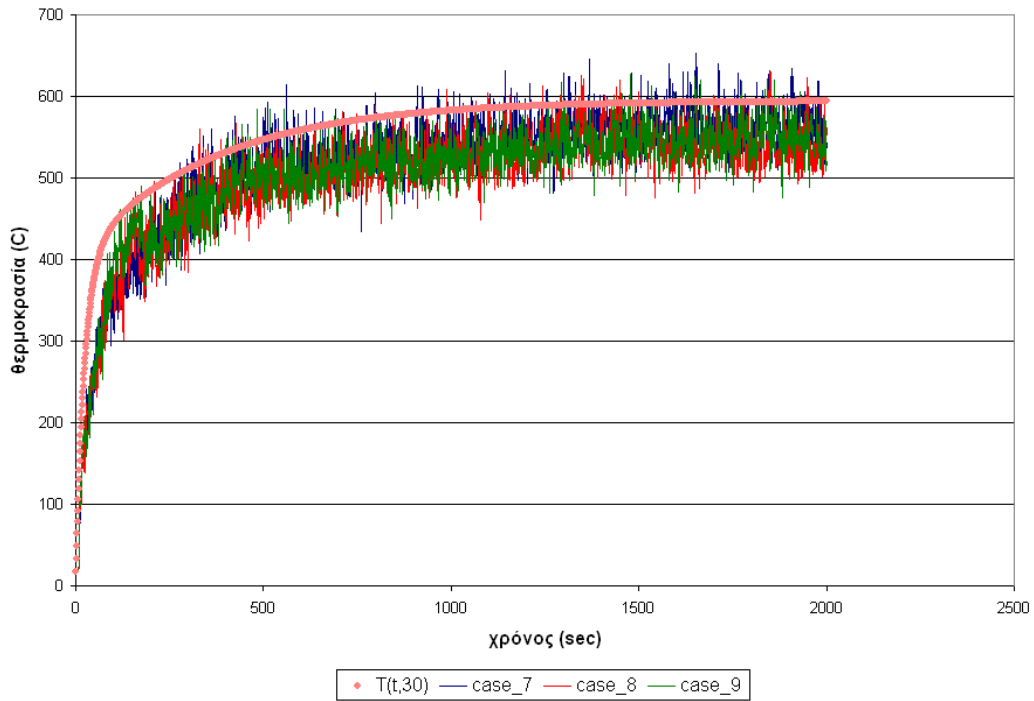
Εικόνα 121 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS – καμπύλης υδρογονανθράκων (HC Curve) για την χρονική εξέλιξη θερμοκρασίας αέρα στην οροφή της σήραγγας σε απόσταση 50m κατόντι του σημείου πυρκαγιάς 50MW



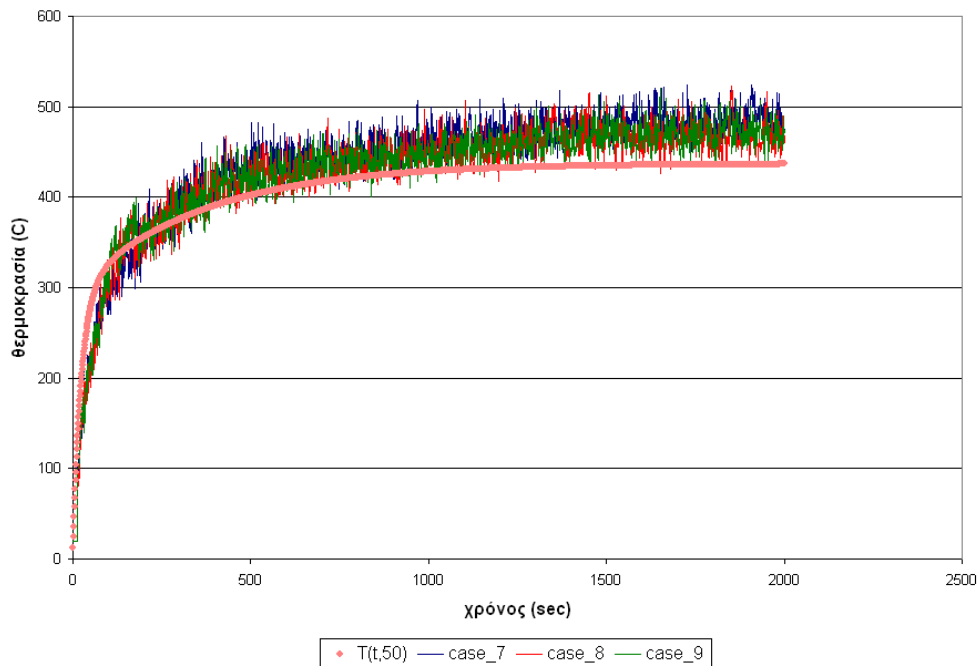
Εικόνα 122 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS – καμπύλης υδρογονανθράκων (HC Curve) για την χρονική εξέλιξη θερμοκρασίας αέρα στην οροφή της σήραγγας σε απόσταση 100m κατόντι του σημείου πυρκαγιάς 50MW



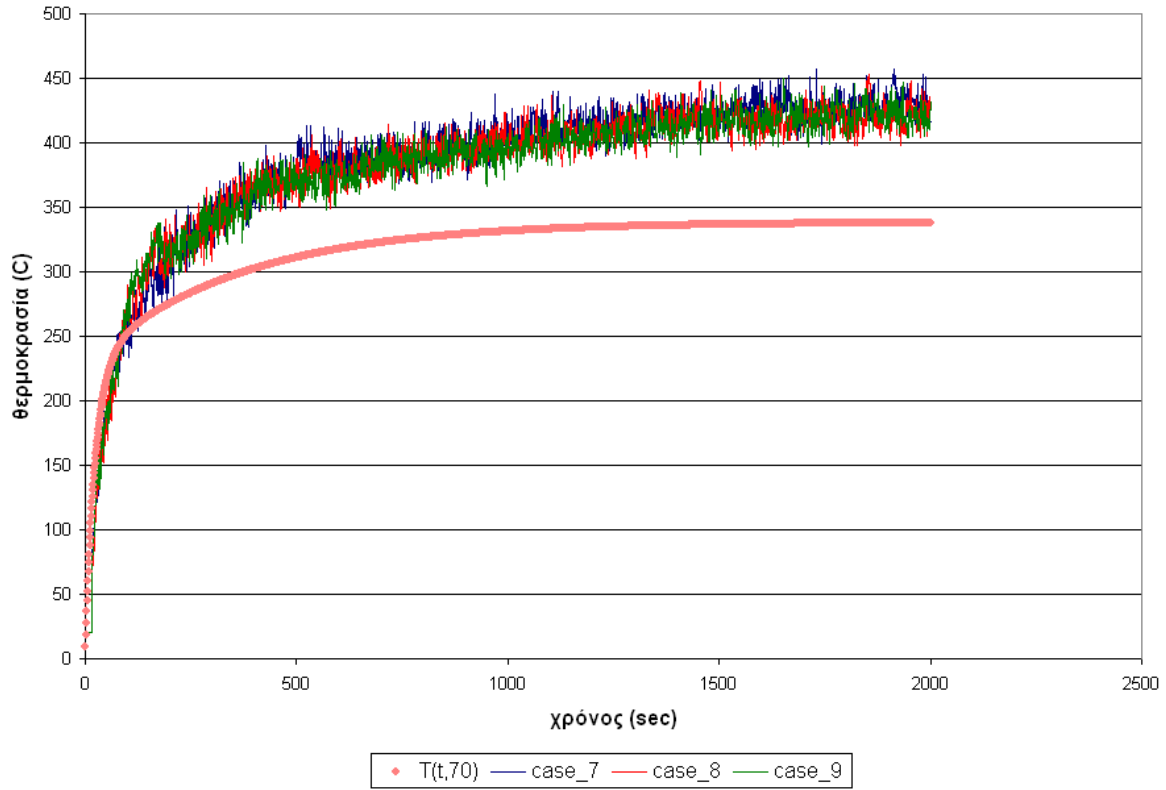
Εικόνα 123 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS – καμπύλης υδρογονανθράκων (HC Curve) για την χρονική εξέλιξη θερμοκρασίας αέρα στην οροφή της σήραγγας σε απόσταση 10m κατόντι του σημείου πυρκαγιάς 100MW



Εικόνα 124 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS – καμπύλης υδρογονανθράκων (HC Curve) για την χρονική εξέλιξη θερμοκρασίας αέρα στην οροφή της σήραγγας σε απόσταση 30m κατάντι του σημείου πυρκαγιάς 100MW



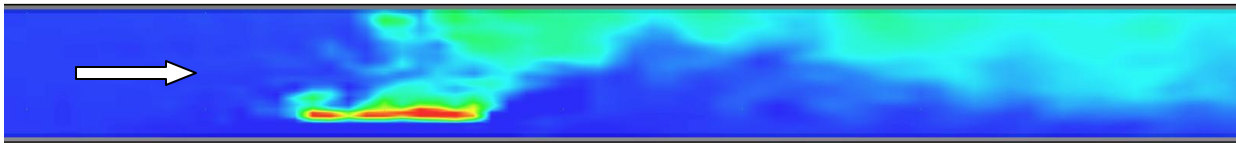
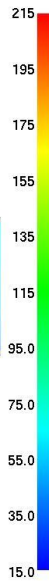
Εικόνα 125 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS – καμπύλης υδρογονανθράκων (HC Curve) για την χρονική εξέλιξη θερμοκρασίας αέρα στην οροφή της σήραγγας σε απόσταση 50m κατάντι του σημείου πυρκαγιάς 100MW



Εικόνα 126 - Συγκριτικό διάγραμμα προλέξεων FDS – καμπύλης υδρογονανθράκων (HC Curve) για την χρονική εξέλιξη θερμοκρασίας αέρα στην οροφή της σήραγγας σε απόσταση 70m κατάντι του σημείου πυρκαγιάς 100MW

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

Slice
temp
C



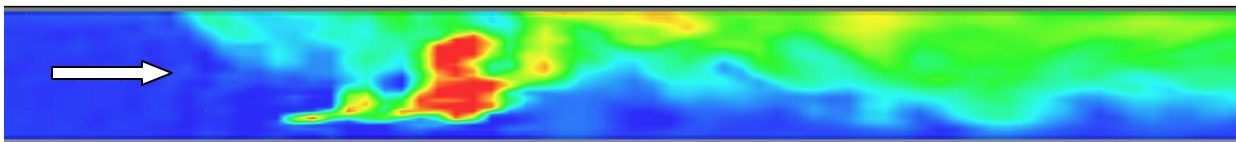
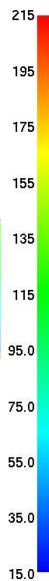
Frame: 100
Time: 100.0



Εικόνα 127 – Κατανομή θερμοκρασίας κατά μήκος της σήραγγας για μέγεθος πυρκαγιάς 30MW σε $t = 100s$

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

Slice
temp
C



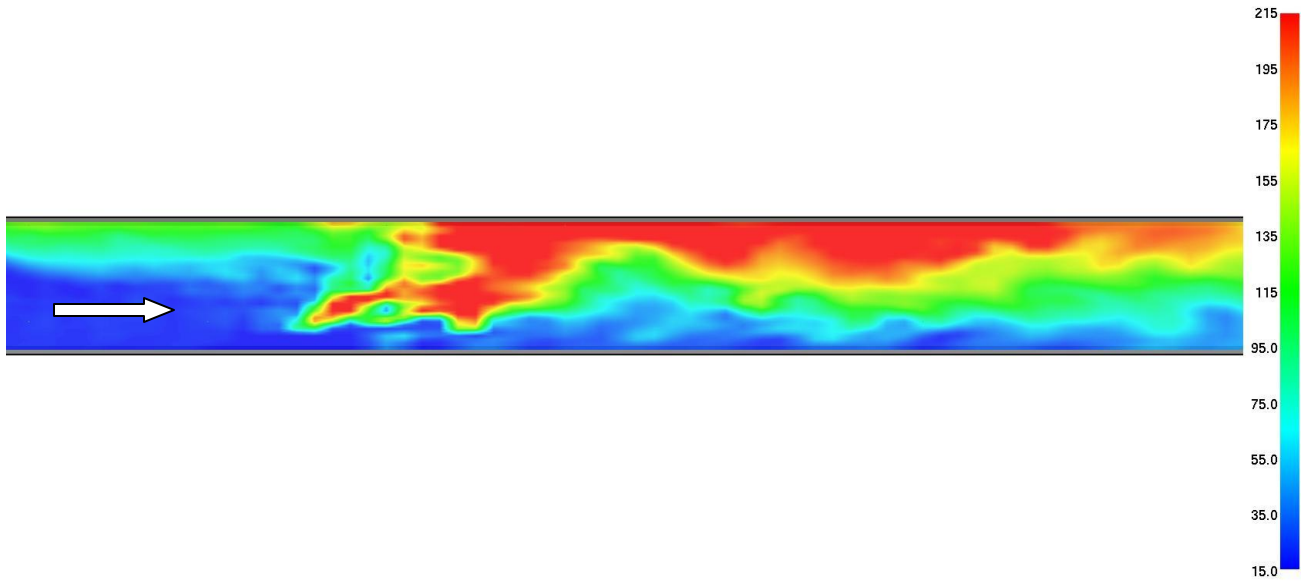
Frame: 200
Time: 200.0



Εικόνα 128 - Κατανομή θερμοκρασίας κατά μήκος της σήραγγας για μέγεθος πυρκαγιάς 30MW σε $t = 200s$

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

Slice
temp
C

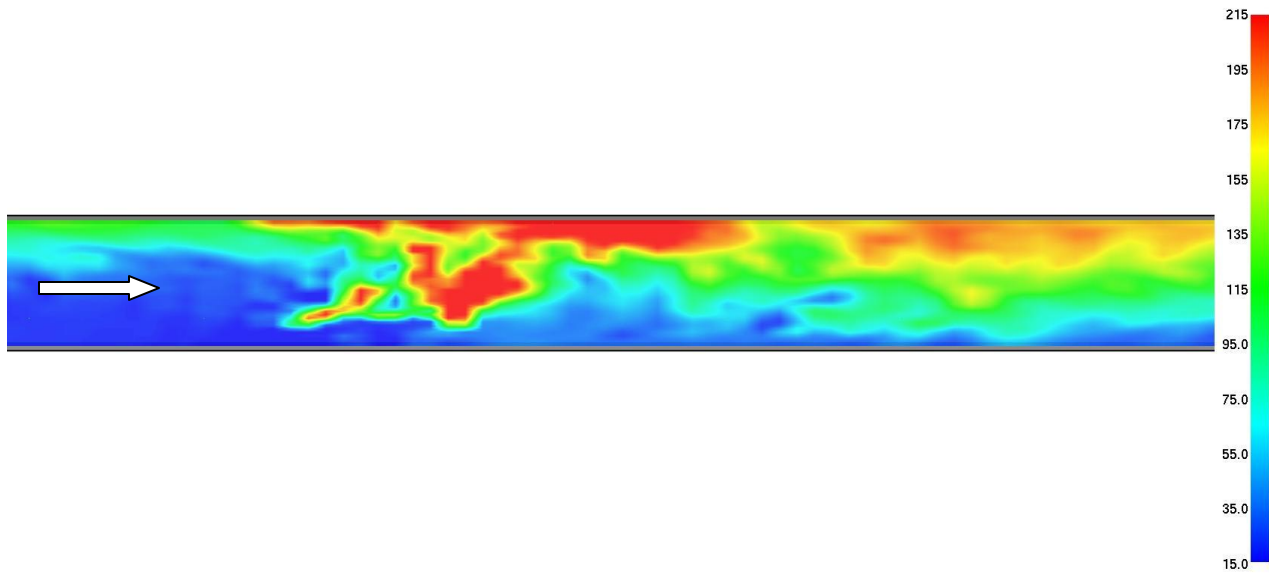


Frame: 300
Time: 300.0

Εικόνα 129 - Κατανομή θερμοκρασίας κατά μήκος της σήραγγας για μέγεθος πυρκαγιάς 30MW σε $t = 300s$

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

Slice
temp
C

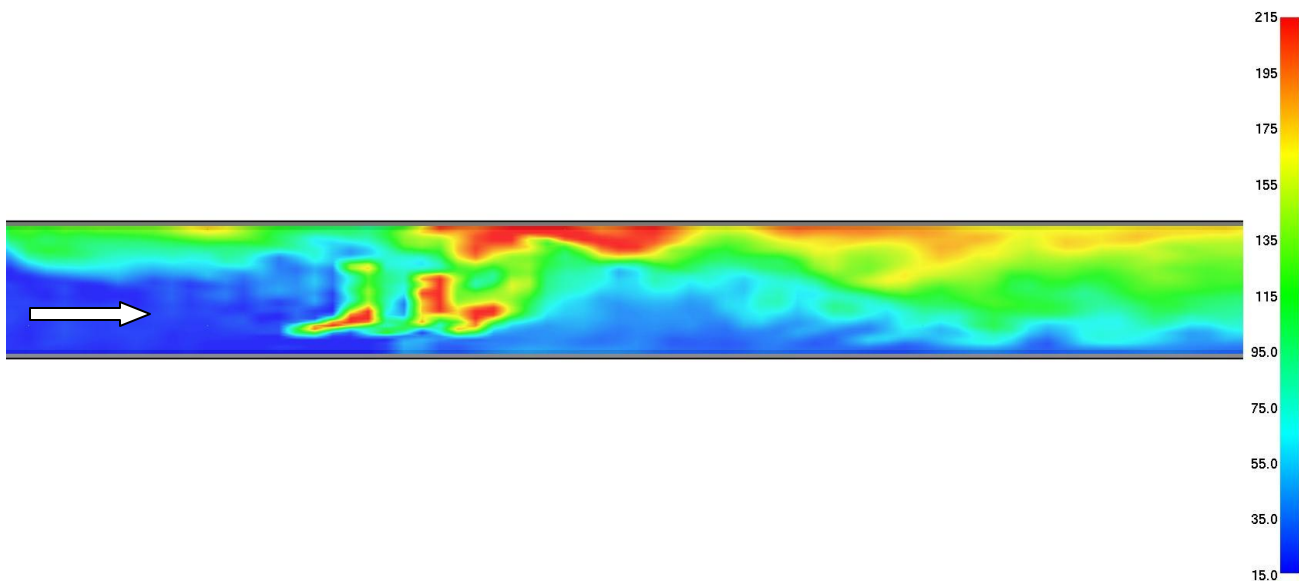


Frame: 501
Time: 500.0

Εικόνα 130 - Κατανομή θερμοκρασίας κατά μήκος της σήραγγας για μέγεθος πυρκαγιάς 30MW σε $t = 500s$

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

Slice temp C

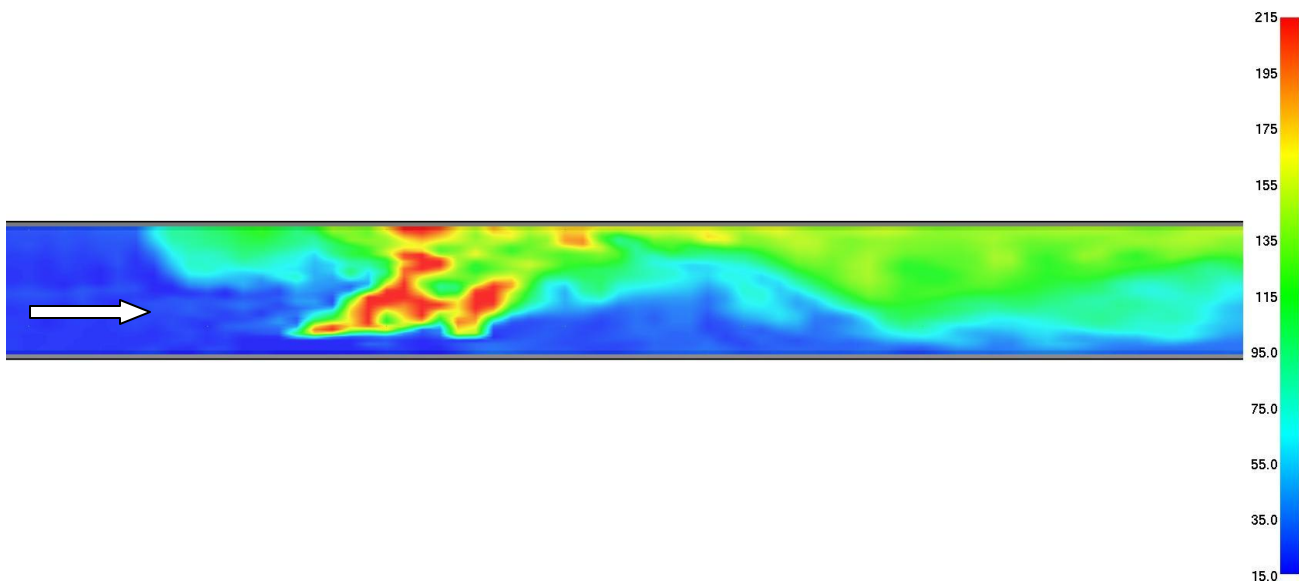


Frame: 1001
Time: 1000.0

Εικόνα 131 - Κατανομή θερμοκρασίας κατά μήκος της σήραγγας για μέγεθος πυρκαγιάς 30MW σε t = 1000s

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

Slice temp C

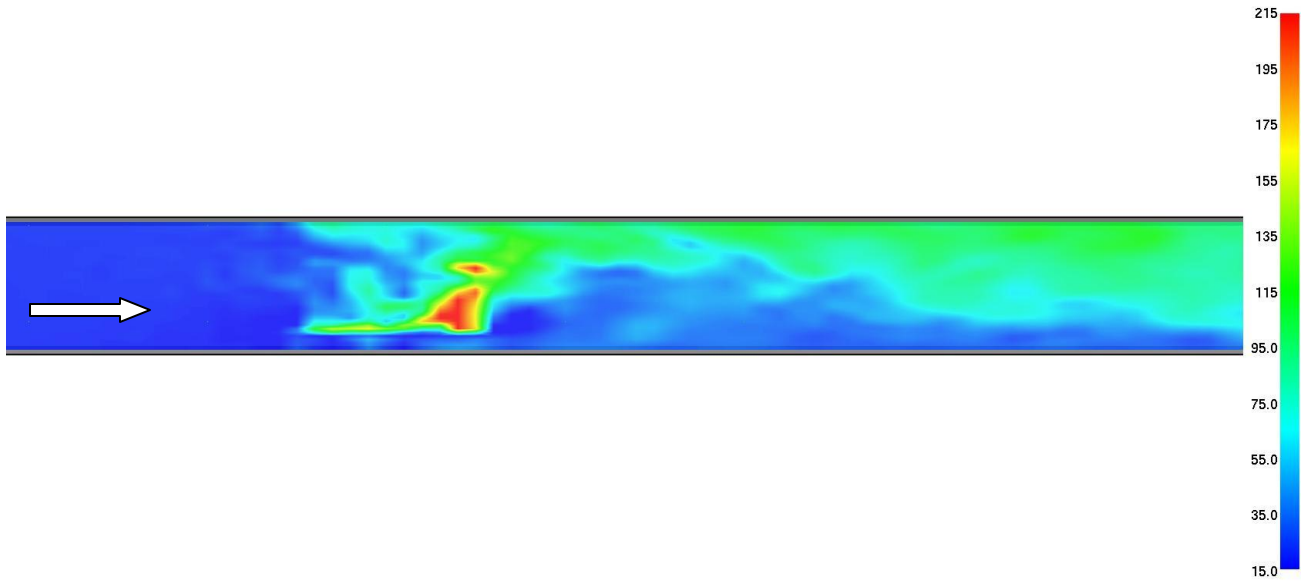


Frame: 1502
Time: 1500.0

Εικόνα 132 - Κατανομή θερμοκρασίας κατά μήκος της σήραγγας για μέγεθος πυρκαγιάς 30MW σε t = 1500s

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

Slice
temp
C

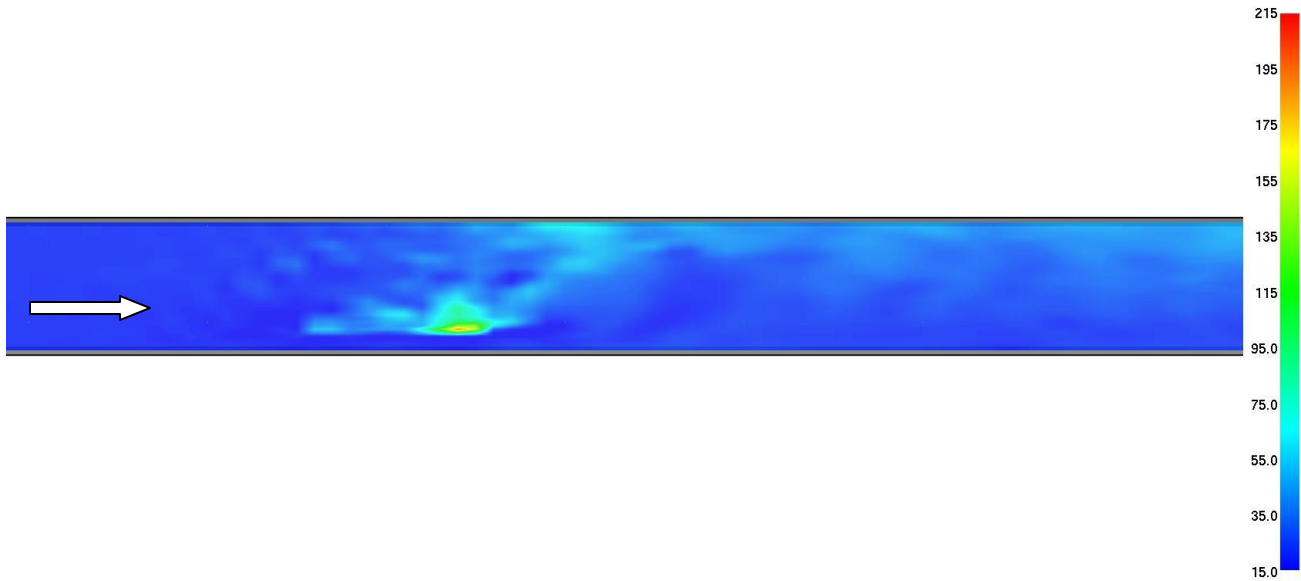


Frame: 2002
Time: 2000.0

Εικόνα 133 - Κατανομή θερμοκρασίας κατά μήκος της σήραγγας για μέγεθος πυρκαγιάς 30MW σε $t = 2000s$

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

Slice
temp
C

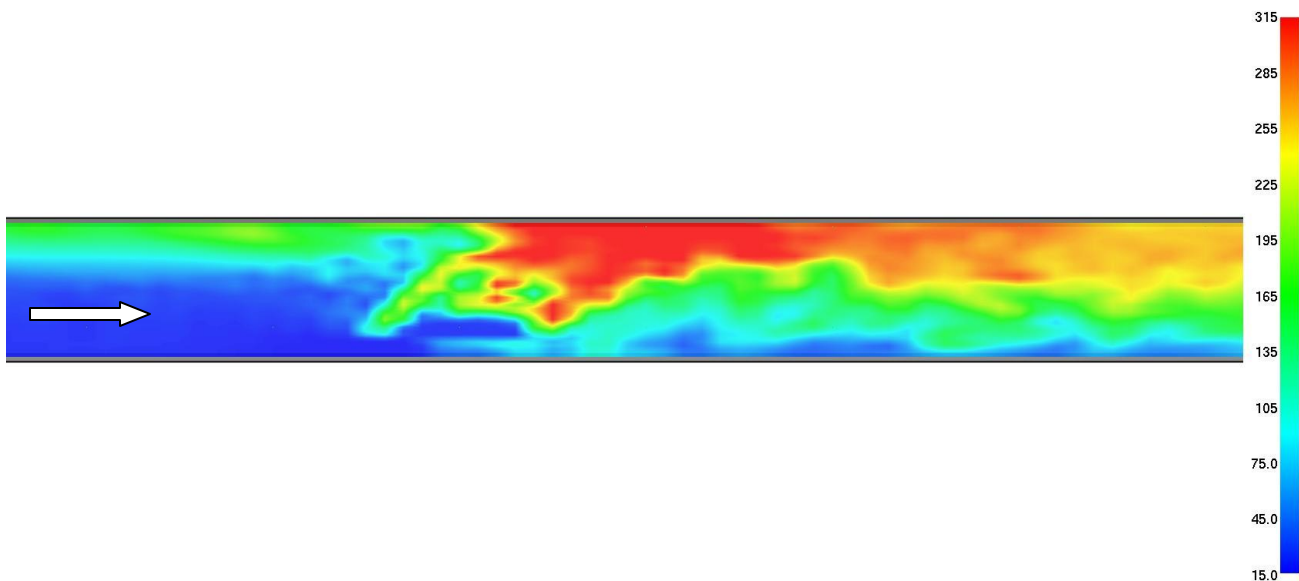


Frame: 3003
Time: 3000.0

Εικόνα 134 - Κατανομή θερμοκρασίας κατά μήκος της σήραγγας για μέγεθος πυρκαγιάς 30MW σε $t = 3000s$

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

Slice temp C

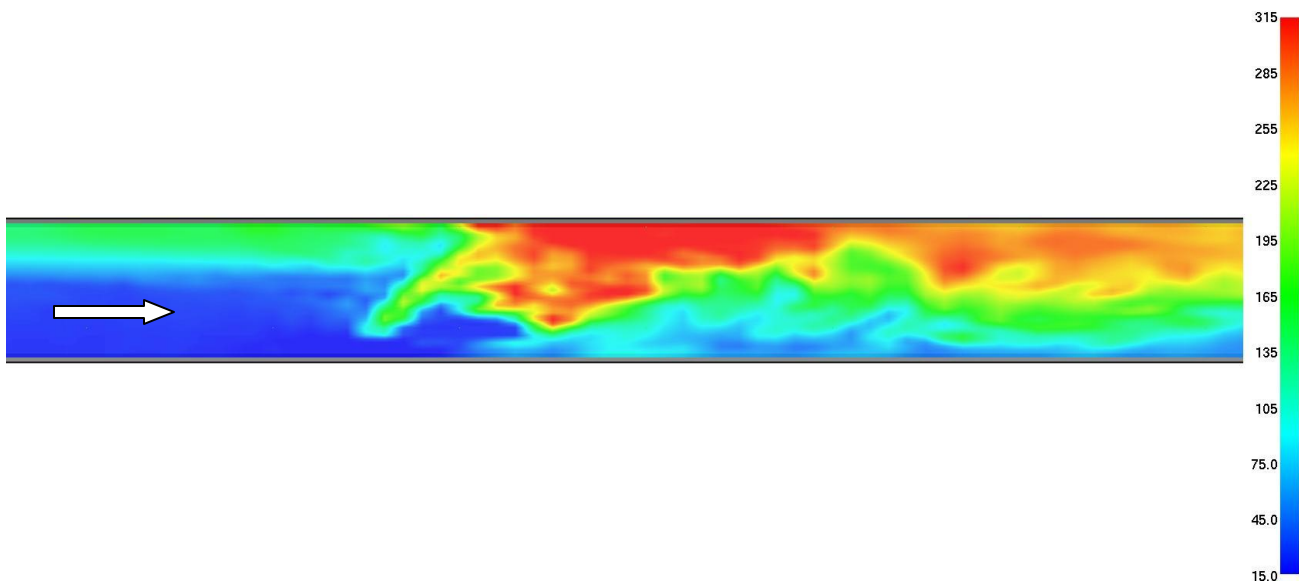


Frame: 801
Time: 800.0

Εικόνα 135 - Κατανομή θερμοκρασίας κατά μήκος της σήραγγας για μέγεθος πυρκαγιάς 50MW σε $t = 800s$

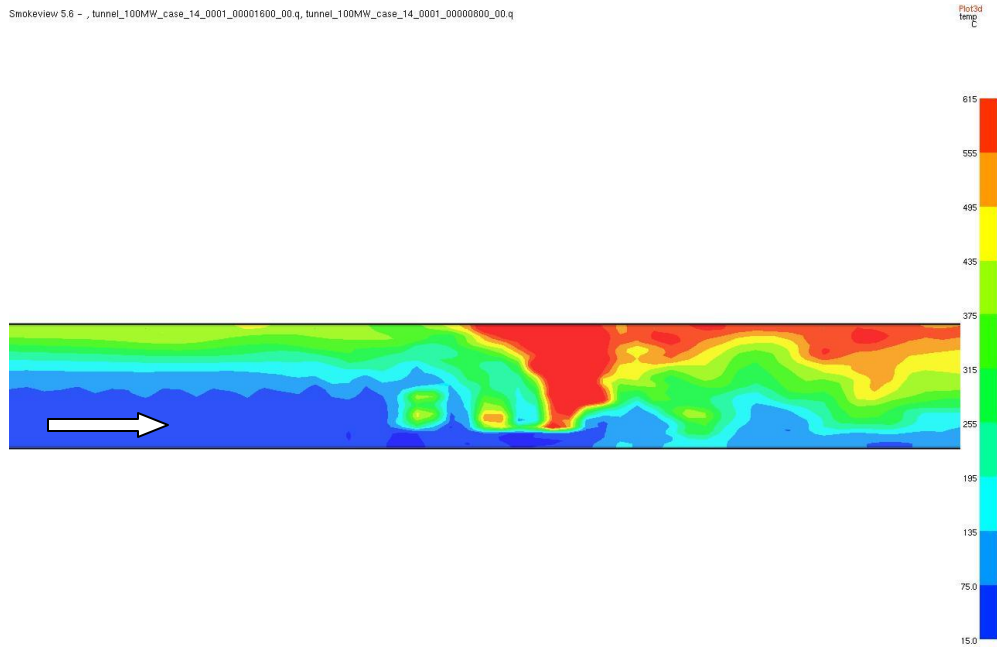
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

Slice temp C

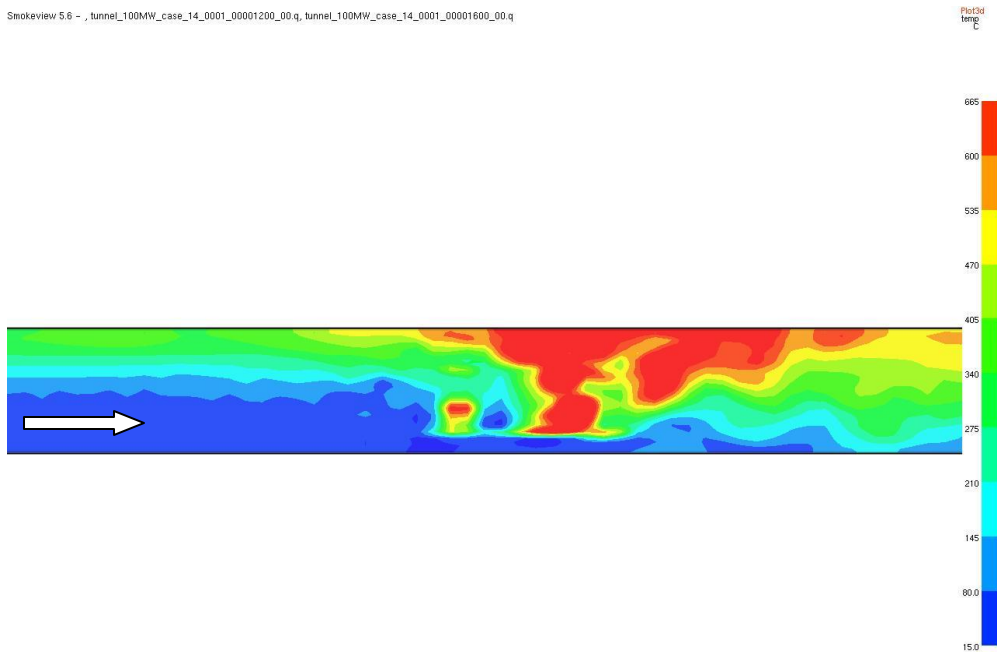


Frame: 1201
Time: 1200.0

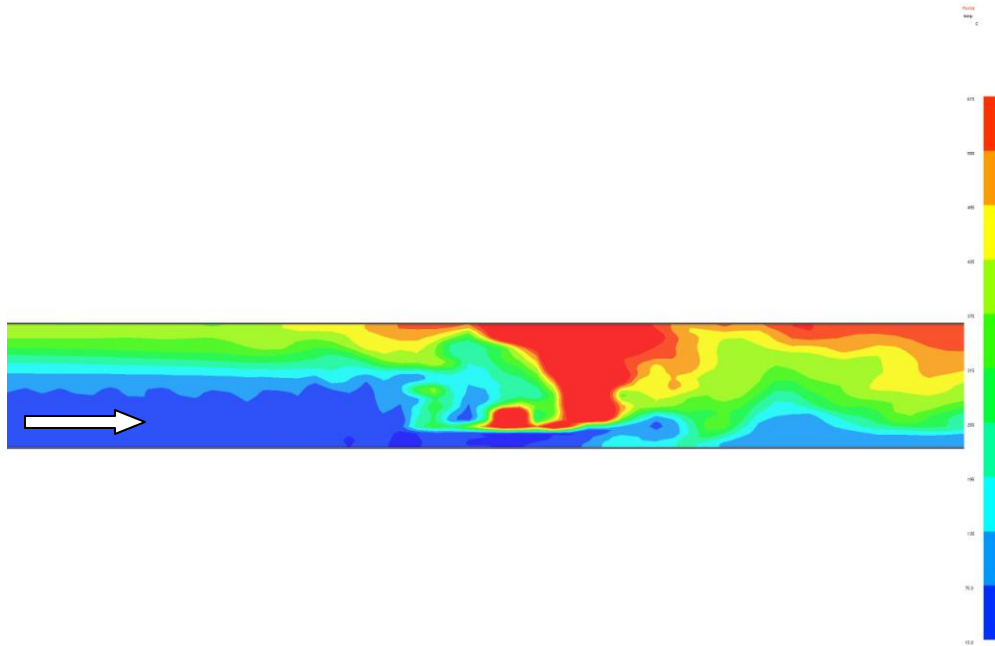
Εικόνα 136 - Κατανομή θερμοκρασίας κατά μήκος της σήραγγας για μέγεθος πυρκαγιάς 50MW σε $t = 1200s$



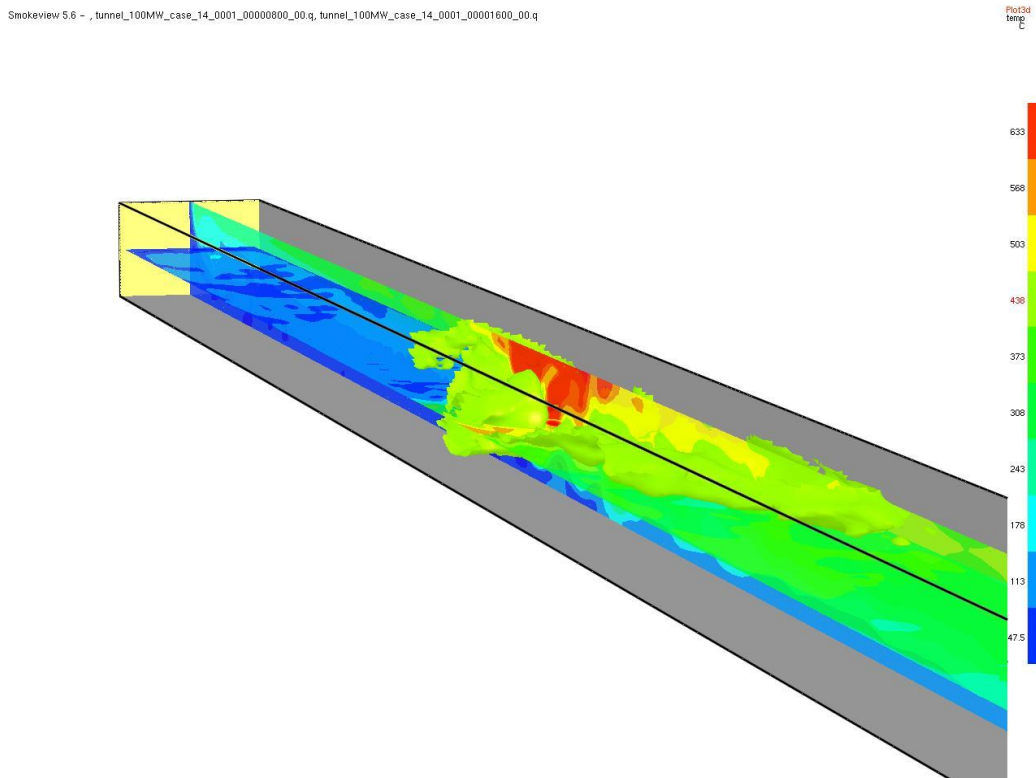
Εικόνα 137 - Κατανομή θερμοκρασίας κατά μήκος της σήραγγας για μέγεθος πυρκαγιάς 100MW σε $t = 800s$



Εικόνα 138 - Κατανομή θερμοκρασίας κατά μήκος της σήραγγας για μέγεθος πυρκαγιάς 100MW σε $t = 1200s$



Εικόνα 139 - Κατανομή θερμοκρασίας κατά μήκος της σήραγγας για μέγεθος πυρκαγιάς 100MW σε $t = 1600s$

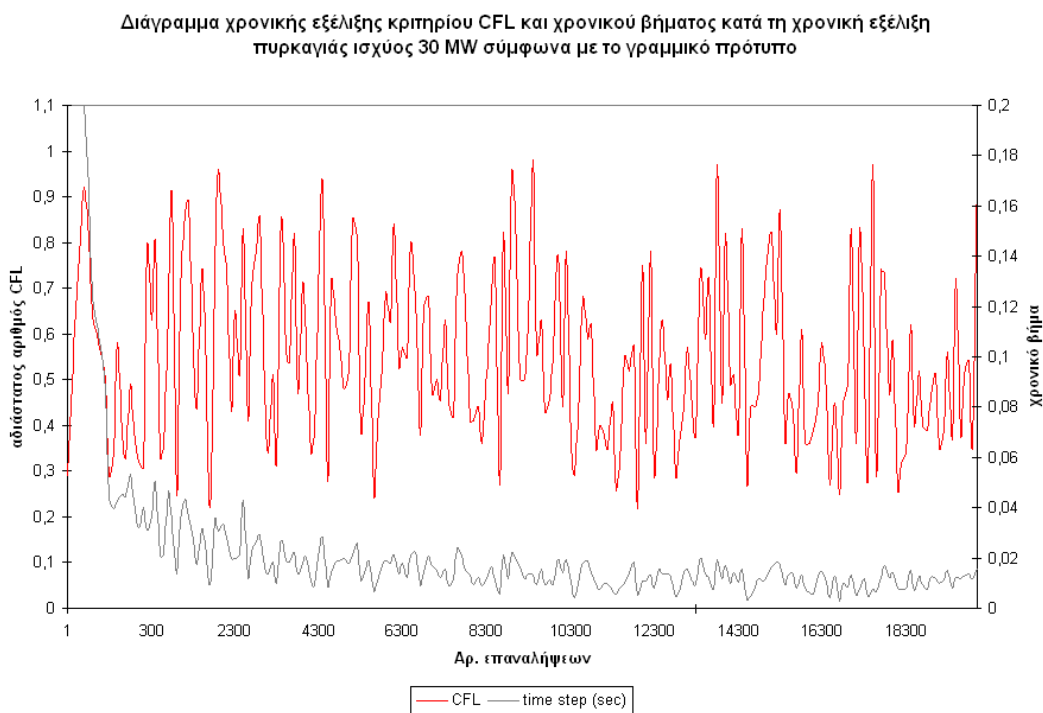


Εικόνα 140 - Τρισδιάστατη απεικόνιση ισοεπιφανειών θερμοκρασίας για μέγεθος πυρκαγιάς 100MW σε $t = 1200s$

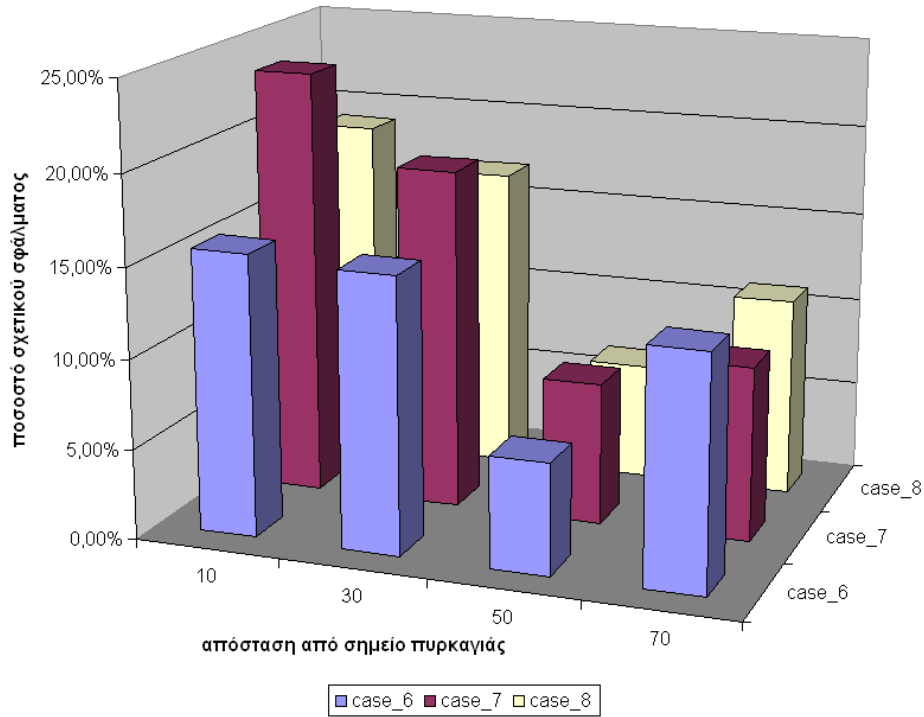
6.8 Σύγκλιση

Σύμφωνα με τη διαδικασία επίλυσης που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3 και αναλύεται διεξοδικά στον οδηγό χρήσης, ένα σημαντικό κριτήριο σύγκλισης είναι η ικανοποίηση του αριθμού CFL < 1 σε κάθε βήμα επανάληψης. Στην εικόνα -141 παριστάνεται η χρονική εξέλιξη της μέγιστης τιμής του CFL που υπολογίστηκε στο σύνολο των κελιών του υπολογιστικού χωρίου καθώς και το μέγεθος του χρονικού βήματος (time step) για τα πρώτα 20000 βήματα που αντιστοιχούν στην αρχική φάση ανάπτυξης των 300 sec για το γραμμικό πρότυπο. Παρατηρείται ότι η τιμή CFL διακυμαίνεται διαρκώς παραμένοντας μικρότερη της μονάδας, ενώ αντίθετα η τιμή του χρονικού βήματος εκκινώντας από την αρχική τιμή των 0.25 sec / βήμα βαίνει διαρκώς μειούμενη έως ότου διακυμανθεί περί τα 0.010 – 0.015 sec / βήμα. Η τελική εκλογή του χρονικού βήματος είναι συνάρτηση του συνολικού αριθμού των κελιών (χωρική διακριτοποίηση) ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα αριθμητικής διάχυσης.

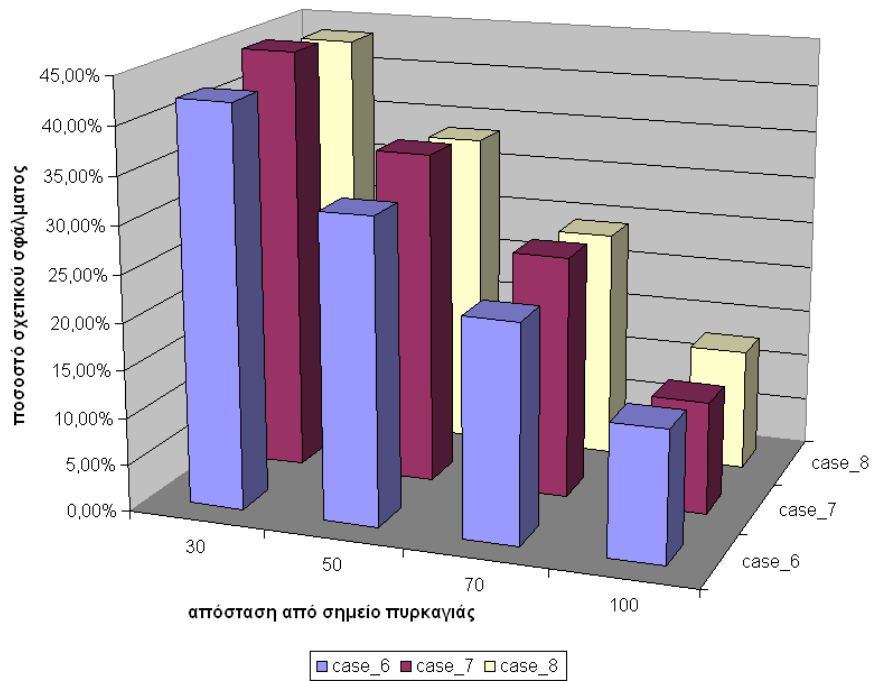
Στη συνέχεια δίδονται συγκριτικά διαγράμματα (Εικόνες 142 – 145) του σχετικού σφάλματος μεταξύ των προλέξεων του FDS και τιμών της θερμοκρασίας που εκτιμώνται κατά ISO – 834 και καμπύλης υδρογονανθράκων (HC Curve).



