

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
ΝΑΥΤΙΚΗ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΕΠΙΣΤΗΜΗ  
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΛΟΙΟΥ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ  
**Παπανικολάου Ταξιάρχης**



“Εκτίμηση ασφάλειας έναντι πυρκαγιάς σε πλοίο τύπου φρεγάτας”

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Επιβλέπων: Κ. Σπύρου, Καθηγητής

Αθήνα, Ιούνιος 2016

*«Στο πόκερ, όπως και στη ζωή, δεν μπορείς να αλλάξεις τα χαρτιά που σου έτυχαν. Μπορείς να αλλάξεις όμως τον τρόπο που θα παίξεις την παρτίδα..»*

RandyPausch, «Η Τελευταία Διάλεξη»

*«Ποτέ μην κατακρίνεις κάποιον, αν πρώτα δεν βαδίσεις ένα φεγγάρι δρόμο μέσα στα δικά του παπούτσια..»*

Ινδιάνικο Γνωμικό



## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον καθηγητή κ. Κ. Σπύρου, ο οποίος μέσω των κατευθύνσεών του και της εμπειρίας του μου παρείχε όλες τις απαραίτητες γνώσεις για την περάτωση της διπλωματικής εργασίας. Επιπρόσθετα, τον ευχαριστώ ακόμα που μου έδωσε τη δυνατότητα εκπόνησης μιας διπλωματικής εργασίας η οποία μέσω κατάλληλων τροποποιήσεων στους κώδικες μπορεί να βοηθήσει μελλοντικά τα πλοία του Ελληνικού Πολεμικού Ναυτικού. Ευχαριστώ επίσης τους καθηγητές κ. Λ. Καϊκτσή και κ. Γ. Γρηγορόπουλο που μαζί με τον κ. Σπύρου, απετέλεσαν τα μέλη της τριμελούς επιτροπής αξιολόγησης της εν λόγω εργασίας.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον διδάκτορα κ. Ν. Θεμελή και την υποψήφια διδάκτορα κ. Ι. Κορομηλά, των οποίων η βοήθεια υπήρξε καταλυτική στην εξοικείωσή μου με τα υπολογιστικά προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν αλλά και στη διαμόρφωση της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλες εκείνες και εκείνους που μου συμπαραστάθηκαν και με βοήθησαν να κρατήσω το κεφάλι ψηλά κατά την πολύ δύσκολη περίοδο που “σεργιάνιζα” με τη φρεγάτα ΨΑΡΑ τις θάλασσες της Σομαλίας (12 Φεβρουαρίου – 19 Μαΐου 2014)...

***Η διπλωματική εργασία αυτή αφιερώνεται στους τρεις συναδέλφους μου στα ελικόπτερα του Ναυτικού: Αναστάσιο Τουλίτση, Κωσταντίνο Πανανά και Ελευθέριο Ευαγγέλου. Έφυγαν άδοξα από τη ζωή εν ώρα υπηρεσίας, όταν το ελικόπτερο ΠΝ-28 συνετρίβη στη νήσο Κίναρο. Ο Θεός ας αναπαύσει τις ψυχές τους ...***

## Περιεχόμενα

Περίληψη.....	6
Abstract .....	7
Κεφάλαιο 1 -Εισαγωγή .....	8
1.1 Γενικά.....	8
1.2 Στόχοι.....	8
1.3 Δομή εργασίας .....	8
1.4 Βιβλιογραφική επισκόπηση .....	9
ΜΕΡΟΣ Ι .....	11
Κεφάλαιο 2 – Θεωρητική προσέγγιση της μηχανικής της πυρκαγιάς.....	12
2.1 Εισαγωγή .....	12
2.2 Φύση και ιδιότητες της πυρκαγιάς .....	12
2.2.1 Συστατικά στοιχεία της πυρκαγιάς .....	13
2.2.2 Στάδια της πυρκαγιάς.....	17
2.2.3 Τρόποι καταπολέμησης πυρκαγιάς .....	18
2.3 Heat Release Rate Curve .....	19
Κεφάλαιο 3- SOLAS και πυρασφάλεια .....	22
3.1 Εισαγωγή .....	22
3.2 Ιστορική αναδρομή της σύμβασης SOLAS .....	22
3.3 Το κεφάλαιο II-2 της SOLAS.....	24
3.4 Πρότυπη δοκιμή φωτιάς σε πλοίο .....	25
3.5 Σύγκριση κανονισμών SOLAS με τα διαθέσιμα μέσα σε πολεμικό πλοίο τύπου φρεγάτας.....	27
ΜΕΡΟΣ ΙΙ .....	35
Κεφάλαιο 4- Μοντέλα Προσομοίωσης Πυρκαγιάς.....	36
4.1 Εισαγωγή .....	36
4.2 Επιλογή κατάλληλου προγράμματος για την διεξαγωγή της προσομοίωσης.....	37
4.3 Fire Dynamics Simulator–Smokeview .....	37
Κεφάλαιο 5 – Προσομοίωση πυρκαγιάς σε πλοίο.....	41
5.1 Εισαγωγή .....	41
5.2 Αντικειμενικός Σκοπός .....	41

5.3 Περιγραφή του χώρου και της πυρκαγιάς.....	41
5.4 Προσομοίωση πυρκαγιάς και θεωρήσεις .....	43
Κεφάλαιο 6 – Επιβίωση Αγήματος.....	45
6.1 Επεξεργασία αποτελεσμάτων .....	45
6.2 Επιβίωση αγήματος στα υπό μελέτη σενάρια .....	47
6.2.1 RAMP 700με μέγιστη ένταση 1846 KW .....	50
6.2.2 RAMP 750 με μέγιστη ένταση 1846 KW.....	58
6.2.3 Σύγκριση μεταξύ των σεναρίων RAMP 700 και RAMP 750 για τα 1846 KW. ....	66
6.2.4 RAMP 750 μέγιστης εντάσεως 500 KW.....	67
6.2.5 RAMP 750 μέγιστης εντάσεως 900 KW.....	69
6.2.6 RAMP 750 1846 KWAlternativeHRR.....	71
6.2.7 RAMP 750 μέγιστης εντάσεως 2500 KW.....	73
6.3 Συγκριτικά αποτελέσματα για την επιβίωση του αγήματος .....	76
Κεφάλαιο 7 – Προσομοίωση Πυρκαγιάς με Ενεργοποίηση συστήματος Κατάσβεσης.....	80
7.1 Εισαγωγή .....	80
7.2 –Τοποθέτηση καταιονιστήρα.....	80
Κεφάλαιο 8– Μελλοντικά βήματα .....	86
8.1 Εισαγωγή .....	86
8.2 Σύνοψη.....	86
8.2 Προτάσεις έρευνας - Σχεδιαστικές αλλαγές .....	86
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	88

## Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εφαρμογή του προτεινόμενου πιθανοθεωρητικού μοντέλου εκτίμησης ασφάλειας έναντι πυρκαγιάς, όπως αυτό περιγράφεται στην εργασία των Spyrou and Themelis (2012), σε πολεμικό πλοίο τύπου φρεγάτας. Στην εργασία τους, διεξάγουν προσομοιώσεις πυρκαγιάς σε ένα μοντέλο επιβατικού πλοίου και εξετάζουν τις επιδράσεις των προϊόντων της πυρκαγιάς στον άνθρωπο αλλά και τον χρόνο που αυτές φτάνουν στις οριακές τους τιμές.

Αρχικά, παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο της μηχανικής της πυρκαγιάς (Fire Engineering). Παρουσιάζονται χρήσιμες πληροφορίες που αφορούν στα δομικά συστατικά της πυρκαγιάς, την επίδραση που έχει αυτή στον άνθρωπο, τους τρόπους αντιμετώπισής της αλλά και ορισμένα επικίνδυνα φαινόμενα που σχετίζονται με αυτή, όπως είναι ενδεικτικά το κύμα φωτιάς (backdraft) και η ανάφλεξη οροφής (rollover). Στη συνέχεια, πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ των κανονισμών ασφάλειας έναντι πυρκαγιάς που πρέπει να ισχύουν στα εμπορικά πλοία (σύμφωνα με το κεφάλαιο II-2 της SOLAS – Safety Of Life At Sea) αλλά και του τί προβλέπεται περί πυρασφάλειας σε μια φρεγάτα.

Κατόπιν, γίνεται αναφορά στους τύπους μοντέλων προσομοίωσης πυρκαγιάς που χρησιμοποιούνται σήμερα. Ακόμη, παρουσιάζεται αναλυτικά το μοντέλο της φρεγάτας αλλά και οι παράγοντες αβεβαιότητας (υπό μορφή θεωρήσεων) που υπεισέρχονται στο πρόβλημα της πυρασφάλειας. Έπειτα, για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων αναφορικά με την επιβίωση του πληρώματος σε ενδεχόμενο πραγματικού συμβάντος, διεξάγονται, με τη χρήση του κώδικα υπολογιστικής ρευστομηχανικής FDS (Fire Dynamics Simulator) σενάρια πυρκαγιάς υπό διαφορετικές συνθήκες (McGrattan et al., 2014). Προς αυτοματοποίηση των διαδικασιών, χρησιμοποιείται και το πρόγραμμα Mathematica (Wolfram, 1986).

Τα σενάρια πυρκαγιάς διεξάγονται σε έναν χώρο μέσης διακινδύνευσης ο οποίος είναι αρκετά απομακρυσμένος από τον χώρο συγκέντρωσης του αγήματος πυρκαγιάς. Θεωρείται ότι το πλοίο βρίσκεται σε κατάσταση γενικού συναγερμού (το προσωπικό βρίσκεται ήδη στις θέσεις που πρέπει να είναι προ εμπλοκής του σε μάχη) και εξετάζονται διαφορετικές περιπτώσεις ανάλογα με τον τρόπο εξέλιξης της πυρκαγιάς, τον χρόνο αντίδρασης του αγήματος για την καταπολέμηση της πυρκαγιάς, διαφορετικές μέγιστες εντάσεις πυρκαγιάς και το κατά πόσο μπορεί να επηρεάσει ή όχι το σενάριο η ύπαρξη, κοντά στο συγκεκριμένο σημείο ανάφλεξης, ενός καταιονιστήρα θαλασσίου ύδατος. Τέλος, ακολουθούν μερικές προτάσεις που αφορούν σε σχεδιαστικές αλλαγές και περαιτέρω διερευνήσεις γύρω από το θέμα της πυρασφάλειας στη φρεγάτα.

## Abstract

The main purpose of the present diploma thesis is the application of the probabilistic model of safety evaluation against fire (as it is described in the work of Spyrou and Themelis (2012)) on a warship, and more specifically, a frigate.

Part I consists of 3 chapters. In chapter 1, general information is presented regarding the thesis, such as its structure and objectives. Also, there is a brief presentation of several theses of a similar subject. In chapter 2, the theoretical background of fire engineering is presented. Useful information regarding the main fire substances, their effects on the human body, the ways to engage them and several phenomena that relate to fire itself (like rollover and backdraft) is presented. In chapter 3, there is a comparison between the safety regulations regarding fire safety that apply on merchant ships nowadays (according to chapter II-2 of SOLAS) and which of them are followed by the navy for this type of ship.

Then, Part II follows, which consists of 5 chapters. In chapter 4, there is a general presentation of fire simulation models and afterwards, a more thorough examination of FDS (Fire Dynamics Simulator) the simulation model that is used (McGrattan et al., 2014). The model provides safer results for crew survivability that almost represent a real incident. In addition, in chapter 5, there is an in-depth description of the frigate model in FDS, where information referring to the structural elements of the ship, the fire and other theories regarding the experiment is presented. Chapter 6 includes data about the survivability of the crew, where FDS results are presented in the form of diagrams and matrices for all fire scenarios. In order for the procedure to be automated, the computational software Mathematica is used (Wolfram, 1986). In chapter 7, a sea water sprinkler is placed right above the fire in order to see whether crew survivability is raised or not. Eventually, in chapter 8, there a presentation of some ideas for further research regarding fire safety.

In conclusion, all fire scenarios are carried out in a medium fire risk room that is far away from the fire engagement team muster station. The ship is considered to be in a state of general alarm (all personnel is in the appropriate positions before engaging into battle) and different cases are examined depending on fire growth and the reaction time of the firefight regiment.

