



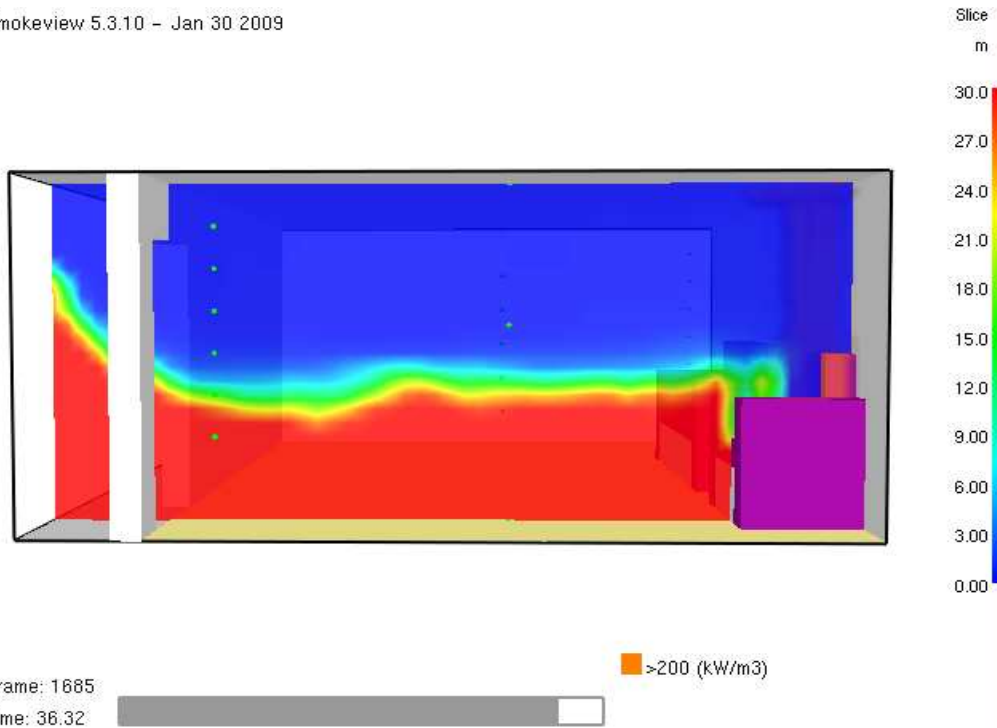
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΛΟΙΟΥ & ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Προσομοίωση πυρκαγιάς σε επιβατηγό πλοίο»

Smokeview 5.3.10 - Jan 30 2009



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΣΠΥΡΟΥ ΚΩΝ/ΝΟΣ

ΨΥΛΛΑ ΕΛΕΝΗ 08104037

ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2010

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ολοκληρώνοντας τον κύκλο σπουδών μου με αυτή τη διπλωματική εργασία, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους εκείνους που διατηρούν υψηλό το επίπεδο σπουδών στη σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Μεταξύ αυτών, ευχαριστώ τον Καθηγητή κ. Κων/νο Σπύρου και τον Διδάκτορα του Τομέα Μελέτης Πλοίου και Θαλασσίων Μεταφορών κ. Νικόλαο Θεμελή αφού χωρίς την καθοδήγηση και τη βοήθειά τους, η ολοκλήρωση της εργασίας αυτής θα ήταν αδύνατη. Επίσης ευχαριστώ τον κ. Νικόλαο Νικολάου για τη βοήθειά του στην κατανόηση της λειτουργίας των χρησιμοποιηθέντων προγραμμάτων και τον υπεύθυνο για θέματα πυρασφάλειας της Επιθεώρησης Εμπορικών Πλοίων, κ. Κοσμά Κρομμύδα, για τις χρήσιμες πληροφορίες που μου παρείχε και τις ουσιαστικές συζητήσεις που είχαμε σε θέματα πυρασφάλειας. Τέλος, ευχαριστώ όλους τους φίλους και συναδέλφους μου για την άψογη συνεργασία που είχαμε όλα αυτά τα χρόνια και ιδιαίτερα τη συνάδελφό μου Ειρήνη Αρβανιτάκη για τη συμβολή της στην όλη πορεία μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο :

- 1.1 Εισαγωγή.....σελ.7
1.2 Στόχοι.....σελ.9

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : ΤΑ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΕΡΑ ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ ΛΟΓΩ ΦΩΤΙΑΣ ΣΕ ΕΠΙΒΑΤΗΓΑ ΠΛΟΙΑ ΚΑΙ Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥΣ ΣΤΟΥΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΥΣ

- 2.1 Εισαγωγή.....σελ.10
2.2 Εξέλιξη των κανονισμών.....σελ.12
2.3 Κανόνες και κανονισμοί που αναφέρονται στη σχεδίαση πλοίου και στην ασφάλεια έναντι φωτιάςσελ.18

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΥΠΑΡΧΟΝΤΩΝ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΓΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ

- 3.1 Εισαγωγή.....σελ. 22
3.2 Τα σημαντικότερα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί για κάθε κατηγορία....σελ.23
3.3 Συγκρίσεις μοντέλων βάσει βιβλιογραφίας.....σελ.25

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : ΕΛΕΓΧΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΔΙΑΧΩΡΙΣΤΙΚΩΝ ΜΕ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΕΣΤ ΦΩΤΙΑΣ (fire test) ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΤΟ FDS (Fire Dynamics Simulator)

- 4.1 Περιγραφή του πρότυπου τεστ φωτιάς (standard fire test)- Χρήσιμοι ορισμοί.....σελ.27

4.2 Προσομοίωση παραλλαγής του πρότυπου τεστ.....σελ.	30
4.3 Αποτελέσματα- Συμπεράσματα.....σελ.	38
4.3.1 Δική μας εστία (our case).....σελ.	39
4.3.2 Εστία που αντιστοιχεί σε καύση καναπέ.....σελ.	44
4.4 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα- Σύγκριση.....σελ.	47
4.5 Επίδραση της θερμοκρασίας αναφοράς (reference temperature) στις αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες.....σελ.	48

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο : ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΟΥ CFAST ΚΑΙ ΤΟΥ FDS- ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ ΔΩΜΑΤΙΟΥ ΚΑΙ ΔΙΑΔΡΟΜΟΥ ΜΕΓΑΛΟΥ ΜΗΚΟΥΣ

5.1 Εισαγωγή.....σελ.	52
5.2 Περιγραφή των δύο προγραμμάτων.....σελ.	52
5.3 (Κοινοί) παράμετροι εισαγωγής στα δύο προγράμματα.....σελ.	55
5.4 Αποτελέσματα από το FDS.....σελ.	58
5.5 Αποτελέσματα από το CFAST.....σελ.	74
5.6 Συγκριτικά διαγράμματα.....σελ.	82
5.7 Συμπεράσματα.....σελ.	91

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο : ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΦΩΤΙΑΣ ΣΤΟΝ ΑΝΘΡΩΠΟ- ΜΕΤΡΗΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΕΙΚΤΩΝ

6.1 Εισαγωγή.....	σελ.93
6.2 Δηλητηρίαση λόγω επικίνδυνων αερίων (toxicity).....	σελ. 94
6.3 Ρεύματα θερμότητας (λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας).....	σελ.95
6.4 Ορατότητα.....	σελ.97
6.5 Εφαρμογή των δεικτών στα αποτελέσματα του κεφαλαίου 5.....	σελ. 97
6.6 Παρουσίαση συμπτωμάτων από εισπνοή μονοξειδίου του άνθρακα.....	σελ.101
6.7 Παρουσίαση συμπτωμάτων λόγω έλλειψης οξυγόνου.....	σελ.102

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....σελ.103

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....σελ.105

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: ΑΠΛΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΞΟΙΚΕΙΩΣΗΣ ΜΕ ΤΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ CFAST, FDS

1. Εξοικείωση με το FDS	σελ.109
2. Εξοικείωση με το CFAST	σελ.117
3. Μελέτη της επίδρασης της πυκνότητας του πλέγματος στο ρυθμό έκλυσης θερμότητας (Heat Release Rate).....	σελ.125

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ

1. Αξιολόγηση και απόκριση σε έκτακτη ανάγκη.....σελ.131
2. Ναυτικά ατυχήματα που σχετίζονται με πυρκαγιά & διερεύνηση των αιτιών των σημαντικότερων (από άποψη έκτασης των συνεπειών) από αυτών.....σελ.134

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ

1. DNV “B class” bulkhead Type Approval.....σελ.142
2. Κώδικας εισαγωγής στο FDS.....σελ.143

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙV

1. Κώδικας εισαγωγής στο FDS.....σελ.146

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα ατυχήματα που οφείλονται σε πυρκαγιά συνιστούν μια μεγάλη κατηγορία ατυχημάτων για τα επιβατηγά πλοία. Ιδιαίτερα μάλιστα, καθώς τα πλοία αυτά λόγω σχεδιαστικών καινοτομιών βρίσκονται εκτεθειμένα σε νέους κινδύνους, τους οποίους οι παλαιότεροι κανονισμοί δεν ελάμβαναν υπ'όψη. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι, σύμφωνα με στατιστικές, πάνω από το 50% των καταγεγραμμένων ανθρώπινων απωλειών σε πλοία οφείλονται σε φωτιά ή έκρηξη και στο 25% αυτών των περιπτώσεων η φωτιά ξεκίνησε από χώρους ενδιαιτήσης και μεταφοράς οχημάτων. (SAFEDOR: “Human Life Safety-Qualitative Design Review (QDR) – D 2.5.2”, 2007)

Κανονισμοί που αφορούν την πρόληψη της εκδήλωσης και διάδοσης της πυρκαϊάς, την καταστολή της καθώς και τη διαφυγή των επιβαινόντων, περιέχονται στη SOLAS, τον κώδικα FTP (Fire Test Procedures Code) και στον κώδικα FSS (Fire Safety Systems Code). Η πρόληψη και η παρεμπόδιση της διάδοσης της πυρκαϊάς αναφέρεται στους κανονισμούς εν μέρει και ως παθητική προστασία, με κύριο στοιχείο το διαχωρισμό του πλοίου σε κύριες κάθετες και οριζόντιες ζώνες πυροπροστασίας. Προβλέπεται μέγιστο μήκος κάθε κατακόρυφης κύριας ζώνης ίσο προς 48 m, δεδομένου ότι η συνολική της επιφάνεια δεν θα υπερβαίνει τα 1600 m², χρήση άκαυστων υλικών, κ.ά. Η παθητική προστασία έχει ουσιαστικά άμεση σχέση με το σχεδιασμό ενός πλοίου. Η καταστολή αναφέρεται και ως ενεργητική προστασία και περιλαμβάνει την ανίχνευση, τη σήμανση συναγερμού, την ενεργοποίηση των συστημάτων κατάσβεσης, κ.ά. Καθώς η SOLAS προϋπήρχε του κώδικα FSS, πολλές διατάξεις της SOLAS μεταφέρθηκαν στον κώδικα FSS, ο οποίος περιλαμβάνει περισσότερες τεχνικές οδηγίες. Ο κώδικας FTP περιέχει οδηγίες για τα τεστ πυρκαϊάς, η διεξαγωγή των οποίων προβλέπεται από τη SOLAS. Στα πλαίσια της εργασίας αυτής, εμβαθύνουμε κυρίως στην παθητική προστασία και ειδικότερα στις προδιαγραφές των υλικών που χρησιμοποιούνται στις ενδιαιτήσεις των επιβατηγών πλοίων.

Ειδικότερα, χρησιμοποιήσαμε ένα γνωστό μοντέλο υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD), το οποίο ονομάζεται FDS (Fire Dynamics Simulator) με στόχο τη μελέτη της συμπεριφοράς ενός διαχωριστικού τάξης B-15 –όπως ορίζεται από το κεφάλαιο II-2 της

SOLAS- έναντι πυρκαϊάς. Το μοντέλο αυτό έχει αναπτυχθεί από το αμερικάνικο ερευνητικό ινστιτούτο NIST (National Institute of Standards and Technology) και βρίσκεται σε διαρκή εξέλιξη και εποπτεία από πλήθος χρηστών. Αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχει πλήθος τέτοιων προγραμμάτων προσομοίωσης φωτιάς τα οποία, λόγω της μεγάλης δυσκολίας και του μεγάλου κόστους διεξαγωγής πειραμάτων μεγάλης ή πλήρους κλίμακας, αποτελούν την πιο ελπιδοφόρα δυνατότητα πρόβλεψης της πιθανής εξάπλωσης μιας πυρκαϊάς. Έπειτα από βιβλιογραφική αναζήτηση, βρήκαμε πληροφορίες για τα προγράμματα αυτά τις οποίες παραθέτουμε σε αντίστοιχο κεφάλαιο.

Αφού επιλέξαμε τα υλικά του μελετούμενου τύπου διαχωριστικού και προσδιορίσαμε τις βασικές ιδιότητές τους προκειμένου να τα εισάγουμε στον κώδικα [ακολουθήσαμε γι' αυτό τις προδιαγραφές της εταιρείας WAS (Wartsila Ship Accommodation Systems- www.waskorea.co.kr)], το υποβάλλαμε σε δύο διαφορετικά σενάρια πυρκαϊάς. Εξετάσαμε τις αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες στην πλευρά του διαχωριστικού που είναι εκτεθειμένη στη φωτιά, καθώς και στη μη εκτεθειμένη πλευρά για διάφορα πάχη μόνωσης του διαχωριστικού. Έπειτα επαναλάβαμε τα παραπάνω για το ίδιο διαχωριστικό με πιο εύφλεκτη επικάλυψη, πράγμα που πετύχαμε μειώνοντας τη θερμοκρασία στην οποία η μάζα του κάθε υλικού προς τη συνολική μάζα του μείγματος μειώνεται με ρυθμό $0,1 \text{ s}^{-1}$. Το μέγεθος αυτό αναφέρεται στο πρόγραμμα ως θερμοκρασία αναφοράς. Επιπλέον εξετάσαμε τη σχέση του χρόνου πλήρους ανάφλεξης με τη θερμοκρασία αναφοράς, καθώς και τη σχέση του χρόνου υπέρβασης μιας συγκεκριμένης θερμοκρασίας σε σχέση πάλι με τη θερμοκρασία αναφοράς.

Εκτός όμως από το FDS, ασχοληθήκαμε και με το πρόγραμμα CFAST (Consolidated Model of Fire and Smoke), το οποίο δεν είναι μοντέλο πεδίου, αλλά θεωρητικά απλούστερο, διζωνικού τύπου μοντέλο. Το μοντέλο αυτό χωρίζει κάθε διαμέρισμα σε 2 ζώνες (άνω και κάτω ζώνη) οι οποίες αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Προχωρήσαμε στην προσομοίωση ενός δωματίου το οποίο ακολουθείται από διάδρομο τετραπλάσιου περίπου μήκους με στόχο τον έλεγχο της συμπεριφοράς του μοντέλου κυρίως στα φαινόμενα που αναπτύσσονται στο διάδρομο. Στην εφαρμογή αυτή εκτός από θερμοκρασίες, μετρήσαμε τη συγκέντρωση μονοξειδίου του άνθρακα και οξυγόνου καθώς και την ορατότητα. Το σενάριο αυτό προσομοιώθηκε ακολούθως και με το μοντέλο FDS, με στόχο τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο προγραμμάτων.

Τέλος, αφού μελετήσαμε σχετική βιβλιογραφία, παρουσιάζουμε ορισμένους δείκτες ποσοτικοποίησης της επικινδυνότητας του φαινομένου. Οι δείκτες αυτοί αναφέρονται σε μεγέθη που κρίνονται κρίσιμα για την επιβίωση του ανθρώπου σε συνθήκες πυρκαγιάς. Τα μεγέθη αυτά είναι: το επίπεδο τοξικότητας στην ατμόσφαιρα, η ορατότητα και το επίπεδο θερμότητας. Εκτός από τους δείκτες αυτούς, παρουσιάζονται επίσης τα αποδεκτά επίπεδα συγκέντρωσης οξυγόνου και μονοξειδίου του άνθρακα.

1.2 ΣΤΟΧΟΙ

Συνοπτικά, οι στόχοι της εργασίας αυτής είναι οι ακόλουθοι:

1. Αναζήτηση και παρουσίαση των μοντέλων προσομοίωσης φωτιάς.
2. Εξοικείωση με τα μοντέλα CFAST (Consolidated Fire And Smoke Transport) και FDS (Fire Dynamics Simulator) μέσω απλών εφαρμογών.
3. Προσομοίωση ενός τεστ φωτιάς με το FDS, στο οποίο έχουμε υποβάλλει προς εξέταση ένα διαχωριστικό τάξης B-15 (βλ. ορισμό κατά SOLAS-Κεφάλαιο II-2).
4. Σύγκριση των μοντέλων CFAST και FDS μέσω της προσομοίωσης μιας απλής σχετικά γεωμετρίας: ενός δωματίου ακολουθούμενο από διάδρομο τετραπλάσιου περίπου μήκους.
5. Εύρεση τρόπου ποσοτικής παρουσίασης των συνεπειών μιας φωτιάς- Παρουσίαση δεικτών που αφορούν την τοξικότητα, την ορατότητα και τη θερμότητα σε χώρο όπου εξελίσσεται πυρκαγιά και εφαρμογή στα αποτελέσματα του CFAST για την περίπτωση δωματίου-διαδρόμου που αναφέρθηκε παραπάνω.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο :

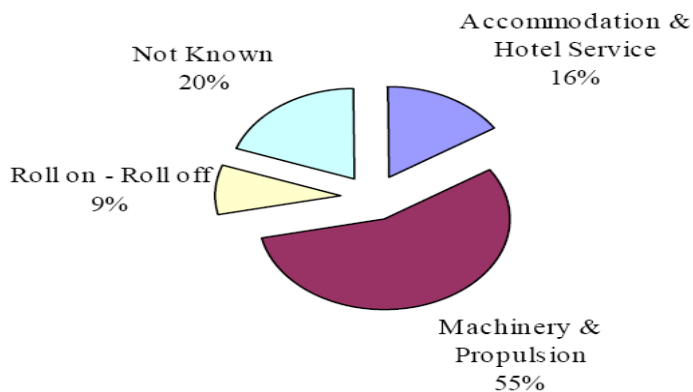
ΤΑ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΕΡΑ ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ ΛΟΓΩ ΦΩΤΙΑΣ ΣΕ ΕΠΙΒΑΤΗΓΑ ΠΛΟΙΑ ΚΑΙ Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥΣ ΣΤΟΥΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΥΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η γενική τάση που επικρατεί στη ναυτιλία τα τελευταία χρόνια στον τομέα των επιβατηγών πλοίων είναι να κατασκευάζονται ολοένα μεγαλύτερα πλοία με δυνατότητα φιλοξενίας περισσότερων επιβατών. Τα επιβατηγά πλοία μπορούμε να τα χωρίσουμε στις εξής δύο κατηγορίες: α) στα καθαρά επιβατηγά πλοία-κρουαζιερόπλοια και β) στα Ro-Ro ferries. Ιδιαίτερα τα κρουαζιερόπλοια συχνά λειτουργούν ως πολυτελή ξενοδοχεία. Συνεπώς οι σχεδιαστές πρέπει να βρουν τη «χρυσή τομή» μεταξύ των κανονισμών ασφαλείας (safety regulations) και της ανάγκης αύξησης του μεγέθους του πλοίου, των επιδόσεών του και της ικανοποίησης των επιβατών (P.Loïs, J.Wang et al. 2002).

Σύμφωνα με μελέτες που έχουν γίνει, έχει βρεθεί ότι σε σχέση με άλλα πλοία, τα κρουαζιερόπλοια έχουν βιώσει μεγάλο πλήθος σοβαρών ατυχημάτων και απωλειών. Τα αντίστοιχα ποσοστά για τα Ro-Ro ferries είναι μικρότερα. Από τη στιγμή μάλιστα που τα κρουαζιερόπλοια έχουν προφίλ υψηλής διακινδύνευσης, οι κανονισμοί που τα αφορούν είναι πιο αυστηροί, όπως επίσης και οι επιθεωρήσεις. Πάνω από το 50% των καταγεγραμμένων απωλειών οφείλονται σε φωτιά ή έκρηξη. Το ίδιο ισχύει και για τον αριθμό των θυμάτων. Όπως φαίνεται και από το ακόλουθο διάγραμμα, στο ένα τέταρτο των ατυχημάτων λόγω φωτιάς, η φωτιά ξεκίνησε από χώρους ενδιαίτησης και γκαράζ:

Fire/Explosion Locations
(174 Incidents, 1985-5/2005)
Source: LMIU, MAIB, TSBC, ATSB



Σχήμα 1 (Πηγή: SAFEDOR)

Αξίζει να σημειωθεί ότι όλα τα παραπάνω δεν αφορούν φωτιές που ξέσπασαν σε ναυπηγεία κατά τη διάρκεια επισκευών του πλοίου.

Με τον όρο «κανονισμοί» αναφερόμαστε σε όλους τους υπάρχοντες κανονισμούς που αφορούν ανίχνευση, κατάσβεση φωτιάς και προστασίας έναντι αυτής. Τέτοιοι κανονισμοί υπάρχουν στη SOLAS (Safety Of Life At Sea), στον κώδικα FSS (Fire Safety Systems Code), στον κώδικα FTP (Fire Test Procedure) καθώς και σε πλήθος οδηγιών και εγκυκλιών του IMO. Οι κανονισμοί αυτοί γενικά χωρίζονται στις ακόλουθες θεματικές ενότητες :

1. στην πρόληψη της φωτιάς- έκρηξης ή αλλιώς στην παθητική προστασία η οποία περιλαμβάνει τρόπους μείωσης της πιθανότητας ανάφλεξης, μείωσης της ποσότητας των εύκαυστων υλικών, ελέγχου της παροχής αέρα και καυσίμου και τέλος μείωσης της πιθανότητας εκπομπής καπνού και τοξικών αερίων.
2. στην καταστολή της φωτιάς ή αλλιώς στην ενεργητική προστασία, η οποία περιλαμβάνει την ανίχνευσή της και τη σήμανση συναγερμού, τον έλεγχο του τρόπου διάδοσης του καπνού, τον έλεγχο της κατασκευαστικής ακεραιότητας του πλοίου και τον περιορισμό της φωτιάς (στο μέρος όπου ξέσπασε) και τέλος την κατάσβεσή της.
3. στη διαφυγή- εκκένωση.

Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε και με τις τρεις προαναφερθείσες θεματικές ενότητες. Πρώτα όμως θα προχωρήσουμε σε μια αναλυτικότερη παρουσίαση των ατυχημάτων λόγω φωτιάς, ξεκινώντας-πρώτα γενικά- από την ανάλυση σε στάδια μιας επείγουσας κατάστασης, προχωρώντας στην καταγραφή των κυριοτέρων ατυχημάτων (από άποψη συνεπειών κάθε είδους) από το 1990 κι έπειτα και παρουσιάζοντας τέλος την εξέλιξη των κανονισμών συναρτήσει των ατυχημάτων αυτών.

2.2 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΚΑΝΟΝΙΣΜΩΝ

1914 και 1929 SOLAS Conventions:

Οι πρώτες διατάξεις για προστασία έναντι φωτιάς περιλαμβάνονται στη SOLAS του 1914, η οποία δημιουργήθηκε έπειτα από τη βύθιση του Τιτανικού (1912). Αν και η εφαρμογή των διατάξεών της παρεμποδιζόταν λόγω του πρώτου Παγκόσμιου Πολέμου, οι διατάξεις της μεταφέρθηκαν στη SOLAS του 1929. Η SOLAS αυτή περιλάμβανε πολλά χρήσιμα μαθήματα σχετικά με την ασφάλεια εν πλω, συμπεριλαμβάνοντας την προστασία έναντι φωτιάς. Το 1934, πυρκαγιά που ξέσπασε στο πλοίο “Morro Castle” προκάλεσε το θάνατο 134 ανθρώπων. Η εξέταση του ατυχήματος αυτού και τα συμπεράσματα που προέκυψαν, συνέβαλλαν σημαντικά στην ανάπτυξη κανονισμών για κατασκευή των πλοίων από μη αναφλέξιμα υλικά (non combustible materials), οι οποίοι αποτελούν τη βάση για τους σημερινούς κανονισμούς ασφαλείας σε επιβατηγά πλοία. Επιπλέον σημειώθηκε ταχύτερη πρόοδος στον τομέα της ναυτικής τεχνολογίας κατά τη διάρκεια του δεύτερου Παγκοσμίου Πολέμου η οποία αντικατοπτρίζεται στη SOLAS του 1948. Συνεπώς, έχει δοθεί μεγάλη έμφαση στην προστασία έναντι φωτιάς και αυτό φαίνεται από την εισαγωγή τριών νέων μερών (parts D,E,F) τα οποία προστέθηκαν στο κεφάλαιο II της SOLAS του 1948. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι οι κανονισμοί της SOLAS του 1948 αφορούσαν και επιβατηγά πλοία και πλοία μεταφοράς φορτίων. Συνοψίζοντας, η SOLAS του 1948 θεμελίωσε τρεις μεθόδους κατασκευής επιβατηγών πλοίων και βασικές απαιτήσεις προστασίας έναντι φωτιάς για πλοία μεταφοράς φορτίων. Έπειτα από την έκδοση αυτή της SOLAS, έχουμε την αναβαθμισμένη SOLAS του 1960. Η σημαντικότερη αλλαγή που εντοπίζεται στη νέα SOLAS και αφορά την προστασία έναντι φωτιάς είναι η εφαρμογή των κανονισμών προστασίας για επιβατηγά πλοία και στα πλοία μεταφοράς φορτίων.

1974 SOLAS Convention:

Παρ'όλο που οι συνθήκες του 1914, 1929, 1948 και 1960 περιελάμβαναν διατάξεις για προστασία έναντι φωτιάς, αποδείχθηκαν ανεπαρκείς για τα επιβατηγά πλοία. Κατά τη δεκαετία του 1960 μια σειρά από ατυχήματα λόγω φωτιάς έφερε στην επιφάνεια πολλά προβλήματα και συνεπώς πολλές αλλαγές ενσωματώθηκαν στη συνθήκη της **SOLAS του 1974**. Η συνθήκη αυτή (η οποία τέθηκε σε εφαρμογή το 1980 και ισχύει μέχρι σήμερα με μερικές τροποποιήσεις), συγκεντρώνει τις διατάξεις περί φωτιάς σε ξεχωριστό κεφάλαιο. Ειδικότερα, το κεφάλαιο II (κατασκευή- construction) της SOLAS του 1960 διαιρέθηκε σε δύο νέα κεφάλαια: το κεφάλαιο II-1 σχετικά με την κατασκευή (construction-structure), την υποδιαίρεση του πλοίου (subdivision), την ευστάθεια (stability), τις μηχανολογικές και ηλεκτρικές απαιτήσεις (machinery and electrical requirements) και το κεφάλαιο II-2 κατασκευή και προστασία έναντι φωτιάς, ανίχνευση φωτιάς και κατάσβεση (construction-fire protection, detection, extinction). Η νέα SOLAS απαιτούσε όλα τα νέα επιβατηγά πλοία να κατασκευάζονται από μη αναφλέξιμα υλικά και να έχουν είτε ένα σταθερό σύστημα από καταιονισθήρες (sprinkler) είτε ένα σταθερό σύστημα ανίχνευσης. Επιπλέον ενημερώθηκαν οι διατάξεις που αφορούσαν τα πλοία μεταφοράς φορτίων και προστέθηκαν νέες για πλοία μεταφοράς συγκεκριμένων φορτίων (πχ. Δεξαμενόπλοια).

1981 Revision:

Οι τροποποιήσεις του 1981 οι οποίες τέθηκαν σε εφαρμογή την 1^η Σεπτεμβρίου του 1984 αναθεωρούσαν ολικά το κεφάλαιο II-2 της SOLAS. Οι τροποποιήσεις αυτές περιλάμβαναν:

- 1) τις διατάξεις των ψηφισμάτων A.327 (IX) (υπόδειξη σχετικά με τις απαιτήσεις ασφαλείας έναντι φωτιάς για πλοία μεταφοράς φορτίων) και A.327 (X) (υπόδειξη σχετικά με τις απαιτήσεις ασφαλείας έναντι φωτιάς για επιβατηγά πλοία που μεταφέρουν μέχρι 36 επιβάτες), οι οποίες υιοθετήθηκαν το 1975 και το 1977 αντίστοιχα.
- 2) Διατάξεις σχετικά με συστήματα κατάσβεσης φωτιάς αλογονωμένου υδρογονάνθρακα (halogenated hydrocarbon fire extinguishing systems) και
- 3) Μια νέα διάταξη σχετικά με τα συστήματα αδρανοποίησης εκρηκτικής ατμόσφαιρας (inert gas systems).

1990 Scandinavian Star and the 1992 Fire Safety Amendments:

Στις 7 Απριλίου του 1990 ξέσπασε φωτιά στο κρουαζιερόπλοιο «Scandinavian Star» η οποία ανιχνεύτηκε αρχικά από τους επιβάτες σε σωρό κλινοσκεπασμάτων και κατασβέστηκε άμεσα (Κ. Σπύρου, Ν.Νικολάου, 2009). Λίγα λεπτά αργότερα όμως, εντοπίστηκε μια δεύτερη εστία σε διάδρομο χώρου ενδιαίτησης, η οποία όταν μετά από αρκετή ώρα έγινε αντιληπτή είχε ήδη λάβει ανεξέλεγκτες διαστάσεις. Η ενεργητική και η παθητική προστασία έναντι της πυρκαγιάς ήταν άκρως αναποτελεσματικές. Ο απολογισμός ήταν 158 νεκροί εκ των οποίων οι 125 απεβίωσαν λόγω εισπνοής μονοξειδίου του άνθρακα, οι 10 λόγω εγκαυμάτων και 23 λόγω εισπνοής υδροκυανίου. Οι περισσότεροι (99) απεβίωσαν εντός των καμπίνων τους.



Εικόνα 1- Scandinavian Star

Το ατύχημα αυτό ήταν η αφορμή να ξεκινήσει μια μεγάλη συζήτηση σχετικά με την προστασία έναντι φωτιάς και την εκκένωση.

Το Δεκέμβριο του 1992, ο IMO υιοθέτησε ένα εκτενές σετ τροποποιήσεων σχετικά με την προστασία έναντι φωτιάς, εφαρμόσιμο και σε νέα αλλά και σε υπάρχοντα επιβατηγά πλοία. Οι τροποποιήσεις αυτές απαιτούσαν την εγκατάσταση συστημάτων αντιμετώπισης της φωτιάς, όμοιων με εκείνων που υπάρχουν σε ένα μοντέρνο ξενοδοχείο, όπως για παράδειγμα αυτόματο σύστημα κατάσβεσης με καταιονιστήρες, αυτόματο σύστημα ανίχνευσης καπνού και κατασκευή φρακτών προστασίας από φωτιά από μη αναφλέξιμα υλικά. Τέλος, περιελάμβαναν την ύπαρξη βελτιωμένων μεθόδων υποβοήθησης μιας διαδικασίας εκκένωσης, όπως είναι η χρήση χαμηλού φωτισμού.

Επίσης το 1992, η υπο-επιτροπή αρμόδια για τα θέματα προστασίας έναντι φωτιάς, αποφάσισε να αναλάβει την αναθεώρηση του κεφαλαίου II-2, καθώς οι τροποποιήσεις που είχαν γίνει, έκαναν το κεφάλαιο δύσκολο και στη χρήση, αλλά και στην εφαρμογή του. Τα νέα τεχνολογικά επιτεύγματα καθώς και τα συμπεράσματα που βγήκαν από τα ατυχήματα που έλαβαν χώρα από την τελευταία αναθεώρηση της SOLAS επέβαλλαν την εισαγωγή νέων διατάξεων και τροποποίηση των υπαρχόντων. Ωστόσο η οκταετής προσπάθεια αυτή κατέληξε σε μια παραπάνω από φιλική προς το χρήστη συγχώνευση των τελευταίων τροποποιήσεων. Όμως η νέα δομή του κεφαλαίου II-2 είχε αρκετά ασαφή σημεία, όπως για παράδειγμα: « Προς ικανοποίηση της Αρχής», « Ένας τρόπος πρέπει να παρασχει, ώστε...», κλπ. Στην πραγματικότητα υπήρχαν πάνω από 200 φράσεις τέτοιου τύπου. Επιπλέον, το κεφάλαιο προς συζήτηση δεν παρείχε καμία υποστήριξη προς πρωτότυπους σχεδιασμούς (design) και έδινε πολύ μικρή σημασία στον ανθρώπινο παράγοντα, ο οποίος ευθύνεται κατά 80% στα ναυτικά ατυχήματα.

1996 Amendments and International Code for Application of Fire Test Procedures (FTP Code)

Οι τροποποιήσεις του 1996 στο κεφάλαιο II-2 οι οποίες τέθηκαν σε ισχύ το 1998 περιελάμβαναν αλλαγές στην εισαγωγή, στο μέρος Β (μέτρα προστασίας έναντι φωτιάς σε επιβατηγά πλοία), στο μέρος Γ (μέτρα προστασίας σε πλοία μεταφοράς φορτίων) και στο μέρος Δ (μέτρα προστασίας σε δεξαμενόπλοια).

Αναπτύχθηκε επίσης ένας νέος διεθνής κώδικας για την εφαρμογή των διαδικασιών των τεστ φωτιάς (Fire Test Procedures Code) ο οποίος έγινε υποχρεωτικός την 1^η Ιουλίου του 1998 και προοριζόταν για χρήση από τις (κρατικές) Αρχές κατά τη διαδικασία έγκρισης προϊόντων και εξαρτημάτων προς εγκατάσταση σε πλοία που έφεραν την αντίστοιχη σημαία.

Ο κώδικας αυτός παρέχει διεθνείς διατάξεις σχετικά με τις διαδικασίες που πρέπει να ακολουθηθούν για τη διεξαγωγή των εξής τεστ:

- Τεστ μη αναφλεξιμότητας (non-combustibility test)
- Τεστ καπνού και τοξικότητας (smoke and toxicity test)

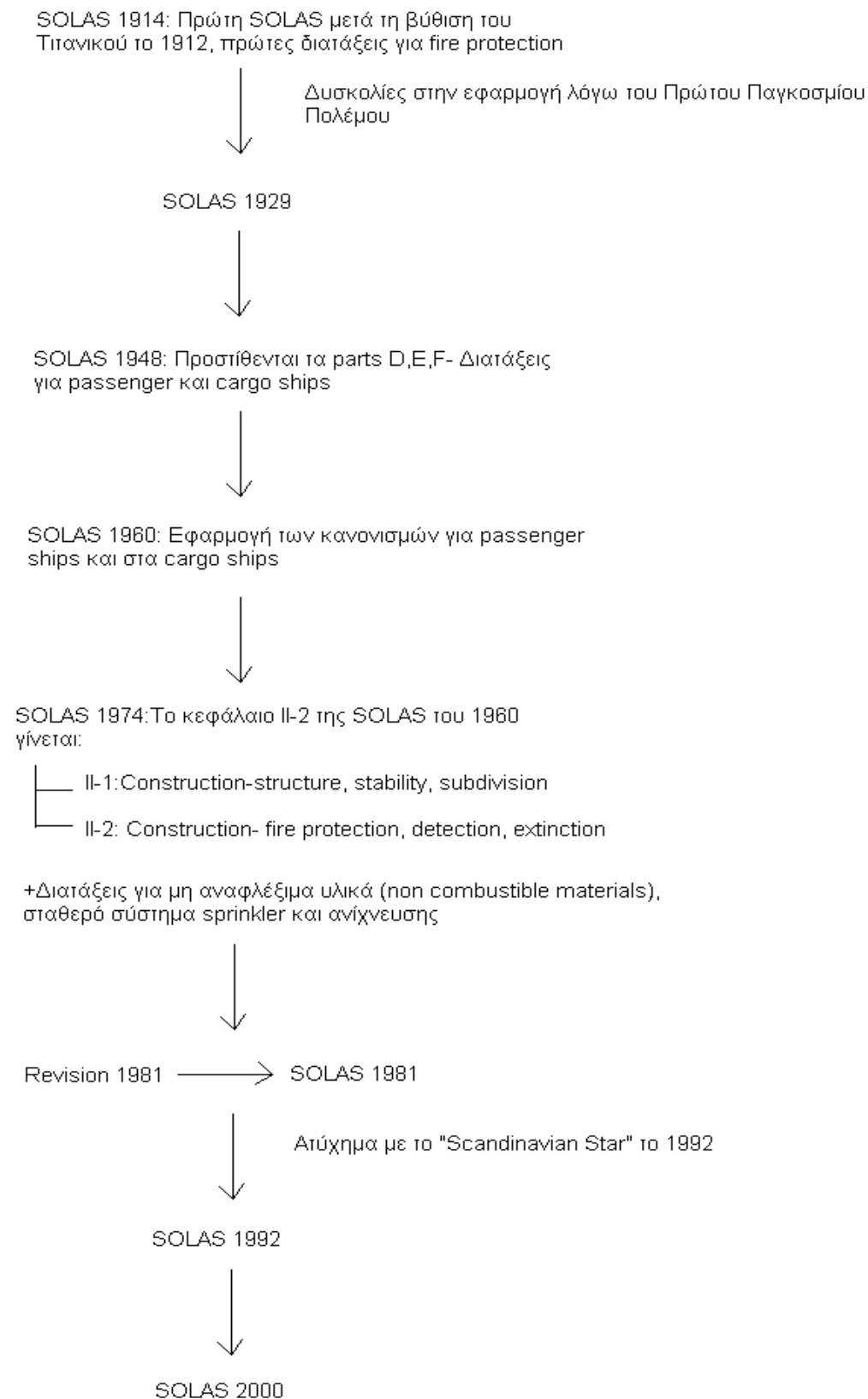
- Τεστ για τα διαχωριστικά «A», «B» και «F» κλάσης (tests for “A”, “B” and “F” class divisions)
- Τεστ για συστήματα ελέγχου των πυρίμαχων πορτών (tests for fire door control systems)
- Τεστ ευφλεξιμότητας επιφάνειας (test for surface flammability)
- Τεστ για τις πρωτεύουσες επικαλύψεις του καταστρώματος (test for primary deck coverings)
- Τεστ για τα καθέτως υποστηριζόμενα υφάσματα και λεπτά στρώματα (test for vertically supported textiles and films)
- Τεστ για έπιπλα με ταπετσαρία (test for upholstered furniture)
- Τεστ για τα στοιχεία του κρεβατιού (test for bedding components)

2000 Amendments- Revised chapter II-2

Το Δεκέμβριο του 2000 ο IMO υιοθέτησε ένα ολικώς αναθεωρημένο κεφάλαιο II-2, το οποίο τέθηκε σε εφαρμογή την 1^η Ιουλίου του 2002.

Η νέα δομή επικεντρώνεται στη διαδικασία ενός σεναρίου φωτιάς και όχι στον τύπο του πλοίου, όπως έκανε η προηγούμενη. Έτσι οι κανονισμοί ξεκινούν με την πρόληψη, ακολουθεί η ανίχνευση και η κατάσβεση και καταλήγουν στη διαφυγή. Επιπλέον, προκειμένου να γίνει το κεφάλαιο πιο φιλικό προς το χρήστη, συγκεκριμένες τεχνικές απαιτήσεις των διαφόρων συστημάτων μεταφέρθηκαν στον κώδικα FSS.

Τέλος, στο αναθεωρημένο κεφάλαιο II-2 προστίθεται το μέρος E το οποίο ασχολείται αποκλειστικά με ζητήματα σχετικά με τον ανθρώπινο παράγοντα, όπως είναι η εκπαίδευση και το μέρος F το οποίο παρουσιάζει μια μεθοδολογία έγκρισης εναλλακτικών σχεδιασμών (alternative designs) και διατάξεων .



Σχήμα 2 -Διαγραμματική απεικόνιση της εξέλιξης των κανονισμών της SOLAS (Safety Of Life At Sea)

2.3 ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΠΟΥ ΑΝΑΦΕΡΟΝΤΑΙ ΣΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΕΝΑΝΤΙ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, δύο είναι τα κυριότερα «σετ» κανονισμών που αφορούν προστασία από φωτιά, τα οποία είναι ευρέως αποδεκτά και αποτελούν βάση για περαιτέρω κανονισμούς και οδηγίες: η SOLAS και ο κώδικας FSS (Fire Safety Systems Code).

Η SOLAS είναι από τις παλαιότερες διεθνείς συμβάσεις που αναφέρεται στην ασφάλεια στη θάλασσα και περιλαμβάνει σειρά μέτρων που αποσκοπούν στην διασφάλιση, στο μέτρο του ανθρωπίνως δυνατού, της ασφαλούς λειτουργίας των πλοίων απ' τη σκοπιά της προστασίας της ανθρώπινης ζωής. Αποτελείται κατά βάση από 12 κεφάλαια, καθένα απ' τα οποία διαπραγματεύεται μία θεματολογική ενότητα ζητημάτων ναυτικής ασφάλειας. Το κεφάλαιο που μας είναι πιο χρήσιμο για την παρούσα εργασία είναι το κεφάλαιο II-2: Κατασκευή- Πυροπροστασία, Ανίχνευση και κατάσβεση πυρκαγιάς. Το κεφάλαιο αυτό αποτελείται από τα ακόλουθα μέρη, σύμφωνα με την αναθεώρηση του 2000 η οποία τέθηκε σε εφαρμογή την 1^η Ιουλίου του 2002:

- A. Γενικά-General.
- B. Πρόληψη φωτιάς και έκρηξης- Prevention of fire and explosion.
- C. Καταστολή φωτιάς-Suppression of fire.
- D. Διαφυγή-Escape.
- E. Λειτουργικές απαιτήσεις-Operational Requirements.
- F. Εναλλακτικός σχεδιασμός και διατάξεις-Alternative design and arrangements.
- G. Ειδικές απαιτήσεις- Special requirements.

Το σύνολο των κανονισμών που περιλαμβάνονται στα παραπάνω μέρη αναγνωρίζουν ότι η απόλυτη προστασία έναντι πυρκαγιάς δεν είναι πρακτικά δυνατή. Χώροι όπου είναι λιγότερο πιθανό να εκδηλωθεί πυρκαγιά απομονώνονται σε σχέση με άλλους χώρους μεγαλύτερου κινδύνου ανάφλεξης, με τη χρήση διαχωριστικών τμημάτων. Παρόμοια διαχωρίζονται χώροι παραμονής ανθρώπων. Γενικά, απαιτείται η διάταξη των πλοίων να είναι τέτοια ώστε η πυρκαγιά να περιορίζεται στο μικρό χώρο εντός του οποίου έχει εκδηλωθεί και με γρήγορη πυρανίχνευση, αποτελεσματικά μέσα κατάσβεσης και σωστή εκπαίδευση του πληρώματος να είναι δυνατό να κατασβεστεί γρήγορα.

Συνοπτικά, οι βασικές αρχές ανάπτυξης των κανονισμών, όπως αναφέρονται στο Κεφάλαιο II - 2 της SOLAS, είναι οι ακόλουθες:

- Διαμερισματοποίηση του πλοίου σε κύριες κατακόρυφες ζώνες με θερμικά και κατασκευαστικά όρια.
- Διαχωρισμός των χώρων ενδιαίτησης απ' το υπόλοιπο πλοίο με θερμικά και κατασκευαστικά όρια.
- Περιορισμένη χρήση εύφλεκτων υλικών.
- Ανίχνευση οποιασδήποτε πυρκαϊάς στο χώρο εκδήλωσής της.
- Προστασία των διόδων εγκατάλειψης και διόδων πρόσβασης για καταπολέμηση της πυρκαϊάς.
- Αμεση διαθεσιμότητα συστημάτων πυρόσβεσης.
- Ελαχιστοποίηση της πιθανότητας ανάφλεξης ατμών του υγρού.

Το βασικό προτέρημα που διαθέτει ένα πλοίο απ' την άποψη της πυρόσβεσης είναι η απεριόριστη παροχή νερού. Συνεπώς, το κύριο μέσο κατάσβεσης είναι το δίκτυο νερού (fire main), το οποίο πρέπει να εκτείνεται σ' ολόκληρο το πλοίο.

Επιπλέον της ύπαρξης του βασικού δικτύου πυρόσβεσης, οι κανονισμοί απαιτούν επίσης την ύπαρξη φορητών και σταθερών πυροσβεστήρων στο μηχανοστάσιο, στις ενδιαιτήσεις και στους χώρους/περιοχές φορτίου. Το μέσο κατάσβεσης όσον αφορά τα σταθερά συστήματα στο μηχανοστάσιο και αντλιοστάσιο μπορεί να είναι αέριο, αφρός που καταλαμβάνει μεγάλο όγκο μετά την απελευθέρωσή του, ή νερό που εκτοξεύεται με πίεση. Σε χώρους ξηρού αλλά ευανάφλεκτου φορτίου, προβλέπονται σταθερά συστήματα αερίου. Συστήματα πυρόσβεσης σε χώρους πληρώματος και επιβατών είναι τύπου αυτόματου sprinkler και πρέπει να εγκαθίστανται σε συνδυασμό με σύστημα πυρανίχνευσης και προειδοποίησης.

Μερικές από τις αρχικές τεχνικές διατάξεις της SOLAS μεταφέρθηκαν στον κώδικα FSS, πολλές από τις οποίες σε πιο λεπτομερή μορφή. Ο κύριος λόγος πίσω από τη δημιουργία ενός ξεχωριστού κώδικα ήταν να χωριστούν οι κρατικές απαιτήσεις (statutory requirements) οι οποίες ανήκουν στη SOLAS και σαφώς περιλαμβάνονται στις απαιτήσεις της σημαίας από τις καθαρά τεχνικές οδηγίες-που ταιριάζουν καλύτερα στον όρο «κώδικας»-και είναι πιο «φιλικές» προς τους κατασκευαστές εξοπλισμού, τους μηχανικούς συστημάτων, κλπ.

Ο σκοπός του κώδικα FSS είναι να παρέχει διεθνή standards για τα συστήματα πυρασφάλειας που απαιτεί η SOLAS στο κεφάλαιο II-2 και ασχολείται με τρόπους

μείωσης του ρίσκου (risk mitigation). Αποτελείται από τα εξής 15 κεφάλαια, καθένα από τα οποία εξετάζει συγκεκριμένα συστήματα και διατάξεις, εκτός από το κεφάλαιο I το οποίο περιλαμβάνει μερικούς ορισμούς και γενικές απαιτήσεις για την έγκριση εναλλακτικών σχεδιασμών. Ακολουθεί μια λίστα των θεμάτων με τα οποία ασχολείται ο κώδικας:

- 1) Γενικά
- 2) Διεθνείς συνδέσεις ξηράς
- 3) Προστασία προσωπικού
- 4) Πυροσβεστήρες
- 5) Σταθερά πυροσβεστικά συστήματα αερίου
- 6) Σταθερά πυροσβεστικά συστήματα αφρού
- 7) Σταθερά συστήματα ψεκασμού νερού υπό πίεση και συστήματα ψεκασμού νέφους νερού
- 8) Αυτόματοι καταιονιστήρες, εντοπισμός φωτιάς και συναγερμός
- 9) Σταθερά συστήματα εντοπισμού φωτιάς και συναγερμού
- 10) Συστήματα εντοπισμού καπνού μέσω λήψης δείγματος
- 11) Φωτισμός χαμηλού επιπέδου
- 12) Σταθερές αντλίες φωτιάς έκτακτης ανάγκης
- 13) Διάταξη των μέσων διαφυγής
- 14) Σταθερά συστήματα αφρού στο κατάστρωμα
- 15) Συστήματα inert gas (αδρανοποίησης εκρηκτικής ατμόσφαιρας)

Και η SOLAS και ο κώδικας FSS παρουσιάζουν ζητήματα που έχουν να κάνουν με φωτιά αλλά και με ζητήματα ευστάθειας και εκκένωσης που μπορεί να προκληθούν. Η καθοδηγητική φύση των κανονισμών είναι βασισμένη σε έρευνες πάνω σε ατυχήματα που έχουν γίνει και στις συνέπειές τους. Παρ' όλο όμως που γίνονται προσπάθειες για τη μείωση της έκτασης της καταστροφής από μια πυρκαγιά, επιβάλλεται οι ολοένα νέες (εναλλακτικές) σχεδιάσεις (alternative designs) να εναρμονίζονται με τις απαιτήσεις των κανονισμών, οπότε προκύπτουν νέα ζητήματα. Παραδείγματα τέτοιων εναλλακτικών σχεδιασμών φαίνονται στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 2- Αίθουσα εκδηλώσεων που εκτείνεται καθ' ύψος σε δύο καταστρώματα



Εικόνα 3- Εστιατόριο που εκτείνεται σε πάνω από δύο καταστρώματα (καθ' ύψος)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο :

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΥΠΑΡΧΟΝΤΩΝ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΓΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με την έννοια μοντελοποίηση μιας πυρκαγιάς εννοούμε την περιγραφή μέσω διαφορικών εξισώσεων του προβλήματος της ανάφλεξης και της εξέλιξής της, με βάση τη φυσική. Πέρα από τη μοντελοποίηση αυτή, ορισμένα προγράμματα δίνουν τη δυνατότητα μοντελοποίησης της εξάπλωσης του καπνού. Υπάρχουν οι εξής τρεις προσεγγίσεις στη μοντελοποίηση πυρκαγιών, οι οποίες «μεταχειρίζονται» την πυρκαγιά σαν μια διαδικασία που εξελίσσεται στο χρόνο σε τρεις διαστάσεις (McGrattan et al. 2007):

1. Αναλυτικά μοντέλα (network models), όπου κάθε όγκος ελέγχου (πχ. ένα διαμέρισμα) θεωρείται σαν ένας κόμβος. Οι ενώσεις των κόμβων συμβάλλουν στην ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ τους και προδιαγράφουν την πορεία της ροής (Floyd et al. 2005) .
2. Διζωνικά (two-zone fire models) ή πολυζωνικά μοντέλα, όπου κάθε διαμέρισμα χωρίζεται σε δύο ζώνες (άνω και κάτω ζώνη) οι οποίες αλληλεπιδρούν μεταξύ τους μέσω των εξισώσεων ροής. Είναι πιο σύνθετα από τα μοντέλα της προηγούμενης κατηγορίας και σημαντικό τους πλεονέκτημα είναι οι πολύ μικρές τους απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ. Αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχουν και μοντέλα μιας ζώνης (one-zone models) τα οποία θεωρούν ότι οι συνθήκες στα πλαίσια ενός διαμερίσματος είναι παντού ομοιόμορφες και χρησιμεύουν στην εξέταση φαινομένων, όπως είναι το flashover (πλήρης ανάφλεξη).
3. Μοντέλα πεδίου (field/computational fluid dynamics (CFD) models), τα οποία λύνουν αριθμητικά τις διαφορικές εξισώσεις ροής σε τρεις διαστάσεις με διάφορα επίπεδα πολυπλοκότητας. Παρ'όλο που τα προγράμματα αυτά μπορούν να προσεγγίσουν με μεγαλύτερη ακρίβεια τις επιπτώσεις της φωτιάς, αδυνατούν στο να παρέχουν μια γρήγορη ανάλυση με τρόπο επωφελή.

Λόγω του ότι στα παραπάνω μοντέλα υπεισέρχονται συχνά στοιχεία που προκύπτουν από παραδοχές, υπάρχει αβεβαιότητα. Για να ελεγχθεί η αβεβαιότητα αυτή απαιτείται τεκμηρίωση (validation). Σύμφωνα με τον κανονισμό ASTM E1355 (American Society

for Testing and Materials)¹, τεκμηρίωση ονομάζεται η διαδικασία καθορισμού του βαθμού στον οποίο μια μέθοδος υπολογισμού είναι ακριβής αντιπροσώπευση του πραγματικού κόσμου και επιτυγχάνεται μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τη χρήση του εκάστοτε μοντέλου με τα αντίστοιχα πειραματικά. Η τεκμηρίωση ενός μοντέλου συνοδεύεται από την επαλήθευσή του (verification), κατά την οποία ελέγχεται εάν το μαθηματικό μοντέλο ανταποκρίνεται στην ιδέα για την οποία αναπτύχθηκε.

3.2 ΤΑ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΕΡΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΟΥ ΕΧΟΥΝ ΑΝΑΠΤΥΧΘΕΙ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ.