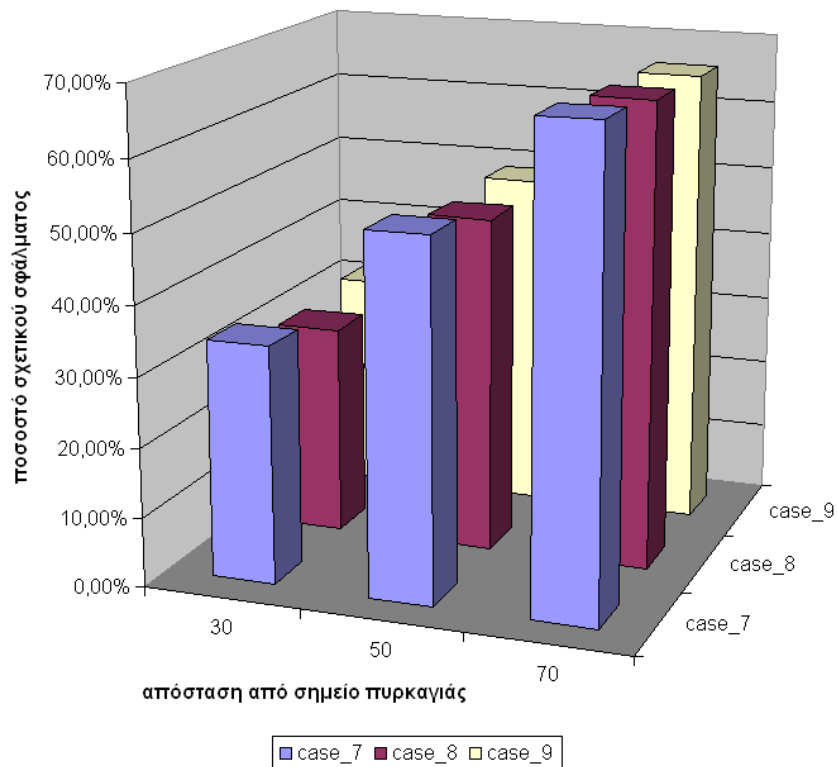
Εικόνα 141 - Χρονική εξέλιξη του αριθμού CFL και του χρονικού βήματος κατά χρονική εξέλιξη της πυρκαγιάς 30 MW σύμφωνα με το γραμμικό πρότυπο



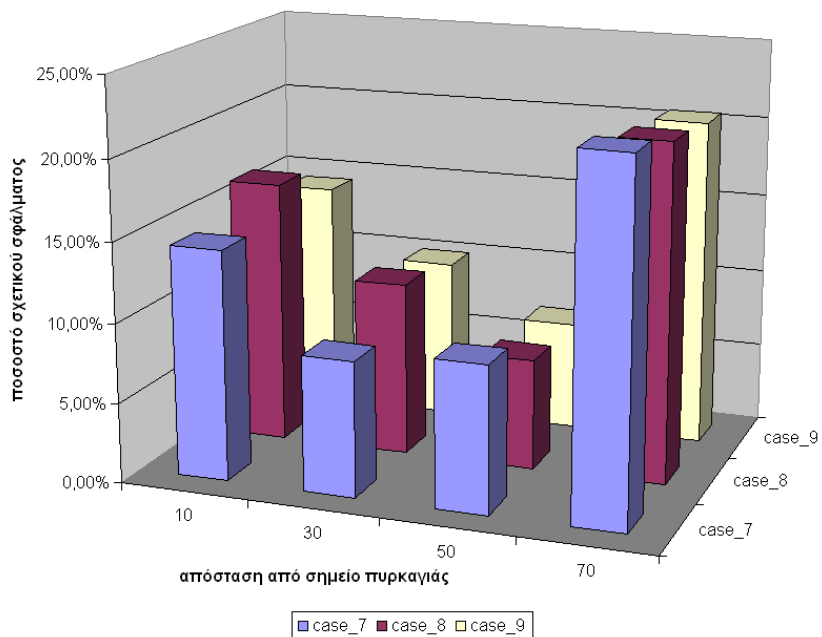
Εικόνα 142 - Κατανομή σχετικού σφάλματος προλέξεων FDS και καμπύλης θερμοκρασίας κατά ISO 834 σε κατάντι αποστάσεις του σημείου πυρκαγιάς ισχύος 50MW



Εικόνα 143 - Κατανομή σχετικού σφάλματος προλέξεων FDS και καμπύλης θερμοκρασίας κατά HC Curve σε κατάντι αποστάσεις του σημείου πυρκαγιάς ισχύος 50MW



Εικόνα 144 - Κατανομή σχετικού σφάλματος προλέξεων FDS και καμπύλης θερμοκρασίας κατά ISO 834 σε κατάντι αποστάσεις του σημείου πυρκαγιάς ισχύος 100MW



Εικόνα 145 - Κατανομή σχετικού σφάλματος προλέξεων FDS και καμπύλης θερμοκρασίας κατά HC Curve σε κατάντι αποστάσεις του σημείου πυρκαγιάς ισχύος 100MW

6.9 Συμπεράσματα - Σχολιασμός

Από τη μορφή των παραπάνω διαγραμμάτων σύμφωνα με τα αποτελέσματα της §6.7 και την κατανομή σύγκλισης της §6.8 μπορούν να ληφθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα :

Q = 30 MW

- Το λογισμικό FDS κατάφερε να προλέξει με ικανοποιητική ακρίβεια την χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας στην οροφή της σήραγγας σε απόσταση 30-70m κατάντι της φωτιάς σε σχέση με την ημιεμπειρική σχέση (2.27) της PIARC τόσο στη φάση ανάπτυξης όσο και στη φάση εξασθένισης με βάση το γραμμικό πρότυπο (βλέπε Εικόνες - 113/115).
- Το κρίσιμο μέγεθος του υπολογιστικού χωρίου ήταν ο αριθμός των κελιών κατά τον άξονα z (κατά ύψος της διατομής). Για αριθμό κελιών = 36, η απόκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων και των τιμών που υπολογίσθηκαν από την ημιεμπειρική σχέση ήταν η μικρότερη δυνατή.
- Η κατανομή της θερμοκρασίας καθ' ύψος της διατομής είναι στρωματοποιημένη σε διαδοχικά επίπεδα (βλέπε Εικόνες 129 - 134) καθ' όλη τη διάρκεια του φαινομένου. Τα επίπεδα θερμοκρασίας κυμαίνονται από 90 – 215 °C κατάντι του σημείου σε απόσταση 30 – 100m.
- Δεν παρατηρείται ουσιαστική ανάπτυξη και διάδοση ρεύματος αναστροφής καπνού (backlayering) ανάντη του σημείου πυρκαγιάς.

Q= 50 MW

- Το λογισμικό FDS κατάφερε να προλέξει με ικανοποιητική ακρίβεια την χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας στην οροφή της σήραγγας σε απόσταση 50-70m κατάντι της φωτιάς σε σχέση με την ημιεμπειρική σχέση (2.27) της PIARC τόσο στη φάση ανάπτυξης όσο και στη σταθερή κατάσταση με βάση το γραμμικό πρότυπο (βλέπε Εικόνες – 116/117).
- Το κρίσιμο μέγεθος του υπολογιστικού χωρίου ήταν ο αριθμός των κελιών κατά τον άξονα z (κατά ύψος της διατομής). Για αριθμό κελιών = 36, η απόκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων

και των τιμών που υπολογίσθηκαν από την ημιεμπειρική σχέση ήταν η μικρότερη δυνατή όπως και στην περίπτωση των 30MW.

- Για μεγαλύτερες αποστάσεις (> 100m) το γραμμικό πρότυπο δεν απέδωσε ασφαλή και ικανοποιητικά αποτελέσματα (βλέπε Εικόνα - 118). Για το λόγο αυτό έγιναν συγκρίσεις θερμοκρασίας με βάση τα πρότυπα ανάπτυξης ISO-834 και φωτιάς υδρογονανθράκων (HC Curve). Η σύγκριση με την καμπύλη ανάπτυξης κατά ISO-834 έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα σε μήκος 50 – 70m (Εικόνες 119 - 120) και το σχετικό σφάλμα ήταν της τάξης του 7.0 – 12.0% (Εικόνα - 142). Αντίθετα η σύγκριση των αποτελεσμάτων μέσω της καμπύλης HC Curve έδωσε σημαντικές αποκλίσεις σε όλα τα μήκη κατάντι της φωτιάς (30 – 100m) (Εικόνες 121-122) με το σχετικό σφάλμα να κυμαίνεται από 15.0 – 40.0% (Εικόνα - 143) ανεξάρτητα της πυκνότητας διακριτοποίησης. Επομένως η πρόβλεψη θερμοκρασίας για φωτιές μεγέθους 50MW σε οδικές σήραγγες, μπορεί να περιγραφεί ακριβέστερα από την καμπύλη ISO 834 καθώς αυτή χρησιμοποιήθηκε αρχικά για φωτιές σε κτίρια / εμπορικά κέντρα όπου η καύσιμη ύλη περιλαμβάνει αρκετές κατηγορίες καύσιμης ύλης (πλαστικό, χαρτί, υλικά συσκευασίας, αφρώδη) παρόμοια με το φέρον φορτίο φορτηγών οχημάτων (HGV) που δεν εντάσσονται στα επικίνδυνα φορτία.
- Η κατανομή της θερμοκρασίας καθ' ύψος της διατομής είναι στρωματοποιημένη σε διαδοχικά επίπεδα (βλέπε Εικόνες 135 - 136) καθ' όλη τη διάρκεια του φαινομένου. Τα επίπεδα θερμοκρασίας κυμαίνονται από 90 – 415 °C κατάντι του σημείου σε απόσταση 30 – 100m (βλέπε Εικόνες 116 -122). Παρόμοιες τιμές έχουν παρατηρηθεί και αποτελέσματα ερευνητικών εργασιών [29,30,33,] που βασίζονται σε πειραματικές δοκιμές πλήρους κλίμακας σε οδικές σήραγγες είτε χρησιμοποιώντας ως καύσιμη ύλη ελαφρύ πετρέλαιο / βενζίνη σε επιμήκεις σκάφες είτε παλαιά αμαξώματα IX / ημιφορτηγών.
- Παρατηρείται ανάπτυξη και διάδοση ρεύματος αναστροφής καπνού (backlayering) ανάντη του σημείου πυρκαγιάς που καλύπτει περίπου το 30% της ωφέλιμης διατομής (βλέπε Εικόνες 135-136)
- Οι γεωμετρικές διαστάσεις της φλόγας καλύπτουν σημαντικό τμήμα της διατομής κατά τη φάση ανάπτυξης (Εικόνα - 136).

Q= 100 MW

- Το λογισμικό FDS κατάφερε να προλέξει με ικανοποιητική ακρίβεια την χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας στην οροφή της σήραγγας σε απόσταση 10-50m κατάντι της φωτιάς με βάση το εκθετικό πρότυπο (βλέπε Εικόνα - 123). Οι συγκρίσεις θερμοκρασίας που έγιναν με βάση τα πρότυπα φωτιάς υδρογονανθράκων (HC Curve) έδωσαν πεπερασμένη ακρίβεια της τάξης 15 – 20% που βρίσκεται εντός των ορίων πιστοποίησης (Εικόνα -144). Επομένως η πρόβλεψη θερμοκρασίας για φωτιές μεγέθους 100MW σε οδικές σήραγγες χρησιμοποιώντας το εκθετικό πρότυπο ανάπτυξης, μπορεί να περιγραφεί ακριβέστερα από την καμπύλη φωτιάς υδρογονανθράκων παρόμοια με το φέρον φορτίο φορτηγών οχημάτων (HGV) που δεν εντάσσονται στα επικίνδυνα φορτία
- Το κρίσιμο μέγεθος του υπολογιστικού χωρίου ήταν ο αριθμός των κελιών κατά τον άξονα z (κατά ύψος της διατομής). Για αριθμό κελιών = 36, η απόκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων και των τιμών που υπολογίσθηκαν από την ημιεμπειρική σχέση ήταν η μικρότερη δυνατή.
- Για μεγαλύτερες αποστάσεις (> 100m) το εκθετικό πρότυπο υπερεκτίμησε τα επίπεδα θερμοκρασίας (βλέπε Εικόνα - 125) και το σφάλμα ήταν αρκετά υψηλό (Εικόνα – 145).
- Η κατανομή της θερμοκρασίας καθ' ύψος της διατομής είναι στρωματοποιημένη σε διαδοχικά επίπεδα (βλέπε Εικόνες 137 - 138) καθ' όλη τη διάρκεια του φαινομένου. Τα επίπεδα θερμοκρασίας κυμαίνονται από 90 – 675 °C κατάντι του σημείου σε απόσταση 30 – 100m (βλέπε Εικόνες 137 - 140)
- Παρατηρείται ανάπτυξη και διάδοση ρεύματος αναστροφής καπνού (backlayering) ανάντη του σημείου πυρκαγιάς που καλύπτει περίπου το 40% της ωφέλιμης διατομής (βλέπε Εικόνες 137 - 138)
- Οι γεωμετρικές διαστάσεις της φλόγας καλύπτουν το σύνολο της διατομής κατά τη φάση ανάπτυξης (Εικόνες 137 - 138) που είναι σύμφωνες με τα όσα αναπτύχθηκαν στο υποκεφάλαιο 2.6 για την περίπτωση μεγάλης φωτιάς.
- Τα επίπεδα θερμοκρασίας που παρατηρούνται πλησίον του σημείου ατυχήματος δυσχεραίνουν πολύ την αυτοδιάσωση και την ικανότητα διαφυγής των θυμάτων. Περισσότερα στοιχεία γύρω από τη διαδικασία εκκένωσης δίδονται στα κεφάλαια 7-8.

7

7. Επίδραση φωτιάς – επικινδυνότητα

Το παρόν κεφάλαιο πραγματεύεται την επίδραση της φωτιάς στους εμπλεκόμενους χρήστες της σήραγγας σε περίπτωση ατυχήματος όσο και στα δομικά μέρη της κατασκευής.

Από πραγματικά περιστατικά ατυχημάτων [Κεφ. 2] διαπιστώθηκε ότι οι κύριες επιδράσεις οφείλονται στις υψηλές τιμές θερμότητας που δέχονται οι χρήστες λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας συνέπεια γειννίασης τους με τη φλόγα καθώς και πρόσληψης αυξημένων συγκεντρώσεων σε τοξικούς αέριους ρύπους όπως το CO, σε συνδυασμό με συγκεντρώσεις άλλων αερίων όπως του CO₂ και O₂.

Παράλληλα μελετάται η επίδραση της θερμοκρασίας στα τοιχώματα της σήραγγας, ώστε να διερευνηθεί η πιθανότητα αποδόμησης του περιμετρικού θόλου εκ σκυροδέματος και του λοιπού Η/Μ εξοπλισμού (ανεμιστήρες αερισμού, φωτιστικά σώματα, καλωδιώσεις ασφαλείας) που οπωσδήποτε θα δυσχέραναν την προσπάθεια εκκένωσης / αυτοδιάσωσης των χρηστών.

7.1 Βασικοί ορισμοί

Στη συνέχεια δίδονται μερικοί χρήσιμοι ορισμοί που αφορούν τις βασικές έννοιες που απαντώνται στην πράξη :

Κίνδυνος – Απειλή, είναι οποιοδήποτε παράγοντας από φυσική, χημική, βιολογική ή άλλη αιτία είναι σε θέση να προκαλέσει βλάβη ή να θέσει σε κίνδυνο ανθρώπινες ζωές ή στο περιβάλλον. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η φωτιά αποτελεί το βασικό κίνδυνο λόγω των περίπλοκων χημικών αντιδράσεων και οι λοιποί κίνδυνοι αναφέρονται στις αυξημένες συγκεντρώσεις ρύπων και εκπομπής θερμότητας.

Επικινδυνότητα, αναφέρεται στην έκφραση της στατιστικής πιθανότητας να συμβεί μια οποιαδήποτε βλάβη όταν ένας χρήστης (ή το περιβάλλον) εκτεθεί σε πιθανό κίνδυνο ή απειλή.

Οι παραπάνω έννοιες συνδέονται μαθηματικά μέσω της σχέσης 7.1 :

$$R = H \times E \quad (7.1)$$

όπου ,

R, η επικινδυνότητα (risk)

H, ο κίνδυνος – απειλή (hazard)

E, η έκθεση στο κίνδυνο (exposure)

7.2 Επίδραση στον άνθρωπο

Οι βασικές επιδράσεις στον άνθρωπο προέρχονται εξαιτίας της ισχύος θερμότητας εκ συναγωγής και ακτινοβολίας [kW/m^2] και των τοξικών συγκεντρώσεων (CO , NO_x , SO_x) και των αλλαγών στις συγκεντρώσεις των μη-τοξικών ρύπων (CO , O_2).

7.2.1 Επίδραση θερμότητας

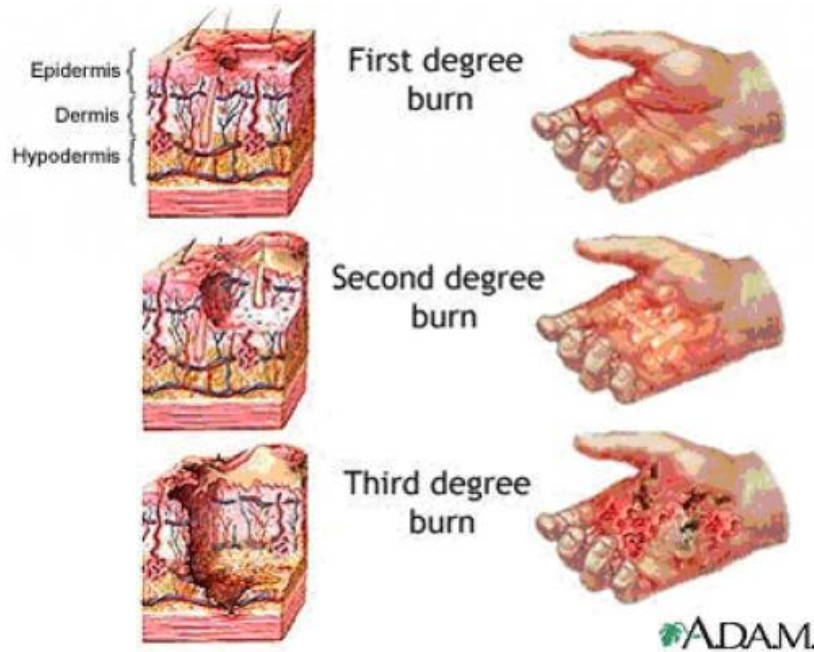
Οι κυριότεροι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η επίπτωση της θερμότητας στον άνθρωπο υπό την μορφή θερμικής ακτινοβολίας και συναγωγής είναι η ένταση της και ο χρόνος έκθεσης σε αυτή. Οι σημαντικότερες συνέπειες είναι η πρόκληση εγκαυμάτων λόγω της μεταφοράς θερμότητας στο δέρμα. Διακρίνονται τρεις τύπους εγκαυμάτων (βλέπε Εικόνα - 146) :

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

2^ο βαθμού: Η ζημιά επεκτείνεται στους ενδιάμεσους ιστούς του δέρματος (χόριο) προκαλώντας περαιτέρω οίδημα, οξύ πόνο και φουσκάλες. Η ανώτερη στοιβάδα της επιδερμίδας καταστρέφεται σε βάθος 0.07 – 0.12 mm)

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

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



Εικόνα 146 - Κατηγορίες θερμικών εγκαυμάτων

Για τον προσδιορισμό της προκαλούμενης βλάβης χρησιμοποιείται ο όρος «Δόση Θερμικής Ακτινοβολίας» που περικλείει όπως προαναφέρθηκε την ένταση και τον χρόνο έκθεσης και περιγράφεται μαθηματικά από την σχέση 7.2 [56]:

$$D = t_{eff} (q')^{4/3} \quad (7.2)$$

όπου,

D, δόση θερμικής ακτινοβολίας [$W^{4/3}s.m^{-8/3}$]

q' , η ροή της ακτινοβολούσας θερμότητας ανάλογα με τον τύπο της φωτιάς (τύπου λίμνης, πύρινης σφαίρας, πίδακα, κτλ) [W/m^2]

t_{eff} , ο χρόνος έκθεσης του ατόμου [s] στη θερμική ακτινοβολία που λαμβάνεται ίσος με το άθροισμα ενός αρχικού χρόνου αντίδρασης [t_r] και του χρόνου που απαιτείται να διανυθεί $\left(\frac{x_0 - r}{u}\right)$ για να φτάσει το άτομο σε ασφαλή σημείο με ταχύτητα βάρδισης u , σύμφωνα με τη σχέση 7.3:

$$t_{eff} = t_r + \frac{(x_0 - r)}{u} \quad (7.3)$$

Ανάλογα με την ένταση της θερμικής ακτινοβολίας είναι δυνατόν να προκληθούν άμεσες επιπτώσεις στους ανθρώπους ανάλογα με τον χρόνο έκθεσης, καθώς και δευτερεύουσες επιπτώσεις στα υλικά σύμφωνα με τον Πίνακα 7.1 [56]. Ενδεικτικά σημειώνεται ότι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας αντιστοιχεί σε 1.0 kW/m².

Πίνακας 7.1 – Επίπτωση έντασης θερμικής ακτινοβολίας σε ανθρώπους και υλικά

Ένταση θερμικής ακτινοβολίας [kW/m ²]	Επιπτώσεις σε υλικά	Επιπτώσεις σε ανθρώπους
37.5	Ικανό να προκαλέσει βλάβη σε εξοπλισμό	100% θνησιμότητα εντός 1 min 1% θνησιμότητα σε 10 sec
25.0	Ελάχιστο επίπεδο για να προκαλέσει ανάφλεξη ξύλου σε πολύ μεγάλες περιόδους έκθεσης	100% θνησιμότητα εντός 1 min Σοβαροί τραυματισμοί σε 10 s
12.5	Ελάχιστο επίπεδο για να προκληθεί ανάφλεξη ξύλου σε περίπτωση κατευθυνόμενης πρόσπτωσης καθώς και λιώσιμο πλαστικών σωλήνων	100% θνησιμότητα εντός 1 min Εγκαύματα 1 ^{ου} βαθμού σε 10 s
9.0		Επίπεδο πόνου μετά από 8 sec – Εγκαύματα δευτέρου βαθμού μετά από 20 sec
4.0		Ικανό να προκαλέσει το αίσθημα του πόνου σε προσωπικό που δεν μπορεί να καλυφθεί σε 20 sec. Εγκαύματα δευτέρου βαθμού είναι πιθανά, 0% θνησιμότητα
1.6		Δυσάρεστο αίσθημα για παρατεταμένη έκθεση

Με βάση την ένταση θερμικής ακτινοβολίας και τον ισοδύναμο ορισμό της δόσης, μπορεί να υπολογισθεί η πιθανότητα θανάτου ή πρόκλησης εγκαυμάτων σύμφωνα με τη σχέση 7.4:

$$P = F_k \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\operatorname{Pr} - 5}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad (7.4)$$

όπου ο όρος Pr καλείται εμπειρική συνάρτηση καταπόνησης και δίδεται από τη σχέση 7.5 :

$$\operatorname{Pr} = c_1 + c_2 \ln D \quad (7.5)$$

Ο αδιάστατος συντελεστής F_k αναφέρεται στην επίδραση της ένδυσης στη πιθανότητα θανάτου ή πρόκλησης εγκαυμάτων. Λαμβάνει τιμές από 0.14 για περίπτωση χειμερινής ένδυσης και 0.95 για θερινή ένδυση (μικρή κάλυψη δέρματος)

Αντικαθιστώντας την τιμή του Pr στην εξίσωση (7.4) είναι δυνατόν να υπολογιστεί η πιθανότητα πρόκλησης θανάτου ή εγκαυμάτων 1^{ου} & 2^{ου} βαθμού ανάλογα με τις τιμές των συντελεστών c_1 , c_2 σύμφωνα με τον Πίνακα 7.2:

Πίνακας 7.2 – Συντελεστές υπολογισμού πιθανότητας εγκαυμάτων

Επίπτωση	c_1	c_2
Εγκαύματα 1 ^{ου} βαθμού	-39.83	3.0186
Εγκαύματα 2 ^{ου} βαθμού	-43.14	3.0186
Θάνατοι	-36.38	2.5600

7.2.2 Επίδραση τοξικών ρύπων

Η διασπορά επικίνδυνων τοξικών ρύπων κατά τη χρονική εξέλιξη της φωτιάς στο εσωτερικό της σήραγγας δυσχεραίνει τη διαδικασία εκκένωσης και αυτοδιάσωσης των χρηστών. Οι επιδράσεις των τοξικών ρύπων – που θεωρούνται ως χημικοί παράγοντες – εξαρτώνται από την ένταση και τον χρόνο έκθεσης των ατόμων σε αυτούς. Για το σκοπό αυτό δίδονται στη συνέχεια οι ορισμοί εκφράσεων των Οριακών Τιμών εκφρασμένες σε $[mg/m^3]$ είτε σε $[ppm]$ σε κανονικές συνθήκες, σύμφωνα με την Αμερικάνικη Εταιρεία Κυβερνητικών Υγιεινολόγων Βιομηχανίας (American Conference of Governmental Industrial Hygienists – ACGIH):

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

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

Παράλληλα με την Οριακή Τιμή έχει καθιερωθεί και η Ανώτατη Οριακή Τιμή Έκθεσης, που ορίζεται ως η τιμή την οποία δεν επιτρέπεται να ξεπερνά η μέση χρονικά σταθμισμένη έκθεση του ατόμου στον χημικό παράγοντα, μετρημένη στη ζώνη του αέρα αναπνοής του, κατά τη διάρκεια οποιαδήποτε δεκαπεντάλεπτης περιόδου στο τυπικό ημερήσιο χρόνο έκθεσης του ακόμα και αν τηρείται η οριακή τιμή έκθεσης

Ο βασικός τοξικός ρύπος που μετριέται στις περισσότερες πειραματικές διατάξεις είναι το μονοξείδιο του άνθρακα (CO). Η συγκέντρωση αναφοράς στον άνθρωπο εξαρτάται από τις συνθήκες του. Για παράδειγμα βρέθηκε ότι σε καπνιστές και σε ανθρώπους που ζουν σε μεγάλες πόλεις (εξαιτίας της ατμοσφαιρικής ρύπανσης) η συγκέντρωση στο αίμα είναι αυξημένη. Στον Πίνακα – 7.3 [57], δίδονται περιληπτικά τα παρατηρούμενα συμπτώματα ανάλογα με τα επίπεδα του εισπνεόμενου CO και της συγκέντρωσης του COHb στο αίμα.

Πίνακας 7.3 – Συμπτώματα επίδρασης μονοξειδίου άνθρακα στον ανθρώπινο οργανισμό

Συγκέντρωση CO στον εισπνεόμενο αέρα	Επίπεδα COHb	Συμπτώματα
35 ppm	< 10%	Πονοκέφαλος και ζαλάδες μετά από 6-8 ώρες συνεχόμενης έκθεσης
100 ppm	> 10%	Ελαφρύς πονοκέφαλος μέσα σε 2-3 h
200 ppm	20%	Ελαφρύς πονοκέφαλος μέσα σε 2-3 h και απώλεια συνείδησης
400 ppm	25%	Μετωπιαία κεφαλαλγία σε 60 – 120 min
800 ppm	30%	Ζαλάδες -ναυτία στα πρώτα 45min. Αναισθησία σε 120 min
1600 ppm	40%	Πονοκέφαλος και ζαλάδες - ναυτία στα πρώτα 20min. Θάνατος μέσα σε 120 min
3200 ppm	50%	Πονοκέφαλος και ζαλάδες - ναυτία στα πρώτα 5-10min. Θάνατος μέσα σε 30 min
6400 ppm	60%	Πονοκέφαλος και ζαλάδες στα πρώτα 1-2min. Σπασμοί, διακοπή αναπνοής και θάνατος σε λιγότερο από 20 min
12800 ppm	> 70%	Θάνατος εντός 3 min

7.2.3 Επίδραση μη-τοξικών ρύπων

Οι αυξημένες συγκεντρώσεις του CO₂ που γενικά δεν θεωρείται τοξικός ρύπος, επιταχύνει την συχνότητα της αναπνευστικής λειτουργίας και ως αποτέλεσμα παρατηρείται αυξημένη πρόσληψη των υπόλοιπων τοξικών ρύπων (CO, NO_x, SO_x) που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Αντίθετα η μειωμένη συγκέντρωση του O₂ συνέπεια των καταναλισκόμενων ποσοτήτων κατά την καύση έχει ως συνέπεια την ανεπαρκή οξυγόνωση των ιστών και του αίματος και την μειωμένη ανατακλαστική ικανότητα του ανθρώπου να συνεχίσει την διαδικασία αυτοδιάσωσης κατά την εκκένωση της σήραγγας.

7.3 Επίδραση στην κατασκευή

Με βάση πειραματικές μετρήσεις που έγιναν στην σήραγγα Runehamar διαπιστώθηκε ότι η μέγιστη θερμοκρασία φλόγας και του καπνού κοντά στο σημείο, ήταν περίπου 1300 C για μεγέθη πυρκαγιάς της τάξης των 100 MW.

Με βάση βιβλιογραφική έρευνα [61-62] και τους Κανονισμούς του Ευρωκώδικα 2/3 [63-64] οι μέγιστες επιτρεπόμενες θερμοκρασίες για τα διάφορα επιμέρους στοιχεία του εξοπλισμού δίδονται στον Πίνακα 7.4:

Πίνακας 7.4 – Θερμοκρασίες αποδόμησης δομικών υλικών

Στοιχείο εξοπλισμού	Θερμοκρασία αστοχίας [°C]
Μεταλλικά στοιχεία χυτοσίδηρου	350 – 400
Επί τόπου στοιχεία έκχυτου σκυροδέματος	300 – 350
Προκατασκευασμένα στοιχεία σκυροδέματος	700 – 800
Ενισχύσεις από χάλυβα	500 – 600
Αγκύρια ανεμιστήρων αερισμού	700 – 750
Κέλυφος ανεμιστήρων αερισμού	400 – 500

Η επίδραση της θερμοκρασίας στην απομείωση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος και του ορίου διαρροής σε εφελκυσμό για τον χάλυβα περιγράφεται μαθηματικά από τις σχέσεις 7.6-7.7[62]

$$f_c^T = \frac{f_c}{1 + 24 \left(\frac{T - 20}{1000} \right)^6}, \quad (7.6)$$

$$f_y^T = \frac{f_y}{1 + 24.4 \left(\frac{T - 20}{1000} \right)^{4.5}} \quad (7.7)$$

όπου,

(f_c^T) , θλιπτική αντοχή σκυροδέματος σε θερμοκρασία T_a [MPa]

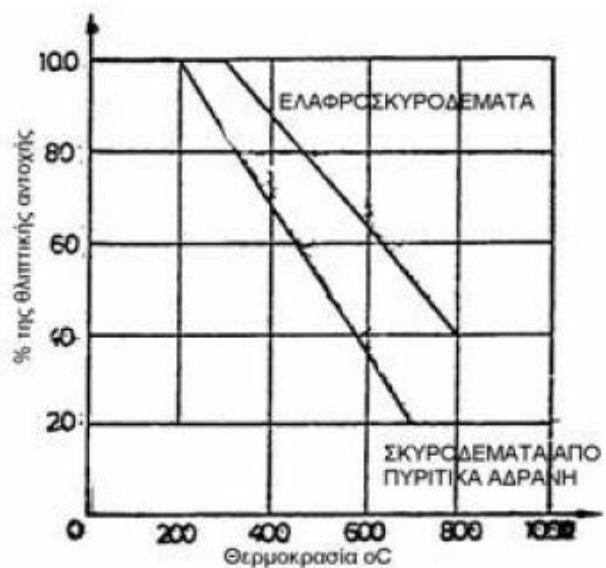
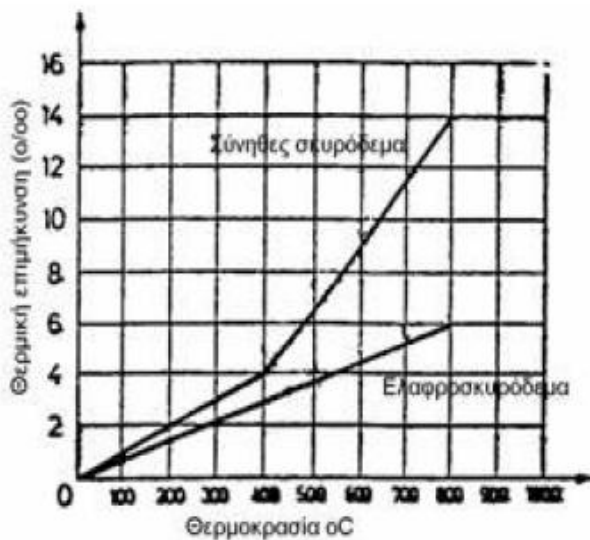
(f_c) , θλιπτική αντοχή σκυροδέματος σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (Κ.Σ) [MPa]

(f_y^T) , όριο διαρροής σε εφελκυσμό για χάλυβα σε θερμοκρασία T [MPa]

(f_y) , όριο διαρροής σε εφελκυσμό για χάλυβα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (Κ.Σ)

Στη συνέχεια δίδονται χαρακτηριστικές καμπύλες για διάφορους τύπους σκυροδέματος που απαντώνται στη πράξη (Εικόνα - 147).

Στη συνέχεια δίδονται χαρακτηριστικές καμπύλες για διάφορους τύπους σκυροδέματος που απαντώνται στη πράξη (Εικόνα - 147).



Εικόνα 147 – Διαγράμματα μεταβολής θερμικής επιμήκυνσης και μείωσης θλιπτικής για κατηγορίες σκυροδέματος συναρτήσει της θερμοκρασίας

Με βάση τα διαγράμματα της Εικόνας 147 παρατηρείται ότι ο ρυθμός υποβάθμισης της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος είναι εντονότερος σε σχέση με την μείωση του ορίου διαρροής του χάλυβα οπλισμού. Γενικά η παραμονή του χάλυβα σε υψηλές θερμοκρασίες έχει ως αποτέλεσμα σημαντική υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων ανάλογα με την χημική σύσταση, την μέθοδο παραγωγής και την προϊστορία σύστασης του υλικού. Διακρίνονται τρεις (3) σημαντικές περιοχές :

- Για όλες τις κατηγορίες χαλύβων οπλισμού, θέρμανση έως και 500 C για χρόνους μέχρι 2h και ελεύθερη ψύξη σε αέρα περιβάλλοντος δεν δημιουργεί ιδιαίτερα προβλήματα στις αρχικές μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Για μεγαλύτερους χρόνους έκθεσης είναι δυνατόν να παρατηρηθούν σημαντικές μειώσεις.
- Για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 500 C, μειώνεται δραματικά το όριο διαρροής καθώς και η συνάφεια με το σκυρόδεμα
- Για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 550 C, παρατηρούνται επιπλέον αλλαγές στη μηχανική συμπεριφορά εξαιτίας επιπρόσθετων αλλαγών στη μικροδομή.

Ως συνέπεια της αλλαγής των μηχανικών ιδιοτήτων εξαιτίας της θερμοκρασίας, στα δομικά μέρη της κατασκευής πιθανόν να οδηγήσουν στο φαινόμενο της αποκόλλησης (βλέπε Εικόνες 148-149).

Ως αποκόλληση ορίζεται η βίαιη ή μη-βίαιη διακοπή στρωμάτων ή τμημάτων του σκυροδέματος από την επιφάνεια του δομικού στοιχείου (π.χ σε προκατασκευασμένα στοιχεία) όταν εκτίθεται σε υψηλές θερμοκρασίες. Στις πυρκαγιές στο εσωτερικό σηράγγων είναι δυνατόν να παρατηρηθεί κατά τη διάρκεια των πρώτων 20 – 30 min. Το φαινόμενο παρουσιάζεται σε τέσσερις μορφές :

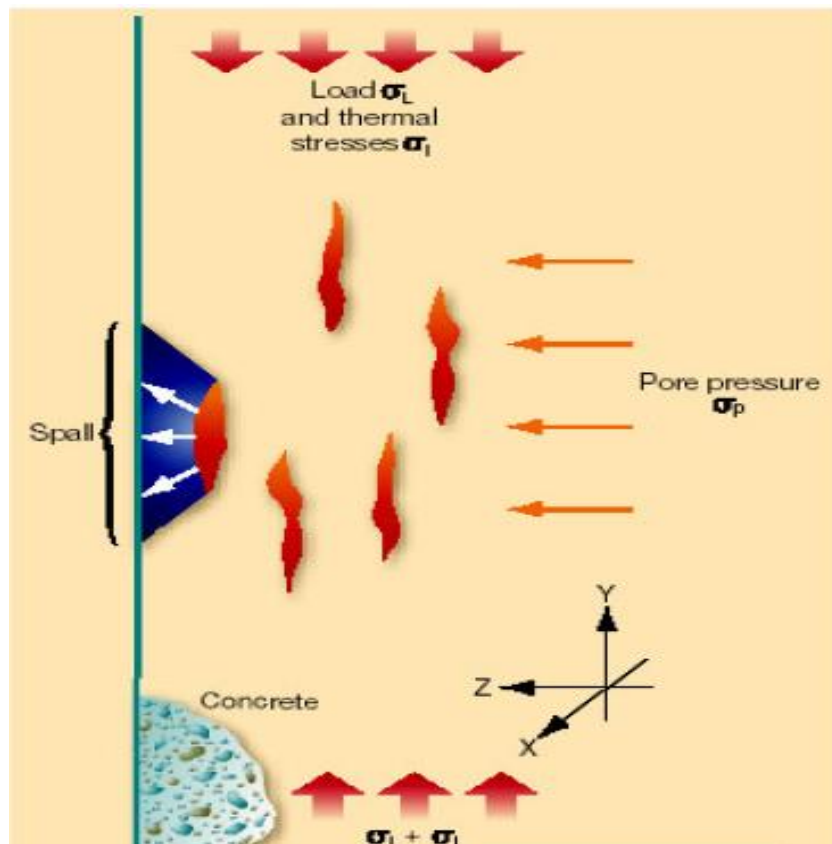
- Αποκόλληση αδρανών
- Εκρηκτική αποκόλληση
- Επιφανειακή αποκόλληση
- Γωνιακή αποκόλληση

Οι τρεις πρώτες περιπτώσεις παρουσιάζονται στα αρχικά στάδια της πυρκαγιάς (20 – 30 min) ενώ η τελευταία εκδηλώνεται στο διάστημα 30 – 60 min από την αρχή της φωτιάς. Ως βίαιες και σοβαρότερες μορφές αποκόλλησης θεωρούνται η εκρηκτική και επιφανειακή.

Οι μηχανισμοί αποκόλλησης είναι εξαιτίας (α) της πίεσης των πόρων, (β) των θερμικών τάσεων και (γ) συνδυασμό των ανωτέρω.

Ανάλογα με τη κρισιμότητα της έκτασης του προβλήματος / βλάβης είναι δυνατόν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής :

- Ασήμαντη (για βάθος ≤ 12 mm)
- Προχωρημένη (για βάθος > 12 mm μέχρι και 25mm)
- Σοβαρή (για βάθος > 25 mm) όπου αποκαλύπτονται τμήματα του σιδηρού σπλισμού



Εικόνα 148 - Μηχανισμός αποκόλλησης (spalling)



Εικόνα 149 - Αποκόλληση σε τμήμα οροφής (Κατηγορία : Σοβαρή)

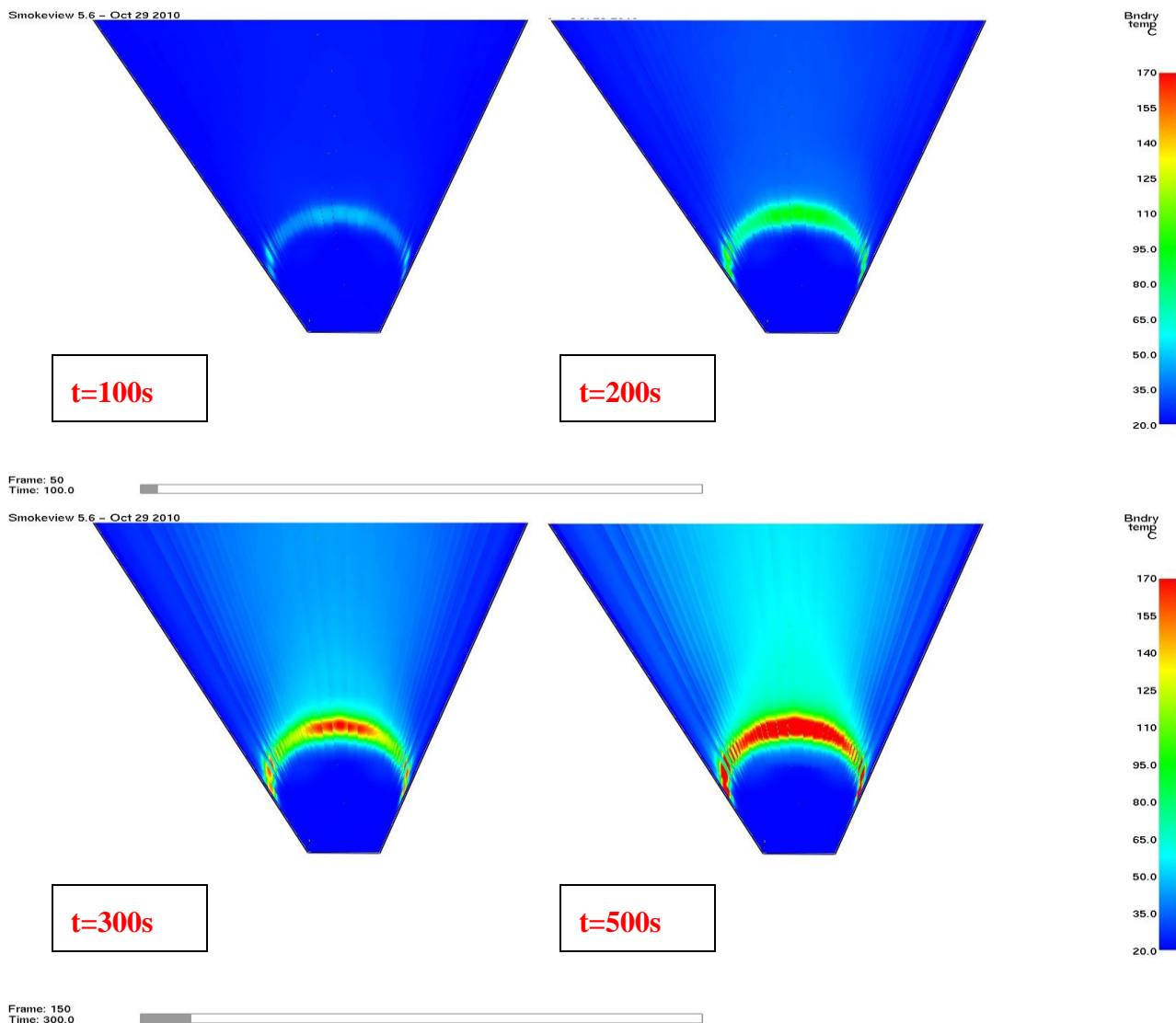
7.4 Αποτελέσματα επιφανειακής θερμοκρασίας

Στη συνέχεια παρατίθενται αποτελέσματα του λογισμικού FDS που αφορούν την κατανομή της θερμοκρασίας των περιμετρικών τοιχωμάτων κατά μήκος της σήραγγας υπό μορφή των Εικόνων 150 - 153 για περιπτώσεις μεγέθους πυρκαγιάς 30 & 50 MW. Μεγαλύτερα μεγέθη πυρκαγιάς (> 100MW) που αντιστοιχούν σε εμπλοκή βαρέων οχημάτων και επικίνδυνων φορτίων – καυσίμων δεν εξετάστηκαν δεδομένου ότι σύμφωνα με τους κανονισμούς ασφαλείας της Εγνατίας Οδού απαιτείται ειδική άδεια και όχημα συνοδείας για τη διέλευση επικίνδυνων φορτίων.

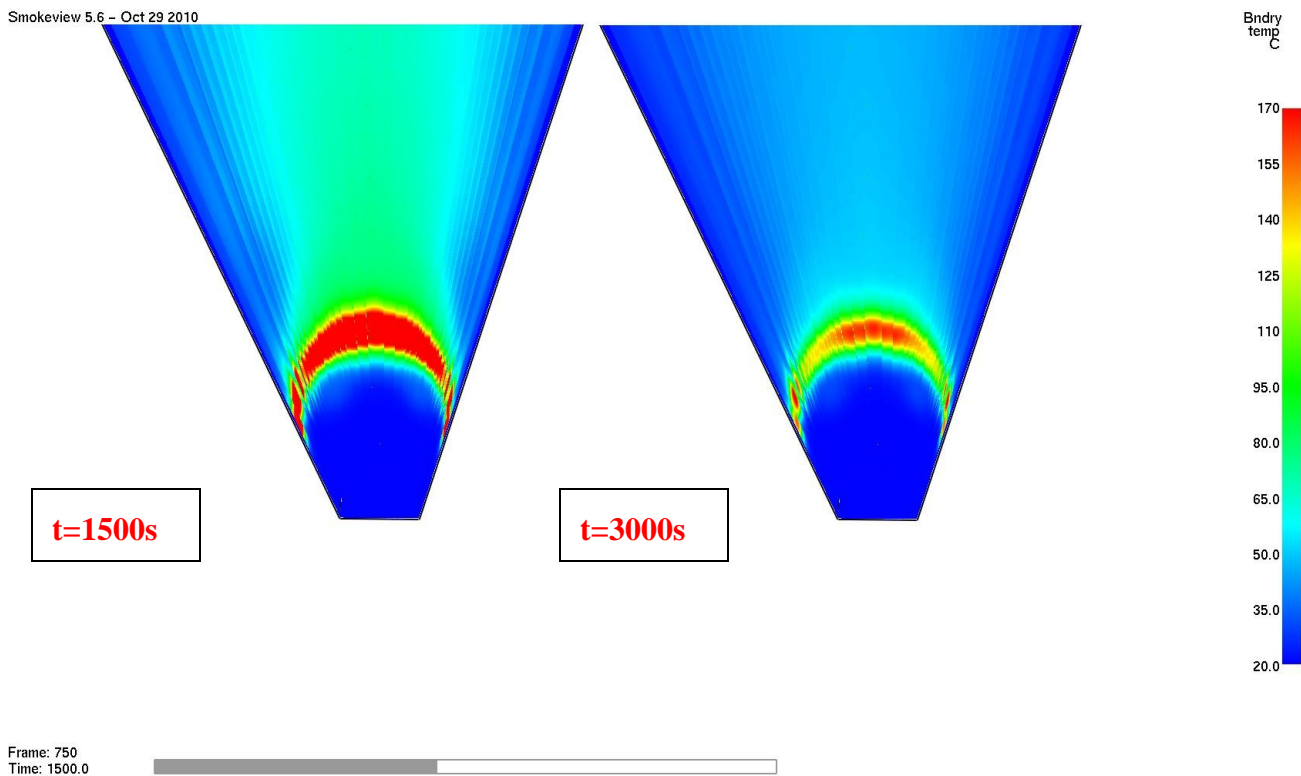
Το λογισμικό FDS επιλύει την κατανομή της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του θόλου της σήραγγας χρησιμοποιώντας πεπερασμένο αριθμό κελιών κατά το μοναδιαίο πάχος μέσω του μηχανισμού της μονοδιάστατης αγωγής.

Από τη μορφή των εικόνων διαπιστώνεται ότι οι μέγιστες θερμοκρασίες για μέγεθος πυρκαγιάς 30MW στην επιφάνεια των τοιχωμάτων της σήραγγας (δάπεδο + περιμετρικός θόλος) δεν υπερβαίνουν τις κρίσιμες θερμοκρασίες καθ' όλη τη διάρκεια του φαινομένου ($t_d = 3300$ sec) για την έναρξη αποδόμησης των προκατασκευασμένων στοιχείων σκυροδέματος είτε του δομικού χάλυβα σύμφωνα με τις τιμές του Πίνακα – 7.4 .

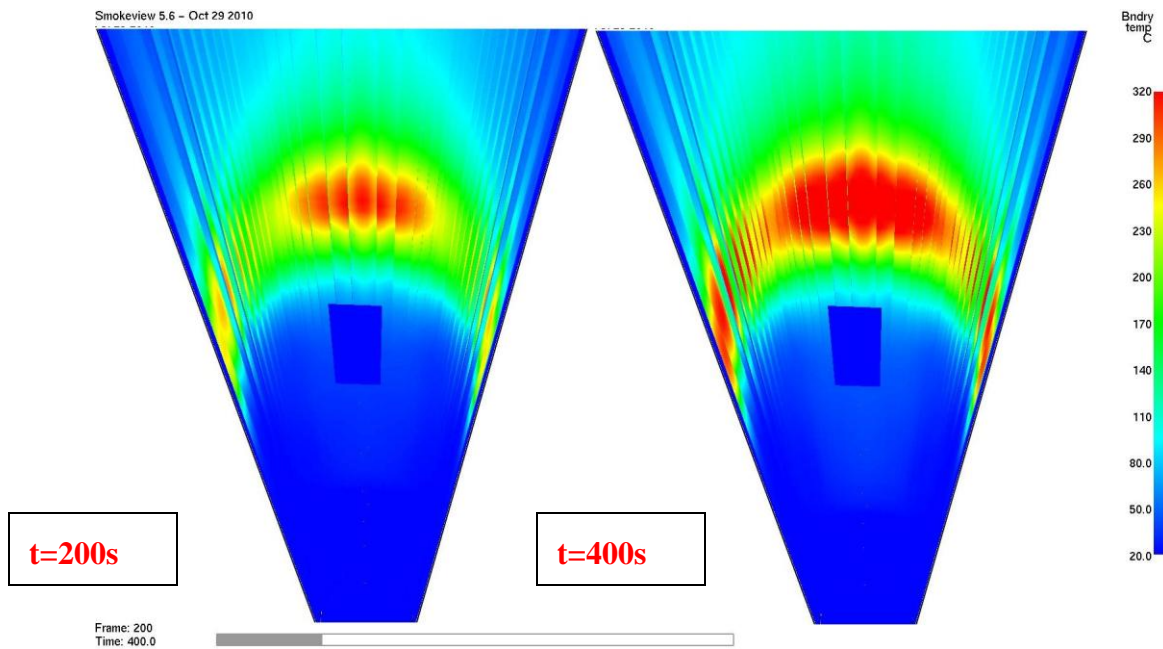
Αντίστοιχα για μέγεθος πυρκαγιάς 50MW στην επιφάνεια των τοιχωμάτων της σήραγγας (δάπεδο + περιμετρικός θόλος) τα επίπεδα θερμοκρασίας είναι της τάξης των 400 – 420C όπως φαίνεται στις Εικόνες 152 - 153 και επομένως υπερβαίνουν ελαφρά τις κρίσιμες θερμοκρασίες για την έναρξη αποδόμησης των προκατασκευασμένων στοιχείων σκυροδέματος (350C) είτε του δομικού χυτοσιδήρου (400 C). Θα πρέπει να τονισθεί ότι η θερμοκρασία αφορά την επιφάνεια του θόλου και όχι αυτή που είναι στο εσωτερικό του προκατασκευασμένου στοιχείου δεδομένης και της θερμικής αποθήκευσης των δομικών υλικών (χάλυβας, σκυρόδεμα).