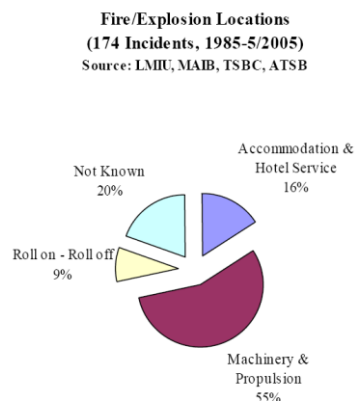


## Κεφάλαιο 1 -Εισαγωγή

### 1.1 Γενικά

Είναι κοινά αποδεκτό ότι η πυρκαγιά είναι ένας από τους μεγαλύτερους κίνδυνους που αντιμετωπίζει ένα πλοίο κατά τη λειτουργία του. Μεγάλες ποσότητες φορτίων έχουν χαθεί ύστερα από ατυχήματα πυρκαγιάς, με αποτέλεσμα να υπάρχουν υψηλές οικονομικές απώλειες για τη διαχειρίστρια εταιρία και τον πλοιοκτήτη. Εκτός όμως της μεγάλης οικονομικής απώλειας που ενδέχεται να έχουν τέτοιου είδους ατυχήματα, ο κίνδυνος για την απώλεια ανθρώπινων ζωών είναι εξέχουσας σημασίας.

Μια πυρκαγιά είναι εύκολο να ξεσπάσει πάνω σε ένα εμπορικό πλοίο εξαιτίας κάποιου βραχυκυκλώματος ηλεκτρονικών συσκευών, των ρακών καθαρισμού που έχουν απορροφήσει εύφλεκτα υλικά (όπως καύσιμα και λάδια), των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται σε χώρους πρόωσης και ενέργειας (όπως είναι το μηχανοστάσιο και το ηλεκτροστάσιο ενός πλοίου) αλλά και λόγω της ανθρώπινης απεισκευασίας (όπως το σβήσιμο τσιγάρων σε κάδους απορριμμάτων). Ακόμα ευκολότερα λοιπόν, μπορεί να ξεσπάσει μια πυρκαγιά σε ένα πολεμικό πλοίο όπως είναι η φρεγάτα, καθόσον υπεισέρχεται ο παράγοντας «μάχη» στην εξίσωση.



**Εικόνα 1** Διάγραμμα που δείχνει τους πιο επικίνδυνους χώρους που μπορεί να ξεσπάσει πυρκαγιά σε ένα πλοίο βάσει στατιστικών από 174 περιστατικά από το 1985-2005 (Πηγή: LMIC, MAIB, TSBC, ATSB).

### 1.2 Στόχοι

Αρχικά, πραγματοποιείται μια συνοπτική μελέτη της φυσιολογίας της πυρκαγιάς (fire engineering), σκοπός της οποίας είναι η εξοικείωση του αναγνώστη γύρω από θέματα που σχετίζονται με αυτήν, όπως είναι τα προϊόντα της καύσεως και η επίδρασή τους στον άνθρωπο, χρήσιμα διαγράμματα που απεικονίζουν πληροφορίες για την εξέλιξη της πυρκαγιάς κ.ο.κ. Δίνεται επίσης η δυνατότητα σύγκρισης των όσων προβλέπονται περί πυρασφάλειας από τη SOLAS για τα εμπορικά πλοία και της πραγματικής κατάστασης που απαντάται στα πολεμικά πλοία τύπου φρεγάτας. Τέλος, βασικός σκοπός είναι η εξέταση, μέσω προσομοιωτή, της αποτελεσματικότητας της παρέμβασης του πληρώματος ενός πολεμικού πλοίου για ένα πραγματικό συμβάν πυρκαγιάς σε ένα διαμέρισμα μέσης επικινδυνότητας, αλλά και η παράθεση προτάσεων που αφορούν στην πρόληψη και ασφαλέστερη αντιμετώπιση παρόμοιων περιστατικών.

### 1.3 Δομή εργασίας

Η διπλωματική εργασία διακρίνεται σε 2 μέρη. Στο Μέρος Ι, παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο που καθορίζει την ανάφλεξη και την ανάπτυξη της. Στο Κεφάλαιο 1, γίνεται μια γενική αναφορά στη διπλωματική εργασία, προσδιορίζονται οι στόχοι της και η δομή της ενώ παράλληλα γίνεται μια βιβλιογραφική επισκόπηση σε παρεμφερείς εργασίες γύρω από το θέμα της πυρασφάλειας. Στο Κεφάλαιο 2, αναφέρονται χρήσιμες πληροφορίες που αφορούν στα δομικά συστατικά της πυρκαγιάς, στην επίδραση που έχει αυτή στον άνθρωπο, στους τρόπους αντιμετώπισής της αλλά και σε ορισμένα επικίνδυνα φαινόμενα

που σχετίζονται με αυτή, όπως είναι ενδεικτικά τα φαινόμενα backdraft και rollover. Στη συνέχεια στο Κεφάλαιο 3, παρατίθενται οι κύριοι ισχύοντες κανονισμοί ασφάλειας εμπορικών πλοίων έναντι πυρκαγιάς (σύμφωνα με το κεφάλαιο II-2 της SOLAS) και συγκρίνονται με τα προβλεπόμενα περί πυρασφάλειας σε μια φρεγάτα. Το Μέρος II, αποτελεί το αριθμητικό κομμάτι της εργασίας. Στο Κεφάλαιο 4, γίνεται μια σύντομη αναφορά στα μοντέλα προσομοίωσης πυρκαγιάς που υπάρχουν σήμερα ενώ παρουσιάζονται αναλυτικότερα ο κώδικας υπολογιστικής ρευστομηχανικής FDS που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία μας εκτενώς. Στο Κεφάλαιο 5 γίνεται μια εκτενής περιγραφή των θεωρήσεων που λήφθηκαν υπόψη για την προσομοίωση και αναφέρονται στοιχεία όπως είναι οι κύριες διαστάσεις της φρεγάτας αλλά και οι δείκτες επιβίωσης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μελέτη των επιπτώσεων των προϊόντων της πυρκαγιάς στη δυνατότητα παρέμβασης του αγήματος. Στο Κεφάλαιο 6, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ενώ, στο Κεφάλαιο 7, γίνεται μία ακόμα πρόσθετη προσομοίωση με την τοποθέτηση ενός καταιονιστήρα ύδατος ακριβώς πάνω από την εστία της πυρκαγιάς. Τέλος, στο Κεφάλαιο 8, γίνονται προτάσεις που αφορούν σε μελλοντική έρευνα και πιθανές σχεδιαστικές αλλαγές.