Στον τομέα των network models έχουν αναπτυχθεί τα ακόλουθα μοντέλα:

- CONTAM: Πρόκειται για ένα μοντέλο όπου οι όγκοι ελέγχου είναι στοιχεία θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού (Walton & Dols 2008). Αναπτύχθηκε από το ινστιτούτο NIST (National Institute of Standards and Technology) και απευθύνεται σε κτίρια. Δεν περιλαμβάνει μοντέλα καύσης καθώς και μοντέλα μεταφοράς θερμότητας μεταξύ επιφανειών.
- FIRE Accident Model (FIRAC): Αναπτύχθηκε από τα εργαστήρια Los Alamos με στόχο την πρόβλεψη της σκέδασης ραδιενεργών σωματιδίων μέσω ενός πολύπλοκου συστήματος εξαερισμού (Floyd et al. 2004). Μπορεί να μοντελοποιήσει μόνο μια φωτιά και δεν περιλαμβάνει μοντέλα ανίχνευσης, κατάσβεσης, εξάπλωσης της φωτιάς και μεταφοράς θερμότητας μεταξύ των διαμερισμάτων.
- Fire and Smoke SIMulator (FSSIM): Είναι ένα πρόγραμμα γραμμένο σε FORTRAN και μερικές δυνατότητές του είναι οι ακόλουθες: Ανίχνευση φωτιάς μέσω ανίχνευσης θερμότητας, καπνού και φλόγας, κατάσβεση μέσω καταινιστήρων, νέφους νερού και αφρού, ύπαρξη περισσότερων από μια πυρκαγιών με ταυτόχρονη εξάπλωσή τους μέσω μεταφοράς θερμότητας μεταξύ διαμερισμάτων, κ.ά (Floyd et al. 2004).

¹ American Society for Testing and Materials, ASTM E 1355-04, *Standard Guide for Evaluating the Predictive Capabilities of Deterministic Fire Models*, (2004)

Τα σημαντικότερα διζωνικά μοντέλα είναι τα εξής:

- Consolidated Model of Fire and Smoke Transport (CFAST): Δημιουργήθηκε κι αυτό από το ινστιτούτο NIST και αρχικά χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση πυρκαγιάς στα πλαίσια ενός κτιρίου (Peacock 2005). Το μοντέλο αυτό αναπτύσσεται πάνω από είκοσι χρόνια και προσφάτως γίνονται προσπάθειες συνδυασμού του με μοντέλα ανάλυσης ρίσκου (risk analysis), όπως είναι για παράδειγμα το Probabilistic Fire Simulator (PFS). Με τη βοήθειά του μπορεί κανείς να καθορίσει την προκύπτουσα από μια πυρκαγιά κατανομή των αερίων και των θερμοκρασιών. Η ικανότητα του CFAST να συμβάλλει στη σχεδίαση πλοίων έγινε γνωστή από το 1995 (Nikolaou & Spyrou 2005).
- Consolidated Compartment Fire Model (CCFM.VENTS): Πρόκειται για ένα μοντέλο, το οποίο δημιουργήθηκε από το NIST με στόχο τη συγκέντρωση όλης της προηγούμενης εμπειρίας και την ευελιξία ως προς την ενσωμάτωση μελλοντικών επιτευγμάτων (Cooper & Forney 1990). Σε σχέση με τα προηγούμενα μοντέλα, είναι πιο φιλικό προς το χρήστη και αριθμητικά πιο ευσταθές.
- FIRE Simulation Technique (FIRST): Αναπτύχθηκε από το NIST και χρησιμεύει στην εξέταση της ανάπτυξης μιας φωτιάς σε ένα μονο διαμέρισμα (Mitler & Rockett 1987) Περιγράφει φαινόμενα όπως είναι η κίνηση των αερίων μέσα και έξω από το διαμέρισμα, η ανάπτυξη θερμού στρώματος, η θέρμανση και η ενδεχόμενη ανάφλεξη τριών στόχων, κ.ά.

Τέλος, καθώς μειωμένος υπολογιστικός χρόνος γίνεται διαθέσιμος με μικρότερο κόστος, στον τομέα των μοντέλων πεδίου (field models) έχουμε τα ακόλουθα επιτεύγματα:

- CFX: Μοντέλο υπολογιστικής ρευστομηχανικής της εταιρείας ANSYS που χρησιμοποιείται εδώ και είκοσι χρόνια. Μπορεί να προσομοιώσει ροές σε πλήθος εφαρμογών και επιτρέπει στους μηχανικούς να προσομοιώσουν διάφορα σενάρια σε εικονικό περιβάλλον.
- JASMINE: Μοντέλο που αναπτύχθηκε από το Building Research Establishment. Μπορεί να προσομοιάσει περισσότερα από ένα

διαμερίσματα με ύπαρξη ανοιγμάτων (πχ. πόρτες, παράθυρα), εξαερισμού και εστιών φωτιάς ή θέρμανσης.

- Simulation of Fire in Enclosures (SOPHIE): Αποτελεί αποτέλεσμα της συνεργασίας ορισμένων ευρωπαϊκών εργαστηρίων που ασχολούνται με τη φωτιά (Baroudi 2007). Το μοντέλο αυτό ενσωματώνει διαφορετικά μοντέλα εξάπλωσης της φλόγας.
- SMARTFIRE: Δημιούργημα του πανεπιστημίου του Greenwich, προσφέρει τη δυνατότητα αυτόματης δημιουργίας του καταλληλότερου για κάθε εφαρμογή πλέγματος (Galea et al. 1999). Αρκεί ο χρήστης να εισάγει την επιθυμητή γεωμετρία. Το πλεονέκτημά του σε σχέση με τα δύο μοντέλα που περιγράφηκαν παραπάνω είναι η αποτελεσματική εύρεση πλέγματος και για πολύπλοκες γεωμετρίες.
- Fire Dynamics Simulator (FDS): Αναπτύχθηκε από το NIST σε συνεργασία με το τεχνικό ερευνητικό κέντρο VVT της Φιλανδίας (McGrattan et al. 2007). Πρόκειται για μοντέλο υπολογιστικής ρευστομηχανικής το οποίο λύνει αριθμητικά τις εξισώσεις ροής Navier-Stokes για ροές μικρής ταχύτητας, με έμφαση στον καπνό και τη μεταφορά θερμότητας από μια φωτιά. Μπορεί, σε συνδυασμό με το FDS, να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο PyroSim, το οποίο προσφέρει ένα πιο φιλικό προς το χρήστη τρόπο εισαγωγής των δεδομένων και παρουσίασης των αποτελεσμάτων.

Το CFAST και το FDS συνοδεύονται από το λογισμικό Smokeview το οποίο χρησιμεύει στην οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων.

3.3 ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΒΑΣΕΙ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ.

Έχουν γίνει στο παρελθόν πολλές προσπάθειες σύγκρισης ανάμεσα σε μοντέλα που ανήκουν στην ίδια κατηγορία, αλλά και μεταξύ μοντέλων διαφορετικής κατηγορίας. Επίσης έχουν διεξαχθεί – λίγα βέβαια- πειράματα σε κανονική κλίμακα (fullscale fire tests) (Steward et. al. 1992). Σε μερικά από αυτά τα πειράματα, έχει γίνει μετέπειτα προσπάθεια σύγκρισης των αποτελεσμάτων με αυτά ενός μοντέλου προσομοίωσης. Τέτοιες προσπάθειες σύγκρισης είναι οι εξής:

1. Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων με το CFAST (Forney et al. 1996, Reneke et. al. 2001).

2. Διεξαγωγή πειραμάτων σε διαμερίσματα και σύγκριση με τα CFAST, FIRST (Dembsey et. al 1995)

Οι υπάρχουσες στη βιβλιογραφία συγκρίσεις μεταξύ μοντέλων διαφορετικής κατηγορίας είναι οι ακόλουθες:

1. Σύγκριση ανάμεσα σε ένα αναλυτικό μοντέλο κατά το οποίο ο μελετητής επιλύει κατάλληλες εξισώσεις (πχ. εξισώσεις διατήρησης μάζας), με το διζωνικό μοντέλο CFAST και το μοντέλο υπολογιστικής ρευστομηχανικής FDS (Rein et al. 2006, Davis et. al 1996).
2. Σύγκριση μεταξύ των CFAST, FDS (Floyd 2002, Nikolaou & Spyrou 2009).

Συμπερασματικά, η καταλληλότητα κάθε μοντέλου κρίνεται από τις ανάγκες κάθε εφαρμογής. Ειδικότερα, για εφαρμογές μικρής κλίμακας (πχ. ένα διαμέρισμα) και για οικονομία χρόνου χρησιμοποιούμε διζωνικά μοντέλα. Για πιο πολύπλοκες εφαρμογές επιλέφουμε μοντέλα υπολογιστικής ρευστομηχανικής, καθώς τα διζωνικά μοντέλα πάνουν γενικά να είναι αριθμητικά ευσταθή και παρουσιάζουν αποκλίσεις.

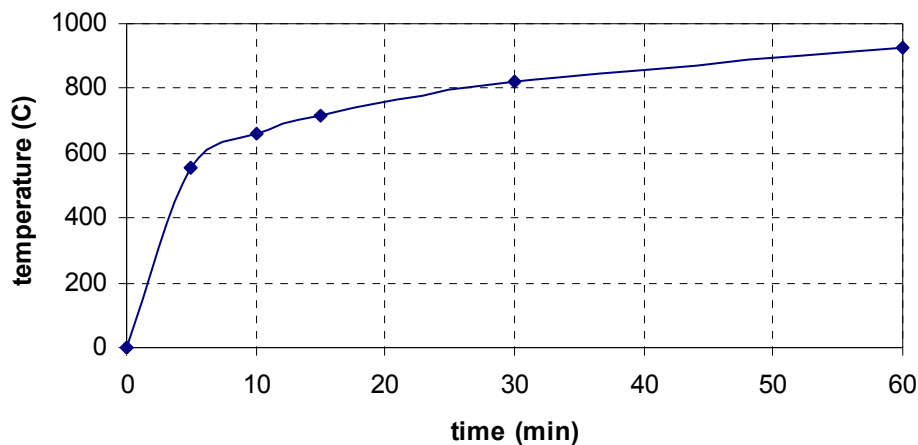
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο :

ΕΛΕΓΧΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΔΙΑΧΩΡΙΣΤΙΚΩΝ ΜΕ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΕΣΤ ΦΩΤΙΑΣ (Fire test) ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΤΟ FDS (Fire Dynamics Simulator)

4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΤΥΠΟΥ ΤΕΣΤ ΦΩΤΙΑΣ (Standard fire test) - ΧΡΗΣΙΜΟΙ ΟΡΙΣΜΟΙ

Σύμφωνα με τον κανονισμό 3 του κεφαλαίου II-2 της SOLAS, το πρότυπο τεστ φωτιάς είναι ένα τεστ κατά το οποίο δοκίμια που έχουν ληφθεί από τις φρακτές προς εξέταση τοποθετούνται σε ειδικό φούρνο και εκτίθενται σε θερμοκρασίες που προδιαγράφονται από την πρότυπη καμπύλη χρόνου- θερμοκρασίας. Οι θερμοκρασίες από τις οποίες διέρχεται η καμπύλη αυτή, η οποία φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί, είναι μετρημένες πάνω από την αρχική θερμοκρασία της επιφάνειας.

Standard time-temperature curve



Διάγραμμα 1

Τα δοκίμια προς εξέταση πρέπει να έχουν εκτεθειμένη (σε θερμότητα) επιφάνεια τουλάχιστον $4,65\text{m}^2$ και ύψος ίσο προς $2,44\text{m}$ ώστε να περιγράφεται όσο το δυνατόν καλύτερα η επιδιωκόμενη κατασκευή. Επίσης θα πρέπει να περιλαμβάνεται όπου είναι κατάλληλο, ένας τουλάχιστον σύνδεσμος.

Στο τεστ αυτό υποβάλλονται τα διαχωριστικά μεταξύ των διαφόρων διαμερισμάτων (πχ. μεταξύ καμπινών, μεταξύ κύριων οριζόντιων και κάθετων ζωνών, μεταξύ του μηχανοστασίου και ενός χώρου φορτίου, μεταξύ των χώρων φορτίου) και μπορεί να είναι τύπου A, B και C. Προχωρούμε παρακάτω σε ορισμένους ορισμούς, όπως αυτοί διατυπώνονται στο κεφάλαιο II-2 της SOLAS και στον κανονισμό 3, για έννοιες που θα χρησιμοποιήσουμε στην προσομοίωση του πρότυπου τεστ:

- *Διαχωριστικά A τάξης ("A" class divisions)* Είναι τα διαχωριστικά που σχηματίζονται από φρακτές και καταστρώματα, τα οποία:

1. Είναι κατασκευασμένα από χάλυβα ή άλλο ισοδύναμο υλικό (ως προς τις ιδιότητες του όπως παρουσιάζονται στο τέλος της απαιτούμενης έκθεσης στα πλαίσια του πρότυπου τεστ φωτιάς).
2. Είναι καταλλήλως ενισχυμένα.
3. Είναι κατασκευασμένα έτσι ώστε να εμποδίζουν τη διέλευση της φλόγας για μια ώρα από την έναρξη του πρότυπου τεστ φωτιάς.
4. Είναι μονωμένα με εγκεκριμένα μη αναφλέξιμα υλικά έτσι ώστε η μέση θερμοκρασία της μη εκτεθειμένης επιφάνειας να μην ξεπεράσει τους 139° C πάνω από την αρχική θερμοκρασία και επίσης η θερμοκρασία σε οποιοδήποτε σημείο, συμπεριλαμβανομένων των συνδέσεων να μην ξεπεράσει τους 180° C πάνω από την αρχική θερμοκρασία, εντός των ακόλουθων χρονικών πλαισίων:

“Class A-60”- 60 λεπτά

“Class A-30”- 30 λεπτά

“Class A-15”- 15 λεπτά

“Class A-0”- 0 λεπτά

- *Διαχωριστικά B τάξης ("B" class divisions):* Είναι τα διαχωριστικά που σχηματίζονται από φρακτές, καταστρώματα, οροφές και δάπεδα τα οποία:

1. Είναι κατασκευασμένα έτσι ώστε να εμποδίζουν τη διέλευση της φλόγας για μισή ώρα από την έναρξη του πρότυπου τεστ φωτιάς.
2. Η μονωτική τους ικανότητα είναι τέτοια, ώστε η μέση θερμοκρασία της μη εκτεθειμένης επιφάνειας να μην ξεπεράσει τους 139° C πάνω από την αρχική θερμοκρασία και επίσης η θερμοκρασία σε οποιοδήποτε σημείο,

συμπεριλαμβανομένων των συνδέσεων να μην ξεπεράσει τους 225° C πάνω από την αρχική θερμοκρασία, εντός των ακόλουθων χρονικών πλαισίων:

“Class B-15”- 15 λεπτά

“Class B-0”-0 λεπτά

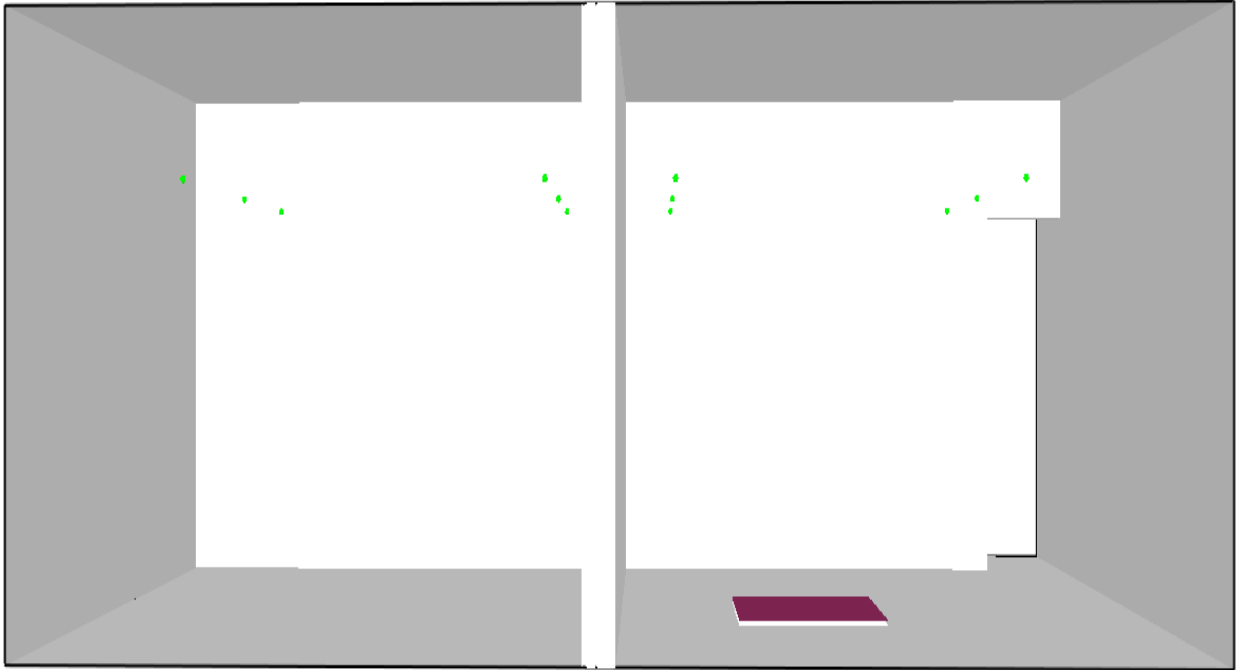
3. Πρέπει να είναι κατασκευασμένα από εγκεκριμένα μη αναφλέξιμα υλικά, αλλά και όλα τα υλικά που υπεισέρχονται στην κατασκευή τους πρέπει να είναι μη αναφλέξιμα, με εξαίρεση ορισμένες επικαλύψεις οι οποίες μπορεί να είναι αναφλέξιμες, αλλά θα πρέπει να πληρούν άλλες απαιτήσεις του κεφαλαίου II-2.
 4. Η σημαία μπορεί να απαιτεί ένα τεστ ενός πρότυπου διαχωριστικού, ώστε να βεβαιωθεί ότι πληρεί τις απαιτήσεις ακεραιότητας και ανόδου της θερμοκρασίας, όπως περιγράφηκαν παραπάνω.
- *Κύριες κατακόρυφες ζώνες (main vertical zones):* Είναι τα μέρη στα οποία χωρίζεται η γάστρα του πλοίου, η υπερκατασκευή και τα υπερστεγάσματα με διαχωριστικά Α τάξης. Το μέσο μήκος μιας τέτοιας ζώνης (σε οποιοδήποτε κατάστρωμα δεν πρέπει να ξεπερνάει τα 40m.
 - *Συνεχείς οροφές και δάπεδα Β τάξης:* Είναι οι οροφές και τα δάπεδα Β τάξης που καταλήγουν μόνο σε διαχωριστικά Α ή Β τάξης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι νηογνώμονες απαιτούν τα διαχωριστικά να είναι type approved, πράγμα που σημαίνει ότι θα πρέπει κάθε διαχωριστικό που προορίζεται για χρήση στο πλοίο, να πληρεί συγκεκριμένες προϋποθέσεις ως προς τον τύπο του. Στο παράρτημα III φαίνονται οι απαιτήσεις του DNV (Det Norske Veritas) για τις φρακτές Β τάξης.

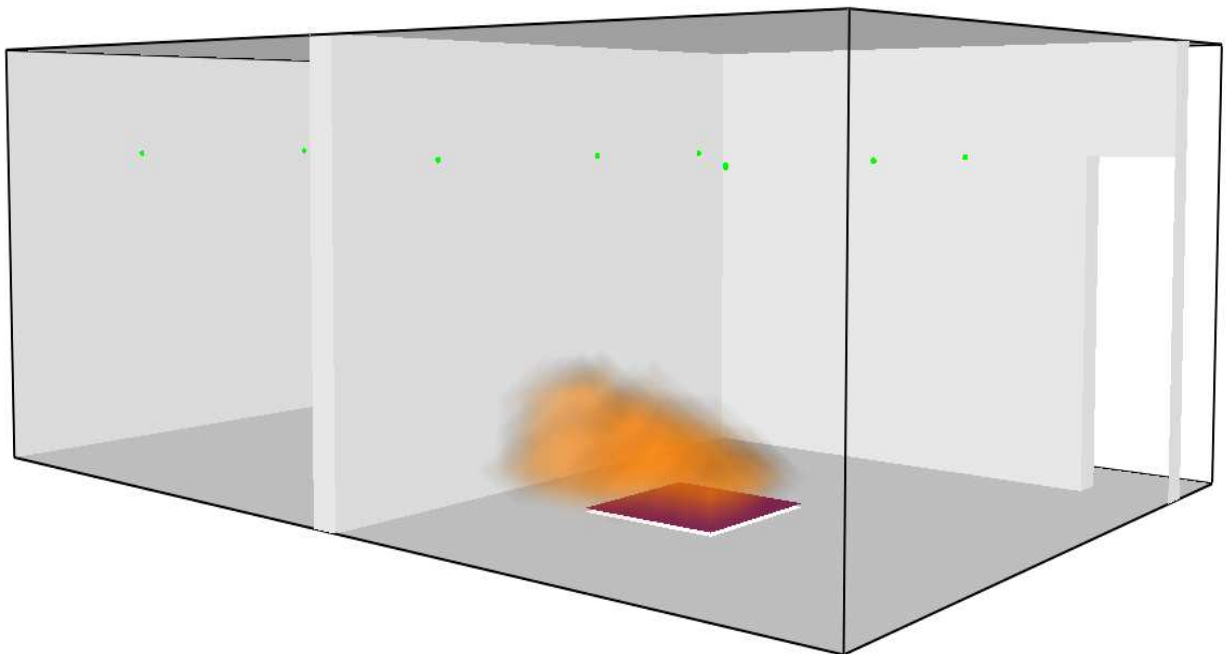
4.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΑΡΑΛΛΑΓΗΣ ΤΟΥ ΠΡΟΤΥΠΟΥ ΤΕΣΤ

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής, μελετήσαμε τη συμπεριφορά ενός διαχωριστικού τάξης B-15, με μεταβαλλόμενο πάχος μόνωσης, με τη βοήθεια του FDS (Fire Dynamics Simulator) σε έκθεση σε δύο διαφορετικές φωτιές, από την άποψη διαφορετικού ρυθμού έκλυσης θερμότητας στο περιβάλλον. Το διαχωριστικό αποτελεί μια στερεή επιφάνεια (solid surface) την οποία το FDS τη μεταχειρίζεται ως θερμική οριακή συνθήκη (thermal boundary condition) (K. Mc Grattan et al. 2006- User's Guide). Το πάχος, μαζί με άλλες ιδιότητες του υλικού που πρέπει να δηλώσουμε (πχ. Θερμική αγωγιμότητα, πυκνότητα, ειδική θερμότητα, κ.ά) παρέχουν πληροφορίες για τη συμπεριφορά του υλικού κατά τη διάρκεια της καύσης. Το FDS παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα να εισάγει ένα υλικό, το οποίο να αποτελείται από πολλά στρώματα, καθένα από τα οποία μπορεί να έχει διαφορετικές ιδιότητες, πράγμα το οποίο θα εξετάσουμε στη συνέχεια. Τα μεγέθη που αντιστοιχούν στις ιδιότητες αυτές και τα οποία αναφέραμε παραπάνω, υπεισέρχονται στις εξισώσεις που επιλύει ο κώδικας σε κάθε κελί του επιλεγμένου πλέγματος.

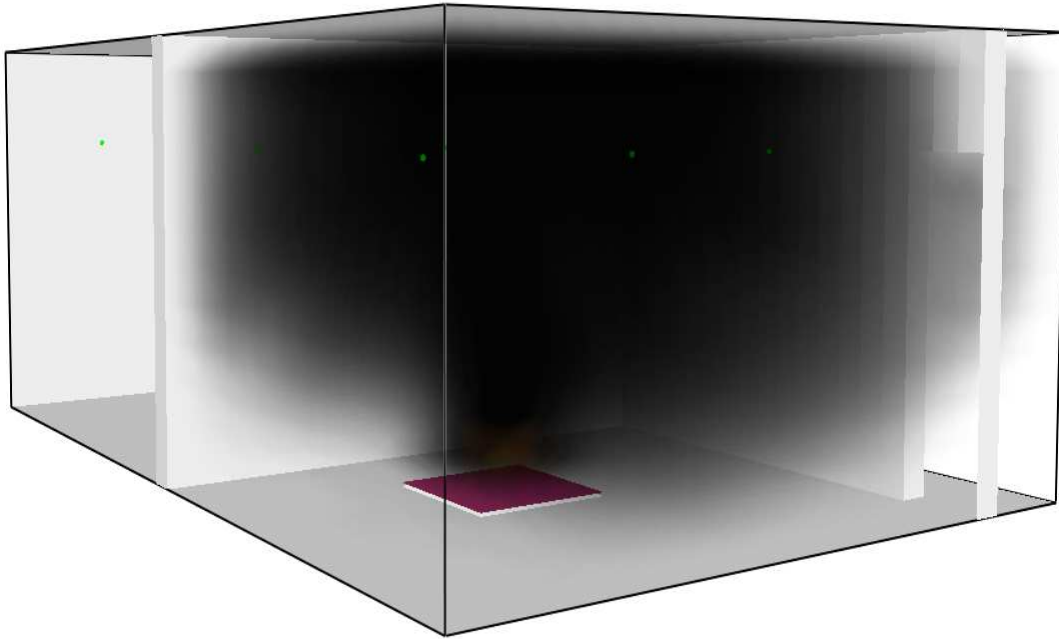
Το τεστ αυτό είναι παραλλαγή του πρότυπου τεστ, καθώς οι φωτιές που εισήχθησαν στο FDS δεν είναι οι προδιαγραφόμενες του πρότυπου fire test. Όλες οι υπόλοιπες προδιαγραφές που αφορούν τα υλικά και τις διαστάσεις ικανοποιούνται. Το διαχωριστικό έχει μελετηθεί για πάχος μόνωσης 15, 30, 45, 60 και 75 χιλιοστά. Για να προχωρήσουμε στην προσομοίωση, κατασκευάζουμε δύο διαμερίσματα, τα οποία χωρίζονται με το διαχωριστικό προς εξέταση. Το κάθε διαμέρισμα έχει μήκος 4m, πλάτος 2.7m και ύψος 2.8 m. Ο χρόνος προσομοίωσης είναι 1800 δευτερόλεπτα. Η εξεταζόμενη γεωμετρία φαίνεται στις εικόνες που ακολουθούν:



Εικόνα 4- Πρόσωση- Στιγμιότυπο πριν την έναρξη της φωτιάς



Εικόνα 5



Εικόνα 6-Απεικόνιση του καπνού

Στις δύο παραπάνω εικόνες παρατηρούμε την ύπαρξη ενός ανοίγματος προκειμένου να διαφεύγει ο καπνός και να εισέρχεται οξυγόνο ώστε να συντηρείται η καύση.

Τρία είναι τα σημαντικότερα στοιχεία που πρέπει να προσδιορίσουμε στον κώδικα: το μέγεθος του πλέγματος, τις ιδιότητες του διαχωριστικού αυτού και τις ιδιότητες της φωτιάς.

➤ **Επιλογή πλέγματος:**

Κάθε πλέγμα χωρίζεται ως γνωστόν σε ορθογωνικά κελιά, το πλήθος των οποίων εξαρτάται από την ανάλυση του πεδίου ροής. Λόγω του ότι το πρόγραμμα χρησιμοποιεί μια επίλυση Poisson η οποία βασίζεται σε Fast Fourier Transformations (FFTs) στις διευθύνσεις y και z θα πρέπει οι διαστάσεις του πλέγματος (δηλαδή το πλήθος των κελιών) στις διευθύνσεις αυτές να είναι της μορφής $2^l 3^m 5^n$, όπου l,m,n ακέραιοι. Για παράδειγμα: $64=2^6$, $72=2^3 3^2$ και $108=2^2 3^3$ είναι καλή επιλογή διαστάσεων για τις διευθύνσεις y,z.

Επιλέγουμε το πλέγμα $36 \times 24 (=2^3 3) \times 12 (=2^2 3)$, με τη βοήθεια ενός προγράμματος που ονομάζεται “mesh calculator” και διατίθεται από το ινστιτούτο NIST στην ιστοσελίδα του (www.nist.gov).

➤ **Επιλογή ιδιοτήτων διαχωριστικού τάξης B-15:**

Τα διαχωριστικά που χρησιμοποιούνται σε επιβατηγά πλοία είναι τύπου sandwich. Οπότε αποτελούνται από στρώματα. Στην εφαρμογή που εξετάζουμε εμείς, το διαχωριστικό αποτελείται από πέντε στρώματα: εξωτερικά υπάρχει επικάλυψη από PVC και από τις δύο πλευρές, ακολουθούν φύλλα (γαλβανισμένου) χάλυβα και στο μέσο έχουμε μόνωση από πετροβάμβακα. Με τον όρο ιδιότητες του διαχωριστικού εννοούμε την πυκνότητα του υλικού κάθε στρώματος, την ειδική θερμότητά του και τη θερμική αγωγιμότητά του. Προχωρούμε σε ορισμούς των μεγεθών αυτών:

- Πυκνότητα (density): Είναι το ποσό της μάζας που περιέχεται σε ορισμένο όγκο (πυκνότητα= μάζα/ όγκος). Για τις ανάγκες του κώδικα την εκφράζουμε σε kg/m^3 .
- Ειδική θερμότητα (specific heat): Είναι η θερμότητα που απαιτείται για να ανέλθει η θερμοκρασία ενός g του σώματος κατά 1 βαθμό. Για τις ανάγκες του κώδικα την εκφράζουμε σε kJ/kgK .
- Θερμική αγωγιμότητα (thermal conductivity): Είναι η ικανότητα ενός υλικού να μεταφέρει θερμότητα. Για τις ανάγκες του κώδικα την εκφράζουμε σε W/mK .

Εκτός όμως από τις ιδιότητες αυτές πρέπει να εισάγουμε τα ακόλουθα μεγέθη ώστε να μπορέσουμε να εκτελέσουμε τον κώδικα: `n_reactions`, `nu_fuel`, `reference_temperature`, `heat_of_reaction`, `heat_of combustion`.

- N_reactions: Το πλήθος των αντιδράσεων που μπορούν να υποβληθούν σ' ένα υλικό (maximum=10 reactions).
- Nu_fuel: Το ποσοστό της μάζας ενός υλικού που μετατρέπεται σε καύσιμο αέριο.
- Reference temperature: Η θερμοκρασία στην οποία το κλάσμα μάζας (mass fraction) του κάθε υλικού μειώνεται με ρυθμό $0,1 \text{ s}^{-1}$. Ως κλάσμα μάζας ορίζεται η μάζα του κάθε υλικού προς τη συνολική μάζα του μίγματος.

Heat of reaction: Το ποσό της ενέργειας που καταναλώνεται ανά μονάδα μάζας αντιδρώντος που μετατρέπεται σε κάτι άλλο.

- Heat of combustion: Η ενέργεια που ελευθερώνεται ανά μονάδα μάζας αέριου καυσίμου που αναμειγνύεται με οξυγόνο και αντιδρά.

Τη θερμοκρασία αναφοράς την χειριζόμαστε ουσιαστικά ως ιδιότητα του υλικού, καθώς είναι αυτή που καθορίζει πόσο αναφλέξιμο είναι ένα υλικό.

Για τα υπόλοιπα μεγέθη, λόγω έλλειψης πληροφοριών επιλέξαμε αυθαίρετα τιμές που ανταποκρίνονται όμως στην πραγματικότητα, διότι έχουν χρησιμοποιηθεί σε παλαιότερες προσομοιώσεις παρόμοιων εφαρμογών.

Στον πίνακα που ακολουθεί είναι συγκεντρωμένες οι ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήσαμε στην προσομοίωση. Για τα πάχη συμβουλευτήκαμε την εταιρεία Wartsila Ship Accommodation Systems (www.waskorea.co.kr), ενώ για τις θερμικές ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήσαμε, συμβουλευτήκαμε την ηλεκτρονική πηγή www.engineeringtoolbox.com

Πίνακας 1-Materials Properties (www.engineeringtoolbox.com)

Υλικό	Πάχος (t) [m]	Πυκνότητα (density) [kg/m ³]	Αγωγιμότητα (thermal conductivity) [W/mK]	Ειδική θερμότητα (specific heat) [kJ/kg K]	Θερμοκρασία αναφοράς (Reference temperature) [C]
Επικάλυψη από PVC	0,0005x2	1300,00	0,19	0,900	750
Γαλβανισμένος χάλυβας (galvanized steel)	0,0006x2	7800	78,75	0,465	- (*)
Πετροβάμβακας (mineralwool)	Δοκιμές για πάχη: 15,30,45,60,75	129,00	0,041	0,750	750

(*): Δεν είναι αναγκαίο να δηλώσουμε τη θερμοκρασία αναφοράς για το χάλυβα, καθώς την έχουμε δηλώσει για τα στρώματα εκατέρωθεν αυτού.

Σημειώνεται ότι ο γαλβανισμένος χάλυβας είναι χάλυβας εμβαπτισμένος σε ψευδάργυρο (zinc). Μέσω της διαδικασίας αυτής ο χάλυβας αποκτά καλές αντιδιαβρωτικές ιδιότητες και χρησιμοποιείται ευρέως στην κατασκευή πλοίων. Οπότε ο γαλβανισμένος χάλυβας έχει ιδιότητες και χάλυβα και ψευδάργυρου. Επειδή όμως ο ψευδάργυρος δεν αποτελεί απλώς ένα εξωτερικό στρώμα, αλλά σχηματίζει δεσμούς στο εσωτερικό με τα μόρια του χάλυβα, θεωρούμε ότι όλα τα μεγέθη που χρειαζόμαστε και που φαίνονται στον παραπάνω πίνακα προκύπτουν ως μέσος όρος αυτών του χάλυβα και αυτών του ψευδαργύρου.

Η εισαγωγή των θερμοκρασιών στον κώδικα γίνεται με βαθμούς Κελσίου. Όμως προκειμένου ο κώδικας να λύσει τις κατάλληλες εξισώσεις μετατρέπει τους βαθμούς Κελσίου σε βαθμούς Kelvin.

➤ **Επιλογή ιδιοτήτων φωτιάς:**

Στο πρόγραμμα που θα χρησιμοποιήσουμε για την υλοποίηση του κώδικα (FDS) υπάρχουν δύο τρόποι δημιουργίας φωτιάς:

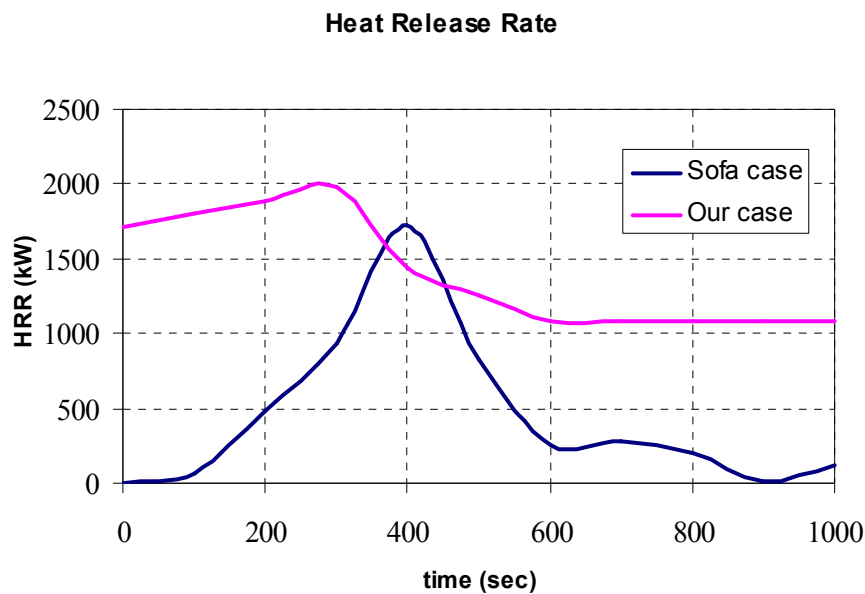
1. Μέσω εισαγωγής του ρυθμού έκλυσης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (HRRPUA=Heat Release Rate Per Unit Area).
2. Μέσω εισαγωγής του μεγέθους `heat_of_reaction` και ορισμένων άλλων θερμικών παραμέτρων, για το οποίο έχει δοθεί ορισμός παραπάνω.

Σημειώνεται ότι είτε επιλέξουμε τον πρώτο τρόπο, είτε τον δεύτερο για να δημιουργήσουμε φωτιά χρησιμοποιούμε το μοντέλο κλάσματος μίγματος. Η βασική ιδέα βασίζεται στην υπόθεση ότι η καύση είναι ελεγχόμενη από το βαθμό ανάμιξης και ότι η αντίδραση καυσίμου και οξυγόνου είναι απείρως γρήγορη. Τα κλάσματα μάζας από όλα τα κυριότερα αντιδρώντα και προϊόντα μπορούν να συναχθούν από το συνολικό κλάσμα μίγματος. Το μοντέλο καύσης κλάσματος μίγματος το οποίο χρησιμοποιείται στον κώδικα FDS βασίζεται στην παραδοχή ότι φαινόμενα μεταφοράς από συναγωγή και ακτινοβολία τα οποία είναι μεγάλης κλίμακας μπορούν να προσομοιωθούν απευθείας, αλλά οι φυσικές διεργασίες οι οποίες συμβαίνουν σε μικρές κλίμακες μήκους και χρόνου πρέπει να αναπαρασταθούν με έναν προσεγγιστικό τρόπο.

Επιλέγουμε να δημιουργήσουμε τις δυο διαφορετικές πηγές θερμότητας με τον πρώτο τρόπο, δηλώνοντας δηλαδή ως input μεταβλητή το μέγεθος HRRPUA, καθώς δε γνωρίζουμε λεπτομέρειες για τον τρόπο που εξελίσσεται η καύση. Παράλληλα, εισάγουμε μια αντίδραση προκειμένου να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο η πολυουρεθάνη.

Επιλογή του μεγέθους HRRPUA:

1. Και για τις δυο φωτιές χρησιμοποιήσαμε συναρτήσεις ramp προκειμένου να περιγράψουμε την εξέλιξή τους με το χρόνο. Η μια φωτιά επιλέχθηκε από εμάς, ενώ η άλλη αντιστοιχεί στον τρόπο καύσης ενός καναπέ. Στη γραφική παράσταση που ακολουθεί φαίνεται ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας των δύο εστιών:



Διάγραμμα 2

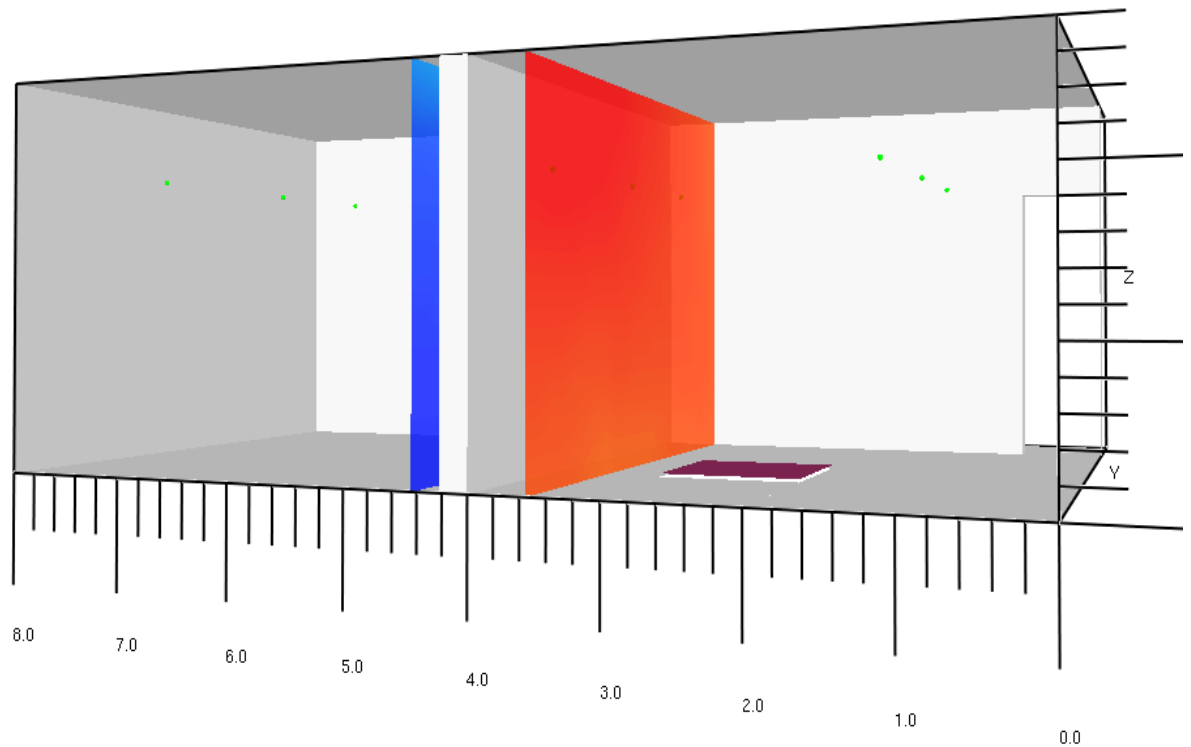
Η σημαντικότερη διαφορά που παρατηρούμε είναι ότι η εστία της δικής μας εκδοχής έχει εξ αρχής υψηλό ρυθμό έκλυσης θερμότητας, ενώ η εστία που αντιστοιχεί στον καναπέ παρουσιάζει αρχικά μικρότερο ρυθμό έκλυσης θερμότητας, ο οποίος έπειτα παρουσιάζει κορύφωση και μετά αρχίζει πάλι να μειώνεται. Η επιλογή αυτή έγινε, με στόχο τη γρήγορη εξέλιξη του φαινομένου.

Τέλος, σημειώνεται ότι έχουμε επιλέξει όλοι οι τοίχοι (εκτός του διαχωριστικού προς εξέταση) να έχουν πολύ μεγάλη μόνωση, δηλαδή πολύ μικρή αγωγιμότητα, ώστε να μην υπάρχει διαφυγή της παραγόμενης θερμότητας από πουθενά.

Χρησιμοποιώντας λοιπόν ως input τις παραπάνω γραφικές παράστασεις και τις ιδιότητες των υλικών από τα οποία αποτελείται το διαχωριστικό που θέλουμε να υποβάλλουμε στο τεστ προχωρούμε στα αποτελέσματα. Ο κώδικας παρατίθεται στο παράρτημα του κεφαλαίου αυτού.

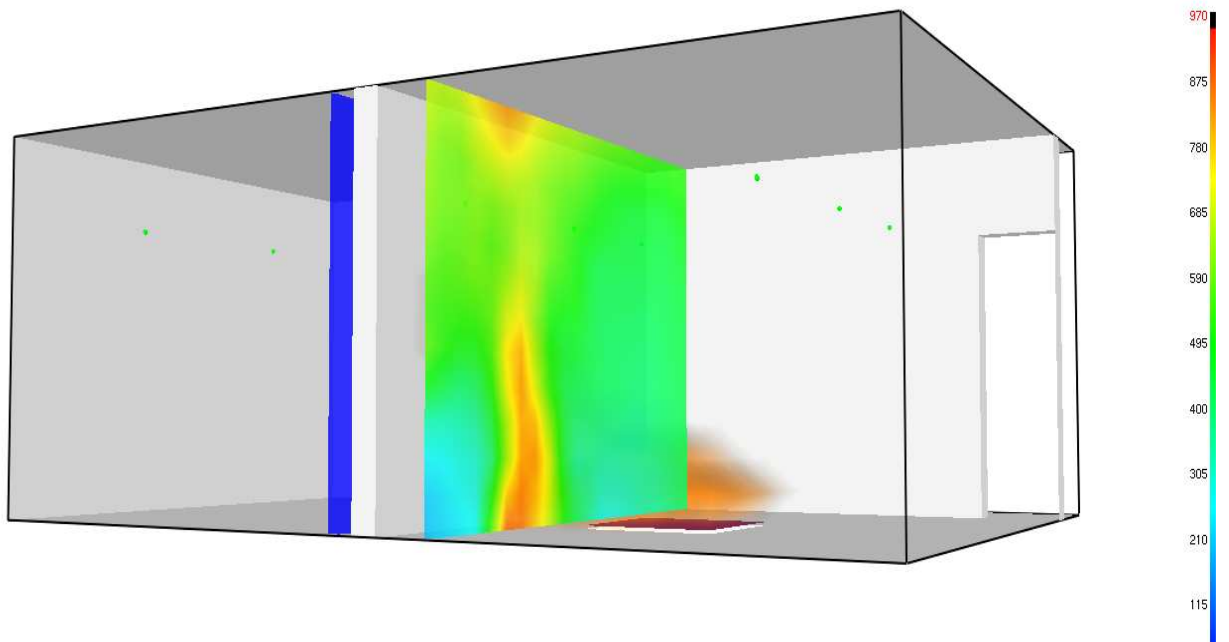
4.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Προκειμένου να έχουμε καλύτερη αίσθηση των αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών έχουμε εισαγάγει εγκάρσια επίπεδα, όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί:



Εικόνα 7-Επίπεδα όπου μετράμε τις αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες

Τα επίπεδα αυτά βρίσκονται κατά τον άξονα x όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα στις θέσεις $x=1.2$, $x=3.6$, (πλευρά φωτιάς- exposed side), $x=4.5$ (μη εκτεθειμένη πλευρά- unexposed side) και $x=7$. Από δω και στο εξής, όταν αναφερόμαστε σε θερμοκρασία θα εννοούμε τη μέση θερμοκρασία που αντιστοιχεί σε κάθε επίπεδο και έχει προκύψει ως μέσος όρος των θερμοκρασιών στις θέσεις $y=1.2$, 2.3 και 4.2 m για $z=2.1$ m (ύψος που αντιστοιχεί στη μέση του δωματίου) για κάθε θέση x.