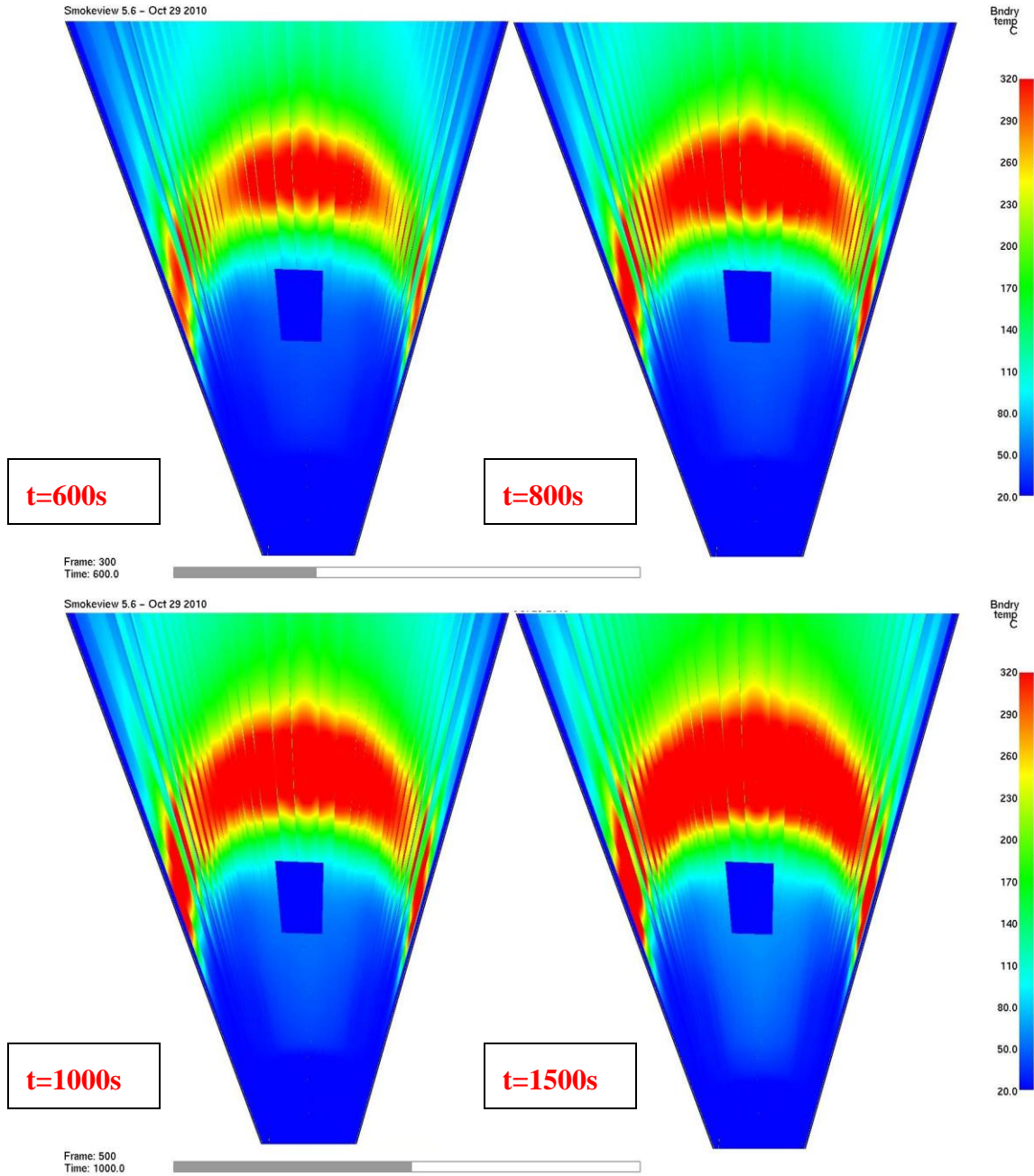
Εικόνα 150 - Κατανομή επιφανειακής θερμοκρασίας στη οροφή σήραγγας για μέγεθος πυρκαγιάς 30MW σε χρόνο 100-200-300-500 sec



Εικόνα 151 - Κατανομή επιφανειακής θερμοκρασίας στη οροφή σήραγγας για μέγεθος πυρκαγιάς 30MW σε χρόνο 1500-3000 sec



Εικόνα 152 - Κατανομή επιφανειακής θερμοκρασίας στη οροφή σήραγγας για μέγεθος πυρκαγιάς 50MW σε χρόνο 200-400sec



Εικόνα 153 - Κατανομή επιφανειακής θερμοκρασίας στη οροφή σήραγγας για μέγεθος πυρκαγιάς 50MW σε χρόνο 600 – 800 – 1000 – 1500 sec

8

8. Διαδικασία Εκκένωσης

8.1 Εκκένωση με ίδια μέσα - αυτοδιάσωση

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

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

- Την περίοδο συνειδητοποίησης του γεγονότος, που εξαρτάται από την αντίδραση των χρηστών να αντιληφθούν τη σοβαρότητα της κατάστασης και την ανάγκη ανάληψης συγκεκριμένων πρωτοβουλιών. Ιδιαίτερα στα πρώτα λεπτά της πυρκαγιάς, όπου ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας είναι ακόμα χαμηλός και παρατηρούνται χαμηλές εκπομπές καπνού και η ορατότητα δεν είναι περιορισμένη, οι χρήστες παρουσιάζουν εσφαλμένη αντίληψη και δυσπιστούν αναφορικά με τη σοβαρότητα της κατάστασης.
- Τη περίοδο απομάκρυνσης, δηλαδή τον απαιτούμενο χρόνο για να διανυθεί η απόσταση μέχρι την ασφαλή θέση. Ο χρόνος αυτός εξαρτάται από την ορατότητα της διαδρομής, την ύπαρξη

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

8.2 Το λογισμικό FDS+Evac

Το λογισμικό FDS+Evac αναπτύχθηκε με σκοπό την προσομοίωση εκκένωσης χρηστών ταυτόχρονα με τις περιπτώσεις πυρκαγιάς ή έκλυσης τοξικών ρύπων από το Φιλανδικό Τεχνολογικό Κέντρο Έρευνας & Ανάπτυξης (VVT – Finland) [65]. Αποτελεί ανεξάρτητο προσάρτημα του βασικού λογισμικού FDS που αναπτύχθηκε από το Εθνικό Ινστιτούτο Προτύπων (NIST) στις ΗΠΑ.

Η κύρια χρήση του είναι για την προσομοίωση εκκένωσης κτιρίων, πολυκαταστημάτων, εμπορικών και αθλητικών κέντρων, κ.ά, με πολύωροφα επίπεδα που συνδέονται μεταξύ τους μέσω κεντρικού κλιμακοστασίου. Ο μέγιστος αριθμός ατόμων που δύναται να προσομοιωθεί είναι 10.000 με πυκνότητα 4 άτομα / m².

Η έκδοση του λογισμικού βρίσκεται σε συνεχή διαδικασία πιστοποίησης με πειραματικά δεδομένα κυρίως σε εμπορικά κέντρα και πλοία σύμφωνα με τους κανονισμούς ασφαλείας [66] καθώς και σε συγκριτική αξιολόγηση με παρόμοια λογισμικά προσομοίωσης εκκένωσης [67].

Οι περιορισμοί ακρίβειας στη χρήση του λογισμικού εντοπίζονται κυρίως στη χρήση ορθογωνικού πλέγματος σε δυο διαστάσεις (η διάσταση z περιέχει πάντα ένα κελί). Το μέγεθος του πλέγματος συστήνεται να είναι της τάξης των 25cm ή και μεγαλύτερο ώστε να είναι συγκρίσιμο με την περιφέρεια ενός ενήλικα. Μικρότερες τιμές αποδείχθηκε ότι καθυστερούν τη σύγκλιση είτε δεν δίδουν καθόλου αποτελέσματα. Αντίστοιχα τα ανοίγματα διαφυγής πρέπει να διαθέτουν επαρκές άνοιγμα τουλάχιστον 70cm που είναι περίπου το άνοιγμα των ώμων ενός ενήλικα.

Άλλοι περιορισμοί στις παραμέτρους λογισμικού έχουν να κάνουν με τον απλοποιημένο αλγόριθμο επιλογής εξόδου διαφυγής (π.χ. όταν ένα άτομο επιλέξει μια έξοδο διαφυγής κινείται προς αυτή αγνοώντας τυχόν άλλες εξόδους όπου στην διάρκεια της εκκένωσης πιθανόν να «φαίνονται» πιο ασφαλείς), την συντεταγμένη συμπεριφορά κατά τη διαφυγή χωρίς να παρατηρούνται καταστάσεις

πανικού και βίαιης συμπεριφοράς προς τους υπόλοιπους χρήστες. Το λογισμικό Evac είναι στη βάση του στοχαστικό πρότυπο και η διαδικασία επίλυσης περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια :

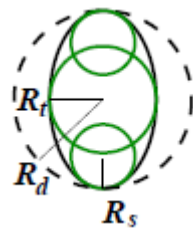
- Αρχική τυχαιοποίηση της θέσης των ατόμων στο πλέγμα διακριτοποίησης
- Εκτίμηση των χρόνων ανίχνευσης και αντίδρασης
- Έναρξη της διαδικασίας εκκένωσης
- Υπολογισμό κρίσιμων μεγεθών (συνολικός χρόνος εκκένωσης, θερμική έκθεση, συγκεντρώσεις βλαπτικών παραγόντων, υπολογισμός FED)

Για να αναγνωρισθεί η επίδραση της αρχικής τυχαιοποίησης της θέσης των ατόμων στο πλέγμα εκτελούνται αρχικά διαδοχικά τρεξίματα μόνο για την περίπτωση εκκένωσης χωρίς τη επίδραση φωτιάς και καπνού. Τα αποτελέσματα για την θέση, την ταχύτητα εξόδου, την χρονική διάρκεια αντίδρασης και διαφυγής είναι υπό μορφή φύλλου εργασίας σε κάθε χρονικό βήμα.

Στη συνέχεια εκτελείται μία φορά ταυτόχρονη επίλυση εκκένωσης + φωτιάς και τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται στο επόμενο στάδιο, όπου και αντλούνται από νέα διαδοχικά τρεξίματα για να εκτιμηθεί η επίδραση του καπνού και φωτιάς στη δυσκολία κίνησης των ατόμων.

8.3 Μαθηματική περιγραφή - Βασικές παράμετροι

Κατά τη διαδικασία εκκένωσης, το λογισμικό αντιμετωπίζει ξεχωριστά τη συμπεριφορά κάθε χρήστη. Αυτό επιτρέπει την εισαγωγή φυσικών όσο και «ψυχολογικών» δυνάμεων που επιδρούν στον χρόνο αντίδρασης και διαφυγής του χρήστη. Προτού δοθεί η μαθηματική περιγραφή των εξισώσεων κίνησης, θα περιγραφεί η βασική γεωμετρία του ανθρώπινου σώματος που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση. Το σχήμα του ανθρώπινου σώματος προσεγγίζεται από το συνδυασμό τριών επικαλυπτόμενων κύκλων σύμφωνα με την Εικόνα - 154 :



Εικόνα 154 - Απλοποιημένο μοντέλο σωματοδομής

όπου οι επιμέρους ακτίνες δίδονται ανάλογα με τη σωματοδομή του ατόμου σύμφωνα με τον Πίνακα 8.1 (όπου σημειώνονται επίσης και οι ονομαστικές ταχύτητες διαφυγής για κανονικές συνθήκες) :

Πίνακας 8.1 – Κατηγορίες ανθρώπων / Γεωμετρικά και κινηματικά στοιχεία

Τύπος ατόμου	R_d [m]	R_t / R_d [-]	R_s / R_d [-]	d_s / R_d [-]	Ταχύτητα [m/s]
Ενήλικας	0.255±0.035	0.5882	0.3725	0.6275	1.25±0.30
Άνδρας	0.270±0.020	0.5926	0.3704	0.6296	1.36±0.20
Γυναίκα	0.240±0.020	0.5833	0.3750	0.6250	1.15±0.20
Παιδί	0.210±0.015	0.5714	0.3333	0.6667	0.90±0.30
ηλικιωμένος	0.250±0.020	0.6000	0.3600	0.6400	0.80±0.30

Ανάλογες τιμές για την ονομαστική ταχύτητα διαφυγής μπορούν να βρεθούν ανατρέχοντας στην βιβλιογραφία σύμφωνα με τις κατευθυντήριες οδηγίες της PIARC [12-13] αφού ληφθούν υπόψη η επίδραση της θερμοκρασίας και της μειωμένης ορατότητας

Οι βασικές εξισώσεις που διέπουν την συμπεριφορά κατά τη διαδικασία εκκένωσης είναι οι εξισώσεις κίνησης που περιγράφονται από γενικευμένη σχέση 8.1:

$$m_i \frac{d^2 x_i(t)}{dt^2} = f_i(t) + \xi_i(t) \quad (8.1)$$

όπου,

m_i , μάζα ατόμου

f_i , δύναμη που εξασκείται στο εμπλεκόμενο άτομο από τον περίγυρο του

ξ_i , διακυμαινόμενη δύναμη

x_i , διανυόμενη απόσταση

Η εξασκούμενη δύναμη έχει πολλές συνιστώσες που δίδονται από την σχέση 8.2 :

$$f_i = \frac{m_i}{\tau_i} (v_i^0 - v_i) + \sum_{j \neq i} (f_{ij}^{soc} + f_{ij}^c + f_{ij}^{att}) + \sum_w (f_{iw}^{soc} + f_{iw}^c) + \sum_k f_{ik}^{att} \quad (8.2)$$

όπου τα επιμέρους αθροίσματα περιγράφουν διαδοχικά την αλληλεπίδραση μεταξύ χρηστών, την αλληλεπίδραση χρήστη – τοιχωμάτων και την αλληλεπίδραση ανάμεσα στον χρήστη και σε άλλους περιβαλλοντικούς παράγοντες. Η ταχύτητα αναφοράς του χρήστη προς την ασφαλή έξοδο διαφυγής είναι ίση με v_i^0 , ενώ ο συντελεστής χαλάρωσης τ_i αναφέρεται στην κινούσα «ψυχολογική» δύναμη που επιτρέπει στον χρήστη να επιταχύνει (εφόσον είναι δυνατόν) προς την ασφαλή θέση.

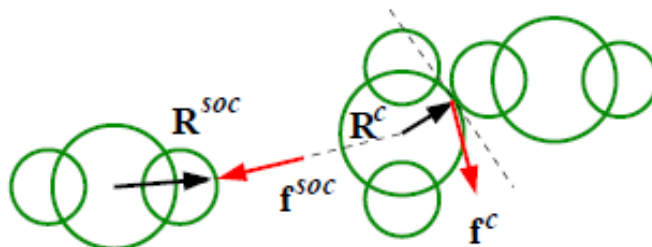
Οι επιμέρους όροι που αφορούν την αλληλεπίδραση μεταξύ χρηστών, περιγράφονται αναλυτικότερα από τις σχέσεις 8.3 – 8.4 ως εξής:

$$- \quad f_{ij}^{soc} = A_i e^{-(d_{ij}-r_{ij})/B_i} \left(\lambda_i + (1 + \lambda_i) \frac{1 + \cos \phi_{ij}}{2} \right) n_{ij} \quad (8.3)$$

όπου αναφέρεται στη «κοινωνική» δύναμη μεταξύ χρηστών και ο παράγοντας λ αναφέρεται στον συντελεστή ανισοτροπίας της εξασκουμένης δύναμης στο άτομο κατά την φορά κίνησης από την εμπρόσθια και την οπίσθια μεριά. Για $\lambda=1$ θεωρείται ισότροπη δύναμη δηλαδή το άτομο δέχεται την ίδια δύναμη εμπρός και πίσω από αυτό.

$$- \quad f_{ij}^c = (k_{ij}(r-d) + c_d \Delta v_{ij}^n) n_{ij} + \kappa_{ij}(r-d) \Delta v_{ij}^t t_{ij} \quad (8.4)$$

όπου αναφέρεται στη φυσική δύναμη επαφής μεταξύ χρηστών όπου οι χρήστες προσομοιώνονται ως ελαστικές σφαίρες. Τα επιμέρους μεγέθη Δv αναφέρονται στις διαφορές της κάθετης γραμμικής και εφαπτομενικής ταχύτητας όταν οι δυο χρήστες έρχονται σε επαφή σύμφωνα με την Εικόνα -155:



Εικόνα 155 - Διάγραμμα εφαρμογής δυνάμεων κατά την σύγκρουση χρηστών

Εκτός από την μεταφορική κίνηση, κατά τη διαδικασία εκκένωσης εξασκούνται επίσης και περιστροφικές δυνάμεις και στροφορμές – για την περίπτωση που δυο άτομα έρχονται σε επαφή υπό γωνία που περιγράφεται μαθηματικά από την σχέση 8.5 :

$$I_i^z \frac{d^2\phi(t)}{dt} = M_i^z(t) + n_i^z(t) \quad (8.5)$$

όπου :

$\phi(t)$, γωνία που διατηρεί το άτομο (i) κατά το χρόνο t

I_i^z , ροπή αδρανείας

$n_i^z(t)$, μικρή διακυμαινόμενη ροπή

$M_i^z(t)$, ροπή που εξασκείται στο άτομο από το γειτονικό του περιβάλλον και περιγράφεται από τη σχέση 8.6

$$M_i^z(t) = M_i^c(t) + M_i^{soc}(t) + M_i^r(t) \quad (8.6)$$

όπου :

$M_i^c = \sum_{j \neq i} (R_i^c \times f_{ij}^c)$, ροπή λόγω δυνάμεων επαφής

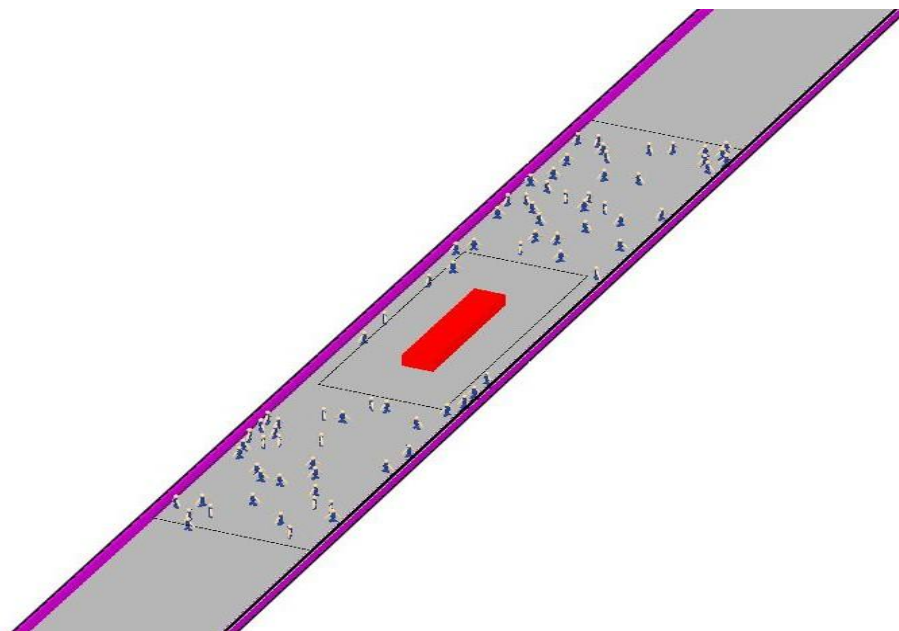
$M_i^{soc} = \sum_{j \neq i} (R_i^{soc} \times f_{ij}^{soc})$, ροπή λόγω κοινωνικών δυνάμεων

$M_i^r(t) = \frac{I_i^z}{\tau_i^z} \left(\frac{\phi_i(t) - \phi_i^0}{\pi} \omega^0 - \omega_i(t) \right) = \frac{I_i^z}{\tau_i^z} (\omega_i^0(t) - \omega_i(t))$, ροπή λόγω ψυχολογικών δυνάμεων / κινήτρου

8.4 Διακριτοποίηση

Για την προσομοίωση της εκκένωσης, επιλέχθηκε το δυσμενέστερο σενάριο εμπλοκής όσον αφορά τον μέγιστο αριθμό χρηστών που αντιστοιχεί σε φωτιά λεωφορείου με ισχύ πυρκαγιάς 30MW που εξελίσσεται σύμφωνα με το γραμμικό πρότυπο. Ο συνολικός αριθμός ατόμων είναι 80 άτομα που αντιστοιχούν στους επιβάτες του λεωφορείου και των πλησιέστερων ακινητοποιημένων οχημάτων που εμπλέκονται έμμεσα στο συμβάν. Ο συνολικός χρόνος προσομοίωσης ήταν 900 sec (15 min) κατά την αρχική φάση εξέλιξης μέχρι τη μέγιστη τιμή. Ο χρόνος αυτός είναι επίσης ικανός για την άφιξη των σωστικών μέσων για την παροχή πρώτων βοηθειών και τη διακομιδή των θυμάτων προς τα Νοσοκομεία.

Για την εφαρμογή και επίλυση της προσομοίωσης των χρηστών στο εσωτερικό της σήραγγας διαστάσεων (702m x 10.8m x 7.2m) καταστρώθηκε ένα δισδιάστατο πλέγμα πλάτους 25 cm (3510 x 54) στο επίπεδο κίνησης των χρηστών ($z = 1.60\text{m}$). Ως οριακές συνθήκες επιλέχθηκαν τα δυο στόμια εισόδου και εξόδου της σήραγγας. Γύρω από το σημείο εξέλιξης της πυρκαγιάς σχηματίστηκε μία ουδέτερη ζώνη απαγόρευσης προσέγγισης και διέλευσης των ατόμων ώστε να αποκλεισθεί η πιθανότητα κάποιο άτομο να διέλθει μέσω της ζώνης φλόγας αναζητώντας την τελική έξοδο διαφυγής. Τα ανωτέρω παρατίθενται στην εικόνα – 156 :



Εικόνα 156 - Αρχική συγκέντρωση χρηστών στο σημείο του ατυχήματος

Υιοθετήθηκαν οι παρακάτω απλοποιητικές παραδοχές :

- Το ατύχημα πραγματοποιείται στο μέσο της σήραγγας ώστε να αντιστοιχεί στην δυσμενέστερη δυνατή κατάσταση. Οι χρήστες είναι υποχρεωμένοι να διανύσουν την μέγιστη δυνατή απόσταση προς ένα από τα δυο στόμια (εισόδου / εξόδου) που έχουν επιλέξει ως τελική όδευση διαφυγής
- Δεν χρησιμοποιείται καμία άλλη όδευση διαφυγής μέσω της συνδετήριας σήραγγας προς τον άλλο κλάδο κυκλοφορίας καθώς η χρήση της προϋποθέτει υποβοήθηση και καθοδήγηση από το προσωπικό της σήραγγας
- Δεν πραγματοποιείται καμία διέλευση οχημάτων εντός της σήραγγας κατά τη διαδικασία εκκένωσης των χρηστών ώστε να εμποδίζονται με άλλα εμπόδια, καθώς θεωρείται ότι παρέχεται αρκετός χρόνος στο προσωπικό και τα τεχνικά μέσα της σήραγγας ώστε να γίνει διακοπή της κυκλοφορίας
- Δεν έχει γίνει εκτενής υπολογισμός του απαιτούμενου χρόνου για την αρχική εκκένωση του λεωφορείου από τους επιβάτες.
- Όλοι οι επιβάτες θεωρείται ότι δεν φέρουν σοβαρά τραύματα είτε τέτοια κινησιολογικά προβλήματα συνέπεια πιθανής σύγκρουσης του οχήματος και μπορούν να προβούν σε αυτοδιάσωση σύμφωνα με την ταχύτητα του Πίνακα - 8.1

Η πιο σημαντική ομάδα εντολών που εισήχθηκε στον κώδικα αφορούσε την προσομοίωση της συμπεριφοράς των χρηστών και αφορούν τον διαχωρισμό τους σε ομάδες σύμφωνα με τον Πίνακα 8.1 και τον χρόνο αντίδρασης – αρχικής συνειδητοποίησης του συμβάντος (detection time) και τον χρόνο αντίδρασης (reaction time) για την ανάληψη απόφασης για διαφυγή. Η κατανομή των παραπάνω χρόνων ακολουθεί τις πιο γνωστές κατανομές (ομοιόμορφη, κανονική, λογαριθμοκανονική, Weibull, εκθετική, κ.ά). Για τους σκοπούς της παραπάνω ανάλυσης και υιοθετήθηκε η ομοιόμορφη κατανομή σύμφωνα με τη σχέση 8.7:

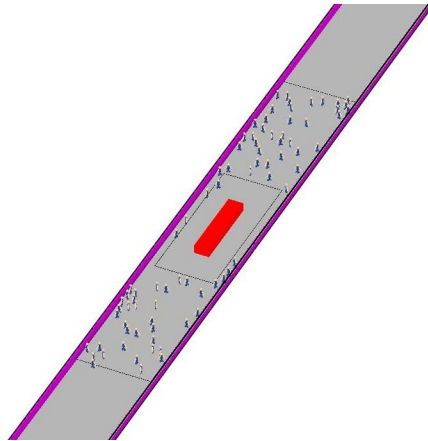
$$f(x) = \bar{x} \pm \sigma \quad (8.7)$$

όπου,

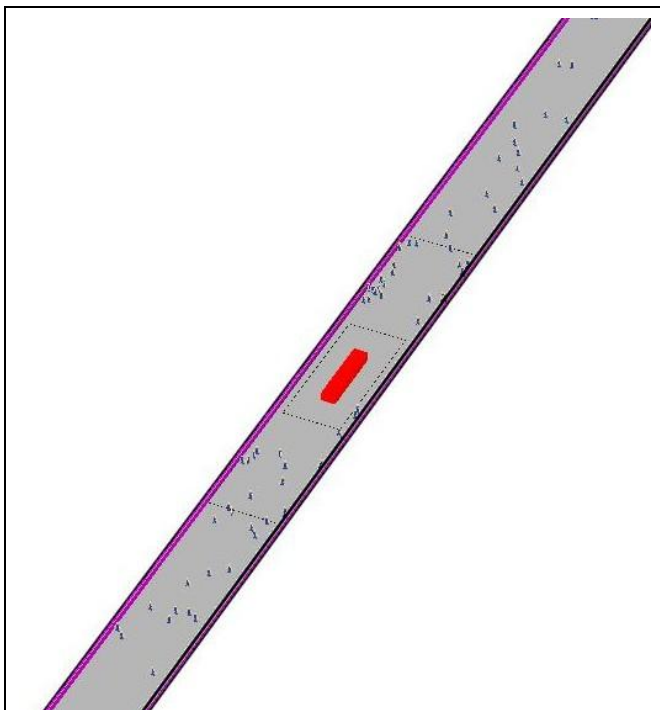
$f(x)$, η κατανομή του χρόνου αντίδρασης & αντίδρασης σύμφωνα με την ομοιόμορφη κατανομή
 \bar{x} , μέση τιμή
 σ , τυπική απόκλιση

8.5 Αποτελέσματα

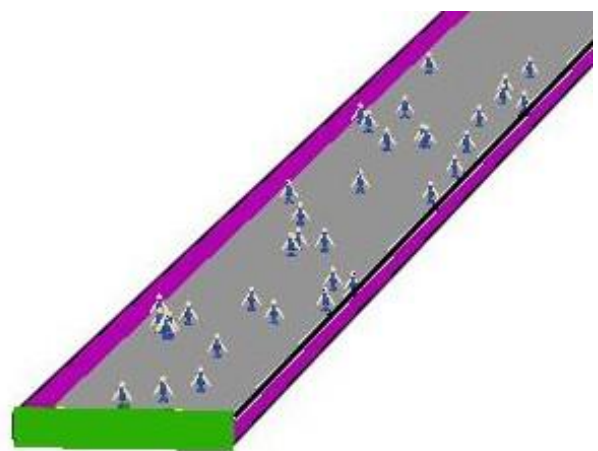
Στη συνέχεια δίδεται υπό μορφή διαγραμμάτων η χρονική εξέλιξη της διαδικασίας εκκένωσης μετά την έναρξη της φωτιάς και η πορεία τους σε ένα από τα δυο στόμια εξόδου (Εικόνες 157 - 159).



Εικόνα 157 – Έναρξη διαδικασίας εκκένωσης σήραγγας



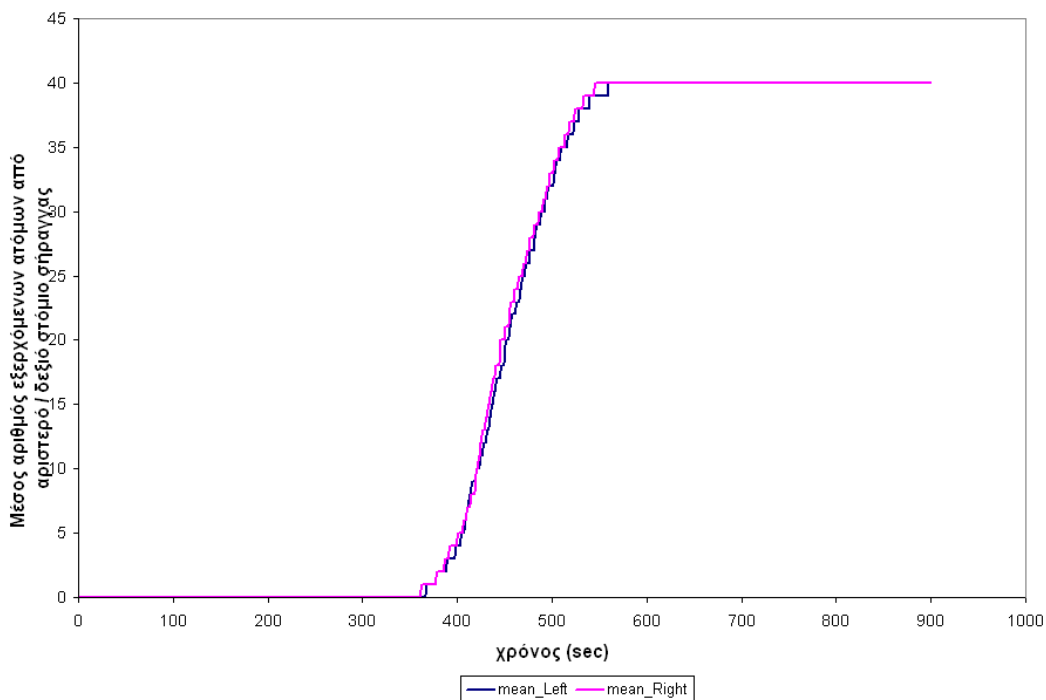
Εικόνα 158 - Εκκένωση σήραγγας σε εξέλιξη



Εικόνα 159 – Πορεία εκκένωσης προς το στόμιο εισόδου της σήραγγας

Όπως αναφέρθηκε ανωτέρω έγιναν δυο ξεχωριστές εκτελέσεις πριν και μετά την πυρκαγιά.

Η πρώτη ομάδα αποτελούμενη από δώδεκα (12) ανεξάρτητα τρεξίματα – προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση της αρχικής τυχαιοποίησης της θέσης – έγινε πριν την έναρξη της φωτιάς (Εικόνα – 160). Μελετήθηκε η κατανομή της ταχύτητας εξόδου, του συνολικού χρόνου εκκένωσης και του αριθμού των ανθρώπων που παραμένουν στο εσωτερικό της σήραγγας για αρχικό χρόνο εντοπισμού και αντίδρασης της τάξης των 2min.



Εικόνα 160 - Διάγραμμα μέσου αριθμού εξερχόμενων ατόμων από τα στόμια της σήραγγας χωρίς την παρουσία φωτιάς

Από την Εικόνα - 160 παρατηρείται ότι υπάρχει ένας αναγκαίος αρχικός χρόνος συνειδητοποίησης (2min) και αντίδρασης (2min) του συμβάντος, ώστε η διαδικασία εκκένωσης να ξεκινά ουσιαστικά μετά τα 350 sec και να ολοκληρώνεται περί τα 580 sec με τους χρήστες να επιλέγουν εξίσου την αριστερή και δεξιά έξοδο.

Η δεύτερη ομάδα αποτελούμενη από δώδεκα (12) ανεξάρτητα τρεξίματα έγινε μετά την έναρξη της φωτιάς. Η επίδραση καπνού / φωτιάς επιδρά στη ταχύτητα διαφυγής μέσω της σχέσης 8.8 [66] :

$$u_i^0(K_s) = \max\left(u_{i,\min}^0, u_i^0\left(1 + \frac{\beta}{\alpha} K_s\right)\right) \quad (8.8)$$

Η επίδραση των τοξικών αερίων ρύπων στη διαδικασία εκκένωσης εισέρχονται μέσω του δείκτη FED. Στο λογισμικό FDS+Evac, η έκφραση του δείκτη FED δίδεται από τη σχέση 8.9 :

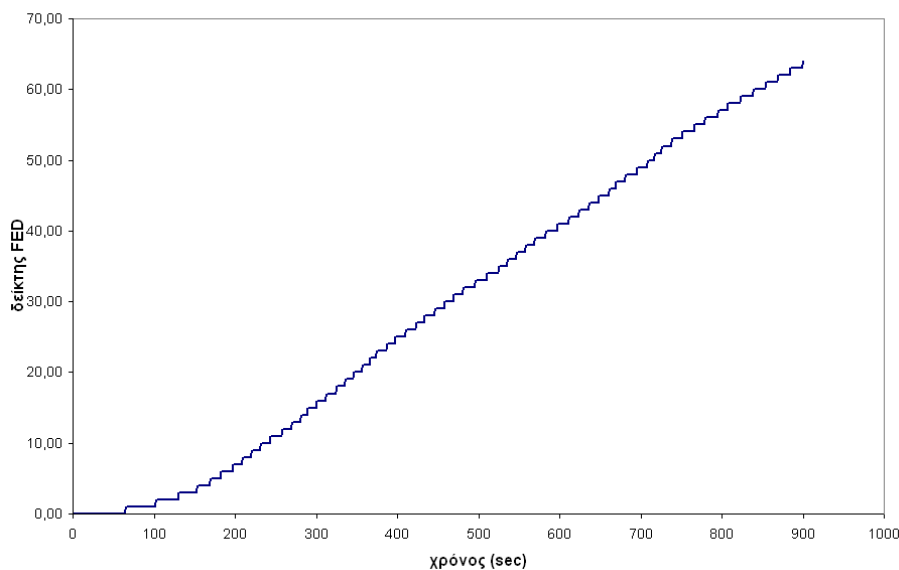
$$FED_{tot} = FED_{CO} \times HV_{CO_2} \times FED_{O_2} \quad (8.9)$$

όπου :

- Ο δείκτης FED_{CO} υπολογίζεται μέσω : $FED_{CO} = 4.607 \cdot 10^{-7} [C_{CO}]^{1.036} t$, $[C_{CO}] \rightarrow ppm$
- Ο δείκτης FED_{O_2} υπολογίζεται μέσω : $FED_{O_2} = \frac{t}{60 \exp[8.13 - 0.54(20.9 - C_{O_2})]}$,
- Το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) δεν θεωρείται γενικά τοξικός ρύπος αλλά επιδρά μέσω της διέγερσης του αναπνευστικού που οδηγεί σε αυξημένη συχνότητα της αναπνοής και στη περαιτέρω πρόσληψη των υπόλοιπων αερίων ρύπων και υπολογίζεται από τον δείκτη :

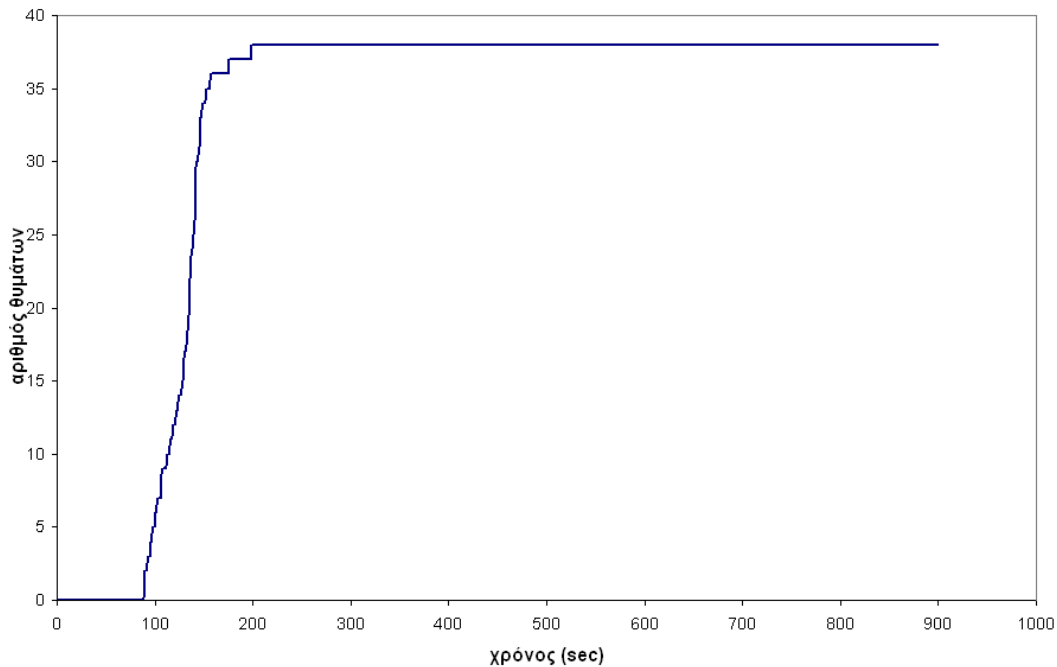
$$HV_{CO_2} = \frac{\exp(0.1930[C_{CO_2}] + 2.0004)}{7.1}$$

Οι τιμές του συντελεστή FED υπολογίζονται σε ύψος 1.60m μέσω της σχέσης (8.9) σε κάθε χρονικό βήμα και αποθηκεύονται σε κατάλληλο αρχείο εξόδου (evac.out) και απεικονίζονται γραφικά στην Εικόνα – 161.



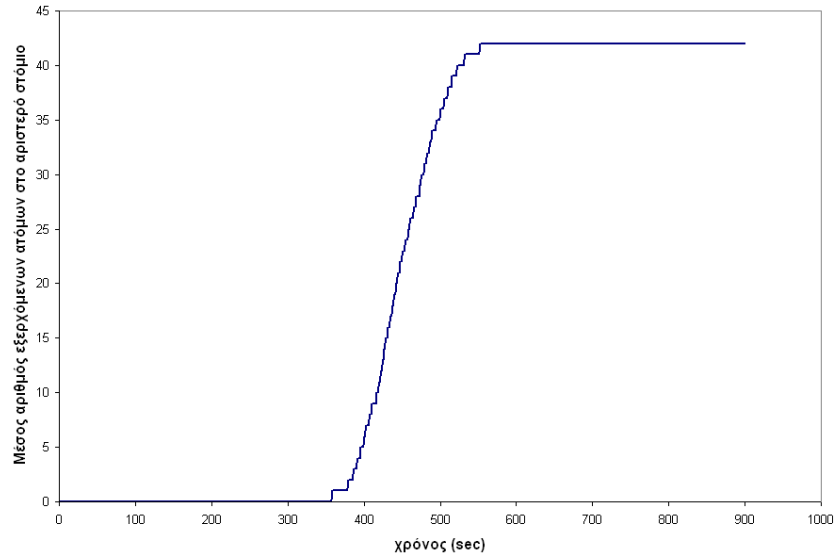
Εικόνα 161 – Διάγραμμα χρονική ς εξέλιξης μέσου συντελεστή FED κατά τη διάρκεια της εκκένωσης

Με βάση τις τιμές του διαγράμματος διαπιστώνεται ότι ο συντελεστής δύναται να λάβει πολύ υψηλές τιμές από τις πρώτες στιγμές της εκκένωσης που κάνουν απαγορευτική τη διαδικασία αυτοδιάσωσης κατόπιν του σημείου πυρκαγιάς (θεωρείται $FED < 1$ προκειμένου να μπορεί ο χρήστης ανεκτά να συνεχίσει την αυτοδιάσωση χωρίς να τον εγκαταλείψουν προοδευτικά οι δυνάμεις του). Αυτό έχει ως συνέπεια προοδευτικά μεγάλος αριθμός χρηστών να χάσει τη ζωή του είτε παραμένοντας στο αρχικό σημείο του ατυχήματος είτε κινούμενος κατόπιν του σημείου πυρκαγιάς και να ακινητοποιηθεί μετά από μερικά μέτρα (βλέπε Εικόνα - 162)



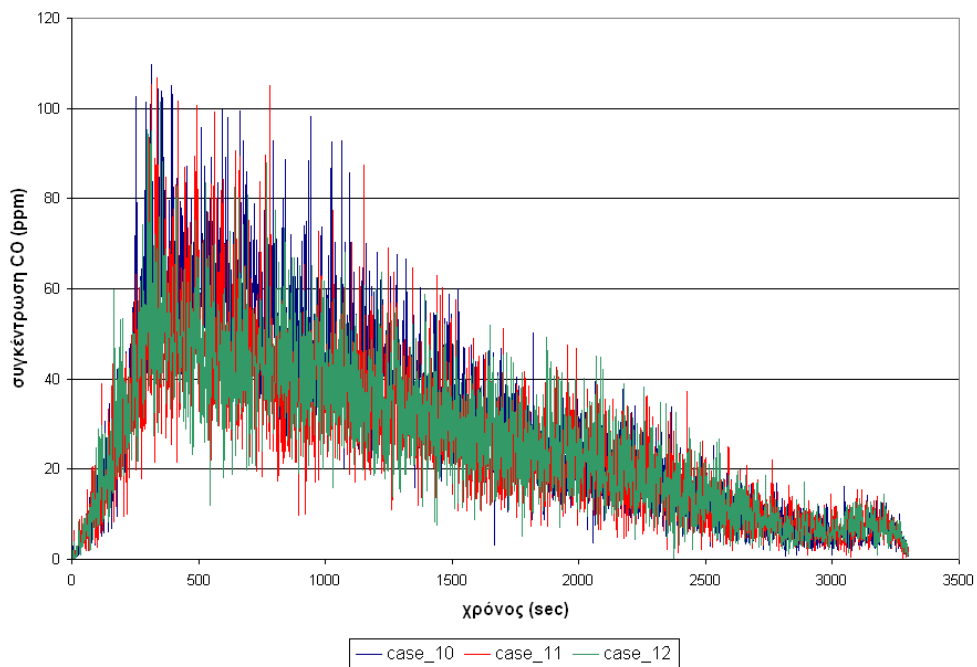
Εικόνα 162 - Διάγραμμα μέσου αριθμού θυμάτων από το δεξιό άκρο κατόπιν του σημείου πυρκαγιάς

Αντίθετα οι υπόλοιποι χρήστες κινούμενοι ανάντη είναι σε θέση να εγκαταλείψουν τη σήραγγα, μιας και όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 6, δεν σχηματίζεται ουσιαστικό ρεύμα αναστροφής καπνού (backlayering) για ισχύ πυρκαγιάς 30MW που αντιστοιχεί σε εμπλοκή λεωφορείου. Η καμπύλη επιβίωσης ακολουθεί τη τυπική «σιγμοειδή» καμπύλη (βλέπε Εικόνα - 163) όμοια με τις καμπύλες επιβίωσης τεχνολογικών συστημάτων που απαντώνται στην Αξιοπιστία και Συντήρηση.

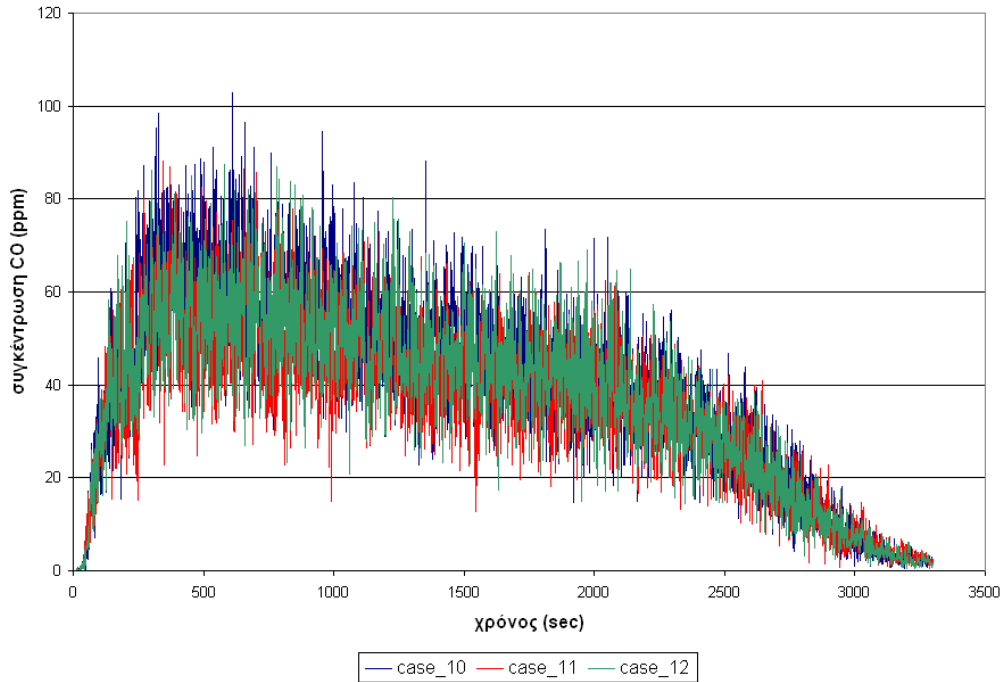


Εικόνα 163 – Διάγραμμα μέσου αριθμού εξερχόμενων ατόμων από το αριστερό άκρο ανάντι του σημείου πυρκαγιάς

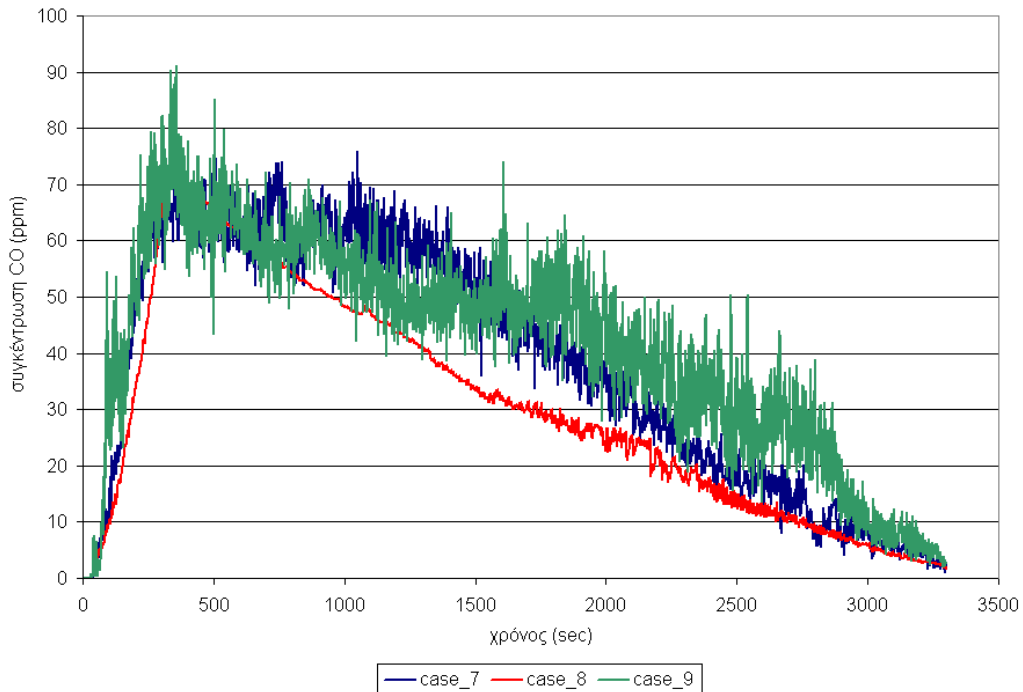
Σημαντικό ρόλο στην ικανότητα διαφυγής διαδραματίζει η έκλυση τοξικών αερίων (κυρίως του CO). Στις παρακάτω Εικόνες 164 - 170 παρατίθενται η συγκεντρώσεις CO για διάφορα μεγέθη πλέγματος σε αποστάσεις 20 – 300m κατάντι του σημείου πυρκαγιάς.