## 1.4 Βιβλιογραφική επισκόπηση

Η μελέτη της ασφάλειας πλοίων έναντι πυρκαγιάς έχει αποτελέσει, τα τελευταία χρόνια, σημαντικό κομμάτι της έρευνας στη ναυπηγική. Οι περισσότερες μελέτες βασίζονται στη χρήση κάποιου κώδικα ρευστομηχανικής για την προσομοίωση τόσο της φωτιάς, όσο και της εκκένωσης του χώρου στον οποίο μαίνεται η πυρκαγιά. Πιο συγκεκριμένα, η Πάλλα (2012) ασχολήθηκε με την αποτελεσματικότητα διαφορετικών παχών μόνωσης των διαχωριστικών B-15 σε καμπίνες επιβατηγών πλοίων καθώς και τη μελέτη των παραγόντων βιωσιμότητας αυτών. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι με κατάλληλες προσομοιώσεις μπορεί κανείς να προσεγγίσει το βέλτιστο συνδυασμό αντοχής/τιμής για τα διαχωριστικά μόνωσης που πρόκειται να τοποθετηθούν σε επιβατικά πλοία. Συμπερασματικά, ανεξάρτητα από το πόσο απέχει η πηγή της φωτιάς από την αρχή του καταστώματος, όλοι οι παράγοντες βιωσιμότητας έχουν ακριβώς τις ίδιες τιμές για τα πρώτα πεντακόσια (500) δευτερόλεπτα. Οι Spyrou et al. (2013), ασχολήθηκαν με την επιτυχή ή όχι διαφυγή των επιβατών από τον χώρο της φωτιάς. Συγκεκριμένα, υπολογίστηκαν οι τιμές συγκέντρωσης - θερμοκρασίας, καπνού και τοξικών ουσιών, έτσι ώστε να βρεθεί ο απαιτούμενος χρόνος που αυτές φτάνουν στις οριακά αποδεκτές τιμές. Συμπερασματικά, προέκυψε ότι η ανακοπή της διαφυγής λόγω υψηλής συγκέντρωσης τοξικών ουσιών απαιτεί πολύ περισσότερο χρόνο για να πραγματοποιηθεί συγκριτικά με την ανακοπή πορείας των επιβατών λόγω υψηλής θερμοκρασίας και συγκέντρωσης καπνού. Μια άλλη σημαντική εργασία είναι εκείνη του Αζαόπουλου (2015). Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε ανάλυση της διαδικασίας για τον υπολογισμό του δείκτη διακινδύνευσης έναντι πυρκαγιάς σε επιβατηγά πλοία. Έχοντας ως απώτερο στόχο τη μελέτη σχεδιαστικών και λειτουργικών αλλαγών στην ασφάλεια επιβατηγού πλοίου έναντι πυρκαγιάς, χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό πρόγραμμα FDS (Fire Dynamic Simulator) για προσομοίωση της εξέλιξη της πυρκαγιάς και της εκκένωσης του πλοίου. Το συμπέρασμα της εν λόγω μελέτης ήταν ότι η βιωσιμότητα των επιβατών εξαρτάται άμεσα από την ένταση της πυρκαγιάς, τον χρόνο εντοπισμού και τον κύκλο ημέρας και νύχτας. Εντούτοις, μέχρι σήμερα δεν έχει πραγματοποιηθεί κάποια αντίστοιχη

μελέτη ασφάλειας έναντι πυρκαγιάς σε πολεμικά πλοία. Έτσι, στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μια προσπάθεια να αξιολογηθεί η ασφάλεια έναντι πυρκαγιάς σε ένα πολεμικό πλοίο τύπου φρεγάτας.

# ΜΕΡΟΣ Ι

## Κεφάλαιο 2 – Θεωρητική προσέγγιση της μηχανικής της πυρκαγιάς

### 2.1 Εισαγωγή

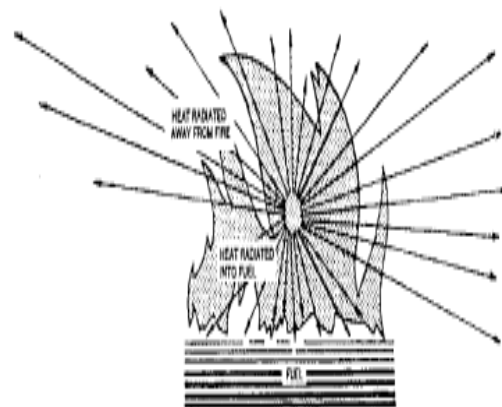
Η πυρκαγιά είναι ένα αρκετά περίπλοκο και επικίνδυνο φαινόμενο, το οποίο μπορεί να παρουσιαστεί να μην απροειδοποίητα αλλά πάντα λόγω κάποιας αιτίας. Ο αριθμός των ατυχημάτων εξαιτίας της είναι μεγάλος ενώ το κόστος τόσο σε ανθρώπινες ζωές όσο και σε υλικό (ιδιαίτερα στους τομείς της βιομηχανίας και της ναυτιλίας) είναι ακόμα μεγαλύτερο. Αναπόφευκτα λοιπόν, έχει αποτελέσει αντικείμενο μελέτης από πλήθος επιστημόνων, προκειμένου να επιτυγχάνεται αφενός η πρόληψη και αφετέρου η αποτελεσματική καταπολέμησή της σε περίπτωση που εκδηλωθεί. Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται αναλυτικά η μηχανική της πυρκαγιάς ή αλλιώς «Fire Engineering». Αναλυτικότερα, γίνεται αναφορά στη φυσιολογία της πυρκαγιάς και τις ιδιότητές της, στα παράγωγα της καύσεως και τις επιπτώσεις τους στον άνθρωπο, στα στάδια εξέλιξής της, σε διάφορα φαινόμενα που συνδέονται με αυτή αλλά στους τρόπους αντιμετώπισής της (ΑΣ (Αρχηγείο Στόλου), 2008).