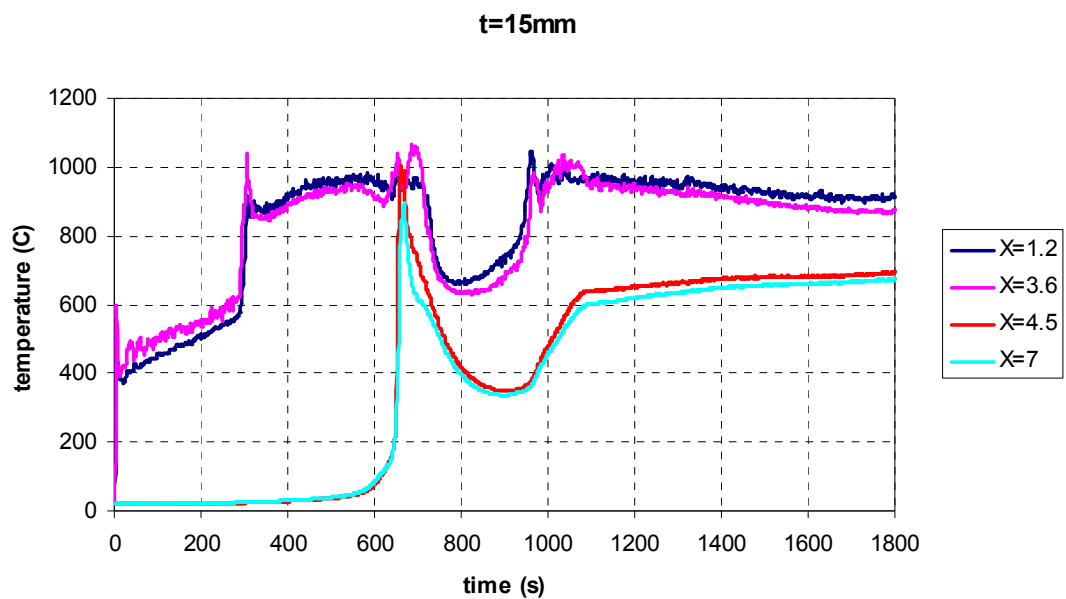


Εικόνα 8-Κατανομή θερμοκρασιών

4.3.1 ΔΙΚΗ ΜΑΣ ΕΣΤΙΑ (OUR CASE)

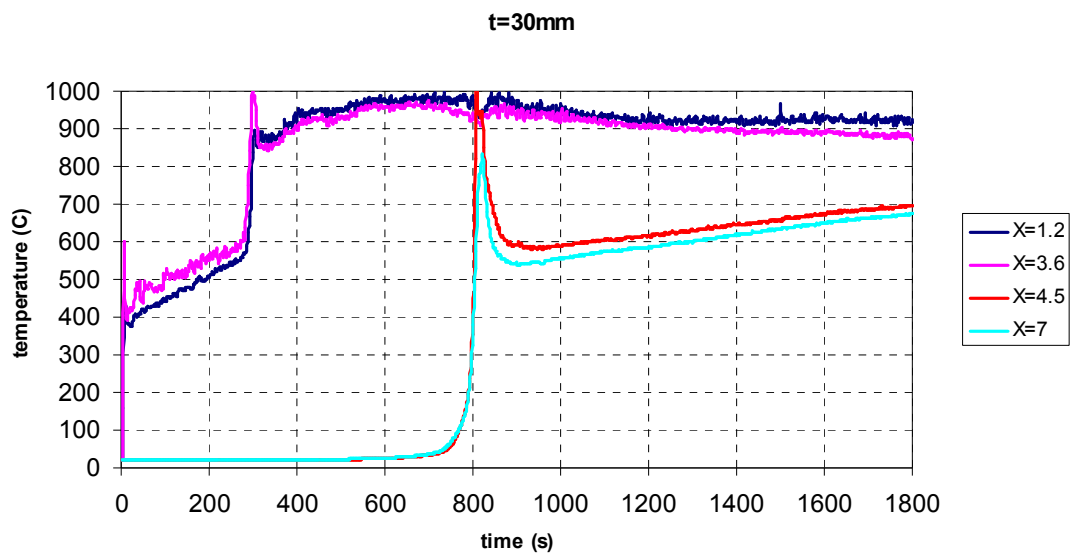
Για την περίπτωση της δικιάς μας εστίας, οι αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες για κάθε πάχος σε όλες τις θέσεις που έχουμε ορίσει διαμορφώνονται ως εξής:

- Για πάχος μόνωσης 15mm:



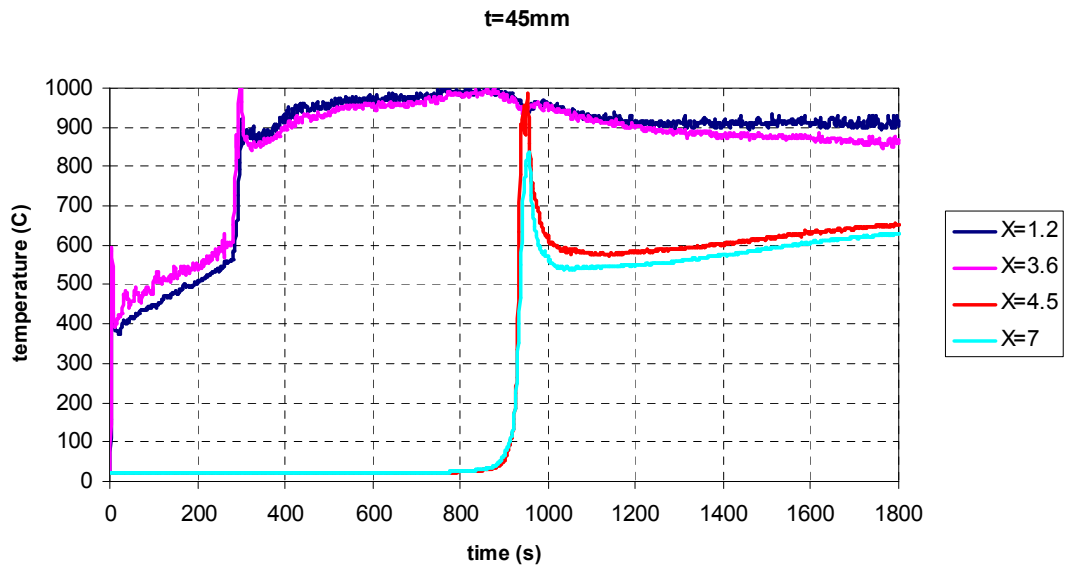
Διάγραμμα 3

➤ Για πάχος μόνωσης 30mm:



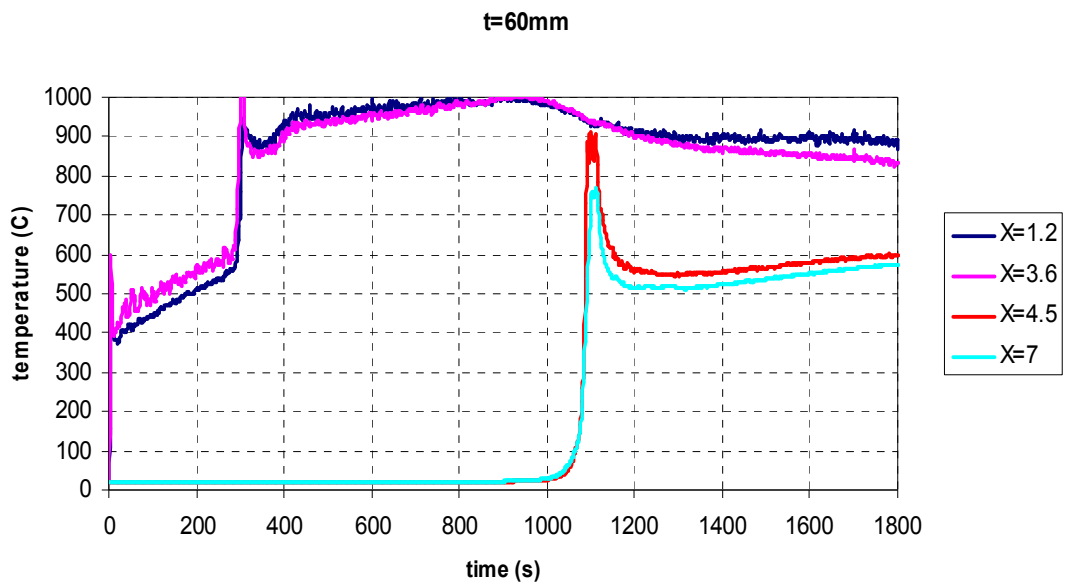
Διάγραμμα 4

➤ Για πάχος μόνωσης 45mm:



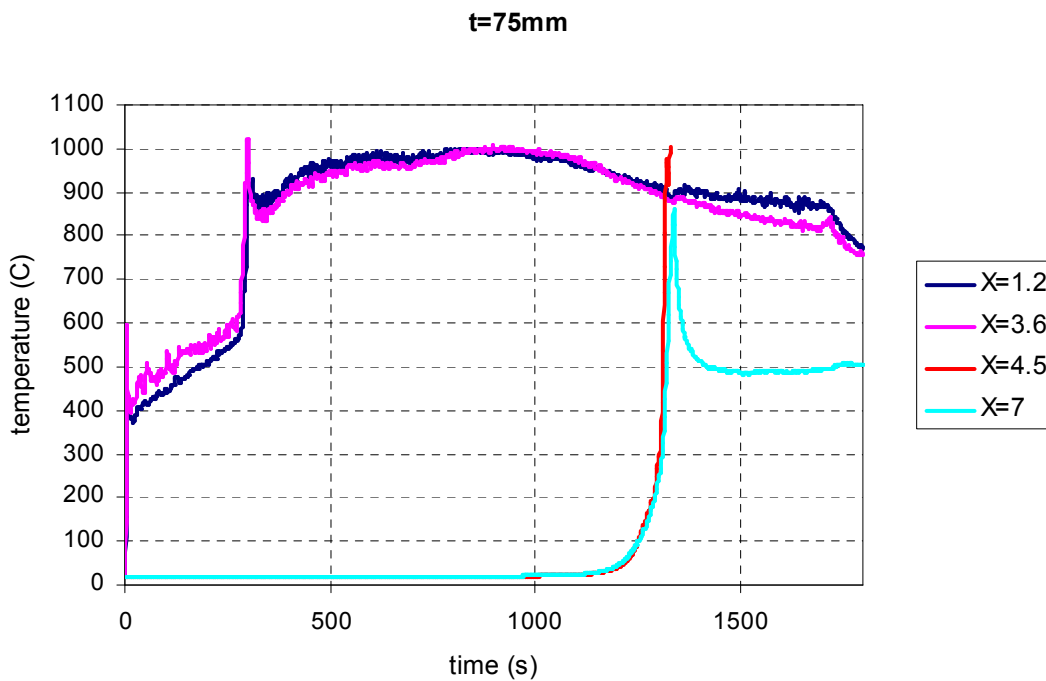
Διάγραμμα 5

➤ Για πάχος μόνωσης 60mm:



Διάγραμμα 6

➤ Για πάχος μόνωσης 75mm:

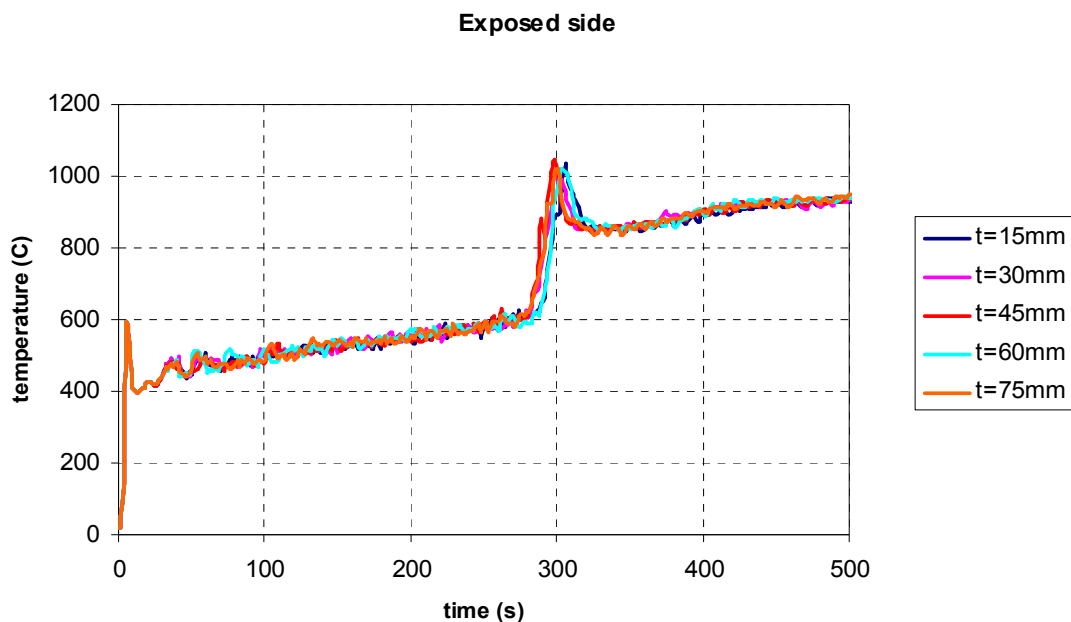


Διάγραμμα 7

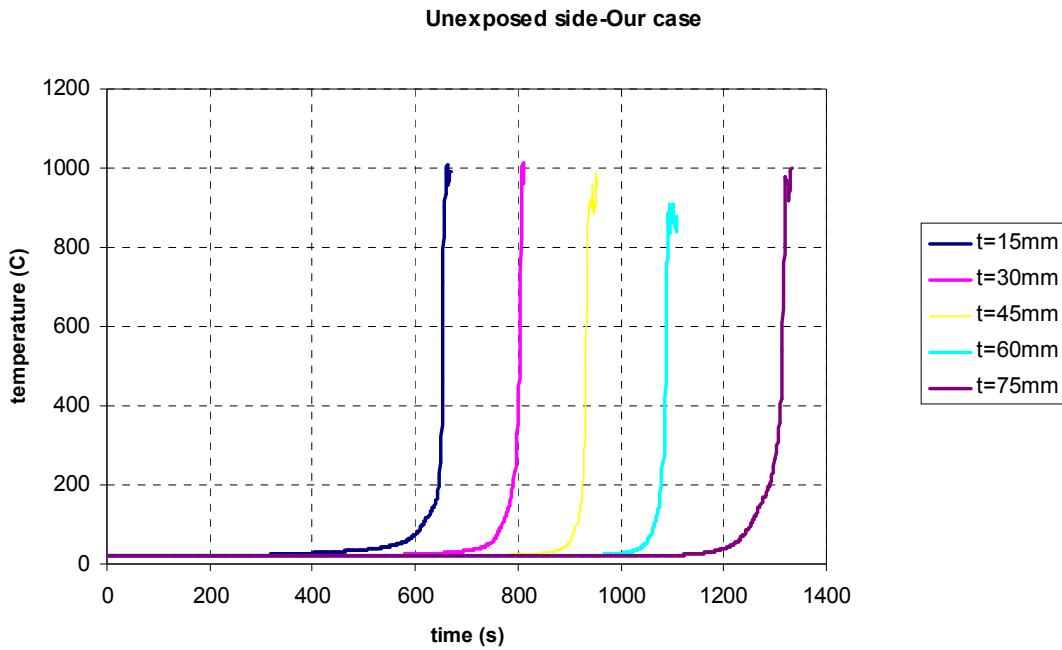
Παρατηρούμε ότι όλες οι καμπύλες παρουσιάζουν μια κορυφή γύρω στους 900 βαθμούς Κελσίου. Η κορυφή αυτή αντιστοιχεί στο σημείο όπου γίνεται **πλήρης**

ανάφλεξη (flash over), δηλαδή μετάβαση από το στάδιο ανάπτυξης της φωτιάς κατά το οποίο η μέση θερμοκρασία του χώρου είναι σχετικά χαμηλή και η πυρκαγιά περιορίζεται κοντά στην πηγή της στο στάδιο της πλήρους ανάπτυξης της φωτιάς, κατά το οποίο όλα τα καύσιμα αντικείμενα μέσα στο χώρο έχουν αρχίσει να καίγονται και οι φλόγες εμφανίζονται να καλύπτουν όλο το χώρο. Αποτελεί ένα φαινόμενο το οποίο φοβίζει ιδιαίτερα τους πυροσβέστες. Προφανώς, το φαινόμενο αυτό αποτυπώνεται σε όλα τα διαγράμματα που έχουν να κάνουν με θερμοκρασία.

Επειδή οι θέσεις που μας ενδιαφέρουν κυρίως είναι αυτές εκατέρωθεν της φρακτής (δηλαδή οι θέσεις $x=3.6$ και $x=4.5$) προχωρούμε στη συγκεντρωτική παρουσίαση των αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών για τα διάφορα πάχη στις θέσεις αυτές:



Διάγραμμα 8



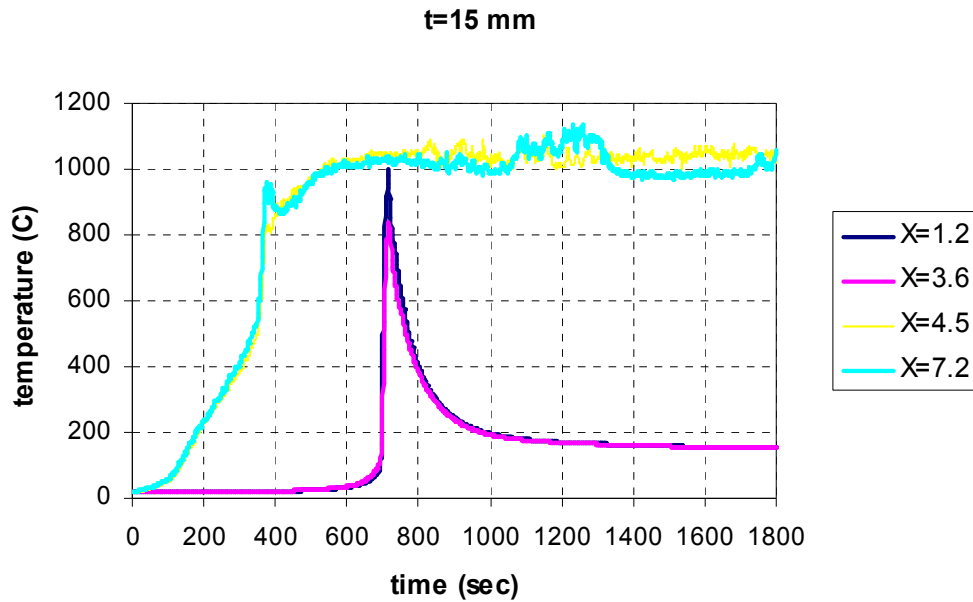
Διάγραμμα 9

Η σημαντικότερη παρατήρηση που μπορεί να γίνει από τα διαγράμματα 8 και 9 είναι το ότι στην εκτεθειμένη πλευρά έχουμε πλήρη ανάφλεξη γύρω στα 330 sec από την έναρξη της προσομοίωσης, ανεξαρτήτως πάχους μόνωσης ενώ στην μη εκτεθειμένη πλευρά ο χρόνος πλήρους ανάφλεξης εξαρτάται από το πάχος. Ειδικότερα, όσο αυξάνεται το πάχος της μόνωσης, αυξάνεται και ο χρόνος πλήρους ανάφλεξης, πράγμα που ήταν αναμενόμενο.

4.3.2 ΕΣΤΙΑ ΠΟΥ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΕΙ ΣΕ ΚΑΥΣΗ ΚΑΝΑΠΕ

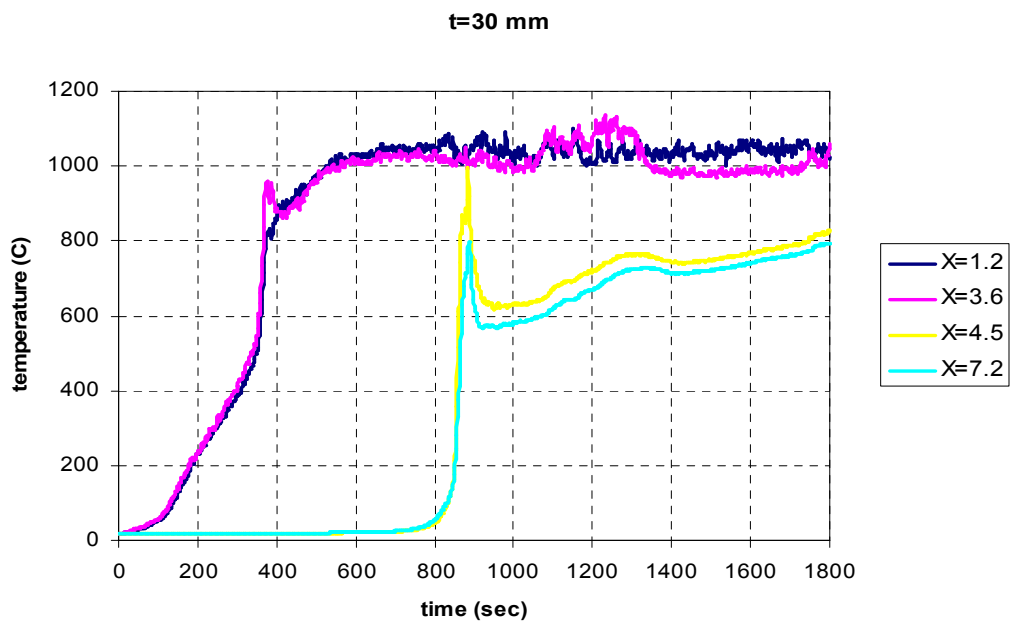
Σχετικά με τη φωτιά που αντιστοιχεί στον **καναπέ**, μπορούμε να κατασκευάσουμε ομοίως τα ακόλουθα διαγράμματα:

➤ Για πάχος μόνωσης 15mm:



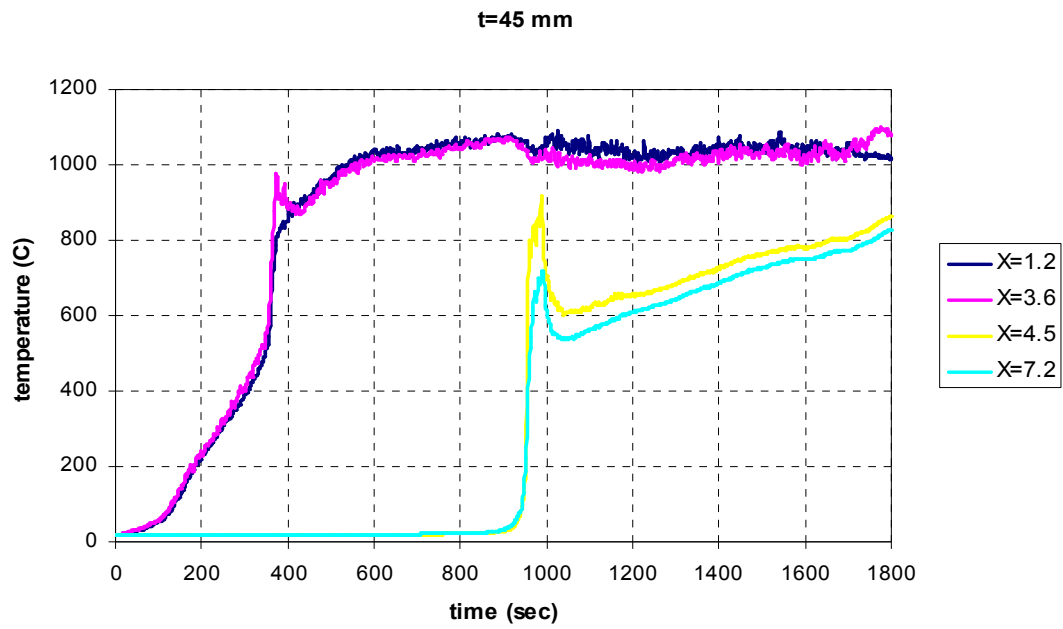
Διάγραμμα 10

➤ Για πάχος μόνωσης 30mm:



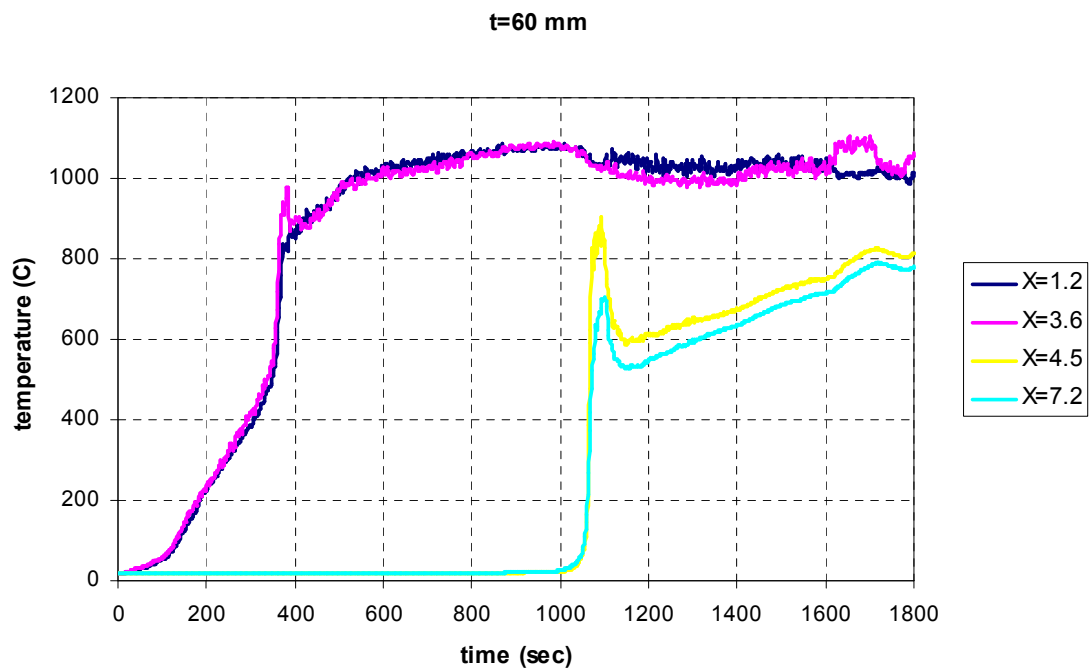
Διάγραμμα 11

➤ Για πάχος μόνωσης 45mm:



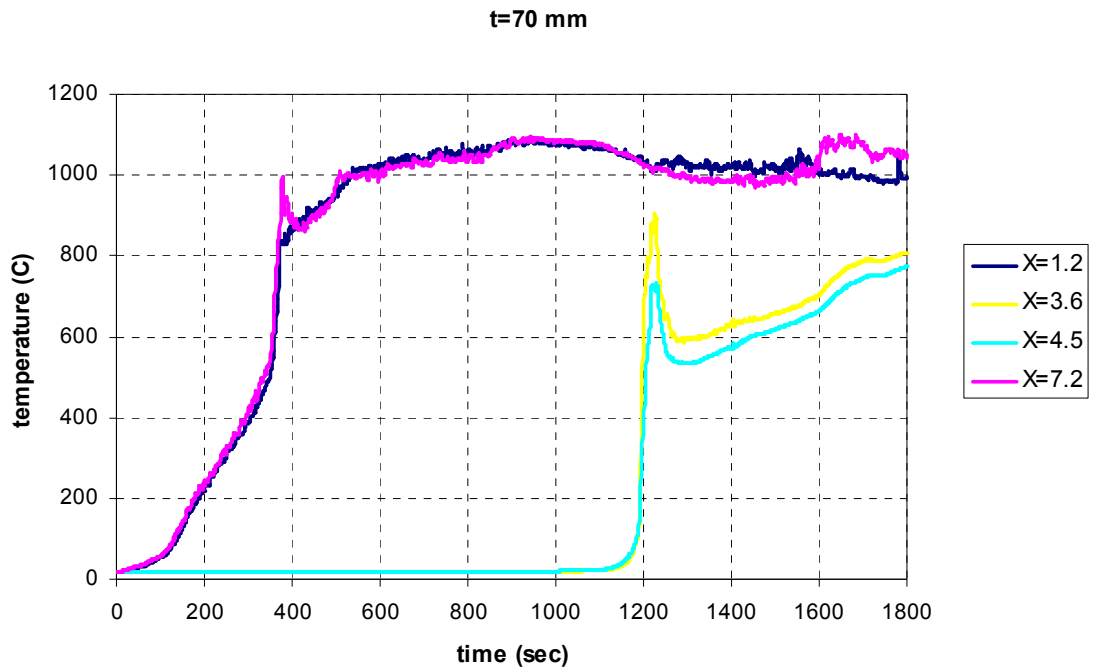
Διάγραμμα 12

➤ Για πάχος μόνωσης 60mm:



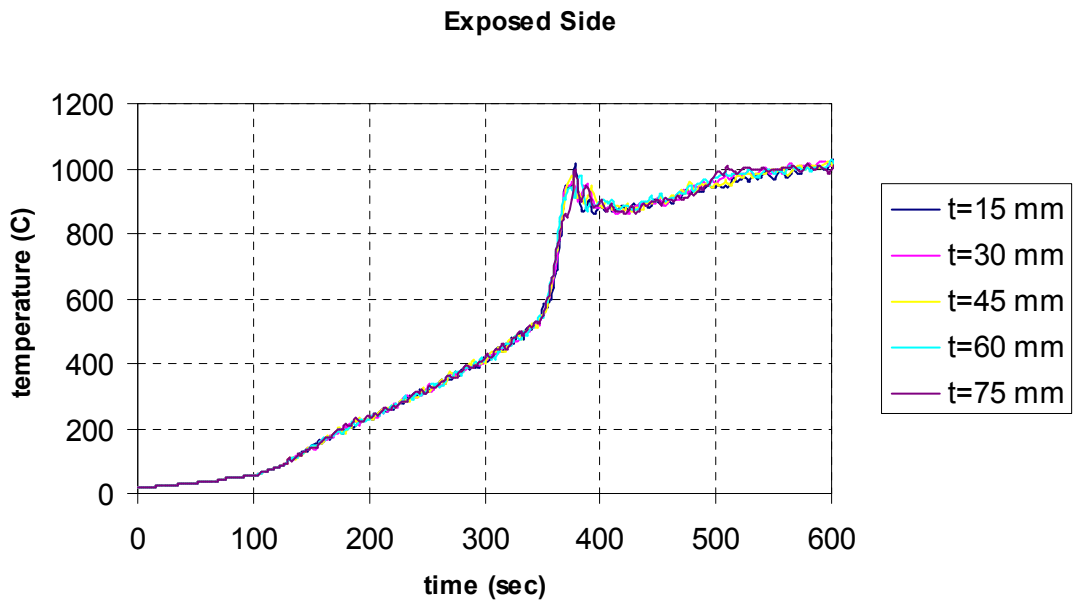
Διάγραμμα 13

➤ Για πάχος μόνωσης 75mm:

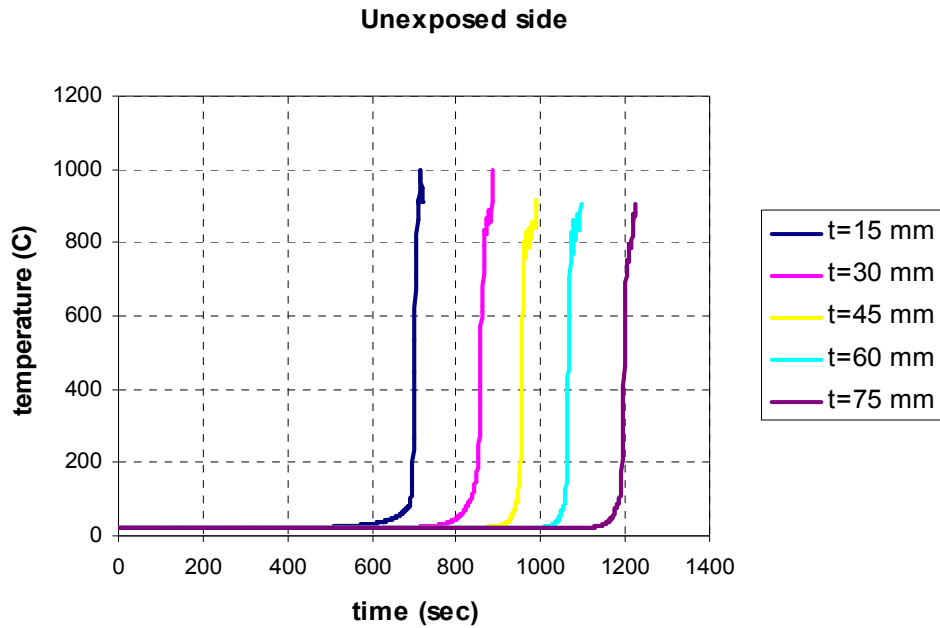


Διάγραμμα 14

Συγκεντρωτικά μπορούμε να εξάγουμε τα ακόλουθα διαγράμματα για την εκτεθειμένη και την μη εκτεθειμένη πλευρά:



Διάγραμμα 15



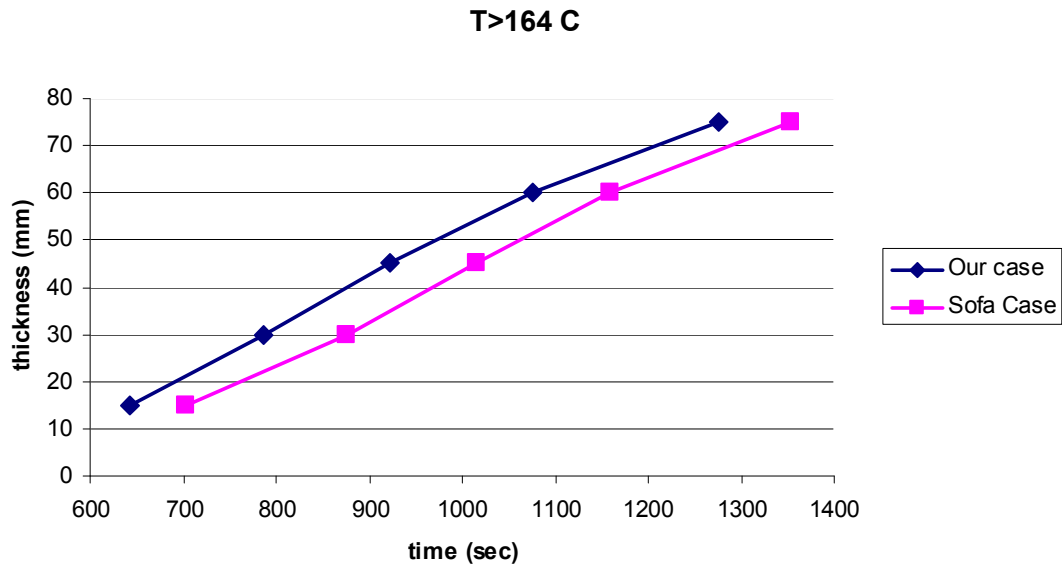
Διάγραμμα 16

Από τα δύο παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι στην εκτεθειμένη πλευρά, ο χρόνος πλήρους ανάφλεξης είναι 380 δευτερόλεπτα από την έναρξη της προσομοίωσης και είναι σχεδόν ίδιος για όλα τα πάχη. Για τη μη εκτεθειμένη πλευρά, ισχύει ότι και πριν. Δηλαδή ο χρόνος πλήρους ανάφλεξης μειώνεται με την αύξηση του πάχους.

4.4 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ- ΣΥΓΚΡΙΣΗ

Επειδή όμως αυτό που μας ενδιαφέρει περισσότερο δεν είναι ο χρόνος πλήρους ανάφλεξης, αλλά ο χρόνος στον οποίο ξεπερνιέται μια κρίσιμη θερμοκρασία (π.χ. για το πρότυπο fire test αυτή η θερμοκρασία είναι 139°C για τη μη εκτεθειμένη επιφάνεια πάνω από την αρχική θερμοκρασία) θα προσπαθήσουμε να δούμε τι ρόλο παίζει το πάχος στην υπέρβαση της θερμοκρασίας αυτής. Επιλέγουμε η κρίσιμη αυτή θερμοκρασία να είναι ίση προς 164 βαθμούς Κελσίου.

Σημειώνεται ότι πήραμε ως δεδομένο (από το εγχειρίδιο χρήσης του FDS) ότι η αρχική θερμοκρασία της επιφάνειας είναι 25⁰ C. Ακολουθεί το συγκεντρωτικό διάγραμμα και για τους δυο τύπους εστιών για τη μη εκτεθειμένη επιφάνεια (x=4.5m):

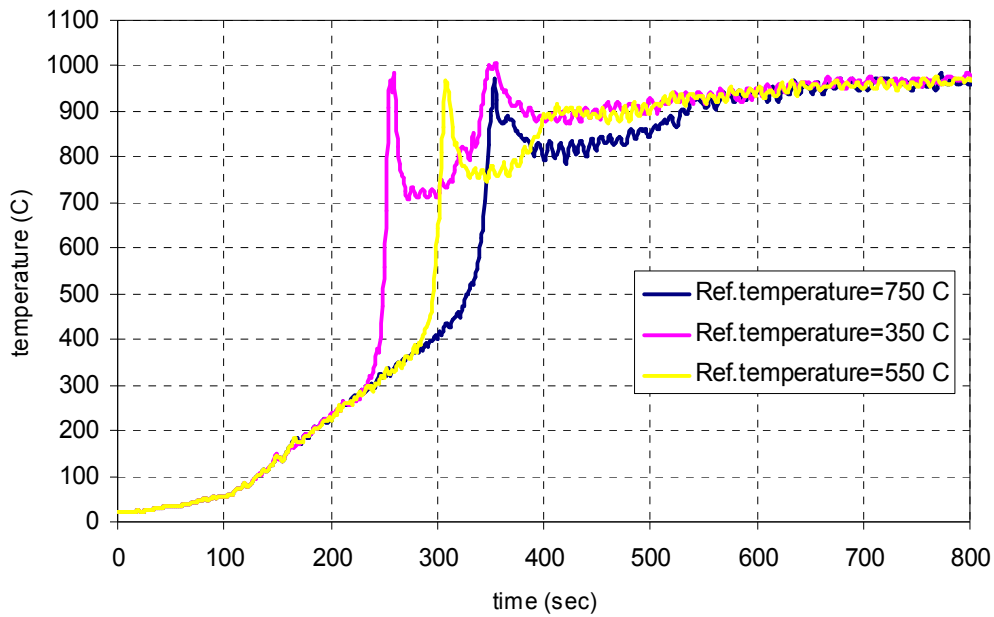


Διάγραμμα 17

4.5 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ (REFERENCE TEMPERATURE) ΣΤΙΣ ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΜΕΝΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.

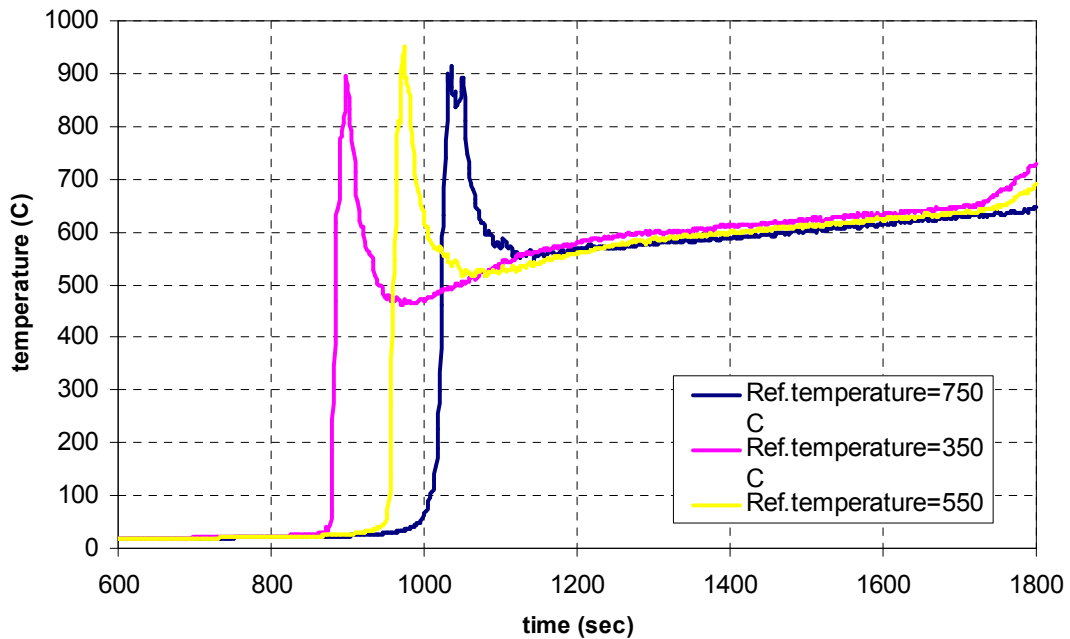
Για να δούμε πως επηρεάζει η θερμοκρασία αναφοράς (reference temperature) τις αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες, θα προχωρήσουμε μελετώντας την αρχική επικάλυψη του διαχωριστικού υπό μελέτη (από PVC) για δύο διαφορετικές θερμοκρασίες αναφοράς: 350 και 550 βαθμούς Κελσίου. Σημειώνεται ότι η αρχική προσομοίωση είχε γίνει για θερμοκρασία αναφοράς της επικάλυψης 750° C. Ουσιαστικά μειώνοντας τη θερμοκρασία αναφοράς, κάνουμε την επικάλυψη πιο εύφλεκτη. Για τη μελέτη αυτή, χρησιμοποιήσαμε πάλι την εστία που αντιστοιχεί στον καναπέ και δε μεταβάλλαμε τις ιδιότητες του διαχωριστικού πάχους 45mm. Ακολουθεί το συγκεντρωτικό διάγραμμα για θερμοκρασίες αναφοράς 350, 550 και 750 βαθμούς και για τις δύο επιφάνειες (εκτεθειμένη και μη εκτεθειμένη στη φωτιά):

Temperatures at the exposed side



Διάγραμμα 18

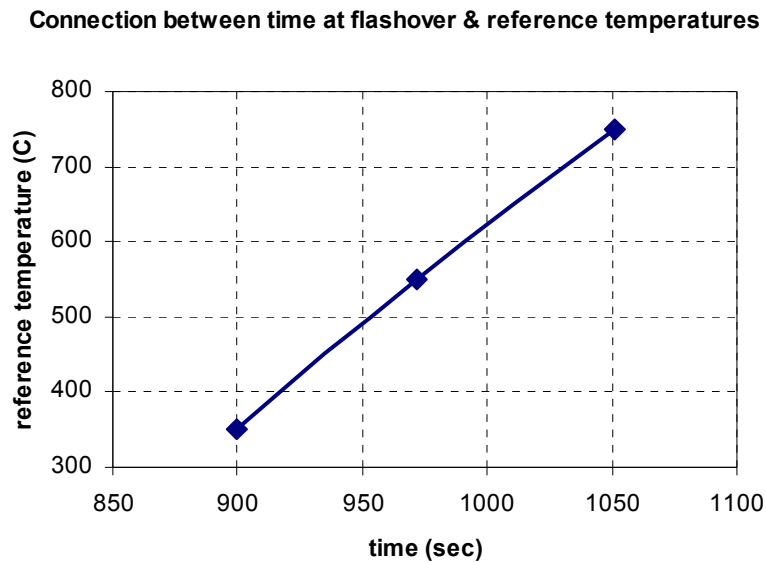
Temperatures at the unexposed side



Διάγραμμα 19

Το συμπέρασμα που εξάγεται από τα δύο παραπάνω διαγράμματα είναι ότι η θερμοκρασία αναφοράς επηρεάζει –όπως ήταν αναμενόμενο- τις αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες. Ειδικότερα, για την εκτεθειμένη επιφάνεια, μικρότερη θερμοκρασία

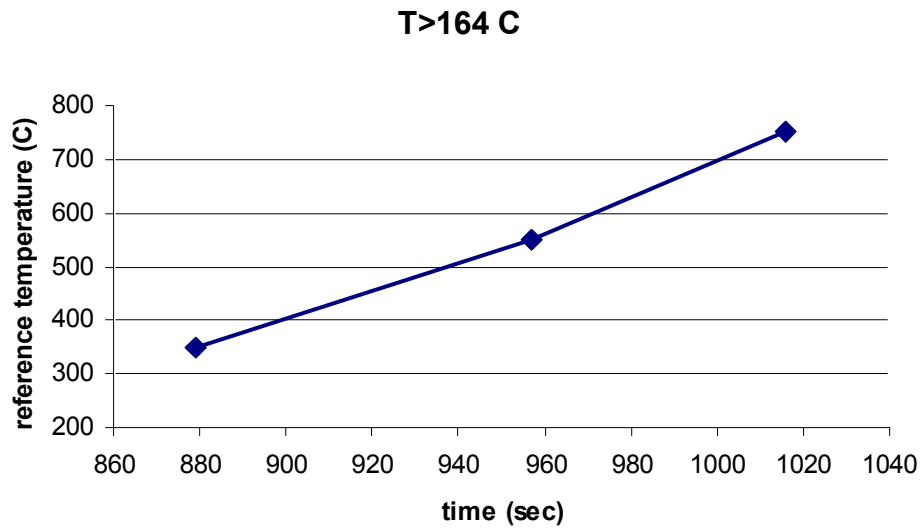
αναφοράς συνεπάγεται υψηλότερες θερμοκρασίες και μικρότερο χρόνο πλήρους ανάφλεξης. Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνεται πως σχετίζονται οι θερμοκρασίες αναφοράς με το χρόνο όπου συμβαίνει πλήρης ανάφλεξη:



Διάγραμμα 20

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι η σχέση που συνδέει τη θερμοκρασία αναφοράς με το χρόνο πλήρους ανάφλεξης είναι αναλογική. Όταν αυξάνεται το ένα μέγεθος, αυξάνεται και το άλλο.

Ας δούμε τώρα πότε ακριβώς ξεπερνιέται η θερμοκρασία των 164°C για καθε θερμοκρασία αναφοράς στην μη εκτεθειμένη επιφάνεια:



Διάγραμμα 21

Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασία αναφοράς, αυξάνεται και ο χρόνος υπέρβασης των 164 βαθμών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο :

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΟΥ CFAST ΚΑΙ ΤΟΥ FDS- ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ ΔΩΜΑΤΙΟΥ & ΔΙΑΔΡΟΜΟΥ ΜΕΓΑΛΟΥ ΜΗΚΟΥΣ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

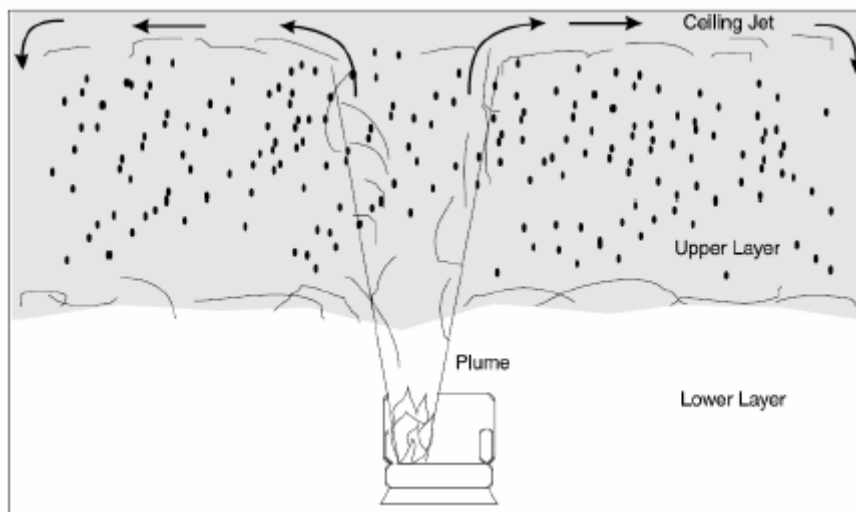
Στην ενότητα αυτή θα συγκρίνουμε ένα διζωνικό μοντέλο –το CFAST (Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport) - με ένα πολυζωνικό μοντέλο –το FDS (Fire Dynamics Simulator)- προσομοιάζοντας φωτιά σ' ένα δωμάτιο ακολουθούμενο από διάδρομο μεγάλου μήκους. Δεδομένης προηγούμενης προσομοίωσης με το CFAST, όπου παρατηρήθηκαν αδυναμίες στην περιγραφή των φαινομένων στο διάδρομο θα προσπαθήσουμε να δούμε τώρα τις διαφορές του με το FDS. Η σύγκριση αυτή θα γίνει μέσω της καταγραφής των χρονικών ιστοριών μεγεθών όπως είναι η θερμοκρασία, η ορατότητα, το οξυγόνο και το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) σε διάφορα σημεία- στόχους που καλύπτουν κατά μήκος και καθ' ύψος όλη την εξεταζόμενη γεωμετρία.

5.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΔΥΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Τα δύο μοντέλα που θα χρησιμοποιήσουμε αντιπροσωπεύουν την υπάρχουσα κατάσταση προόδου στη μοντελοποίηση της πυρκαγιάς, βρίσκονται σε διαρκή εξέλιξη υπό την εποπτεία του NIST (National Institute of Standards and Technology, USA) και ελέγχονται από την επιστημονική κοινότητα και από πολυάριθμους χρήστες σε διεθνές επίπεδο.

Το CFAST αναπτύχθηκε από το εργαστήριο έρευνας φωτιάς σε κτίριο (Building and fire research laboratory) του ινστιτούτου NIST με σκοπό να παρέχει στους ερευνητές και στους ειδικούς για προστασία έναντι φωτιάς, ένα σχετικά εύκολο στη χρήση κώδικα με μικρές απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ που μπορεί να προβλέπει τις επιπτώσεις της φωτιάς στο εσωτερικό ενός κτιρίου (J. Floyd, 2002). Το πρόγραμμα αυτό κυκλοφόρησε το 1990 και η τελευταία του έκδοση είναι η 4.0.1. Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, το CFAST είναι ένα διζωνικό μοντέλο στο οποίο κάθε δωμάτιο χωρίζεται σε δύο στρώματα, ένα ανώτερο και ένα κατώτερο. Φωτιές προερχόμενες από

το κατώτατο στρώμα παρασέρνουν αέρα σε μια στήλη καπνού και μεταφέρουν θερμότητα και μάζα στο ανώτερο στρώμα, όπως φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί:



Εικόνα 9- Βασικοί όροι διζωνικού μοντέλου (W.W. Jones, R.D. Richard et al. 2005-Technical Reference Guide)

Προφανώς καθώς προχωράει ο χρόνος, μεγαλώνει και το ανώτερο στρώμα, καθώς όλο και περισσότερη μάζα διοχετεύεται σ' αυτό. Ως στοιχεία εισόδου παρέχονται πληροφορίες για τη γεωμετρία της κατασκευής, τις ιδιότητες υλικών κατασκευής, τις συνδέσεις των διαμερισμάτων (πόρτες, παράθυρα, ανοίγματα, κλπ), μέγεθος αρχικής πυρκαγιάς και προϊόντα πυρκαγιάς ως συνάρτηση του χρόνου, προδιαγραφές για τους ανιχνευτές, τους ψεκαστήρες, αντικείμενα στόχους της πυρκαγιάς- targets (θέση, μέγεθος, χαρακτηριστικά μετάδοσης θερμότητας και χαρακτηριστικά ροής), κ.ά. Οι εξισώσεις διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται στο CFAST λαμβάνουν τη μαθηματική μορφή ενός συστήματος αρχικών τιμών για ένα σύστημα συνήθων διαφορικών εξισώσεων (Ordinary Differential Equations- ODEs). Αυτές οι εξισώσεις προκύπτουν από τη διατήρηση μάζας και ενέργειας (πρώτο θερμοδυναμικός νόμος), νόμου τελείων αερίων και σχέσεων πυκνότητας και εσωτερικής ενέργειας. Μέσω των εξισώσεων αυτών υπολογίζονται ως χρονικές ιστορίες μεγέθη όπως θερμοκρασίες, πιέσεις, ύψη ζωνών(W.W. Jones, R.D. Richard et al. 2005-User's Guide).Ως στοιχεία εξόδου λαμβάνονται οι μεταβλητές που απαιτούνται για την αξιολόγηση των συνθηκών στο χώρο που έχουμε μοντελοποιήσει, δηλαδή: οι θερμοκρασίες των ανώτερων και κατώτερων ζωνών σε κάθε διαμέρισμα, συγκεντρώσεις αερίων μέσα σε κάθε στρώμα, θερμοκρασίες στόχων και χρονικές στιγμές ενεργοποίησης ψεκαστήρων.

Όσο αφορά το FDS αναπτύχθηκε κι αυτό από το ινστιτούτο NIST. Είναι ένα πρόγραμμα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής γραμμένο σε FORTRAN, το οποίο λύνει εξισώσεις που περιγράφουν την εξέλιξη της φωτιάς (K. Mc Grattan et al. 2006- User's Guide). Διαβάζει τις παραμέτρους από ένα αρχείο .txt, υπολογίζει μια αριθμητική λύση για τις κατάλληλες εξισώσεις και στα αρχεία output και τέλος εξάγει τα αποτελέσματα που έχει επιλέξει ο χρήστης. Για να διευκολυνθεί η διαδικασία εισαγωγής των παραμέτρων, έχει αναπτυχθεί από το NIST το πρόγραμμα PYROSIM, το οποίο είναι πιο φιλικό προς το χρήστη και επιτρέπει τη σχηματική δημιουργία της εξεταζόμενης γεωμετρίας (χωρίς χρήση εντολών) (NIST website). Στο FDS, η περιοχή ενδιαφέροντος (π.χ οι ενδαιτήσεις ενός πλοίου) χωρίζεται σε πολλά μικρά κελιά- μικρούς όγκους ελέγχου. Η ανταλλαγή πλήθους παραμέτρων μεταξύ κάθε κελιού και των περιβάλλοντων κελιών καθορίζεται από ένα πλήθος εξισώσεων που προκύπτουν από θεμελιώδεις νόμους της φύσης, όπως είναι η διατήρηση μάζας, ορμής, ενέργειας και η μεταφορά ενέργειας μέσω ακτινοβολίας. Οι εξισώσεις αυτές έχουν τη μορφή μερικών διαφορικών εξισώσεων (partial differential equations) (S.A. Ramsdale et al.). Υπάρχουν όμως και άλλα φαινόμενα τα οποία πρέπει να ληφθούν υπ' όψη στη διαδικασία επίλυσης των εξισώσεων αυτών. Πιο συγκεκριμένα, οι επιδράσεις στροβιλότητας (turbulence) ή στροβιλώδους ροής αναπαρίστανται με δύο πρόσθετες εξισώσεις. Σημειώνεται ότι στροβιλώδης ροή ονομάζεται το είδος της ροής των ρευστών που χαρακτηρίζεται από χαώδεις ή τυχαίες μεταβολές του πεδίου ροής τους. Δηλαδή οι μεταβλητές του πεδίου ροής ενός ρευστού, πίεση και ταχύτητα μεταβάλλονται απότομα και τυχαία για κάθε σημείο του χώρου που καταλαμβάνει το πεδίο ροής κατά τη χρονική εξέλιξη του φαινομένου. Προσοχή πρέπει να δίνεται στις οριακές συνθήκες, οπότε θα πρέπει να γίνεται προσεκτικά η επιλογή των ορίων (boundaries). Για παράδειγμα, όταν εξετάζουμε φωτιά που έχει ξεσπάσει στο εσωτερικό ενός κτιρίου, παρουσία ανέμου και τοποθετήσουμε τα όρια στους εξωτερικούς τοίχους του κτιρίου, είναι πολύ πιθανό να πάρουμε μη ρεαλιστικά αποτελέσματα. Αυτό θα συμβεί γιατί χρειάζεται να επιλυθεί το πεδίο εξωτερικά του κτιρίου και τα όρια πρέπει να είναι επαρκώς μακριά από το κτίριο, προτού απλές οριακές συνθήκες εφαρμοστούν σ' αυτά. Το κυρίαρχο πλεονέκτημα ενός τέτοιου κώδικα CFD σε σχέση με τους άλλους είναι η γενικότητά του, η οποία επιτρέπει την εξέταση πολύπλοκων γεωμετριών, χωρίς τις υποθέσεις που περιλαμβάνει για παράδειγμα ένα διζωνικό μοντέλο. Το σημαντικότερο μειονέκτημά τους είναι το κόστος, καθώς το «στήσιμο» ενός προβλήματος μπορεί να είναι ακριβό λόγω δημιουργίας πλέγματος (σε πολύπλοκες γεωμετρίες) και ανάγκης

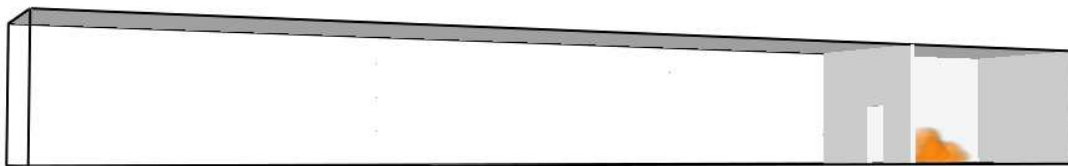
παρακολούθησης (monitoring) της όλης διαδικασίας (διότι είναι αρκετά χρονοβόρα και οι επιπτώσεις έστω και ενός λάθους θα είναι καθοριστικές). Τέλος, για τη δημιουργία ενός τέτοιου κώδικα απαιτείται ο χρήστης να έχει επαρκή εμπειρία ώστε να μπορεί να αξιολογήσει την ορθότητα των αποτελεσμάτων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι και τα δύο προγράμματα συνοδεύονται από το πρόγραμμα Smokeview, το οποίο οπτικοποιεί τα αποτελέσματα, τα οποία θα δούμε στη συνέχεια.

5.3 (ΚΟΙΝΕΣ) ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΣΤΑ ΔΥΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ

➤ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ:

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η γεωμετρία που θα εξετάσουμε αποτελείται από ένα δωμάτιο ακολουθούμενο από ένα διάδρομο μεγάλου μήκους. Το δωμάτιο έχει μήκος 7 m, πλάτος 2.5 m και ύψος 4m. Ο διάδρομος έχει μήκος 28 m, πλάτος 2.5 m και ύψος 4m.

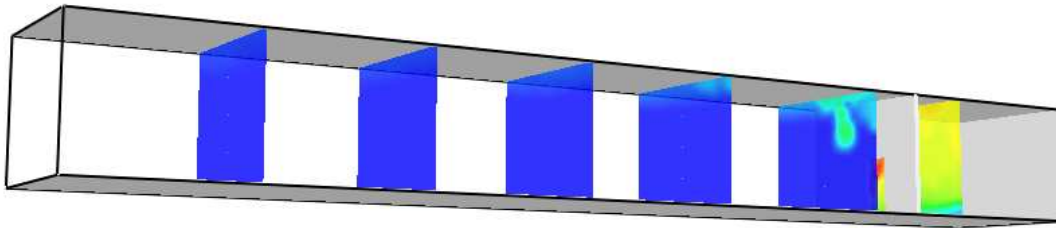


Εικόνα 10- Η γεωμετρία στο FDS



Εικόνα 11- Η γεωμετρία στο CFAST

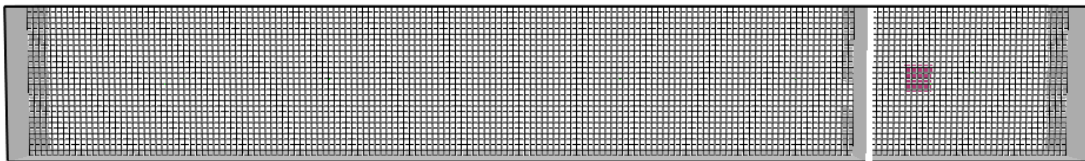
Σημαντικό ρόλο στην προσομοίωση κατέχει η θέση των μετρούμενων σημείων των μεγεθών που μας ενδιαφέρουν (θερμοκρασία, ορατότητα, επίπεδο οξυγόνου). Στο FDS μετράμε σε διάφορες θέσεις στον άξονα x- σημεία στόχοι (targets), όπου εισάγουμε εγκάρσια επίπεδα για καλύτερη οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων, όπως φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί:



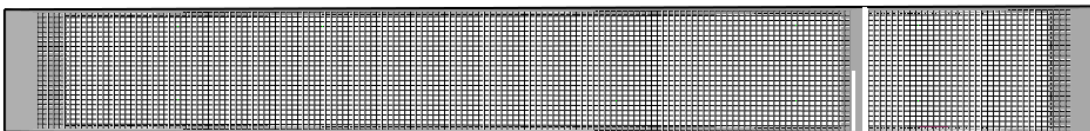
Εικόνα 12- Επίπεδα x (FDS), θέσεις: $x=5$ m, $x=9$ m, $x=15$ m, $x=25$ m, $x=30$ m

Σημεία στόχοι υπάρχουν στις θέσεις x που αναφέρθηκαν παραπάνω ($x=5$ m, $x=9$ m, $x=15$ m, $x=25$ m, $x=30$ m), στο μισό του πλάτους ($y=2.5$) και καθ' ύψος στις θέσεις $z=1$ m, $z=2$ m και $z=3.5$ m. Οπότε χρησιμοποιούμε 15 σημεία στόχους για να κατασκευάσουμε τα διαγράμματα των μεγεθών που μας ενδιαφέρουν.