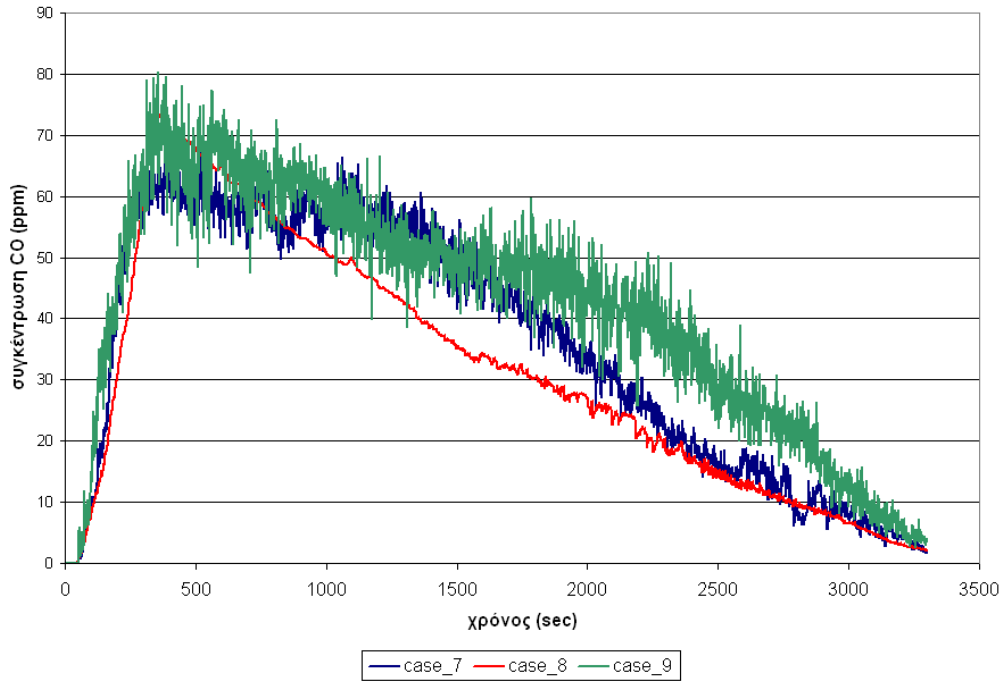
Εικόνα 164 – Διάγραμμα προλέξεων FDS συγκέντρωσης CO σε ύψος 1.60m από το δάπεδο της σήραγγας σε απόσταση 20m κατάντι του σημείου πυρκαγιάς μέγιστης ισχύος 30MW



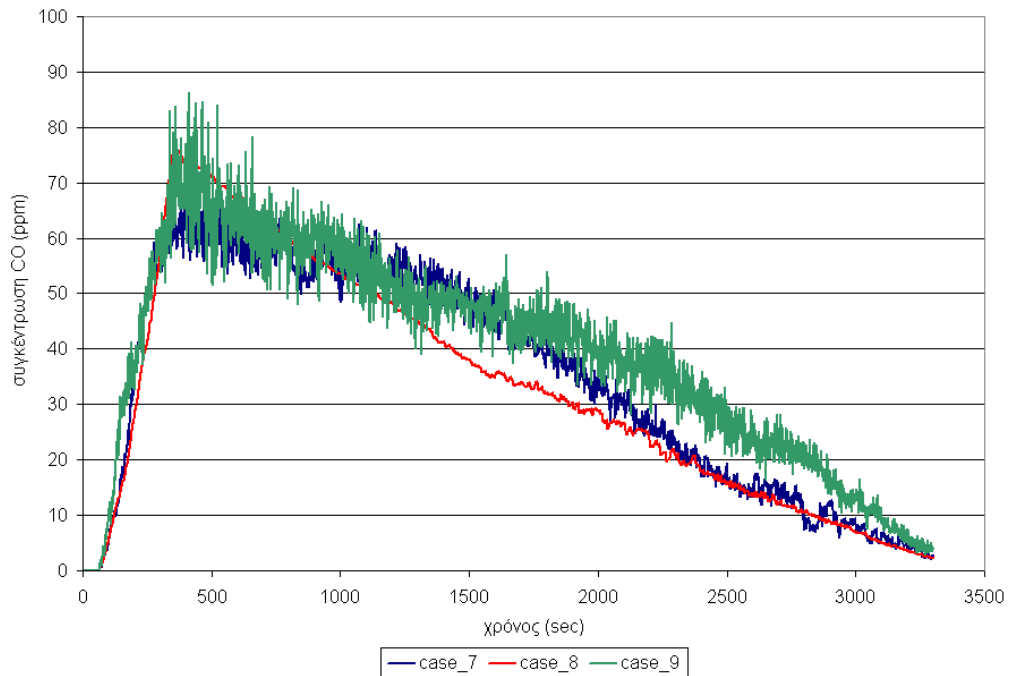
Εικόνα 165 - Διάγραμμα προλέξεων FDS συγκέντρωσης CO σε ύψος 1.60m από το δάπεδο της σήραγγας σε απόσταση 50m κατάντι του σημείου πυρκαγιάς μέγιστης ισχύος 30MW



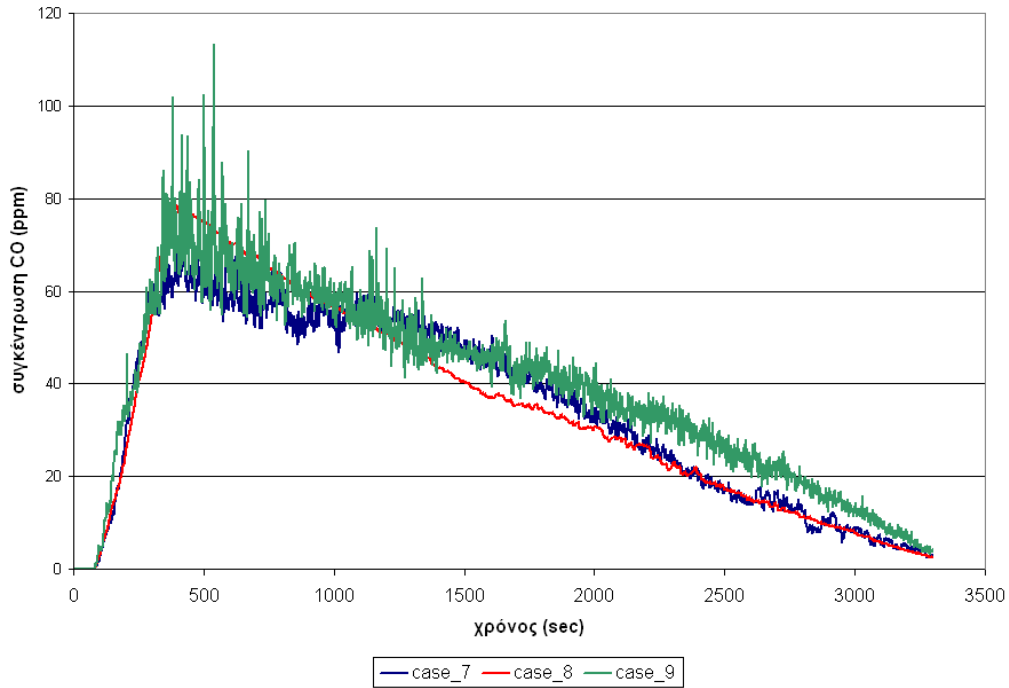
Εικόνα 166 - Διάγραμμα προλέξεων FDS συγκέντρωσης CO σε ύψος 1.60m από το δάπεδο της σήραγγας σε απόσταση 100m κατάντι του σημείου πυρκαγιάς μέγιστης ισχύος 30MW



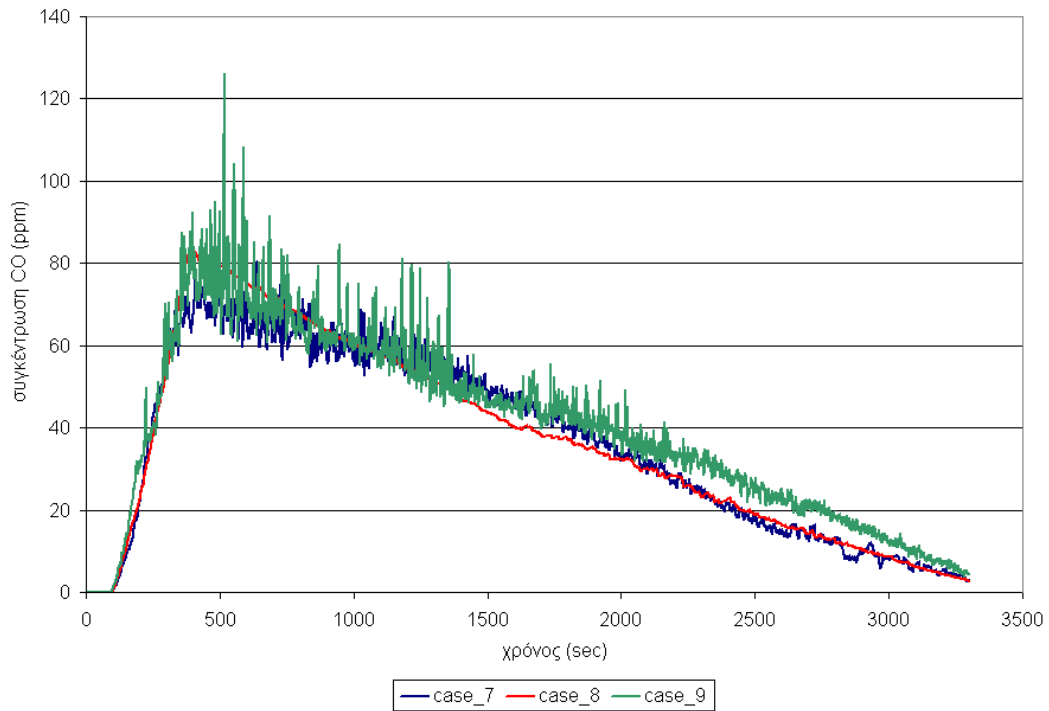
Εικόνα 167 - Διάγραμμα προλέξεων FDS συγκέντρωσης CO σε ύψος 1.60m από το δάπεδο της σήραγγας σε απόσταση 150m κατάντι του σημείου πυρκαγιάς μέγιστης ισχύος 30MW



Εικόνα 168 - Διάγραμμα προλέξεων FDS συγκέντρωσης CO σε ύψος 1.60m από το δάπεδο της σήραγγας σε απόσταση 200m κατάντι του σημείου πυρκαγιάς μέγιστης ισχύος 30MW



Εικόνα 169 - Διάγραμμα προλέξεων FDS συγκέντρωσης CO σε ύψος 1.60m από το δάπεδο της σήραγγας σε απόσταση 250m κατάντι του σημείου πυρκαγιάς μέγιστης ισχύος 30MW



Εικόνα 170 - Διάγραμμα προλέξεων FDS συγκέντρωσης CO σε ύψος 1.60m από το δάπεδο της σήραγγας σε απόσταση 300m κατάντι του σημείου πυρκαγιάς μέγιστης ισχύος 30MW

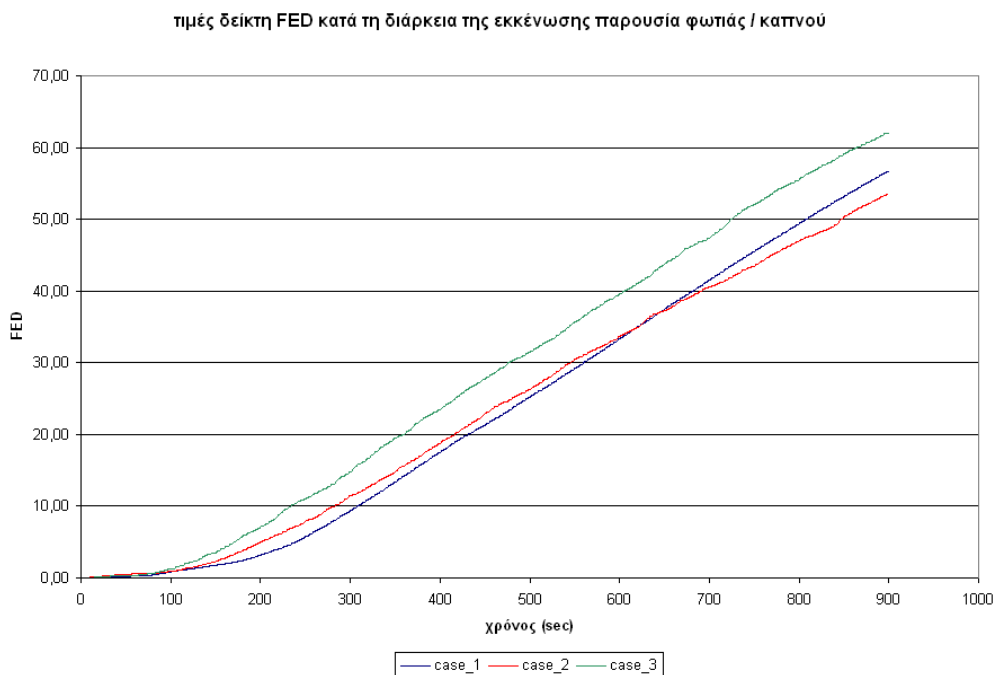
8.6 Ανάλυση ευαισθησίας – Ακρίβεια

Προκειμένου να διερευνηθεί ο κρίσιμος χρόνος εντοπισμού και αντίδρασης εκτελέστηκαν δυο επιπλέον σειρές που αντιστοιχούν σε χρόνο 5min. Διαπιστώθηκε ότι υψηλότεροι χρόνοι αναμονής και συνειδητοποίησης του συμβάντος οδηγούν σε μεγαλύτερο αριθμό θυμάτων προς την κατάντι πλευρά, χωρίς να εκκινήσει η διαδικασία εκκένωσης όσο δηλαδή οι χρήστες παραμένουν πλησίον του ατυχήματος για την παροχή βοθητιών σε συγγενικά πρόσωπα, μεταφορά τραυματιών, κτλ. Στη συνέχεια διερευνήθηκε η επίδραση του πλέγματος φωτιάς στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων εκκένωσης. Διενεργήθηκαν τρεις ομάδες που αντιστοιχούν στον Πίνακα 8.2 :

Πίνακας 8.2 – Καρτεσιανό πλέγμα φωτιάς για ανάλυση ευαισθησίας

α/α	Τύπος	Nx – Ny - Nz
1	Case_1	702 x 11 x 18
2	Case_2	702 x 22 x 14
3	Case_3	702 x 22 x 36

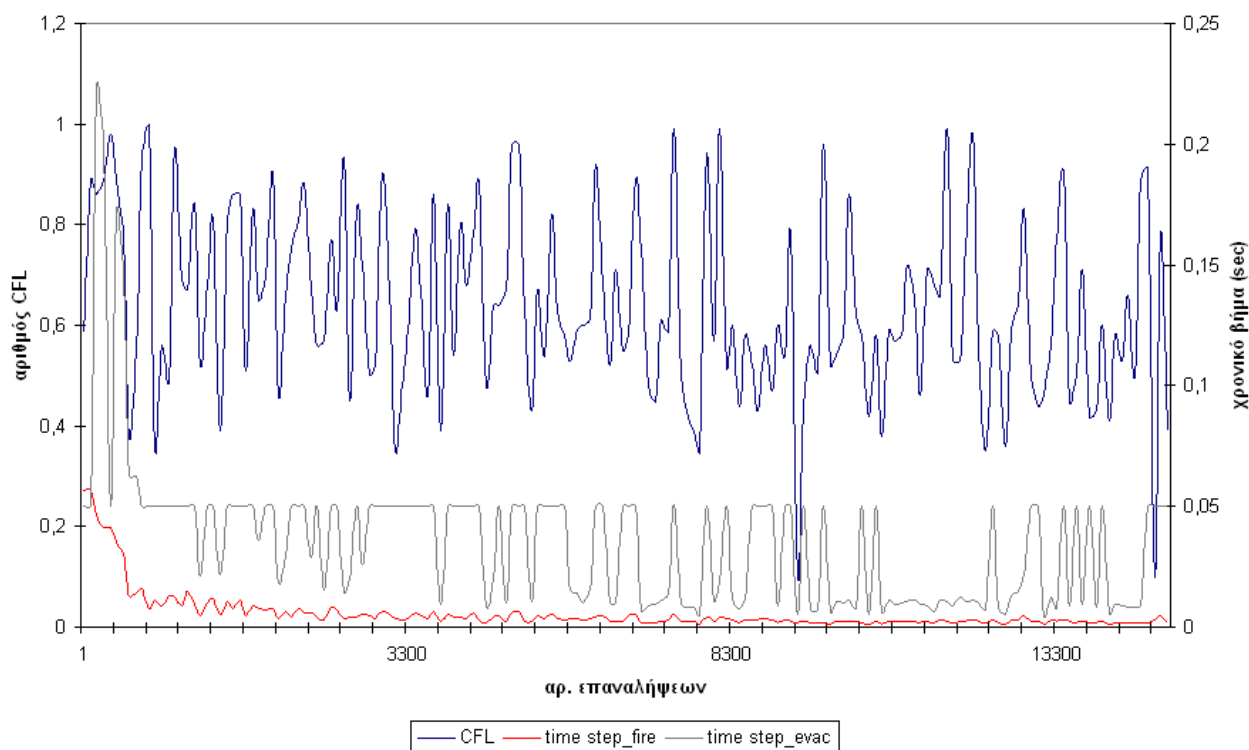
Οι τιμές του δείκτη FED κατά τη διάρκεια της εκκένωσης δίδεται στην Εικόνα - 171



Εικόνα 171 – Τιμές δείκτη FED για την ανάλυση ευαισθησίας

Η πορεία της σύγκλισης εκφράζεται μέσω του κριτηρίου $CFL < 1$ σύμφωνα με τον οδηγό χρήσης. Στο διάγραμμα (Εικόνα – 172) αναπαρίσταται η χρονική μεταβολή του αριθμού CFL και των χρονικών βημάτων φωτιάς και εκκένωσης κατά τις πρώτες 15.000 επαναλήψεις (για αρχικό χρόνο 250 sec). Το μέγεθος του βήματος επίλυσης φωτιάς εξαρτάται από την εκάστοτε χωρική διακριτοποίηση (στο διάγραμμα απεικονίζονται τιμές που αντιστοιχούν σε πλέγμα 702 x 22 x 36).

Διάγραμμα χρονικής μεταβολής CFL - χρονικού βήματος κατά τη διαδικασία εκκένωσης για φωτιά ισχύος 30MW



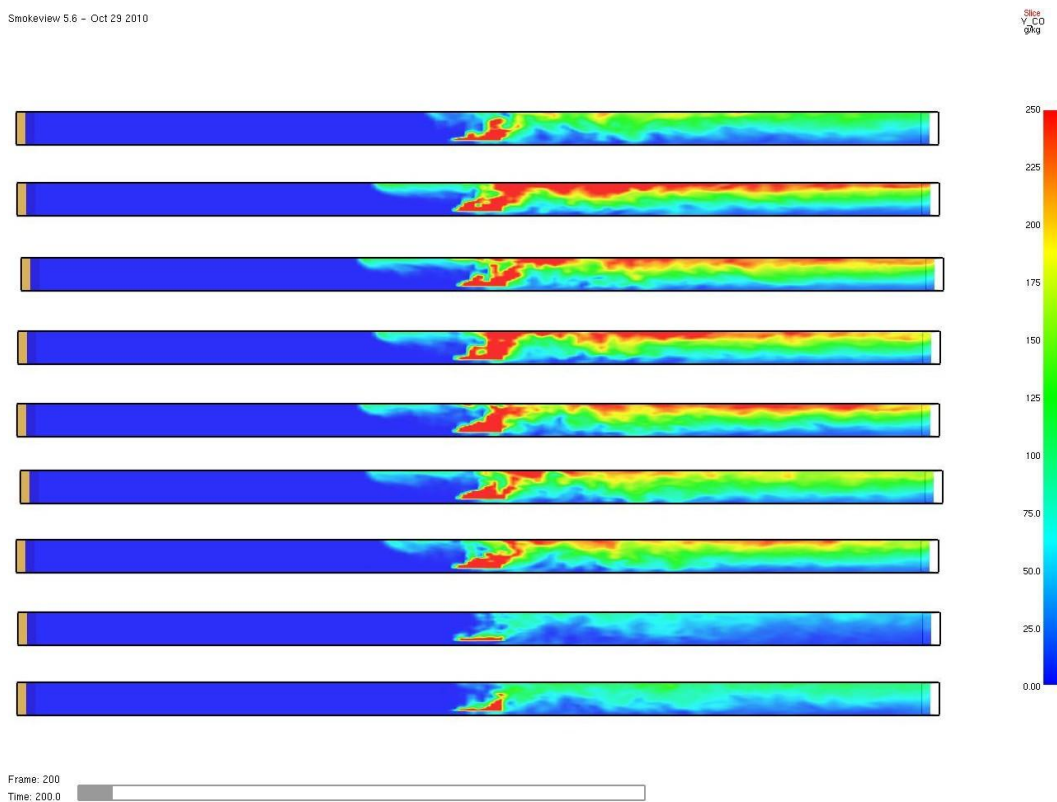
Εικόνα 172 – Χρονική μεταβολή του αριθμού CFL – χρονικού βήματος συναρτήσει του αριθμού επαναλήψεων

Από το διάγραμμα διαπιστώνεται ότι η τιμή CFL διακυμαίνεται συνεχώς γύρω από μία μέση τιμή της τάξης του 0.60 – 0.70, ενώ αντίθετα τα χρονικά βήματα είναι της τάξης του 0.006 – 0.008 sec (φωτιά) και 0.05 sec (εκκένωση). Οι παραπάνω τιμές είναι απόλυτα λογικές καθώς ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί τις τιμές των παραμέτρων της πυρκαγιάς (θερμοκρασία, συγκέντρωση) για να υπολογίσει τους δείκτες FED και τις μεταβολές της ταχύτητας διαφυγής σε κάθε κελί του πλέγματος εκκένωσης. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζονται αρκετές επαναλήψεις του πλέγματος φωτιάς καθώς το φαινόμενο εξελίσσεται ταχύτερα ώστε να υπολογιστούν στη συνέχεια οι μεταβλητές του πλέγματος εκκένωσης.

8.7 Συζήτηση – σχολιασμός

Με βάση τα αποτελέσματα και διαγράμματα των υπολογισμών εκκένωσης, μπορούν να ληφθούν ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα όπως :

- Η μέγιστη συγκέντρωση μονοξειδίου του άνθρακα σε απόσταση 20 – 300m κατάντι της φωτιάς κυμάνθηκε σε 65 – 80 ppm για χρόνο περίπου 450 sec – όσος χρόνος απαιτείται για την διαφυγή των χρηστών.
- Η συγκέντρωση μονοξειδίου παραμένει στα επίπεδα των 50 ppm ακόμα και μετά από 1000 sec από την έναρξη της πυρκαγιάς, χρόνος στον οποίο θεωρείται ότι η διαδικασία εκκένωσης διαφυγής θα έχει ολοκληρωθεί προς τα στόμια εισόδου / εξόδου.
- Υπάρχει διασπορά του μονοξειδίου καθ' ύψος της διατομής (βλέπε Εικόνα - 173) δυσχεραίνοντας την εκκένωση. Επίσης ανάντι της φωτιάς δεν παρατηρούνται μεγάλες τιμές συγκέντρωσης γεγονός που καθιστά ασφαλή τη πρόσβαση των αρμόδιων αρχών (Πυροσβεστική, ΕΚΑΒ) για την παροχή πρώτων βοηθειών σε όσους δεν καταφέρουν να διαφύγουν.



Εικόνα 173 – Συγκεντρώσεις CO κατάντι της σήραγγας για $t = 100/200/300/500/1000/1500/2000/2500/3000$ sec

8.8 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η παραπάνω προσπάθεια προσομοίωσης εκκένωσης χρηστών σε συνθήκες έκτακτων περιστατικών σε οδικές σήραγγες περιελάμβανε ένα σχετικά απλοποιημένο μοντέλο διαφυγής που δεν μπορεί να υποκαταστήσει τα πραγματικά σενάρια που έχουν εκπονηθεί από τις αρμόδιες αρχές για το σκοπό αυτό. Με απώτερο στόχο, μια όσο το δυνατόν ρεαλιστικότερη αναπαράσταση, το αρχικό μοντέλο μπορεί να εμπλουτιστεί και να συμπεριλάβει στοιχεία όπως :

- Τη ρεαλιστικότερη αναπαράσταση της συμπεριφοράς των χρηστών κατά τη φάση της εκκένωσης. Για παράδειγμα να μπορεί ο χρήστης να επιλέξει εναλλακτική διαδρομή, χρησιμοποιώντας την φωτεινή σήμανση ανάγκης, εφόσον η διαδρομή απόφασης είναι καλυμμένη από πυκνό καπνό είτε επικρατούν υψηλές θερμοκρασίες που εμποδίζουν την πρόσβαση.
- Την χρήση της συνδετήριας σήραγγας που βρίσκεται συνήθως στο κέντρο της σήραγγας είτε κάθε 500m για την ασφαλή διαφυγή προς τον άλλο κλάδο. Για το σκοπό αυτό θα πρέπει να καταστρωθεί πυκνότερο πλέγμα ώστε να απεικονισθούν τα δομικά μέρη και ο εξοπλισμός ασφαλείας (πυράντοχες θύρες, χρονοκαθυστέρηση, κτλ)
- Την επίδραση της διαμήκουσ ταχύτητας αερισμού στους δείκτες FED και στην τελική ταχύτητα διαφυγής. Στο παρόν υπολογισμό θεωρήθηκε ταχύτητα αερισμού ίση με 3.0 m/s σύμφωνα με τους κανονισμούς. Εναλλακτικά μπορούν να υπολογισθεί το πεδίο θερμοκρασίας και συγκέντρωσης για ταχύτητες της τάξης των 0.50 – 1.0 m/s ώστε να ληφθεί υπ' όψιν η πιθανότητα βλάβης κάποιου μηχανικού ανεμιστήρα ώσης
- Την ύπαρξη ενδιάμεσων εμποδίων ανάντι του χώρου πυρκαγιάς που να αντιστοιχούν σε ακινητοποιημένα οχήματα. Η παραπάνω θεώρηση θα δυσχέρανε περαιτέρω τη διαδικασία εκκένωσης. Στη παρούσα φάση το σύνολο των χρηστών που επέλεξαν το στόμιο εισόδου (ανάντι της φωτιάς) κατάφεραν να διαφύγουν με επιτυχία.
- Τη σύγκριση του FDS+ Evac με άλλα λογισμικά προσομοίωσης εκκένωσης (πχ. EXODUS, Simulex) ώστε να πιστοποιηθεί η ακρίβεια των παραδοχών που χρησιμοποιήθηκαν και τα των τελικών αποτελεσμάτων (δείκτες FED, τελική ταχύτητα διαφυγής, αριθμός θυμάτων).

9

9. Προσομοίωση μεγάλης φωτιάς με χρήση του λογισμικού PHOENICS

Το λογισμικό PHOENICS αποτελεί έναν γενικευμένο κώδικα – πακέτο υπολογιστικής ρευστοδυναμικής που αναπτύχθηκε από την εταιρεία CHAM Ltd στο Λονδίνο στη δεκαετία του 1980. Αποτελεί ακρωνύμιο του **Parabolic Hyperbolic Or Elliptic Numerical Integration Code Series**.

Χρησιμοποιείται για την μελέτη και προσομοίωση βιομηχανικών και βιολογικών ροών στους τομείς:

Αεροδυναμικής, σε εξωτερικές ροές γύρω από κτίρια, αεροτομές, βυθισμένα σώματα

Βιοϊατρικής Τεχνολογίας, για την προσομοίωση αιμοδυναμικών ροών,

Μηχανολογίας, σε εσωτερικές ροές σε σωληνώσεις,

Χημικής Μηχανικής, για τον υπολογισμό χημικών αντιδράσεων

Περιβάλλοντος, στη διασπορά αερίων και υγρών ρύπων σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους, στο ανθρωπογενές και φυσικό περιβάλλον

Υγιεινής και Ασφάλειας, στη μελέτη και πρόβλεψη φαινομένων πυρκαγιάς σε κτίρια, υπόγειους χώρους στάθμευσης, οδικές σήραγγες, βελτιστοποίηση σε αερισμό χώρων

9.1 Δομή του λογισμικού PHOENICS

Η βασική δομή του λογισμικού αποτελείται από τα επιμέρους στοιχεία :

Προεπεξεργαστής (pre-processing), για την περιγραφή του φυσικού προβλήματος, της γεωμετρίας και των οριακών και τυχόν αρχικών συνθηκών,

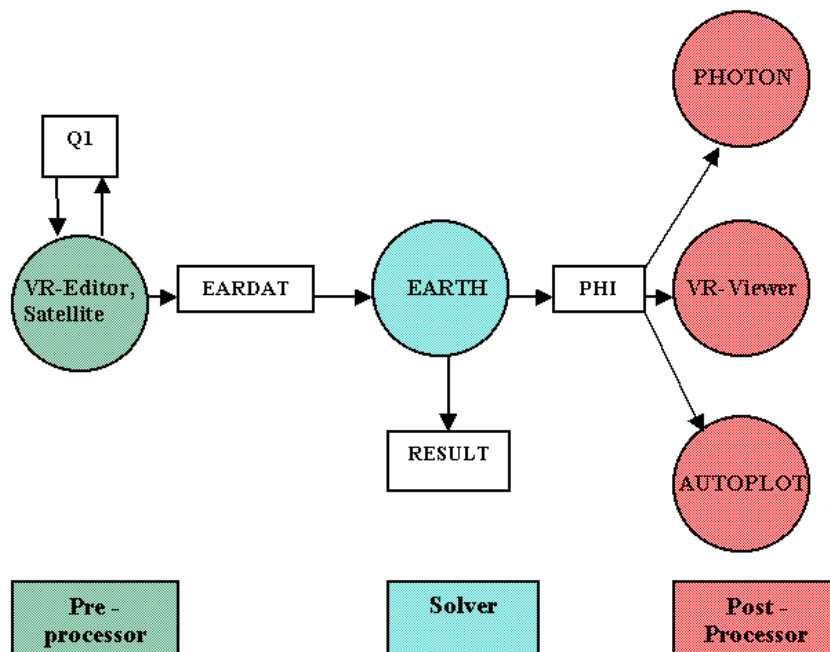
Επιλύτης (solver data-processing), για την καθαυτή αριθμητική επίλυση με χρήση κατάλληλων αριθμητικών σχημάτων των διακριτοποιημένων εξισώσεων που προκύπτουν από τις αντίστοιχες μερικές διαφορικές εξισώσεις διατήρησης που διέπουν το φυσικό πρόβλημα,

Μετεπεξεργαστής (post-processing), για την απεικόνιση και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων των υπολογισμών υπό μορφή γραφημάτων ή πινάκων

Τα στοιχεία για το λογισμικό PHOENICS αποτελούνται από:

- SATELLITE, όπου γίνεται η εισαγωγή και μετατροπή της γεωμετρίας και περιλαμβάνει επιπρόσθετα εργαλεία όπως τον VR-Editor
- EARTH, όπου αποτελεί τον κύριο επιλύτη
- PHOTON, για την γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων, όπου συμπεριλαμβάνεται το πακέτο AUTO PLOT

και αναπαρίστανται στην εικόνα - 174



Εικόνα .174 - Βασική δομή του λογισμικού PHOENICS

Παράλληλα με τα παραπάνω, υπάρχουν επιπρόσθετα αρχεία εισόδου και εξόδου που αλληλεπιδρούν με τα βασικά εργαλεία, όπως τα :

Q1, αποτελεί το βασικό αρχείο εισόδου οριζόμενο από τον χρήστη που περιέχει τα φυσικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά του προβλήματος, τις παραμέτρους του αριθμητικού σχήματος για την επίλυση της κάθε μεταβλητής και είναι γραμμένο σε γλώσσα PIL (Phoenix Input Language)

EARDAT, αποτελεί ένα αρχείο μεταγλώττισης σε μορφή ASCII του αρχείου εισόδου Q1 σε κατάλληλη μετατροπή εντολών ώστε να μπορεί να αναγνωσθεί από τον κύριο επιλύτη EARTH

PHI, αποτελεί το αρχείο εξόδου για τις μεταβλητές επίλυσης που παράγεται από τον επιλύτη EARTH ώστε να μπορεί να προσπελασθεί από τα εργαλεία μετεπεξεργασίας PHOTON, AUTO PLOT και VR-VIEWER

RESULT, τυπώνει τα αποτελέσματα σε μορφή ASCII κατάλληλη για περαιτέρω χειρισμό υπό μορφή πινάκων ή εκτύπωσης.

Το λογισμικό είναι απλό και φιλικό τόσο προς τους αρχάριους χρήστες μέσω πληθώρας έτοιμων βιβλιοθηκών και παραδειγμάτων μέσω γραφικού περιβάλλοντος (VR-Editor) από τομείς της Επιστήμης και Μηχανικής όσο και προς τους πεπειραμένους χρήστες καθώς τους δίνει την δυνατότητα να γράψουν απευθείας στο αρχείο q1 σε ένα κοινό επεξεργαστή κειμένου και να το εισάγουν προς επίλυση. Για περαιτέρω διευκρινίσεις, ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης μπορεί να περιηγηθεί στην on-line εγκυκλοπαίδεια και να εξοικειωθεί με τα χαρακτηριστικά του λογισμικού μέσα από την ιστοσελίδα της CHAM [68].

9.2 Μαθηματική περιγραφή

Η ροή στο εσωτερικό της σήραγγας παρουσία της φωτιάς είναι μη-μόνιμη, έντονα τυρβώδης, εκτείνεται σε τρεις διαστάσεις και επηρεάζεται από δυνάμεις άνωσης. Η διαδικασία καύσης που συντελείται είναι χρονικά μεταβαλλόμενη για το διάστημα [0-300s] και συνοδεύεται από μεγάλα ποσά έκλυσης θερμότητας, σωματίδια αιθάλης και παραπροϊόντα σε υψηλή θερμοκρασία. Για να ληφθούν υπόψη οι επιδράσεις της τύρβης θα χρησιμοποιηθούν οι χρονικά μέσες μορφές των εξισώσεων Navier – Stokes (Reynolds Averaged Navier Stokes – RANS) και ειδικότερο το πιο διαδεδομένο μοντέλο τύρβης δυο εξισώσεων standard k-ε που αναπτύχθηκε στα μέσα της δεκαετίας του 1970 και βελτιώθηκε από του Launder & Spalding [75,76]. Οι τελικές εξισώσεις διατήρησης εκφράζονται από τις σχέσεις [9.1 – 9.5]

Διατήρηση Μάζας :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (9.1)$$

Διατήρηση Ορμής :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial \overline{\rho u_i u_j}}{\partial x_j} \quad (9.2)$$

Διατήρηση ενέργειας :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho T) + \rho u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = -\frac{\partial q}{\partial x_i} + \rho Q + \rho \frac{\nu}{\sigma} \frac{\partial^2 T}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial \overline{\rho T u_j}}{\partial x_j} \quad (9.3)$$

Εξίσωση κινητικής ενέργειας τύρβης (k) :

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left[u_j' \left(\frac{uu}{2} + \frac{p'}{\rho} \right) - 2\nu u_i' S_{ij} \right] - \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \nu \left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_j} \frac{\partial u_i'}{\partial x_j} + \frac{\partial u_i'}{\partial x_j} \frac{\partial u_i'}{\partial x_i} \right) \quad (9.4)$$

Εξίσωση ρυθμού καταστροφής ενέργειας τύρβης (ε) :

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_i}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (9.5)$$

όπου :

$u_i = \bar{u}_i + u_i'$, η στιγμιαία ταχύτητα ορίζεται ως άθροισμα της μέσης και διακυμαινόμενης ταχύτητας

ρ , πυκνότητα του μέσου (για τη συγκεκριμένη περίπτωση εξετάζεται ο ατμοσφαιρικός αέρας)

$\frac{\partial p}{\partial x_i}$, κλίση της πίεσης στην κατεύθυνση (i)

$\frac{\partial q}{\partial x_i}$, κλίση της ροής θερμότητας στην κατεύθυνση (i)

$\frac{\partial k}{\partial t}$, ρυθμός μεταβολής της κινητικής ενέργειας τύρβης

$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}$, ρυθμός μεταβολής του όρου καταστροφής (ή απορρόφησης) ε

ν , κινηματικό ιξώδες

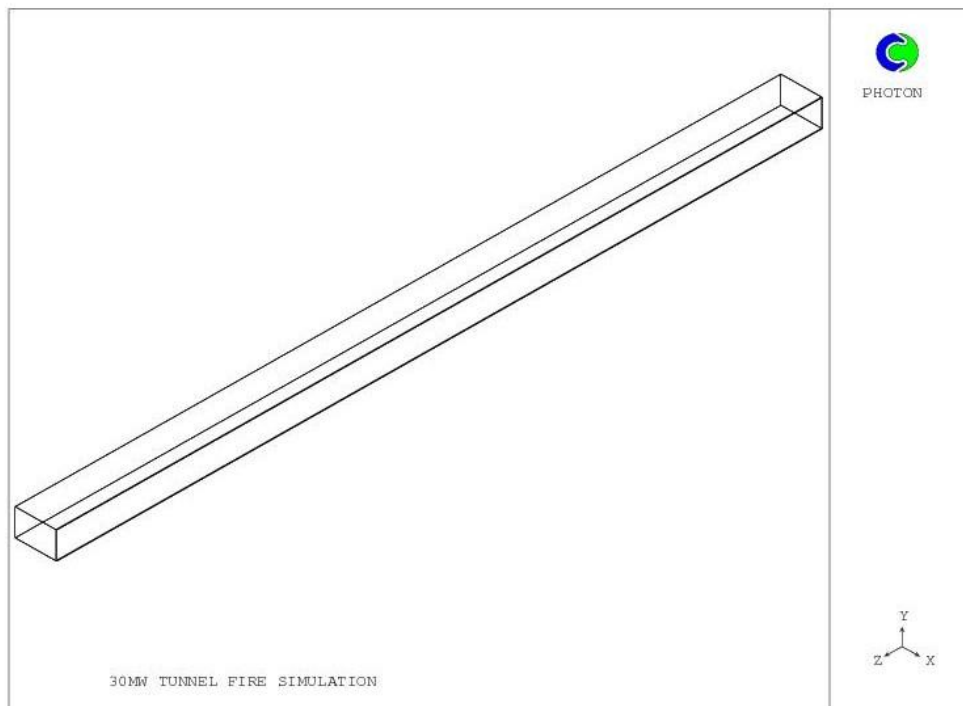
$$\nu_t = C_D \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad \text{τυρβώδες κινηματικό ιξώδες}$$

S_{ij} , συμμετρικό τμήμα (ή τμήμα παραμόρφωσης) του τανυστή δεύτερης τάξης του διακυμαινόμενου ρυθμού παραμόρφωσης $\frac{\partial u_i'}{\partial x_j}$

$C_D = 0.09$, $C_{\varepsilon 1} = 1.44$, $C_{\varepsilon 2} = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$, εμπειρικοί συντελεστές του μοντέλου k-ε

9.3 Γεωμετρία σήραγγας

Για την επίλυση του ροϊκού και θερμοκρασιακού πεδίου επιλέχθηκε σήραγγα ορθογωνικής διατομής διαστάσεων 10.8 x 7.2 x 200m (Βλέπε Εικόνα - 175), σύμφωνα με τις βασικές διαστάσεις αντίστοιχης σήραγγας του Κεφαλαίου 6.



Εικόνα 175 - Σχηματική απεικόνιση της γεωμετρίας σήραγγας

9.4 Οριακές & Αρχικές συνθήκες

Για την επίλυση των χρονικά μεταβαλλόμενων εξισώσεων απαιτούνται οριακές και αρχικές συνθήκες του πεδίου ροής. Αναλυτικότερα :

- Συνθήκες εισόδου (inlet) : Ομοιόμορφη ταχύτητα 3.0 m/s στο στόμιο εισόδου ($z = 0$)
- Συνθήκες εξόδου (outlet): Ατμοσφαιρικός αέρας σε κανονικές συνθήκες
- Θέση φωτιάς (Fire spot) : Απεικονίζεται μέσω ενός ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου διαστάσεων 1.0 x 1.0 x 10.0 τοποθετημένο στο $z=95.0\text{m}$ κατά τον διαμήκη άξονα συμμετρίας. Η εκλυόμενη θερμότητα μοντελοποιήθηκε μέσω γραμμικής θερμοροής (heat flux) για το χρονικό διάστημα 0 – 300s όπου και λαμβάνει τη μέγιστη τιμή 30 MW ώστε να μοντελοποιηθεί η αρχική φάση ανάφλεξης φωτιάς σε λεωφορείο σύμφωνα με το προτεινόμενο σενάριο (Βλέπε Κεφάλαιο 2).
- Η μοντελοποίηση τύρβης έγινε μέσω του μοντέλου k-ε. Η ένταση τύρβης εισήχθη ως ποσοστό 5.0% της αρχικής ταχύτητας εισόδου
- Χρησιμοποιήθηκε η προσέγγιση Boussinesq για την επίδραση των δυνάμεων άνωσης.
- Σε απόσταση 30 & 50m κατάντι του σημείου πυρκαγιάς αποτυπώνεται η χρονική εξέλιξη των μεγεθών ώστε να μπορεί να ελεγχθεί τόσο η ανεξαρτησία πλέγματος καθώς αυτό πυκνώνει διαδοχικά όσο και για να συγκριθούν τα αποτελέσματα με αυτά που προέκυψαν από το λογισμικό FDS. Για το σκοπό αυτό, τα πειράματα του κεφαλαίου 6 για υπομήμη σήραγγας 200m της Εγνατίας Οδού επαναλήφθηκαν σε σήραγγα ορθογωνικής διατομής ώστε να απαλειφθούν τυχόν διαφορές που θα προέκυπταν εξαιτίας της διαφορετικής ημικυκλικής γεωμετρίας.
- Χρησιμοποιήθηκαν συναρτήσεις τοίχου για τα στερεά όρια του θόλου της σήραγγας που ορίστηκαν ως τσιμέντο για την οροφή και ασφαλτοτάπητας για το δάπεδο.

9.5 Διακριτοποίηση – υπολογιστική διάταξη

Οι διαφορικές εξισώσεις διατήρησης (9.1) – (9.5) μπορούν να λάβουν την μορφή της γενικευμένης εξίσωσης μεταφοράς σύμφωνα με τη σχέση 9.6 :

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \text{div} \rho \phi \mathbf{u} = \text{div} \Gamma \text{grad} \phi + S_{\phi} \quad (9.6)$$

όπου:

t , χρόνος

ρ , πυκνότητα ρευστού

ϕ , μεταβλητή ϕ ανά μονάδα μάζας

u , ταχύτητα

Γ , συντελεστής διάχυσης της ποσότητας Φ

S , ο ρυθμός παραγωγής ή κατανάλωσης Φ

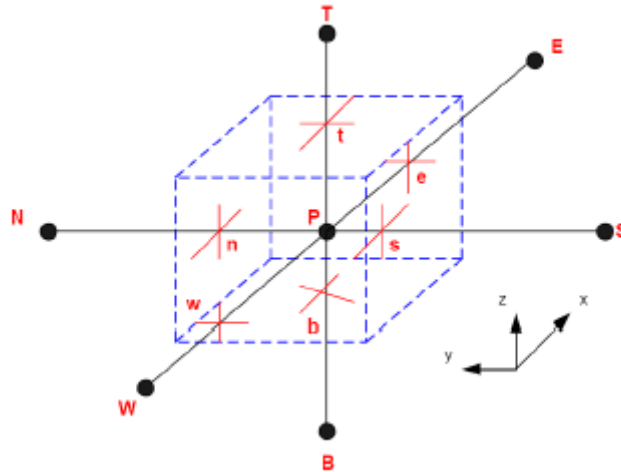
Η παραπάνω μορφή της γενικευμένης εξίσωσης εκφράζεται περιγραφικά με τον ρυθμός μεταβολής των ποσοτήτων :

$$\begin{aligned} & \text{Ρυθμός μεταβολής της ποσότητας } \Phi \text{ του στοιχείου ρευστού} \\ & + \\ & \text{Καθαρός ρυθμός εκροής } \Phi \text{ από το στοιχείο ρευστού} \\ & = \\ & \text{Ρυθμός μεταβολής της ποσότητας } \Phi \text{ λόγω διάχυσης} \\ & + \\ & \text{Ρυθμός μεταβολής της ποσότητας } \Phi \text{ λόγω πηγών} \end{aligned}$$

Με άλλα λόγια, η γενικευμένη εξίσωση μεταφοράς αποτελείται από τους αντίστοιχους όρους κατά σειρά εμφάνισης : τον μεταβατικό, τον όρο συναγωγής, διάχυσης και πηγής.

Το σύνολο των διαφορικών εξισώσεων που διέπουν το πρόβλημα διακριτοποιείται στο χωρίο επίλυσης μέσω της τεχνικής των πεπερασμένων όγκων ελέγχου (Finite Volume Method – FVM) με διάταξη μετατοπισμένου πλέγματος [70,74] σε τρεις διαστάσεις (βλ. Εικόνα ...). Οι όγκοι ελέγχου μπορούν να έχουν σχήμα μη-ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου (αυστηρά καρτεσιανό πλέγμα) αλλά θα έχουν τοπολογικά πάντα έξι επιφάνειες και δώδεκα ακμές στη τρισδιάστατη δομή. Στο εσωτερικό κάθε όγκου αποθηκεύονται τα βαθμωτά μεγέθη(p,T) και στα κέντρα των επιφανειών τα διανυσματικά (u,v,w). Το αποτέλεσμα της ολοκλήρωσης είναι η αλγεβρική εξίσωση σύμφωνα με τη σχέση 9.7:

$$A_P\phi_P = A_N\phi_N + A_S\phi_S + A_W\phi_W + A_E\phi_E + A_B\phi_B + A_F\phi_F + S_\phi \quad (9.7)$$



Εικόνα 176 – Καρτεσιανός όγκος ελέγχου σε τρεις διαστάσεις

όπου N, S, E, W, B, F είναι οι γειτονικοί κόμβοι του κεντρικού P

Για την επίλυση επιλέχθηκε η μέθοδος πλήρους πεδίου που αντιστοιχεί στην έκφραση για την άγνωστη ποσότητα ϕ , σύμφωνα με τη σχέση 9.8.

$$a_P\phi_P^{new} - a_N\phi_N^{new} - a_S\phi_S^{new} - a_E\phi_E^{new} - a_W\phi_W^{new} - a_H\phi_H^{new} - a_L\phi_L^{new} = a_T\phi_T + S_\phi \quad (9.8)$$

Για να εξασφαλισθεί ρεαλιστική λύση, οι εξισώσεις διατήρησης κατά τη διαδικασία μοντελοποίησης με τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων πρέπει να υπακούουν σε τέσσερις βασικούς κανόνες [69,71,74] :

1. Αντιστρεπτότητα

Όταν μια επιφάνεια είναι κοινή σε δυο γειτονικούς όγκους ελέγχου, θα πρέπει η ροή του μεγέθους Φ (μάζα, ορμή, θερμοκρασία, συγκέντρωση συστατικού) να είναι αναπαρίσταται από την ίδια έκφραση στις διακριτοποιημένες εξισώσεις και για τους δυο όγκους ελέγχου. Για παράδειγμα η θερμική ροή που εγκαταλείπει έναν όγκο ελέγχου θα πρέπει να είναι ίδια με την ροή που εισέρχεται στον αμέσως επόμενο όγκο διαμέσου της ίδιας επιφάνειας διαφορετικά το συνολικό ισοζύγιο δεν θα ικανοποιείται.

2. Θετικοί συντελεστές

Στο συγκεκριμένο πρόβλημα συναγωγής – διάχυσης, οι τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής ϕ σε έναν κεντρικό κόμβο (P) θα επηρεάζονται από τις αντίστοιχες τιμές στους γειτονικούς κόμβους του P. Συνεπώς η αύξηση της τιμής του P θα πρέπει να οδηγεί σε αύξηση της τιμής του ϕ σε έναν γειτονικό κόμβο και όχι μείωση όταν οι άλλες συνθήκες παραμένουν αμετάβλητες. Επομένως αύξηση της Φ_E πρέπει να οδηγεί σε αύξηση της Φ_P , που σημαίνει ότι οι συντελεστές πρέπει να είναι ομόσημοι. Με εκλογή θετικών συντελεστών προκύπτει ότι όλοι οι συντελεστές πρέπει να είναι θετικοί..

3. Γραμμικοποίηση πηγών με αρνητική κλίση

Σύμφωνα με την μέθοδο διακριτοποίησης πεπερασμένων που επιλέχθηκε αρχικά (βλέπε εξ.9.6) είναι δυνατόν ακόμα και όταν οι γειτονικοί συντελεστές να είναι θετικοί, ο συντελεστής του κεντρικού σημείου (P) να είναι θετικός μέσω του όρου πηγής S_p . Για το λόγο αυτό απαιτείται ο όρος S_p να είναι μην είναι θετικός. Παρά το γεγονός ότι αυτό μοιάζει αυθαίρετο, η φυσική ερμηνεία του από τις διεργασίες που παρατηρούνται στο φυσικό κόσμο οδηγεί τελικά σε ευσταθείς και ρεαλιστικές λύσεις. Για παράδειγμα αν ο συντελεστής του S_p ήταν θετικός, οποιαδήποτε μεταβολή του Φ_P θα αύξανε την τιμή του S_p που με τη σειρά του θα αύξανε περαιτέρω την τιμή του Φ_P δίχως να υπάρχει ένας μηχανισμός που να επαναφέρει το σύστημα σε ισορροπία. Επομένως από υπολογιστικής άποψης είναι απολύτως ρεαλιστικό να υπάρχει αρνητικό πρόσημο στον συντελεστή του S_p προκειμένου να μην δημιουργηθούν ασταθείς και μη-ρεαλιστικές λύσεις κατά τη διάρκεια επίλυσης του προβλήματος.

4. Άθροισμα γειτονικών συντελεστών

. Εφόσον η μεταβλητή Φ ικανοποιεί τη διαφορική εξίσωση, τότε θα πρέπει να την ικανοποιεί και η μεταβλητή $\Phi+c$, όπου c αυθαίρετη σταθερά. Έτσι στην αλγεβρική εξίσωση (9.7), αν αυξηθεί η Φ_P θα πρέπει να αυξηθούν και τα $\Phi_\gamma = \sum \phi_\gamma$ που ανήκουν στους γειτονικούς κόμβους. Ο κανόνας αυτός υπονοεί ότι μια κεντρική τιμή Φ_P είναι ένας σταθμισμένος μέσος όρος των γειτονικών τιμών του. Όταν ο όρος πηγής εξαρτάται από τη θερμοκρασία θα πρέπει να ισχύει $a_p = a_\gamma - S_p$. Στη περίπτωση που δεν υπάρχει όρος πηγής τότε όλα τα Φ_γ είναι ίσα και τα η κεντρική τιμή Φ_P θα είναι ίση με τις γειτονικές.