### 2.2 Φύση και ιδιότητες της πυρκαγιάς

Η πυρκαγιά είναι στην πραγματικότητα μία χημική αντίδραση η οποία ονομάζεται οξειδωση. Οξειδωση είναι μία χημική διαδικασία στην οποία μία ουσία αναμιγνύεται με οξυγόνο και κατά τη διάρκεια αυτής υπάρχει απόδοση ενέργειας σε μορφή θερμότητας. Σε αντίθεση με την οξειδωση που εμφανίζεται με τη μορφή σκουριάς στα μεταλλικά υλικά όπου γίνεται με βραδύ ρυθμό, η πυρκαγιά είναι μια μορφή ταχείας οξειδωσης με ταυτόχρονη παραγωγή θερμότητας και φλόγας. Κατά τη διάρκειά της παράγονται θερμά προϊόντα καύσης αλλά και εκπομπή ορατής και μη ορατής ακτινοβολίας (ΤΕΑΠ (Τεχνικές Αντιμετώπισης Πυρκαγιάς), 2008).

Ο ατμός που δημιουργείται είτε από μία ουσία η οποία βρίσκεται σε αέρια μορφή (λόγω ελλείψεως δυνάμεων συνοχής μεταξύ των μορίων) είτε από μια ουσία που θερμαίνεται ευρισκόμενη σε υγρή ή στερεά μορφή (η θέρμανση ευνοεί τη διάσπαση των δεσμών μεταξύ των μορίων και παράγει ατμό), σε συνδυασμό με την παρουσία ικανής ποσότητας οξυγόνου δύναται να αναφλεγεί και να προκαλέσει την λεγόμενη καύση.

Πιο συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια της καύσης, εκλύεται ενέργεια σε μορφή θερμότητας και φωτός. Η θερμότητα αυτή είναι ακτινοβολούμενη και ίδιας μορφής με την ηλιακή, μεταδίδεται προς όλες τις κατευθύνσεις καθώς και προς την εστία της πυρκαγιάς. Η θερμότητα που επιστρέφει στην καύσιμη ύλη ονομάζεται

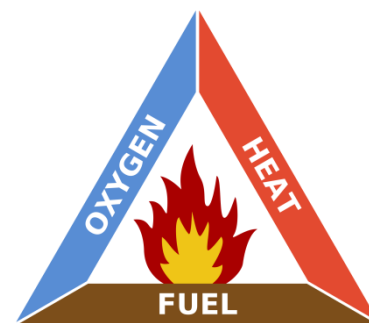


Εικόνα 2 Επιστρέφουσα ακτινοβολία. (πηγή: ΤΕΑΠ 2008)

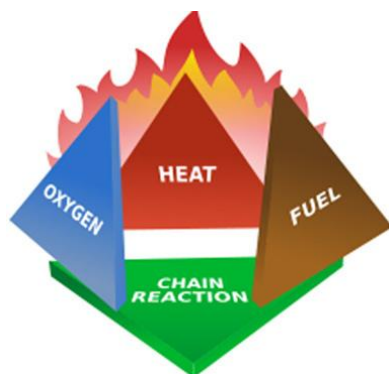
**επιστρέφουσα ακτινοβολία.** Μέρος αυτής ενισχύει τον ρυθμό εξάτμισης του καυσίμου, ενώ η υπόλοιπη ανεβάζει την θερμοκρασία του εξατμισθέντος καυσίμου σε επίπεδο ανάφλεξης. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την εισαγωγή του αέρα στο σημείο όπου ο ατμός και η φλόγα συνυπάρχουν είναι η αύξηση του μεγέθους της φλόγας και η αύξηση της ποσότητας του ατμού. Κατά αυτόν τον τρόπο, δημιουργείται μια αυτοσυντηρούμενη αλυσιδωτή αντίδραση στην οποία η καύση του εξατμισθέντος καυσίμου εκλύει θερμότητα, η οποία εν συνεχεία προκαλεί ανάφλεξη και παράγει ακόμα περισσότερον ατμό. Ο πλεονάζων ατμός εν συνεχεία καίγεται, εκλύοντας ακόμα περισσότερη θερμότητα, η οποία εν τέλει απελευθερώνει και αναφλέγει νέες ποσότητες εξατμισθέντος καυσίμου. Αυτή η διαδικασία εξακολουθεί μέχρις ότου αναλωθεί όλο το διαθέσιμο καύσιμο ή το οξυγόνο ή να πραγματοποιηθεί κατάσβεση της πυρκαγιάς.

### 2.2.1 Συστατικά στοιχεία της πυρκαγιάς

Για την εκδήλωση μιας πυρκαγιάς είναι απαραίτητα τρία συστατικά: η καύσιμη ύλη, το οξυγόνο και η θερμότητα (HAI (Hellenic Aircraft Industry, 2013). Τα τρία αυτά συστατικά, αντιστοιχίζονται για εποπτικούς λόγους, στις πλευρές ενός ισοσκελούς τριγώνου, γνωστό ως το **τρίγωνο της πυρκαγιάς** (Εικόνα 3). Αν οποιαδήποτε από τις τρεις πλευρές του τριγώνου λείπει ή αφαιρεθεί, η πυρκαγιά δεν μπορεί να εκδηλωθεί - διατηρηθεί.



Εικόνα 3 Τρίγωνο της πυρκαγιάς. (Πηγή: [www.globalsecurity.org](http://www.globalsecurity.org))



Εικόνα 4 Τετράεδρο της πυρκαγιάς. (πηγή: [www.globalsecurity.org](http://www.globalsecurity.org))

Όταν περιγράφονται οι προϋποθέσεις ύπαρξης επιφανειακής φλόγας ή σιγοκαίουσας φωτιάς, το τρίγωνο της πυρκαγιάς είναι αποδεκτό. Παρόλα αυτά, δε μπορεί να περιγράψει πλήρως τις συνθήκες διατήρησης μιας, έντονης σε φλόγες, καύσης. Για τον λόγο αυτό, απαιτείται η ύπαρξη μιας ανεμπόδιστης χημικής αλυσιδωτής αντίδρασης που να επιτρέπει την ύπαρξη και διατήρηση της φλόγας. Αυτή είναι δυνατό να απεικονίζεται ως η τέταρτη πλευρά ενός τετραέδρου (Εικόνα 4). Παρόμοια με το τρίγωνο της πυρκαγιάς, όταν οποιαδήποτε από τις τέσσερις πλευρές, τότε η έντονη σε φλόγες καύση σταματά.