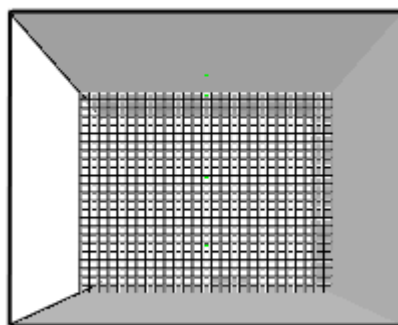
Όσο αφορά το πλέγμα που έχουμε επιλέξει, αυτό αποτελείται από 180 κελιά στη διεύθυνση x, 27 κελιά στη διεύθυνση y και 24 κελιά στη διεύθυνση z. Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνονται 3 τομές του χρησιμοποιούμενου πλέγματος (μια τομή σε κάθε διεύθυνση):



Εικόνα 13- Χρησιμοποιούμενο πλέγμα, επίπεδο xy



Εικόνα 14- Χρησιμοποιούμενο πλέγμα- επίπεδο xz



Εικόνα 14- Χρησιμοποιούμενο πλέγμα- επίπεδο yz

Στο CFAST δεν έχουμε τη δυνατότητα χρήσης εγκάρσιων επιπέδων, αλλά η κατανομή της θερμοκρασίας παρουσιάζεται με τον ακόλουθο τρόπο:



Εικόνα 15- Οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων στο CFAST

Ουσιαστικά, όπως συμπεραίνουμε από την παραπάνω εικόνα, το CFAST δημιουργεί εξ ορισμού ένα διάμηκες επίπεδο που καταλαμβάνει κατά μήκος όλη την εξεταζόμενη γεωμετρία. Τα σημεία στόχοι στο CFAST, δεν έχουν την ίδια λειτουργία όπως αυτά στο FDS. Ειδικότερα, στο CFAST οι στόχοι αποτελούν σωματίδια (από κάποιο υλικό) στα οποία υπολογίζεται η μεταφορά θερμότητας από το δωμάτιο στο οποίο βρίσκονται.

➤ **ΜΕΓΕΘΟΣ ΦΩΤΙΑΣ:**

Η φωτιά που επιλέξαμε αντιστοιχεί σε κάυση μεθανίου (CH_4), έχει ρυθμό έκλυσης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας ίση προς 550 kW ($\text{HRRPUA}=550 \text{ kW}$) και είναι σταθερή (δεν εξαρτάται από το χρόνο). Την επιφάνεια της φωτιάς τη λαμβάνουμε ίση προς 1 m^2 . Οπότε ο συνολικός ρυθμός έκλυσης θερμότητας είναι ίσος προς 550 kW ($550 \text{ kW}/\text{m}^2 \times 1 \text{ m}^2 = 550 \text{ kW}$).

➤ **ΥΛΙΚΟ:**

Επιλέξαμε το υλικό όλων των τοίχων να είναι χάλυβας. Στο CFAST υπάρχει μια βάση δεδομένων για τα διάφορα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μια προσομοίωση. Τα δεδομένα αυτά αφορούν τις θερμικές τους ιδιότητες (για συγκεκριμένο δεδομένο πάχος). Το πάχος αυτό είναι ίσο προς 0,003 m.

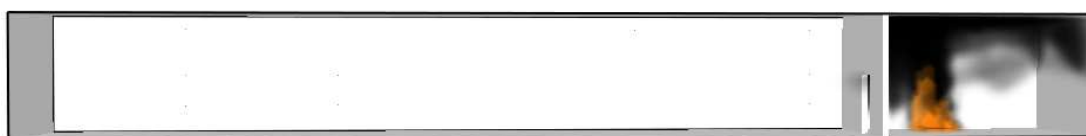
Επειδή όμως στο FDS η επιλογή των ιδιοτήτων των υλικών εναπόκειται στην κρίση του χρήστη, χρησιμοποιήσαμε για τα διάφορα μεγέθη τις τιμές του CFAST, ώστε να μιλάμε ακριβώς για το ίδιο υλικό. Οι ιδιότητες αυτές φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 2- Θερμικές ιδιότητες του υλικού που χρησιμοποιήσαμε

Thermal Properties	Value
Specific heat	0,559 kJ/kg °C
Conductivity	0,048 kW/m °C
Density	7854 kg/m ³
Emissivity	0.9

Σημειώνεται ότι σε όσα μεγέθη χρειάστηκε έγινε μετατροπή στις κατάλληλες μονάδες ώστε να τα εισάγουμε σωστά στο FDS. Οι μονάδες που δέχεται το FDS καθώς και οι ορισμοί των παραπάνω μεγεθών έχουν δοθεί στο 3^ο κεφάλαιο, εκτός του μεγέθους της ικανότητας θερμικής εκπομπής (emissivity) η οποία συμβολίζεται με ϵ . Το μέγεθος αυτό εκφράζει τη σχετική ισχύ της επιφάνειας ενός σώματος να εκπέμπει θερμότητα μέσω ακτινοβολίας. Είναι ο λόγος της ενέργειας που ακτινοβολείται από ένα συγκεκριμένο υλικό προς την ενέργεια που ακτινοβολείται από ένα σώμα μαύρου χρώματος στην ίδια θερμοκρασία. Είναι ουσιαστικά ένα μέτρο της ικανότητας ενός υλικού να εκπέμπει θερμότητα που έχει απορροφήσει και είναι αδιάστατο μέγεθος. Ένα μαύρο σώμα έχει $\epsilon=1$, ενώ οποιοδήποτε άλλο έχει $\epsilon<1$.

5.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΟ FDS (Fire Dynamics Simulator)



Εικόνα 16- Στιγμιότυπο από το FDS στα πρώτα λεπτά της προσομοίωσης

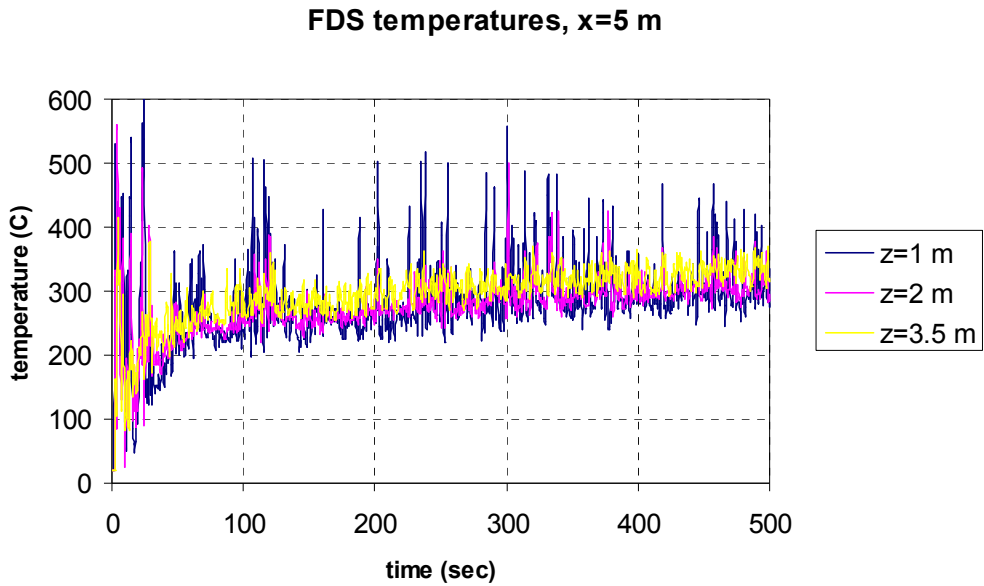


Εικόνα 17- Στιγμιότυπο από το FDS στα μέσα της προσομοίωσης

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, τα μεγέθη των οποίων οι χρονικές ιστορίες μας ενδιαφέρουν είναι: η θερμοκρασία, η ορατότητα, το επίπεδο οξυγόνου και το επίπεδο μονοξειδίου του άνθρακα. Θα προχωρήσουμε στην παρουσίαση των διαγραμμάτων τα

οποία περιγράφουν την αναπτυσσόμενη κατάσταση στις επιλεγμένες θέσεις x και ύψη z . Σημειώνεται ότι ο χρόνος προσομοίωσης είναι 500 δευτερόλεπτα. Γι' αυτό το χρόνο προσομοίωσης, το CFAST χρειάστηκε ορισμένα δευτερόλεπτα για την εξαγωγή αποτελεσμάτων, ενώ το FDS χρειάστηκε περίπου 7 ώρες.

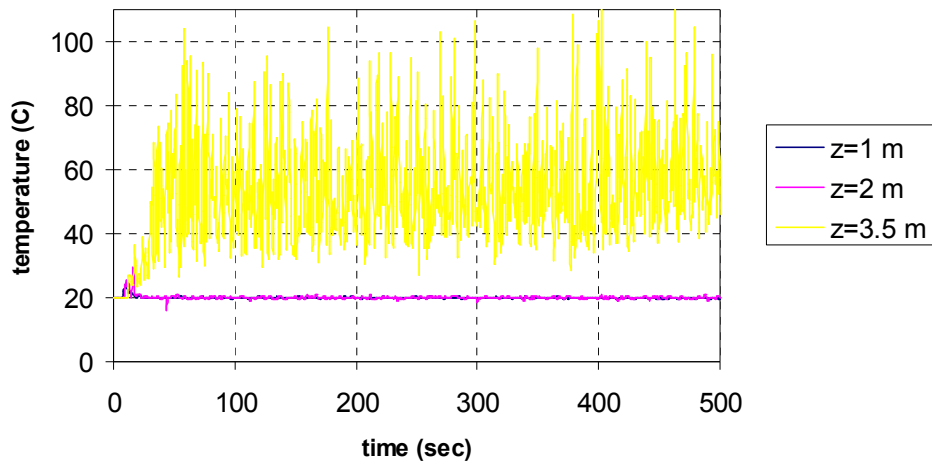
Αναπτυσσόμενη θερμοκρασία:



Διάγραμμα 22

Η θέση $x=5$ βρίσκεται πάνω ακριβώς στη φωτιά, οπότε πρόκειται για προβληματικό σημείο ως προς τα αποτελέσματα. Παρατηρούμε μικρές διαφορές στη θερμοκρασία ανάμεσα στις 3 θέσεις καθ' ύψος όπου μετράμε, με υψηλότερη αυτήν στην υψηλότερη θέση ($z=3.5$ m). Ειδικότερα, όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα υπάρχουν πολλές διακυμάνσεις, οπότε εστιάζομαστε στις θέσεις του διαδρόμου. Στη συνέχεια θα δούμε διαγραμματικά την κατανομή της θερμοκρασίας στο διάδρομο:

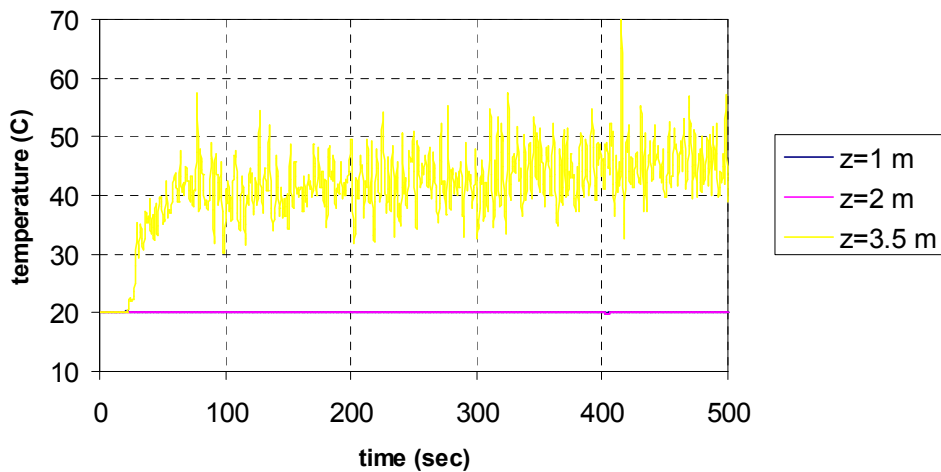
FDS temperatures, x=9 m



Διάγραμμα 23

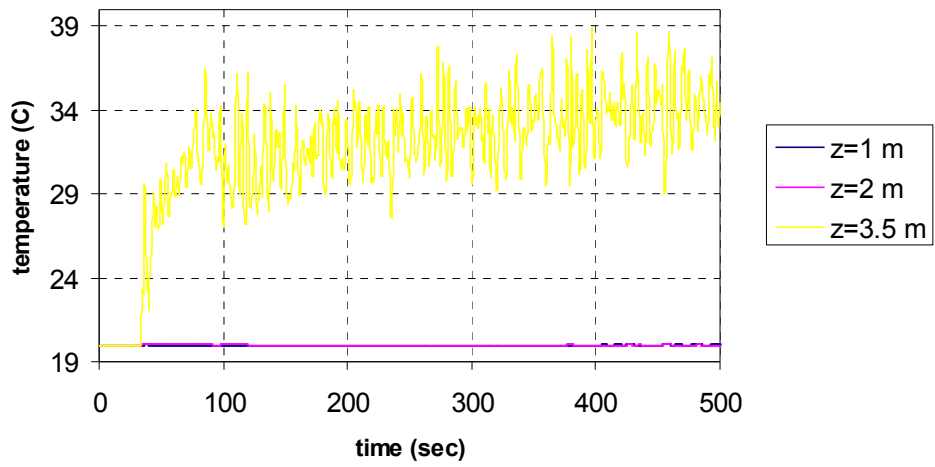
Εδώ η θερμοκρασία που αναπτύσσεται στα στρώματα $z=1$ & $z=2$ είναι περίπου η ίδια. Μεγάλη διαφοροποίηση (της τάξης των 40 βαθμών) παρουσιάζουν οι θερμοκρασίες του ανώτατου στρώματος. Αυτό συμβαίνει, διότι ο παραγόμενος καπνός, επειδή είναι ελαφρύς κατευθύνεται προς την οροφή και ταυτόχρονα μεταφέρεται θερμότητα.

FDS temperatures, x=15 m



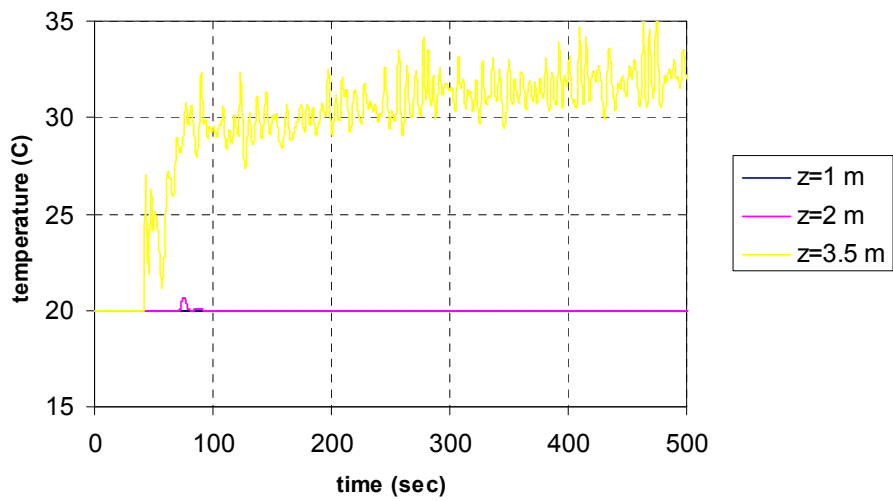
Διάγραμμα 24

FDS temperatures, x=25 m



Διάγραμμα 25

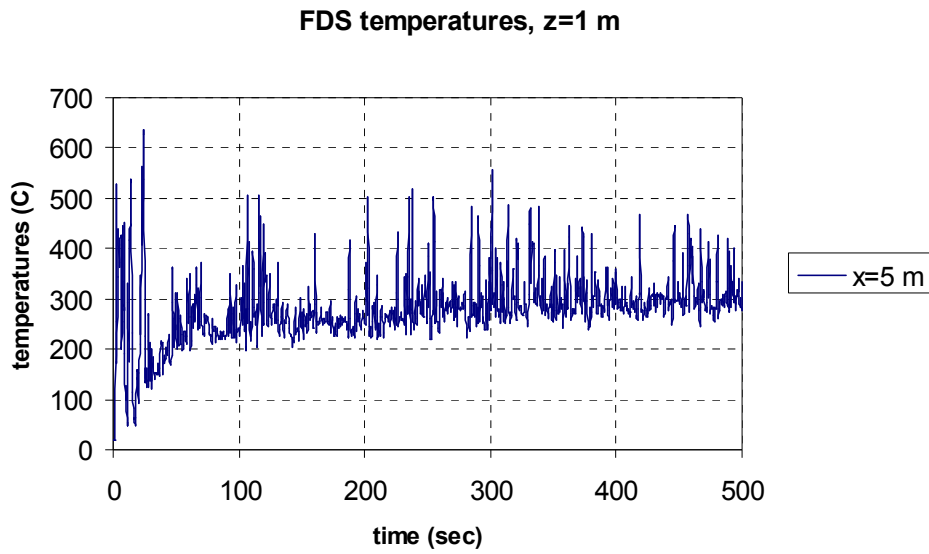
FDS temperatures, x=30 m



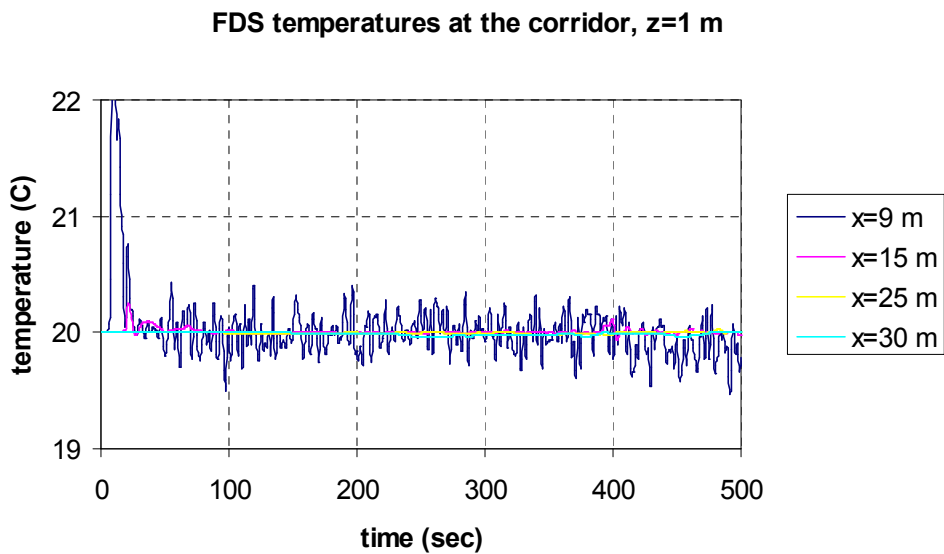
Διάγραμμα 26

Από τα διαγράμματα 3,4,5 παρατηρούμε ότι κατά μήκος του διαδρόμου μειώνονται οι θερμοκρασίες, πράγμα αναμενόμενο.

Στη συνέχεια θα δούμε πως αναπτύσσεται η θερμοκρασία καθ' ύψος:



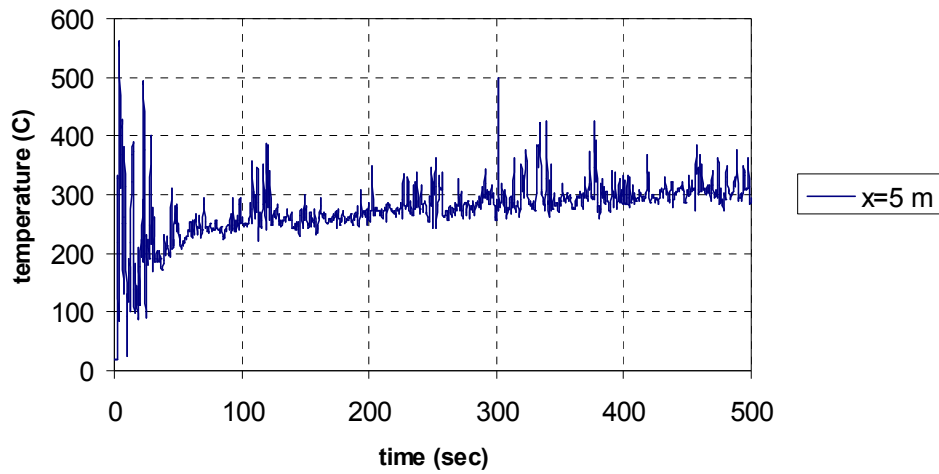
Διάγραμμα 27



Διάγραμμα 28

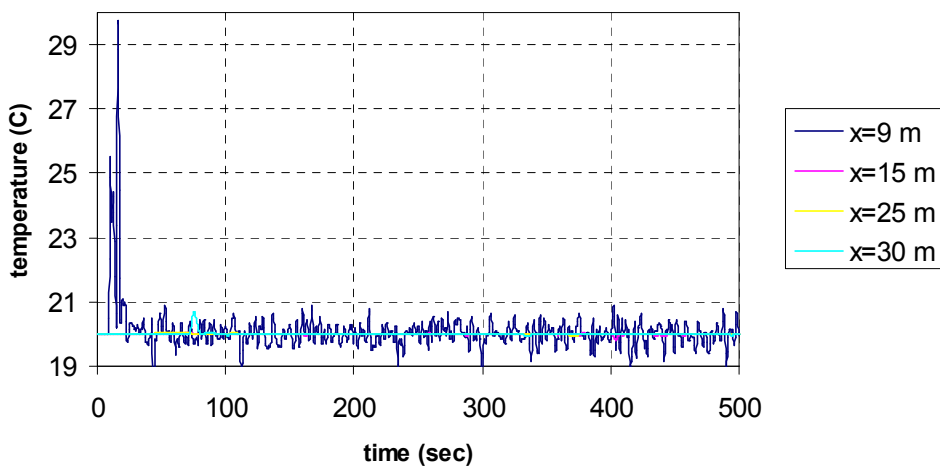
Παρατηρούμε ότι το κατώτατο στρώμα που δημιουργείται στην περιοχή του διαδρόμου παρουσιάζει μια ομοιομορφία ως προς τη θερμοκρασία. Έντονες διακυμάνσεις τις θερμοκρασίας εντοπίζονται στη θέση $x=9$ m. Αυτό συμβαίνει διότι η θέση αυτή είναι η πλησιέστερη στη φωτιά.

FDS temperatures, z=2 m



Διάγραμμα 29

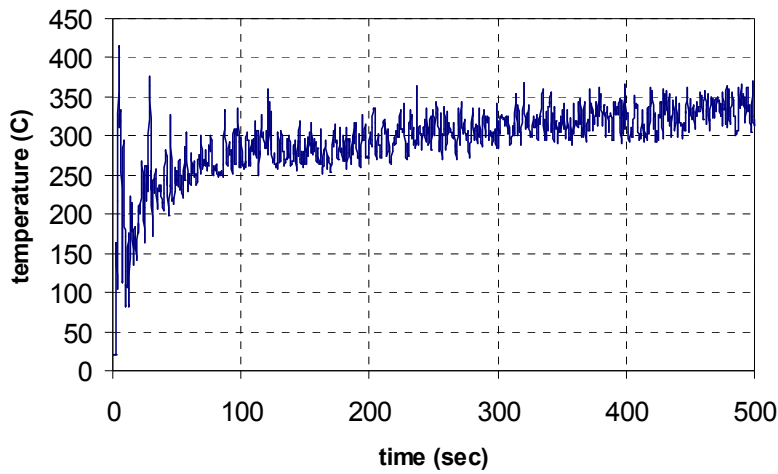
FDS temperatures at the corridor, z=2 m



Διάγραμμα 30

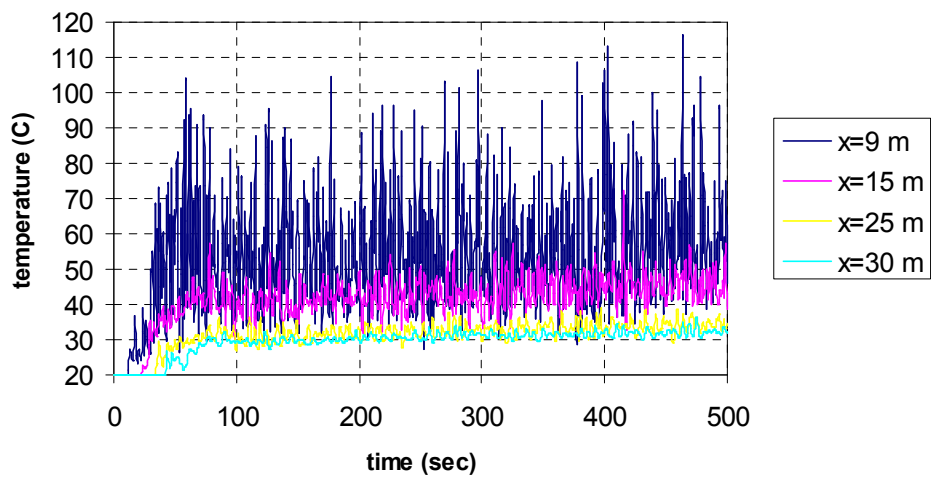
Η παρατήρηση που κάναμε για την ομοιομορφία των θερμοκρασιών κατά μήκος του στρώματος z=1 ισχύει και για το στρώμα z=2. Πάλι παρατηρούνται οι έντονες διακυμάνσεις στη θέση x=9 m.

FDS temperatures, z=3.5 m



Διάγραμμα 31

FDS temperatures at the corridor, z=3.5 m



Διάγραμμα 32

Στο ανώτατο στρώμα υπάρχει διαφοροποίηση της θερμοκρασίας κατά μήκος. Πιο συγκεκριμένα, υψηλότερη θερμοκρασία αναπτύσσεται στη θέση $x=9$ m και χαμηλότερη όπως είναι αναμενόμενο, στη θέση $x=30$ m. Συνολικά όμως οι θερμοκρασίες του ανώτατου στρώματος είναι υψηλότερες για όλες τις θέσεις x .

Ορατότητα:

Η ορατότητα είναι μια σημαντική παράμετρος που έχει ιδιαίτερη σημασία σε σενάρια εκκένωσης. Αρχικά, όμως θα εξηγήσουμε πώς υπολογίζεται το μέγεθος αυτό από το FDS.

Η ορατότητα (δια μέσου του καπνού) (σε m) προκύπτει από τη σχέση (Mc Grattan et al. 2006):

$$S=C/K$$

όπου,

C: αδιάστατη σταθερά που σχετίζεται με τον τύπο του αντικειμένου, το οποίο κοιτάζουμε δια μέσου του καπνού. Ενδεικτικά, C=8 για ταμπέλα (πχ. έξοδος κινδύνου) που εκπέμπει φως, ενώ C=3 για ταμπέλα που αντανακλά φως. Η προκαθορισμένη τιμή του C η οποία χρησιμοποιείται από το πρόγραμμα είναι: C=3.

K [1/m]: ο συντελεστής εξάλειψης του φωτός (light extinction coefficient). Δίνεται από τη σχέση:

$$K= K_m \cdot \rho Y_s$$

όπου:

K_m [m^2/kg]: ο συντελεστής εξάλειψης μάζας του καπνού (mass extinction coefficient).

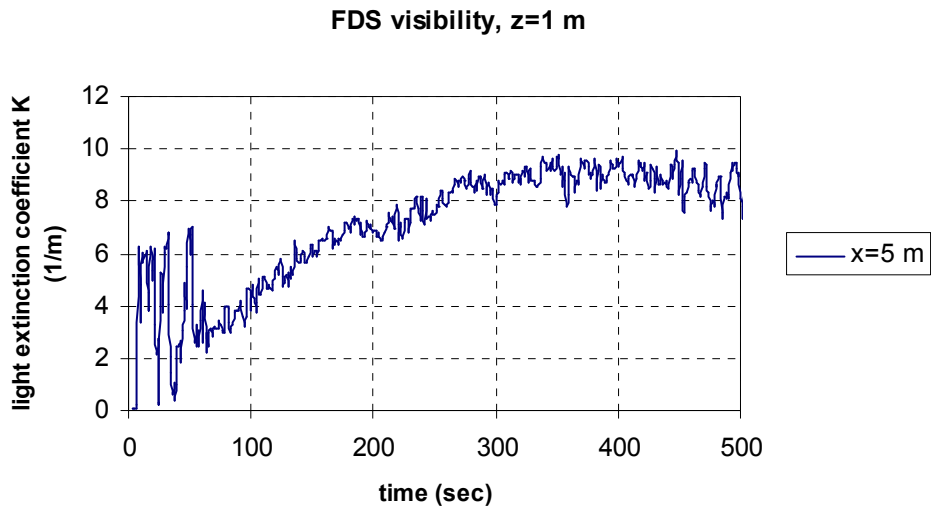
Η default τιμή του K_m είναι: $K_m=8700 m^2/kg$

ρY_s [kg/m^3]: πυκνότητα των σωματιδίων του καπνού. Το μέγεθος αυτό σχετίζεται με τη μεταβλητή soot_yield, την οποία εισάγουμε αρχικά στον κώδικα (βλ. παράρτημα) και είναι το κλάσμα της μάζας καυσίμου που μετατρέπεται σε καπνό.

Ένα μέγεθος παρόμοιο με τον συντελεστή εξάλειψης φωτός (K) είναι το ορατό βάθος (optical depth) το οποίο υπολογίζεται από το FDS μέσω της σχέσης: $OD= K/ 2.3$.

Δεδομένων λοιπόν όλων των τιμών που χρειάζεται το FDS, υπολογίζει το μέγεθος S. Εμείς όμως-κάνοντας τις απαραίτητες μετατροπές- παρουσιάζουμε διαγραμματικά τον συντελεστή K (light extinction coefficient), διότι θα μας χρησιμεύσει στη συνέχεια στο κομμάτι της σύγκρισης με το CFAST.

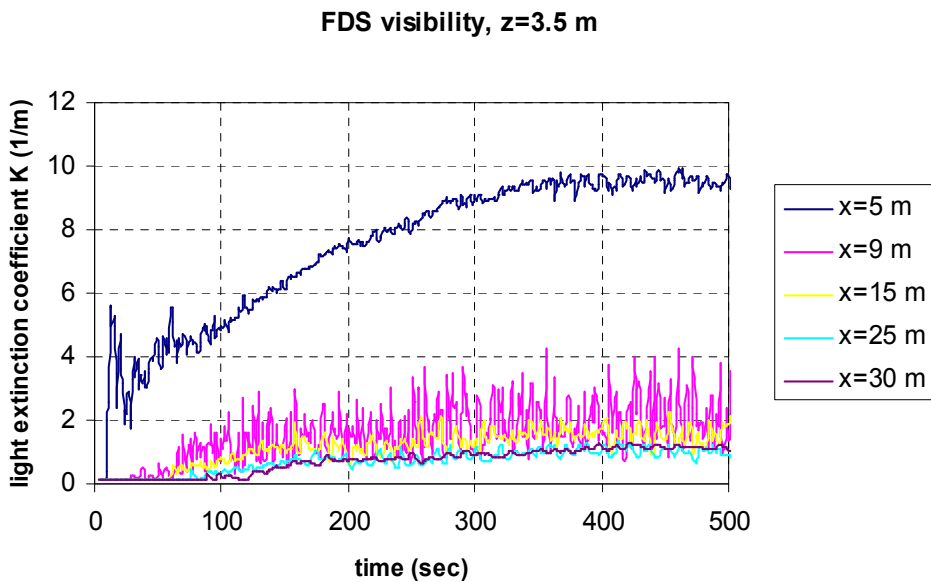
Επειδή η ορατότητα μας ενδιαφέρει κυρίως στο διάδρομο και λόγω του ότι σε όλες τις θέσεις του διαδρόμου, η ορατότητα είναι ίδια για τα στρώματα $z=1$, $z=2$ m (ίση με τη μέγιστη) παραλείπουμε τα διαγράμματα κατά θέση x και προχωρούμε στην απεικόνιση κατά στρώματα:



Διάγραμμα 33

Για τις υπόλοιπες θέσεις (θέσεις διαδρόμου) ο συντελεστής K είναι σταθερός και ίσος προς 0,1 1/m.

Το στρώμα $z=2$ m παρουσιάζει ακριβώς την ίδια συμπεριφορά με το στρώμα $z=1$ m. Οπότε προχωρούμε στο ανώτερο στρώμα:



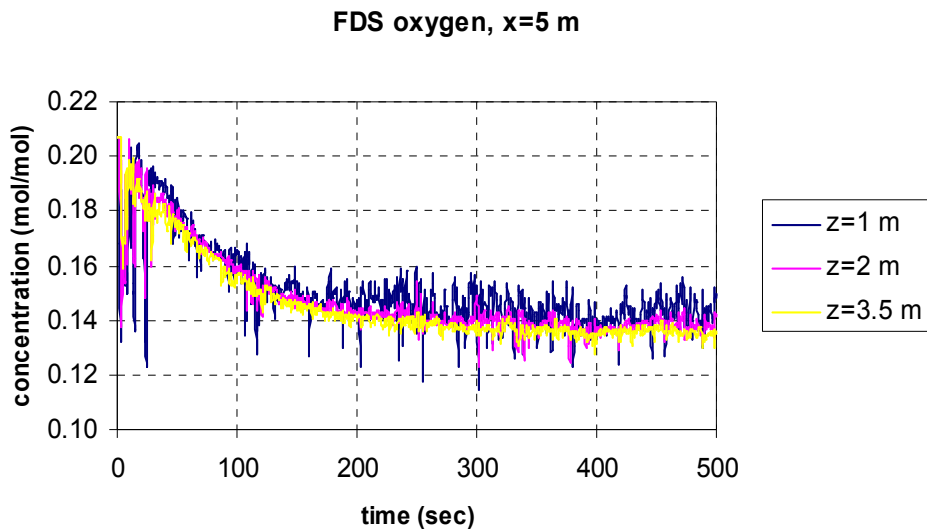
Διάγραμμα 34

Όπως επιβεβαιώνεται και από τα διαγράμματα που αντιστοιχούν στα εξεταζόμενα στρώματα, η ορατότητα είναι ίδια στα σημεία του διαδρόμου σε ύψος 1 και 2 m από το πάτωμα. Διαφοροποίηση ανάλογα με τη θέση υπάρχει στο ανώτατο στρώμα (σε ύψος 3.5 m από το πάτωμα), με χαμηλότερη ορατότητα, όπως είναι λογικό, στα αρχικά

σημεία του διαδρόμου, που βρίσκονται και πλησιέστερα στη φωτιά. Σημειώνεται ότι σύμφωνα με τη σχέση $K=C/S$ τα μεγέθη K και S είναι αντιστρόφως ανάλογα.

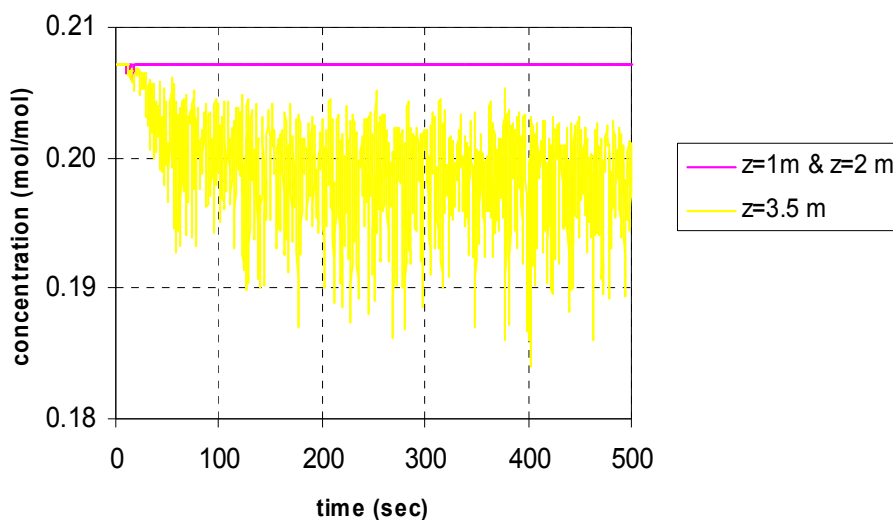
Επίπεδο οξυγόνου:

Εκτός από την ορατότητα, το επίπεδο του οξυγόνου είναι πολύ σημαντικός παράγοντας που καθορίζει την επιβιωσιμότητα σ' ένα χώρο. Ενδεικτικά αναφέρουμε η κανονική ατμοσφαιρική ποσότητα οξυγόνου είναι 21% και 19,5% είναι το κατώτατο «υγιές» όριο, σύμφωνα με το υπουργείο της ασφάλειας στο σπίτι των Ηνωμένων Πολιτειών (U.S Department of Homeland Security). Πάλι η διαγραμματική απεικόνιση του επιπέδου του οξυγόνου θα γίνει και κατά θέση x αλλά και κατά επίπεδο z .



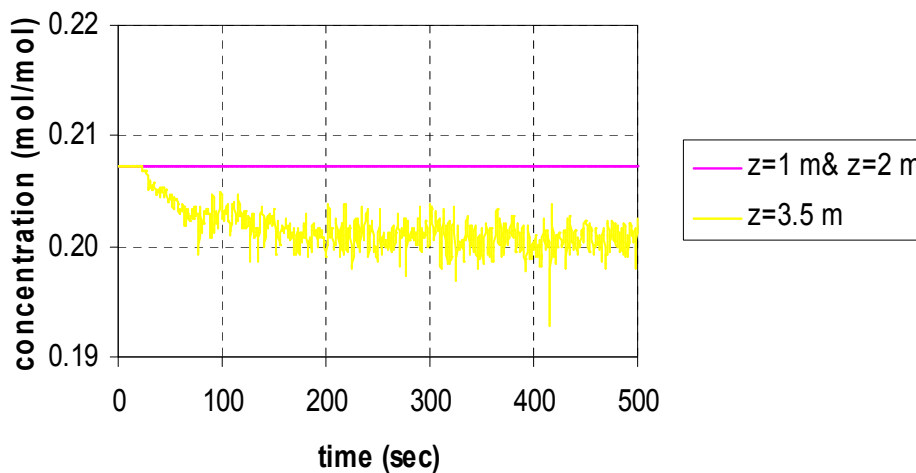
Διάγραμμα 35

FDS oxygen, x=9 m



Διάγραμμα 36

FDS oxygen, x=15m & x=25m & x=30m

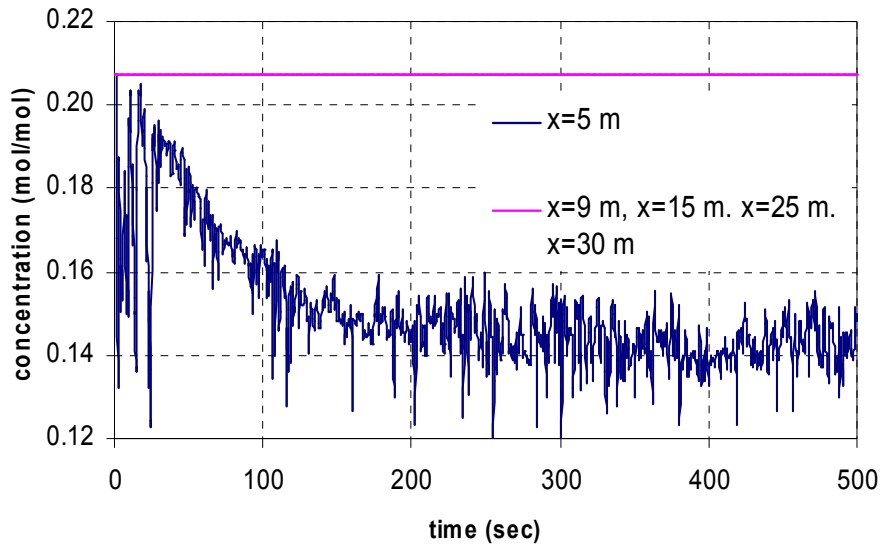


Διάγραμμα 37

Παρατηρούμε ότι στη θέση $x=5\text{m}$ το οξυγόνο μειώνεται αρκετά γρήγορα. Αρχικά είναι $0,21\text{ mol/mol}$ (που είναι το φυσιολογικό επίπεδο οξυγόνου) και τελικά φτάνει τα $0,14\text{ mol/mol}$. Η τιμή αυτή είναι εύλογη, καθώς αναφέρεται στις συνθήκες πάνω από τη φωτιά. Επιπλέον, η συγκέντρωση του οξυγόνου είναι περίπου ίδια για όλες τις θέσεις του διαδρόμου και περίπου ίση προς την ατμοσφαιρική, εκτός της θέσης $x=9\text{ m}$, όπου το επίπεδο του οξυγόνου είναι λίγο χαμηλότερο από το κατώτερο φυσιολογικό.

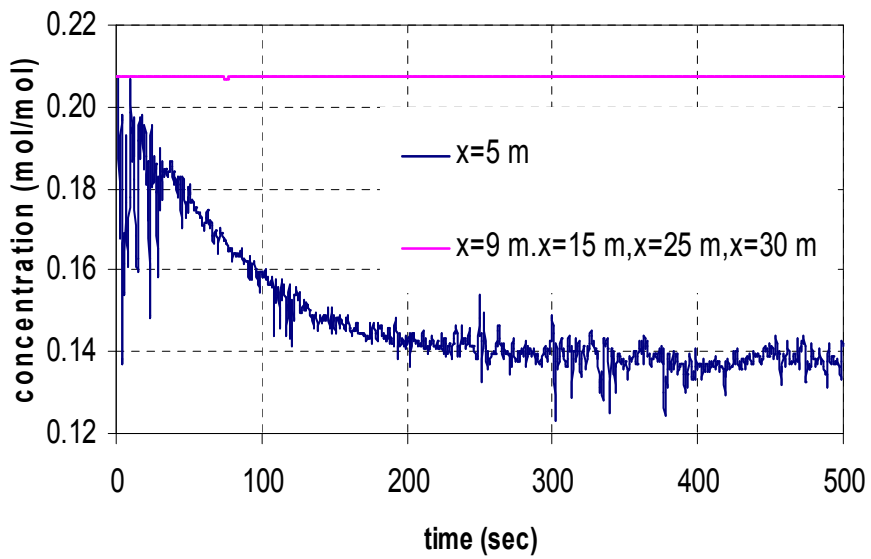
Στη συνέχεια θα δούμε τι συμβαίνει κατά στρώματα:

FDS oxygen, z=1 m



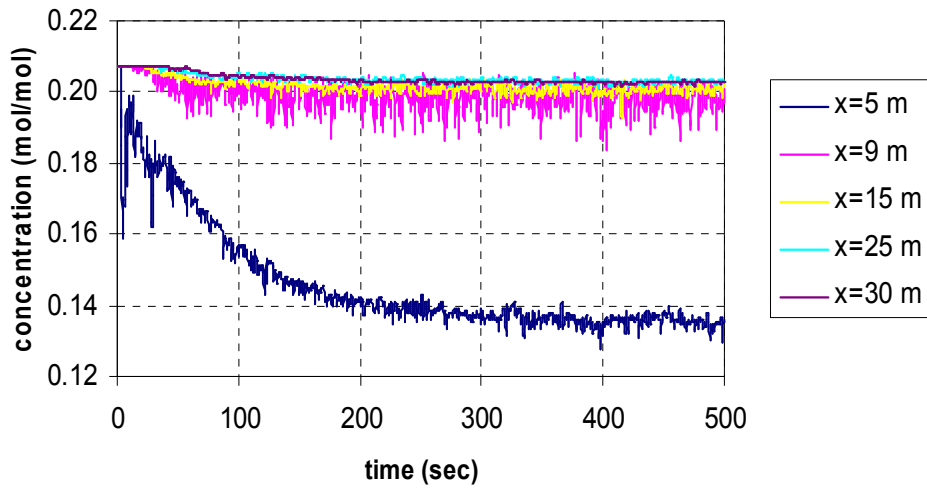
Διάγραμμα 38

FDS oxygen, z=2 m



Διάγραμμα 39

FDS oxygen, z=3.5 m

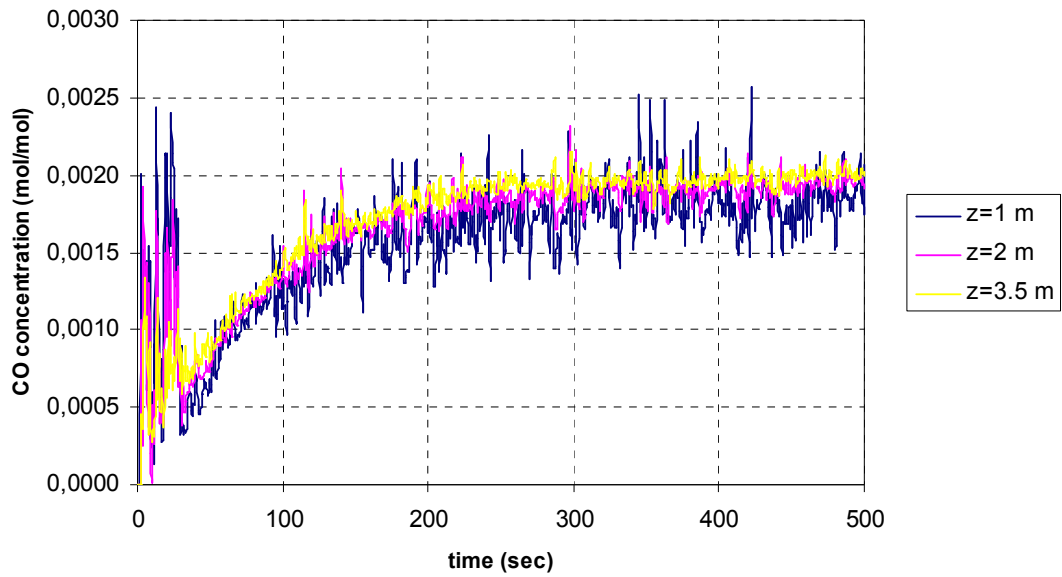


Διάγραμμα 40

Από τα διαγράμματα 20,21 και 22 παρατηρούμε ότι τα στρώματα $z=1\text{m}$ & $z=2\text{m}$ έχουν την ίδια συμπεριφορά. Πιο συγκεκριμένα, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, και στα δύο στρώματα, η συγκέντρωση του οξυγόνου είναι χαμηλότερη στη θέση $x=5\text{ m}$ και υψηλότερη στις θέσεις του διαδρόμου. Όσο αφορά το ανώτατο στρώμα παρατηρείται μικρή διαφοροποίηση ανάμεσα στις θέσεις του διαδρόμου. Ειδικότερα, παρατηρείται μικρή μείωση κατά μήκος του διαδρόμου (ξεκινώντας από το δωμάτιο της φωτιάς).

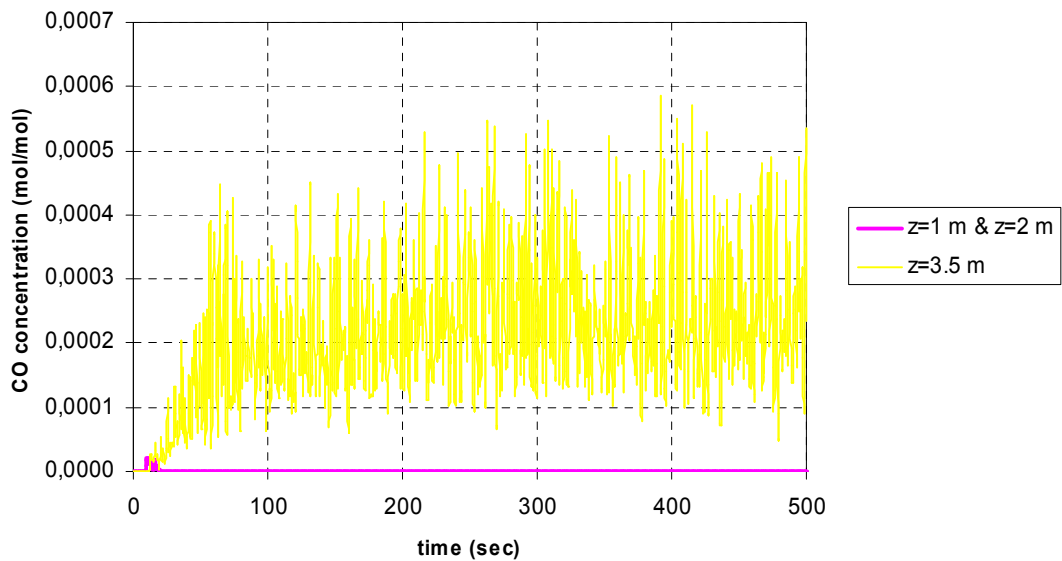
Επίπεδο μονοξειδίου του άνθρακα:

FDS CO, x=5 m



Διάγραμμα 41

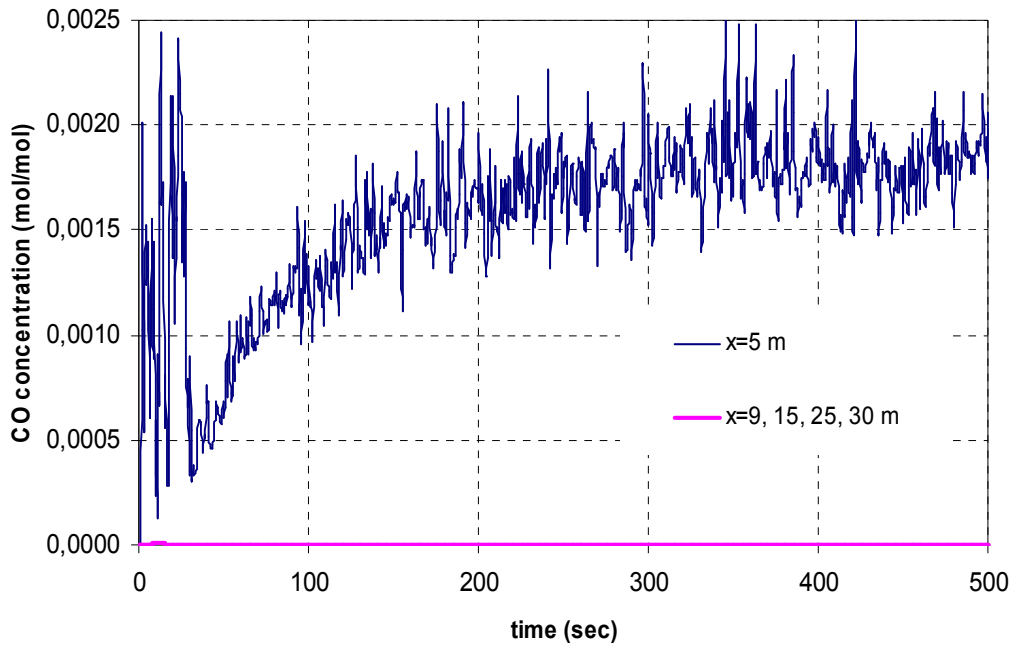
FDS CO, x=9 m



Διάγραμμα 42

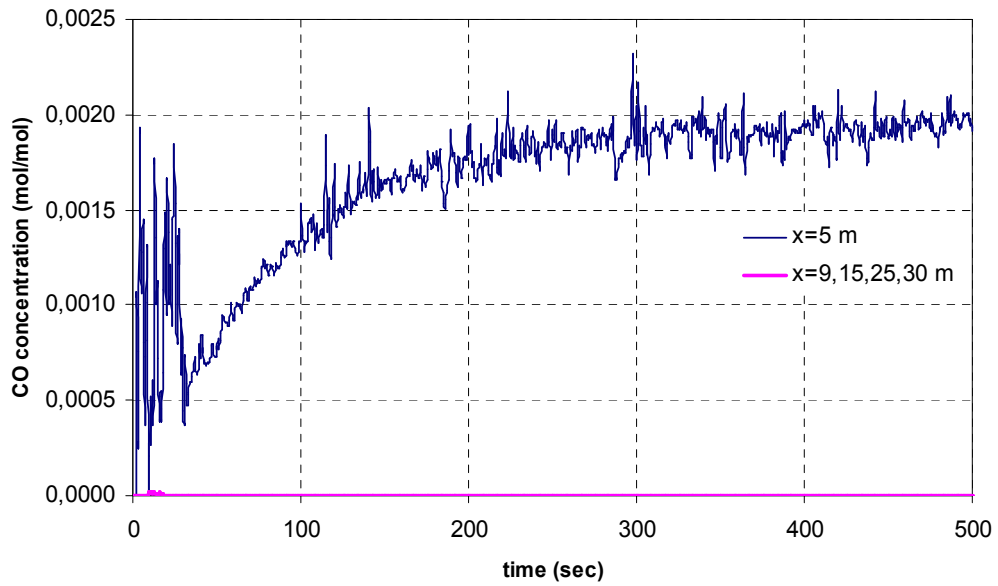
Λόγω του ότι η συγκέντρωση μονοξειδίου του άνθρακα είναι μηδενική για $z=2$ m και $z=3.5$ m στις θέσεις $x=9$ (όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα), $x=15$ m, $x=25$ m και $x=30$ m, είναι προτιμότερο να παραλείψουμε τα αντίστοιχα διαγράμματα και η απεικόνιση να γίνει κατά στρώματα. Επομένως:

FDS CO, z=1 m



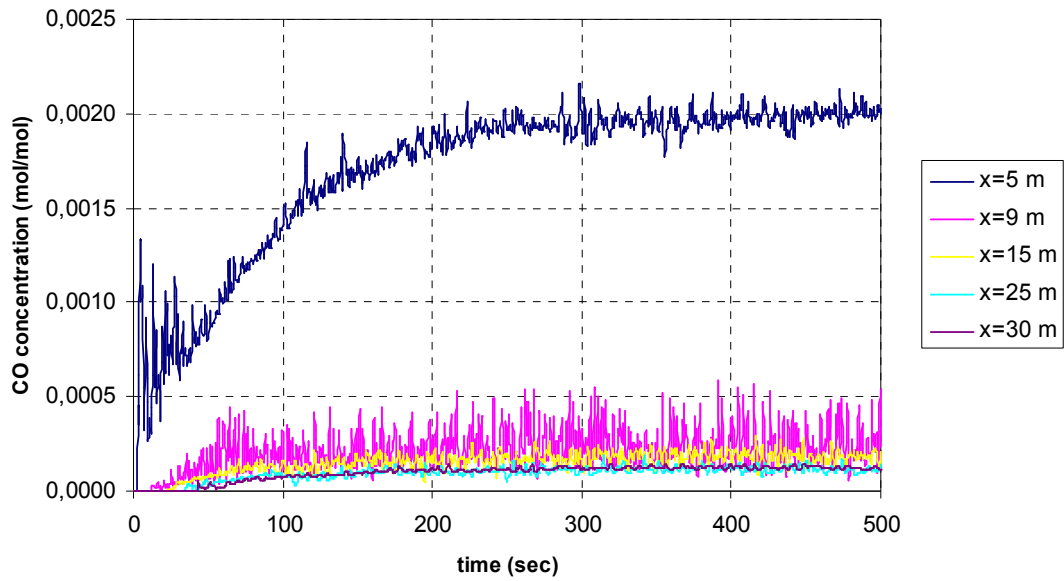
Διάγραμμα 43

FDS CO, z=2 m



Διάγραμμα 44

FDS CO, z=3.5 m



Διάγραμμα 45

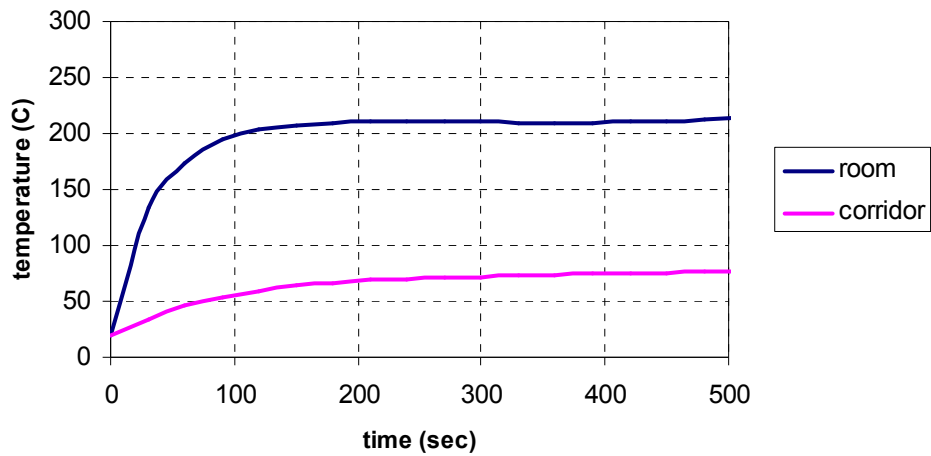
Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει καθόλου μονοξείδιο στα στρώματα $z=1$ και $z=2$ m στο διάδρομο. Στο ανώτατο στρώμα ($z=3.5$ m) υπάρχει μονοξείδιο, πολύ περισσότερο προφανώς στη θέση της φωτιάς. Στο διάδρομο υπάρχει πολύ μικρή διακύμανση της συγκέντρωσης του μονοξειδίου με μεγαλύτερη στις θέσεις που είναι πλησιέστερες στη φωτιά.