Η τελική μορφή των αλγεβρικών εξισώσεων ροής επιλύεται μέσω του αλγόριθμου SIMPLE [69,73] όπου αρχικά εκτιμάται ένα πεδίο πίεσης και στη συνέχεια γίνονται διαδοχικές εσωτερικές

επαναλήψεις του επιλύτη μέχρι οι ταχύτητες που θα προκύψουν να ικανοποιούν τις εξισώσεις συνέχειας και ορμής. Τα βήματα του αλγορίθμου μπορούν να συνοψισθούν ως εξής :

1. Εκτίμηση πεδίου πίεσης p^*
2. Επίλυση εξισώσεων ορμής για (u^*, v^*, w^*)
3. Επίλυση εξίσωσης διόρθωσης πίεσης
4. Υπολογισμός – διόρθωση πίεσης μέσω της σχέσης $p = p^* + p'$
5. Υπολογισμός – διόρθωση του πεδίου ταχυτήτων
6. Επίλυση εξισώσεων βαθμωτών μεγεθών (θερμοκρασία, συγκέντρωση συστατικών)
7. Επιστροφή στο βήμα (1) και αντικατάσταση του $p^* = p$ και επανάληψη της διαδικασίας μέχρι σύγκλισης

Δεδομένου ότι το συγκεκριμένο πρόβλημα είναι χρονικά μεταβαλλόμενο, η παραπάνω διαδικασία ακολουθείται για κάθε χρονικό βήμα.

9.6 Τεχνικές υποχαλάρωσης

Για την εξασφάλιση της σύγκλισης χρησιμοποιούνται συντελεστές χαλάρωσης τόσο για τις βαθμωτές όσο και για τις διανυσματικές ποσότητες. Αναλυτικότερα :

Όροι πίεσης

Χρησιμοποιείται γραμμικός συντελεστής χαλάρωσης σύμφωνα με τη σχέση 9.9 :

$$P^{new} = P^{old} + a(P^{new} - P^{old}) = aP^{new} + (1-a)P^{old} \quad (9.9)$$

όπου $a = 0.70$, η τιμή του συντελεστή χαλάρωσης για την πίεση

Όροι ταχύτητας

Χρησιμοποιείται συντελεστής ψευδού χρονικού βήματος (false time relaxation) σύμφωνα με τη σχέση 9.10:

$$S_{\Phi} = (\rho V)_p \frac{V^{old} - V^{new}}{dt} \quad (9.10)$$

όπου $S_\phi = 1.00$, η τιμή του συντελεστή ψευδού βήματος για τις ταχύτητες

Επισημαίνεται ότι dt είναι το ψευδοχρονικό βήμα όπου μεγάλες τιμές οδηγούν σε χαλαρή υπερχαλάρωση και αντίστοιχα μικρές τιμές σε σφικτή

Συγκεντρώσεις συστατικών (καπνός)

Χρησιμοποιείται συντελεστής ψευδού χρονικού βήματος σύμφωνα με τη σχέση 9.11:

$$S_\phi = (\rho V)_p \frac{C^{old} - C^{new}}{dt} \quad (9.11)$$

όπου $S_\phi = 100$, η τιμή του συντελεστή ψευδού βήματος για την συγκέντρωση καπνού

Θερμοκρασία

Χρησιμοποιείται συντελεστής ψευδού χρονικού βήματος σύμφωνα με τη σχέση 9.12:

$$S_\phi = (\rho V)_p \frac{T^{old} - T^{new}}{dt} \quad (9.12)$$

όπου $S_\phi = 10^9$, η τιμή του συντελεστή ψευδού βήματος για την θερμοκρασία

Συντελεστές k -ε

Χρησιμοποιείται γραμμικός συντελεστής χαλάρωσης σύμφωνα με τη σχέση 9.13:

$$k^{new} = k^{old} + a(k^{new} - k^{old}) = ak^{new} + (1-a)k^{old} \quad (9.13)$$

όπου $a = 0.50$, η τιμή του συντελεστή χαλάρωσης για τις μεταβλητές k , ϵ .

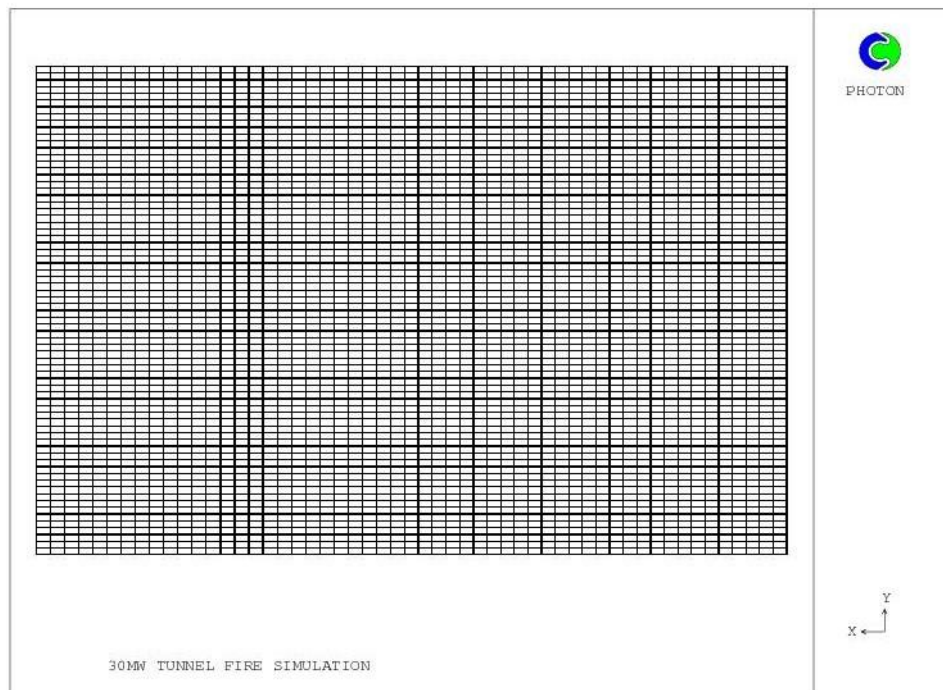
9.7 Παραμετρική μελέτη

Προκειμένου να εξασφαλισθεί λύση ανεξάρτητη του πλέγματος (grid sensitivity) έγιναν διαδοχικά τρεξίματα για το χρονικό διάστημα 300s τόσο σε δυο (2D) όσο και σε τρεις (3D) διαστάσεις με διαφορετικά μεγέθη πλέγματος. Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων επικεντρώθηκε κυρίως στις

τρεις διαστάσεις προκειμένου να εκτιμηθεί το πεδίο ροής κατάντι του σημείου πυρκαγιάς και τα αποτελέσματα να συγκριθούν με εκείνα που προέκυψαν από το FDS . Τυπικό αριθμητικό πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε στην εγκάρσια κατεύθυνση (x-y) δίδεται στην Εικόνα - 177 ενώ ο αριθμός των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν για την μελέτη ανεξαρτησίας δίδονται στον Πίνακα 9.1 :

Πίνακας – 9.1 Συγκεντρωτικά στοιχεία περιπτώσεων παραμετρικής μελέτης ανεξαρτησίας

α/α	Διαστάσεις πλέγματος	Νο εσ. επαναλήψεων (iterations)	Νο χρονικών βημάτων (steps)
Case_1	27x36x200	30	300 / 600
Case_2	54x36x200	30	300 / 600
Case_3	54x72x200	30	300 / 600

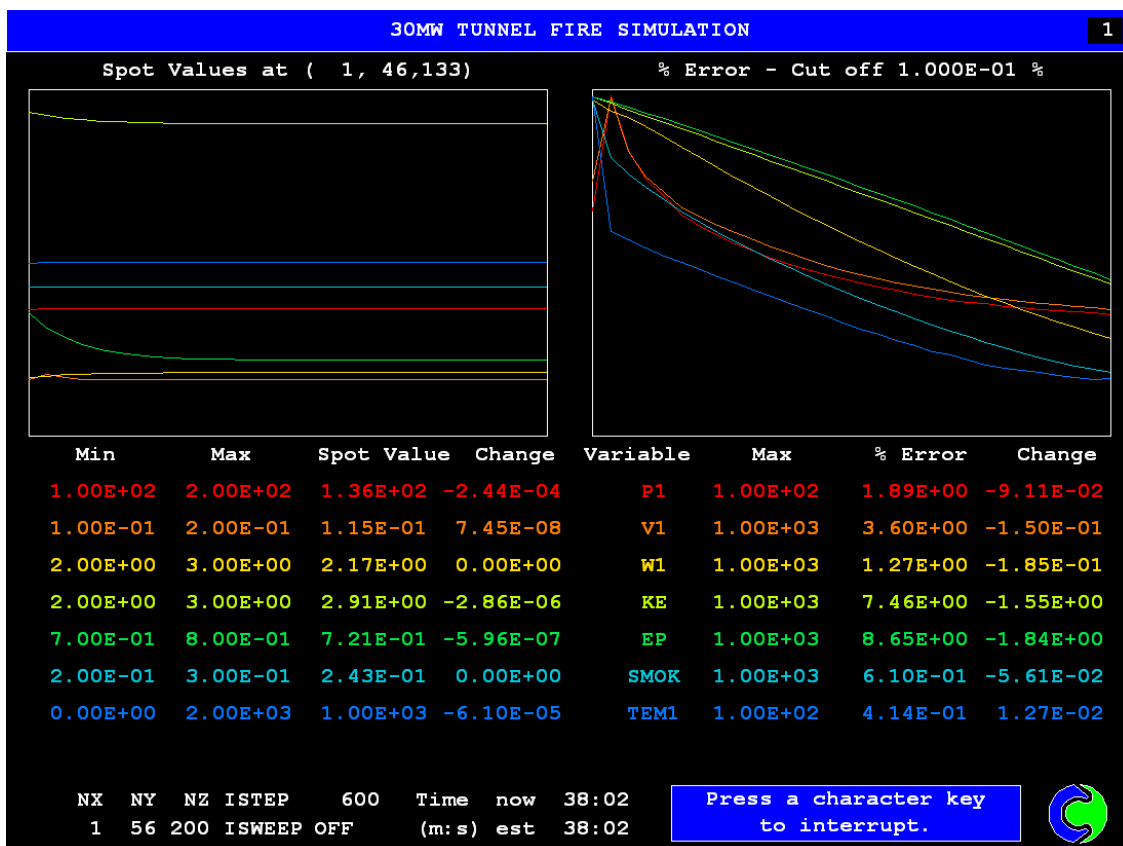


Εικόνα 177 - Πλέγμα 54 X 72

9.8 Αποτελέσματα

Οι προσομοιώσεις εκτελέστηκαν σε τυπικό Η/Υ με επεξεργαστή Pentium 2.6 GHz με 4GB Ram. Ο χρόνος που αφιερώθηκε ήταν περίπου 10 – 30min για τις περιπτώσεις σε δυο διαστάσεις και 8 – 50h για τις περιπτώσεις σε τρεις διαστάσεις ανάλογα με την πυκνότητα του πλέγματος.

Η τυπική μορφή των υπολοίπων (residuals) κατά την πορεία της σύγκλισης παρατίθενται στην εικόνα - 178 .

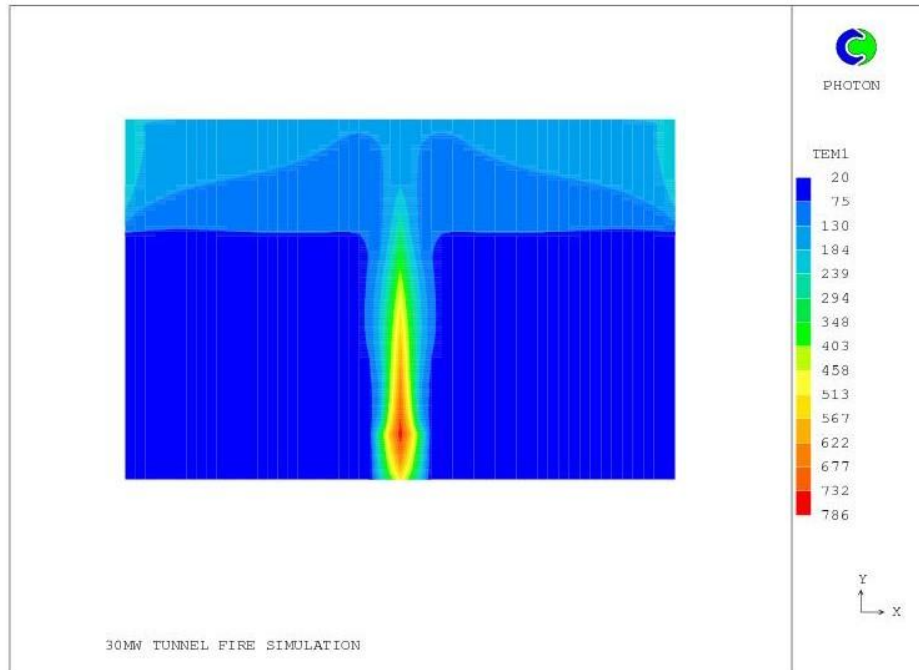


Εικόνα 178 – Διάγραμμα σύγκλισης υπολοίπων για την περίπτωση πλέγματος NY x NZ = 54 x 200

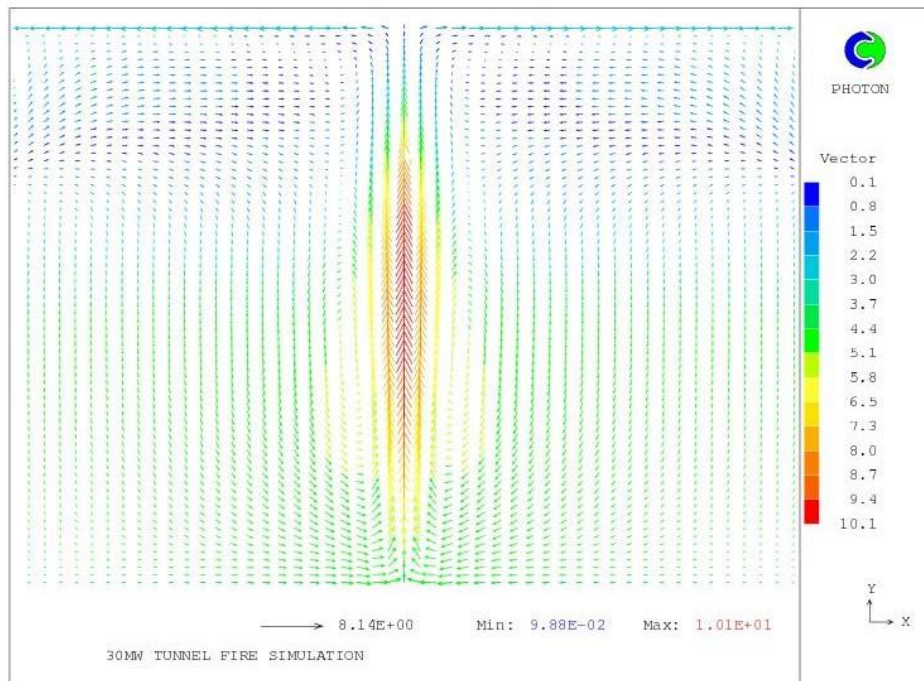
Κριτήρια σύγκλισης αποτελούν οι σταθερότητα των τιμών σε κάποιο κρίσιμο κελί (spot value) και η πτώση των υπολοίπων – που εκφράζουν τις διαφορές των μεταβλητών μεταξύ διαδοχικών επαναλήψεων - κάτω από μια συγκεκριμένη τιμή που έχει επιλεγεί από το χρήστη.

Στη συνέχεια δίδονται αποτελέσματα υπό μορφή ισοσταθμικών καμπυλών θερμοκρασίας, ταχύτητας (contour plots) και διαγραμμάτων ταχύτητας κατά ύψος της σήραγγας σε αποστάσεις 30 – 50 – 70m κατάντι που δημιουργήθηκαν με το λογισμικό PHOTON για μέγεθος πυρκαγιάς 30 – 50 MW.

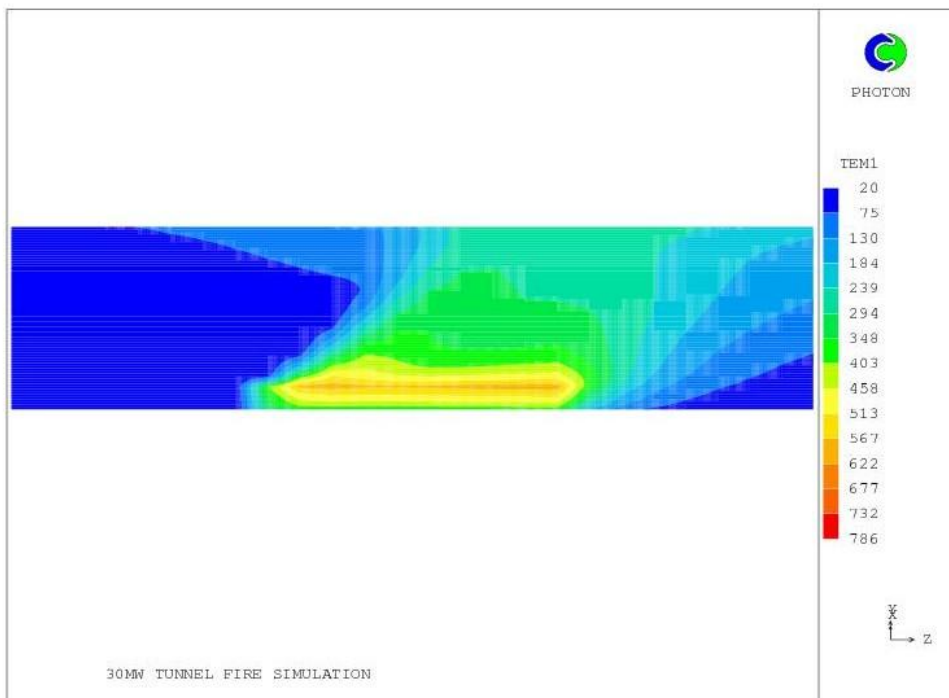
A. ΙΣΧΥΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ = 30 MW



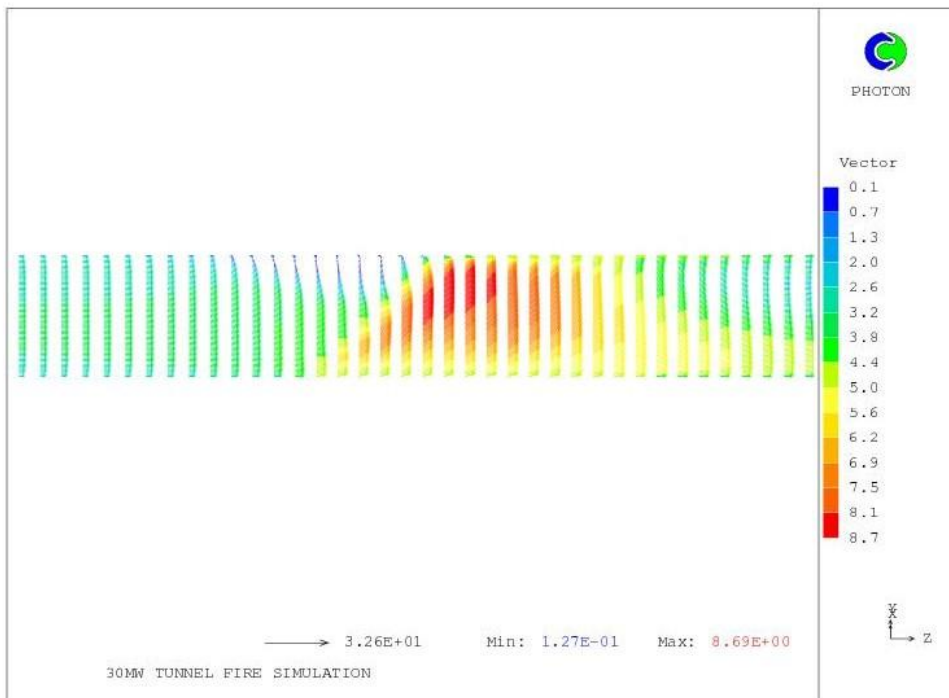
Εικόνα 179 -Εγκάρσια κατανομή θερμοκρασίας στο σημείο πυρκαγιάς



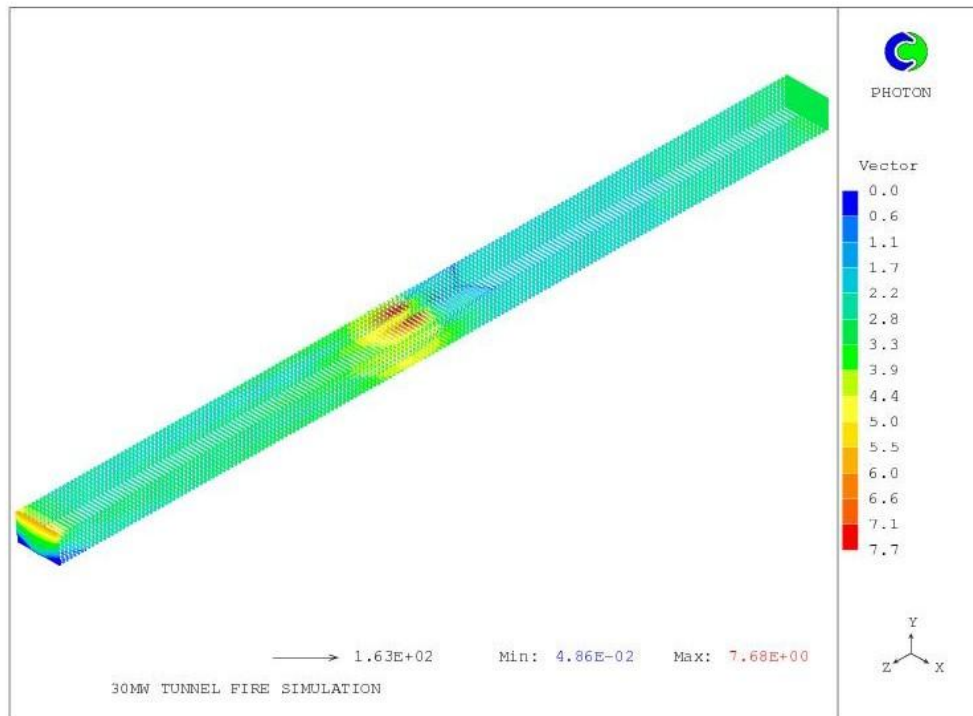
Εικόνα 180 - Ανύσματα ταχυτήτων κατά την εγκάρσια διεύθυνση στο σημείο πυρκαγιάς



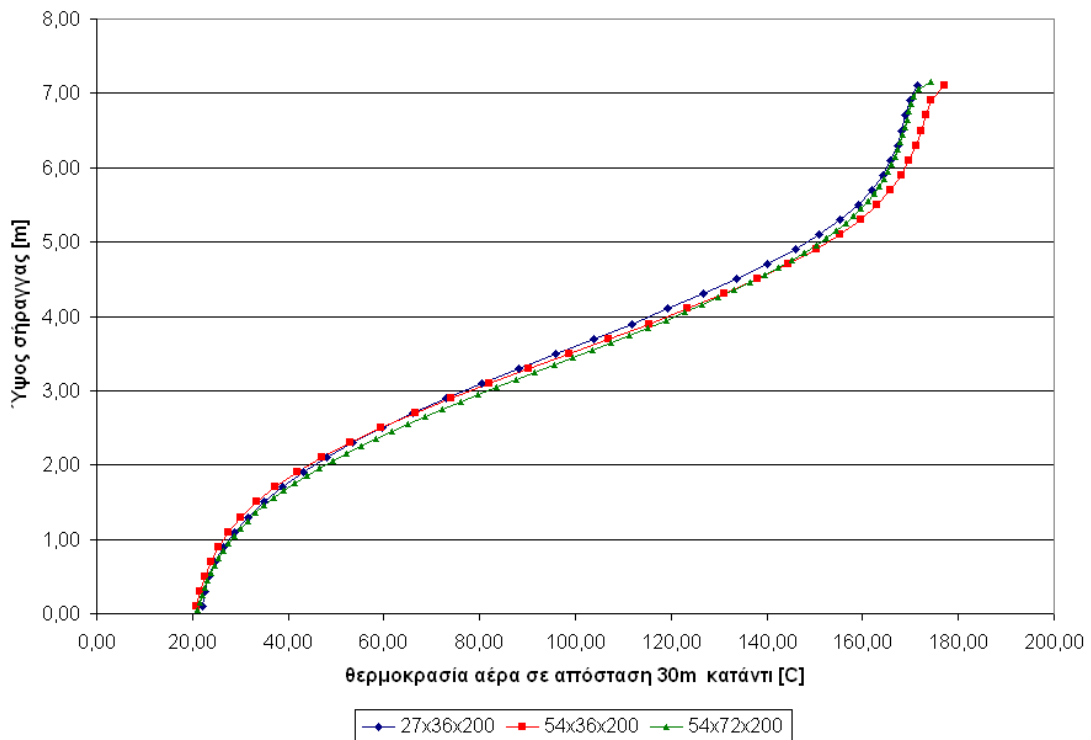
Εικόνα 181 - Διαμήκης κατανομή θερμοκρασίας στο σημείο πυρκαγιάς



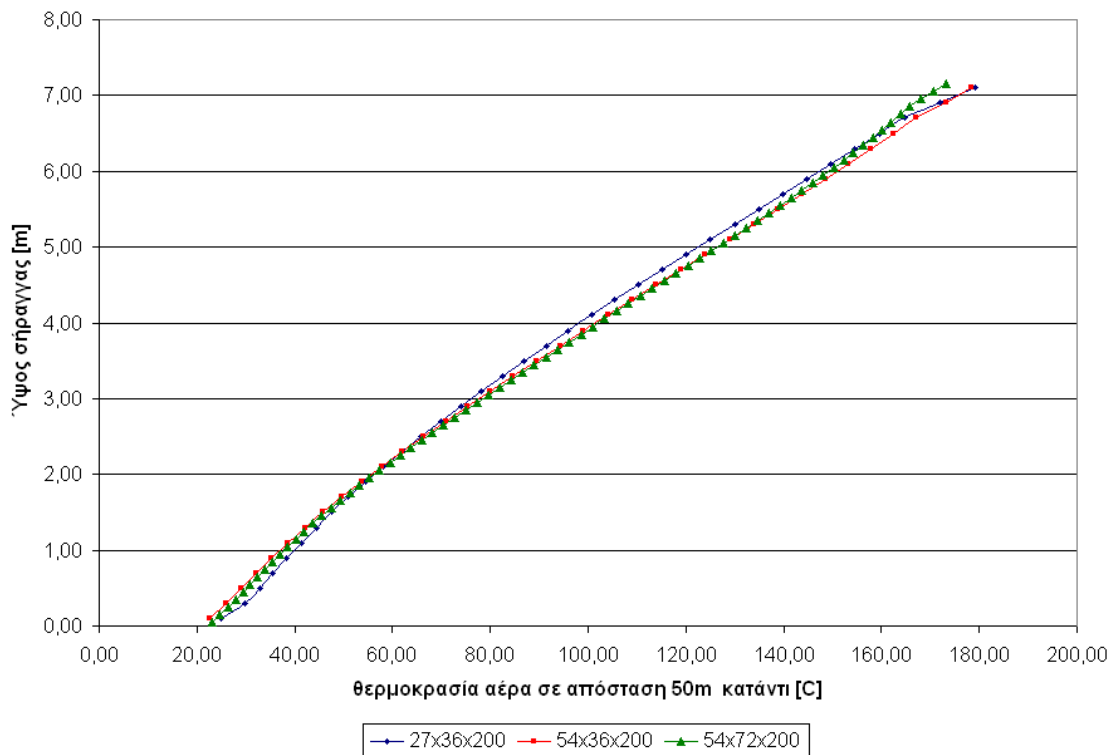
Εικόνα 182 - Ανύσματα ταχυτήτων κατά τη διαμήκη διεύθυνση στο σημείο πυρκαγιάς



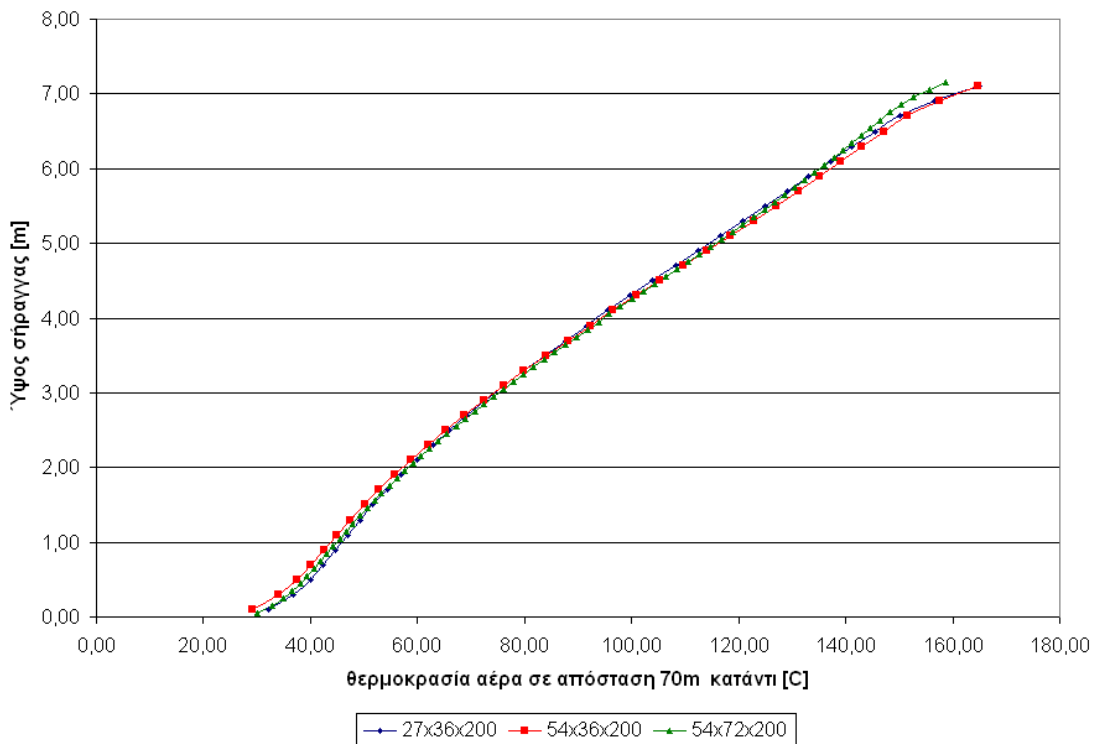
Εικόνα 183 - Ανόσματα ροής σε τρεις διαστάσεις κατά μήκος της σήραγγας



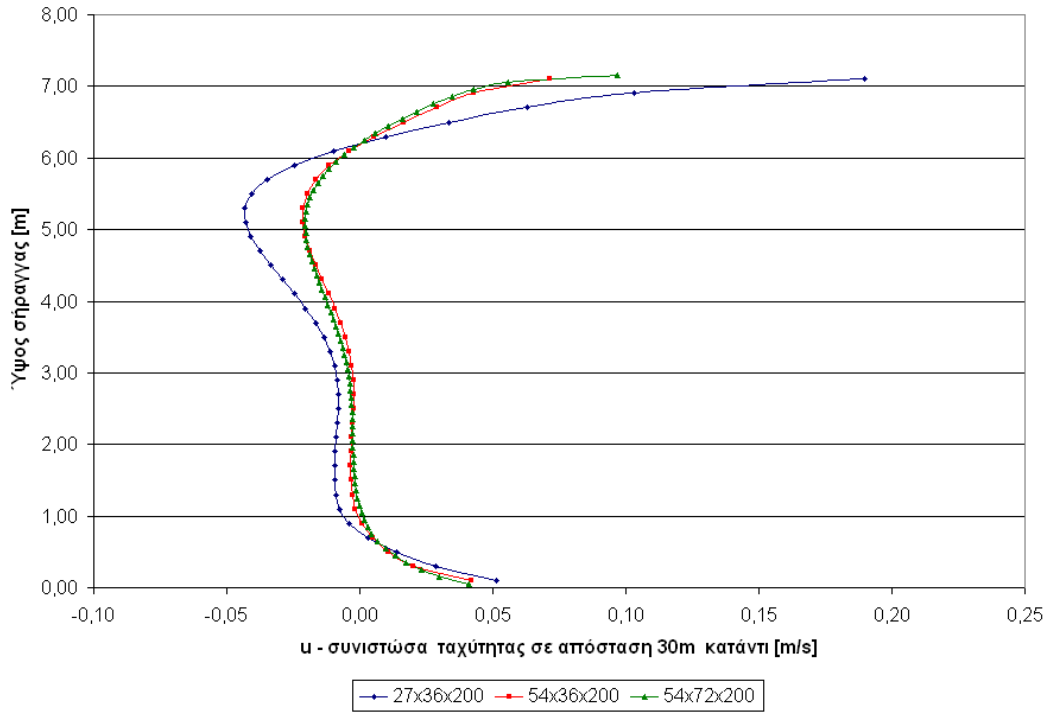
Εικόνα 184 - Θερμοκρασία κατά ύψος της σήραγγας σε απόσταση 30m κατόντι του σημείου πυρκαγιάς



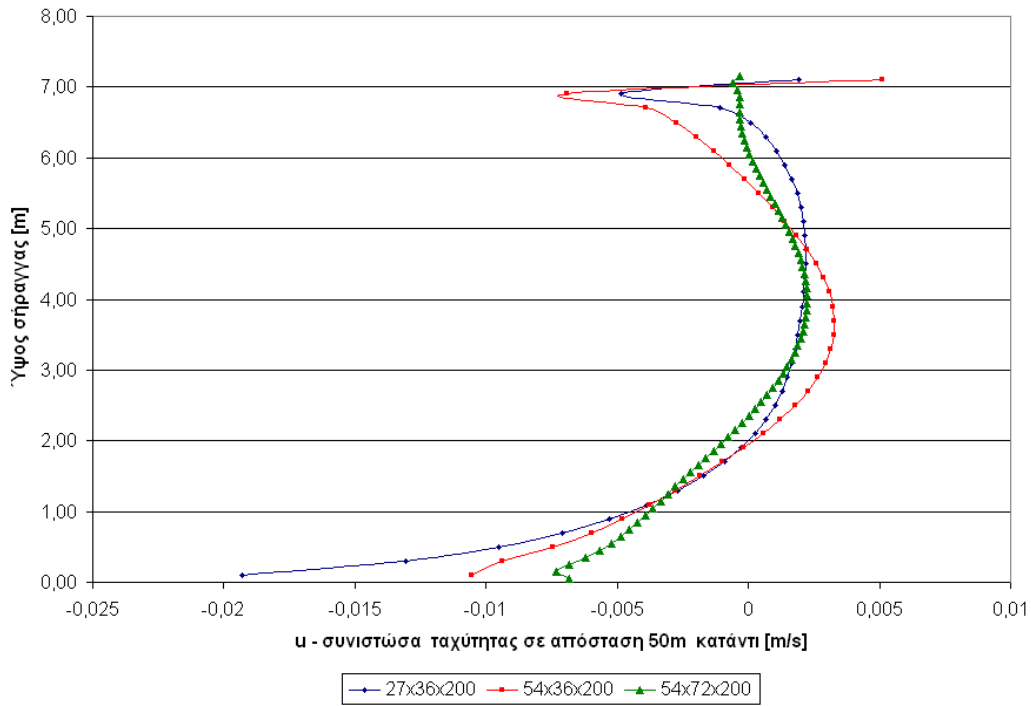
Εικόνα 185 - Θερμοκρασία κατά ύψος της σήραγγας σε απόσταση 50m κατόντι του σημείου πυρκαγιάς



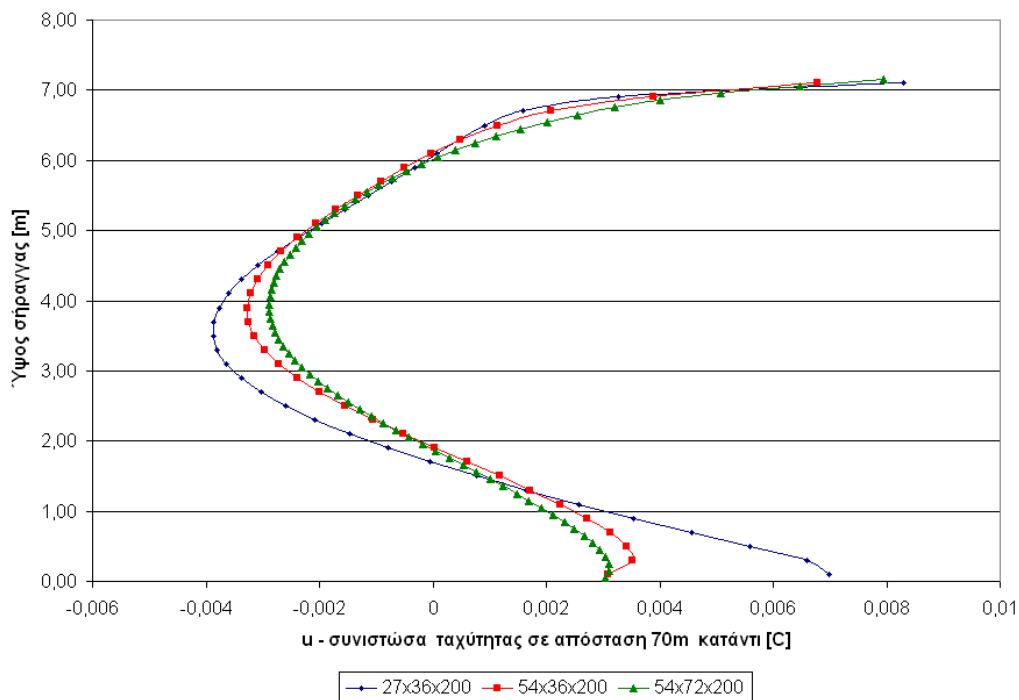
Εικόνα 186 - Θερμοκρασία κατά ύψος της σήραγγας σε απόσταση 70m κατόντι του σημείου πυρκαγιάς



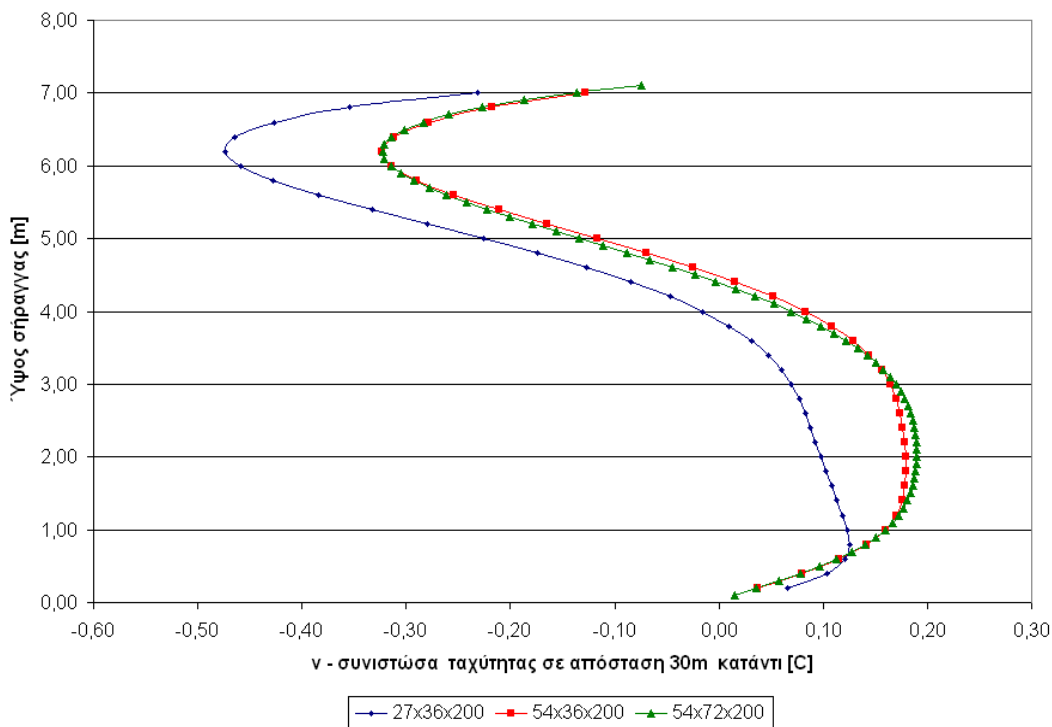
Εικόνα 187 - Κατανομή u- συνιστώσας ταχύτητας κατά ύψος της σήραγγας σε απόσταση 30m κατάντι της φωτιάς



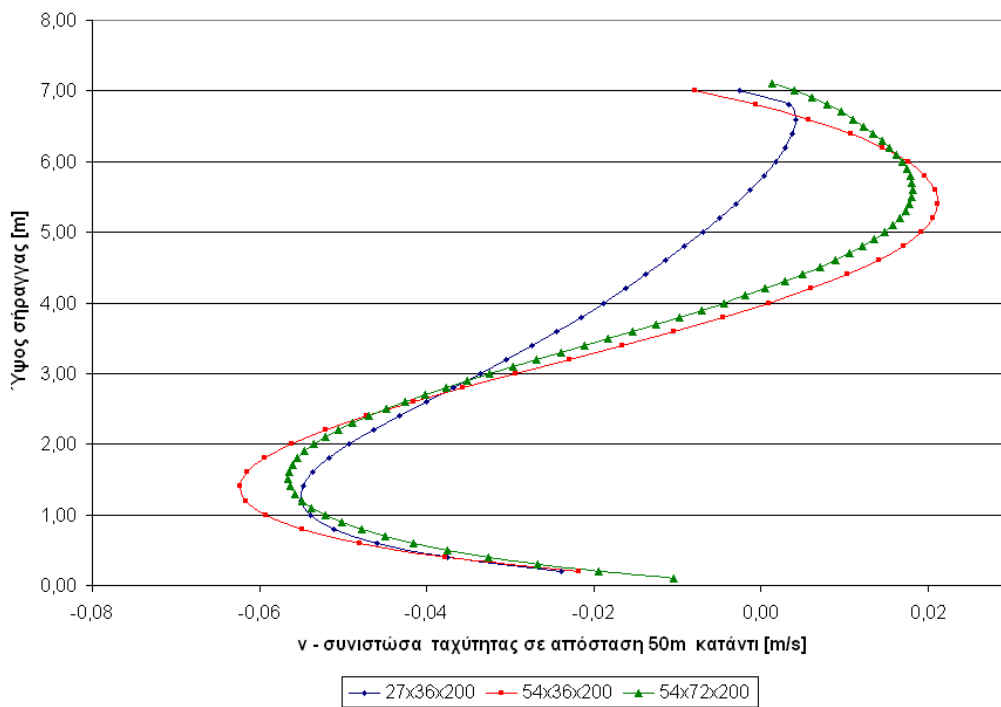
Εικόνα 188 - Κατανομή u- συνιστώσας ταχύτητας κατά ύψος της σήραγγας σε απόσταση 50m κατάντι της φωτιάς



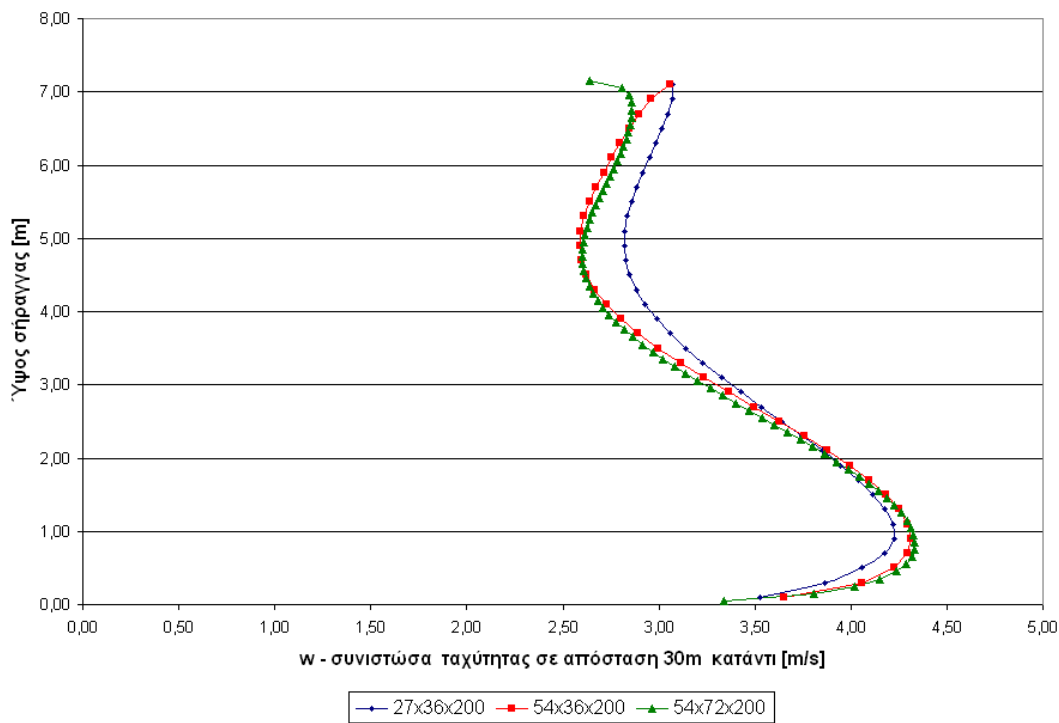
Εικόνα 189 - Κατανομή u- συνιστώσας ταχύτητας κατά ύψος της σήραγγας σε απόσταση 70m κατάντι της φωτιάς



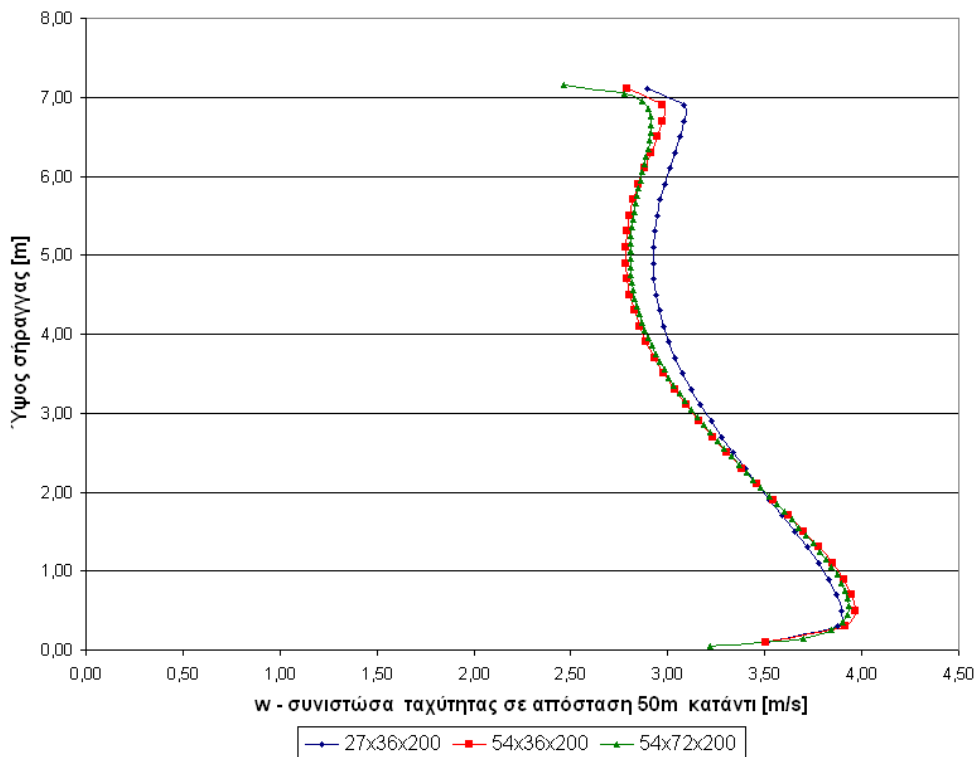
Εικόνα 190 - Κατανομή v- συνιστώσας ταχύτητας κατά ύψος της σήραγγας σε απόσταση 30m κατάντι της φωτιάς



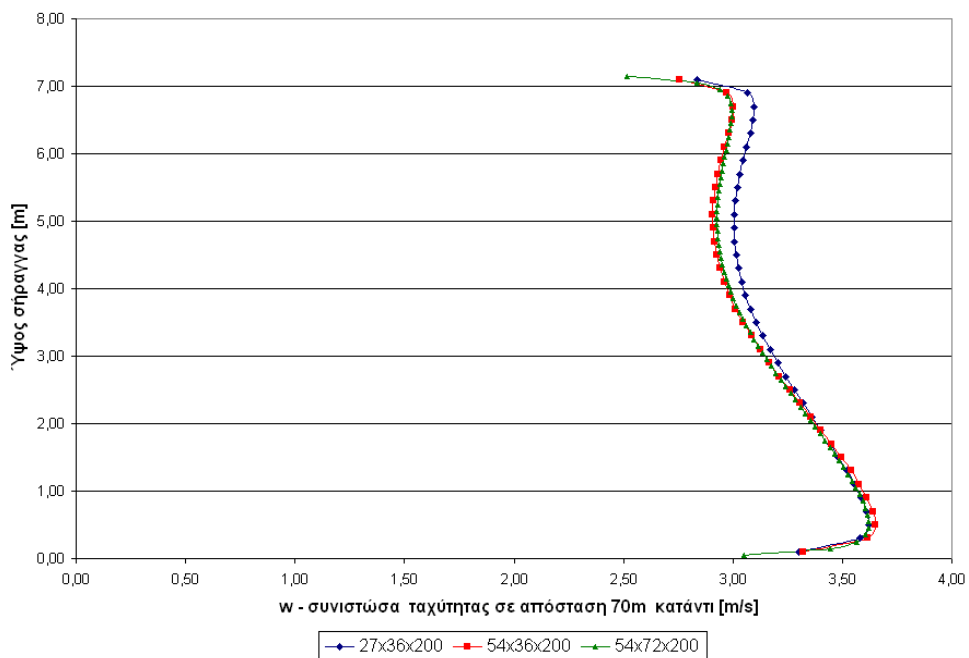
Εικόνα 191 - Κατανομή u- συνιστώσας ταχύτητας κατά ύψος της σήραγγας σε απόσταση 50m κατάντι της φωτιάς