#### 2.2.1.1 Καύσιμη ύλη

Η καύσιμη ύλη μπορεί να είναι στερεά, υγρή ή αέρια. Παραδείγματα στερεών καυσίμων είναι το ξύλο, το ελαστικό, το χαρτί και τα ρούχα. Πριν ένα στερεό αρχίσει να καίγεται, θα πρέπει να με κάποιο τρόπο να δημιουργηθούν γύρω του ατμοί. Σε μια πυρκαγιά, αυτό επιτυγχάνεται με την αρχική εφαρμογή θερμότητας. Η διαδικασία ονομάζεται **πυρόλυση** και μπορεί να οριστεί σαν χημική αποσύνθεση με την αρχική εφαρμογή θερμότητας. Αν ο ατμός που παραχθεί αναμιχθεί ικανοποιητικά με ικανή ποσότητα αέρα και θερμανθεί τότε πραγματοποιείται καύση. Ο ρυθμός με τον οποίο

καίγεται ένα στερεό συνδέεται άμεσα με τη μοριακή του δομή. Γενικά, στερεά καύσιμα σε κονιορτοποιημένη μορφή καίγονται πολύ πιο εύκολα και γρήγορα συγκριτικά με πιο ογκώδη υλικά. Η ένταση του φαινομένου της καύσης συναρτήσε του χρόνου ποσοτικοποιείται από τον ρυθμό έκλυσης θερμότητας, μέγεθος που εκφράζεται σε μονάδες ισχύος (π.χ. KW). Εποπτικά, για μια φωτιά σε ένα καλάθι χαρτιών, ο ρυθμός έκλυσης μπορεί να φτάσει μέχρι τα 10 KW.

Όσον αφορά στα υγρά καύσιμα, σύνηθες υλικό σε φρεγάτες και πλοία γενικότερα, αυτά μπορεί να είναι το πετρέλαιο, η βενζίνη, το καύσιμο ελικοπτέρου, τα χρώματα, τα λιπαντικά και τα υδραυλικά υγρά. Ο ρυθμός απελευθέρωσης ατμών των υγρών καυσίμων είναι πολύ μεγαλύτερος των στερεών καυσίμων και μάλιστα σε μεγαλύτερο θερμοκρασιακό εύρος. Όσο αυξάνεται μάλιστα η θερμοκρασία αυξάνεται και ο ρυθμός εξάτμισης του καυσίμου. Η χαμηλότερη θερμοκρασία στην οποία ένα υγρό έχει δημιουργήσει ικανή ποσότητα ατμών επικίνδυνη προς ανάφλεξη ονομάζεται σημείο ανάφλεξης (**flashpoint**). Γενικά, τα εύφλεκτα υγρά παράγουν 2,5 με 3 φορές περισσότερη θερμότητα από το ξύλο η οποία μάλιστα αποδίδεται 3 έως και 10 φορές ταχύτερα. Όταν τα εύφλεκτα υγρά χύνονται καταλαμβάνουν μεγάλη επιφάνεια, απελευθερώνουν μεγάλη ποσότητα ατμού και παράγουν μεγάλα ποσά θερμότητας κατά την καύση.

Τα αέρια καύσιμα που απαντώνται συνήθως σε μια φρεγάτα είναι η ασετιλίνη και το υδρογόνο, υλικά που χρησιμοποιούνται κατά κόρον στις συγκολλήσεις. Για την ανάφλεξη αυτών απαιτείται κατάλληλη αναλογία καυσίμου και οξυγόνου με παρουσία θερμότητας ούτως ώστε να πραγματοποιηθεί ανάφλεξη. Το μικρότερο ποσοστό (κατ' όγκον) αερίου που απαιτείται για τη δημιουργία αναφλέξιμου μίγματος με τον αέρα ονομάζεται **κατώτερο όριο αναφλεξιμότητας** ενώ αντίθετα, το μεγαλύτερο ποσοστό αερίου για τη δημιουργία αναφλέξιμου μίγματος με τον αέρα λέγεται **ανώτερο όριο αναφλεξιμότητας**. Η περιοχή που μεσολαβεί μεταξύ των 2 ορίων αποκαλείται **περιοχή αναφλεξιμότητας**. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται οι ιδιότητες ορισμένων εύφλεκτων υγρών και αερίων καυσίμων που συναντώνται σε μία φρεγάτα:

Πίνακας 1 Εύφλεκτα ρευστά που απαντώνται σε μια φρεγάτα, και ιδιότητες αυτών σχετιζόμενες με την αναφλεξιμότητα. Πηγή: ΑΣ, 2008.)

Υλικό	Flashpoint	LFL	UFL	Θερμοκρασία Ανάφλεξης
Μονοξείδιο του Άνθρακα	αέριο	12.5%	100%	305°C
Μαγειρικό Λάδι	321,11°C	--	--	393,33°C - 443,33°C
F-76 (πετρέλαιο στρατιωτικών προδιαγραφών)	60°C	--	--	363°C
Βενζίνη 100 οκτανίων	-43°C	1.4%	7.6%	456°C
JP-5 (στρατιωτικό αεροπορικό καύσιμο)	60°C	0.6%	4.6%	246°C
Έλαιο 2190 TEP	205°C	0.9%	7.0%	352°C
Υδρογόνο	αέριο	4.0%	75.0%	500°C
Otto Fuel II	129°C	--	--	--
Μμεθάνιο	αέριο	5.0%	15.0%	537°C
Προπάνιο	αέριο	2.1%	9.5%	450°C

### 2.2.1.2 Οξυγόνο

Το οξυγόνο είναι ίσως το πιο κρίσιμο συστατικό για την καύση και απαντάται στον ατμοσφαιρικό αέρα σε συγκέντρωση 21%. Η ελάχιστη συγκέντρωση για τη συντήρηση της φλόγας και την παραγωγή φλόγας είναι 15%. Ωστόσο, μία υποβόσκουσα καύση, δηλαδή μία καύση η οποία έχει μεν καπνό αλλά όχι φλόγα, μπορεί να συντηρηθεί με συγκέντρωση οξυγόνου λίγο μεγαλύτερη από 3%.