5.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΟ CFAST (Consolidated Model of Fire and Smoke Transport)

Επειδή όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο ορισμός των στόχων είναι διαφορετικός στο CFAST απ' ότι στο FDS, θα εργαστούμε στη συνέχεια σε επίπεδο στρωμάτων (ανώτερο & κατώτερο).

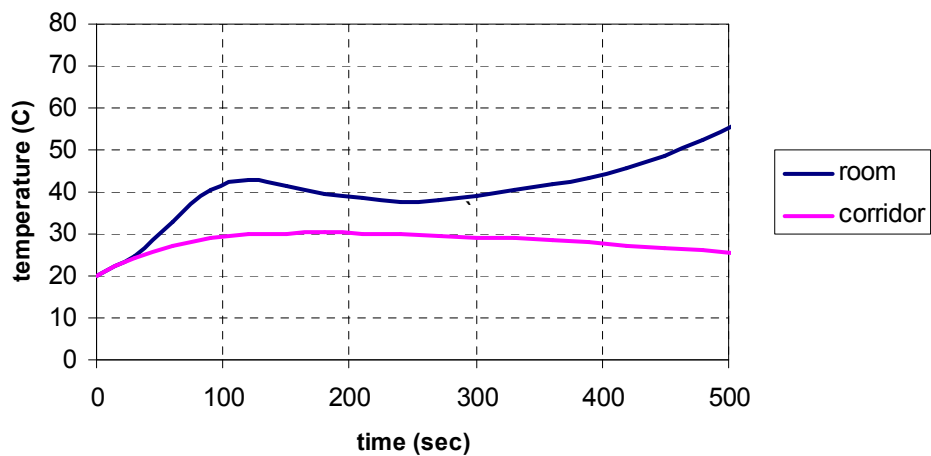
Αναπτυσσόμενη θερμοκρασία:

CFAST upper layer temperatures



Διάγραμμα 46

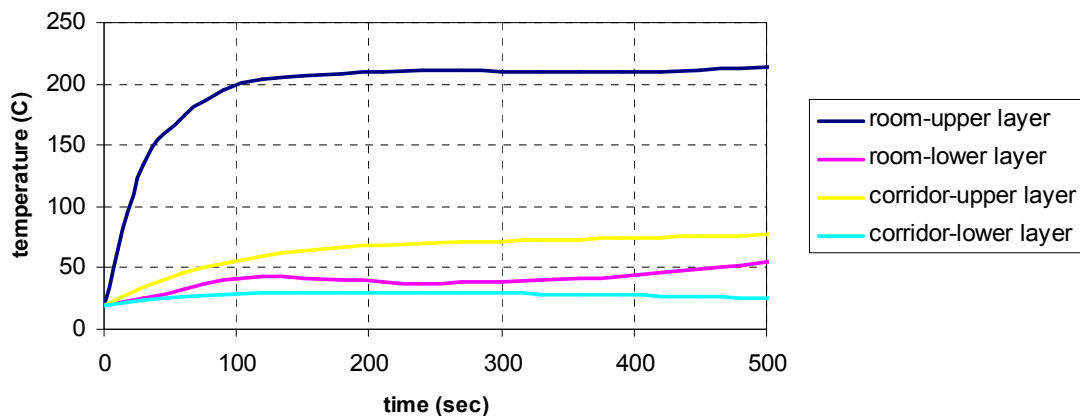
CFAST lower layer temperatures



Διάγραμμα 47

Και συγκεντρωτικά:

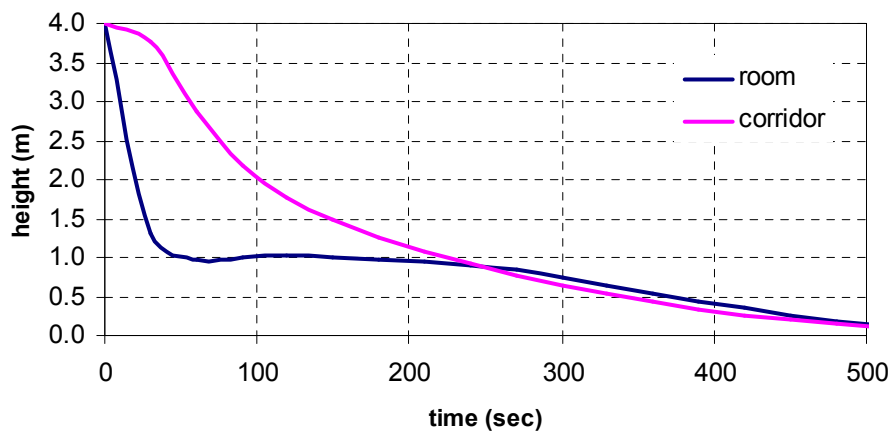
CFAST upper & lower layer temperatures



Διάγραμμα 48

Παρατηρούμε ότι, όπως είναι αναμενόμενο, οι θερμοκρασίες είναι μεγαλύτερες στο ανώτερο στρώμα (upper layer) και στο δωμάτιο (όπου έχει τοποθετηθεί η φωτιά). Η μέγιστη θερμοκρασία που καταγράφεται από το CFAST στο διάδρομο είναι 83° C. Στο FDS η θερμοκρασία αυτή είναι ίση προς 116° C (στη θέση x=9 m).

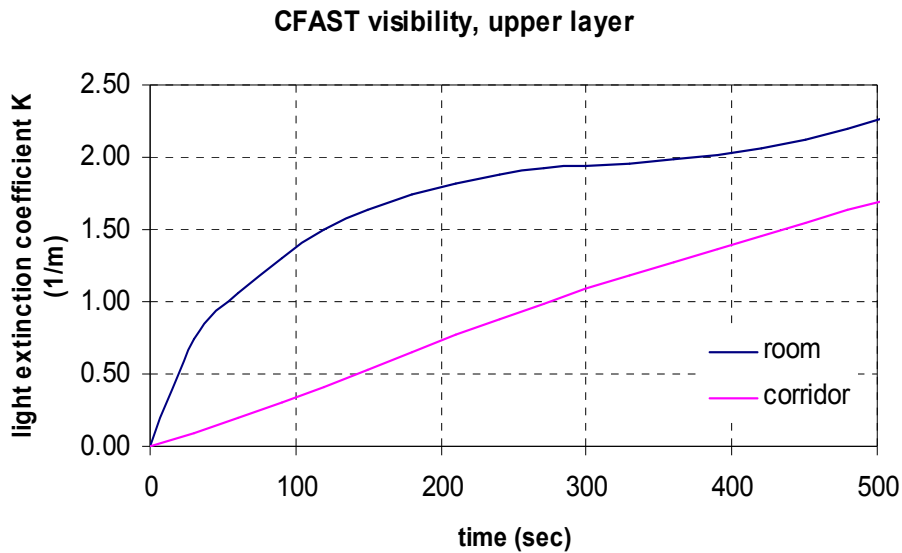
CFAST, Height between upper & lower layer



Διάγραμμα 49

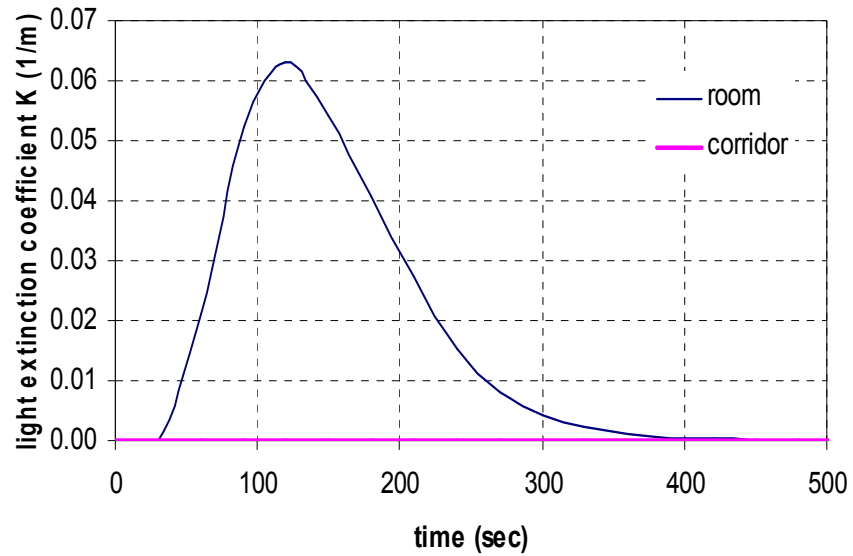
Ορατότητα:

Η ορατότητα εκφράζεται στο CFAST διαφορετικά απ' ότι είδαμε στο FDS. Δεν έχει την έννοια της απόστασης η οποία είναι ορατή από τον άνθρωπο καθώς εξελίσσεται η φωτιά, αλλά αποτελεί μέτρο της πυκνότητας του καπνού (soot mass density). Πιο συγκεκριμένα, το CFAST υπολογίζει το ορατό βάθος OD (optical depth), το οποίο εκφράζεται σε μονάδες 1/m. Οπότε, σύμφωνα με τα όσα γράφηκαν παραπάνω στο κεφάλαιο των αποτελεσμάτων του FDS για την ορατότητα, για να βρούμε το συντελεστή K, πολλαπλασιάζουμε το μέγεθος που μας δίνει το CFAST με 2.3. (Υπενθυμίζεται: $K = OD \cdot 2.3$)



Διάγραμμα 50

CFAST visibility, lower layer



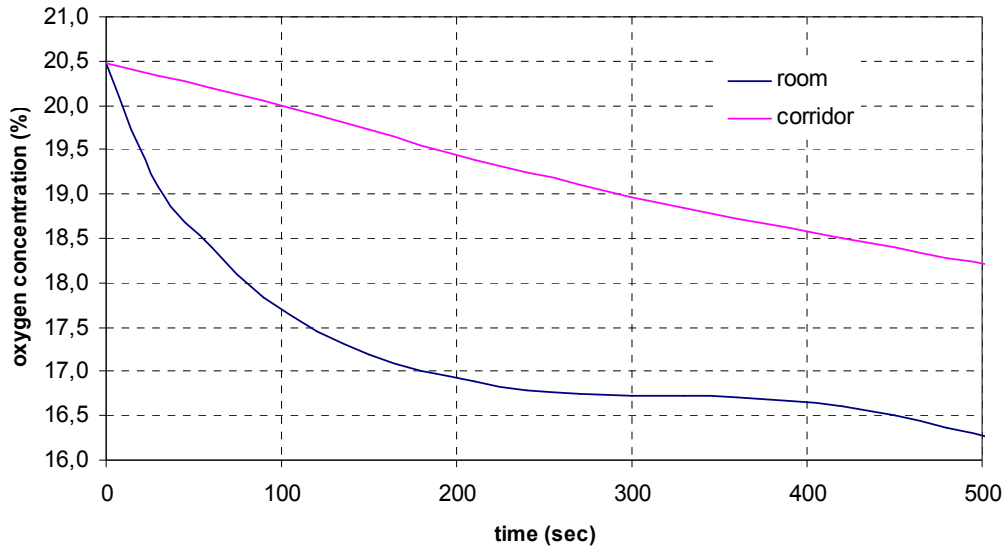
Διάγραμμα 51

Λόγω της διαφορετικής τάξης μεγέθους των αποτελεσμάτων του CFAST για το ανώτερο και κατώτερο στρώμα, δεν είναι χρήσιμο να γίνει και συγκεντρωτικό διάγραμμα για το ανώτερο και το κατώτερο στρώμα.

Στο κατώτατο στρώμα του διαδρόμου, σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα δεν υπάρχει καπνός. Αντίθετα, όπως είναι αναμενόμενο, υπάρχει καπνός στο ανώτερο στρώμα σε ποσότητα μεγαλύτερη στο δωμάτιο της φωτιάς.

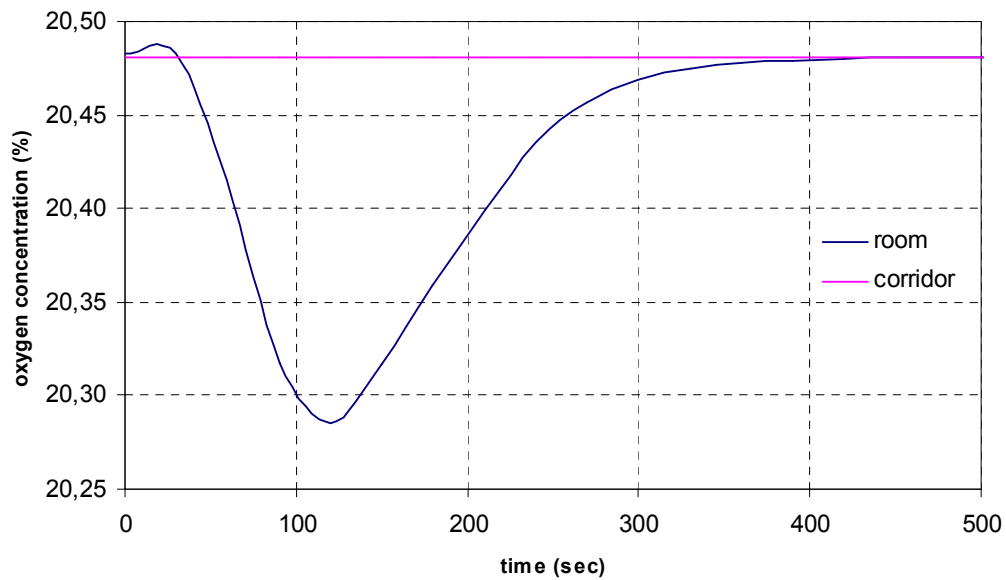
Επίπεδο οξυγόνου:

CFAST oxygen concentration, upper layer



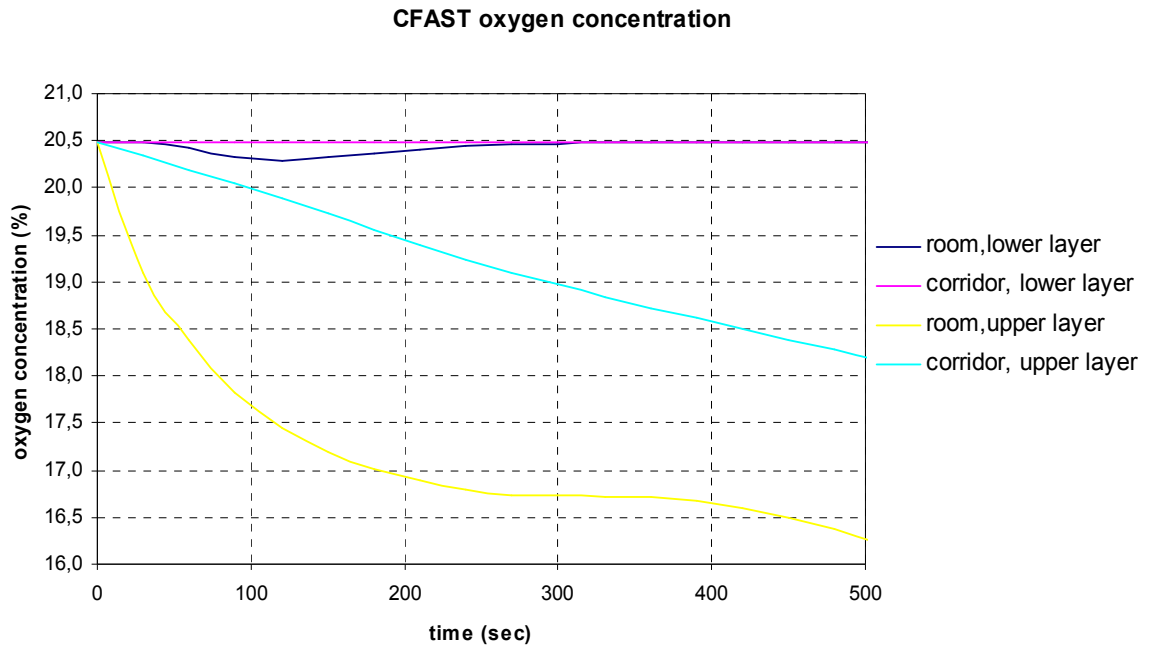
Διάγραμμα 52

CFAST oxygen concentration, lower layer



Διάγραμμα 53

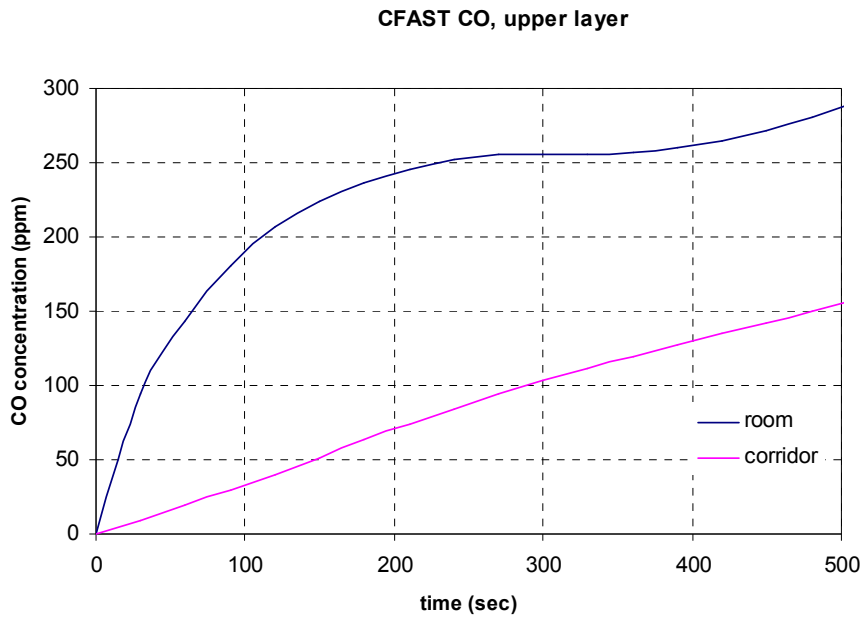
Και συγκεντρωτικά:



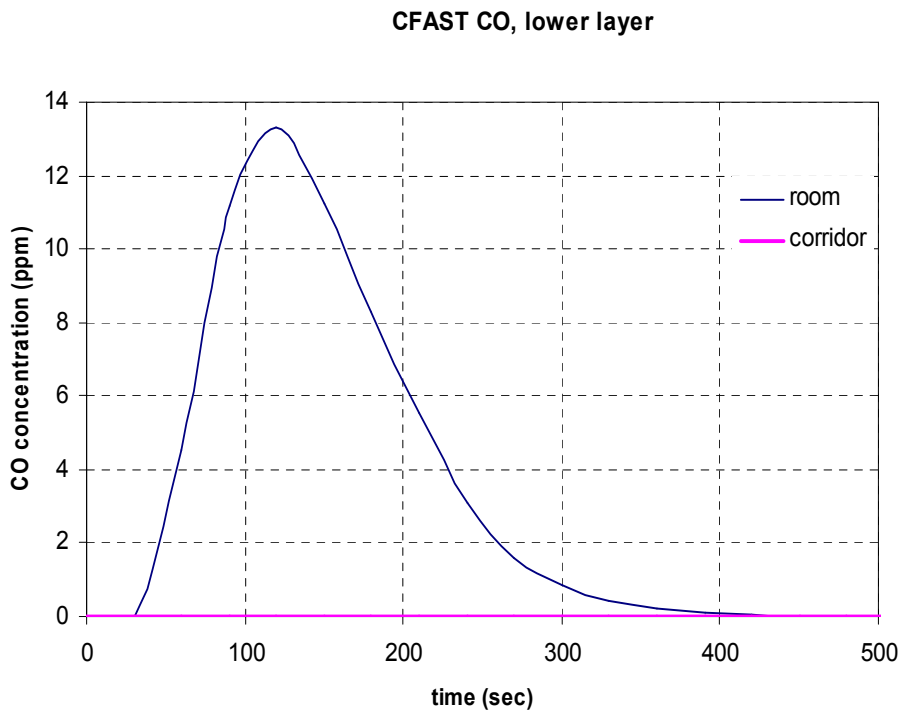
Διάγραμμα 54

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι στο κατώτατο στρώμα και στο δωμάτιο αλλά και στο διάδρομο η περιεκτικότητα σε οξυγόνο είναι περίπου ίση με την ατμοσφαιρική. Στο ανώτερο στρώμα όμως μειώνεται. Μεγαλύτερη μείωση έχουμε στο δωμάτιο. Η ελάχιστη περιεκτικότητα οξυγόνου στο διάδρομο είναι περίπου ίση προς 18%.

Επίπεδο μονοξειδίου του άνθρακα:

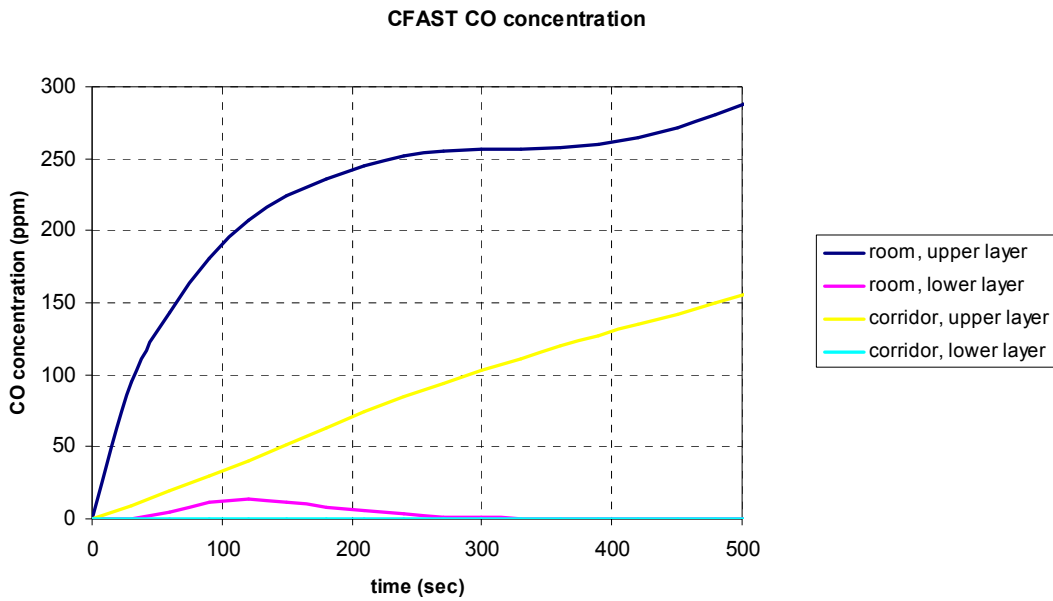


Διάγραμμα 55



Διάγραμμα 56

Και συγκεντρωτικά:



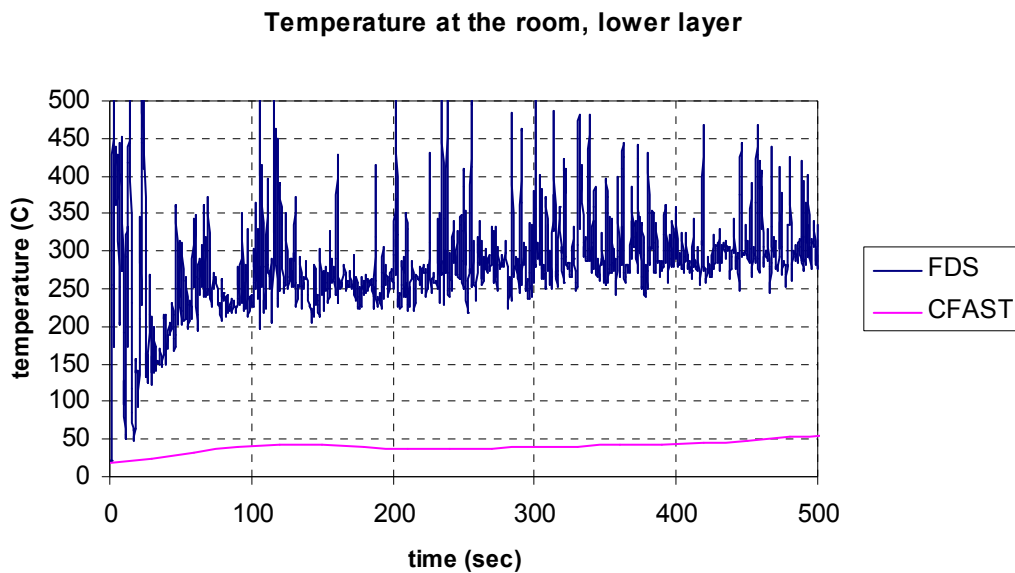
Διάγραμμα 57

Το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) παρουσιάζει όπως είναι αναμενόμενο αντίθετη συμπεριφορά από το οξυγόνο. Δηλαδή, ενώ η ποσότητα του οξυγόνου είναι μεγαλύτερη στο κατώτατο στρώμα, το επίπεδο μονοξειδίου είναι μεγαλύτερο στο ανώτερο στρώμα. Αξίζει να σημειωθεί ότι το επίπεδο μονοξειδίου στο δωμάτιο είναι περίπου διπλάσιο απ' αυτό που υπάρχει στο διάδρομο.

5.6 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

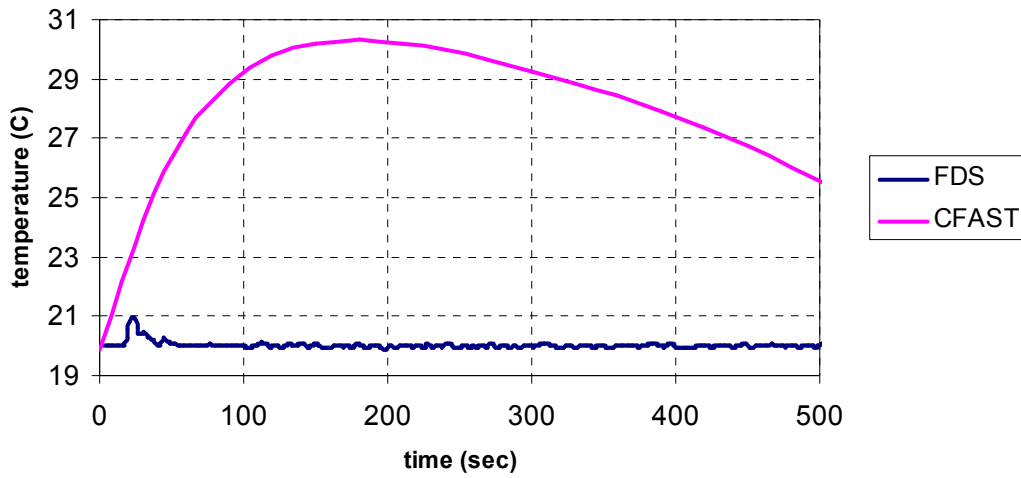
Θερμοκρασία:

Για να μπορέσουμε να συγκρίνουμε τις αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες που υπολογίζουν τα δύο προγράμματα, θα χρησιμοποιήσουμε την απεικόνιση κατά στρώματα. Οπότε θα χρησιμοποιήσουμε το επίπεδο $z=1$ m του FDS και το κατώτατο στρώμα του CFAST (lower layer). Λόγω της ύπαρξης θέσεων κατά το διάμηκες (άξονας x) παίρνουμε το μέσο όρο των θερμοκρασιών στα σημεία αυτά. Τα συγκριτικά διαγράμματα έχουν ως εξής:



Διάγραμμα 58

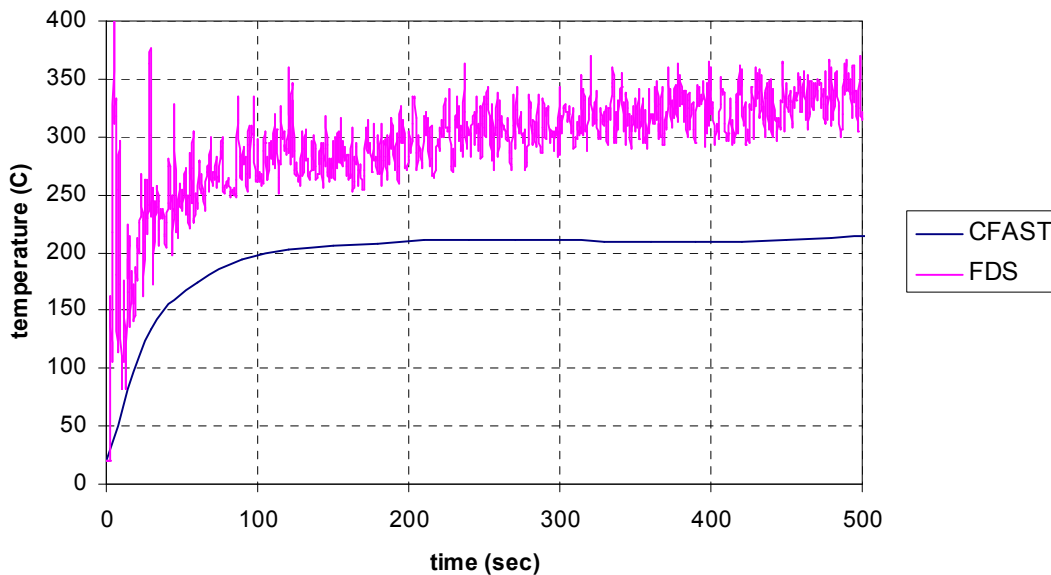
Temperature at the corridor, lower layer



Διάγραμμα 59

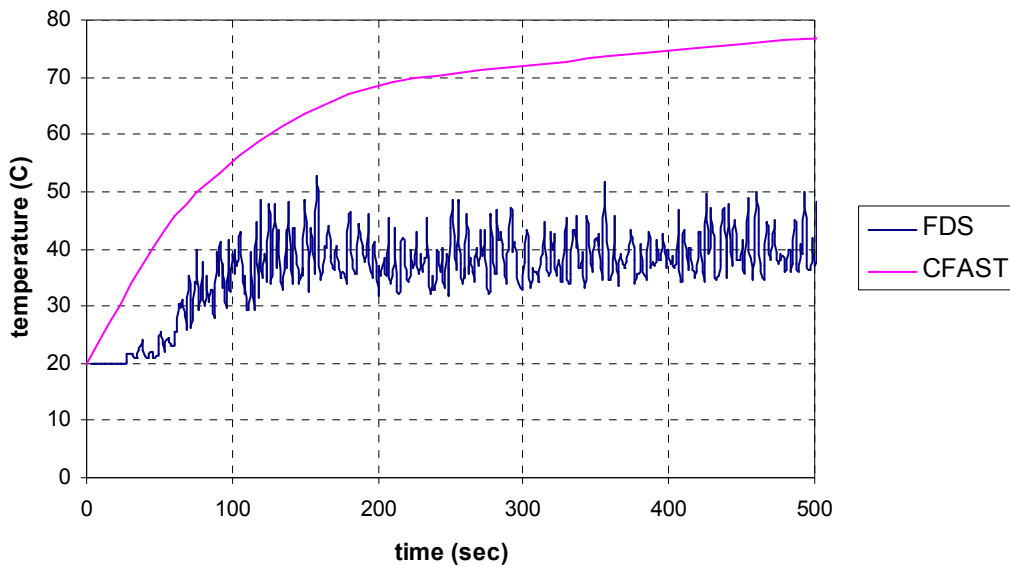
Παρατηρούμε ότι υπάρχουν αποκλίσεις στα αποτελέσματα των δύο προγραμμάτων. Ειδικότερα, η μέγιστη θερμοκρασιακή διαφορά στο δωμάτιο είναι 280 βαθμοί, με το FDS να προβλέπει μεγαλύτερη θερμοκρασία και στο διάδρομο 10 βαθμοί, με το CFAST να προβλέπει μεγαλύτερη θερμοκρασία.

Temperatures at the room, upper layer



Διάγραμμα 60

Temperatures at the corridor, upper layer



Διάγραμμα 61

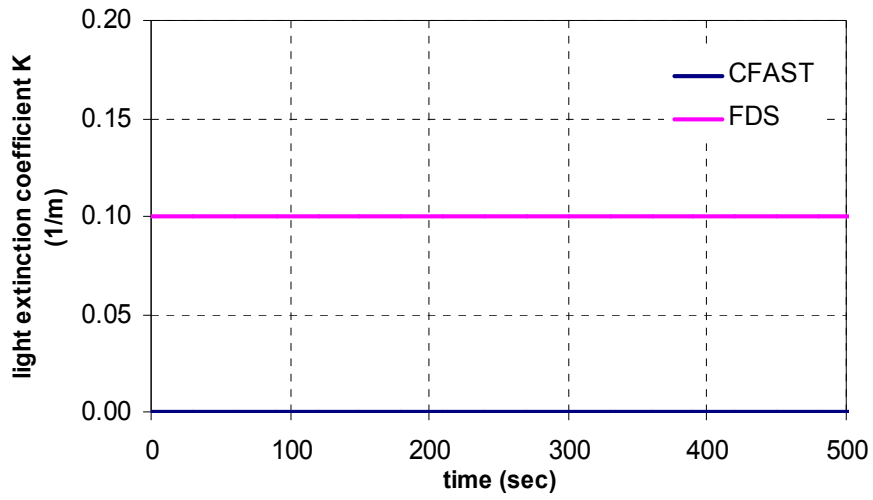
Στο ανώτερο στρώμα τα αποτελέσματα των δύο διαγραμμάτων παρουσιάζουν μεγαλύτερη σύγκλιση όσο αφορά το δωμάτιο της φωτιάς και λιγότερη όσο αφορά το διάδρομο. Ειδικότερα, η θερμοκρασιακή διαφορά στο δωμάτιο της φωτιάς είναι περίπου 100 βαθμοί με το FDS να δίνει πάλι μεγαλύτερες θερμοκρασίες. Στο διάδρομο, το CFAST δίνει κατά 40 βαθμούς μεγαλύτερη θερμοκρασία.

Ορατότητα:

Μπορούμε από τα παραπάνω διαγράμματα που αφορούν στην ορατότητα, να παρατηρήσουμε είναι ότι υπάρχει ομοιομορφία στα αποτελέσματα. Δηλαδή και τα δύο προγράμματα προβλέπουν ότι η ορατότητα θα είναι μικρότερη στο ανώτατο στρώμα του διαδρόμου και μικρότερη στο κατώτατο στρώμα του διαδρόμου.

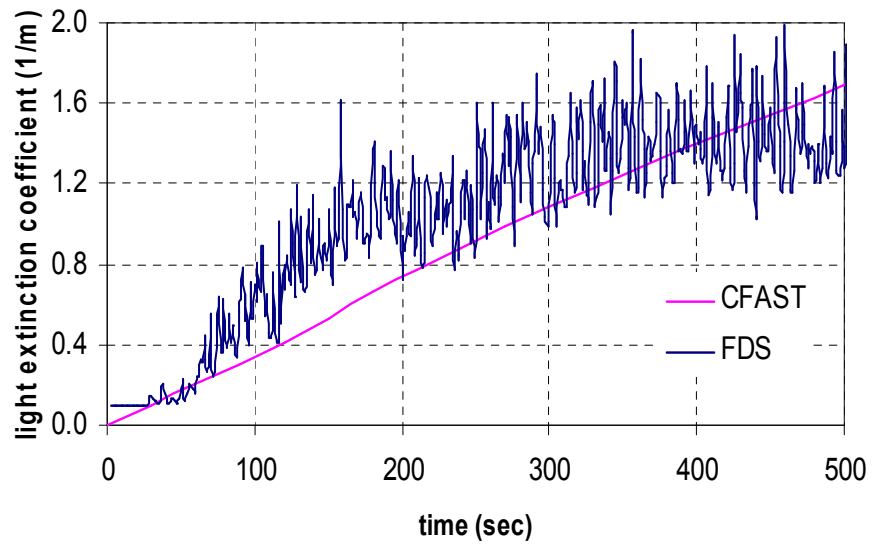
Για το κατώτατο στρώμα που αναπτύσσεται στο δωμάτιο δεν μας είναι χρήσιμο να κατασκευάσουμε το αντίστοιχο διάγραμμα δείχνοντας τη συμπεριφορά των δύο προγραμμάτων, διότι τα αποτελέσματά τους όπως φαίνονται και από τα διαγράμματα 12 & 30 είναι διαφορετικής τάξης μεγέθους. Οπότε προχωρούμε στο κατώτατο στρώμα του διαδρόμου:

Visibility at the corridor, lower layer



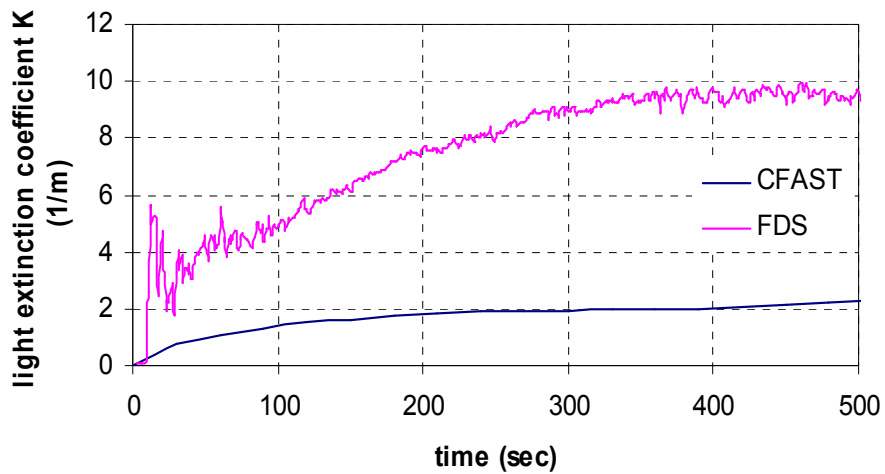
Διάγραμμα 62

Visibility at the corridor, upper layer



Διάγραμμα 63

Visibility at the room, upper layer

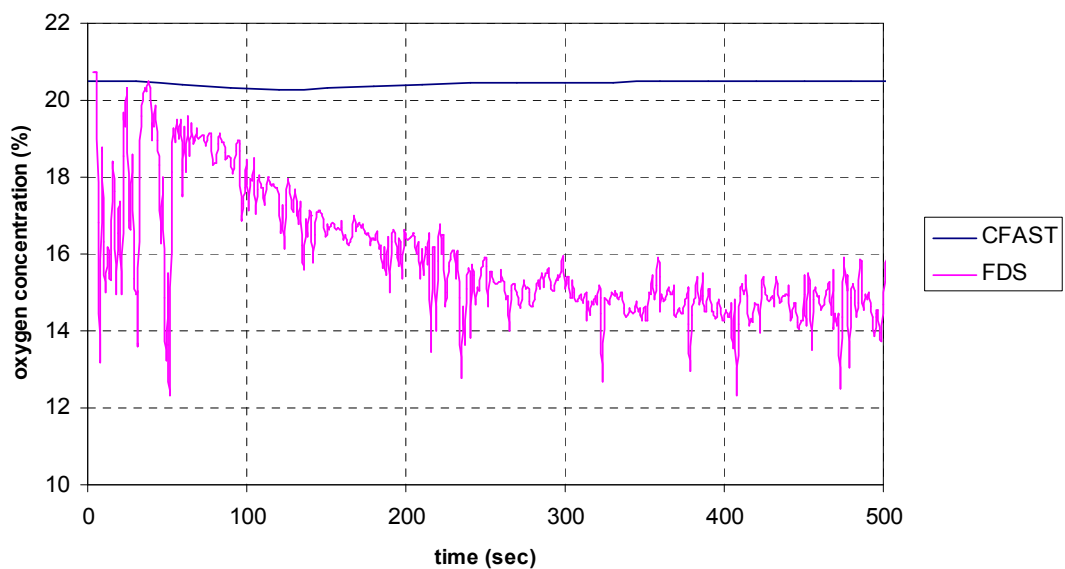


Διάγραμμα 64

Από τα παραπάνω διαγράμματα, συμπεραίνουμε ότι σύγκλιση των αποτελεσμάτων υπάρχει μόνο στο ανώτατο στρώμα του διαδρόμου. Μεγαλύτερη διαφορά έχουμε στο κατώτατο στρώμα που σχηματίζεται στο δωμάτιο της φωτιάς. Γενικά όμως μπορούμε να πούμε ότι τα διαγράμματα μοιάζουν ποιοτικά.

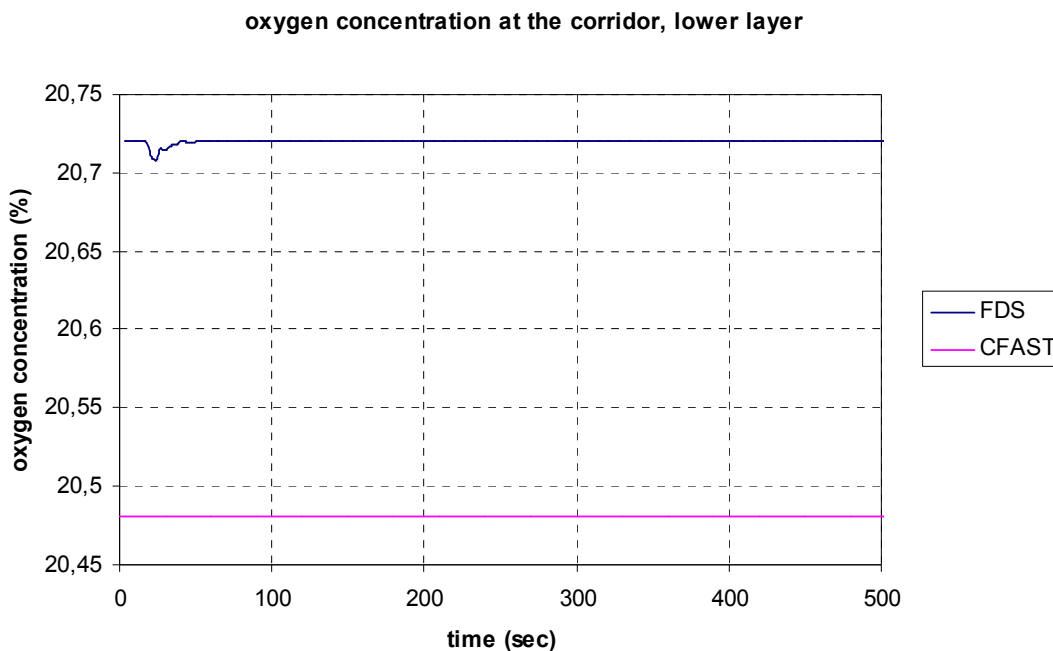
Επίπεδο Οξυγόνου:

oxygen concentration at the room, lower layer

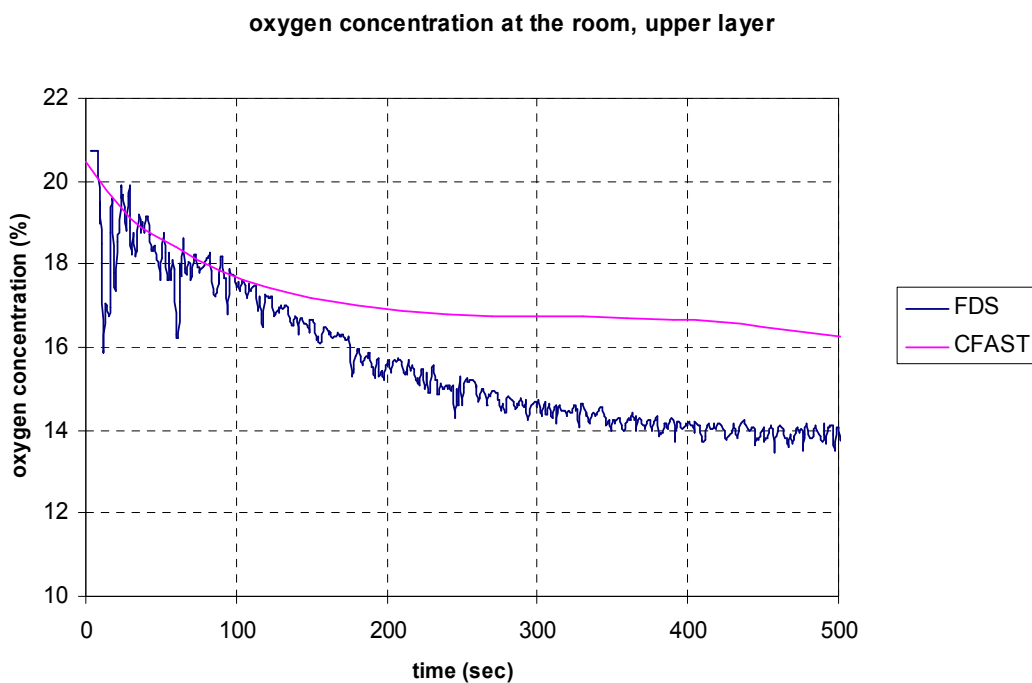


Διάγραμμα 65

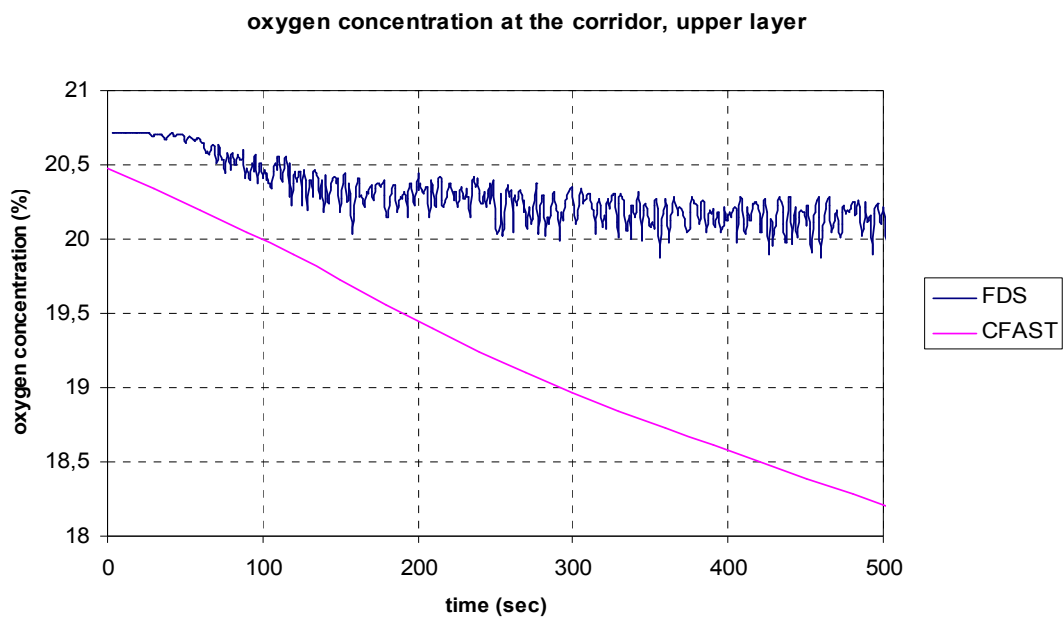
Όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα, το επίπεδο οξυγόνου στο δωμάτιο όπου υπάρχει η φωτιά είναι φυσιολογικό, πράγμα που μας προβληματίζει διότι δεν είναι ορθό. Αντιθέτως, το FDS περιγράφει καλύτερα τις συνθήκες.