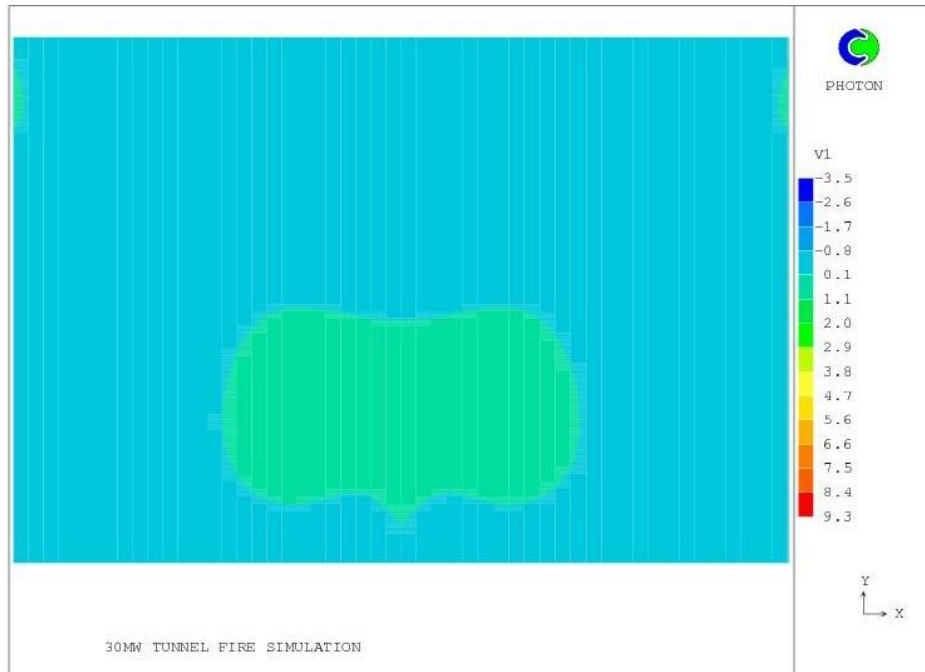
Εικόνα 192 - Κατανομή w- συνιστώσας ταχύτητας κατά ύψος της σήραγγας σε απόσταση 30m κατάντι της φωτιάς



Εικόνα 193 - Κατανομή w- συνιστώσας ταχύτητας κατά ύψος της σήραγγας σε απόσταση 50m κατόντι της φωτιάς



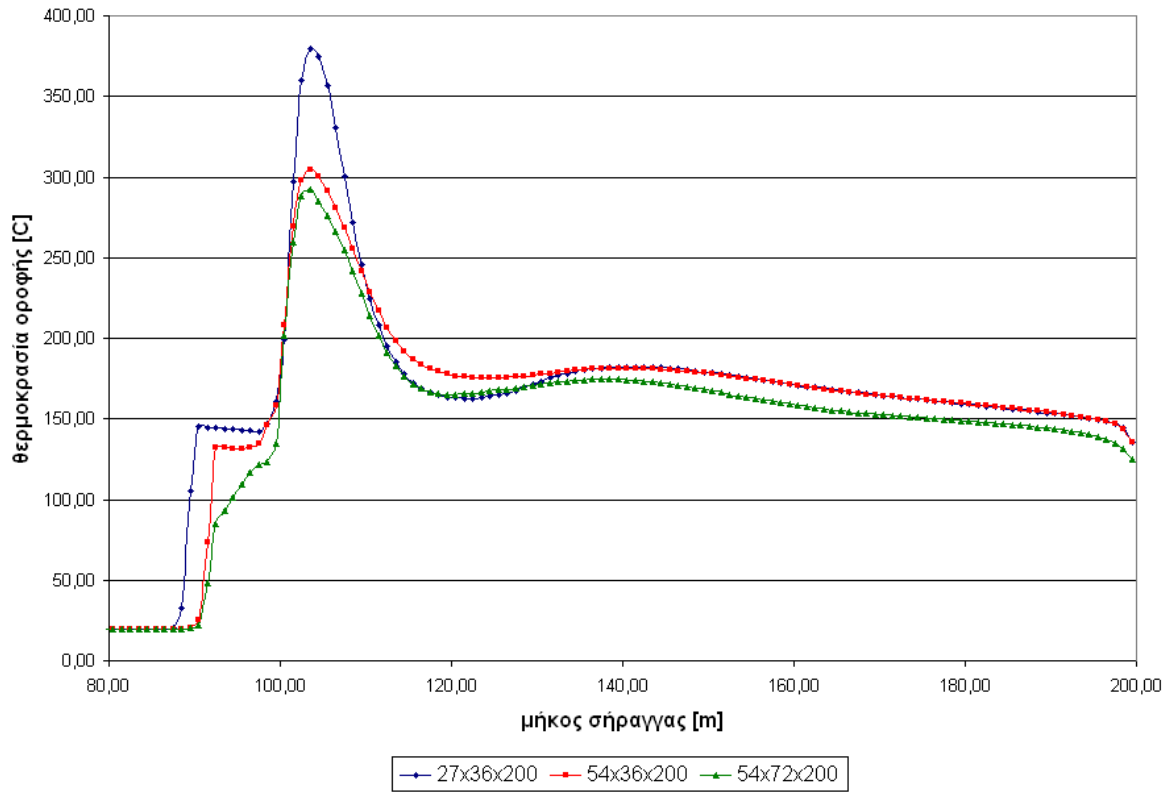
Εικόνα 194 - Κατανομή w- συνιστώσας ταχύτητας κατά ύψος της σήραγγας σε απόσταση 70m κατόντι της φωτιάς



Εικόνα 195 - Κατανομή v-συνιστώσας ταχύτητας σε απόσταση 30m κατόντι

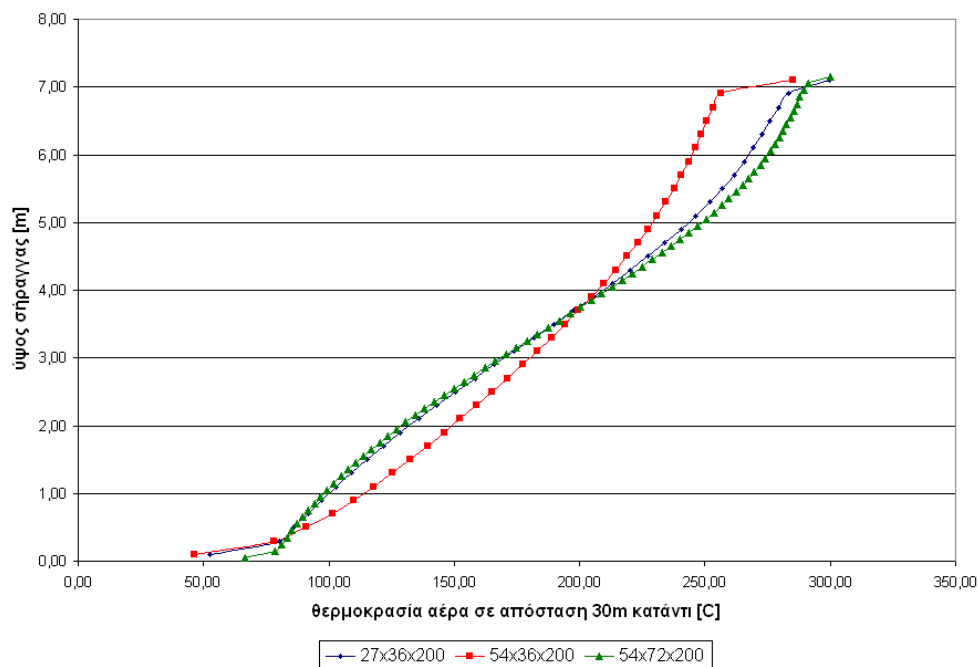


Εικόνα 196 - - Κατανομή w-συνιστώσας ταχύτητας σε απόσταση 30m κατόντι

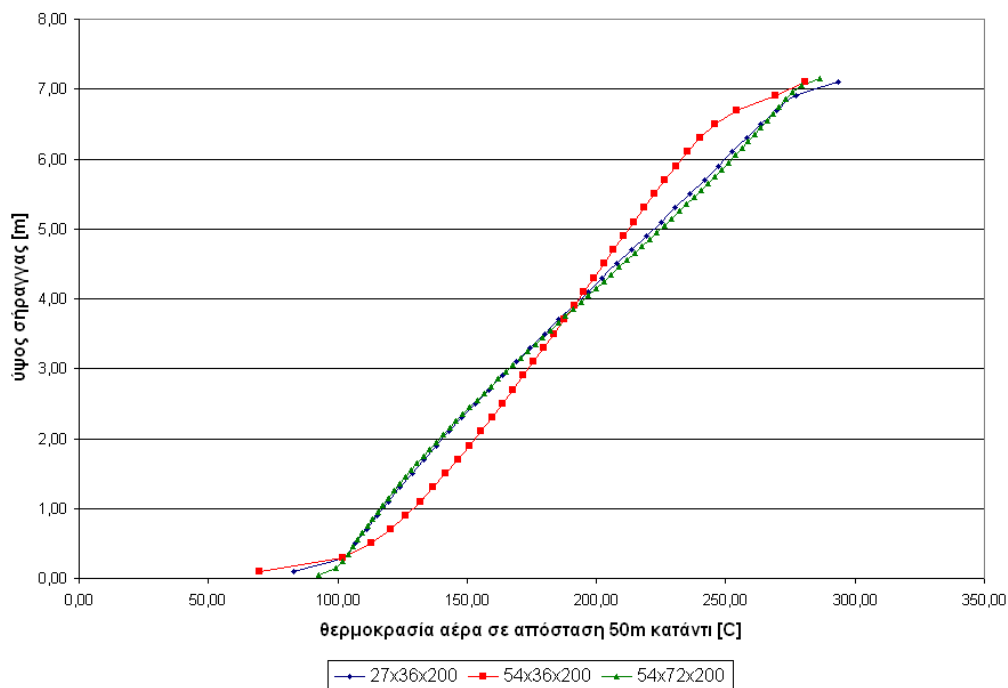


Εικόνα 197 - Κατανομή θερμοκρασίας οροφής κατά μήκος της σήραγγας

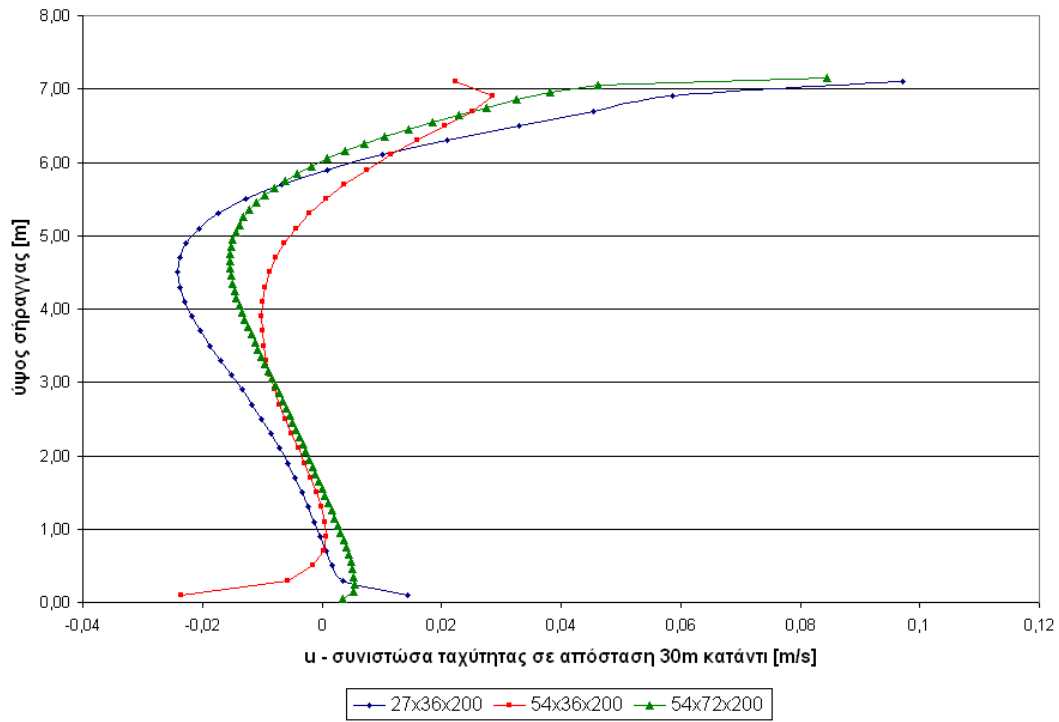
B. ΙΣΧΥΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ = 50 MW



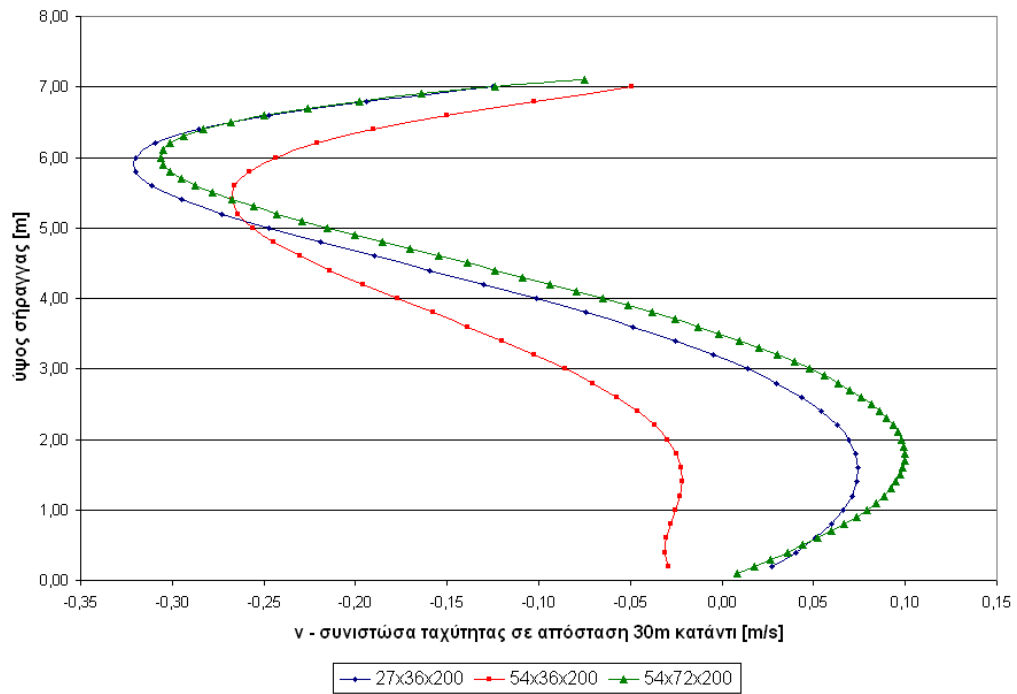
Εικόνα 198 - Κατανομή θερμοκρασίας κατά ύψος της σήραγγας σε απόσταση 30m κατόντι της φωτιάς



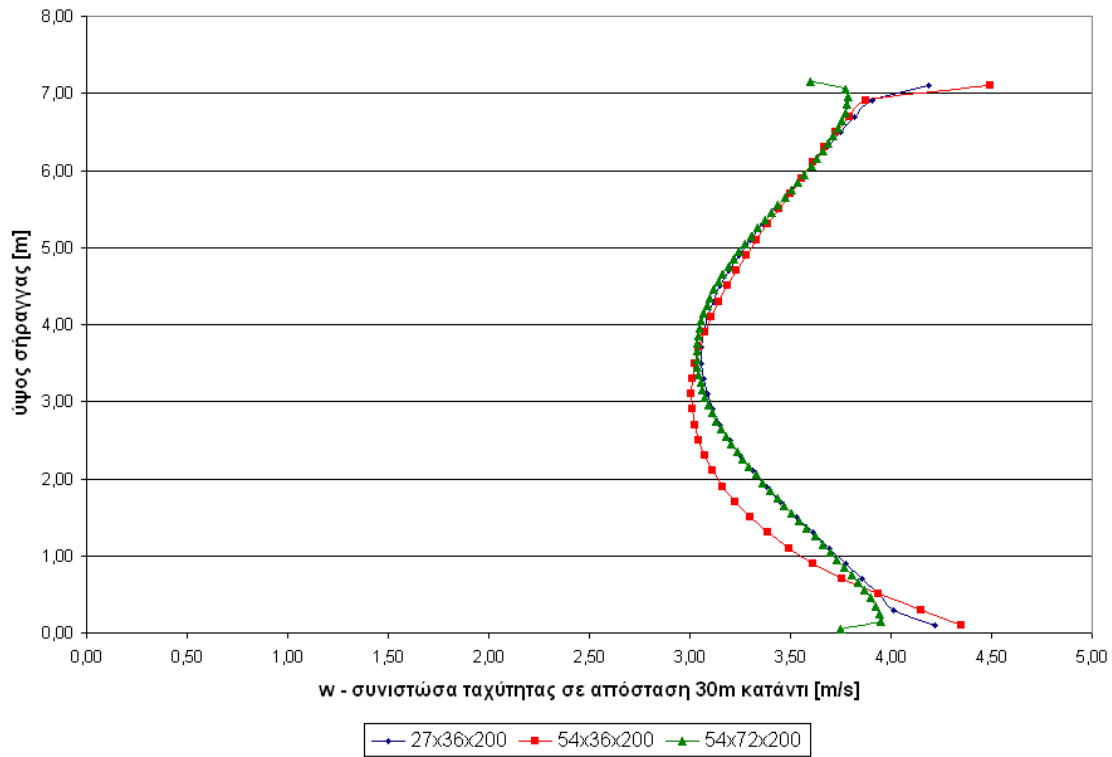
Εικόνα 199 - Κατανομή θερμοκρασίας κατά ύψος της σήραγγας σε απόσταση 50m κατόντι της φωτιάς



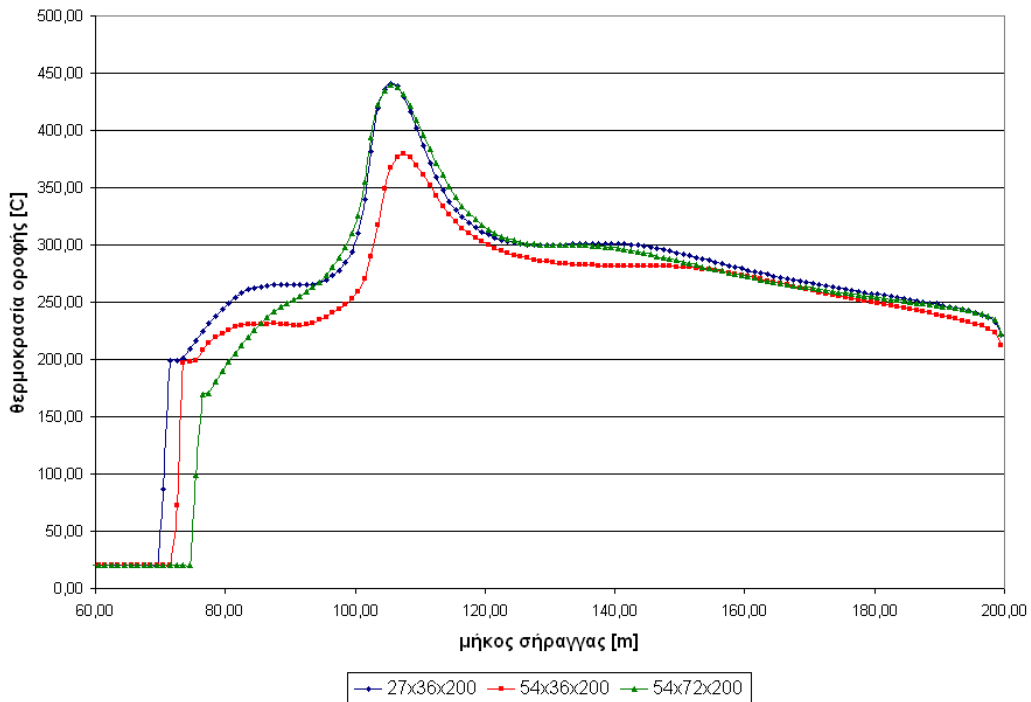
Εικόνα 200 - Κατανομή u- συνιστώσας ταχύτητας κατά ύψος της σήραγγας σε απόσταση 30m κατάντι της φωτιάς



Εικόνα 201 - Κατανομή v- συνιστώσας ταχύτητας κατά ύψος της σήραγγας σε απόσταση 30m κατάντι της φωτιάς

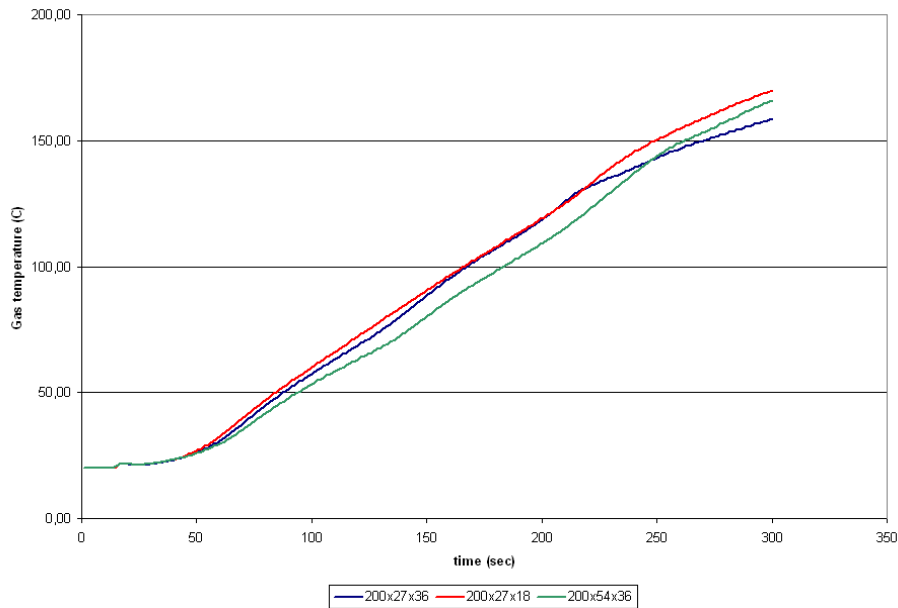


Εικόνα 202 - Κατανομή w- συνιστώσας ταχύτητας κατά ύψος της σήραγγας σε απόσταση 30m κατάντι της φωτιάς

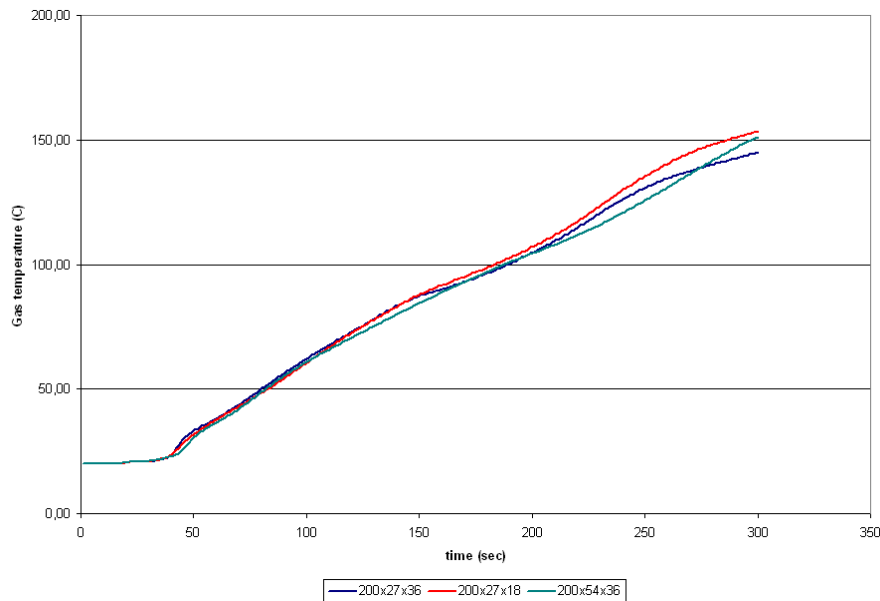


Εικόνα 203 - Κατανομή θερμοκρασίας οροφής κατά μήκος της σήραγγας

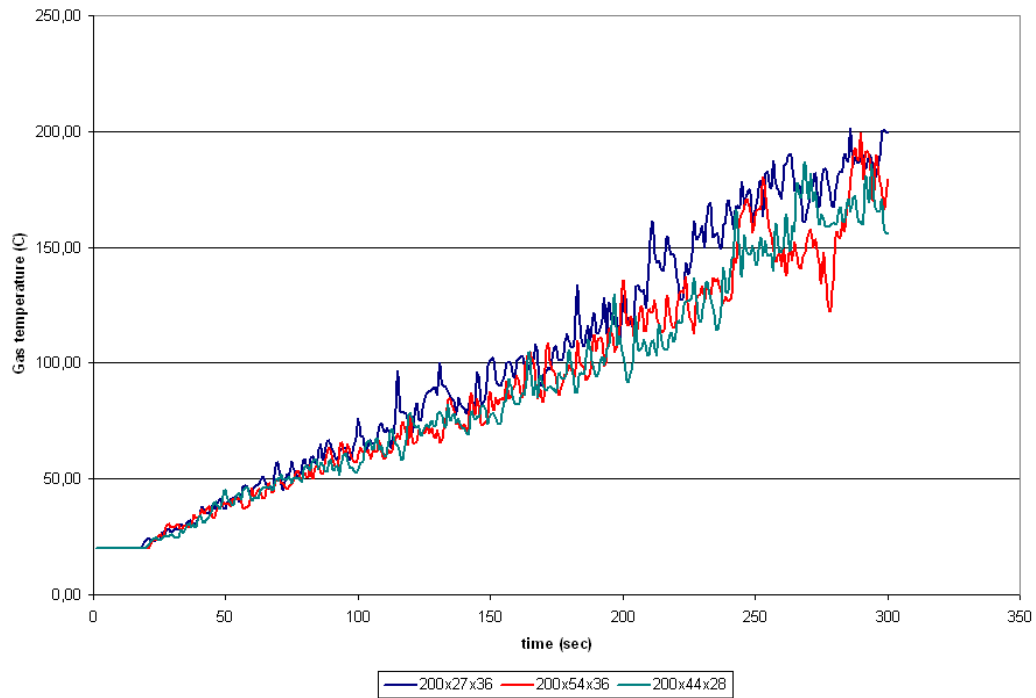
Στη συνέχεια δίδονται συγκριτικά διαγράμματα μελέτης ανεξαρτησίας πλέγματος για τμήμα σήραγγας μήκους 200m και διατομής 10.8m x 7.2m για χρονική εξέλιξη πυρκαγιάς 30MW - που αντιστοιχεί σε φωτιά λεωφορείου - για το αρχικό διάστημα ανάπτυξης [0-300s] με βάση το γραμμικό πρότυπο. Οι προσομοιώσεις διενεργήθηκαν με χρήση του PHOENICS και FDS για μέγεθος πλέγματος σύμφωνα με τον Πίνακα 9.1.



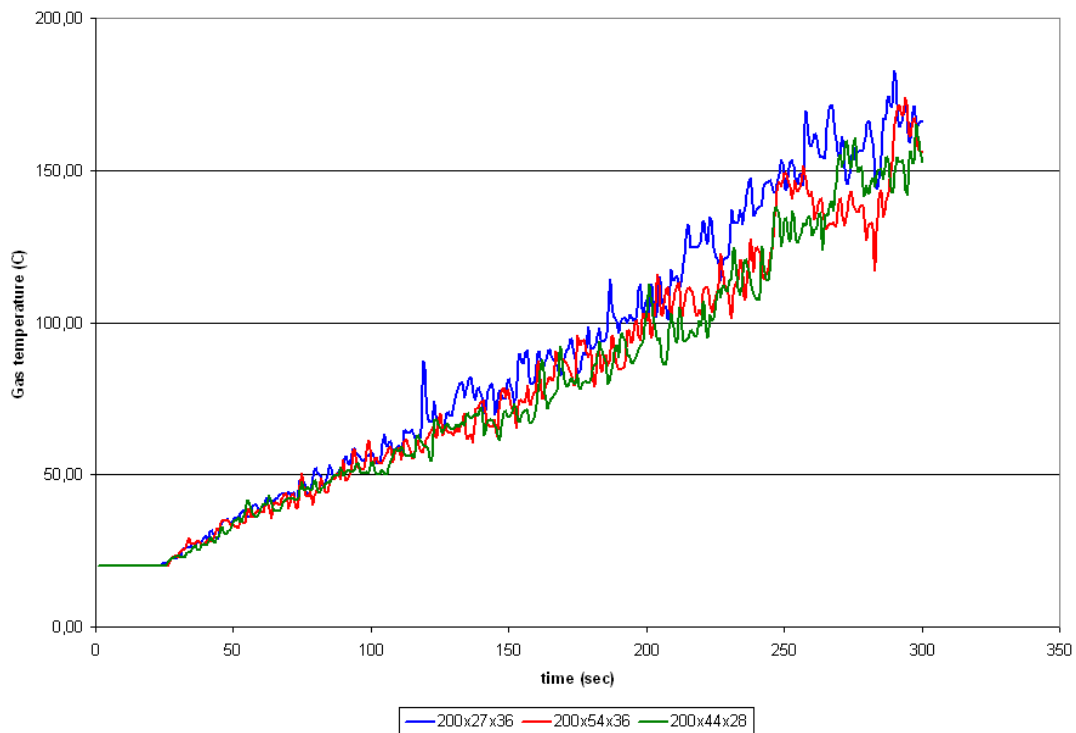
Εικόνα 204 – Χρονική εξέλιξη πυρκαγιάς 30 MW σε απόσταση 30m κατάντι σε ύψος 7.0m



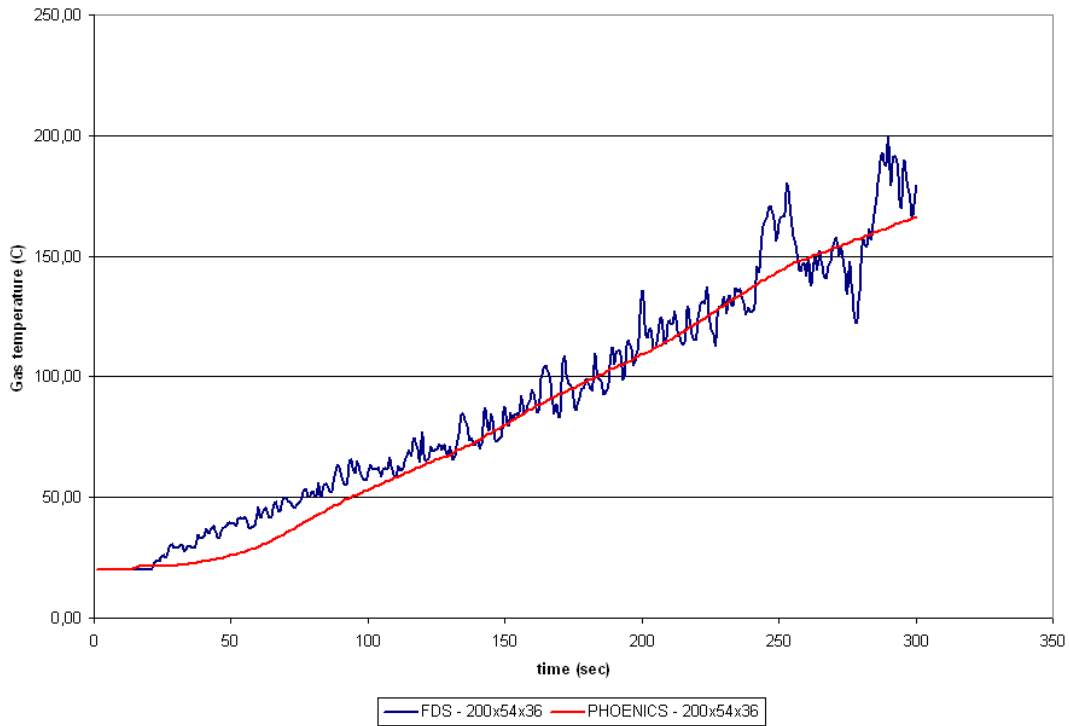
Εικόνα 205 - Χρονική εξέλιξη πυρκαγιάς 30 MW σε απόσταση 50m κατάντι σε ύψος 7.0m



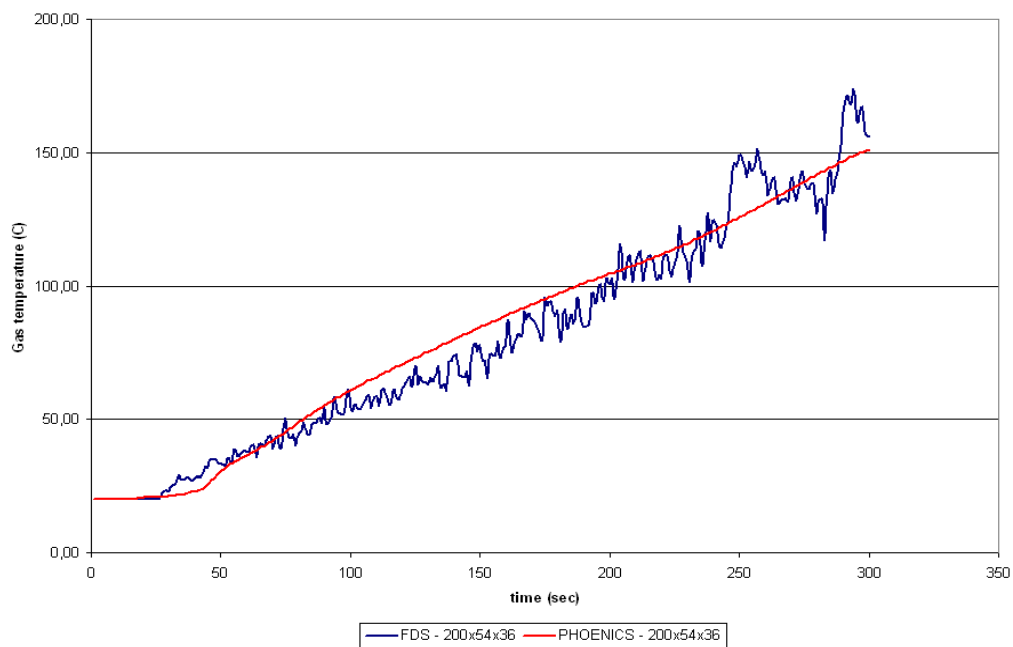
Εικόνα 206 –Χρονική εξέλιξη πυρκαγιάς σε απόσταση 30m κατόντι με χρήση του λογισμικού FDS



Εικόνα 207 - Χρονική εξέλιξη πυρκαγιάς σε απόσταση 30m κατόντι με χρήση του λογισμικού FDS



Εικόνα 208 - Συγκριτική εξέλιξη με προλέξεις FDS πυρκαγιάς 30 MW σε απόσταση 30m κατόντι σε ύψος 7.0m



Εικόνα 209 - Συγκριτική εξέλιξη με προλέξεις FDS πυρκαγιάς 30 MW σε απόσταση 50m κατόντι σε ύψος 7.0m

9.9 Συμπεράσματα - Σχολιασμός

Με βάση τα αποτελέσματα και διαγράμματα των υπολογισμών με το λογισμικό PHOENICS, μπορούν να ληφθούν ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα όπως :

1. Το λογισμικό PHOENICS βασισμένο στο μοντέλο τύρβης k-ε κατάφερε να προλέξει με πολύ καλή ακρίβεια τη χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας σε απόσταση 30 – 50m από το σημείο πυρκαγιάς. Η θερμοκρασία γενικά ακολουθεί μία ομαλή καμπύλη (Εικόνες 204-205) σε σχέση με αυτή που εκτιμήθηκε μέσω του λογισμικού FDS (Εικόνες 206-207) για το ίδιο μέγεθος πλέγματος (Εικόνες 208 – 209). Η διακύμανση πιθανόν να οφείλεται σε :
 - Στη διαφορετική μοντελοποίηση της τύρβης για τα δυο λογισμικά (k-ε / LES)
 - Στη διαφορετική μέθοδο επίλυσης (πεπερασμένοι όγκοι – πεπερασμένες διαφορές)
 - Στο γεγονός ότι ο λόγος των διαστάσεων στο κάθε κελί ήταν της τάξης του $(z,x,y) = 1:5:10$ γεγονός που ενδεχομένως να εισαγάγει θέματα αριθμητικής διάχυσης μιας και στη μέθοδο LES συχνά οι διαστάσεις των κελιών θα πρέπει να προσεγγίζουν τον κύβο.
 - Στο γεγονός ότι η φωτιά αντιμετωπίστηκε με διαφορετικό τρόπο από τα δυο λογισμικά. Στο PHOENICS ως χρονικά μεταβαλλόμενη θερμοροή ενώ στο FDS μέσω γραμμικής μεταβολής μιας φωτιάς υδρογονανθράκων με θερμογόνο δύναμη καυσίμου της τάξης των 47281 kJ/kg, όπου ορίζεται η αρχική και η τελική εκλυόμενη θερμική ισχύ σε kW. Στη συνέχεια το καύσιμο «καίγεται» μέσω του απλού μηχανισμού (μοντέλο μιας εξίσωσης) που μελετήθηκε στο Κεφάλαιο 3. Για το λόγο αυτό οι διαταραχές της θερμοκρασίας εμπεριέχουν αντίστοιχα μεταβολές στον ρυθμό καύσης, στον τρόπο μετάδοσης ακτινοβολίας με τα τοιχώματα, κτλ.
 - Για καλύτερη μοντελοποίηση της φωτιάς, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μελλοντικά η ειδική έκδοση του PHOENICS / FLAIR για ροές με άνωση και χημική αντίδραση σε κλειστούς χώρους στάθμευσης, γυμναστήρια, εμπορικά κέντρα, κτλ.
2. Η καμπύλη θερμοκρασίας κατά ύψος της σήραγγας σε αποστάσεις 30 – 70m κατάντι υποδηλώνει την ανάπτυξη ενός θερμικού στρώματος στην οροφή σύμφωνα με όσα έχουν μελετηθεί αντίστοιχα στη βιβλιογραφία από τους Ingason et al. [19,20,24]. Το θερμικό

στρώμα καταλαμβάνει περίπου το μισό της συνολικής διατομής όπως ακριβώς διαπιστώθηκε και στο Κεφάλαιο 6 για το λογισμικό FDS.

3. Οι καμπύλες των εγκάρσιων συνιστωσών της ταχύτητας u , v κατά ύψος της σήραγγας σε ανάλογες αποστάσεις (30,50,70) κατάντι της σήραγγας υποδηλώνουν μια έντονη ανακυκλοφορία εξαιτίας των αρνητικών τιμών ταχύτητας σε ύψος 3.00 – 7.00 (Εικόνες 187 - 191), που οφείλεται σε αλληλεπίδραση του θερμικού στρώματος κοντά στην οροφή με το υπόλοιπο μισό (0.0 – 4.0). Παρατηρείται επίσης ότι για ισχύ φωτιάς 50 MW υπάρχει εντονότερη αλληλεπίδραση (Εικόνες 187,190,200,201) εξαιτίας των ισχυρότερων δυνάμεων άνωσης και κλίσεων ταχύτητας. Παρόμοιες μορφές ανακυκλοφορίας έχουν εκτιμηθεί και στη βιβλιογραφία από τους Borello et al. [77].
4. Η καμπύλη της διαμήκουσ συνιστώσας της ταχύτητας w κατά ύψος της σήραγγας στις ίδιες αποστάσεις παρουσιάζει μια μείωση κατάντι καθώς αλληλεπιδρά αφενός με τα στερεά όρια όπου παρατηρούνται μηδενικές ταχύτητες (συνθήκη μη – ολίσθησης) και αφετέρου εξαιτίας της αλληλεπίδραση με το θερμικό στρώμα της οροφής, εφαρμόζονται δυνάμεις διάτμησης μεταξύ γειτονικών στρωμάτων ρευστών που επιβραδύνουν τον κύριο όγκο της ροής (Εικόνες 192 – 194).
5. Από τη καμπύλη κατανομής της θερμοκρασίας κατά μήκος της σήραγγας (Εικόνες 197, 203) για μέγεθος φωτιάς 30 – 50MW λαμβάνονται τα ακόλουθα :
 - Παρατηρείται μέγιστη τιμή της τάξης των 310 C για ισχύ 30MW για απόσταση 5.0m από το σημείο έναυσης. Αντίστοιχα για ισχύ 50MW παρατηρείται μέγιστο 445 C σε απόσταση 3.5m
 - Τα παραπάνω έρχονται σε συμφωνία με τον προσδιορισμό του σημείου μέγιστης θερμοκρασίας στη οροφή σύμφωνα με όσα ορίστηκαν για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της φλόγας στο Κεφάλαιο 2 (§2.6) και τη βιβλιογραφία [21]
 - Η μέγιστη θερμοκρασία οροφής κατά μήκος της σήραγγας επηρεάζει επίσης τον υπόλοιπο εγκατεστημένο εξοπλισμό (φωτισμός, αερισμό, εγκαταστάσεις ισχυρών / ασθενών ρευμάτων). Ειδικά για τους ανεμιστήρες ώσης, η θερμοκρασία στο κέλυφος δεν πρέπει να ξεπερνά τους 400C για διάστημα 2h (βλέπε Παράρτημα I)
6. Όσον αφορά την παραμετρική μελέτη ανεξαρτησίας πλέγματος, η κρίσιμη παράμετρος στην συνολική σύγκλιση των μεγεθών ήταν ο αριθμός κελιών $x = 54$ στην εγκάρσια διεύθυνση x .

Οι τιμές θερμοκρασίας έδωσαν πρακτικά τα ίδια αποτελέσματα για αριθμό κελιών $x=27$ & $x=54$, ενώ όσον αφορά τις εγκάρσιες συνιστώσες της ταχύτητας (u,v) απαιτήθηκε πυκνότερη διακριτοποίηση προκειμένου να αποτυπωθούν οι κλίσεις τους. Περαιτέρω διακριτοποίηση στη x -διεύθυνση κρίθηκε μη-σκόπιμη δεδομένου ότι σε φωτιές μεγάλης ισχύος με βάση τη βιβλιογραφία [31-34] τα αποτελέσματα για τη θερμοκρασία δεν διαφοροποιούνται σημαντικά στην εγκάρσια διεύθυνση καθώς η φλόγα καταλαμβάνει το σύνολο της ωφέλιμης διατομής.

10

10. Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε την παραμετρική μελέτη φωτιάς μικρής και μεγάλης ισχύος σε οδικές σήραγγες τόσο περιορισμένου πλάτους όσο και πλήρους μεγέθους που είναι ήδη λειτουργικά ενταγμένες σε οδικά δίκτυα.

Παρά το γεγονός ότι το θέμα είναι ανεξάντλητο στη διεθνή βιβλιογραφία τόσο από πλευράς επιστημονικής έρευνας αιχμής, όσο και στις εθνικές επιτροπές κρατών – μελών που καταρτίζουν και αναθεωρούν τους κανονισμούς ασφαλείας, έγινε προσπάθεια να μελετηθεί κάθε δυνατή παράμετρος που επηρεάζει το φαινόμενο, προκειμένου να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα που θα μπορούν να αποτελέσουν πολύτιμο οδηγό στις αρμόδιες αρχές.

Τα βασικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από το σύνολο της εργασίας μπορούν να συνοψισθούν επιγραμματικά :

1. Η παραδοχή χρήσης ποσοστού ακτινοβολίας της τάξης του 30% αποδείχθηκε σωστή κατά τη συγκριτική μελέτη προλέξεων και πειραματικών μετρήσεων που έγινε καταρχήν σε σήραγγα περιορισμένων διαστάσεων στο Κεφάλαιο 4 και εν συνεχεία υιοθετήθηκε και στις προσομοιώσεις πλήρους κλίμακας στα Κεφάλαια 5 & 6.
2. Μελετήθηκαν τόσο πλήρεις σήραγγες μήκους αρκετών χιλιομέτρων όσο και τμήματα αυτών κοντά στο σημείο της φωτιάς. Τα μεταξύ τους αποτελέσματα ανάντι και κατάντι σε σχέση με τις πειραματικές μετρήσεις δεν διέφεραν σημαντικά όπως έδειξαν τα σχετικά σφάλματα των Κεφαλαίων 5&6.
3. Η μέγιστη θερμοκρασία στο εσωτερικό της σήραγγας ανάλογα με το μέγεθος της φωτιάς κυμαίνεται από 300 – 450 C σε απόσταση 30m κατάντι, όπως εκτιμήθηκε στο Κεφάλαιο 9.
4. Η επιφανειακή θερμοκρασία που αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την πιθανότητα κατάρρευσης δομικών τμημάτων είναι χαμηλότερη για ισχύ 30MW και οριακά υψηλότερη για ισχύ 50MW. Ο χρόνος αντίδρασης των συνεργείων διάσωσης είναι κρίσιμη παράμετρος προκειμένου να αποφευχθεί πιθανή αστοχία και εγκλωβισμός θυμάτων.

5. Η διαδικασία εκκένωσης επηρεάζεται σημαντικά από τους αρχικούς χρόνους αναγνώρισης (detection) και αντίδρασης (reaction) του κινδύνου, καθώς και από την εκλογή της όδευσης διαφυγής. Τα επίπεδα συγκέντρωσης μονοξειδίου του άνθρακα ήταν της τάξης 60-80 ppm για την κρίσιμη φάση ανάπτυξης.
6. Δεν υπήρχε ουσιαστική διαφοροποίηση στα αποτελέσματα χρονικής μεταβολής θερμοκρασίας από τη χρήση διαφορετικών μοντέλων τύρβης (k-ε, LES) όπως εξετάσθηκε στο Κεφάλαιο 9.
7. Υπήρχε συμφωνία στο πάχος του θερμικού στρώματος που σχηματίζεται και στη θέση της μέγιστης θερμοκρασίας οροφής για φωτιές μεγάλης ισχύος (30-50MW) κατάντι της φωτιάς και για τα δυο πρότυπα.
8. Υπάρχουν περιοχές κοντά στη φωτιά με έντονη ανακυκλοφορία στην εγκάρσια διεύθυνση που δυνητικά μπορούν να επηρεάσουν τις τοπικές συγκεντρώσεις καπνού και τοξικών ρύπων (Κεφ. 10).

Εκτός από όσα εξετάσθηκαν στην παρούσα εργασία, συστήνεται περαιτέρω εμβάθυνση του θέματος, ώστε να γίνει «ρεαλιστικότερη» αναπαράσταση των συνθηκών φωτιάς στο εσωτερικό σήραγγων. Ειδικότερα δε συστήνονται προς μελλοντική έρευνα :

1. Στη παρούσα εργασία η φωτιά μεγέθους 30/50/100 MW αναπαρίσταται μέσω μιας επιφάνειας 20m² στο μέσο της σήραγγας, με βάση γραμμικό ή εκθετικό πρότυπο (Κεφάλαιο 6). Δεδομένου ότι οι φωτιές μεγάλης ισχύος προέρχονται κυρίως από την καύση υδρογονανθράκων θα μπορούσε να περιγράψει μέσω μιας φωτιάς λίμνης (pool fire) με μεταβαλλόμενη ακτίνα ιδίως για την φάση ανάπτυξης. Η παραπάνω περιγραφή είναι πιο ρεαλιστική καθώς όπως δείχθηκε στην ιστορική αναδρομή των ατυχημάτων του Κεφαλαίου 2, καθώς τέτοιες φωτιές προέρχονται από σύγκρουση και διαρροή καυσίμου στο οδόστρωμα, με τις τελικές διαστάσεις της φλόγας να καταλαμβάνουν το σύνολο της διατομής.
2. Για φωτιές μικρότερης ισχύος (5-30MW) όπου προέρχονται κυρίως από σύγκρουση οχημάτων είτε ανάφλεξη σε ακινητοποιημένα οχήματα συνέπεια μηχανικής βλάβης (υπερθέρμανση κινητήρα, βραχυκύκλωμα) θα μπορούσε να γίνει πλήρης αναπαράσταση ενός οχήματος στο λογισμικό FDS με κυριότερα χαρακτηριστικά του (πλαστικός διάκοσμος , ταπετσαρία, ελαστικά, αφρώδη υλικά καθισμάτων, κτλ) και εν συνεχεία να «καεί» βάσει μιας πηγής φλόγας πολύ υψηλής θερμοκρασίας που θα αντιστοιχούσε στην έναυση

σπινθήρα. Με τον τρόπο αυτό θα μπορεί να μελετηθεί η ακρίβεια των απλοποιημένων προτύπων και ο συνολικός χρόνος καύσης που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία.