### 2.2.1.3 Θερμότητα

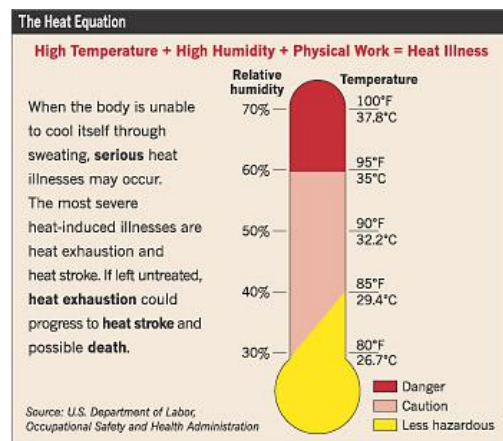
Η θερμότητα είναι υπεύθυνη για την χημική αντίδραση της καύσης. Μπορεί να προέλθει από το άναμμα ενός σπίρτου, από τριβή, από μία θερμή επιφάνεια αλλά και από βραχυκύκλωμα. Τρόποι μετάδοσης της θερμότητας είναι μέσω:

- **Αγωγιμότητας:** δηλαδή μέσω φυσικής επαφής π.χ. το νερό που βράζει στον βραστήρα
- **Ακτινοβολίας:** δηλαδή εκπομπή θερμότητας από μια πηγή π.χ. το τζάκι
- **Συναγωγής:** δηλαδή μεταφορά θερμότητας μέσω της κυκλοφορίας των αερίων και των υγρών. Ο καπνός και τα θερμά αέρια που παράγονται από μια πυρκαγιά, μεταφέρουν τη θερμότητα κατά την κίνησή τους, σε εύφλεκτα υλικά που βρίσκονται στη διαδρομή τους. Η πυρκαγιά παράγει αέρια ελαφρύτερα του αέρα, τα οποία ανυψώνονται προς τα υψηλότερα σημεία ενός χώρου. Ο θερμός αέρας, που και αυτός είναι ελαφρύτερος του ψυχρού αέρα, επίσης ανυψώνεται. Καθώς αυτά τα θερμά προϊόντα καύσης ανυψώνονται, ψυχρός αέρας καταλαμβάνει τη θέση τους και θερμαίνεται με τη σειρά του.

### 2.2.1.4 Παράγωγα της καύσης και οι επιπτώσεις στον άνθρωπο

Με την καύση παράγονται φλόγα, θερμότητα, τοξικά αέρια και καπνός. Τα εν λόγω παράγωγα της καύσης είναι δυνατό να επηρεάσουν αρνητικά την υγεία των ανθρώπων που βρίσκονται στον χώρο που λαμβάνει χώρα η καύση. Η απευθείας επαφή με τη φλόγα δύναται να προκαλέσει στον άνθρωπο σοβαρά εγκαύματα και βλάβες στην αναπνευστική οδό.

Όσον αφορά στη θερμοκρασία των προϊόντων της καύσης, αυτή μπορεί να φτάσει μέχρι και τους 1100 °C. Γενικά, θερμοκρασίες άνω των 60°C είναι επιβλαβείς για τον άνθρωπο αφού μπορεί να οδηγήσουν σε τραυματισμό έως και τον θάνατο. Έκθεση της επιδερμίδας σε θερμοκρασία 71°C για 60 δευτερόλεπτα μπορεί να οδηγήσει σε εγκαύματα δευτέρου βαθμού. Επιπρόσθετα, η απευθείας έκθεση σε θερμόν αέρα μπορεί να προκαλέσει αφυδάτωση, εξουθένωση, εγκαύματα και φράξιμο της αναπνευστικής οδού. Η υψηλή θερμοκρασία, τέλος αυξάνει τον καρδιακό παλμό και δύναται να προκαλέσει υπερθερμία, η οποία οδηγεί σε υψηλό πυρετό και βλάβες στο νευρικό σύστημα.



Εικόνα 5 Επίδραση της θερμοκρασίας στον ανθρώπινο οργανισμό. (πηγή: TEAP 2008)



Τα παράγωγα τοξικά αέρια σε μια πυρκαγιά είναι άμεσα συνδεδεμένα με το είδος της καύσιμης ύλης. Στο πλαίσιο πυρκαγιών σε πλοία, στα πλέον επικίνδυνα για την υγεία του ανθρώπου αέρια συγκαταλέγονται το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>). Το μονοξείδιο του άνθρακα βρίσκεται σε μεγάλη ποσότητα σε μια διεργασία καύσης και αποτελεί τη μεγαλύτερη απειλή σε μια ατμόσφαιρα που έχει δημιουργηθεί από μία πυρκαγιά. Έκθεση σε CO προκαλεί ανεπάρκεια O<sub>2</sub> στον εγκέφαλο και το σώμα. Συγκέντρωση σε ποσοστό 1.3% προκαλεί αναισθησία μετά από δύο ή τρεις αναπνοές και θάνατο σε μερικά λεπτά. Επίσης, είναι ιδιαίτερα εύφλεκτο. Στον Πίνακα 2 φαίνεται η αντοχή του ανθρώπινου οργανισμού σε μονοξείδιο του άνθρακα (Σιμιτσής 2013). Από την άλλη μεριά, το διοξείδιο του άνθρακα προκαλεί σοβαρές βλάβες στο αναπνευστικό σύστημα. Όσο αυξάνεται η ποσότητα του CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα, μειώνεται η παρουσία του οξυγόνου άρα κατά συνέπεια και η ποσότητα αυτού που απορροφάται από τους πνεύμονες. Δείγμα ότι ένας άνθρωπος δεν λαμβάνει ικανή ποσότητα οξυγόνου είναι οι βαθιές και έντονες αναπνοές. Γενικά, μείωση της ποσότητας του O<sub>2</sub> στο 16% προκαλεί μείωση του μυϊκού ελέγχου. Σε ποσοστό 10 έως και 14% επηρεάζεται η κρίση και επέρχεται έντονη κόπωση. Εάν η περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε οξυγόνο πέσει κάτω από 10% τότε ο άνθρωπος αναισθητοποιείται.