Διάγραμμα 66



Διάγραμμα 67

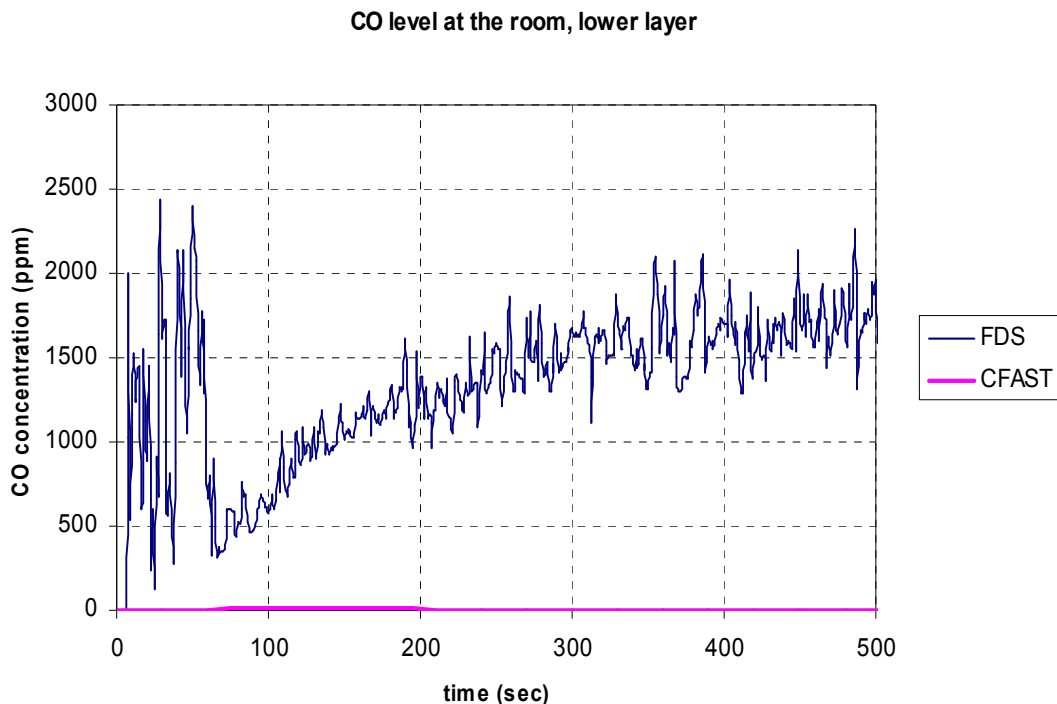


Διάγραμμα 68

Παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα παρουσιάζουν μεγαλύτερη σύγκλιση στην περίπτωση του κατώτατου στρώματος που αναπτύσσεται στο διάδρομο, όπου και τα δύο προγράμματα προβλέπουν ατμοσφαιρική περίπου συγκέντρωση οξυγόνου. Γενικότερα, το CFAST προβλέπει μικρότερη συγκέντρωση οξυγόνου από το FDS.

Επίπεδο μονοξειδίου του άνθρακα:

Για να κατασκευάσουμε τα συγκριτικά διαγράμματα για τη συγκέντρωση του μονοξειδίου του άνθρακα, ήταν αναγκαία η μετατροπή των μονάδων (συγκέντρωσης) του FDS σε μονάδες του CFAST. Μετατρέψαμε δηλαδή τα mol/mol (μονάδα η οποία εκφράζει την ποσότητα των mol του μονοξειδίου σε mol μείγματος) σε ppm (parts per million- μέρη στο εκατομμύριο). Η έκφραση αυτή δηλώνει το ποσό μιας δεδομένης ουσίας σε ένα συνολικό ποσό του 1000000, όπως το ποσοστό % εκφράζει το ποσό μιας δεδομένης ουσίας σε ένα συνολικό ποσό του 100 αντίστοιχα. Οπότε ισχύει η ισότητα: $1\mu\text{mol}/\text{mol}=1\text{ ppm}$.

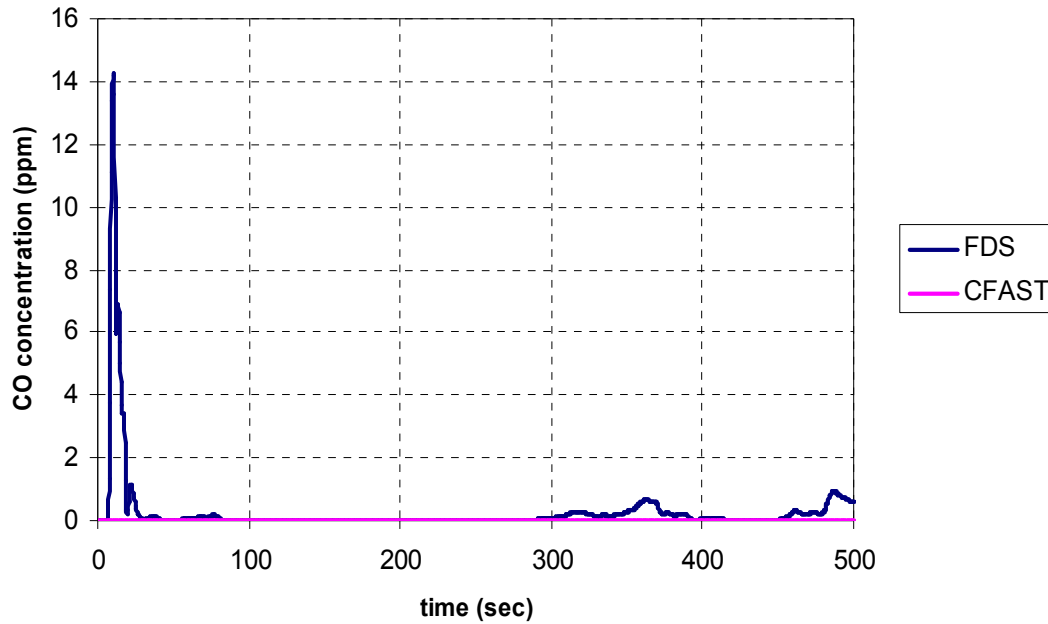


Διάγραμμα 69

Παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα των δύο προγραμμάτων είναι διαφορετικής τάξης μεγέθους, όπως και στην περίπτωση της ορατότητας. Το CFAST παρουσιάζει απουσία μονοξειδίου του άνθρακα στο κατώτατο στρώμα στην περιοχή του δωματίου, πράγμα που μας προβληματίζει, διότι δεν είναι ορθό, ενώ σύμφωνα με το διάγραμμα που ακολουθεί, στο διάδρομο τα αποτελέσματα παρουσιάζουν σύγκλιση. Και τα δύο προγράμματα εκτιμούν πολύ μικρή συγκέντρωση μονοξειδίου, αν εξαιρέσουμε το

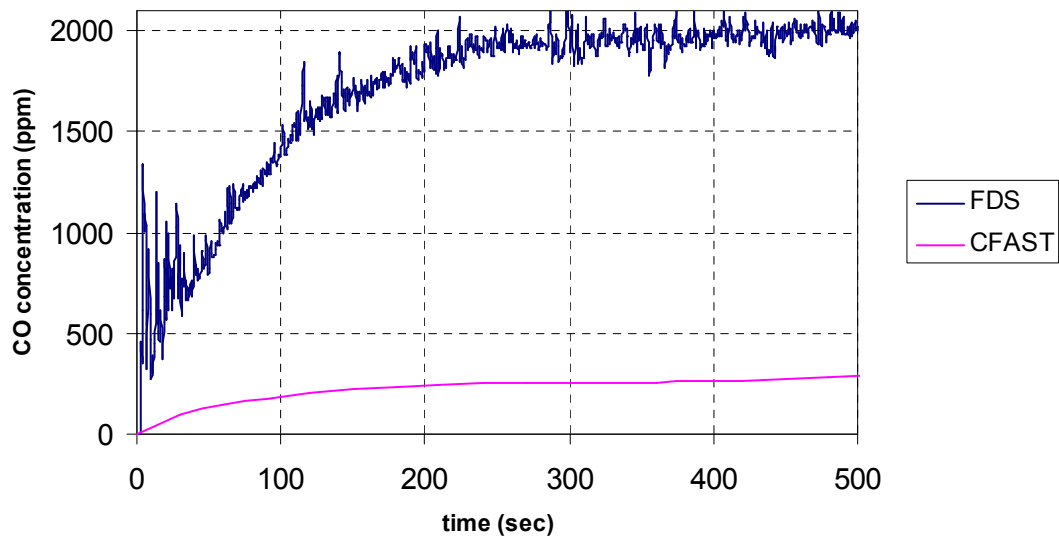
γεγονός ότι στα πρώτα 50 δευτερόλεπτα της προσομοίωσης το FDS υπολογίζει λίγο μεγαλύτερη συγκέντρωση, πιθανόν λόγω της έναρξης της πυρκαγιάς.

CO level at the corridor, lower layer



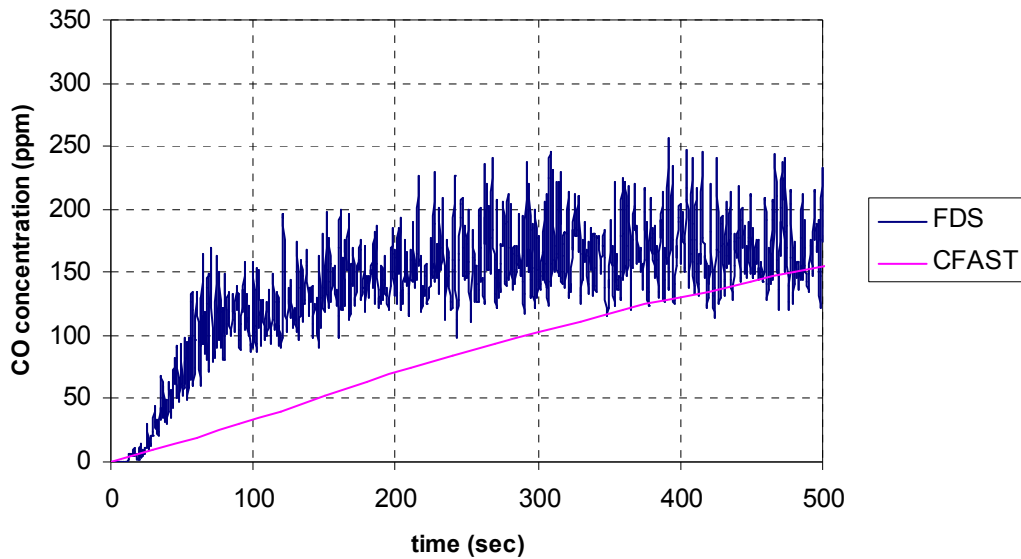
Διάγραμμα 70

CO level at the room, upper layer



Διάγραμμα 71

CO level at the corridor, upper layer



Διάγραμμα 72

Όσο αφορά στο ανώτατο στρώμα, η συμπεριφορά των δύο κωδίκων μοιάζει στην περίπτωση του διαδρόμου. Πάλι τα αποτελέσματα για το δωμάτιο είναι διαφορετικής τάξης μεγέθους.

5.7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα συμπεράσματα στα οποία καταλήγουμε έπειτα από τη σύγκριση μεταξύ των δύο προγραμμάτων είναι τα ακόλουθα:

1. Θερμοκρασία: Όσο αφορά στο δωμάτιο, τα αποτελέσματα και στα δύο στρώματα μπορούν να συγκριθούν μόνο ως προς την τάξη μεγέθους. Πιο συγκεκριμένα, το CFAST προβλέπει μεγαλύτερη θερμοκρασία στο κατώτερο στρώμα, ενώ το FDS στο ανώτερο. Στο διάδρομο τα αποτελέσματα παρουσιάζουν μεγαλύτερη σύγκλιση, με το CFAST να προβλέπει τώρα μεγαλύτερη θερμοκρασία και στα δύο στρώματα.
2. Ορατότητα: Η σύγκριση έγινε μέσω της χρήσης ενός συντελεστή που εκφράζει το πόσο γρήγορα εξαφανίζεται το φως που βλέπουμε. Ο συντελεστής αυτός συμβολίζεται με K και ουσιαστικά εκφράζει την πυκνότητα του καπνού. Και τα δύο προγράμματα προβλέπουν μικρότερη ορατότητα στο ανώτατο στρώμα. Υπάρχει ποιοτική ομοιότητα όλων των διαγραμμάτων, εκτός του διαγράμματος

που αφορά το ανώτερο στρώμα του διαδρόμου, όπου υπάρχει σύγκλιση των αποτελεσμάτων.

3. Συγκέντρωση οξυγόνου: Και τα δύο προγράμματα προβλέπουν ατμοσφαιρική συγκέντρωση οξυγόνου στο κατώτερο στρώμα που αναπτύσσεται στο διάδρομο. Το CFAST όμως παρουσιάζει φυσιολογικό επίπεδο οξυγόνου στο κατώτερο στρώμα του δωματίου, πράγμα που είναι λανθασμένο. Όσο αφορά το ανώτερο στρώμα, το CFAST προβλέπει μεγαλύτερη συγκέντρωση οξυγόνου στο δωμάτιο ενώ το FDS στο διάδρομο.
4. Συγκέντρωση μονοξειδίου του άνθρακα: Τα αποτελέσματα των δύο προγραμμάτων παρουσιάζουν ομοιότητα στην περιοχή του διαδρόμου. Μεγάλες αποκλίσεις υπάρχουν στο δωμάτιο, με το FDS να δίνει μεγαλύτερες τιμές και για τα δύο στρώματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο :

ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΦΩΤΙΑΣ ΣΤΟΝ ΑΝΘΡΩΠΟ- ΜΕΤΡΗΣΗ & ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΕΙΚΤΩΝ.

6.1 Εισαγωγή

Όλες οι φωτιές παράγουν μεγάλες ποσότητες καπνού και υψηλή θερμότητα. Οι παράγοντες αυτοί δυσκολεύουν την κίνηση και την ορατότητα, μπλοκάρουν τις εξόδους διαφυγής και καθιστούν τους ανθρώπους εντελώς ανίκανους να αντιδράσουν σε μια κατάσταση έκτακτης ανάγκης. Το στοιχείο που ενδιαφέρει περισσότερο σε τέτοιου είδους καταστάσεις είναι ο διαθέσιμος χρόνος προς εκκένωση. Το κρίσιμο κριτήριο για την προστασία της ανθρώπινης ζωής έναντι φωτιάς είναι ο διαθέσιμος χρόνος διαφυγής να είναι μικρότερος από τον απαιτούμενο χρόνο εκκένωσης (G. Hartzell, H. Emmons, 1988). Ως διαθέσιμος χρόνος διαφυγής ορίζεται το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από τη στιγμή της ανάφλεξης μέχρι τη στιγμή κατά την οποία οι επικρατούσες στο χώρο συνθήκες είναι τέτοιες, ώστε οι επιβάτες δεν μπορούν να αναλάβουν δράση και να πετύχουν τη διαφυγή τους. Τέτοιες συνθήκες δημιουργούνται λόγω:

1. Εισπνοής ασφυξιογόνων αερίων, τα οποία προκαλούν απώλεια των αισθήσεων και οδηγούν σε δηλητηρίαση (toxicity).
2. Έκθεσης σε θερμότητα λόγω συναγωγής ή ακτινοβολίας (exposure to heat).
3. Παρεμπόδιση της ορατότητας λόγω πυκνού καπνού (visibility impairment).

Στη συνέχεια θα δούμε πώς μπορούμε να ποσοτικοποιήσουμε κάθε έναν από τους παραπάνω παράγοντες ώστε να μπορούμε να σχεδιάζουμε αποτελεσματικά την ενεργητική και παθητική προστασία έναντι φωτιάς πάνω σ' ένα πλοίο. Υπενθυμίζεται εδώ ότι η παθητική προστασία περιλαμβάνει την υποδιαίρεση του πλοίου σε οριζόντιες και κάθετες ζώνες με θερμικά και κατασκευαστικά όρια, περιορισμένη χρήση εύφλεκτων υλικών, προστασία των εξόδων διαφυγής, κλπ. Η ενεργητική προστασία περιλαμβάνει την ύπαρξη φορητών πυροσβεστήρων, αυτομάτων συστημάτων καταιονιστήρων, αυτομάτων συστημάτων ανίχνευσης του καπνού στο μηχανοστάσιο, τις ενδιαιτήσεις, τους χώρους φορτίου, κλπ. Τέλος, θα ασχοληθούμε με τα συμπτώματα από εισπνοή μονοξειδίου του άνθρακα ανάλογα με το χρόνο έκθεσης σ' αυτό και συμπτώματα λόγω έλλειψης οξυγόνου.

6.2 ΔΗΛΗΤΗΡΙΑΣΗ ΛΟΓΩ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΩΝ ΑΕΡΙΩΝ (Toxicity)

Τα τοξικά προϊόντα μιας πυρκαγιάς είναι ο κύριος παράγοντας τραυματισμών και θανάτων, αλλά υπάρχουσες μέθοδοι μέτρησης ή υπολογισμού των τοξικών ποσοτήτων έχουν σοβαρούς περιορισμούς (A.A. Stec et al. 2009). Πειράματα φωτιάς μεγάλης κλίμακας έχουν χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του κινδύνου λόγω τοξικών αερίων. Όμως τα πειράματα αυτά είναι πολύ ακριβά και επιπλέον τα πειράματα μικρής κλίμακας συχνά προσομοιάζουν ελλειπώς τις συνθήκες πλήρους κλίμακας. Έτσι έχουν δημιουργηθεί ορισμένοι δείκτες που μας βοηθούν να ποσοτικοποιήσουμε το κίνδυνο λόγω των αερίων αυτών. Ένας από αυτούς τους δείκτες ονομάζεται FED (Fractional Effective Dose- Κλασματική δραστική δόση) και περιγράφει τη μη ανεκτή από τον ανθρώπινο οργανισμό δόση (Incapacitating dose) λόγω της αύξησης των συγκεντρώσεων του διοξειδίου και μονοξειδίου του άνθρακα και της ταυτόχρονης μείωσης της συγκέντρωσης του οξυγόνου. Ο δείκτης αυτός δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$FED_{IN} = FED_{CO} \cdot V_{CO_2} + FED_{O_2}, \text{ όπου:}$$

FED_{IN} : Fractional Effective Dose of an incapacitating dose (Κλασματική δραστική δόση, μη ανεκτή από τον άνθρωπο)

FED_{CO} : Fractional Effective Dose of Carbon Monoxide (Κλασματική δραστική δόση μονοξειδίου του άνθρακα). Δίνεται από τη σχέση:

$$FED_{CO} = \sum_{t1}^{t2} \frac{K \cdot [CO]^{1.036}}{D} \cdot \Delta t, \text{ όπου:}$$

Δt [min]: το χρονικό διάστημα που εξετάζουμε

[CO] [ppm]: η μέση συγκέντρωση του μονοξειδίου στο διάστημα Δt .

K,D : Σταθερές που σχετίζονται με τη δραστηριότητα του ανθρώπου. Οι τιμές τους φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 3

Δραστηριότητα	K	D
Ξεκούραση	2.81945×10^{-4}	40
Ελαφριά εργασία	8.29250×10^{-4}	30
Βαριά εργασία	1.65850×10^{-3}	20

Αξίζει να σημειωθεί ότι το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), αν και δεν είναι τοξικό, το λαμβάνουμε υπ' όψη μας διότι σε συγκεντρώσεις μεγαλύτερες του 5% δυσκολεύει την αναπνοή. Επιπλέον, ο υπεραερισμός ενός χώρου, δηλαδή η (συνεχής) εισαγωγή καθαρού αέρα μπορεί να αυξήσει το ρυθμό με τον οποίο παράγονται άλλα τοξικά αέρια, όπως είναι το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) κι επομένως να μειωθεί ο χρόνος ανοχής κι άρα ο χρόνος μέχρι το θάνατο. Για να ληφθεί υπ' όψη αυτή η αύξηση της συγκέντρωσης των τοξικών αερίων λόγω του υπεραερισμού εισάγεται ο παράγοντας V_{CO_2} , ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$V_{CO_2} = \frac{\exp(0.1903x\% CO_2 + 2.0004)}{7.1}, \text{ όπου:}$$

%CO₂: είναι το ποσοστό του διοξειδίου του άνθρακα στο διαμέρισμα που εξετάζουμε.

Ομοίως, η κλασματική δραστική δόση για την έλλειψη οξυγόνου δίνεται από τη σχέση:

$$FED_{O_2} = \sum_{t1}^{t2} \frac{1}{\exp[8.13 - 0.54(20.9\% - \%O_2)]} \cdot \Delta t, \text{ όπου:}$$

(20.9%- %O₂) είναι η ποσοστιαία μείωση του οξυγόνου στο χρονικό διάστημα Δt.

Σημειώνεται ότι όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, ποσοστό οξυγόνου 20.9% αντιστοιχεί στο κανονικό ατμοσφαιρικό επίπεδο οξυγόνου.

6.3 ΡΕΥΜΑΤΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ (ΛΟΓΩ ΣΥΝΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ)

Η θερμότητα λόγω συναγωγής έχει να κάνει με τη θερμοκρασιακή διαφορά του ανθρωπίνου σώματος με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος χώρου. Έχουν γίνει μελέτες σχετικά με το τι ρόλο παίζει η θέση με την έννοια της στάσης ενός ανθρώπου (πχ. Είναι όρθιος, κάθεται στο πάτωμα, κάθεται σε μια καρέκλα, κλπ) στη μεταφορά θερμότητας λόγω συναγωγής (Y. Kurazumi et al. 2008). Η θερμότητα λόγω ακτινοβολίας είναι η θερμότητα που νιώθει κάποιος όταν βρίσκεται κοντά σε μια φωτιά και προφανώς όσο πλησιάζουμε στη φωτιά γίνεται εντονότερη. Επιπλέον, κατά την εκπομπή της θερμότητας αυτή στην ατμόσφαιρα, η έντασή της μειώνεται λόγω της απορρόφησης στην ατμόσφαιρα υδρατμών και διοξειδίου του άνθρακα. Έχουν διεξαχθεί αρκετά πειράματα σχετικά με την αντοχή του ανθρώπου σε αυτό το είδος θερμότητας, ανάλογα με το είδος των ρούχων που φοράει (P. Raj, 2008). Έχει βρεθεί ότι ένας μέσος ενήλικας μπορεί να αντέξει, χωρίς μεγάλο πόνο ή σοβαρό τραυματισμό, ρεύμα θερμότητας λόγω ακτινοβολίας ίσο προς 5 kW/m²

για διάστημα 30 δευτερολέπτων. Ένδυση με λεπτά ρούχα μπορεί να μειώσει το ρεύμα θερμότητας στο δέρμα κατά το μισό ή κατά το 1/3. Για παράδειγμα, αν το ρεύμα θερμότητας που εφαρμόζεται σ' έναν άνθρωπο έξω από τα ρούχα του είναι 5 kW/m^2 , το δέρμα του θα νιώσει τα $1.67\text{-}2.5 \text{ kW/m}^2$.

Υπάρχουν τρεις βασικοί τρόποι με τους οποίους μπορεί η έκθεση σε θερμότητα να οδηγήσει σε θάνατο. Οι τρόποι αυτοί είναι οι εξής (G. Hartzell, H. Emmons, 1988) :

- Υπερθερμία
- Επιφανειακά εγκαύματα
- Καταστροφή των αναπνευστικών οδών

Γενικά, έκθεση μικρής διάρκειας σε μεγάλη θερμοκρασία ή μεγάλο ρεύμα θερμότητας ακτινοβολίας είναι λιγότερο ανεκτή από έκθεση μεγαλύτερης διάρκειας σε μικρότερη θερμοκρασία ή ρεύμα θερμότητας. Μπορεί να εφαρμοστεί μια μεθοδολογία παρόμοια με αυτή που παρουσιάσαμε για τα τοξικά αέρια. Συνεπώς, η συνολική δραστική δόση θερμότητας (Fractional Effective Dose of Heat) κατά την έκθεση ενός ανθρώπου σε αυτήν υπολογίζεται από τη σχέση:

$$FED_{HEAT} = \sum_{t_1}^{t_2} \left(\frac{1}{t_{Irad}} + \frac{1}{t_{Iconv}} \right) \cdot \Delta t, \text{ όπου:}$$

t_{Irad} [min]: ο χρόνος που χρειάζεται για να καεί το δέρμα λόγω θερμότητας ακτινοβολίας. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, μια ανεκτή τιμή είναι τα 2.5 kW/m^2 .

Για τιμές μεγαλύτερες ($\dot{q}_{rad} \geq 2.5 \text{ kW/m}^2$), ο χρόνος t_{Irad} μειώνεται πολύ γρήγορα, σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$t_{Irad} = 1.33 \cdot (\dot{q}_{rad})^{-\frac{4}{3}}, \text{ όπου } \dot{q}_{rad} [\text{kW/m}^2] \text{ είναι το ρεύμα θερμότητας λόγω ακτινοβολίας}$$

t_{Iconv} [min]: ο χρόνος που οδηγεί σε ανυπόφορη από τον άνθρωπο κατάσταση κάτω από συνθήκες έκθεσης σε θερμότητα συναγωγής σε περιβάλλον με αέρα που περιέχει λιγότερο από 10% κατ'όγκον υδρατμό. Δίνεται από τη σχέση:

$$t_{Iconv} = K_1 \cdot T^{K_2}, \text{ όπου:}$$

T [°C]: Η θερμοκρασία

K_1, K_2 : αδιάστατες σταθερές οι τιμές των οποίων εξαρτώνται από την έκταση του ρουχισμού:

Πίνακας 4

	K_1	K_2
Για ρούχα που καλύπτουν όλο το σώμα	4.1×10^8	-3.61
Για πιο ελαφριά ή καθόλου ρούχα	5.0×10^7	-3.40

6.4 ΟΡΑΤΟΤΗΤΑ

Η παρεμπόδιση της ορατότητας βασισμένη στη χρήση του δείκτη FEC (Fractional Effective Concentration και όχι Dose, διότι μιλάμε για καπνό) υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$FEC_{SMOKE} = OD/0.2, \text{ για μικρούς χώρους και αποστάσεις με μέγιστη ορατότητα } 5\text{m}$$

$$FEC_{SMOKE} = OD/0.08, \text{ για μεγάλους χώρους και αποστάσεις με μέγιστη ορατότητα } 10\text{m}$$

Όπου:

OD [1/m] είναι η οπτική πυκνότητα του καπνού. Στην παραπάνω σχέση, η συγκέντρωση του καπνού εκφράζεται σαν κλάσμα της συγκέντρωσης που θεωρείται ότι επηρεάζει σημαντικά τη δυνατότητα διαφυγής. Όταν $FEC_{SMOKE, total} = 1$, σημαίνει ότι το επίπεδο της ορατότητας εμποδίζει οποιαδήποτε προσπάθεια διαφυγής.

6.5 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ ΣΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

5.

Στην παράγραφο αυτή, θα υπολογίσουμε αρχικά, σύμφωνα με τη σχέσεις που παρουσιάστηκαν παραπάνω τη μη ανεκτή από τον άνθρωπο κλασματική δόση επικίνδυνων αερίων και θερμότητας και τη μη ανεκτή συγκέντρωση καπνού, για τις συνθήκες προσομοίωσης που περιγράφηκαν αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο. Θα χρησιμοποιήσουμε τα αποτελέσματα από το CFAST και ειδικότερα αυτά που αφορούν τις συνθήκες στο ανώτατο στρώμα που αναπτύσσεται στο διάδρομο. Σημειώνεται ότι οι

τιμές μη επιβίωσης αντιστοιχούν σε FED=1 (για όλους τους παράγοντες που εξετάσαμε) (Peacock et al. 2004)

➤ Τοξικότητα

Χρησιμοποιούμε τη σχέση:

$$\boxed{FED_{IN} = FED_{CO} \cdot V_{CO_2} + FED_{O_2}} \quad (1)$$

Επειδή όλα τα μεγέθη που υπεισέρχονται στη σχέση αυτή μας είναι άγνωστα, προχωρούμε στον υπολογισμό τους:

$$FED_{CO} = \sum_{t1}^{t2} \frac{K \cdot [CO]^{1.036}}{D} \cdot \Delta t \quad (2), \text{ όπου:}$$

$K = 2,81945 \cdot 10^{-4}$ και $D = 40$, διότι θεωρούμε ότι η πυρκαγιά ξεσπάει τη νύχτα, οπότε και οι περισσότεροι επιβάτες κοιμούνται.

$\Delta t = 500 \text{ sec} = 8,33 \text{ min}$, ο χρόνος προσομοίωσης

$$\sum_{t1}^{t2} [CO]^{1.036} \Delta t = 787,68 \text{ ppm}, \text{ η συγκέντρωση του μονοξειδίου του άνθρακα στο}$$

διάστημα Δt .

Τελικά, έπειτα από πράξεις έχουμε ότι: $FED_{CO} = 4,93 \cdot 10^{-3}$. (3)

$$\text{Όπως αναφέραμε και παραπάνω, ισχύει: } V_{CO_2} = \frac{\exp(0.1903x\%CO_2 + 2.0004)}{7.1} \quad (4)$$

Σύμφωνα με το CFAST το ποσοστό του διοξειδίου του άνθρακα στο διάδρομο είναι ίσο προς: $\%CO_2=0,535$.

Έπειτα από πράξεις, έχουμε ότι: $V_{CO_2} = 1,1527$ (5)

Τέλος, υπολογίζουμε τη δραστική δόση έλλειψης οξυγόνου, σύμφωνα με τη σχέση:

$$FED_{O_2} = \sum_{t1}^{t2} \frac{1}{\exp[8.13 - 0.54(20.9\% - \%O_2)]} \cdot \Delta t \quad (6), \text{ όπου:}$$

$\Delta t = 500 \text{ sec} = 8,33 \text{ min}$, ο χρόνος προσομοίωσης και

$\%O_2$ το ποσοστό του οξυγόνου στο διάδρομο, το οποίο είναι ίσο προς $\%O_2=19,25$.

Έπειτα από πράξεις έχουμε ότι: $FED_{O_2} = 5,98 \cdot 10^{-3}$ (7)

Αντικαθιστώντας τις (3), (5), (7) στην (1) έχουμε τελικά ότι:

$$\boxed{FED_{IN} = 0,012 < 1} \quad (8)$$

Συμπεραίνουμε ότι οι άνθρωποι όσο αφορά στα τοξικά αέρια, μπορούν να επιβιώσουν στις συνθήκες προσομοίωσής μας.

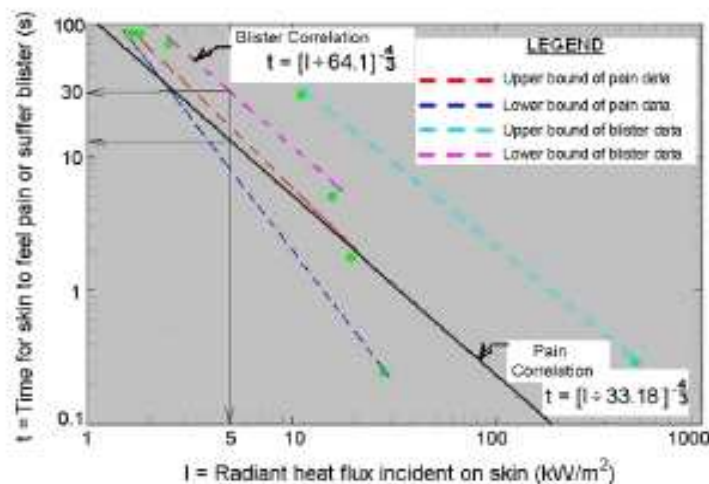
➤ **Θερμότητα**

Για την εκτίμηση της μη ανεκτής δόσης θερμότητας (λόγω ακτινοβολίας και συναγωγής), θα χρησιμοποιήσουμε τη σχέση:

$$FED_{HEAT} = \sum_{t1}^{t2} \left(\frac{1}{t_{Irad}} + \frac{1}{t_{Iconv}} \right) \cdot \Delta t \quad (9), \text{ όπου:}$$

t_{Irad} [min]: ο χρόνος που χρειάζεται για να καεί το δέρμα λόγω θερμότητας ακτινοβολίας. Μια ανεκτή τιμή είναι τα 2.5 kW/m^2 .

Επειδή το CFAST εμφανίζει το μέγεθος αυτό ως ποσοστό του συνολικού εφαρμοζόμενου ρεύματος θερμότητας και επειδή στην προσομοίωσή μας έχουμε επιλέξει ρεύμα θερμότητας ίσο προς 550 kW/m^2 , το οποίο δεν είναι συγκρίσιμο με την «ανεκτή» τιμή των 2.5 kW/m^2 , θεωρούμε ότι στο ανώτερο στρώμα του διαδρόμου, λαμβάνουμε υπ' όψη μας μόνο τη θερμότητα λόγω συναγωγής.



Διάγραμμα 73

Ισχύει: $t_{Iconv} = K_1 \cdot T^{K_2}$ (11), όπου $K_1 = 5 \cdot 10^7$, $K_2 = -3.40$, υποθέτοντας ότι οι επιβάτες φορούν ελαφριά ρούχα (κατά τη διάρκεια του ύπνου) και $T=63,87^\circ \text{ C}$, η μέση θερμοκρασία που αναπτύσσεται στο ανώτατο στρώμα του διαδρόμου.

Έπειτα από πράξεις, έχουμε: $t_{Iconv} = 36,5 \text{ sec} = 0,6083 \text{ min}$ (11)

Από την (9) λόγω (10) και (11) προκύπτει: $FED_{HEAT} = 0,3127 < 1$ (12)

Η τιμή που βρήκαμε για τον δείκτη FED δεν ξεπερνάει τη μονάδα, πράγμα που συνεπάγεται ότι είναι δυνατή η επιβίωση. Το αποτέλεσμα αυτό δεν κρίνεται λογικό,

καθώς το ρεύμα θερμότητας που έχουμε εφαρμόσει στην περίπτωση που εξετάζουμε είναι –όπως αναφέρθηκε και παραπάνω- πολύ υψηλό και ο χρόνος προσομοίωσης πολύ μικρός. Το αποτέλεσμα αυτό, μας κάνει να υποψιαζόμαστε ότι το CFAST γενικώς υποεκτιμά τις τιμές των μεγεθών που εξετάζουμε.

➤ Ορατότητα

Για την εκτίμηση της μη ανεκτής συγκέντρωσης καπνού, θα χρησιμοποιήσουμε τη σχέση:

$$FEC_{SMOKE} = OD / 0.08 \quad (13)$$

Η σχέση αυτή αναφέρεται σε μεγάλους χώρους και αποστάσεις με μέγιστη ορατότητα 10m.

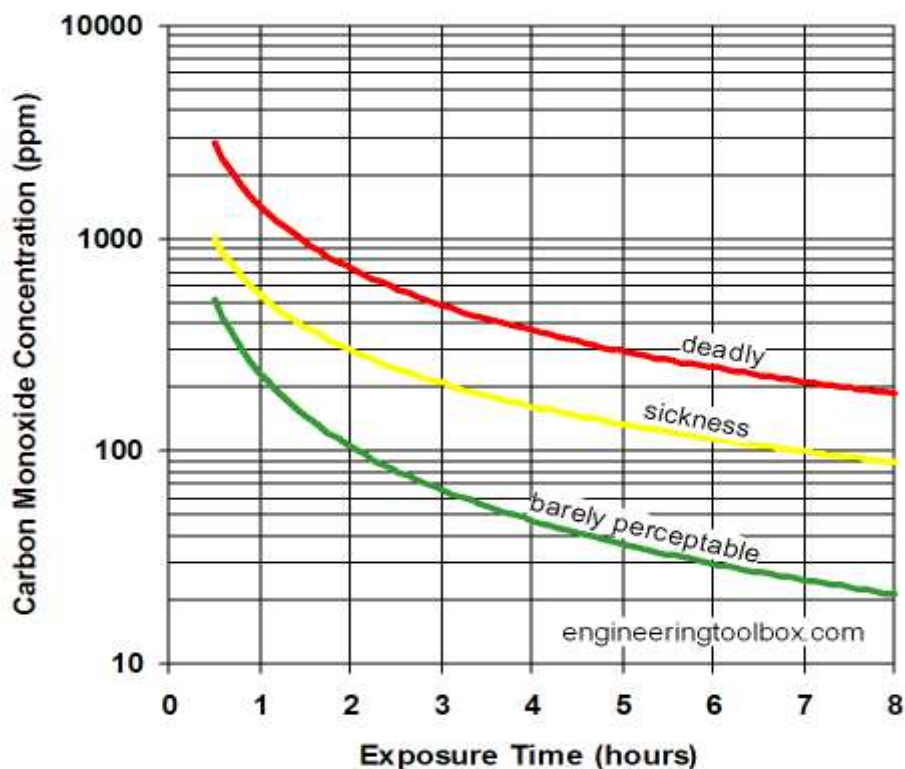
Από τα αποτελέσματα του CFAST έχουμε ότι η μέση οπτική πυκνότητα (optical density) στο ανώτερο στρώμα του διαδρόμου είναι ίση προς: $OD=0,39 \text{ 1/m}$ (14)

Οπότε από τη σχέση (13), λόγω της (14) προκύπτει ότι : $FEC_{SMOKE} = 4,875 > 1$, πράγμα που σημαίνει ότι το επίπεδο της ορατότητας εμποδίζει οποιαδήποτε προσπάθεια διαφυγής. Η επιβίωση είναι δυνατή έως ότου:

$$FEC_{SMOKE} = 1 \Rightarrow OD / 0.08 = 1 \Rightarrow OD = 0.08 \text{ 1/m}$$

Το επίπεδο αυτό ορατότητας επιτυγχάνεται στα 60 δευτερόλεπτα από την έναρξη της προσομοίωσης.

6.6 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΣΥΜΠΤΩΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΕΙΣΠΝΟΗ ΜΟΝΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ



Πηγή: engineeringtoolbox.com

Πίνακας 5

CO [ppm]	Χρόνος έκθεσης	Συμπτώματα
35	8 ώρες	Μέγιστη επιτρεπτή έκθεση σε εργασιακό χώρο σε διάστημα 8ώρου (σύμφωνα με Occupational Safety and Health Administration-OSHA)
200	2-3 ώρες	Ήπιος πονοκέφαλος, κούραση, ναυτία και ζαλάδα
400	1-2 ώρες	Σοβαρός πονοκέφαλος, απειλή της ζωής έπειτα από 3 ώρες
800	45 λεπτά	Ζαλάδα, ναυτία, συσπάσεις. Αναισθησία σε διάστημα 2 ωρών και θάνατος εντός 2-3 ωρών
1600	20 λεπτά	Πονοκέφαλος, ναυτία, ζαλάδα. Θάνατος εντός 1 ώρας
3200	5-10 λεπτά	Πονοκέφαλος, ναυτία, ζαλάδα. Θάνατος εντός 1 ώρας
6400	1-2 λεπτά	Πονοκέφαλος, ναυτία, ζαλάδα. Θάνατος εντός 25-30 λεπτών
12800	1-3 λεπτά	Θάνατος

6.7 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΣΥΜΠΤΩΜΑΤΩΝ ΛΟΓΩ ΕΛΛΕΙΨΗΣ ΟΞΥΓΟΝΟΥ

Σύμφωνα με το Υπουργείο Ασφάλειας στο σπίτι των Ηνωμένων Πολιτειών (U.S Department of Homeland Security), τα συμπτώματα λόγω έλλειψης οξυγόνου φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 6

Συγκέντρωση οξυγόνου (%)	Συμπτώματα
21%	Κανένα- Κανονικό ατμοσφαιρικό επίπεδο
19.5%	Κανένα- Κατώτατο υγιές επίπεδο
15-19%	Μειωμένη αντοχή, πρόκληση πρώτων συμπτωμάτων από αυτά που αναφέρονται στη συνέχεια
12-14%	Αύξηση με κόπο του ρυθμού αναπνοής, ταχυκαρδία. Περιορισμένη αντίληψη και κρίση
10-12%	Αυξάνεται ακόμα περισσότερο ο αναπνευστικός ρυθμός, τα χείλη μελανιάζουν, πολύ μικρή κρίση
8-10%	Νοητική ανεπάρκεια, αδυναμία, αναισθησία, ναυτία
6-8%	Θανατηφόρα συγκέντρωση έπειτα από 6-8 λεπτά
4-6%	Πρόκληση αναισθησίας- κώμα εντός 40 δευτερολέπτων, συσπάσεις, η αναπνοή εξασθενεί, θάνατος

Πιθανή έλλειψη οξυγόνου στο δρόμο διαφυγής είναι δυνατό να εμποδίσει κάποιον να σκεφτεί καθαρά και λογικά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο :

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σύμφωνα με τις προσομοιώσεις που διεξάγαμε με τα προγράμματα FDS, CFAST μπορούμε να συμπεράνουμε τα ακόλουθα:

Το FDS είναι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πλήθος εφαρμογών. Οι εφαρμογές αυτές μπορεί να είναι πάρα πολύ απλές έως πάρα πολύ πολύπλοκες (από πλευράς γεωμετρίας και τύπου- εξέλιξης φωτιάς). Δίνει μια ρεαλιστική περιγραφή των αναπτυσσόμενων συνθηκών, καθώς διαθέτει πλήθος εντολών οι οποίες όταν χρησιμοποιούνται σωστά αποτυπώνεται με αρκετή ακρίβεια η πραγματικότητα. Για να χρησιμοποιηθούν όμως σωστά οι εντολές αυτές απαιτείται ο χρήστης να είναι έμπειρος, πράγμα που συνιστά και μειονέκτημα για το FDS, καθώς δεν μπορεί να το χρησιμοποιήσει οποιοσδήποτε. Σε όλα τα παραπάνω πρέπει να ληφθεί υπ'όψη και το μεγάλο υπολογιστικό κόστος εκτέλεσης ενός ή περισσότερων σεναρίων με τον κώδικα FDS.

Από την προσομοίωση του διαχωριστικού τάξης B-15 αυτό που θα πρέπει να κρατήσουμε είναι η σημαντική επίδραση του πάχους της μόνωσης στην αναπτυσσόμενη θερμοκρασία. Βέβαια, μόνωση μικρού πάχους αλλά μεγάλης πυκνότητας μπορεί να είναι ισοδύναμη με μόνωση μεγάλου πάχους και μικρής πυκνότητας. Τέτοιου είδους σενάρια εναλλακτικού σχεδιασμού μπορούν να αποτελέσουν υλικό μελλοντικής δουλειάς πάνω στο θέμα της αριθμητικής προσομοίωσης φωτιάς σε επιβατηγά πλοία. Αξίζει να σημειωθεί ότι διεξάγονται δοκιμές ελέγχου των αποτελεσμάτων του από χρήστες σε όλο τον κόσμο.

Όσο αφορά στο CFAST, μπορούμε να πούμε με ασφάλεια ότι η εκτίμηση-πρόβλεψη που μας δίνει είναι σωστή μόνο ως προς την τάξη μεγέθους. Είναι ένα πρόγραμμα απλό στη χρήση του και διευκολύνει ιδιαίτερα να το χρησιμοποιήσουμε όταν η φωτιά που θέλουμε να προσομοιάσουμε αντιστοιχεί σε μια από αυτές που υπάρχουν στη βάση δεδομένων του (πχ. Φωτιά που ξεκινάει από καναπέ). Μπορούν στο μέλλον να εξεταστούν σε βάθος οι αδυναμίες που εντοπίσαμε, όπως είναι για παράδειγμα η

περίπτωση της περιγραφής της ροής σε διάδρομο. Σημειώνεται επίσης ότι τα αποτελέσματά του αποκλίνουν αρκετά από αυτά του FDS. Οπότε καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το CFAST αξίζει να χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις που πρέπει να προσομοιάσουμε σε πολύ λίγο χρόνο μια κατάσταση, στην οποία μας ενδιαφέρει μόνο η τάξη μεγέθους των αναπτυσσόμενων μεταβλητών.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο συνδυασμός των προγραμμάτων αυτών με προγράμματα προσομοίωσης σεναρίων εκκένωσης, ώστε να υπάρχει μια πιο εκτεταμένη και ρεαλιστική προσομοίωση πραγματικών σεναρίων.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] IMO, *SOLAS chapter II-2 , Construction- Fire Protection, Fire Detection and Fire Extinction*, <http://www.mcga.gov.uk>.
- [2] P. Lois, J.Wang, A.Wall, T.Ruxton, (2004), *Formal Safety Assessment of cruise ships*, *Tourism Management* 25; 93-109.
- [3] American Society for Testing and Materials, ASTM E 1355-04, (2004), *Standard Guide for Evaluating the Predictive Capabilities of Deterministic Fire Models*.
- [4] Maritime Safety Umbrella Operations (MSUO), (2007), *Passenger Ship Safety Guidelines*.
- [5] Κ. Σπύρου, (2008), *Σχεδίαση πλοίου για ασφάλεια και περιβαλλοντική προστασία*, , Κεφ.4.
- [6] N.Nikolaou, K.Spyrou ,(2009),*Numerical fire modeling for passenger ships*, IMAM-International Maritime Association of the Mediterranean, Istanbul.
- [7] S. Kristiansen, (1991), *Maritime Transportation: Safety Management and Risk Analysis*, Elsevier Butterworth- Heinemann Productions, p. 56, 57
- [8] Marine Accident Investigation Branch (MAIB), (2006), *Report on the investigation of the fire onboard Star Princess*.
- [9] K.McGrattan, G. Forney, (2009), *Fire Dynamics Simulator (Version 5.3) User's Guide NIST Special Publication 1019-5*, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland.
- [10] J.Floyd, S.Hunt, F.Williams, P. Tatem, (2005), *A Network Fire Model for the Simulation of Fire Growth and Smoke Spread in Multiple Compartments with Complex Ventilation*,15; 199.

[11] G.Walton, W.Stuart Dols, (2008), CONTAM 2.4 User Guide and Program Documentation, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland.

[12] J. Floyd, S. Hunt, F.Williams, P. Tatem, (2004) Fire and Smoke Simulator (FSSIM) (Version 1) Theory Manual, Naval Research Laboratory, Washington.

[13] Peacock Richard D., Jones Walter W., Forney Glenn P., Reneke Paul A, (2005) NIST Special Publication 1041. CFAST – Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 6). User’s Guide.

[14] Cooper L.Y, Forney G.P, (1990), Consolidated Compartment Fire Model Computer Code Application CCFM.VENTS, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland.

[15] Mitler H.E, Rockett J.A, (1987), User’s Guide to FIRST, A Comprehensive single-room Fire Model, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland.

[16] Website της εταιρείας ANSYS:

<http://www.ansys.com/products/fluid-dynamics/cfx/>

[17] Website του οργανισμού Building Research Establishment (BRE):

<http://www.bre.co.uk>

[18] D. Baroudi, (2007) , Thermal Models for Fire Safety- Calculation of Flame Spread on Surfaces and Heating of Structures, Helsinki University of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, Laboratory of Structural Mechanics.

[19] E.R. Galea, J. Ewer, M.K Patel, S. Taylor, B. Knight, M. Petridis, (1999), Smartfire: An Intelligent CFD Based Fire Model, Journal of Fire Protection Engineering, 10; 13-27.

- [20] F.R. Steward, L. Morrison, J. Mehaffey, (1992), Full Scale Fire Tests for Ship Accommodation Quarters, Fire Technology, 28; 31-47.
- [21] W.W. Jones, G.P. Forney, (1996), Comparison of CFAST Prediction to real-scale-fire tests, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland.
- [22] P.A. Reneke, M.J. Peatross, W.W. Jones, C.L. Beyler, R. Richards, (2001), Comparison of CFAST Predictions to USCG Real- Scale Fire Tests, Journal of Fire Protection Engineering, 11; 43-68.
- [23] N.A. Dembsey, P.J. Pagni, R.B. Williamson, (1995), Compartment fire experiments: Comparison with Models, Fire Safety Journal, 25; 187-227.
- [24] Guillermo Rein, Amnon Bar-Ilan, A. Carlos Fernandez- Pello, Norman Alvares, (2006), A Comparison of Three Models for the Simulation of Accidental Fires, Journal of Fire Protection Engineering, 16; 183- 209.
- [25] Jason E. Floyd, (2002), Comparison of CFAST and FDS for Fire Simulation with the HDR T51 and T52 Tests, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland.
- [26] W.D. Davis, K.A. Notarianni, K.B. McGrattan, (1996), Comparison of Fire Model Predictions with Experiments Conducted in a Hangar with a Ceiling Height of 14.9 m, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland.
- [27] Peacock Richard D., Jones Walter W., Forney Glenn P., Reneke Paul A, (2005), NIST Special Publication 1041. CFAST – Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 6). Technical Reference Guide.
- [28] S.A. Ramsdale, M. Crooper, G.A. Tickle, J. Watt, Research Report 473- SAFETY FIRST, Final Report of AEA Technology's Contribution to the SAFETY FIRST Project, AEA Technology place, Stokes House, Warrington.

[29] U.S Department of Homeland Security (DHS) website:

<http://www.dhs.gov>

[30] G. Hartzell, H. Emmons,(1988), *The Fractional Effective Dose Model for Assessment of Toxic Hazards in Fires*, Journal of Fire Sciences, 5 ; 356-362.

[31] A.A. Stec, T.R. Hull, J.A. Purser, D.A. Purser, (2009), *Comparison of Toxic Product Yields from bench-scale to ISO room*, Fire Safety Journal, 44;62-70.

[32] Y. Kurazumi, T. Tsuchicawa, J. Ishii, K. Fukagawa, Y. Yamato, N. Matsubara, (2008), *Radiative and Convective heat transfer coefficients of the human body in natural convection*, Building and Environment, 43; 2142-2153.

[33] P.Raj, (2008), *Field tests on human tolerance to (LNG) fire radiant heat exposure and attenuation effects of clothing and other objects*, Journal of Hazardous Materials, 157; 247-259.

[34] Wartsila Ship Accommodation Systems website:

www.waskorea.co.kr

[35] SAFEDOR: “Human Life Safety-Qualitative Design Review (QDR) – D 2.5.2”, SSRC, Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Universities of Glasgow and Strathclyde, Glasgow, UK, (2007).

[27] Peacock R. D., Averill J.D, Reneke P. A., Jones W.W., (2004), *Characteristics of Fire Scenarios in Which Sublethal Effects of Smoke are Important*, Fire Technology, 40; 127-147.

[28] P. Raj, (2008), *A review of the criteria for people exposure to radiant heat flux from fires*, Journal of Hazardous Materials, 159; 61-71.