3. Χρησιμοποιήθηκε η παραδοχή ομοιόμορφης ταχύτητας 3.0 m/s στο στόμιο εισόδου της σήραγγας. Στη πραγματικότητα η διαδικασία εκκαπνισμού πραγματοποιείται μέσω της των αξονικών ανεμιστήρων ώσης (jet fans) τοποθετημένων κατά μήκος της σήραγγας ανάλογα με το σενάριο αερισμού. Περαιτέρω έρευνα στον τομέα αυτό θα αποτελούσε η μελέτη του χρονικά μεταβαλλόμενου πεδίου ροής με σταδιακή ενεργοποίηση των ανεμιστήρων ώσης. Εναλλακτικά θα μπορούσε να διερευνηθεί η επίδραση της ταχύτητας αερισμού στο εύρος σχεδιασμού [1.0 – 8.0 m/s] στη διατήρηση του θερμικού στρώματος ή ανάμιξη γειτονικών στρωμάτων κατά μήκος της σήραγγας.
4. Στα λογισμικά χρησιμοποιήθηκε αμιγώς καρτεσιανό πλέγμα. Η καμπύλη γεωμετρία αλλά και ο εγκατεστημένος εξοπλισμός επιβάλλουν τη χρήση οριόδετου πλέγματος για την καλύτερη αναπαράσταση του.
5. Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η απόκριση των τοιχωμάτων της σήραγγας σε συνθήκες φωτιάς σε όχημα με βάση απλά πρότυπα. Δεν μελετήθηκε η απόκριση του υπόλοιπου εξοπλισμού. Ειδικά για τις εγκαταστάσεις φωτισμού και αερισμού που είναι κρίσιμες για την ασφαλή διαφυγή των εμπλεκόμενων, θα μπορούσε να διερευνηθεί η επίδραση της θερμότητας στις ηλεκτρικές καλωδιώσεις. Τα ειδικών απαιτήσεων καλώδια τροφοδοσίας είναι πύραντοχα, χαμηλής εκπομπής καπνού και αλογόνων και βρίσκονται τοποθετημένα σε εσχάρες οροφής.
6. Για την διαδικασία εκκένωσης που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 8, θα μπορούσε να μελετηθεί αντίστοιχη οδική σήραγγα ενταγμένη σε δίκτυο πόλης υπό συνθήκες κυκλοφοριακής συμφόρησης. Τα υπόλοιπα οχήματα - που θα αντιμετωπίζονταν ως εμπόδια - θα δυσχέραιναν αποφασιστικά την προσπάθεια διαφυγής των ατόμων από το σημείο.
7. Με την είσοδο της υγραεριοκίνησης στους σύγχρονους στόλους οχημάτων, θα ήταν χρήσιμη η συγκριτική μελέτη τους σε περίπτωση φωτιάς με τα υπόλοιπα συμβατικά οχήματα τόσο σε σήραγγες όσο και σε κλειστούς χώρους στάθμευσης.
8. Στη παρούσα εργασία μελετήθηκαν οχήματα που δεν μεταφέρουν επικίνδυνα φορτία. Επιπρόσθετη έρευνα μπορεί να γίνει στον τρόπο αντιμετώπισης εκτάκτων καταστάσεων με εμπλοκή επικίνδυνων φορτίων είτε σε περίπτωση έκρηξης είτε σε περίπτωση ανάφλεξης αερίου νέφους, είτε σε διαρροή τοξικών αερίων. Η διαδικασία εκκένωσης και ο πιθανός αριθμός θυμάτων είναι ένας κρίσιμος παράγοντας προς διερεύνηση προκειμένου να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα, καθώς δεν μπορούν να γίνει πραγματικά πειράματα στη πράξη όπως με φωτιές τύπου λίμνης.

11

Βιβλιογραφία

1. Χ. Εφραιμίδης, Δομικές Μηχανές, Εκδόσεις Χ. Εφραιμίδη, Αθήνα (2000)
2. D. Kolymbas, Tunneling and Tunnel Mechanics – a rational approach to tunneling, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, Germany (2005)
3. Γ. Εξαδάκτυλος, Μ. Σταυροπούλου, Κατασκευή και Μηχανική των Σηράγγων και των υπογείων έργων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά (2006)
4. Ιστοσελίδα Extraco (www.extraco.gr)
5. Ιστοσελίδα Αττικό μετρό (www.ametro.gr)
6. A.G. Buntelius, Tunnel Ventilation in J.O. Brickel, T.R. Kuesel, E.W. King (eds) Tunnel Engineering Handbook – 2nd Edition, Chapman & Hall (1996)
7. US EPA, Mobile6 Source Emission Factor Model – User Guide, Office of Transportation and Air Quality, USA (2003)
8. State of California, Caline4 User Manual – A dispersion model for predicting air pollution concentrations near roadways, , Dept.of Transportation, USA (1999)
9. R.O. Carvel, Fire size in tunnels, PhD Thesis, Heriot – Watt University, Civil Eng., Edinburgh (2004)
10. National Academy of Science, Transit Cooperative Research Program (TCRP), Report 525, Making Transportation Tunnels Safe and Secure, 12, Washington D.C., USA (2006)
11. Alessandro G. Colombo, Lessons learnt from tunnel accidents, EUR Report, JRC-ISIS (2001)
12. Fires in transport tunnels: report on full-scale tests, EUREKA Project EU495 (FIRETUN), Düsseldorf (1995)

13. Ευρωπαϊκή Επιτροπή, Οδηγία 2004/54/EK, Ελάχιστες απαιτήσεις ασφαλείας για τις σήραγγες του διευρωπαϊκού οδικού δικτύου (2004)
14. Ελληνική Δημοκρατία, ΠΔ 230/2007, Προσαρμογή της Ελληνικής Νομοθεσίας στην Οδηγία 2004/54/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της Ευρώπης της 29^{ης} Απριλίου 2004 σχετικά με τις ελάχιστες απαιτήσεις ασφαλείας για τις σήραγγες του διευρωπαϊκού οδικού δικτύου (2007)
15. Υπουργείο Χωροταξίας, Περιβάλλοντος & Δημοσίων Έργων (ΥΠΕΧΩΔΕ), Οδηγίες Σύνταξης Οδικών Έργων - Τεύχος Οδικών Σηράγγων, Αθήνα (2002)
16. Εγνατία Οδός, Οδηγός Σύνταξης Μελετών Εγνατίας Οδού (ΟΣΜΕΟ), Θεσσαλονίκη (2004)
17. Εγνατία Οδός, Προδιαγραφές Η/Μ Εγκαταστάσεων, Θεσσαλονίκη (2004)
18. Εγνατία Οδός, Πρότυπα σχέδια Σηράγγων, Θεσσαλονίκη (2004)
19. Y.Z. Li, B. Lei, H. Ingason, The maximum temperature of buoyancy-driven smoke flow beneath the ceiling in tunnel fires, *Fire Safety Journal*, 46, 204-210 (2011)
20. Y.Z. Li, H. Ingason, The maximum ceiling gas temperature in large tunnel fires, *Fire Safety Journal*, 48, 38-48 (2012)
21. Y.Z. Li, H. Ingason, Maximum ceiling temperature in a tunnel fire, *SP Technical Research Institute of Sweden*, 51 (2010)
22. Y.Z. Li, B. Lei, H. Ingason, Study of critical velocity and backlayering length in longitudinally ventilated tunnel fires, *Fire Safety Journal*, 45, 361-370 (2010)
23. H. Ingason, A. Lonnemark, Y.Z. Li, Model of ventilation flows during large tunnel fires, *Tunneling and Underground Space Technology*, 30, 64-73 (2012)
24. H. Nyman, H. Ingason, Temperature stratification in tunnels, *Fire Safety Journal*, 48, 30-37 (2012)
25. C.C. Hwang, J.C. Edwards, the critical ventilation velocity in tunnel fires – a computer simulation, *Fire Safety Journal*, 40, 213-244 (2005)
26. ΓΓΔΕ/ΥΠΕΧΩΔΕ, Διοικητική Αρχή Σηράγγων, Μέθοδος Ανάλυσης Επικινδυνότητας οδικών Σηράγγων χωρίς εμπλοκή οχημάτων που μεταφέρουν επικίνδυνα φορτία – σεναριακή προσέγγιση, Αθήνα (2011)
27. H. Ingason, Design fires in tunnels, *Safe & Reliable Tunnels*, 2nd Int. Symposium, Lausanne (2006)
28. H. Ingason, Design fire curves for tunnels, *Fire Safety Journal*, 44, 259-265 (2009)

29. E. Cafaro, V. Bertola, Fires in Tunnels: Experiments and Modeling, *Open Thermodynamics Journal*, 4, 156 – 166 (2010)
30. Y.Z. Li, B. Lei, H. Ingason, A. Lonnemark, Numerical simulation of Runehamar tunnel fire tests, 6th Int. Conference “Tunnel Safety and Ventilation”, Graz (2012)
31. H. Ingason, A. Lonnemark, Heat release rates from heavy goods vehicle trailer fires in tunnels, *Fire Safety Journal*, 40, 646-668 (2005)
32. A. Lonnemark, H. Ingason, Gas temperatures in heavy goods vehicle trailer fires in tunnels, *Fire Safety Journal*, 40, 506-527 (2005)
33. H. Ingason, Y.Z. Li, Model scale tunnel fire tests with longitudinal ventilation , *SP Fire Safety Journal*, 45, 371-384 (2010)
34. T. Lemaire, Y. Kenyon, Large Scale Fire Tests in the Second Benelux Tunnel, *Fire Technology*, 42, 329-350 (2006)
35. R.O. Carvel et al., Variation of heat rate with forced longitudinal ventilation for vehicle fires in tunnels, *Fire Safety Journal*, 36, 569-596 (2001)
36. P. Reszka, T. Steinhaus, H. Biteau, R.O. Carvel, G. Rein, J.L. Torero, A study of fire durability for a road tunnel comparing CFD and simple analytical models, *EUROTUN Conf., Computational Methods in Tunneling*, Vienna, Austria (2007)
37. Camby M.K. Se, Eric W.M. Lee, Alvin C.K. Lai, Impact of location of jet fans on airflow structure in tunnel fire, *Tunneling and Underground Space Technology*, 27, 30-40 (2012)
38. Feng Wang, Mingnian Wang, S. He, Jisheng Zhang, Yuanye Deng, Computational study of effects of jet fans on the ventilation of a highway curved tunnel, *Tunneling and Underground Space Technology*, 25, 382-390 (2010)
39. B. Merci, K.V. Maele, Influence of the turbulence model in numerical simulations of fire in a ventilated horizontal tunnel, *European Combustion Meeting*, Louvain-la-Neuve, Belgium (2005)
40. E. Migoya, A. Crespo, J. Garcia, J. Hernandez, A simplified model of fires in road tunnels. Comparison with three-dimensional models and full-scale measurements, *Tunneling and Underground Space Technology*, 24, 37-52 (2009)
41. K. McGrattan et al., *Fire Dynamics Simulator – Technical Reference Guide*, NIST Special Publication 1018-5 (2010)
42. K. McGrattan et al., *Fire Dynamics Simulator – User Guide*, NIST Special Publication 1019-5 (2010)

43. S. B. Pope, Turbulent Flows, Cambridge University Press, (2000)
44. H.Y. Wang, Prediction of soot and carbon monoxide production in a ventilated tunnel fire by using a computer simulation, Fire Safety Journal, 44, 394-406 (2009)
45. P. Weisenpacher, L. Halada, J. Glasa, V. Sipkova, Parallel model of FDS used for a tunnel fire simulation, Int. Conf. on Parallel Numerics, Leibnitz, Austria, (2011)
46. L. Hluchy, L. Halada, P. Weisenpacher, J. Glasa, V. Sipkova, V. Tran, Tunnel fire simulation using FDS, EGI Community Forum, 26-30 March, Munich, Germany (2012)
47. S. Cochard, Validation for the freeware “Fire Dynamics Simulator v.2.0” for simulating tunnel fires, 4th Int. Conference of Tunnel Fires, Switzerland (2002)
48. M.K. Cheong et al., Calibrating an FDS simulation of goods vehicle fire growth in a tunnel using the Runehamar fire experiment, J. Fire Protection Eng. 19, No.3, 177-196 (2009)
49. An Yong-lin et al., Transverse distribution of fire smoke in road tunnel: a case study of Xuenfengshan tunnel, China, Underground Facilities for better environment and safety, World Tunnel Congress, India (2008)
50. B. Truchot, G. Leroy, F. Fouillen, Y. Perin, Modeling fire in tunnels: A large scale validated two steps modeling method, 6th Int. Conf. Tunnel Safety and Ventilation, Graz (2012)
51. F. Chen, J.C. Leong, Smoke flow phenomena and turbulence characteristics of tunnel fires, Applied Mathematical Modeling, 35, pp 4554-4566 (2011)
52. K. B. McGrattan, Numerical simulation of the Caldecott Tunnel Fire – April 1982, NISTIR Publication 7231, NIST (2005)
53. L. H. Hu, N.K. Fong, L.Z. Yang, W.K. Chow, Y.Z. Li and R. Huo, Modeling fire-induced smoke spread and carbon monoxide transportation in a long channel: Fire Dynamics Simulator comparisons with measured data, J. of Hazardous Materials, 140, 293-298 (2007)
54. U. O. Köylü, G.M. Faeth, Carbon monoxide and soot emissions from liquid-fueled buoyant turbulent diffusion flames, Combustion and Flames, 87, 61-76 (1991)
55. L. H. Hu, R. Huo, H.B Wang, Y.Z. Li, R.X. Yang, Experimental studies on fire-induced smoke temperature distribution along tunnel ceiling, Building and Environment, 42, 3905-3915 (2007)
56. Μ.Ι Ασσαέλ, Κ.Ε. Κακοσίμος, Ανάλυση Επικινδυνότητας, Εγχειρίδιο Υπολογισμών των Επιπτώσεων Φωτιάς, Έκρηξης & Διασποράς Τοξικών Ρύπων, Εκδόσεις Τζιόλα, Αθήνα (2008)
57. Π. Λαζαρίδης, Ποιότητα αέρα εσωτερικών χώρων, Εκδόσεις Τζιόλα, Αθήνα (2007)

58. Α. Δαΐκου, Σ. Δοντάς, Οριακές Τιμές έκθεσης χημικών παραγόντων 2007, Εκδόσεις ΕΛΙΝΥΑΕ, Αθήνα (2008)
59. Ε. Γεωργιάδου, Βιομηχανικά Ατυχήματα Μεγάλης Έκτασης – Μεθοδολογικός & Πληροφοριακός Οδηγός, Εκδόσεις ΕΛΙΝΥΑΕ, Αθήνα (2001)
60. D. Vallero, Fundamentals of Air-Pollution – 4th Ed., Academic Press, Elsevier Inc., USA (2008)
61. P. Reszka, T. Steinhaus, H. Biteau, R. Carvel, G. Rein, J. Torero, A study of fire durability for a road tunnel: comparing CFD and simple analytical models, ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Tunneling (EUROTUN), Aug 27-29, Vienna, Austria (2007)
62. Π. Μαυροειδής, Χάλυβες Οπλισμού Σκυροδέματος, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα (2005)
63. Ελληνική Δημοκρατία, Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος (ΚΤΣ – 97), ΦΕΚ 315, 17-4-1997 (1997)
64. Κ. Σίδερης, Αντοχή σκυροδέματος έναντι πυρκαγιάς – Μηχανισμοί αστοχίας και μέθοδοι προστασίας, Περιοδικό Σκυρόδεμα (2003)
65. T. Korhonen, S. Hostikka, Fire Dynamics Simulator with Evacuation : FDS + Evac – Technical Reference and User’s Guide, VTT Technical Research Center, Finland (2010)
66. S. Hostikka, T. Paloposki, T. Rinne, S. Heliovaara, Evacuation experiments in offices and public buildings, VTT Technical Papers 85, VTT, Finland (2007)
67. S. Hostikka, T. Korhonen, T. Paloposki, T. Rinne, K. Matikainen, S. Heliovaara, Evacuation Development and validation of FDS+Evac for evacuation simulations – Project summary report, VTT Research Notes 2421, VTT, Finland (2007)
68. Ιστοσελίδα CHAM Ltd (www.cham.co.uk)
69. Ν. Χ. Μαρκάτος, Δ. Ασημακόπουλος, Υπολογιστική Ρευστοδυναμική – 2^η έκδοση, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα (1996)
70. Η. Κ. Versteeg, W. Malalasekera, An introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method, Longman Group Ltd, London, (1996)
71. Ν. Χ. Μαρκάτος, Τυρβώδη Φαινόμενα Μεταφοράς και Μαθηματικά Πρότυπα Προσομοίωσης τους, Σημειώσεις Χ.Μ ΕΜΠ, Αθήνα, (1988)
72. Γ.Χ. Μπεργελές Υπολογιστική Ρευστομηχανική, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, (1996)

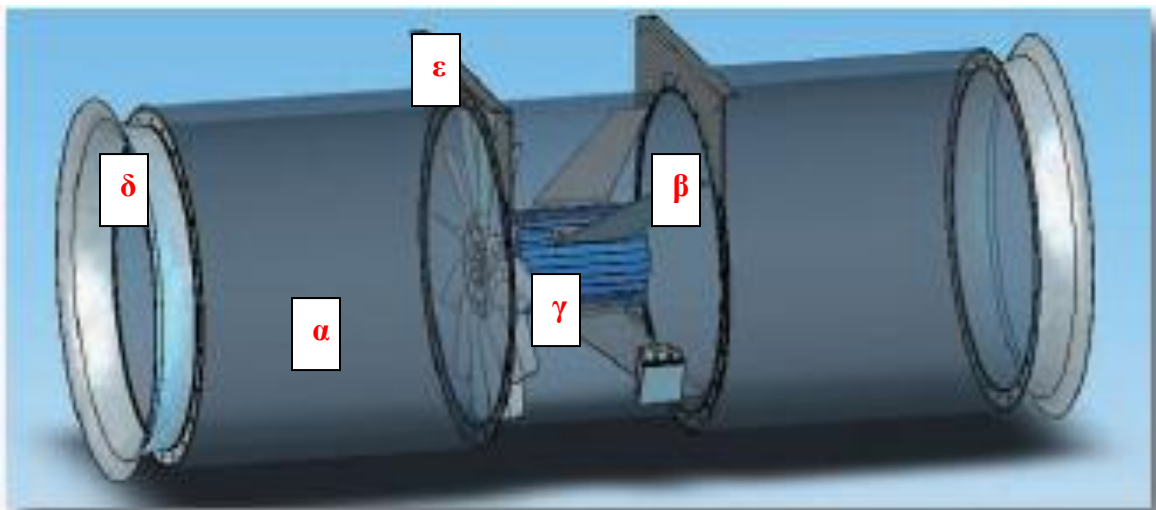
73. S.V. Patankar, D.B. Spalding, A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three-Dimensional Parabolic Flows, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.15, pp 1787, (1972)
74. S. V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corporation, Taylor & Francis Group, New York, (1980)
75. B.E. Launder, D.B. Spalding, Lectures in Mathematical models of turbulence, Academic Press, New York (1972)
76. B.E. Launder, D.B. Spalding, The Numerical Computation of Turbulent Flow, Comp. Methods Appl. Mech. Eng. Vol. 3, pp 269-289, (1974)
77. D. Borello, G.Giuli, F. Rispoli, A CFD Methodology for fire spread and radiative effects simulation in longitudinal ventilation tunnels: Applications to the Memorial Tunnel, Int. PHOENICS User Conference, Moscow (2002)
78. J. Vistnes, Validation of Phoenics 3.5 for modeling tunnel ventilation systems under fire conditions, Int. PHOENICS User Conference, Melbourne (2004)

Π-1. Παράρτημα Ι

Στη συνέχεια δίδεται τα σημαντικότερα τμήματα του συστήματος διαμήκους αερισμού των σηράγγων όπως έχουν προδιαγραφεί από τα αντίστοιχα πρότυπα και τον οδηγό εφαρμογής [15].

Τεχνικά χαρακτηριστικά συστήματος διαμήκους αερισμού

1 Για τον διαμήκη αερισμό των σηράγγων χρησιμοποιούνται αξονικοί ανεμιστήρες ώσης (Jet Fans). Οι ανεμιστήρες θα είναι πλήρως αναστρέψιμης λειτουργίας, που σημαίνει ότι δίνουν την ίδια ώση (Thrust) και κατά τις δυο κατευθύνσεις ροής του αέρα. Κάθε ανεμιστήρας αποτελείται από τα κάτωθι μέρη (βλέπε Εικόνα - 210) :



Εικόνα 210 - Προοπτικό σχέδιο ανεμιστήρα ώσης

α. Κέλυφος : Από χαλυβδόφυλλο, με φλάντζες που δημιουργούνται με γύρισμα του χαλυβδοφύλλου. Πάνω στο κέλυφος συγκολλούνται (με συνεχή ραφή) τα τέσσερα αξονικά τοποθετημένα ποδαρικά για την ανάρτηση του ηλεκτροκινητήρα. Μετά την κατασκευή του κελύφους, αυτό θα γαλβανίζεται σε θερμό λουτρό κατά BS 729/1 ή ISO 1459.

β. Πτερωτή : Η πτερωτή θα αποτελείται από πτερύγια αεροδυναμικής διατομής (Aerofoil), τα οποία θα στηρίζονται στην κεφαλή κατά τρόπο που θα επιτρέπει την ρύθμιση της κλίσης των πτερυγίων. Πτερύγια και κεφαλή θα είναι από χυτό κράμα πυριτιούχου αλουμινίου. Η πτερωτή θα είναι στατικά

ζυγοσταθμισμένη ώστε το επίπεδο ζυγοστάθμισης να μην υπερβαίνει τα 4,5mm/s RMS, στην θέση στήριξης του ανεμιστήρα. Τα περύγια πριν την τοποθέτησή τους θα ελέγχονται με ακτίνες X.

γ. Ηλεκτροκινητήρας : Θα είναι κατάλληλος για τροφοδότηση από δίκτυο 3X400V/50Hz ή 3X690V/50Hz, βραχυκυκλωμένου δρομέα, ερμητικά κλειστός προστασίας IP55 κατά IEC 345 και για λειτουργία μέσα σε ρεύμα αέρος.

Ο ηλεκτροκινητήρας θα στηρίζεται με πέλματα πάνω στα ποδαρικά που φέρει για τον σκοπό αυτό το κέλυφος. Η μόνωσή του θα είναι κλάσης H. Ο ηλεκτροκινητήρας θα είναι πυράντοχος με αντοχή σε 250°C για μια (1) ώρα.

Οι τριβείς κύλισης του ηλεκτροκινητήρα θα έχουν διάρκεια ζωής τουλάχιστον 20,000 ώρες και θα έχουν λιπαντικό κατάλληλο για την παραπάνω θερμοκρασία και θα είναι εξοπλισμένοι με εξωτερικούς γρασαδόρους, πάνω στο κέλυφος του ανεμιστήρα. Ο ανεμιστήρας θα φέρει πάνω στο κέλυφος του ένα τερματικό ηλεκτρικό κουτί, προστασίας IP55 που θα συνδέεται με τον ηλεκτροκινητήρα μέσω άκαμπτης σωλήνωσης.

δ. Ηχοαπορροφητήρες : Οι ηχοαπορροφητήρες (silencers) τοποθετούνται στην είσοδο και έξοδο του ανεμιστήρα, μήκους ο καθένας τουλάχιστον ίσου με μια διάμετρο του ανεμιστήρα. Η είσοδος και η έξοδος κάθε ηχοαπορροφητήρα θα έχει την μορφή καμπάνας (Bell mouth).

Τα υλικά κατασκευής των ηχοαπορροφητήρων θα παρέχουν επαρκή προστασία στην διάβρωση αλλά και στις υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας. Το εξωτερικό περίβλημα θα είναι από γαλβανισμένο χαλυβδόφυλλο που θα είναι βιδωμένο με τα τελειώματα των άκρων και τις καμπάνες (από γαλβανισμένο χαλυβδόφυλλο σε θερμό λουτρό). Η εσωτερική επιφάνεια θα είναι από διάτρητο γαλβανισμένο χαλυβδόφυλλο.

Οι ηχοαπορροφητήρες θα είναι υψηλής θερμοκρασίας, δηλαδή θα αντέχουν τουλάχιστον σε 250°C. Η απόσβεση των ηχοαπορροφητήρων θα είναι τέτοια ώστε η στάθμη θορύβου στην σήραγγα που προκαλείται από την λειτουργία των ανεμιστήρων εκκαπνισμού να μην υπερβαίνει τα 85 με 95 dBA (ώστε να είναι δυνατή η επικοινωνία μέσα σε αυτή). Η πτώση πιέσεως στους ηχοαπορροφητήρες δεν υπερβαίνει τα 80Pa για ταχύτητα 15m/s.

ε. Στήριγμα : Ο ανεμιστήρας θα έχει ποδαρικά στήριξης.

στ. Τελείωμα : Το τελείωμα του ανεμιστήρα θα περιλαμβάνει εσωτερική και εξωτερική βαφή, με εποξειδικό χρώμα, μετά από την κατάλληλη επεξεργασία ή πλύσιμο των επιφανειών που θα βαφούν.

Χαρακτηριστικά ενδεικτικού τύπου ανεμιστήρα ώσης :

α. Διάμετρος	1120mm
β. Στροφές	1470 rpm
γ. Ωση	1500 N ή σύμφωνα με τη μελέτη
δ. Παροχή αέρα	~35 m ³ /s
ε. Ταχύτητα εξόδου	~ 35m/s
στ. Απορροφούμενη ισχύς	~ 50 KW
ζ. Θόρυβος	< 73 dBA (σε απόσταση 10m σε ελεύθερο πεδίο)
η. Πλήρως αναστρέψιμος	
θ. Αντοχή σε θερμοκρασία	250°C για 1 ώρα
ι. Τάση λειτουργίας	3X400V/50Hz

2. Σύστημα μέτρησης ρύπων (CO, NO και καπνού)

Για τον έλεγχο του συστήματος αερισμού, προβλέπεται συνεχής μέτρηση των ρύπων μέσα στην σήραγγα δηλαδή συνεχής μέτρηση του μονοξειδίου του άνθρακα (CO), του οξειδίου του αζώτου (NO) και του καπνού (ορατότητας). Η μέτρηση του NO είναι προαιρετική. Μέσα στην σήραγγα με εγκατάσταση αερισμού, προβλέπονται σταθμοί μέτρησης. Κάθε σταθμός μετράει CO και ορατότητα (NO προαιρετικά). Ακολούθως γίνεται αναφορά σε ενδεικτικού τύπου σύστημα μέτρησης.

Η μέτρηση του καπνού (ορατότητας) στηρίζεται στην μέτρηση απόσβεσης ακτίνας φωτός.

Ο μετρητής αποτελείται από δύο κεφαλές, έναν πομποδέκτη και έναν ανακλαστήρα. Οι κεφαλές εγκαθίστανται επάνω στο πλευρικό τοίχωμα της σήραγγας σε ύψος περ. 3.5m από το οδόστρωμα, με

κατεύθυνση παράλληλη με το τοίχωμα, σε απόσταση μεταξύ τους μέχρι 12m (συνήθως 5m). Οι δυο κεφαλές συσκευές έχουν οπτική επαφή, χωρίς να παρεμβάλλεται κανένα εμπόδιο μεταξύ τους. Επάνω στην κεφαλή του πομποδέκτη υπάρχει μονάδα αξιολόγησης μέσα σε στεγανό ηλεκ. πίνακα. Τα κύρια χαρακτηριστικά του συστήματος είναι :

α. Περιοχή μέτρησης	$0 \div 15 \cdot 10^3 \text{ m}^{-1}$
β. Ακρίβεια μέτρησης	2%
γ. Περιοχή θερμοκρασίας λειτουργίας	-20 μέχρι +50°C
δ. Τάση λειτουργίας	230V/50Hz
ε. Προστασία αισθητήρων	IP 65 / AISI 316
στ. Μονάδα αξιολόγησης	- Ενδείξεις μετρήσεων και παραμέτρων

Η μέτρηση θα μεταδίδεται στο σύστημα SCADA μέσω ειδικών καλωδίων σημάτων.

Οι κεφαλές στηρίζονται επάνω στο τοίχωμα με ειδική βάση από ανοξείδωτη λαμαρίνα και βύσματα από ανοξείδωτο χάλυβα σύμφωνα με τα Π.Κ.Ε. ή τις οδηγίες του κατασκευαστή.

Η μέτρηση του CO (και προαιρετικά του NO) γίνεται με ειδικό αισθητήριο για κάθε είδος ρύπου.

Ο μετρητής εγκαθίσταται μέσα σε εσοχή στο πλευρικό τοίχωμα της σήραγγας σε ύψος περ. 1.5m από το οδόστρωμα, σύμφωνα με τα Π.Κ.Ε. Η εσοχή έχει πρόσοψη με πόρτα. Επάνω στην πόρτα υπάρχουν θυρίδες για την είσοδο του αέρα.

Ο μετρητής συνοδεύεται από μονάδα αξιολόγησης που τοποθετείται και αυτή μέσα στην εσοχή. Τα κύρια χαρακτηριστικά του συστήματος είναι :

α. Περιοχή μέτρησης CO	$0 \div 300 \text{ ppm}$
β. Περιοχή μέτρησης NO	$0 \div 50 \text{ ppm}$
γ. Περιοχή θερμοκρασίας λειτουργίας	-20 μέχρι +50°C
δ. Τάση λειτουργίας	24Vdc
ε. Μονάδα αξιολόγησης	- Ενδείξεις μετρήσεων και παραμέτρων σε τοπική οθόνη LCD - Αναλογική έξοδος : 4-20mA

- Έξοδοι κατάστασης : επαφές NO/NC

Η μέτρηση θα μεταδίδεται στο σύστημα SCADA μέσω ειδικών καλωδίων σημάτων.

3. Σύστημα μέτρησης ταχύτητας και κατεύθυνσης αέρα μέσα σε σήραγγα

Το σύστημα περιλαμβάνει δυο κεφαλές πομπού / δέκτη που εγκαθίστανται σε απέναντι τοιχώματα της σήραγγας και σε ύψος περίπου 3.5m από το οδόστρωμα, με κλίση 30° έως 60° ως προς τον άξονά της και μια μονάδα αξιολόγησης των δεδομένων.

Η μέτρηση στηρίζεται στην μέτρηση του χρόνου μεταφοράς από πομπό σε δέκτη, του εκπεμπόμενου υπέρηχου. Τα κύρια χαρακτηριστικά του συστήματος είναι :

- α. Περιοχή μέτρησης ταχύτητας : $-20\text{m/s} \div +20\text{m/s}$ με ακρίβεια 0.1m/s
- β. Περιοχή θερμοκρασίας λειτουργίας : -20°C μέχρι $+40^{\circ}\text{C}$
- γ. Αυτοέλεγχος : συνεχής με αυτόματη ευθυγράμμιση συστήματος
- δ. Τάση λειτουργίας : $230\text{V}/50\text{Hz}$
- ε. Προστασία μονάδων πομπού / δέκτη : IP 65
- στ. Μονάδα αξιολόγησης :
 - α) Ενδείξεις μετρήσεων και παραμέτρων σε οθόνη LCD
 - β) Αναλογική έξοδος μέτρησης $4-20\text{mA}$
 - γ) Επαφές κατάστασης NO/NC

Η μέτρηση θα μεταδίδεται στο σύστημα SCADA μέσω ειδικών καλωδίων σημάτων.

Οι κεφαλές μέτρησης εγκαθίστανται σύμφωνα με τα Π.Κ.Ε. και τις οδηγίες του κατασκευαστή. Οι κεφαλές στηρίζονται επάνω σε ειδική βάση απο ανοξείδωτη λαμαρίνα και βύσματα από ανοξείδωτο χάλυβα.

Η μονάδα αξιολόγησης τοποθετείται μέσα σε ηλεκ. πίνακα σε εσοχή ή σε χώρο ηλεκ. πινάκων σε εγκάρσια στοά της σήραγγας.

Π-2. Παράρτημα Π

Αρχείο εισόδου FDS για προσομοίωση φωτιάς μικρής ισχύος σε μικρή σήραγγα

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
THERMAL ENGINEERING SECTION
HETEROGENEOUS MIXTURE AND COMBUSTION SYSTEMS

DPMS - COMPUTATIONAL MECHANICS

ACADEMIC YEAR : 2012 - 13

STUDENT NAMES : KARALIS KONSTANTINOS, DIPL. MINING ENG.
MIKRONIS KONSTANTINOS, DIPL. MECH. ENG.

CASE STUDY : COMPUTATIONAL SIMULATION IN ROAD TUNNEL USING F.D.S

ABSTRACT

A VALIDATION IS PRESENTED IN THIS CASE STUDY USING FIRE DYNAMICS SIMULATOR (F.D.S) INTRODUCED BY NIST. MEASUREMENT DATA AND CORRELATED OUTPUTS FROM FDS COMING FROM L.B.HU et al.(2007) HAVE BEEN SUBJECTED TO PARAMETRIC STUDY. NUMEROUS MESH DIMENSIONS, FIRE GROWTH CURVE AND TOXIC GASES EMISSION FACTORS HAVE BEEN USED. TEMPERATURE AND CONCENTRATION FLOW FIELDS ARE COMPARED TO PUBLISHED DATAS TO ORDER TO ESTABLISH A CURVE FITTING MODEL. CONTOUR PLOT ARE ACCOMPANIED TO THE FITTING PLOTS USING POST-PROCESSING SMOKEVIEW.

```
&HEAD CHID='model_fire_test_5', TITLE='COMPUTATIONAL SIMULATION IN ROAD TUNNEL USING FDS' /  
&MESH IJK= 20,80,27, XB= 78.00,80.00,0.0,8.0,0.0,2.70 / MESH SIZE 0.1 X 0.1 X 0.1 according to original paper (43200 CELS)  
&MESH IJK= 130,40,27, XB= 0.00,13.00,0.0,8.0,0.0,2.70 / MESH SIZE 0.1 X 0.2 X 0.1 according to original paper (140400 CELLS)  
&MESH IJK= 130,40,27, XB= 13.00,26.00,0.0,8.0,0.0,2.70 / MESH SIZE 0.1 X 0.2 X 0.1 according to original paper (140400 CELLS)  
&MESH IJK= 130,40,27, XB= 26.00,39.00,0.0,8.0,0.0,2.70 / MESH SIZE 0.1 X 0.2 X 0.1 according to original paper (140400 CELLS)  
&MESH IJK= 130,40,27, XB= 39.00,52.00,0.0,8.0,0.0,2.70 / MESH SIZE 0.1 X 0.2 X 0.1 according to original paper (140400 CELLS)  
&MESH IJK= 130,40,27, XB= 52.00,65.00,0.0,8.0,0.0,2.70 / MESH SIZE 0.1 X 0.2 X 0.1 according to original paper (140400 CELLS)  
&MESH IJK= 130,40,27, XB= 65.00,78.00,0.0,8.0,0.0,2.70 / MESH SIZE 0.1 X 0.2 X 0.1 according to original paper (140400 CELLS)
```

&MESH IJK= 80,40,27, XB= 80.00,88.00,0.0,8.0,0.0,2.70 / MESH SIZE 0.1 X 0.2 X 0.1 according to original paper (86400 CELLS)

&TIME TWFIN=600.00 / (600 sec)

&MISC SURF_DEFAULT='CONCRETE SURFACE', GVEC=0.0,0.0,-9.81 ,TMPA=28.0/

&DUMP NFRAMES=600, DT_RESTART=60. /

&RADI RADIATIVE_FRACTION=0.3/

&SPEC ID='CARBON MONOXIDE'

&MATL ID = 'STEEL'

FYI = 'A242 Steel'

SPECIFIC_HEAT_RAMP = 'c_steel'

CONDUCTIVITY_RAMP = 'k_steel'

DENSITY = 7850. /

&RAMP ID='c_steel', T= 20.,F=0.45 /

&RAMP ID='c_steel', T=377.,F=0.60 /

&RAMP ID='c_steel', T=677.,F=0.85 /

&RAMP ID='k_steel', T= 20.,F=48. /

&RAMP ID='k_steel', T=677.,F=30. /

&MATL ID = 'CONCRETE'

FYI = 'Quintiere, Fire Behavior'

SPECIFIC_HEAT = 0.88

DENSITY = 2100.

CONDUCTIVITY = 1.0 /

&SURF ID = 'CONCRETE SURFACE'

COLOR = 'GRAY 60'

MATL_ID = 'CONCRETE'

THICKNESS = 0.1 /

&SURF ID = 'STEEL SHEET'

COLOR = 'BLACK'
MATL_ID = 'STEEL'
BACKING = 'EXPOSED'
THICKNESS = 0.003 /

----- FIRE DESCRIPTION - SCENARIO -----

ACCORDING TO EXPERIMENTAL PROCEDURE FIRE SPOT IS LOCATED 9.0M AWAY FROM THE CLOSED NORTH END. DIAMETER OF PAN CONTAINED THE DIESEL FUEL IS 0.44M. EQUIVALENT AREA = $\text{PI} \cdot (\text{D}/2)^2 = 0.151976 \text{ M}^2$. SO FOR FDS CALCULATIONS WE CAN ASSUME FIRE SPOT AS SURF_ID WITH AREA 0.152. SO $\text{HRRPUA} = 0.75 \text{ MW}/0.151976 = 4.93498 \sim 4.678,50 \text{ MW}/\text{m}^2 = 4687.50 \text{ KW}/\text{M}^2$. DIMENSIONS OF FIRE $\sim 0.40 \text{ X } 0.40$

&SURF ID='FIRE',HRRPUA= 4687.50, RAMP_Q='fireramp', MASS_FLUX(1)=4.08125, RAMP_MF(1)='leak_ramp' /
0.75 MW:0.16 m²= 4687.50 kW/m²

&RAMP ID='fireramp', T=0, F= 0.0000/
&RAMP ID='fireramp', T=12, F= 0.1937/
&RAMP ID='fireramp', T=25, F= 0.3873/
&RAMP ID='fireramp', T=50, F= 0.6733/
&RAMP ID='fireramp', T=70, F= 0.7540/
&RAMP ID='fireramp', T=90, F= 0.8347/
&RAMP ID='fireramp', T=160, F= 0.9477/
&RAMP ID='fireramp', T=195, F= 0.9844/
&RAMP ID='fireramp', T=265, F= 0.9976/
&RAMP ID='fireramp', T=320, F= 0.9873/
&RAMP ID='fireramp', T=375, F= 0.8729/
&RAMP ID='fireramp', T=395, F= 0.7438/
&RAMP ID='fireramp', T=432, F= 0.4606/

&RAMP ID='fireramp', T=470, F= 0.3623/
&RAMP ID='fireramp', T=490, F= 0.1936/
&RAMP ID='fireramp', T=515, F= 0.1335/
&RAMP ID='fireramp', T=560, F= 0.0748/
&RAMP ID='fireramp', T=605, F= 0.0323/
&RAMP ID='fireramp', T=700, F= 0.0337/

```
&RAMP ID='leak_ramp', T=0, F= 0.0000/  
&RAMP ID='leak_ramp', T=25, F= 0.3873/  
&RAMP ID='leak_ramp', T=50, F= 0.6733/  
&RAMP ID='leak_ramp', T=90, F= 0.8347/  
&RAMP ID='leak_ramp', T=160, F= 0.9477/  
&RAMP ID='leak_ramp', T=195, F= 0.9844/  
&RAMP ID='leak_ramp', T=265, F= 0.9976/  
&RAMP ID='leak_ramp', T=320, F= 0.9873/  
&RAMP ID='leak_ramp', T=375, F= 0.8729/  
&RAMP ID='leak_ramp', T=395, F= 0.7438/  
&RAMP ID='leak_ramp', T=432, F= 0.4606/  
&RAMP ID='leak_ramp', T=470, F= 0.3623/  
&RAMP ID='leak_ramp', T=490, F= 0.1936/  
&RAMP ID='leak_ramp', T=515, F= 0.1335/  
&RAMP ID='leak_ramp', T=560, F= 0.0748/  
&RAMP ID='leak_ramp', T=605, F= 0.0323/  
&RAMP ID='leak_ramp', T=700, F= 0.0337/  
  
&DUMP MASS_FILE=.TRUE. /  
----- FIRE SPOT -----  
&VENT XB= 78.80, 79.20, 3.80, 4.20, 0.00, 0.00, SURF_ID='FIRE', COLOR='RED'/  
WE PLACE FIRE SPOT IN CENTERLINE OF X = 79m ALONG TUNNEL AXIS (Y=4) IN DATUM LEVEL  
(Z=0.00)  
  
----- TUNNEL GEOMETRY -----  
&OBST XB= 0.00, 88.00, 8.00, 8.00, 0.00, 2.70, SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT SIDEWALL  
&OBST XB= 0.00, 88.00, 0.00, 0.00, 0.00, 2.70, SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / RIGHT SIDEWALL  
&OBST XB= 0.00, 88.00, 0.00, 8.00, 2.70, 2.70, SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / CEILING ROOF  
&OBST XB= 88.00, 88.00, 0.00, 8.00, 0.00, 2.70, SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / CLOSED END  
-----  
&VENT MB='XMIN', SURF_ID='OPEN' / ASSUME OPEN END IN TUNNEL ENTRANCE  
-----  
&OBST XB= 78.0, 80.0, 2.50, 5.50, 2.0, 2.0, SURF_ID='STEEL SHEET' / PLACEMENT OF STEEL SHEET  
DIMENSION 2 X 3 M ABOVE FIRE SPOT IN 2.0 M
```

-----THERMOCOUPLE LOCATION-----

&DEVC ID="TC-1', XYZ= 74, 4, 2.65,QUANTITY="TEMPERATURE"/ K THERMOCOUPLE LOCATED 5M FROM FIRE SOURCE - 1ST SET
&DEVC ID="TC-2', XYZ= 73, 4, 2.65,QUANTITY="TEMPERATURE"/ K THERMOCOUPLE LOCATED 6M FROM FIRE SOURCE
&DEVC ID="TC-3', XYZ= 72, 4, 2.65,QUANTITY="TEMPERATURE"/ K THERMOCOUPLE LOCATED 7M FROM FIRE SOURCE
&DEVC ID="TC-4', XYZ= 71, 4, 2.65,QUANTITY="TEMPERATURE"/ K THERMOCOUPLE LOCATED 8M FROM FIRE SOURCE
&DEVC ID="TC-5', XYZ= 70, 4, 2.65,QUANTITY="TEMPERATURE"/ K THERMOCOUPLE LOCATED 9M FROM FIRE SOURCE
&DEVC ID="TC-6', XYZ= 69, 4, 2.65,QUANTITY="TEMPERATURE"/ K THERMOCOUPLE LOCATED 10M FROM FIRE SOURCE
&DEVC ID="TC-7', XYZ= 68, 4, 2.65,QUANTITY="TEMPERATURE"/ K THERMOCOUPLE LOCATED 11M FROM FIRE SOURCE
&DEVC ID="TC-8', XYZ= 67, 4, 2.65,QUANTITY="TEMPERATURE"/ K THERMOCOUPLE LOCATED 12M FROM FIRE SOURCE
&DEVC ID="TC-9', XYZ= 66, 4, 2.65,QUANTITY="TEMPERATURE"/ K THERMOCOUPLE LOCATED 13M FROM FIRE SOURCE
&DEVC ID="TC-10', XYZ= 65, 4, 2.65,QUANTITY="TEMPERATURE"/ K THERMOCOUPLE LOCATED 14M FROM FIRE SOURCE
&DEVC ID="TC-11', XYZ= 64, 4, 2.65,QUANTITY="TEMPERATURE"/ K THERMOCOUPLE LOCATED 15M FROM FIRE SOURCE
&DEVC ID="TC-12', XYZ= 63, 4, 2.65,QUANTITY="TEMPERATURE"/ K THERMOCOUPLE LOCATED 16M FROM FIRE SOURCE
&DEVC ID="TC-13', XYZ= 62, 4, 2.65,QUANTITY="TEMPERATURE"/ K THERMOCOUPLE LOCATED 17M FROM FIRE SOURCE
&DEVC ID="TC-14', XYZ= 61, 4, 2.65,QUANTITY="TEMPERATURE"/ K THERMOCOUPLE LOCATED 18M FROM FIRE SOURCE
&DEVC ID="TC-15', XYZ= 60, 4, 2.65,QUANTITY="TEMPERATURE"/ K THERMOCOUPLE LOCATED 19M FROM FIRE SOURCE
&DEVC ID="TC-16', XYZ= 59, 4, 2.65,QUANTITY="TEMPERATURE"/ K THERMOCOUPLE LOCATED 20M FROM FIRE SOURCE
&DEVC ID="TC-17', XYZ= 58, 4, 2.65,QUANTITY="TEMPERATURE"/ K THERMOCOUPLE LOCATED 21M FROM FIRE SOURCE
&DEVC ID="TC-18', XYZ= 57, 4, 2.65,QUANTITY="TEMPERATURE"/ K THERMOCOUPLE LOCATED 22M FROM FIRE SOURCE
&DEVC ID="TC-19', XYZ= 56, 4, 2.65,QUANTITY="TEMPERATURE"/ K THERMOCOUPLE LOCATED 23M FROM FIRE SOURCE
&DEVC ID="TC-20', XYZ= 55, 4, 2.65,QUANTITY="TEMPERATURE"/ K THERMOCOUPLE LOCATED 24M FROM FIRE SOURCE
&DEVC ID="TC-21', XYZ= 54, 4, 2.65,QUANTITY="TEMPERATURE"/ K THERMOCOUPLE LOCATED 25M FROM FIRE SOURCE
&DEVC ID="TC-22', XYZ= 53, 4, 2.65,QUANTITY="TEMPERATURE"/ K THERMOCOUPLE LOCATED 26M FROM FIRE SOURCE
&DEVC ID="TC-23', XYZ= 52, 4, 2.65,QUANTITY="TEMPERATURE"/ K THERMOCOUPLE LOCATED 27M FROM FIRE SOURCE
&DEVC ID="TC-24', XYZ= 50, 4, 2.65,QUANTITY="TEMPERATURE"/ K THERMOCOUPLE LOCATED 29M FROM FIRE SOURCE - 2ST SET
&DEVC ID="TC-25', XYZ= 49, 4, 2.65,QUANTITY="TEMPERATURE"/ K THERMOCOUPLE LOCATED 30M FROM FIRE SOURCE
&DEVC ID="TC-26', XYZ= 48, 4, 2.65,QUANTITY="TEMPERATURE"/ K THERMOCOUPLE LOCATED 31M FROM FIRE SOURCE
&DEVC ID="TC-27', XYZ= 47, 4, 2.65,QUANTITY="TEMPERATURE"/ K THERMOCOUPLE LOCATED 32M FROM FIRE SOURCE
&DEVC ID="TC-28', XYZ= 46, 4, 2.65,QUANTITY="TEMPERATURE"/ K THERMOCOUPLE LOCATED 33M FROM FIRE SOURCE
&DEVC ID="TC-29', XYZ= 45, 4, 2.65,QUANTITY="TEMPERATURE"/ K THERMOCOUPLE LOCATED 34M FROM FIRE SOURCE
&DEVC ID="TC-30', XYZ= 44, 4, 2.65,QUANTITY="TEMPERATURE"/ K THERMOCOUPLE LOCATED 35M FROM FIRE SOURCE
&DEVC ID="TC-31', XYZ= 43, 4, 2.65,QUANTITY="TEMPERATURE"/ K THERMOCOUPLE LOCATED 36M FROM FIRE SOURCE
&DEVC ID="TC-32', XYZ= 42, 4, 2.65,QUANTITY="TEMPERATURE"/ K THERMOCOUPLE LOCATED 37M FROM FIRE SOURCE
&DEVC ID="TC-33', XYZ= 41, 4, 2.65,QUANTITY="TEMPERATURE"/ K THERMOCOUPLE LOCATED 38M FROM FIRE SOURCE
&DEVC ID="TC-34', XYZ= 40, 4, 2.65,QUANTITY="TEMPERATURE"/ K THERMOCOUPLE LOCATED 39M FROM FIRE SOURCE
&DEVC ID="TC-35', XYZ= 39, 4, 2.65,QUANTITY="TEMPERATURE"/ K THERMOCOUPLE LOCATED 40M FROM FIRE SOURCE
&DEVC ID="TC-36', XYZ= 38, 4, 2.65,QUANTITY="TEMPERATURE"/ K THERMOCOUPLE LOCATED 41M FROM FIRE SOURCE
&DEVC ID="TC-37', XYZ= 37, 4, 2.65,QUANTITY="TEMPERATURE"/ K THERMOCOUPLE LOCATED 42M FROM FIRE SOURCE
&DEVC ID="TC-38', XYZ= 36, 4, 2.65,QUANTITY="TEMPERATURE"/ K THERMOCOUPLE LOCATED 43M FROM FIRE SOURCE

&DEVC ID='TC-39', XYZ= 35, 4, 2.65,QUANTITY='TEMPERATURE'/ K THERMOCOUPLE LOCATED 44M FROM FIRE SOURCE
&DEVC ID='TC-40', XYZ= 34, 4, 2.65,QUANTITY='TEMPERATURE'/ K THERMOCOUPLE LOCATED 45M FROM FIRE SOURCE
&DEVC ID='TC-41', XYZ= 33, 4, 2.65,QUANTITY='TEMPERATURE'/ K THERMOCOUPLE LOCATED 46M FROM FIRE SOURCE
&DEVC ID='TC-42', XYZ= 32, 4, 2.65,QUANTITY='TEMPERATURE'/ K THERMOCOUPLE LOCATED 47M FROM FIRE SOURCE
&DEVC ID='TC-43', XYZ= 31, 4, 2.65,QUANTITY='TEMPERATURE'/ K THERMOCOUPLE LOCATED 48M FROM FIRE SOURCE
&DEVC ID='TC-44', XYZ= 30, 4, 2.65,QUANTITY='TEMPERATURE'/ K THERMOCOUPLE LOCATED 49M FROM FIRE SOURCE
&DEVC ID='TC-45', XYZ= 29, 4, 2.65,QUANTITY='TEMPERATURE'/ K THERMOCOUPLE LOCATED 50M FROM FIRE SOURCE
&DEVC ID='TC-46', XYZ= 28, 4, 2.65,QUANTITY='TEMPERATURE'/ K THERMOCOUPLE LOCATED 51M FROM FIRE SOURCE
&DEVC ID='TC-47', XYZ= 27, 4, 2.65,QUANTITY='TEMPERATURE'/ K THERMOCOUPLE LOCATED 52M FROM FIRE SOURCE
&DEVC ID='TC-48', XYZ= 26, 4, 2.65,QUANTITY='TEMPERATURE'/ K THERMOCOUPLE LOCATED 53M FROM FIRE SOURCE
&DEVC ID='TC-49', XYZ= 25, 4, 2.65,QUANTITY='TEMPERATURE'/ K THERMOCOUPLE LOCATED 54M FROM FIRE SOURCE

-----CO DETECTORS LOCATION-----

&DEVC ID='CO-51', XYZ= 40, 4, 0.45,QUANTITY='CARBON MONOXIDE'/ PLACEMENT OF CARBON MONOXIDE DETECTORS
&DEVC ID='CO-52', XYZ= 40, 4, 0.95,QUANTITY='CARBON MONOXIDE'/ AT DISTANCE 39m FROM THE FIRE SPOT
&DEVC ID='CO-53', XYZ= 40, 4, 1.45,QUANTITY='CARBON MONOXIDE'/ (79 - 39 = 40m).SPOT VALUES ARE TO BE
&DEVC ID='CO-54', XYZ= 40, 4, 1.95,QUANTITY='CARBON MONOXIDE'/ COMPARED TO MEASUREMENT DATA FROM
&DEVC ID='CO-55', XYZ= 40, 4, 2.45,QUANTITY='CARBON MONOXIDE'/ REFERENCE PAPER (L.H.Hu et al.(2007))

&DEVC ID='CO-1', XYZ= 72, 4, 2.45,QUANTITY='CARBON MONOXIDE'/ CO-1 STATION LOCATED 7M FROM THE FIRE
&DEVC ID='CO-2', XYZ= 64, 4, 2.45,QUANTITY='CARBON MONOXIDE'/ CO-2 STATION LOCATED 15M FROM THE FIRE
&DEVC ID='CO-3', XYZ= 56, 4, 2.45,QUANTITY='CARBON MONOXIDE'/ CO-3 STATION LOCATED 23M FROM THE FIRE
&DEVC ID='CO-4', XYZ= 48, 4, 2.45,QUANTITY='CARBON MONOXIDE'/ CO-4 STATION LOCATED 31M FROM THE FIRE

&DEVC ID='CO-6', XYZ= 32, 4, 2.45,QUANTITY='CARBON MONOXIDE'/ CO-6 STATION LOCATED 47M FROM THE FIRE
&DEVC ID='CO-7', XYZ= 24, 4, 2.45,QUANTITY='CARBON MONOXIDE'/ CO-7 STATION LOCATED 55M FROM THE FIRE
&DEVC ID='CO-8', XYZ= 16, 4, 2.45,QUANTITY='CARBON MONOXIDE'/ CO-8 STATION LOCATED 63M FROM THE FIRE
&DEVC ID='CO-9', XYZ= 8, 4, 2.45,QUANTITY='CARBON MONOXIDE'/ CO-9 STATION LOCATED 71M FROM THE FIRE
&DEVC ID='CO-10',XYZ= 8, 4, 2.45,QUANTITY='CARBON MONOXIDE'/ CO-10 STATION LOCATED 71M FROM THE FIRE

-----SLICES FOR Y=4.0-----

&SLCF PBY=4.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /

&SLCF PBZ=1.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /

&SLCF PBY=4.0, QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE. /

&SLCF PBY=4.0, QUANTITY='HRRPUV' /

-----SLICES FOR TEMP-----

&SLCF PBX=79.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /

&SLCF PBX=40.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /

&SLCF PBX=20.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /

&SLCF PBX= 1.20, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /

-----SLICES FOR CO-----

&SLCF PBX=79.0, QUANTITY='CARBON MONOXIDE', VECTOR=.TRUE. /

&SLCF PBX=40.0, QUANTITY='CARBON MONOXIDE', VECTOR=.TRUE. /

&TAIL /

Π-3. Παράρτημα ΙΙΙ

Αρχείο εισόδου FDS για προσομοίωση φωτιάς μικρής ισχύος σε μεγάλη σήραγγα

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
THERMAL ENGINEERING SECTION
HETEROGENEOUS MIXTURE AND COMBUSTION SYSTEMS

DPMS - COMPUTATIONAL MECHANICS
ACADEMIC YEAR: 2012 - 13

STUDENT NAME: MIKRONIS KONSTANTINOS, DIPL. MECH. ENG.