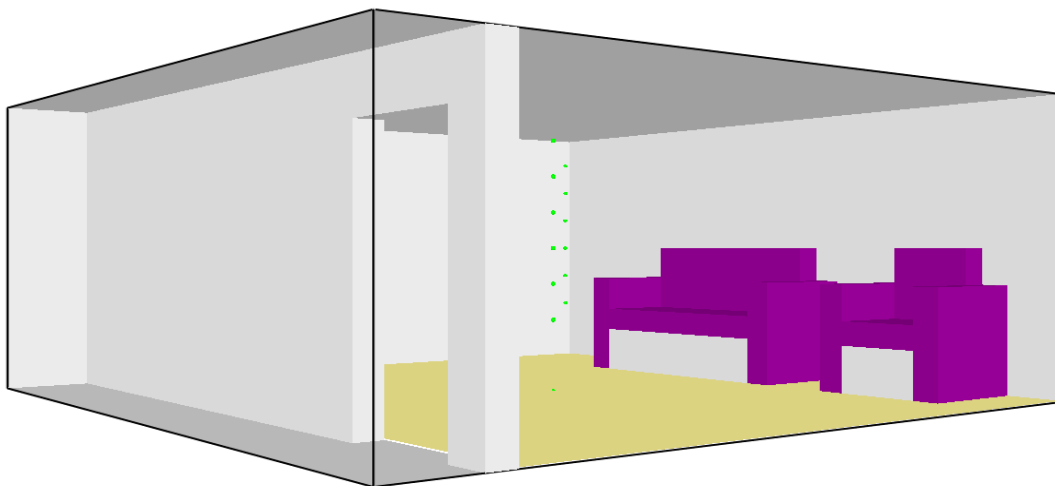
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

ΑΠΛΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΞΟΙΚΕΙΩΣΗΣ ΜΕ ΤΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ CFAST, FDS

1. ΕΞΟΙΚΕΙΩΣΗ ΜΕ ΤΟ FDS (Fire Dynamics Simulator)

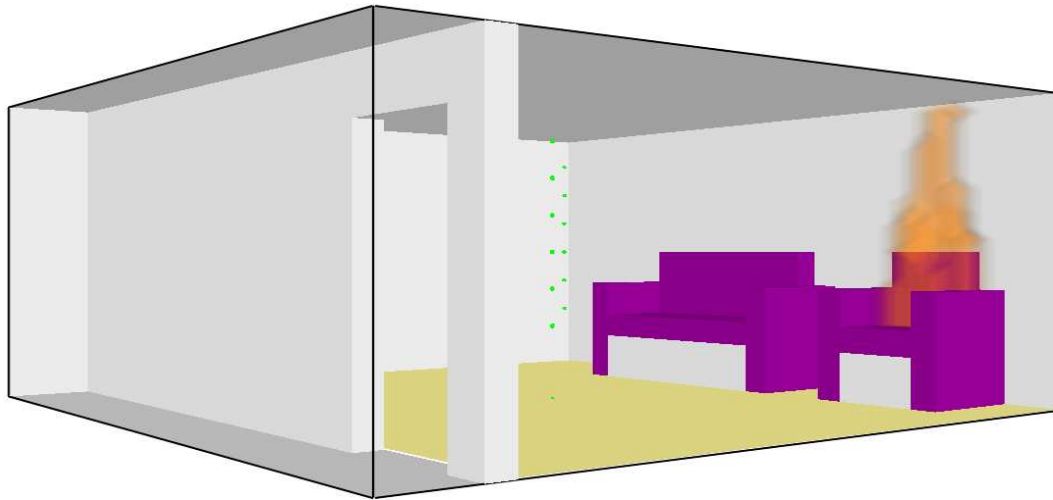
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ:

Στην παρούσα εργασία, παίρνουμε ένα από τα (έτοιμα) παραδείγματα του FDS (Fire Dynamics Simulator) το οποίο ονομάζεται `room_fire` και το τροποποιούμε. Ειδικότερα, παρουσιάζεται προσομοίωση πυρκαγιάς σε δωμάτιο με άνοιγμα (πόρτα), όπου υπάρχει ένας καναπές και δίπλα του μια πολυθρόνα. Θεωρούμε ότι η φωτιά ξεκινάει από το κάθισμα της πολυθρόνας, μέσω μιας αντίδρασης-έκρηξης και εξετάζουμε διάφορα σενάρια, τα οποία αναλύουμε στη συνέχεια. Σύμφωνα με το παράδειγμα, οι τοίχοι του διαμερίσματος είναι από γύψο και τα έπιπλα καλύπτονται από επένδυση που αποτελείται από αφρό στη μεριά με τη σύνδεσή της με τον καναπέ και από ύφασμα στην εξωτερική πλευρά. Η εξεταζόμενη γεωμετρία φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



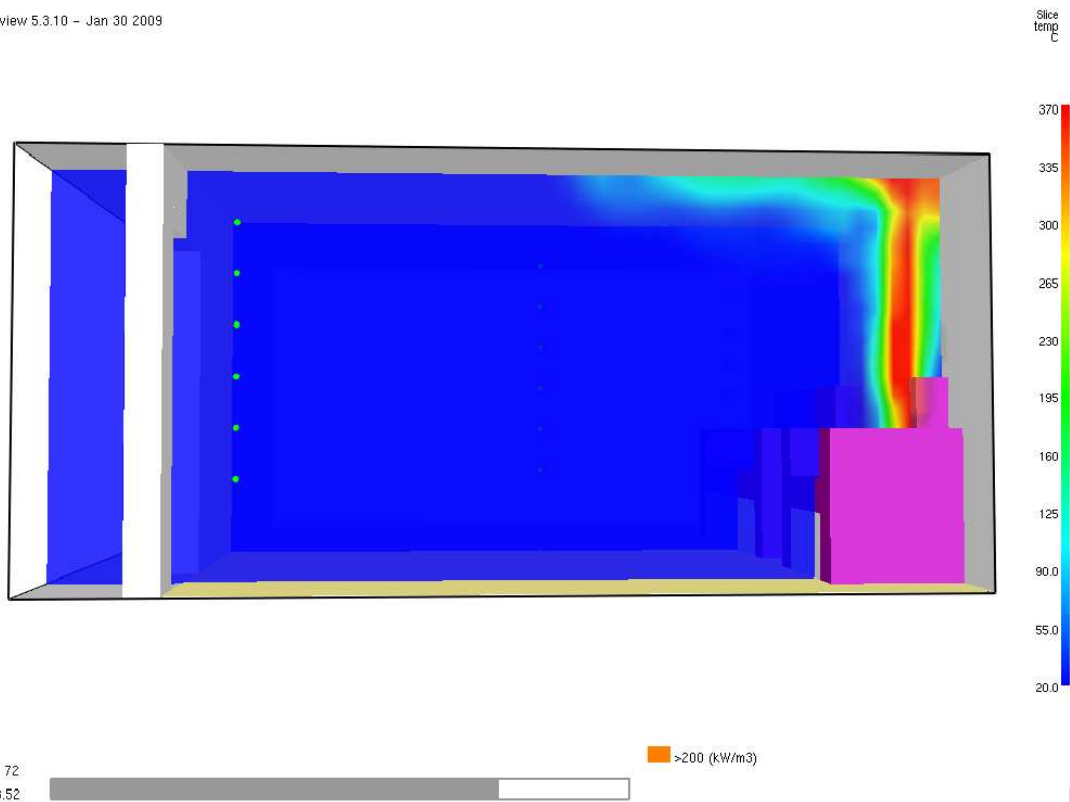
Εικόνα 1

Ακολουθεί στιγμιότυπο λίγο μετά την έναρξη της πυρκαγιάς:



Εικόνα 2

Smokeview 5.3.10 - Jan 30 2009



Εικόνα 3

Παραπάνω φαίνεται στιγμιότυπο της φωτιάς στην πλήρη ανάπτυξή της, καθώς επίσης και οι αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες. Για την καλύτερη οπτικοποίηση της θερμοκρασίας στα διάφορα σημεία έχουμε εισάγει ένα επίπεδο κάθετο στην

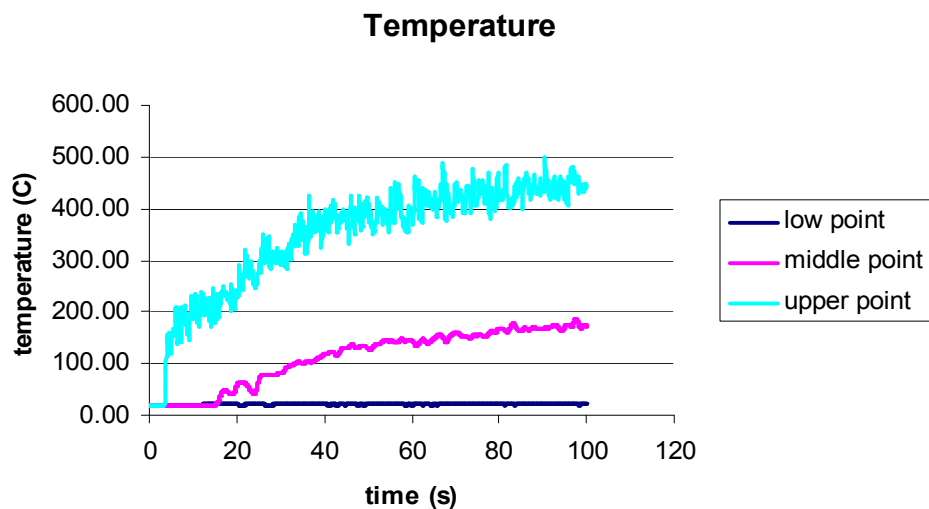
πολυθρόνα. Στο επίπεδο αυτό μετράμε εκτός από τη θερμοκρασία, τη συγκέντρωση μονοξειδίου του άνθρακα, τη συγκέντρωση οξυγόνου και την ορατότητα σε τρία σημεία: ένα σημείο στο πάτωμα, ένα άλλο στο μέσο του ύψους του διαμερίσματος και ένα τρίτο στην οροφή .

1.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ:

Ακολουθούν διαγράμματα με την περιγραφή των παραπάνω μεγεθών πρώτα για την περίπτωση χωρίς καταιονιστήρα έπειτα με καταιονιστήρα, ο οποίος θεωρούμε ότι ενεργοποιείται στους 74° C και στη συνέχεια με καταιονιστήρα ρίψης νερού με διπλή ταχύτητα. Τέλος, τρέχουμε άλλο ένα σενάριο, κατά το οποίο ελέγχουμε το ρυθμό μετάδοσης της φωτιάς με τη βοήθεια των εντολών RAMP . Συγκεντρωτικά τα σενάρια έχουν ως εξής:

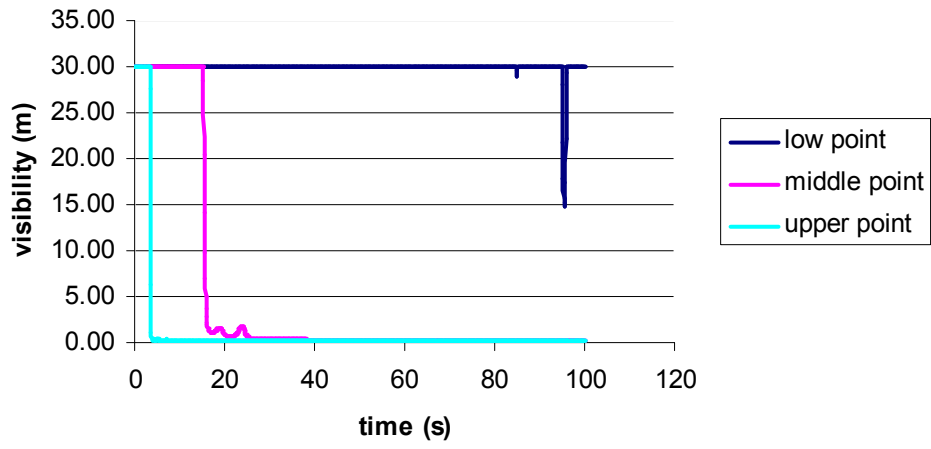
- Σενάριο 1:

Sprinkler: No



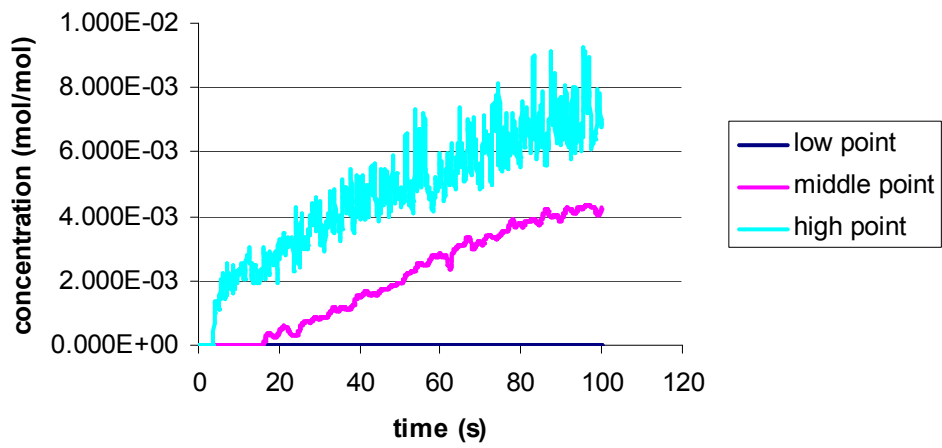
Διάγραμμα 1

Visibility



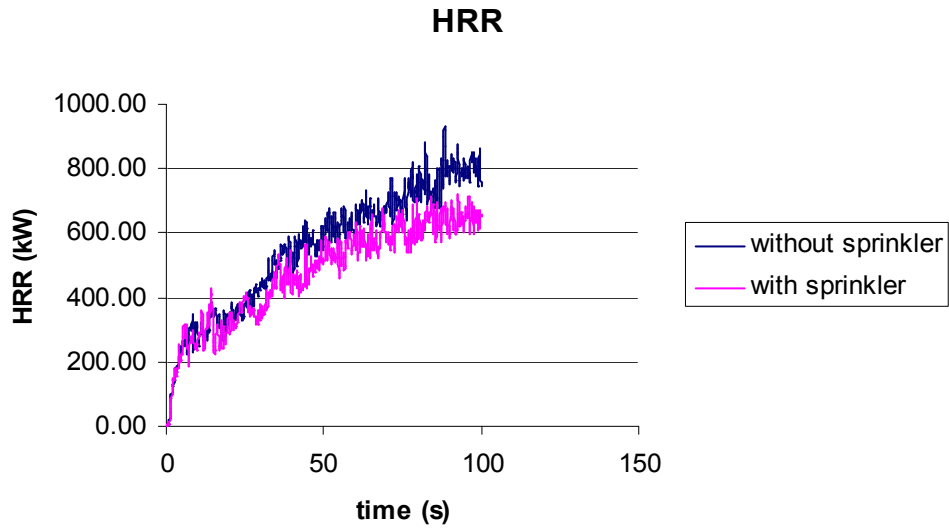
Διάγραμμα 2

CO concentration



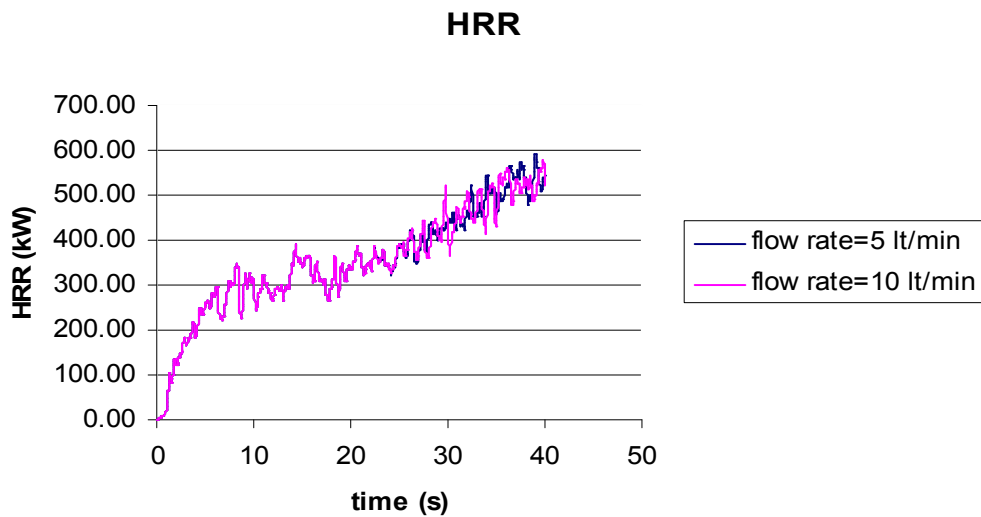
Διάγραμμα 3

- Σενάριο 2:
Sprinkler: Yes



Διάγραμμα 4

- Σενάριο 3:
Sprinkler: Yes, with double flow rate

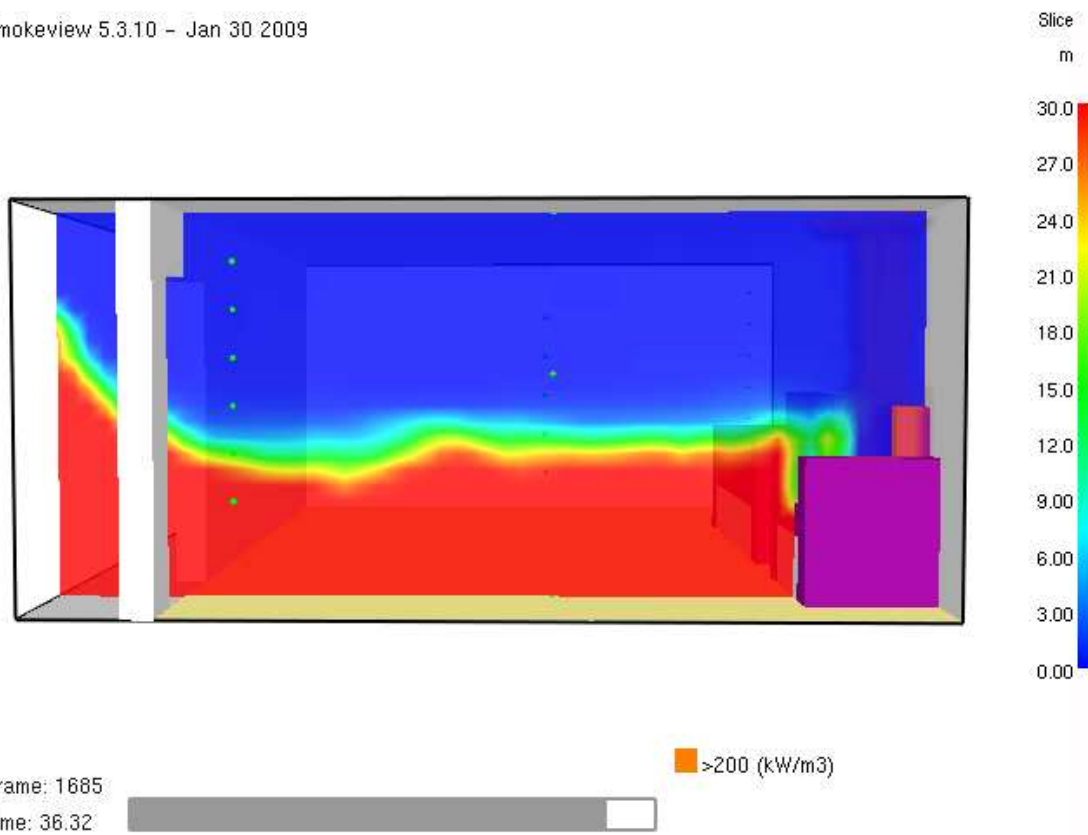


Διάγραμμα 5

Στην ακόλουθη εικόνα φαίνεται η ορατότητα σε επίπεδο κάθετο στην πόρτα, μέγεθος το οποίο είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε συνθήκες εκκένωσης. Όπως ήταν αναμενόμενο,

η ορατότητα είναι μικρότερη στα ανώτερα στρώματα, λόγω της ύπαρξης πυκνού καπνού ο οποίος φαίνεται στην εικόνα 5.

Smokeview 5.3.10 - Jan 30 2009



Εικόνα 4

Smokeview 5.3.10 - Jan 30 2009

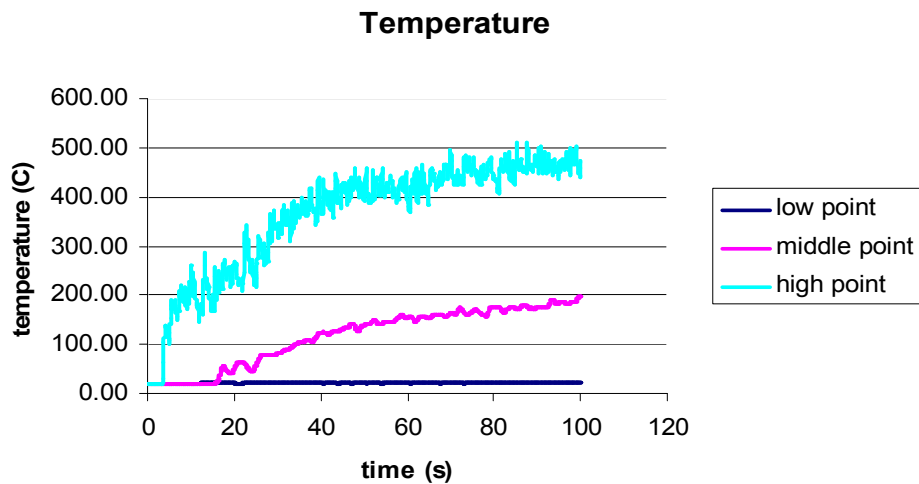


Εικόνα 5

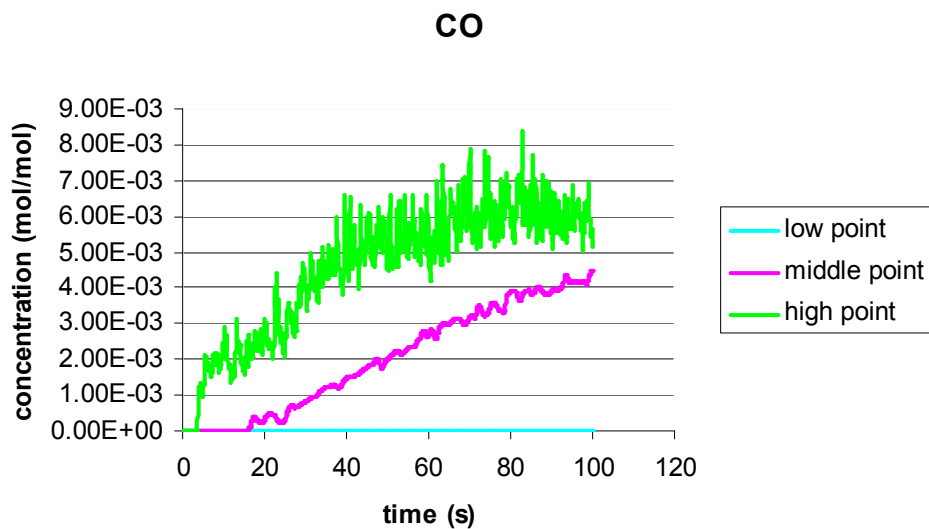
- Σενάριο 4:

Sprinkler: No, Fire spread at some specified rate

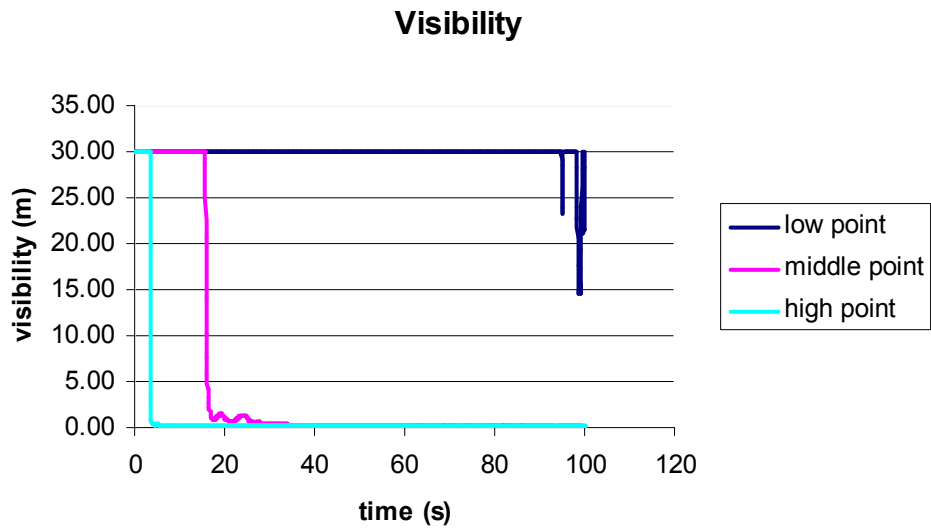
Σημειώνεται ότι με τις εντολές που έχουμε χρησιμοποιήσει, η επιφάνεια της πολυθρόνας καίγεται με την ίδια φωτιά (από άποψη έντασης- ρυθμού έκλυσης θερμότητας) για 70 δευτερόλεπτα κι έπειτα αρχίζει να εξασθενεί. Ακολουθούν οι χρονικές ιστορίες των μεγεθών που λάβαμε υπ' όψη μας και στο σενάριο 1.



Διάγραμμα 6

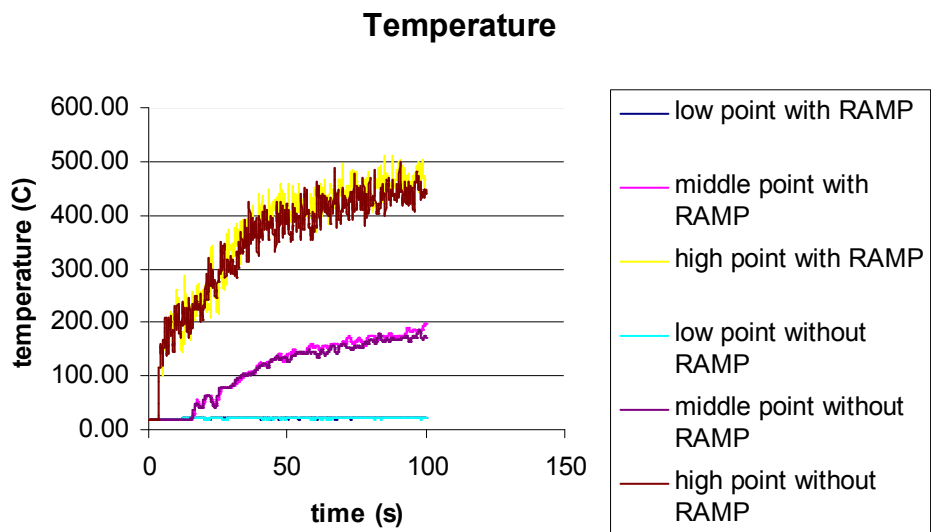


Διάγραμμα 7



Διάγραμμα 8

Παρακάτω συγκρίνουμε τα σενάρια 1 και 4 ως προς τη θερμοκρασία και παρατηρούμε πολύ μικρές διαφορές:



Διάγραμμα 9

2. ΕΞΟΙΚΕΙΩΣΗ ΜΕ ΤΟ CFAST (Consolidated Fire And Smoke Transport)

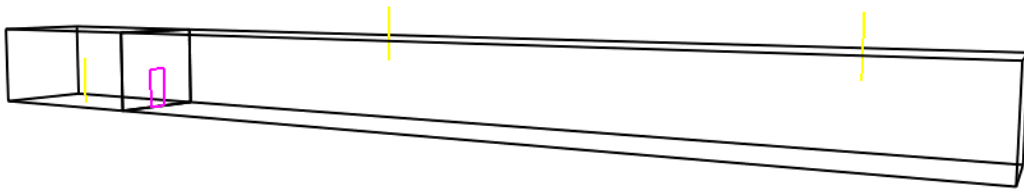
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε πρώτη φάση μας ενδιαφέρει η προσομοίωση πυρκαγιάς με τη βοήθεια του διζωνικού μοντέλου CFAST που περιλαμβάνει καμπίνα και διάδρομο και έλεγχος της συμπεριφοράς του μοντέλου αυτού στο διαμέρισμα του διαδρόμου. Μας απασχολεί ιδιαίτερος το διαμέρισμα του διαδρόμου διότι το διζωνικό μοντέλο υποθέτει τις ίδιες τιμές μεγεθών (π.χ. θερμοκρασία, συγκέντρωση CO) στην κάθε ζώνη ανεξάρτητα του μήκους του διαμερίσματος, συνεπώς είναι λογικό να σκεφτεί κάποιος ότι σε χώρους με μεγάλο μήκος θα υπάρχει μια αδυναμία στην περιγραφή των συνθηκών σε κάθε σημείο. Για να πετύχουμε τα παραπάνω κατασκευάζουμε διάφορα σενάρια μετάδοσης μιας πυρκαγιάς η οποία ξεκινάει από την καμπίνα λόγω της παραγωγής φλόγας από έναν καυστήρα Bunsen και προχωράει σε διάδρομο (4πλάσιου περίπου μήκους) που εκτείνεται μπροστά της και τοποθετούμε δύο σημεία-στόχους (το ένα στην αρχή του διαδρόμου στο οποίο από εδώ και στο εξής θ' αναφερόμαστε ως target 1, και το άλλο στο τέλος του, στο οποίο από εδώ και στο εξής θα αναφερόμαστε ως target 2), όπου θα γίνει η μέτρηση των μεγεθών που μας ενδιαφέρουν. Η σύνδεση-επαφή των δύο διαμερισμάτων γίνεται μέσω ανοίγματος (πόρτας) το οποίο παραμένει ανοιχτό καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Θεωρούμε ότι υπάρχει μετάδοση θερμότητας με συναγωγή μεταξύ των δύο διαμερισμάτων. Σκοπός μας είναι να εξετάσουμε την επίδραση της θεώρησης της ροής στο διάδρομο ως corridor σε σχέση με τη θεώρηση ως normal, διότι η επιβιωσιμότητα στους διαδρόμους είναι κρίσιμη στα επιβατηγά πλοία.

Επιπλέον μας ενδιαφέρει η επίδραση της ύπαρξης καταιονιστήρα στο χώρο της πυρκαγιάς (δηλαδή στην καμπίνα) και στο χώρο του διαδρόμου. Οι καταιονιστήρες αυτοί έχουμε επιλέξει να ενεργοποιούνται περίπου στους 74° C. Προχωρούμε στην εξέταση αυτή με έλεγχο της συμπεριφοράς των ακολούθων παραμέτρων σε σχέση με το χρόνο: Θερμοκρασία ανώτερου και κατώτερου στρώματος στα δυο διαμερίσματα, θερμοκρασία στα σημεία-στόχους, τα οποία αυτομάτως τοποθετεί το CFAST στα εξεταζόμενα διαμερίσματα (ένα στο πάτωμα κάθε διαμερίσματος με θερμοκρασία ίδια με του πατώματος), συγκέντρωση CO στο ανώτερο και κατώτερο στρώμα του διαδρόμου και της καμπίνας. Αξίζει να σημειωθεί ότι επιλέγουμε τις παραπάνω

παραμέτρους, διότι είναι από τις κυριότερες παράμετρους που επηρεάζουν τη διαδικασία εκκένωσης των επιβατών.

Η προσομοίωση διαρκεί 1800 δευτερόλεπτα, οι (εσωτερικές και εξωτερικές) περιβαλλοντικές συνθήκες αφήνονται στις default τιμές. Επιλέγουμε το υλικό του πατώματος και των δύο διαμερισμάτων και το υλικό των τοίχων της καμπίνας να είναι σκυρόδεμα, το υλικό της οροφής και των δύο διαμερισμάτων να είναι σύνθετο με ίνες γυαλιού και οι τοίχοι του διαδρόμου να είναι από γυψοσανίδα. Παρακάτω φαίνεται η εξεταζόμενη γεωμετρία:



Εικόνα 6

Τα σενάρια που θα εξετάσουμε στην πορεία είναι τα ακόλουθα:

- **Σενάριο 1:**

Flow characteristics: Normal

Sprinkler: No

Vertical/Horizontal Surface connections: No/Yes

- **Σενάριο 2:**

Flow characteristics: Corridor

Sprinkler: No

Vertical/Horizontal Surface connections: No/Yes

- **Σενάριο 3:**

Flow characteristics: Normal

Sprinkler: Yes

Vertical/Horizontal Surface connections: No/Yes

- **Σενάριο 4:**

Flow characteristics: Corridor

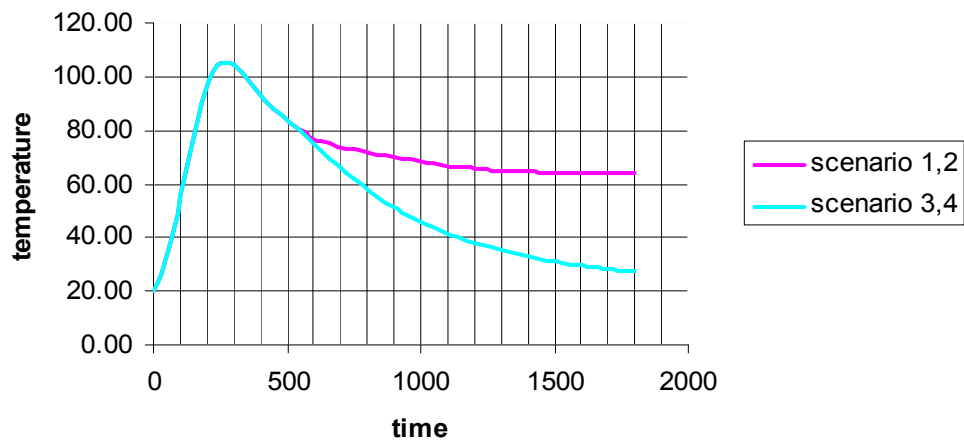
Sprinkler: Yes

Vertical/Horizontal Surface connections: No/Yes

Ακολουθεί η συγκεντρωτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων σε μορφή διαγραμμάτων από την εκτέλεση των παραπάνω σεναρίων:

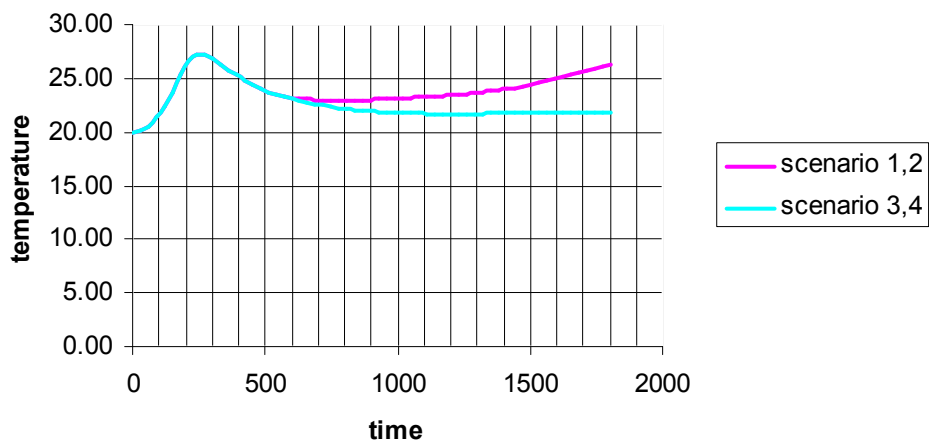
2.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Cabin upper layer temperature



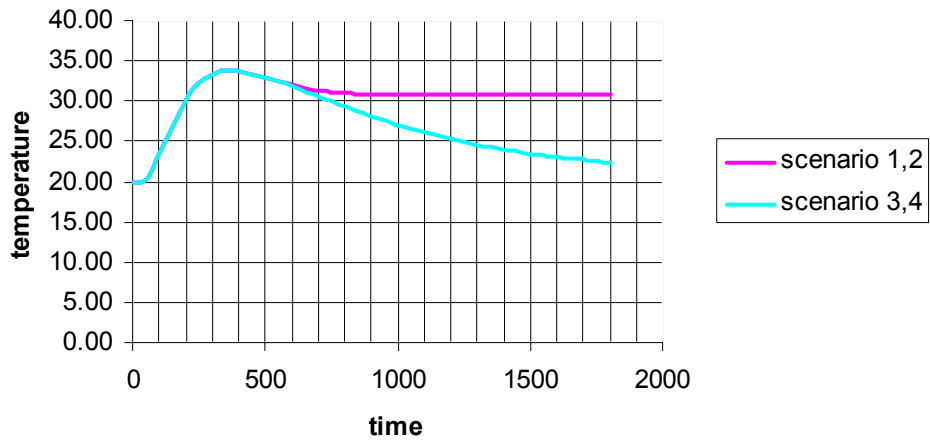
Διάγραμμα 10

Cabin lower layer temperature



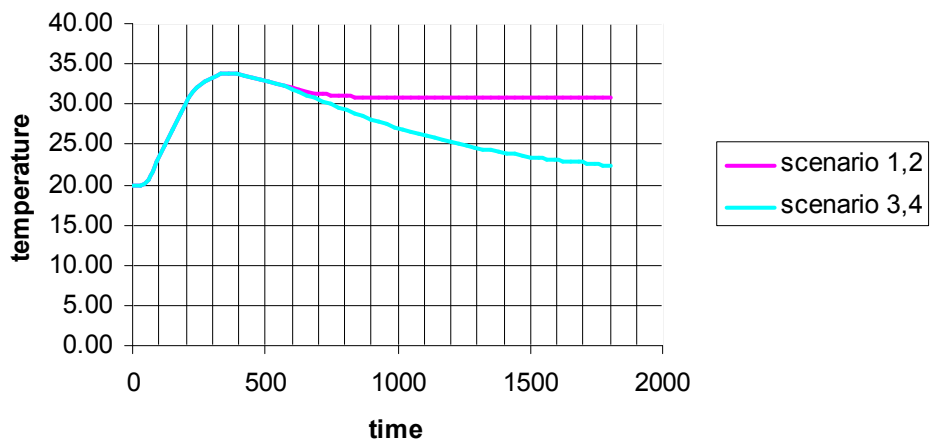
Διάγραμμα 11

Corridor upper layer temperature



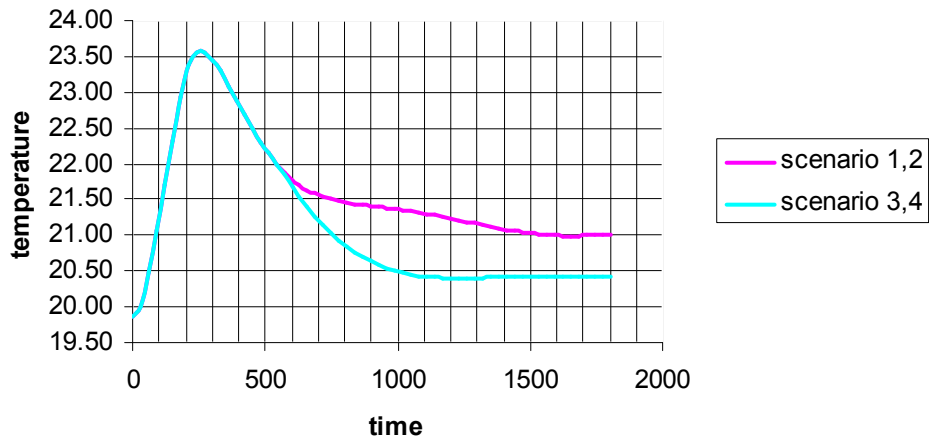
Διάγραμμα 12

Corridor upper layer temperature



Διάγραμμα 13

Corridor lower layer temperature

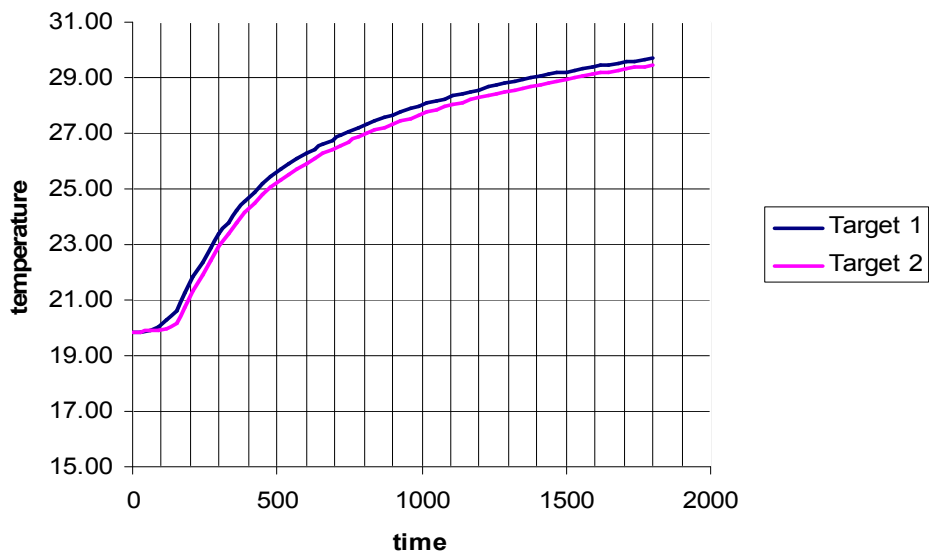


Διάγραμμα 14

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι η μέγιστη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στο διάδρομο δεν ξεπερνά τους 35 βαθμούς. Αυτό σημαίνει ότι ο καταιονιστήρας που βρίσκεται στο διάδρομο δεν ενεργοποιείται, άρα η ύπαρξή του δεν έχει καμία απολύτως επίδραση στα αποτελέσματα.

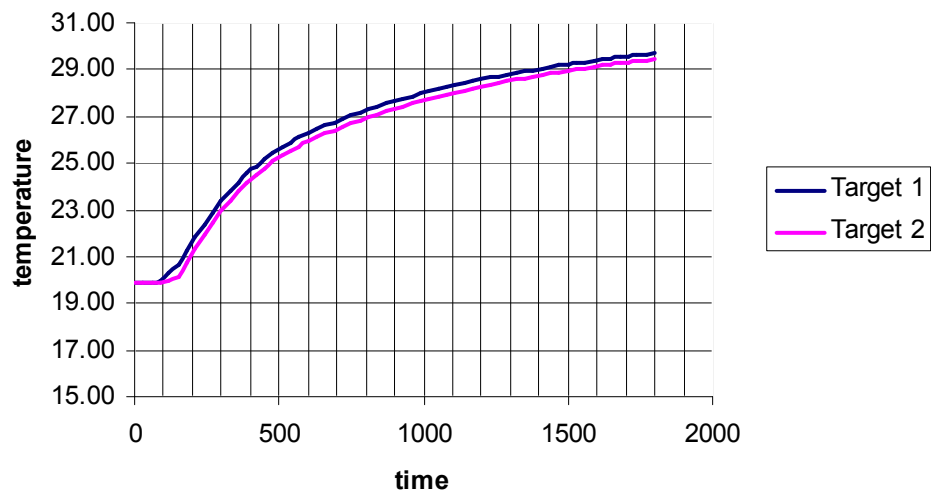
Η μέγιστη θερμοκρασία που εμφανίζεται στην καμπίνα είναι 106 βαθμοί Κελσίου. Οπότε ο καταιονιστήρας που βρίσκεται εκεί ενεργοποιείται..

Temperature at targets assuming normal flow



Διάγραμμα 15

Temperature at targets assuming corridor flow

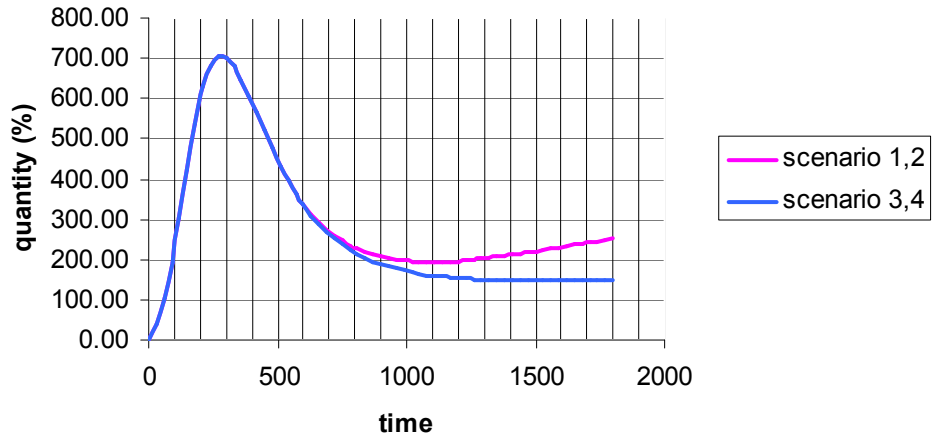


Διάγραμμα 16

Η θερμοκρασιακή διαφορά όμως των δύο σημείων είναι ίδια είτε έχουμε κανονική ροή, είτε ροή corridor.

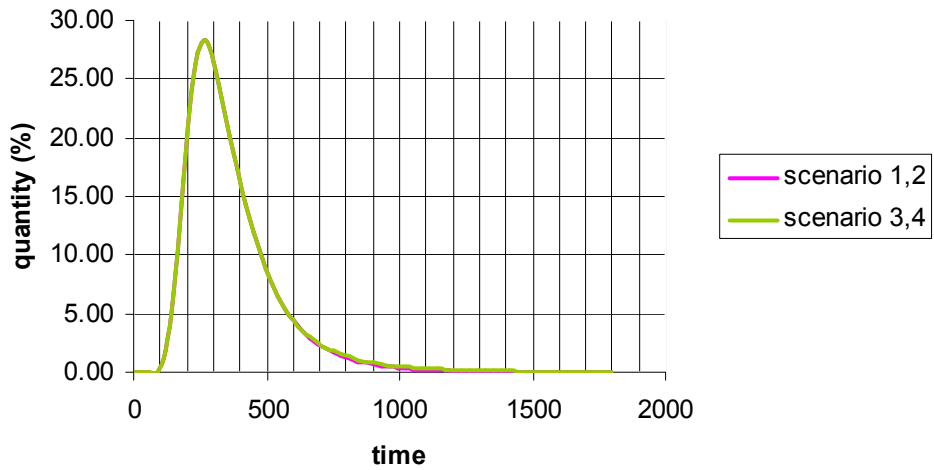
Cabin:

Upper CO level



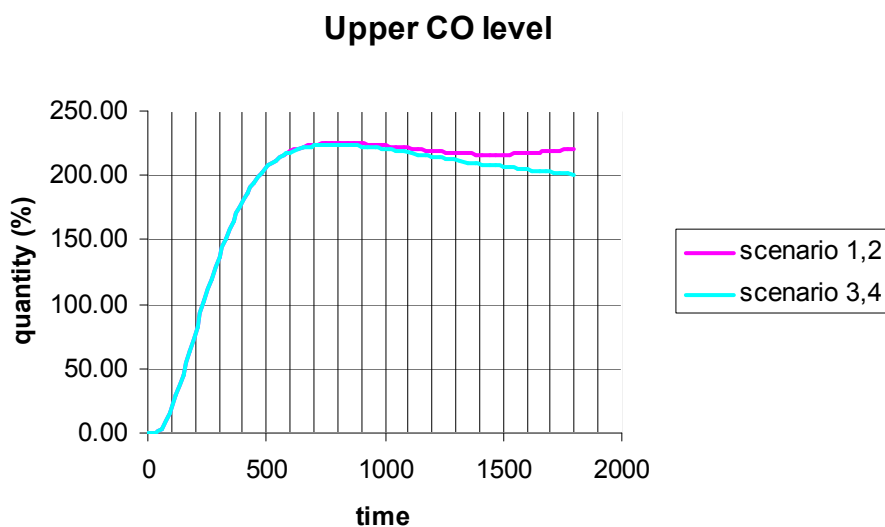
Διάγραμμα 17

Lower CO level



Διάγραμμα 18

Corridor:



Διάγραμμα 19

Σημειώνεται ότι το μονοξείδιο του άνθρακα είναι ανύπαρκτο στο κάτω στρώμα στην περιοχή του διαδρόμου.

Συμπέρασμα:

Απ' όλα τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι το CFAST δεν διαφοροποιεί τα αποτελέσματα ανάλογα με το αν έχουμε κανονική ροή ή ροή προσαρμοσμένη σε διάδρομο είτε έχουμε, είτε δεν έχουμε καταιονιστήρα.

Όπως παρατηρούμε από τα διαγράμματα 6 και 7, η θερμοκρασιακή διαφορά των δύο στόχων είναι ίδια είτε έχουμε κανονική ροή, είτε ροή corridor.

Η επίδραση του καταιονιστήρα στην πτώση της θερμοκρασίας και στην καμπίνα αλλά και στον διάδρομο είναι σημαντική (της τάξης των 180 βαθμών στην καμπίνα και των 40 βαθμών στο διάδρομο). Αξιοσημείωτη πτώση παρατηρείται επίσης και στη συγκέντρωση του μονοξειδίου του άνθρακα στο ανώτερο στρώμα που αναπτύσσεται στην καμπίνα. Η πτώση αυτή είναι μικρότερη στο ανώτερο στρώμα του διαδρόμου.

3. ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΣΤΟ ΡΥΘΜΟ ΕΚΛΥΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ (Heat Release Rate-HRR)

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε προηγούμενη μελέτη με πρόγραμμα υπολογιστικής ρευστομηχανικής (Fire Dynamics Simulator-FDS), όπου μελετούσαμε την εξέλιξη της πυρκαγιάς σε ένα δωμάτιο, είχαμε εισάγει στον κώδικα τις ιδιότητες ενός καταιονιστήρα, χωρίς να έχουμε δηλώσει την ακριβή θέση του. Ουσιαστικά ο καταιονιστήρας αυτός ήταν ανύπαρκτος και αναμέναμε τα αποτελέσματα όσον αφορά τα εξεταζόμενα μεγέθη (θερμοκρασία, ορατότητα, συγκέντρωση μονοξειδίου του άνθρακα, HRR) να είναι ακριβώς τα ίδια. Και όντως τα αποτελέσματα σχετικά με τα τρία πρώτα από τα μεγέθη που αναφέρθηκαν παραπάνω ήταν ίδια. Παρουσιάστηκε όμως διαφοροποίηση στο ρυθμό έκλυσης θερμότητας. Στόχος μας λοιπόν σ' αυτή τη μελέτη είναι να εξηγήσουμε γιατί συνέβη αυτό λαμβάνοντας υπ' όψη τις αδυναμίες του προγράμματος αυτού όπως διατυπώνονται στο εγχειρίδιο χρήσης του.

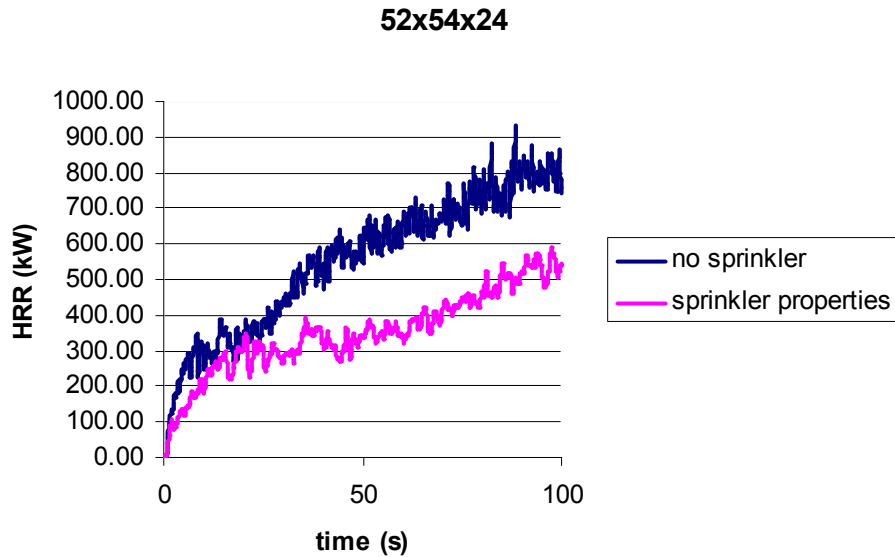
3.2 ΑΝΑΛΥΣΗ

Σύμφωνα με το εγχειρίδιο χρήσης του FDS, στοιχεία που είναι μικρότερα από τις διαστάσεις ενός κελιού δεν μπορούν να προσομοιωθούν. Οπότε υποψιαζόμαστε ότι το πρόγραμμα θεωρεί τον καταιονιστήρα ως ένα πολύ μικρό στοιχείο από τη στιγμή που έχουμε εισάγει μόνο τις ιδιότητες του και προκειμένου να τον προσομοιάσει δημιουργεί ένα τοπικό πλέγμα (υπόπλεγμα), πολύ μικρότερο από το αρχικό όπου λύνει τις κατάλληλες εξισώσεις. Για να δούμε κατά πόσο είναι σωστή η υπόθεσή μας, παίρνουμε το αρχικό σενάριο που είχε χρησιμοποιηθεί στην προηγούμενη μελέτη και αυξάνουμε τα κελιά του πλέγματος. Ειδικότερα στην πρώτη περίπτωση διπλασιάζουμε τα κελιά και στις τρεις διευθύνσεις και στη δεύτερη το αυξάνουμε κατά το $\frac{1}{4}$ της προηγούμενης αύξησης. Άρα τα τρία προς εξέταση πλέγματα θα είναι τα εξής:

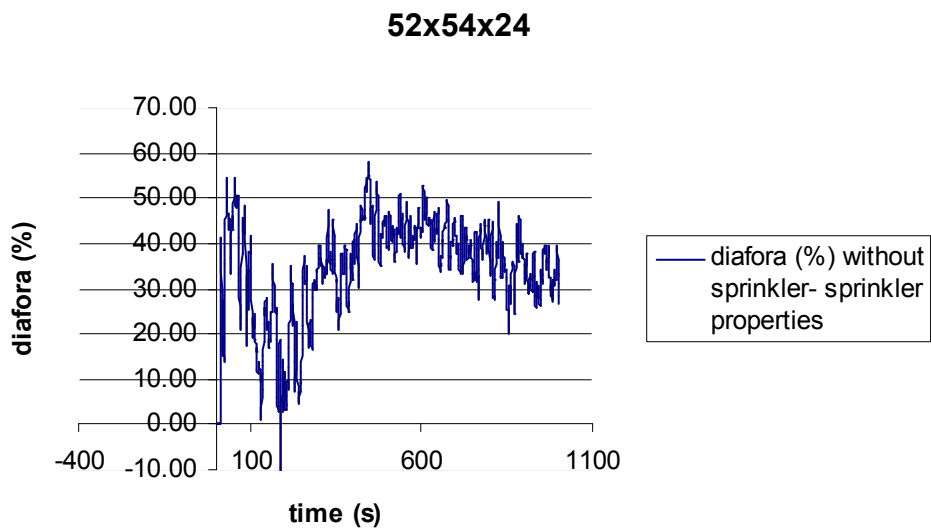
- a) 52x54x24,
- b) 104x108x48 και
- c) 130x135x60.