CASE STUDY: VALIDATION STUDY OF LARGE SCALE FIRE TEST - TUNNEL 4 - USING F.D.S

ABSTRACT

A VALIDATION IS PRESENTED IN THIS CASE STUDY USING FIRE DYNAMICS SIMULATOR (F.D.S) INTRODUCED BY NIST. MEASUREMENT DATA AND CORRELATED OUTPUTS FROM FDS COMING FROM L.H.HU et al.(2007) HAVE BEEN SUBJECTED TO PARAMETRIC STUDY.A LARGE SCALE FIRE TEST LOCATED IN TUNNEL-4 HAS BEEN SELECTED. TYPICAL DIMENSIONS ARE L=1036.8m, W=10.80m,H=7.20m.

NUMEROUS MESH DIMENSIONS (0.10 / 0.20 / 0.30), FIRE GROWTH CURVE HAVE BEEN USED.

TEMPERATURE AND VELOCITY FLOW FIELDS ARE COMPARED TO PUBLISHED DATAS TO ORDER TO ESTABLISH A CURVE FITTING MODEL. CONTOUR PLOT ARE ACCOMPANIED TO THE FITTING PLOTS USING POST-PROCESSING SMOKEVIEW.

&HEAD CHID='tunnel_4_test_9_scenario_3', TITLE='COMPUTATIONAL SIMULATION IN ROAD TUNNEL USING FDS' /

&MESH IJK= 480,27,36, XB= 0.00, 480.00,-5.40, 5.40, 0.0, 7.20 / MESH SIZE 0.50 X 0.40 X 0.40 (583200 CELS)

&TIME TWFIN=1600.00 / (1600 sec)

&MISC SURF_DEFAULT='CONCRETE SURFACE', GVEC=0.205964496,0.0,-9.807837612 ,TMPA=21.5/

&DUMP NFRAMES=1600, DT_RESTART=60. /

&RADI RADIATIVE_FRACTION=0.3/

```
&SURF ID    = 'CONCRETE SURFACE'
  COLOR     = 'GRAY 60'
  MATL_ID   = 'CONCRETE'
  THICKNESS = 0.1 /
```

----- FIRE DESCRIPTION - TEST NO-9 -----

```
&SURF ID='FIRE',HRRPUA=1800.00, RAMP_Q='fireramp' / 1.8 MW:1.00 m²=1800.0 kW
```

```
&RAMP ID='fireramp', T=1000, F= 0.0000/
&RAMP ID='fireramp', T=1002, F= 0.0375/
&RAMP ID='fireramp', T=1007, F= 0.4073/
&RAMP ID='fireramp', T=1020, F= 0.5636/
&RAMP ID='fireramp', T=1055, F= 0.7090/
&RAMP ID='fireramp', T=1090, F= 0.8082/
&RAMP ID='fireramp', T=1145, F= 0.9537/
&RAMP ID='fireramp', T=1170, F= 1.0000/
&RAMP ID='fireramp', T=1220, F= 0.8439/
&RAMP ID='fireramp', T=1270, F= 0.6590/
&RAMP ID='fireramp', T=1300, F= 0.5226/
&RAMP ID='fireramp', T=1350, F= 0.4215/
&RAMP ID='fireramp', T=1400, F= 0.2478/
&RAMP ID='fireramp', T=1440, F= 0.1423/
&RAMP ID='fireramp', T=1490, F= 0.0543/
&RAMP ID='fireramp', T=1545, F= 0.0369/
&RAMP ID='fireramp', T=1611, F= 0.0019/
```

```
&OBST XB= 240.00, 241.00, -0.50, 0.50, 1.60, 1.60, SURF_IDS ='FIRE','INERT','INERT',COLOR = 'RED'/
```

----- TUNNEL GEOMETRY -----

```
&OBST XB= 0.00, 480.00, 5.400000000, 5.20, 0.00, 0.20 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / RIGHT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 480.00, 5.400000000, 5.20, 0.20, 0.40 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / RIGHT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 480.00, 5.400000000, 5.20, 0.40, 0.40 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / RIGHT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 480.00, 5.400000000, 5.20, 0.40, 0.60 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / RIGHT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 480.00, 5.400000000, 5.20, 0.60, 0.60 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / RIGHT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 480.00, 5.400000000, 5.20, 0.60, 0.80 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / RIGHT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 480.00, 5.400000000, 5.40, 0.80, 0.80 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / RIGHT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 480.00, 5.400000000, 5.40, 0.80, 1.00 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / RIGHT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 480.00, 5.400000000, 5.40, 1.00, 1.20 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / RIGHT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 480.00, 5.400000000, 5.40, 1.20, 1.20 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / RIGHT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 480.00, 5.400000000, 5.40, 1.20, 1.40 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / RIGHT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 480.00, 5.400000000, 5.40, 1.40, 1.40 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / RIGHT CURVED TOP
```



```

&OBST XB= 0.00, 480.00, -5.400000000, -2.80, 6.40, 6.40 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 480.00, -5.400000000, -2.80, 6.40, 6.40 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 480.00, -5.400000000, -2.60, 6.40, 6.40 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 480.00, -5.400000000, -2.60, 6.40, 6.60 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 480.00, -5.400000000, -2.40, 6.60, 6.60 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 480.00, -5.400000000, -2.40, 6.60, 6.60 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 480.00, -5.400000000, -2.20, 6.60, 6.80 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 480.00, -5.400000000, -2.00, 6.80, 6.80 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 480.00, -5.400000000, -1.80, 6.80, 6.80 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 480.00, -5.400000000, -1.80, 6.80, 6.80 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 480.00, -5.400000000, -1.60, 6.80, 6.80 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 480.00, -5.400000000, -1.60, 6.80, 6.80 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 480.00, -5.400000000, -1.40, 6.80, 7.00 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 480.00, -5.400000000, -1.40, 7.00, 7.00 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 480.00, -5.400000000, -1.20, 7.00, 7.00 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 480.00, -5.400000000, -1.20, 7.00, 7.00 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 480.00, -5.400000000, -1.00, 7.00, 7.00 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 480.00, -5.400000000, -1.00, 7.00, 7.00 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 480.00, -5.400000000, -0.80, 7.00, 7.00 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 480.00, -5.400000000, -0.80, 7.00, 7.00 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 480.00, -5.400000000, -0.60, 7.00, 7.00 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 480.00, -5.400000000, -0.60, 7.00, 7.20 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 480.00, -5.400000000, -0.40, 7.20, 7.20 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 480.00, -5.400000000, -0.40, 7.20, 7.20 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 480.00, -5.400000000, -0.20, 7.20, 7.20 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 480.00, -5.400000000, -0.20, 7.20, 7.20 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 480.00, -5.400000000, 0.00, 7.20, 7.20 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP

```

----- VENTILATION VELOCITY -----

```

&SURF ID='INLET-9', VEL = -1.0 /

```

```

&VENT MB='XMIN', SURF_ID='INLET-9' /

```

```

&VENT MB='XMAX', SURF_ID='OPEN' /

```

-----THERMOCOUPLE LOCATION-----

```

&DEVC ID='TC-U.1', XYZ= 20, 0, 7.1, QUANTITY='TEMPERATURE' / - DISTANCE -220M
&DEVC ID='TC-U.2', XYZ= 40, 0, 7.1, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC ID='TC-U.3', XYZ= 60, 0, 7.1, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC ID='TC-U.4', XYZ= 80, 0, 7.1, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC ID='TC-U.5', XYZ= 100, 0, 7.1, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC ID='TC-U.6', XYZ= 120, 0, 7.1, QUANTITY='TEMPERATURE' / - DISTANCE -120M
&DEVC ID='TC-U.7', XYZ= 140, 0, 7.1, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC ID='TC-U.8', XYZ= 160, 0, 7.1, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC ID='TC-U.9', XYZ= 180, 0, 7.1, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC ID='TC-U.10', XYZ= 200, 0, 7.1, QUANTITY='TEMPERATURE' /

```

&DEVC ID='TC-U.11', XYZ= 220, 0, 7.1, QUANTITY='TEMPERATURE' / - DISTANCE - 20M
&DEVC ID='TC-0' , XYZ= 240, 0, 7.1, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC ID='TC-D.1' , XYZ= 260, 0, 7.1, QUANTITY='TEMPERATURE' / - DISTANCE +20M
&DEVC ID='TC-D.2' , XYZ= 280, 0, 7.1, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC ID='TC-D.3' , XYZ= 300, 0, 7.1, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC ID='TC-D.4' , XYZ= 320, 0, 7.1, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC ID='TC-D.5' , XYZ= 340, 0, 7.1, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC ID='TC-D.6' , XYZ= 360, 0, 7.1, QUANTITY='TEMPERATURE' / - DISTANCE +120M
&DEVC ID='TC-D.7' , XYZ= 380, 0, 7.1, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC ID='TC-D.8' , XYZ= 400, 0, 7.1, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC ID='TC-D.9' , XYZ= 420, 0, 7.1, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC ID='TC-D.10', XYZ= 440, 0, 7.1, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC ID='TC-D.11', XYZ= 460, 0, 7.1, QUANTITY='TEMPERATURE' / - DISTANCE +220M

----- HOT WIRE ANEMOMETER -----

&DEVC ID='V-1', XYZ= 230, 0, 1.4, QUANTITY='VELOCITY' /
&DEVC ID='V-2', XYZ= 230, 0, 1.5, QUANTITY='VELOCITY' /
&DEVC ID='V-3', XYZ= 230, 0, 1.6, QUANTITY='VELOCITY' /
&DEVC ID='V-4', XYZ= 230, 0, 1.7, QUANTITY='VELOCITY' /
&DEVC ID='V-5', XYZ= 230, 0, 1.8, QUANTITY='VELOCITY' /

-----SLICES FOR Y=0.0-----

&SLCF PBY=0.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBY=0.0, QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBY=0.0, QUANTITY='HRRPUV' /

-----SLICES FOR TEMP-----

&SLCF PBX=0.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX= 50.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=100.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=150.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=200.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=240.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=300.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=400.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=500.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /

&TAIL /

Π-4. Παράρτημα IV

Αρχείο εισόδου FDS για προσομοίωση φωτιάς σε σήραγγα Εγνατίας Οδού

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
THERMAL ENGINEERING SECTION
HETEROGENEOUS MIXTURE AND COMBUSTION SYSTEMS

DPMS - COMPUTATIONAL MECHANICS
ACADEMIC YEAR : 2012 - 13

STUDENT NAME : MIKRONIS KONSTANTINOS, DIPL. MECH. ENG.

CASE STUDY : PARAMETRIC STUDY OF LARGE SCALE FIRE TEST - EGNATIA ODOS (A2) - USING F.D.S

ABSTRACT

A FIRE SCENARIO OF HRR = 30MW USING FDS HAS BEEN SIMULATED IN THE PRESENT STUDY. TEMPERATURE AND TOXIC GAS (CARBON MONOXIDE) AND SMOKE STRATIFICATION IN CEILING HAVE BEEN COMPUTED ALONG TUNNEL AXIS.

A 700m LONG TUNNEL IN EGNATIA ODOS (A2) MOTORWAY IN METSOVO-GREVENA HAS BEEN SELECTED AS REFERENCE. TYPICAL CROSS-SECTIONAL AREA IS ASSUMED SEMICIRCULAR IN RADIUS = 5.50M AND TOTAL HEIGHT = 7.00M

SIX (6) JET FANS HAVE BEEN INSTALLED IN ROOF AT 120M BETWEEN. ACCORDING TO FIRE EVACUATION SCENARIOS, EACH JET-FAN HAS BEEN ACTIVATED AFTER AN STALL PERIOD OF 30 SEC IN CASE OF EMERGENCY. SEQUENTIAL ACTIVATION HAS BEEN TAKEN PLACE WITH 5 SEC INTERVAL TEMPERATURE AND CONCENTRATION CONTOUR PLOTS ARE CONSTRUCTED USING POST-PROCESSING COMPANION SMOKEVIEW.

DIAGRAMS OF TEMPERATURE DISTRIBUTION COULD BE VERY USEFUL IN EVALUATION OF EVACUATION PROCESS ISSUED BY AUTHORITIES IN ORDER TO AVOID POSSIBLE EXCESSIVE THERMAL EXPOSURE OF OCCUPANTS AND DAMAGE / DEGRADATION OF INFRASTRUCTURE.

```
&HEAD CHID='tunnel_30MW_case_1', TITLE='COMPUTATIONAL SIMULATION IN ROAD TUNNEL USING  
FDS' /
```

```
&MESH IJK= 702,27,36, XB= 0.00, 702.00,-5.40, 5.40, 0.00, 7.20 / MESH SIZE 0.50 X 0.50 X 0.50 (494208  
CELLS)
```

```
&TIME TWFN=3300.00 / (3300 sec)
```

```
&MISC SURF_DEFAULT='CONCRETE SURFACE', GVEC=0.0,0.0,-9.81 , TMPA=20.0, RESTART=.TRUE./
```

```
&DUMP NFRAMES=3300, DT_RESTART=60. /
```

```
&RADI RADIATIVE_FRACTION=0.3/
```

```
&SPEC ID='CARBON MONOXIDE'
```

```
&MATL ID = 'STEEL'
```

```
 FYI = 'A242 Steel'
```

```
 SPECIFIC_HEAT_RAMP = 'c_steel'
```

```
 CONDUCTIVITY_RAMP = 'k_steel'
```

```
 DENSITY = 7850. /
```

```
&RAMP ID='c_steel', T= 20.,F=0.45 /
```

```
&RAMP ID='c_steel', T=377.,F=0.60 /
```

```
&RAMP ID='c_steel', T=677.,F=0.85 /
```

```
&RAMP ID='k_steel', T= 20.,F=48. /
```

```
&RAMP ID='k_steel', T=677.,F=30. /
```

```
&MATL ID = 'CONCRETE'
```

```
 FYI = 'Quintiere, Fire Behavior'
```

```
 SPECIFIC_HEAT = 0.88
```

```
 DENSITY = 2100.
```

```
 CONDUCTIVITY = 1.0 /
```

```
&SURF ID = 'CONCRETE SURFACE'
```

```
 COLOR = 'GRAY 60'
```

```
 MATL_ID = 'CONCRETE'
```

```
 THICKNESS = 0.1 /
```

```
&SURF ID = 'STEEL SHEET'
```

```
 MATL_ID = 'STEEL'
```

```
 BACKING = 'EXPOSED'
```

```
 THICKNESS = 0.003 /
```

----- FIRE DESCRIPTION - SCENARIO (30 Mw) -----

&SURF ID='FIRE',HRRPUA=1500.0, RAMP_Q='fireramp' , MASS_FLUX(1)=1.305882255,
RAMP_MF(1)='leakramp' / 30 MW:20 m²=1500.00 kW/m²

----- LINEAR GROWTH -----

&RAMP ID='fireramp', T=0, F= 0 /
&RAMP ID='fireramp', T=30, F= 0.1000/
&RAMP ID='fireramp', T=60, F= 0.2000/
&RAMP ID='fireramp', T=90, F= 0.3000/
&RAMP ID='fireramp', T=120, F= 0.4000/
&RAMP ID='fireramp', T=150, F= 0.5000/
&RAMP ID='fireramp', T=180, F= 0.6000/
&RAMP ID='fireramp', T=210, F= 0.7000/
&RAMP ID='fireramp', T=240, F= 0.8000/
&RAMP ID='fireramp', T=270, F= 0.9000/
&RAMP ID='fireramp', T=300, F= 1.0000/
&RAMP ID='fireramp', T=330, F= 0.9900/
&RAMP ID='fireramp', T=360, F= 0.9800/
&RAMP ID='fireramp', T=390, F= 0.9700/
&RAMP ID='fireramp', T=420, F= 0.9600/
&RAMP ID='fireramp', T=450, F= 0.9500/
&RAMP ID='fireramp', T=480, F= 0.9400/
&RAMP ID='fireramp', T=510, F= 0.9300/
&RAMP ID='fireramp', T=540, F= 0.9200/
&RAMP ID='fireramp', T=570, F= 0.9100/
&RAMP ID='fireramp', T=600, F= 0.9000/
&RAMP ID='fireramp', T=630, F= 0.8900/
&RAMP ID='fireramp', T=660, F= 0.8800/
&RAMP ID='fireramp', T=690, F= 0.8700/
&RAMP ID='fireramp', T=720, F= 0.8600/
&RAMP ID='fireramp', T=750, F= 0.8500/
&RAMP ID='fireramp', T=780, F= 0.8400/
&RAMP ID='fireramp', T=810, F= 0.8300/
&RAMP ID='fireramp', T=840, F= 0.8200/
&RAMP ID='fireramp', T=870, F= 0.8100/
&RAMP ID='fireramp', T=900, F= 0.8000/
&RAMP ID='fireramp', T=930, F= 0.7900/
&RAMP ID='fireramp', T=960, F= 0.7800/
&RAMP ID='fireramp', T=990, F= 0.7700/
&RAMP ID='fireramp', T=1020, F= 0.7600/

&RAMP ID='fireramp', T=1050, F= 0.7500/
&RAMP ID='fireramp', T=1080, F= 0.7400/
&RAMP ID='fireramp', T=1110, F= 0.7300/
&RAMP ID='fireramp', T=1140, F= 0.7200/
&RAMP ID='fireramp', T=1170, F= 0.7100/
&RAMP ID='fireramp', T=1200, F= 0.7000/
&RAMP ID='fireramp', T=1230, F= 0.6900/
&RAMP ID='fireramp', T=1260, F= 0.6800/
&RAMP ID='fireramp', T=1290, F= 0.6700/
&RAMP ID='fireramp', T=1320, F= 0.6600/
&RAMP ID='fireramp', T=1350, F= 0.6500/
&RAMP ID='fireramp', T=1380, F= 0.6400/
&RAMP ID='fireramp', T=1410, F= 0.6300/
&RAMP ID='fireramp', T=1440, F= 0.6200/
&RAMP ID='fireramp', T=1470, F= 0.6100/
&RAMP ID='fireramp', T=1500, F= 0.6000/
&RAMP ID='fireramp', T=1530, F= 0.5900/
&RAMP ID='fireramp', T=1560, F= 0.5800/
&RAMP ID='fireramp', T=1590, F= 0.5700/
&RAMP ID='fireramp', T=1620, F= 0.5600/
&RAMP ID='fireramp', T=1650, F= 0.5500/
&RAMP ID='fireramp', T=1680, F= 0.5400/
&RAMP ID='fireramp', T=1710, F= 0.5300/
&RAMP ID='fireramp', T=1740, F= 0.5200/
&RAMP ID='fireramp', T=1770, F= 0.5100/
&RAMP ID='fireramp', T=1800, F= 0.5000/
&RAMP ID='fireramp', T=1830, F= 0.4900/
&RAMP ID='fireramp', T=1860, F= 0.4800/
&RAMP ID='fireramp', T=1890, F= 0.4700/
&RAMP ID='fireramp', T=1920, F= 0.4600/
&RAMP ID='fireramp', T=1950, F= 0.4500/
&RAMP ID='fireramp', T=1980, F= 0.4400/
&RAMP ID='fireramp', T=2010, F= 0.4300/
&RAMP ID='fireramp', T=2040, F= 0.4200/
&RAMP ID='fireramp', T=2070, F= 0.4100/
&RAMP ID='fireramp', T=2100, F= 0.4000/
&RAMP ID='fireramp', T=2130, F= 0.3900/
&RAMP ID='fireramp', T=2160, F= 0.3800/
&RAMP ID='fireramp', T=2190, F= 0.3700/
&RAMP ID='fireramp', T=2220, F= 0.3600/
&RAMP ID='fireramp', T=2250, F= 0.3500/

&RAMP ID='fireramp', T=2280, F= 0.3400/
&RAMP ID='fireramp', T=2310, F= 0.3300/
&RAMP ID='fireramp', T=2340, F= 0.3200/
&RAMP ID='fireramp', T=2370, F= 0.3100/
&RAMP ID='fireramp', T=2400, F= 0.3000/
&RAMP ID='fireramp', T=2430, F= 0.2900/
&RAMP ID='fireramp', T=2460, F= 0.2800/
&RAMP ID='fireramp', T=2490, F= 0.2700/
&RAMP ID='fireramp', T=2520, F= 0.2600/
&RAMP ID='fireramp', T=2550, F= 0.2500/
&RAMP ID='fireramp', T=2580, F= 0.2400/
&RAMP ID='fireramp', T=2610, F= 0.2300/
&RAMP ID='fireramp', T=2640, F= 0.2200/
&RAMP ID='fireramp', T=2670, F= 0.2100/
&RAMP ID='fireramp', T=2700, F= 0.2000/
&RAMP ID='fireramp', T=2730, F= 0.1900/
&RAMP ID='fireramp', T=2760, F= 0.1800/
&RAMP ID='fireramp', T=2790, F= 0.1700/
&RAMP ID='fireramp', T=2820, F= 0.1600/
&RAMP ID='fireramp', T=2850, F= 0.1500/
&RAMP ID='fireramp', T=2880, F= 0.1400/
&RAMP ID='fireramp', T=2910, F= 0.1300/
&RAMP ID='fireramp', T=2940, F= 0.1200/
&RAMP ID='fireramp', T=2970, F= 0.1100/
&RAMP ID='fireramp', T=3000, F= 0.1000/
&RAMP ID='fireramp', T=3030, F= 0.0900/
&RAMP ID='fireramp', T=3060, F= 0.0800/
&RAMP ID='fireramp', T=3090, F= 0.0700/
&RAMP ID='fireramp', T=3120, F= 0.0600/
&RAMP ID='fireramp', T=3150, F= 0.0500/
&RAMP ID='fireramp', T=3180, F= 0.0400/
&RAMP ID='fireramp', T=3210, F= 0.0300/
&RAMP ID='fireramp', T=3240, F= 0.0200/
&RAMP ID='fireramp', T=3270, F= 0.0100/
&RAMP ID='fireramp', T=3300, F= 0.0000/

----- CO LEAK -----

&RAMP ID='leakramp', T=0, F= 0 /
&RAMP ID='leakramp', T=30, F= 0.1000/

&RAMP ID='leakramp', T=60, F= 0.2000/
&RAMP ID='leakramp', T=90, F= 0.3000/
&RAMP ID='leakramp', T=120, F= 0.4000/
&RAMP ID='leakramp', T=150, F= 0.5000/
&RAMP ID='leakramp', T=180, F= 0.6000/
&RAMP ID='leakramp', T=210, F= 0.7000/
&RAMP ID='leakramp', T=240, F= 0.8000/
&RAMP ID='leakramp', T=270, F= 0.9000/
&RAMP ID='leakramp', T=300, F= 1.0000/
&RAMP ID='leakramp', T=330, F= 0.9900/
&RAMP ID='leakramp', T=360, F= 0.9800/
&RAMP ID='leakramp', T=390, F= 0.9700/
&RAMP ID='leakramp', T=420, F= 0.9600/
&RAMP ID='leakramp', T=450, F= 0.9500/
&RAMP ID='leakramp', T=480, F= 0.9400/
&RAMP ID='leakramp', T=510, F= 0.9300/
&RAMP ID='leakramp', T=540, F= 0.9200/
&RAMP ID='leakramp', T=570, F= 0.9100/
&RAMP ID='leakramp', T=600, F= 0.9000/
&RAMP ID='leakramp', T=630, F= 0.8900/
&RAMP ID='leakramp', T=660, F= 0.8800/
&RAMP ID='leakramp', T=690, F= 0.8700/
&RAMP ID='leakramp', T=720, F= 0.8600/
&RAMP ID='leakramp', T=750, F= 0.8500/
&RAMP ID='leakramp', T=780, F= 0.8400/
&RAMP ID='leakramp', T=810, F= 0.8300/
&RAMP ID='leakramp', T=840, F= 0.8200/
&RAMP ID='leakramp', T=870, F= 0.8100/
&RAMP ID='leakramp', T=900, F= 0.8000/
&RAMP ID='leakramp', T=930, F= 0.7900/
&RAMP ID='leakramp', T=960, F= 0.7800/
&RAMP ID='leakramp', T=990, F= 0.7700/
&RAMP ID='leakramp', T=1020, F= 0.7600/
&RAMP ID='leakramp', T=1050, F= 0.7500/
&RAMP ID='leakramp', T=1080, F= 0.7400/
&RAMP ID='leakramp', T=1110, F= 0.7300/
&RAMP ID='leakramp', T=1140, F= 0.7200/
&RAMP ID='leakramp', T=1170, F= 0.7100/
&RAMP ID='leakramp', T=1200, F= 0.7000/
&RAMP ID='leakramp', T=1230, F= 0.6900/
&RAMP ID='leakramp', T=1260, F= 0.6800/

&RAMP ID='leakramp', T=1290, F= 0.6700/
&RAMP ID='leakramp', T=1320, F= 0.6600/
&RAMP ID='leakramp', T=1350, F= 0.6500/
&RAMP ID='leakramp', T=1380, F= 0.6400/
&RAMP ID='leakramp', T=1410, F= 0.6300/
&RAMP ID='leakramp', T=1440, F= 0.6200/
&RAMP ID='leakramp', T=1470, F= 0.6100/
&RAMP ID='leakramp', T=1500, F= 0.6000/
&RAMP ID='leakramp', T=1530, F= 0.5900/
&RAMP ID='leakramp', T=1560, F= 0.5800/
&RAMP ID='leakramp', T=1590, F= 0.5700/
&RAMP ID='leakramp', T=1620, F= 0.5600/
&RAMP ID='leakramp', T=1650, F= 0.5500/
&RAMP ID='leakramp', T=1680, F= 0.5400/
&RAMP ID='leakramp', T=1710, F= 0.5300/
&RAMP ID='leakramp', T=1740, F= 0.5200/
&RAMP ID='leakramp', T=1770, F= 0.5100/
&RAMP ID='leakramp', T=1800, F= 0.5000/
&RAMP ID='leakramp', T=1830, F= 0.4900/
&RAMP ID='leakramp', T=1860, F= 0.4800/
&RAMP ID='leakramp', T=1890, F= 0.4700/
&RAMP ID='leakramp', T=1920, F= 0.4600/
&RAMP ID='leakramp', T=1950, F= 0.4500/
&RAMP ID='leakramp', T=1980, F= 0.4400/
&RAMP ID='leakramp', T=2010, F= 0.4300/
&RAMP ID='leakramp', T=2040, F= 0.4200/
&RAMP ID='leakramp', T=2070, F= 0.4100/
&RAMP ID='leakramp', T=2100, F= 0.4000/
&RAMP ID='leakramp', T=2130, F= 0.3900/
&RAMP ID='leakramp', T=2160, F= 0.3800/
&RAMP ID='leakramp', T=2190, F= 0.3700/
&RAMP ID='leakramp', T=2220, F= 0.3600/
&RAMP ID='leakramp', T=2250, F= 0.3500/
&RAMP ID='leakramp', T=2280, F= 0.3400/
&RAMP ID='leakramp', T=2310, F= 0.3300/
&RAMP ID='leakramp', T=2340, F= 0.3200/
&RAMP ID='leakramp', T=2370, F= 0.3100/
&RAMP ID='leakramp', T=2400, F= 0.3000/
&RAMP ID='leakramp', T=2430, F= 0.2900/
&RAMP ID='leakramp', T=2460, F= 0.2800/
&RAMP ID='leakramp', T=2490, F= 0.2700/

```

&RAMP ID='leakramp', T=2520, F= 0.2600/
&RAMP ID='leakramp', T=2550, F= 0.2500/
&RAMP ID='leakramp', T=2580, F= 0.2400/
&RAMP ID='leakramp', T=2610, F= 0.2300/
&RAMP ID='leakramp', T=2640, F= 0.2200/
&RAMP ID='leakramp', T=2670, F= 0.2100/
&RAMP ID='leakramp', T=2700, F= 0.2000/
&RAMP ID='leakramp', T=2730, F= 0.1900/
&RAMP ID='leakramp', T=2760, F= 0.1800/
&RAMP ID='leakramp', T=2790, F= 0.1700/
&RAMP ID='leakramp', T=2820, F= 0.1600/
&RAMP ID='leakramp', T=2850, F= 0.1500/
&RAMP ID='leakramp', T=2880, F= 0.1400/
&RAMP ID='leakramp', T=2910, F= 0.1300/
&RAMP ID='leakramp', T=2940, F= 0.1200/
&RAMP ID='leakramp', T=2970, F= 0.1100/
&RAMP ID='leakramp', T=3000, F= 0.1000/
&RAMP ID='leakramp', T=3030, F= 0.0900/
&RAMP ID='leakramp', T=3060, F= 0.0800/
&RAMP ID='leakramp', T=3090, F= 0.0700/
&RAMP ID='leakramp', T=3120, F= 0.0600/
&RAMP ID='leakramp', T=3150, F= 0.0500/
&RAMP ID='leakramp', T=3180, F= 0.0400/
&RAMP ID='leakramp', T=3210, F= 0.0300/
&RAMP ID='leakramp', T=3240, F= 0.0200/
&RAMP ID='leakramp', T=3270, F= 0.0100/
&RAMP ID='leakramp', T=3300, F= 0.0000/

```

----- FIRE SPOT -----

```

&OBST XB = 345.0, 355.0, -1.00, 1.00, 1.00, 1.00, SURF_IDS='FIRE','INERT','INERT', COLOR='RED'/

```

----- TUNNEL GEOMETRY -----

```

&OBST XB= 0.00, 702.00, 5.400000000, 5.20, 0.00, 0.20 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / RIGHT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 702.00, 5.400000000, 5.20, 0.20, 0.40 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / RIGHT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 702.00, 5.400000000, 5.20, 0.40, 0.40 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / RIGHT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 702.00, 5.400000000, 5.20, 0.40, 0.60 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / RIGHT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 702.00, 5.400000000, 5.20, 0.60, 0.60 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / RIGHT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 702.00, 5.400000000, 5.20, 0.60, 0.80 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / RIGHT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 702.00, 5.400000000, 5.40, 0.80, 0.80 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / RIGHT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 702.00, 5.400000000, 5.40, 0.80, 1.00 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / RIGHT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 702.00, 5.400000000, 5.40, 1.00, 1.20 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / RIGHT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 702.00, 5.400000000, 5.40, 1.20, 1.20 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / RIGHT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 702.00, 5.400000000, 5.40, 1.20, 1.40 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / RIGHT CURVED TOP

```



```

&OBST XB= 0.00, 702.00, -5.400000000, -3.00, 6.20, 6.20 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 702.00, -5.400000000, -3.00, 6.20, 6.40 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 702.00, -5.400000000, -2.80, 6.40, 6.40 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 702.00, -5.400000000, -2.80, 6.40, 6.40 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 702.00, -5.400000000, -2.60, 6.40, 6.40 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 702.00, -5.400000000, -2.60, 6.40, 6.60 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 702.00, -5.400000000, -2.40, 6.60, 6.60 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 702.00, -5.400000000, -2.40, 6.60, 6.60 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 702.00, -5.400000000, -2.20, 6.60, 6.80 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 702.00, -5.400000000, -2.20, 6.60, 6.80 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 702.00, -5.400000000, -2.00, 6.80, 6.80 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 702.00, -5.400000000, -1.80, 6.80, 6.80 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 702.00, -5.400000000, -1.80, 6.80, 6.80 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 702.00, -5.400000000, -1.60, 6.80, 6.80 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 702.00, -5.400000000, -1.60, 6.80, 6.80 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 702.00, -5.400000000, -1.40, 6.80, 7.00 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 702.00, -5.400000000, -1.40, 7.00, 7.00 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 702.00, -5.400000000, -1.20, 7.00, 7.00 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 702.00, -5.400000000, -1.20, 7.00, 7.00 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 702.00, -5.400000000, -1.00, 7.00, 7.00 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 702.00, -5.400000000, -1.00, 7.00, 7.00 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP

```

```

&OBST XB= 0.00, 702.00, -5.400000000, -0.80, 7.00, 7.00 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 702.00, -5.400000000, -0.80, 7.00, 7.00 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 702.00, -5.400000000, -0.60, 7.00, 7.00 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 702.00, -5.400000000, -0.60, 7.00, 7.20 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 702.00, -5.400000000, -0.40, 7.20, 7.20 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 702.00, -5.400000000, -0.40, 7.20, 7.20 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 702.00, -5.400000000, -0.20, 7.20, 7.20 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 702.00, -5.400000000, -0.20, 7.20, 7.20 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP
&OBST XB= 0.00, 702.00, -5.400000000, 0.00, 7.20, 7.20 ,SAWTOOTH=.FALSE. ,SURF_ID='CONCRETE SURFACE' / LEFT CURVED TOP

```

----- VENTILATION VELOCITY -----

```

&SURF ID='INLET-9', VEL = -3.0 /
&VENT MB='XMIN', SURF_ID='INLET-9' /
&VENT MB='XMAX', SURF_ID='OPEN' /

```

-----THERMOCOUPLE LOCATION-----

```

&DEVC ID='TC-5', XYZ= 50, 0, 1.6, QUANTITY='TEMPERATURE'/
&DEVC ID='TC-10',XYZ= 100, 0, 1.6, QUANTITY='TEMPERATURE'/
&DEVC ID='TC-15',XYZ= 150, 0, 1.6, QUANTITY='TEMPERATURE'/
&DEVC ID='TC-20',XYZ= 200, 0, 1.6, QUANTITY='TEMPERATURE'/
&DEVC ID='TC-25',XYZ= 250, 0, 1.6, QUANTITY='TEMPERATURE'/
&DEVC ID='TC-30',XYZ= 300, 0, 1.6, QUANTITY='TEMPERATURE'/

```

&DEVC ID='TC-35',XYZ= 350, 0, 1.6, QUANTITY='TEMPERATURE'/
&DEVC ID='TC-40',XYZ= 400, 0, 1.6, QUANTITY='TEMPERATURE'/
&DEVC ID='TC-45',XYZ= 450, 0, 1.6, QUANTITY='TEMPERATURE'/
&DEVC ID='TC-50',XYZ= 500, 0, 1.6, QUANTITY='TEMPERATURE'/
&DEVC ID='TC-55',XYZ= 550, 0, 1.6, QUANTITY='TEMPERATURE'/
&DEVC ID='TC-60',XYZ= 600, 0, 1.6, QUANTITY='TEMPERATURE'/
&DEVC ID='TC-65',XYZ= 650, 0, 1.6, QUANTITY='TEMPERATURE'/

----- TUNNEL CEILING THERMOCOUPLE LOCATION -----

&DEVC ID='TC-71',XYZ= 50, 0, 7.0, QUANTITY='TEMPERATURE'/
&DEVC ID='TC-72',XYZ= 100, 0, 7.0, QUANTITY='TEMPERATURE'/
&DEVC ID='TC-73',XYZ= 150, 0, 7.0, QUANTITY='TEMPERATURE'/
&DEVC ID='TC-74',XYZ= 200, 0, 7.0, QUANTITY='TEMPERATURE'/
&DEVC ID='TC-75',XYZ= 250, 0, 7.0, QUANTITY='TEMPERATURE'/
&DEVC ID='TC-76',XYZ= 300, 0, 7.0, QUANTITY='TEMPERATURE'/
&DEVC ID='TC-77',XYZ= 350, 0, 7.0, QUANTITY='TEMPERATURE'/
&DEVC ID='TC-78',XYZ= 400, 0, 7.0, QUANTITY='TEMPERATURE'/
&DEVC ID='TC-79',XYZ= 450, 0, 7.0, QUANTITY='TEMPERATURE'/
&DEVC ID='TC-80',XYZ= 500, 0, 7.0, QUANTITY='TEMPERATURE'/
&DEVC ID='TC-81',XYZ= 550, 0, 7.0, QUANTITY='TEMPERATURE'/
&DEVC ID='TC-82',XYZ= 600, 0, 7.0, QUANTITY='TEMPERATURE'/
&DEVC ID='TC-83',XYZ= 650, 0, 7.0, QUANTITY='TEMPERATURE'/

-----CO DETECTORS LOCATION-----

&DEVC ID='CO-1', XYZ= 100, 0, 1.6, QUANTITY='CARBON MONOXIDE'/
&DEVC ID='CO-2', XYZ= 150, 0, 1.6, QUANTITY='CARBON MONOXIDE'/
&DEVC ID='CO-3', XYZ= 200, 0, 1.6, QUANTITY='CARBON MONOXIDE'/
&DEVC ID='CO-4', XYZ= 250, 0, 1.6, QUANTITY='CARBON MONOXIDE'/
&DEVC ID='CO-5', XYZ= 300, 0, 1.6, QUANTITY='CARBON MONOXIDE'/
&DEVC ID='CO-6', XYZ= 310, 0, 1.6, QUANTITY='CARBON MONOXIDE'/
&DEVC ID='CO-7', XYZ= 320, 0, 1.6, QUANTITY='CARBON MONOXIDE'/
&DEVC ID='CO-8', XYZ= 330, 0, 1.6, QUANTITY='CARBON MONOXIDE'/
&DEVC ID='CO-9', XYZ= 340, 0, 1.6, QUANTITY='CARBON MONOXIDE'/
&DEVC ID='CO-10',XYZ= 350, 0, 1.6, QUANTITY='CARBON MONOXIDE'/
&DEVC ID='CO-11',XYZ= 360, 0, 1.6, QUANTITY='CARBON MONOXIDE'/
&DEVC ID='CO-12',XYZ= 370, 0, 1.6, QUANTITY='CARBON MONOXIDE'/
&DEVC ID='CO-13',XYZ= 380, 0, 1.6, QUANTITY='CARBON MONOXIDE'/
&DEVC ID='CO-14',XYZ= 390, 0, 1.6, QUANTITY='CARBON MONOXIDE'/
&DEVC ID='CO-15',XYZ= 400, 0, 1.6, QUANTITY='CARBON MONOXIDE'/

&DEVC ID='CO-16',XYZ= 450, 0, 1.6, QUANTITY='CARBON MONOXIDE'/
&DEVC ID='CO-17',XYZ= 500, 0, 1.6, QUANTITY='CARBON MONOXIDE'/
&DEVC ID='CO-18',XYZ= 550, 0, 1.6, QUANTITY='CARBON MONOXIDE'/
&DEVC ID='CO-19',XYZ= 600, 0, 1.6, QUANTITY='CARBON MONOXIDE'/
&DEVC ID='CO-20',XYZ= 650, 0, 1.6, QUANTITY='CARBON MONOXIDE'/

-----SLICES FOR Y=0.0-----

&SLCF PBY=0.0, QUANTITY='TEMPERATURE' , VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBY=0.0, QUANTITY='CARBON MONOXIDE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBY=0.0, QUANTITY='VELOCITY' , VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBY=0.0, QUANTITY='HRRPUV' /

-----SLICES FOR TEMP-----

&SLCF PBX=0.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=100.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=200.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=300.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=350.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=400.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=500.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=600.0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /

-----SLICES FOR CO -----

&SLCF PBX=100.0, QUANTITY='CARBON MONOXIDE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=200.0, QUANTITY='CARBON MONOXIDE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=300.0, QUANTITY='CARBON MONOXIDE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=400.0, QUANTITY='CARBON MONOXIDE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=500.0, QUANTITY='CARBON MONOXIDE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=600.0, QUANTITY='CARBON MONOXIDE', VECTOR=.TRUE. /

----- SLICES FOR WALL TEMPERATURE -----

&BNDF QUANTITY ='WALL TEMPERATURE' /

&TAIL /

Π-5. Παράρτημα V

Προσάρτημα αρχείου εισόδου FDS + Evac για την εκκένωση χρηστών

----- EVACUATION PROCESS -----

Setting evacuation mesh for tunnel floor

```
&MESH IJK= 3510,54,1, XB = 0.00, 702.00, -5.40, 5.40, 0.40, 1.60,  
EVAC_Z_OFFSET=1.0,EVACUATION=.TRUE.,EVAC_HUMANS=.TRUE., ID='MainEvacGrid'/
```

Setting additional door flow meshes at tunnel portals

Note: main evacuation mesh and door flow meshes should have same XB and IJK

```
&MESH IJK= 3510,54,1, XB = 0.00, 702.00, -5.40, 5.40, 0.40, 1.60,EVACUATION=.TRUE.,  
ID='LeftExitGrid'/
```

```
&MESH IJK= 3510,54,1, XB = 0.00, 702.00, -5.40, 5.40, 0.40, 1.60,EVACUATION=.TRUE.,  
ID='RightExitGrid'/
```

```
&MISC EVAC_SURF_DEFAULT = 'EVAC_WALL', /
```

```
&SURF ID = 'EVAC_WALL', RGB = 200,0,200 /
```

Boundary condition for the evacuation flow fields

```
&SURF ID='OUTFLOW', VEL = +0.000001, TAU_V=0.1 /
```

Evacuation geometry input

Define the evacuation vents for the main evacuation mesh, there should be an evacuation vent at every place where tunnel occupants can go inside some door, exit, etc

Definition of Left Exit (Metsovo) Tunnel Portal:

```
-----  
&VENT XB= 0.00, 0.00, -5.40, 5.40, 0.40, 1.60, SURF_ID='OUTFLOW',  
MESH_ID='MainEvacGrid',EVACUATION=.TRUE.,RGB=0,0,255 /
```

```
&OBST XB=-0.20, 0.00, -5.40, 5.40, 0.40, 1.60, SURF_ID='INERT', EVACUATION=.TRUE.,RGB=  
30,150,20 /
```

Definition of Right Exit (Grevena) Tunnel Portal:

```
-----  
&VENT XB= 702.00, 702.00, -5.40, 5.40, 0.40, 1.60, SURF_ID='OUTFLOW',  
MESH_ID='MainEvacGrid',EVACUATION=.TRUE.,RGB=0,0,255 /  
&OBST XB= 702.20, 702.00, -5.40, 5.40, 0.40, 1.60, SURF_ID='INERT', EVACUATION=.TRUE.,RGB=  
30,150,20 /
```

An EXIT namelist defines an exit door which takes humans out of the calculation

Definition of Left Exit (Metsovo) Tunnel Portal:

```
-----  
&EXIT ID='LeftExit', IOR=-1,  
  FYI='Comment line',  
  VENT_FFIELD='LeftExitGrid',  
  COLOR='YELLOW',  
  XYZ = 0.20, 0.00, 1.00,  
  XB  = 0.00, 0.00, -5.40, 5.40, 0.40, 1.60 /  
  
&VENT XB= 0.00, 0.00, -5.40, 5.40, 0.40, 1.60, SURF_ID='OUTFLOW',  
MESH_ID='LeftExitGrid',EVACUATION=.TRUE./
```

Definition of Right Exit (Grevena) Tunnel Portal:

```
-----  
&EXIT ID='RightExit', IOR=+1,  
  FYI='Comment line',  
  VENT_FFIELD='RightExitGrid',  
  COLOR='BLUE',  
  XYZ = 701.80, 0.00, 1.00,  
  XB  = 702.00, 702.00, -5.40, 5.40, 0.40, 1.60 /  
  
&VENT XB= 702.00, 702.00, -5.40, 5.40, 0.40, 1.60, SURF_ID='OUTFLOW',  
MESH_ID='RightExitGrid',EVACUATION=.TRUE./
```

Next is a counter i.e it just produces a column in the CHID_evac.csv file.

```
&EXIT ID='RightCounter', IOR=+1,  
  FYI='Comment line',  
  COUNT_ONLY=.TRUE.,  
  XB  = 701.80, 701.80, -5.40, 5.40, 0.40, 1.60 /
```


Evacuation calculation, human properties

Note: DENS_INIT and COLOR_METHOD are given only on one PERS-line. If they are given on many PERS-lines then the last values read in are used.

COLOR_METHOD: How Smokeview draws humans:

- 1: (default) Default colors in Smokeview
- 0: The color given at the EVAC/ENTR-line
- 3: The color given at the PERS-line
- 4: The color of the target door

```
&PERS ID='Adult',  
  FYI='Male+Female diameter and velocity',  
  DEFAULT_PROPERTIES='Adult',  
  PRE_EVAC_DIST=1,PRE_LOW= 60.0,PRE_HIGH=120.0,  
  DET_EVAC_DIST=1,DET_LOW= 60.0,DET_HIGH=120.0,  
  TDET_SMOKE_DENS=0.1,  
  HUMAN_SMOKE_HEIGHT=1.60,  
  DENS_INIT=4.0,  
  OUTPUT_SPEED=.TRUE.,  
  OUTPUT_FED=.TRUE.,  
  COLOR_METHOD= 0 /
```

```
&PERS ID='Male',  
  FYI='Male diameter and velocity',  
  DEFAULT_PROPERTIES='Male',  
  PRE_EVAC_DIST=1,PRE_LOW= 60.0,PRE_HIGH=120.0,  
  DET_EVAC_DIST=1,DET_LOW= 60.0,DET_HIGH=120.0 /
```

```
&PERS ID='Female',  
  FYI='Female diameter and velocity',  
  DEFAULT_PROPERTIES='Female',  
  PRE_EVAC_DIST=1,PRE_LOW= 60.0,PRE_HIGH=120.0,  
  DET_EVAC_DIST=1,DET_LOW= 60.0,DET_HIGH=120.0 /
```

```
&PERS ID='Child',
```

```
FYI='Child diameter and velocity',  
DEFAULT_PROPERTIES='Child',  
PRE_EVAC_DIST=1,PRE_LOW= 60.0,PRE_HIGH=120.0,  
DET_EVAC_DIST=1,DET_LOW= 60.0,DET_HIGH=120.0 /
```

```
&PERS ID='Elderly',  
FYI='Elderly diameter and velocity',  
DEFAULT_PROPERTIES='Elderly',  
PRE_EVAC_DIST=1,PRE_LOW= 60.0,PRE_HIGH=120.0,  
DET_EVAC_DIST=1,DET_LOW= 60.0,DET_HIGH=120.0 /
```

Since the fire took place in center of tunnel at x=350m and occupants have no prior experience of tunnel geometry and exit characteristics they do not know exact positions of fire retardant doors in evacuation tunnel route that moves towards the net lane of motorway.

So they will try to go the nearest visible exit door (either Left or Right tunnel Portals).

the total number of occupants are 80 persons (60 passengers of coach bus and 20 person as driver+passengers of vehicles).

```
&EVAC ID= 'HumanNoDoorKnown',  
NUMBER_INITIAL_PERSONS= 80,  
XB= 320.0,380.0, -5.0,5.0, 0.4,1.6  
FLOW_FIELD_ID= 'MainEvacGrid',  
AVATAR_COLOR= 'BLUE',  
PERS_ID= 'Adult' /
```

An evacuation hole, do not put humans on top of the fire

```
&EVHO ID='Evho Fire',  
FYI='Do not put humans close to the fire'  
XB = 340.00, 360.00, -4.00, 4.00, 0.40, 1.60 /
```

Plot evacuation flow field

```
&SLCF PBZ = 1.0, QUANTITY= 'VELOCITY', VECTOR=.TRUE., EVACUATION=.TRUE. /  
&TAIL /
```