Δημιουργήσαμε λοιπόν τρία διαφορετικά σενάρια. Τρέχουμε έπειτα τα σενάρια αυτά για δυο περιπτώσεις:

a) χωρίς καταιονιστήρα και
b) με τις ιδιότητες μόνο του καταιονιστήρα
και απεικονίζουμε γραφικά τη χρονική ιστορία του ρυθμού έκλυσης θερμότητας και για τις δύο προαναφερθείσες περιπτώσεις. Ακολουθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα:

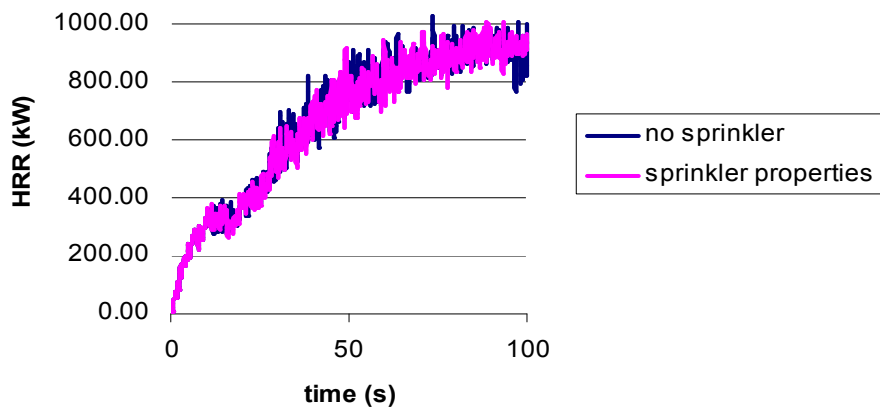


Διάγραμμα 20



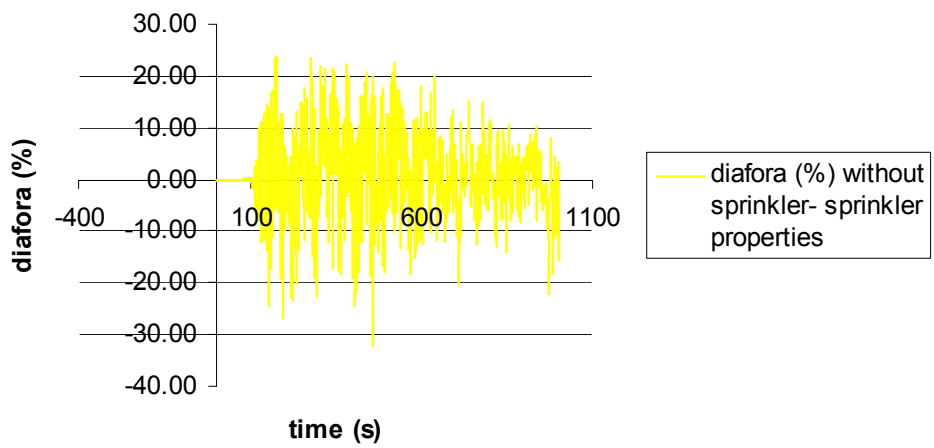
Διάγραμμα 21

104x108x48



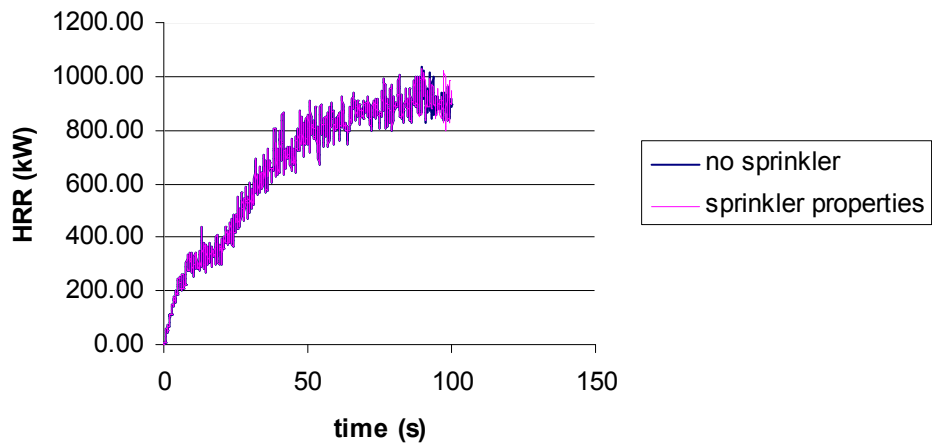
Διάγραμμα 22

104x108x48



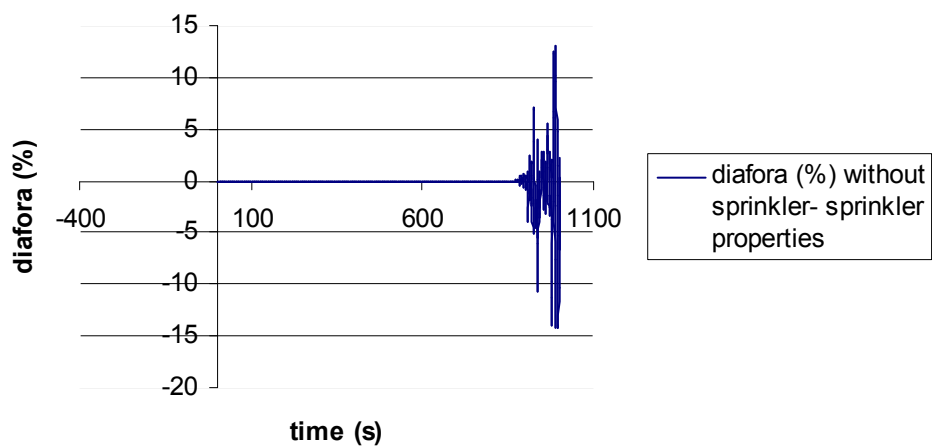
Διάγραμμα 23

130x135x60



Διάγραμμα 24

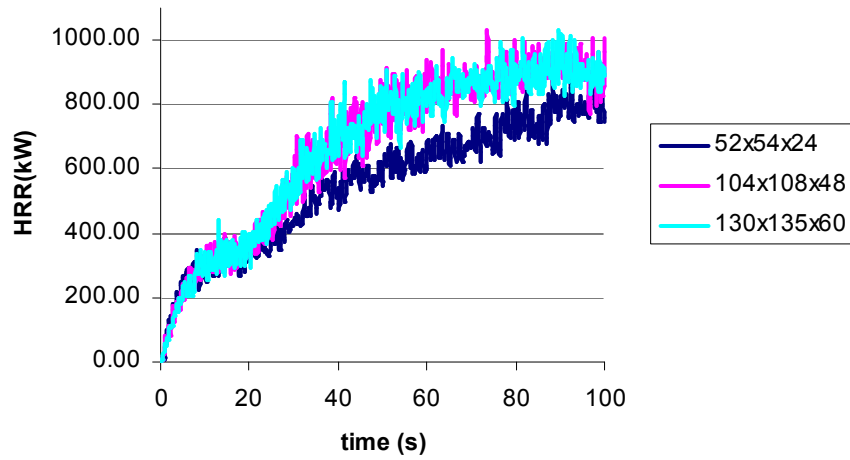
130x135x60



Διάγραμμα 25

Έπειτα εξετάζουμε τη συμπεριφορά του κάθε πλέγματος στην περίπτωση που δεν υπάρχει καταιονιστήρας και κατασκευάζουμε το αντίστοιχο συγκεντρωτικό διάγραμμα:

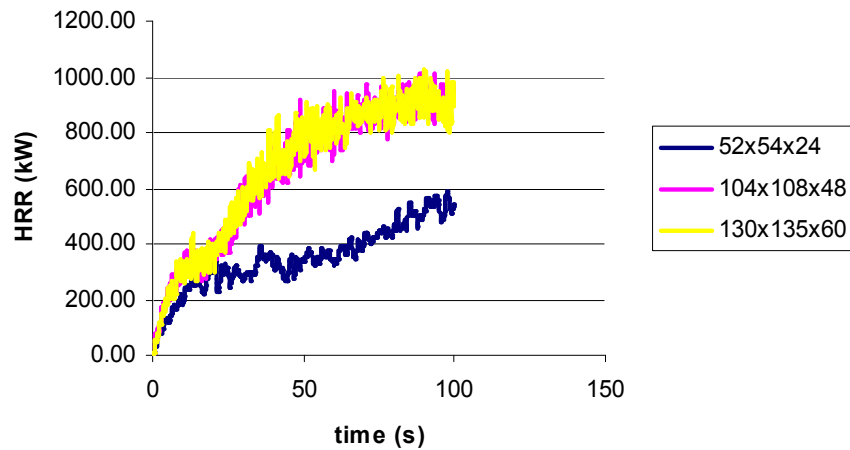
HRR for different grids without sprinkler



Διάγραμμα 26

Τέλος, εξετάζουμε τη συμπεριφορά του κάθε πλέγματος στην περίπτωση που υπάρχουν οι ιδιότητες του κατιονιστήρα και κατασκευάζουμε το αντίστοιχο συγκεντρωτικό διάγραμμα:

HRR for different grids with sprinkler properties



Διάγραμμα 27

Συμπεράσματα:

Διαπιστώνουμε όπως φαίνεται κυρίως από τα διαγράμματα 2,3 ότι η υπόθεσή μας είναι σωστή, διότι όταν αυξάνουμε το πλέγμα οι γραφικές παραστάσεις της απουσίας καταιονιστήρα και της ύπαρξης μόνο των ιδιοτήτων του σχεδόν συμπίπτουν. Η ποσοστιαία διαφορά του σεναρίου απουσίας καταιονιστήρα με το σενάριο ύπαρξης μόνο των ιδιοτήτων όπως φαίνεται από τα διαγράμματα 2,4,6 μειώνεται (από 50% στο μικρότερο πλέγμα μειώνεται σε 12% στο μεγαλύτερο). Επίσης παρατηρούμε ότι οι διαφορές ανάμεσα στα δύο πυκνότερα πλέγματα είναι πολύ μικρές, πράγμα που σημαίνει ότι τα αποτελέσματα είναι ευσταθή μέχρι κάποιο όριο πυκνότητας πλέγματος. Δηλαδή, δεν σημαίνει ότι περαιτέρω αύξηση της πυκνότητας του πλέγματος οδηγεί και σε καλύτερα- ακριβέστερα αποτελέσματα. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι διπλασιασμός της πυκνότητας του πλέγματος οδηγεί σε εκθετική αύξηση του υπολογιστικού χρόνου. Ειδικότερα τον αυξάνει κατά 2^4 φορές.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ

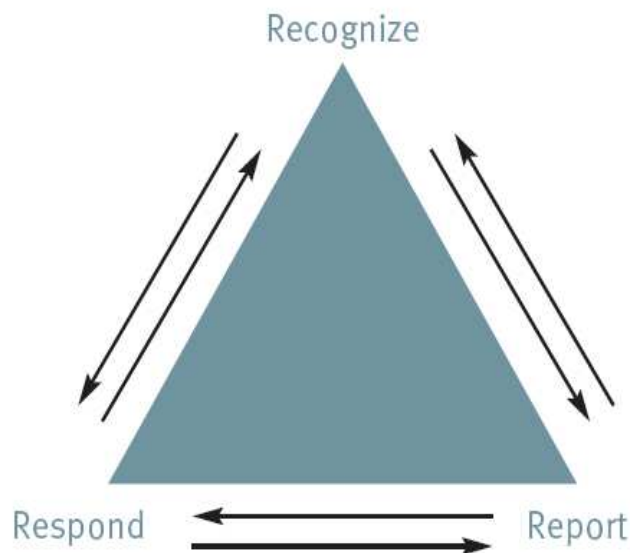
1. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΣΕ ΕΚΤΑΚΤΗ ΑΝΑΓΚΗ.

Κάθε κατάσταση έκτακτης ανάγκης που μπορεί να παρουσιαστεί σ' ένα πλοίο μπορεί να χωριστεί σε τρία στάδια: α) Την αναγνώριση του κινδύνου (recognition) , β) την απόκριση (response) και γ) την αναφορά (report). Τα στάδια αυτά δεν αναφέρονται μόνο στο πλοίο που διατρέχει τον άμεσο κίνδυνο, αλλά και σε κάθε πλοίο που προσπαθεί να βοηθήσει το πλοίο αυτό και δίνει αναφορά στις αρχές. Παρακάτω παρουσιάζονται περισσότερα στοιχεία για το κάθε στάδιο (Maritime Safety Umbrella Operations 2007):

1. Recognition: Η αναγνώριση και η σωστή κρίση της σοβαρότητας-επικινδυνότητας της κατάστασης είναι το κλειδί του επιτυχημένου χειρισμού της. Περιλαμβάνει καταρχήν την αναγνώριση της αιτίας της έκτακτης ανάγκης. Αυτή μπορεί να είναι φωτιά, κατάκλυση, βλάβη κύριας μηχανής, κλπ. Έπειτα πρέπει να γίνει αντιληπτό το μέγεθος του κινδύνου. Για παράδειγμα, εάν έχει ξεπάσει φωτιά, θα πρέπει να γίνει σαφής η έκτασή της. Καταλαμβάνει μια ολόκληρη καμπίνα ή έχει περιοριστεί στον καναπέ; Τέλος, θα πρέπει να αξιολογηθεί σωστά ο χρόνος που απαιτείται μέχρι ο κίνδυνος αυτός ν' αρχίσει να απειλεί ανθρώπινες ζωές και περιουσίες. Η αποτυχία αναγνώρισης της ύπαρξης ενός κινδύνου οδηγεί συνήθως σε μεγάλα ατυχήματα, όπως έγινε στην περίπτωση των RoRo-passenger πλοίων "Herald of Free Enterprise" και "Estonia", τα οποία ανετράπησαν.
2. Response: Η απόκριση σε μια κατάσταση έκτακτης ανάγκης, θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν γρηγορότερη, με επαρκή μέσα και τρόπο και θα πρέπει οπωσδήποτε να περιλαμβάνει τη λήψη μέτρων για την αποφυγή της επέκτασης του κινδύνου και σε άλλες περιοχές και την προστασία επιβατών και άλλων που δεν εμπλέκονται άμεσα στην απόκριση. Προφανώς, σε μια έκτακτη και επικύνδινη κατάσταση το πλήρωμα πρέπει να «αποκριθεί» πρώτο.
3. Report: Το στάδιο αυτό περιλαμβάνει την έγκαιρη μετάδοση- γνωστοποίηση του κινδύνου με στόχο την εντολή για έναρξη της απόκρισης, τη μετάδοση της

έναρξης απόκρισης σε όλες τις συμβαλλόμενες ομάδες και τέλος την έγκαιρη γνωστοποίηση της κατάστασης στις αρχές, στην εταιρεία, σε άλλα πλοία, κλπ.

Τα παραπάνω τρία στάδια που συνθέτουν την αντιμετώπιση ενός κινδύνου συνδέονται μεταξύ τους, σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 1 (Maritime Safety Umbrella Operations, 2007)

Το παραπάνω σχήμα δείχνει ότι εάν και η αναγνώριση της ύπαρξης ενός κινδύνου είναι το πρώτο στοιχείο στην καταπολέμησή του, η διαδοχή των τριών στοιχείων είναι δυναμική. Αυτό σημαίνει ότι το επόμενο βήμα έπειτα από την αναγνώριση μπορεί να είναι είτε άμεση απόκριση, είτε απόκριση με ταυτόχρονη γνωστοποίηση του κινδύνου σε τρίτους φορείς. Συνεπώς, η αναγνώριση μιας εξελισσόμενης κατάστασης που μπορεί να αλλάξει με το χρόνο θα απαιτεί και αλλαγή στις μεταδιδόμενες πληροφορίες. Το σχήμα αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση παρελθόντων έκτακτων αναγκών καθώς επίσης και σαν οδηγός στην αντιμετώπιση μιας τρέχουσας.

Σχεδόν όλες οι καταστροφές σε επιβατηγά πλοία οφείλονται σε αποτυχία σ' ένα από τα παραπάνω στοιχεία του τριγώνου ή τουλάχιστον έχουν επιταχυνθεί λόγω της αποτυχίας αυτής. Με τον όρο «αποτυχία» εννοούμε αποτυχημένη σύνδεση των τριών σταδίων μεταξύ τους ή απουσία επαρκών μέσων για τη σωστή εκτέλεση του κάθε βήματος. Κλασσικό παράδειγμα αποτελεί το ναυάγιο του «Τιτανικού». Αφού το πλοίο προσάραξε στο παγόβουνο, η συνειδητοποίηση της κατάστασης καθώς και η

επικοινωνία-γνωστοποίηση του γεγονότος ήταν επιτυχημένες. Προβλήματα υπήρξαν στο στάδιο της απόκρισης (έλλειψη σωστικών λεμβών) και στο στάδιο της επικοινωνίας (περιορισμένα μέσα για τη γνωστοποίηση του γεγονότος).

Οι κανονισμοί και κυρίως η SOLAS ασχολούνται περισσότερο με το στάδιο της απόκρισης στον κίνδυνο, ενώ οι κανονισμοί του κώδικα ISM (International Safety Management Code) ασχολούνται με το κομμάτι της επικοινωνίας μεταξύ των εμπλεκόμενων μερών (πχ. Πλοίο, ναυτιλιακή εταιρεία, Αρχές) σε περίπτωση μιας έκτακτης ανάγκης.

Ειδικότερα, η SOLAS περιλαμβάνει κανονισμούς που αφορούν το πλήθος, το είδος, την τοποθεσία και τις συνθήκες χρήσης των σωστικών λεμβών, των σωστικών σχεδίων, των σωσιβίων και των λοιπών μέσων διάσωσης (κεφάλαιο III). Εκείνο που έχει τεράστια σημασία είναι η εκπαίδευση του πληρώματος και η σωστή συντήρηση του εξοπλισμού. Οι κανονισμοί απαιτούν να γίνεται εκπαίδευση σε εγκατάλειψη του πλοίου και τακτική διενέργεια δοκιμών. Υπάρχουν συγκεκριμένες απαιτήσεις λειτουργικής ετοιμότητας καθώς και λεπτομερών εβδομαδιαίων και μηνιαίων ελέγχων για το σύνολο του εξοπλισμού διάσωσης.

Ο IMO έχει εκδώσει πρόσφατα οδηγίες για τη διεξαγωγή ανάλυσης εκκένωσης νέων και υπαρχόντων επιβατηγών πλοίων, τόσο με απλοποιημένη όσο και με λεπτομερή εκτίμηση του χρόνου εκκένωσης (αρχικά MSC/Circ.909 και πιο πρόσφατα MSC/Circ. 1033). Αυτές οι οδηγίες δεν περιλαμβάνονται στο κείμενο της SOLAS, Σημειώνεται ότι έχει αναπτυχθεί ξεχωριστά και σχετική διαδικασία υπολογισμού για ταχύπλοα επιβατηγά σκάφη (MSc/Circ.1001).

2. ΝΑΥΤΙΚΑ ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΣΧΕΤΙΖΟΝΤΑΙ ΜΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ & ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΑΙΤΙΩΝ ΤΩΝ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΕΡΩΝ (ΑΠΟ ΑΠΟΨΗ ΕΚΤΑΣΗΣ ΤΩΝ ΣΥΝΕΠΕΙΩΝ) ΑΠΟ ΑΥΤΩΝ.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα πιο πρόσφατα, μεγάλης κλίμακας, ατυχήματα (που έλαβαν χώρα από το 1990 και μετά) λόγω φωτιάς καθώς επίσης και στοιχεία για το πότε έγιναν, ποιά ήταν η αιτία και το ακριβές σημείο έναρξης της πυρκαγιάς.

Πίνακας 1 (Πηγή: SAFEDOR)

ΤΟΜΕΑΣ	ΟΝΟΜΑ ΠΛΟΙΟΥ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΧΩΡΟΣ ΕΝΑΡΞΗΣ ΦΩΤΙΑΣ
ΧΩΡΟΙ ΕΝΔΙΑΙΤΗΣΗΣ & ΞΕΝΟΔΟΧΕΙΑΚΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ	“Scandinavian Star”	07/04/1990	Καμπίνες επιβατών, διάδρομοι, σκάλες
	“Spirit of Tasmania”	24/02/2001	Μαγαζί φωτογραφίας
	“Cinderella”	08/03/2002	Χώρος νυχτερινής διασκέδασης
	“ Star Princess”	23/03/2006	Μπαλκόνι καμπίνας επιβατών
ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΑ	“Sally Star”	25/08/1994	Διαρροή στο σύστημα καυσίμου
	“Pride of Le Havre”	27/07/1998	Επιπλοκή στα ηλεκτρικά συστήματα

ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΑ (συνέχεια)	“HSS Stena Explorer”	20/09/2001	Διαρροή στο σύστημα καυσίμου
	“Norsea”	14/08/2002 & 02/09/2002	Διαρροή στο σύστημα καυσίμου
	“Al Salam Boccaccio 98”	02/02/2006	Συσσώρευση νερού στο κατάστρωμα αυτοκινήτων (car deck) ως αποτέλεσμα προσπάθειας κατάσβεσης φωτιάς
	“Princess of Scandinavia”	17/05/2002	Διαρροή στο σύστημα καυσίμου
	“Queen of Surrey”	12/05/2003	Διαρροή στο σύστημα καυσίμου
	“Calypso”	06/05/2006	Μηχανοστάσιο
	“Columbia”	06/06/2000 & 28/05/2003	Δημιουργία σπινθήρα στον ηλ. πίνακα & διαρροή στο σύστημα καυσίμου

Στη συνέχεια θα ασχοληθούμε με τα σημαντικότερα - από την άποψη συνεπειών και συμβολής τους στην εξέλιξη των κανονισμών- ατυχήματα λόγω φωτιάς σε χώρους ενδιαίτησης.

- “*Scandinavian Star*”

Σημαντικά εμπειρικά στοιχεία προέκυψαν απ’τη διερεύνηση της πυρκαγιάς επί του νορβηγικού πλοίου *Scandinavian Star*, το οποίο μόλις είχε τεθεί σε λειτουργία όταν στις 7 Απριλίου του 1990 ξέσπασε φωτιά η οποία ανιχνεύτηκε αρχικά από τους επιβάτες σε σωρό κλινοσκεπασμάτων και κατασβέστηκε άμεσα (Κ. Σπύρου, Ν.Νικολάου, 2009). Λίγα λεπτά αργότερα όμως, εντοπίστηκε μια δεύτερη εστία σε διάδρομο χώρου ενδιαίτησης. Όταν, με σημαντική καθυστέρηση, η δεύτερη εστία έγινε αντιληπτή, η πυρκαγιά είχε ήδη λάβει ανεξέλεγκτες διαστάσεις καθώς και η ενεργητική και η παθητική προστασία (active and passive fire protection) έναντι της φωτιάς ήταν άκρως αναποτελεσματικές. Εντός 8 ÷ 12 λεπτών από την έναρξη της πυρκαγιάς, πυκνός καπνός κάλυπτε τους περισσότερους από τους διαδρόμους στους οποίους τελικά χάθηκαν ανθρώπινες ζωές. Ο απολογισμός ήταν 158 νεκροί εκ των οποίων οι 125 απεβίωσαν λόγω εισπνοής μονοξειδίου του άνθρακα, οι 10 λόγω εγκαυμάτων και 23 λόγω εισπνοής υδροκυανίου. Οι περισσότεροι (99) απεβίωσαν εντός των καμπίνων τους.

Η πυρκαγιά φαίνεται να οφείλεται σε εμπρηστική ενέργεια, γεγονός όμως που από μόνο του δεν αρκεί για να εξηγήσει την καταστροφική έκταση του περιστατικού (S. Kristiansen, 1991). Το πλοίο είχε επέλθει λίγο πριν το ατύχημα υπό την κατοχή νέων ιδιοκτητών. Η μετατροπή από κρουαζιερόπλοιο που εκτελούσε μικρές αποστάσεις στην Καραϊβική σε ferry στην Σκανδιναβία απαιτούσε πολλές και πολύπλοκες μετασκευές. Οι εργασίες αυτές είχαν πραγματοποιηθεί κυρίως από το πλήρωμα λίγο πριν τη νέα δρομολόγηση του πλοίου και όταν ξεκίνησε για το πρώτο του ταξίδι από το Όσλο, οι εργασίες αυτές δεν είχαν καν ολοκληρωθεί. Συνεπώς το πλήρωμα δεν ήταν εξοικειωμένο με το πλοίο αλλά και ούτε εκπαιδευμένο για καταστάσεις εκτάκτου ανάγκης. Εκτός από αυτό, η πλειοψηφία των ναυτών ήταν Πορτογάλοι οπότε δεν καταλάβαιναν σε μεγάλο βαθμό Σκανδιναβικά ή Αγγλικά.

Επιπλέον, ο εξοπλισμός εκτάκτου ανάγκης ήταν απαρχαιωμένος. Το πλοίο, ναυπηγημένο σύμφωνα με τις απαιτήσεις πυρασφάλειας της Μεθόδου I της SOLAS 1960, δε διέθετε ούτε αυτόματο σύστημα πυρανίχνευσης, ούτε αυτόματο σύστημα πυρόσβεσης στους χώρους ενδιαίτησης. Η απουσία αυτόματου συστήματος πυρανίχνευσης είχε ως αποτέλεσμα την καθυστερημένη ανίχνευση της δεύτερης εστίας.. Πυρίμαχες πόρτες που βρίσκονταν σε κρίσιμα σημεία δεν ήταν κλειδωμένες και συνέβαλλαν στη τροφοδότηση ρευμάτων αέρα που επιτάχυναν τη μετάδοση της φωτιάς.

Η πολύπλοκη αρχιτεκτονική των χώρων ενδιαίτησης συνέβαλε στην παγίδευση των επιβαινόντων κατά την προσπάθεια απομάκρυνσης από την πυρκαγιά και τον καπνό. Η επικάλυψη των τοιχωμάτων και των οροφών των διαδρόμων με πολυστρωματικό πλαστικό πάχους 1,5 mm και θερμαντικής αξίας 48 MJ/m², συνέβαλε στην παραγωγή μονοξειδίου του άνθρακα και υδροκυανίου καθώς επίσης και στη διάδοση της πυρκαγιάς (λόγω εξασφάλισης συνεχούς επιφάνειας εύφλεκτου υλικού). Η θερμαντική αξία της επικάλυψης των τοιχωμάτων ήταν μεγαλύτερη κατά 3 MJ/m² της μέγιστης επιτρεπόμενης από τη SOLAS 1974 τιμής (45 MJ/m²). Η SOLAS 1960 δεν προέβλεπε μέγιστη επιτρεπτή τιμή, και συνεπώς το εν λόγω υλικό ήταν αποδεκτό. Λόγω του καπνού, η σήμανση, τοποθετημένη σχετικά υψηλά σε σχέση με το πάτωμα, δεν ήταν ευκόλως ορατή από τους επιβάτες.

- “Cinderella”

Κατά τη διάρκεια μιας κρουαζιέρας του πλοίου αυτού μεταξύ Ταλίν, Εσθονίας και Ελσίνκι ξέσπασε φωτιά σε χώρο νυχτερινής διασκέδασης κατά τις πρώτες πρωινές ώρες, οπότε και υπήρχαν πολλοί επιβάτες στο χώρο αυτόν (Maritime Safety Umbrella Operations 2007). Η φωτιά έγινε γρήγορα αντιληπτή εξαιτίας της φλόγας και του καπνού, όμως δεν είχε εντοπιστεί το ακριβές σημείο έναρξής της. Η κουρτίνα της σκηνής που χρησιμοποιήθηκε για την κατάσβεση της φωτιάς έπιασε φωτιά και η φωτιά επεκτάθηκε και ολόκληρος ο χώρος γέμισε καπνό.

Με τη γρήγορη αντίδραση του πληρώματος έγινε η κατάσβεση της πυρκαγιάς μέσα σε μισή ώρα. Δεν υπήρξαν τραυματισμοί, ο χώρος εκκενώθηκε με ομαλές διαδικασίες και

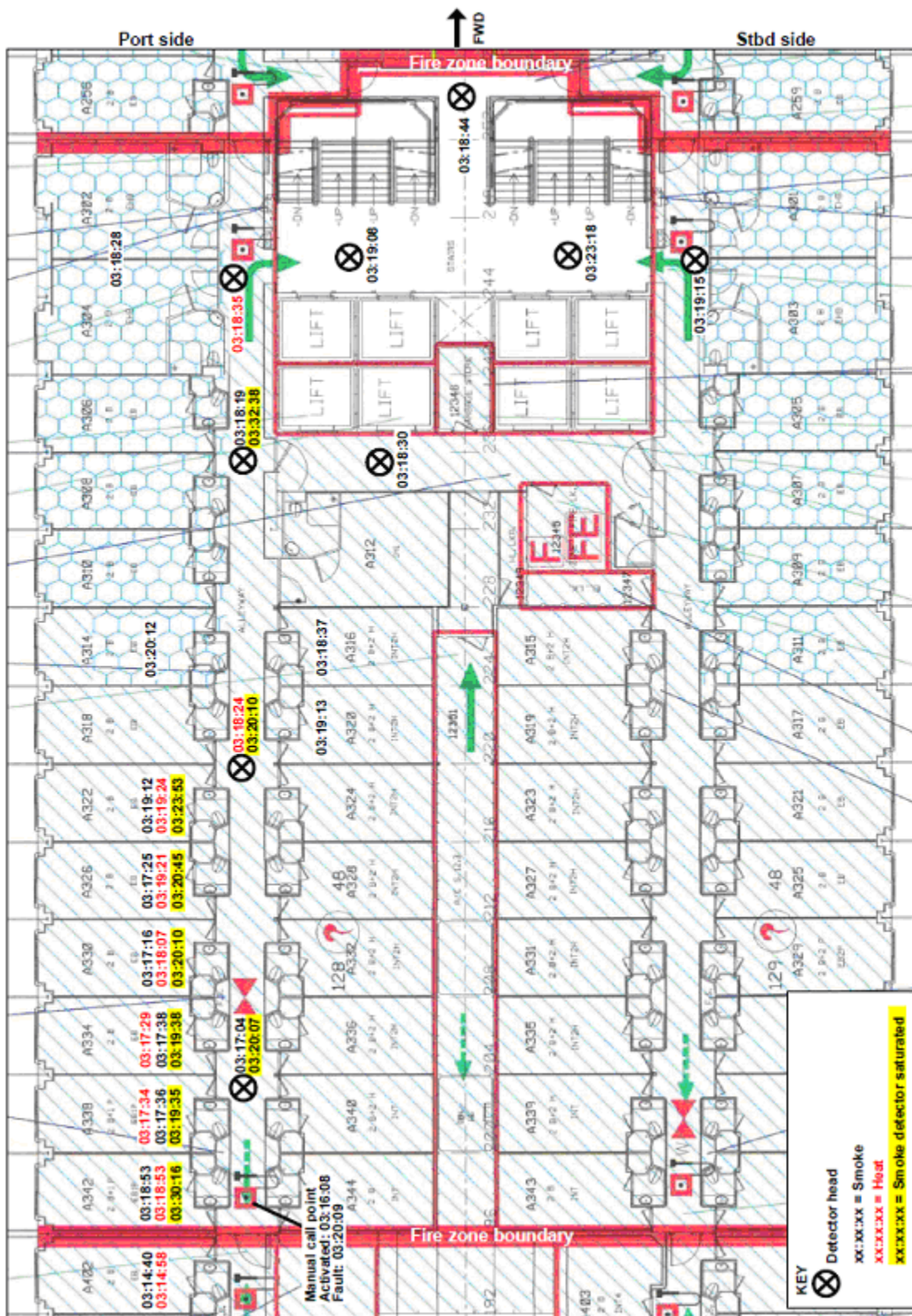
οι επιβάτες παρέμειναν ψύχραιμοι. Αξίζει να σημειωθεί ότι στο ίδιο πλοίο στις 20 Μαΐου του 2009 ξέσπασε φωτιά στο κατάστρωμα αυτοκινήτων. Ειδικότερα, η φωτιά ξεκίνησε από μια σακούλα με κάρβουνα στο χώρο φορτίο ενός φορτηγού, διότι δεν είχε μεσολαβήσει ο απαιτούμενος χρόνος για την ψύξη των κάρβουνων έπειτα από την παραγωγή τους και πριν την αποθήκευσή τους.

- “*Star Princess*”

Στις 23 Μαρτίου του 2006 εντοπίστηκε εστία πυρκαγιάς στο κρουαζιερόπλοιο “*Star Princess*” κατά το ταξίδι του από το Grand Cayman στο Montego Bay στην Τζαμάικα με 2690 επιβάτες και 1123 άτομα πλήρωμα (Marine Accident Investigation Branch, 2006). Η φωτιά ξεκίνησε από εξωτερικό μπαλκόνι στο κατάστρωμα 10 στην αριστερή μεριά του πλοίου, στο κέντρο της κύριας κατακόρυφης ζώνης 3, η οποία φαίνεται σε κάτοψη στην παρακάτω εικόνα στο ύψος του καταστρώματος 12. Στην ίδια εικόνα φαίνονται και οι χρόνοι ανίχνευσης της πυρκαγιάς:



Εικόνα7- Έκταση της ζημιάς στο κρουαζιερόπλοιο “*Star Princess*”



Εικόνα 8-Κάτωψη κύριας κατακόρυφης ζώνης 3

Είναι πιθανό η φωτιά να ξεκίνησε από κάποιο τσιγάρο μισοσβησμένο που άρχισε να θερμαίνει τα αναφλέξιμα υλικά του μπαλκονιού, τα οποία εξέπεμπαν καπνό για περίπου 20 λεπτά, προτού εμφανιστούν φλόγες. Από τη στιγμή της δημιουργίας της φωτιάς, υπήρξε πολύ γρήγορη εξάπλωση στα γειτονικά μπαλκόνια και λόγω του πολύ δυνατού αέρα, επεκτάθηκε εντός 6 λεπτών στα μπαλκόνια των καταστροφμάτων 11 και 12 κατά μήκος των ζωνών 3 και 4. Έπειτα από 20 λεπτά είχε επεκταθεί έως και τη ζώνη 5. Αξίζει να σημειωθεί ότι η φωτιά δεν περιορίστηκε στα μπαλκόνια, αλλά εξαπλώθηκε και στο εσωτερικό των καμπινών, καθώς η θερμότητα που εκλυόταν ήταν αρκετή ώστε να καταστραφεί το διαχωριστικό τζάμι μεταξύ μπαλκονιού- καμπίνας, αλλά ευτυχώς περιορίστηκε λόγω της περιορισμένης αναφλεξιμότητας των επίπλων και της ενεργοποίησης των κατασβεστικών συστημάτων. Όσο προόδευε η φωτιά, μεγάλα ποσά καπνού παράγονταν από τα αναφλέξιμα έπιπλα του μπαλκονιού (πλαστικές καρέκλες, τραπέζια) και δυσκόλευε τη διαδικασία εκκένωσης. Ένας επιβάτης πέθανε λόγω εισπνοής των επικίνδυνων αερίων και 13 παρουσίασαν προβλήματα υγείας.

Πλήθος παραγόντων υποδεικνύουν ότι αν και τα μπαλκόνια ήταν κατασκευασμένα και σχεδιασμένα σύμφωνα με τις διατάξεις της SOLAS και του κεφαλαίου II-2 (σχετικά με την προστασία έναντι φωτιάς), ορισμένες βασικές αρχές δεν πληρούνταν. Αυτές είναι οι ακόλουθες:

- 1) Τα διαχωριστικά μεταξύ των μπαλκονιών, τα πλακάκια του καταστρώματος από πολουρεθάνη και τα πλαστικά έπιπλα ήταν εύφλεκτα και παρήγαγαν μεγάλη ποσότητα πυκνού καπνού όταν καίγονταν.
- 2) Τα τζάμια στις μπαλκονόπορτες δεν ήταν ούτε πυρίμαχα (κλάσης «Α»), ούτε έκλειναν αυτόματα από μόνα τους.
- 3) Τα μπαλκόνια διέσχιζαν κύριες οριζόντιες και κατακόρυφες ζώνες χωρίς να διαθέτουν δομικά ή θερμικά όρια στα σύνορα των ζωνών αυτών.
- 4) Απουσία συστήματος ανίχνευσης και κατάσβεσης της φωτιάς στα μπαλκόνια.

Η φωτιά έσβησε έπειτα από 1,5 ώρα. Συνολικά 79 καμπίνες καταστράφηκαν ολοσχερώς και ζημιές υπήρξαν σε 218. Η συνολική βεβλαμμένη επιφάνεια κάλυπτε 3 κατακόρυφες ζώνες σε 5 καταστρώματα. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το μέγεθος της καταστροφής:

Τέλος, ο πίνακας που ακολουθεί περιλαμβάνει τα σημαντικότερα γεγονότα που έλαβαν χώρα από τη στιγμή της αντίληψης της φωτιάς κατά χρονολογική σειρά.

Πίνακας 2- Τα σημαντικότερα γεγονότα που έλαβαν χώρα κατά χρονολογική σειρά

0250	Smell of burning detected amidships on the port side of deck 14. The relative wind was 27 ^o on the port bow at 30 knots.
0309	Fire seen by passenger and manual call point activated on deck 11 zone 2, port side. Fire seen from port bridge wing immediately after alarm.
0310	Broadcast for assessment party to proceed to deck 11 zone 2, port side. First Smoke detectors triggered deck 15, zones 5 and 6
0311	First smoke and heat detectors triggered in deck 10, zone 3 (C316 and C318) First smoke detector triggered in deck 11, zone 3 (alleyway by B324) Hi-fog flow alarm triggered deck 10, zone 3
0312	Captain and Staff Captain arrive on the bridge/safety centre First heat detector in deck 11, zone 3 (B322)
0313	Crew alert broadcast
0314	Fire screen doors closed Hi-fog flow alarm triggered in deck 11, zone 3 First smoke detector triggered in deck 12, zone 4 (A402)
0315	First heat detector in deck 12, zone 4 (A402)
0316	First smoke detector triggered in deck 11, zone 4 (B402) First smoke detector triggered in deck 10, zone 4 (C402) First manual call point activated in deck 12, zone 4 (by A342)
0317	All ventilation stopped Order given to reduce ship's speed First heat detector triggered in deck 11, zone 4 (B406) First smoke detector triggered in deck 12, zone 3 (alleyway by A340) First heat detector triggered in deck 10, zone 4 (C402) Hi-fog flow alarm triggered in deck 11, zone 4 First heat detector triggered in deck 12, zone 3 (A338)
0318	First smoke detector triggered in deck 14, zone 3 (pizza bar) Hi-fog flow alarm triggered in deck 10, zone 4 Hi-fog flow alarm triggered in deck 12, zone 3 Commenced course alteration to port
0320	General Emergency Stations broadcast Relative wind now on starboard bow
0322	First smoke detector triggered in deck 14, zone 4
0323	First smoke detector triggered in deck 14, zone 5
0325	Order given to prepare the ships' lifeboats Progressively established boundary cooling on decks 14, 15, 7, 8, and 9
0326	Deck fire party enters into fire affected area on deck 11 with firefighters with CABA
0328	Captain orders an urgency message to be sent. The message is prepared but not transmitted
0331	First smoke detector triggered in deck 11, zone 5
0332	First smoke detector triggered in deck 12, zone 5
0334	First heat detector triggered in deck 11, zone 5
0338	Engine fire party enter deck 12, zone 3 with firefighters equipped with breathing apparatus First smoke detector triggered in deck 10, zone 5 First heat detector triggered in deck 10, zone 5 First heat detector triggered in deck 12, zone 5
0344	Casualty reported on deck 12, zone 3
0402	Further casualty reported on deck 12, zone 3
0425	Second casualty on deck 12, zone 3 pronounced dead
0518	Speed increased and course altered toward Montego Bay
0520	Smoke extraction commenced in fire affected areas
0548	Deck 11, zones 3,4, and 5 search complete
0641	Search of fire affected areas complete
0945	Ship arrives Montego Bay
0954	All passengers and crew accounted for. Fatality identified

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ

1. DNV TYPE APPROVAL

471.12 Class B Bulkhead

The below is liable to change in the light of new experience gained

Documents to be submitted

The following documents are to be submitted:

- Technical documentation
- One copy of test reports from a recognised test laboratory (the reports should normally be less than 24 months old)

Design Requirements

The product is to comply with the following Rules and Regulations:

- a Det Norske Veritas' Rules for Classification of Ships and Mobile Offshore Units
- b IMO Res. MSC.61(67), FTPC Part 3

Test requirements

The product should be tested in accordance with IMO FTPC Part 3 (IMO Res. A.754(18)) to determine the fire rating (B-0, B-15 or B-30).

The insulation material should be tested for non-combustibility according to IMO FTPC Part 1 (ISO 1182:1990).

If the bulkhead incorporate panels, the specimen should be constructed such that at least one of the panels is of full width and this, or these, should be positioned such that both its/their longitudinal edges are joint to an adjacent panel and are not secured to the restraint frame.

If the bulkhead may be incorporate electrical fittings, e.g. light fittings and/or ventilation units, it is necessary that initially a test is performed on a specimen of bulkhead itself, without the incorporate of these units, to establish the basic performance. A separate test(s) may be performed on a specimen with the units incorporated to ascertain their influence on their performance of the bulkhead.

Text in certificate

The following items shall be specified in the certificate (if applicable):

- Thickness of steel/aluminium
- Type, thickness, density and manufacturer of insulation material
- Fastening arrangement
- Max. panel size (height x width)
- Total thickness of bulkhead

2. ΚΩΔΙΚΑΣ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΣΤΟ FDS

```
&HEAD CHID='STANDARD_FIRE_TEST', TITLE='ATF Room Fire Test, SVN
$Revision: 3127 $' /

&MESH IJK=36,24,12, XB=0.0,8.0,-0.8,4.6,0.0,2.8 /

&TIME T_END=1800.0 /

&MISC SURF_DEFAULT='WALL' /

&REAC ID          = 'POLYURETHANE'
      FYI          = 'C_6.3 H_7.1 N O_2.1, NFPA Handbook, Babrauskas'
      SOOT_YIELD   = 0.10
      N            = 1.0
      C            = 6.3
      H            = 7.1
      O            = 2.1 /

&SURF ID='FIRE', HRRPUA=1900., COLOR='RASPBERRY',RAMP_Q = 'fire_ramp'
/

&RAMP ID='fire_ramp', T = 0.0, F=0.95 /
&RAMP ID='fire_ramp', T = 100.0, F=1. /
&RAMP ID='fire_ramp', T = 200.0, F=1.05 /
&RAMP ID='fire_ramp', T = 300.0, F=1.1 /
&RAMP ID='fire_ramp', T = 400.0, F=0.8/
&RAMP ID='fire_ramp', T = 500.0, F=0.7 /
&RAMP ID='fire_ramp', T = 600.0, F=0.6 /
&RAMP ID='fire_ramp', T = 700.0, F=0.6 /

&MATL ID          = 'STEEL'
      FYI          = 'Properties completely fabricated'
      SPECIFIC_HEAT = 0.465
      CONDUCTIVITY  = 78.75
      DENSITY       = 7800 /

&MATL ID          = 'MINWOOL'
      FYI          = 'Properties completely fabricated'
      SPECIFIC_HEAT = 0.75
      CONDUCTIVITY  = 0.041
      DENSITY       = 129
      N_REACTIONS   = 1
      NU_FUEL       = 1.
      REFERENCE_TEMPERATURE = 750.
      HEAT_OF_REACTION = 1500.
      HEAT_OF_COMBUSTION = 30000. /

&MATL ID          = 'PVC'
      FYI          = 'Properties completely fabricated'
      SPECIFIC_HEAT = 0.9
      CONDUCTIVITY  = 0.19
      DENSITY       = 1300
      N_REACTIONS   = 1
      NU_FUEL       = 1.
      REFERENCE_TEMPERATURE = 750.
      HEAT_OF_REACTION = 1500.
      HEAT_OF_COMBUSTION = 30000. /
```



```

&MATL ID          = 'PVC2'
  FYI              = 'Properties completely fabricated'
  SPECIFIC_HEAT    = 0.9
  CONDUCTIVITY     = 0.01
  DENSITY          = 1300
  REFERENCE_TEMPERATURE = 1000.
  N_REACTIONS      = 1
  NU_FUEL          = 1.
  HEAT_OF_REACTION = 1500.
  HEAT_OF_COMBUSTION = 30000. /

&SURF ID          = 'WALL'
  RGB              = 200,200,200
  MATL_ID          = 'PVC2','STEEL','MINWOOL','STEEL','PVC2'
  THICKNESS        = 0.0005,0.003,0.018,0.003,0.0005 /

&SURF ID          = 'WALL2'
  RGB              = 200,200,200
  MATL_ID          = 'PVC','STEEL','MINWOOL','STEEL','PVC'
  THICKNESS        = 0.0005,0.0006,0.015,0.0006,0.0005
  BACKING          = 'EXPOSED' /

&OBST XB= 2.30,2.50,2.00,2.80,0.00,0.20, SURF_ID='FIRE' /

&OBST XB= 4.00,4.25,-0.80,4.60,0.00,2.80, SURF_ID='WALL2' /DIAXWRIST
&OBST XB= 0.00,8.00,-0.80,4.60, 0.00, 0.00 /orofi

&OBST XB= 0.00, 8.00, -0.20, 0.00, 0.00, 2.80 / Front wall
&HOLE XB= 0.10, 0.60, -0.20, 0.00, 0.00, 2.00 / Door

&VENT MB='YMIN',SURF_ID='OPEN' /

&BNDF QUANTITY='GAUGE HEAT FLUX' /
&BNDF QUANTITY='WALL TEMPERATURE' /
&BNDF QUANTITY='BURNING RATE' /

&SLCF PBX=3.60, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBX=3.60, QUANTITY='oxygen' /
&SLCF PBX=3.60, QUANTITY='MIXTURE FRACTION' /
&SLCF PBX=3.60, QUANTITY='HRRPUV' / Heat Release Rate per Unit Volume

&SLCF PBX=4.45, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBX=4.45, QUANTITY='oxygen' /

&SLCF PBZ=0.7, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBZ=1.4, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBZ=2.1, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBZ=2.6, QUANTITY='TEMPERATURE' /

&DEVC XYZ=1.2,1,2.1, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC XYZ=3.6,1,2.1, QUANTITY='TEMPERATURE' /

```



```
&DEVC XYZ=4.5,1,2.1, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC XYZ=7,1,2.1, QUANTITY='TEMPERATURE' /

&DEVC XYZ=1.2,2.3,2.1, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC XYZ=3.6,2.3,2.1, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC XYZ=4.5,2.3,2.1, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC XYZ=7,2.3,2.1, QUANTITY='TEMPERATURE' /

&DEVC XYZ=1.2,4,2.1, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC XYZ=3.6,4,2.1, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC XYZ=4.5,4,2.1, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC XYZ=7,4,2.1, QUANTITY='TEMPERATURE' /

&DEVC XYZ=2.6,2.3,0.0, QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX', IOR=3 /

&TAIL /
```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ IV

1. ΚΩΔΙΚΑΣ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΣΤΟ FDS:

```
&HEAD CHID='SYGKRISI', TITLE='ATF Room Fire Test, SVN $Revision: 3127
$' /

&MESH IJK=180,27,24, XB=0.0,35.0,0.0,5.0,0.0,4.0 /

&TIME T_END=500. /

&MISC SURF_DEFAULT='WALL' /

&REAC ID          = 'METHANE'
      SOOT_YIELD = 0.10
      C           = 1.
      H           = 4. /

&SURF ID='FIRE', HRRPUA=550., COLOR='RASPBERRY'/

&MATL ID          = 'STEEL'
      FYI          = 'Properties completely fabricated'
      SPECIFIC_HEAT = 1.045
      CONDUCTIVITY  = 0.048
      DENSITY       = 7854.
      N_REACTIONS   = 1.
      NU_FUEL       = 1.
      REFERENCE_TEMPERATURE = 750.
      HEAT_OF_REACTION = 1500.
      HEAT_OF_COMBUSTION = 50000.
      EMISSIVITY    = 0.9 /

&SURF ID          = 'WALL'
      RGB          = 200,200,200
      MATL_ID      = 'STEEL'
      THICKNESS    = 0.003
      BACKING      = 'EXPOSED'/

&OBST XB= 4.00,5.00,2.00,3.00,0.20,0.20, SURF_ID='FIRE'/

&OBST XB= 7.00,7.25,0.0,5.0,0.0,4.0, SURF_ID='WALL' /DIAXWRIST
&OBST XB= 0.00,40.,0.0,5.,0.00,0.00 /orofi

&OBST XB= 0.00, 7.00, 0, 0.00, 0.00, 4.00 / Front wall
&HOLE XB= 7.00,7.25, 2.5,3.5,0.0,2.00 / Door

&VENT MB='YMIN',SURF_ID='OPEN' /
```

```

&BNDF QUANTITY='GAUGE HEAT FLUX' /
&BNDF QUANTITY='WALL TEMPERATURE' /
&BNDF QUANTITY='BURNING RATE' /

&SLCF PBZ=0.7,QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBZ=2.1,QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBZ=3.00,QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBZ=3.8,QUANTITY='TEMPERATURE' /

&SLCF PBX=5, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBX=5, QUANTITY='oxygen' /
&SLCF PBX=9, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBX=9, QUANTITY='oxygen' /
&SLCF PBX=15, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBX=15, QUANTITY='oxygen' /
&SLCF PBX=20, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBX=20, QUANTITY='oxygen' /
&SLCF PBX=25, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBX=25, QUANTITY='oxygen' /

&DEVC XYZ= 5.00,2.5,1.00,QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC XYZ= 9.00,2.5,1.00,QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC XYZ= 15.00,2.5,1.00,QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC XYZ= 25.00,2.5,1.00,QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC XYZ= 30.00,2.5,1.00,QUANTITY='TEMPERATURE' /

&DEVC XYZ= 5.00,2.5,1.00,QUANTITY='oxygen' /
&DEVC XYZ= 9.00,2.5,1.00,QUANTITY='oxygen' /
&DEVC XYZ= 15.00,2.5,1.00,QUANTITY='oxygen' /
&DEVC XYZ= 25.00,2.5,1.00,QUANTITY='oxygen' /
&DEVC XYZ= 30.00,2.5,1.00,QUANTITY='oxygen' /

&DEVC XYZ= 5.00,2.5,1.00,QUANTITY='VISIBILITY' /
&DEVC XYZ= 9.00,2.5,1.00,QUANTITY='VISIBILITY' /
&DEVC XYZ= 15.00,2.5,1.00,QUANTITY='VISIBILITY' /
&DEVC XYZ= 25.00,2.5,1.00,QUANTITY='VISIBILITY' /
&DEVC XYZ= 30.00,2.5,1.00,QUANTITY='VISIBILITY' /

&DEVC XYZ= 5.00,2.5,1.00,QUANTITY='carbon monoxide' /
&DEVC XYZ= 9.00,2.5,1.00,QUANTITY='carbon monoxide' /
&DEVC XYZ= 15.00,2.5,1.00,QUANTITY='carbon monoxide' /
&DEVC XYZ= 25.00,2.5,1.00,QUANTITY='carbon monoxide' /
&DEVC XYZ= 30.00,2.5,1.00,QUANTITY='carbon monoxide' /

&DEVC XYZ= 5.00,2.5,2.00,QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC XYZ= 9.00,2.5,2.00,QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC XYZ= 15.00,2.5,2.00,QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC XYZ= 25.00,2.5,2.00,QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC XYZ= 30.00,2.5,2.00,QUANTITY='TEMPERATURE' /

&DEVC XYZ= 5.00,2.5,2.00,QUANTITY='oxygen' /
&DEVC XYZ= 9.00,2.5,2.00,QUANTITY='oxygen' /
&DEVC XYZ= 15.00,2.5,2.00,QUANTITY='oxygen' /
&DEVC XYZ= 25.00,2.5,2.00,QUANTITY='oxygen' /

```

```
&DEVC XYZ= 30.00,2.5,2.00,QUANTITY='oxygen' /

&DEVC XYZ= 5.00,2.5,2.00,QUANTITY='VISIBILITY' /
&DEVC XYZ= 9.00,2.5,2.00,QUANTITY='VISIBILITY' /
&DEVC XYZ= 15.00,2.5,2.00,QUANTITY='VISIBILITY' /
&DEVC XYZ= 25.00,2.5,2.00,QUANTITY='VISIBILITY' /
&DEVC XYZ= 30.00,2.5,2.00,QUANTITY='VISIBILITY' /

&DEVC XYZ= 5.00,2.5,2.00,QUANTITY='carbon monoxide' /
&DEVC XYZ= 9.00,2.5,2.00,QUANTITY='carbon monoxide' /
&DEVC XYZ= 15.00,2.5,2.00,QUANTITY='carbon monoxide' /
&DEVC XYZ= 25.00,2.5,2.00,QUANTITY='carbon monoxide' /
&DEVC XYZ= 30.00,2.5,2.00,QUANTITY='carbon monoxide' /

&DEVC XYZ= 5.00,2.5,3.50,QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC XYZ= 9.00,2.5,3.50,QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC XYZ= 15.00,2.5,3.50,QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC XYZ= 25.00,2.5,3.50,QUANTITY='TEMPERATURE' /
&DEVC XYZ= 30.00,2.5,3.50,QUANTITY='TEMPERATURE' /

&DEVC XYZ= 5.00,2.5,3.50,QUANTITY='oxygen' /
&DEVC XYZ= 9.00,2.5,3.50,QUANTITY='oxygen' /
&DEVC XYZ= 15.00,2.5,3.50,QUANTITY='oxygen' /
&DEVC XYZ= 25.00,2.5,3.50,QUANTITY='oxygen' /
&DEVC XYZ= 30.00,2.5,3.50,QUANTITY='oxygen' /

&DEVC XYZ= 5.00,2.5,3.50,QUANTITY='VISIBILITY' /
&DEVC XYZ= 9.00,2.5,3.50,QUANTITY='VISIBILITY' /
&DEVC XYZ= 15.00,2.5,3.50,QUANTITY='VISIBILITY' /
&DEVC XYZ= 25.00,2.5,3.50,QUANTITY='VISIBILITY' /
&DEVC XYZ= 30.00,2.5,3.50,QUANTITY='VISIBILITY' /

&DEVC XYZ= 5.00,2.5,3.50,QUANTITY='carbon monoxide' /
&DEVC XYZ= 9.00,2.5,3.50,QUANTITY='carbon monoxide' /
&DEVC XYZ= 15.00,2.5,3.50,QUANTITY='carbon monoxide' /
&DEVC XYZ= 25.00,2.5,3.50,QUANTITY='carbon monoxide' /
&DEVC XYZ= 30.00,2.5,3.50,QUANTITY='carbon monoxide' /

&DEVC XYZ=2.6,2.3,0.0, QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX', IOR=3 /

&TAIL /
```