**Πίνακας 2 Αντοχή ανθρώπου στο μονοξείδιο του άνθρακα (Πηγή: el.wikipedia.org)**

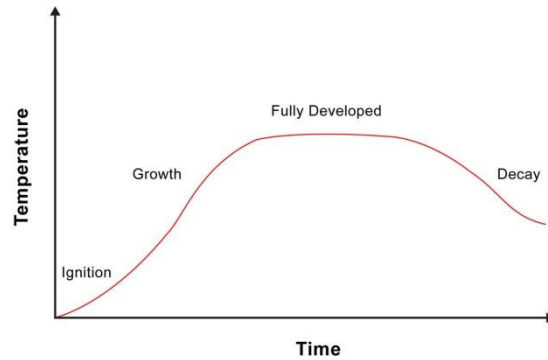
PPM	%CO	Συμπτώματα
35	0.0035%	Πονοκέφαλος και ζάλη από 6 – 8 ώρες έκθεσης
100	0,01	Ελαφρύς πονοκέφαλος μέσα σε 2- 3 ώρες
200	0,02	Ελαφρύς πονοκέφαλος μέσα σε 2 – 3 ώρες, απώλεια της κρίσης
400	0,04	Μετωπιαίος πονοκέφαλος μετά από 2 – 3 ώρες
800	0,08	Ζάλη, ναυτία, σπασμοί μέσα σε 45 λεπτά, λιποθυμία εντός 2 ωρών
1600	0,16	Πονοκέφαλος, ταχυκαρδία, ζάλη και ναυτία εντός 20 λεπτών, θάνατος μέσα σε 30 λεπτά
3200	0,32	Πονοκέφαλος, ζάλη σε ένα με 2 λεπτά, θάνατος σε 30 λεπτά.
6400	0,64	Σπασμοί διακοπή της αναπνοής και θάνατος σε 20 λεπτά.
12800	1,28	Απώλεια αισθήσεων μετά από 2 αναπνοές, θάνατος σε λιγότερο από 3 λεπτά

Άλλα αέρια, τα οποία μπορεί να είναι επιβλαβή για την υγεία του ανθρώπου είναι το υδροχλώριο (HCl) που παράγεται από την καύση του πολυβινυλοχλωριδίου, το υδροκυάνιο που παράγεται από την καύση των θερμικών μονώσεων αλλά και η καύση των ψυκτικών αερίων μπορεί να προκαλέσουν σοβαρότατες βλάβες στον ανθρώπινο οργανισμό.

Τέλος, ο καπνός που παράγεται από την καύση αποτελείται από άνθρακα και άκαυστες ουσίες στη μορφή αιωρούμενων σωματιδίων. Μεταφέρει οξέα και άλλα χημικά τα οποία δύναται να προκαλέσουν δηλητηρίαση ή ερεθισμό κατά την εισπνοή τους. Ο καπνός γενικά περιορίζει την ορατότητα στην περιοχή της πυρκαγιάς και την αναπνοή.

## 2.2.2 Στάδια της πυρκαγιάς

Μια πυρκαγιά αποτελείται από τέσσερα διαδοχικά στάδια. Αρχικά είναι το εναρκτήριο στάδιο της πυρκαγιάς, στη συνέχεια ακολουθούν το στάδιο της ανάφλεξης και της πλήρους ανάπτυξης της πυρκαγιάς και τέλος ακολουθεί το στάδιο της εξασθένησης. Στην εικόνα 6 παρουσιάζονται σχηματικά τα τέσσερα στάδια της πυρκαγιάς.



Εικόνα 6 Σχηματική απεικόνιση χρονικής εξέλιξης της αναπτυσσόμενης θερμοκρασίας, σε μια πυρκαγιά (Πηγή: [www.NIST.gov](http://www.NIST.gov)).

### 2.2.2.1 Εναρκτήριο στάδιο (incipient stage)

Στο εναρκτήριο στάδιο της πυρκαγιάς η μέση θερμοκρασία στο χώρο είναι χαμηλή και η πυρκαγιά είναι περιορισμένη στην περιοχή της αρχικής εστίας. Παρατηρούνται υψηλές θερμοκρασίες μέσα και γύρω από τα καίόμενα υλικά και ο παραγόμενος καπνός αρχίζει και εμφανίζει ένα θερμό στρώμα στην οροφή του διαμερίσματος. Κατά τη διάρκεια



Εικόνα 7 Φαινόμενο rollover. (πηγή: [www.pinterest.com](http://www.pinterest.com))

του σταδίου αυτού, ποσότητα άκαυστων αλλά εύφλεκτων αερίων αναμιγνύονται με τον φρέσκο αέρα πλησίον της οροφής ενός κλειστού χώρου με αποτέλεσμα την καύση τους σε κάποια απόσταση από την εστία της πυρκαγιάς. Έτσι σχηματίζεται ένα μέτωπο φλόγας κατά μήκος της οροφής που λέγεται rollover. Η διαφορά του με το flashover(θα αναπτυχθεί αμέσως μετά) είναι ότι κατά το rollover, καίγονται μόνο τα αέρια που βρίσκονται στον

χώρο και όχι όλα τα υλικά.

### 2.2.2.2 Στάδιο ανάφλεξης (Flashover)

Το στάδιο της ανάφλεξης είναι εκείνο το σημείο κατά το οποίο γίνεται η μετάβαση από το εναρκτήριο στάδιο της πυρκαγιάς στο στάδιο της πλήρους ανάπτυξης. Εκδηλώνεται σε πολύ σύντομο χρόνο και παρουσιάζεται όταν η θερμοκρασία στο στρώμα καπνού φτάσει τους 600°C ενώ η ροή ακτινοβολούμενης θερμότητας προς το δάπεδο του διαμερίσματος φτάνει τα 20 KW/m<sup>2</sup>. Κατά τη διάρκεια του flashover (Εικόνα 8), παρατηρείται απότομη εξάπλωση της πυρκαγιάς σε όλα τα υλικά εντός του διαμερίσματος. Η πιθανότητα επιβίωσης σε διαμέρισμα που έχει συμβεί flashoverείναι σχεδόν μηδενική.



Εικόνα 8 Φαινόμενο flashover. (πηγή: [www.fire.gr](http://www.fire.gr))

### 2.2.2.3 Στάδιο πλήρους ανάπτυξης (fully developed fire)

Κατά τη διάρκεια αυτού του σταδίου, όλα τα υλικά στο διαμέρισμα έχουν φτάσει στις θερμοκρασίες ανάφλεξής τους και καίγονται. Ο ρυθμός καύσης περιορίζεται από τη διαθέσιμη ποσότητα οξυγόνου στον αέρα του χώρου. Οι φλόγες αναδύονται από κάθε

πιθανό άνοιγμα και το άκαυστο καύσιμο το οποίο υπάρχει στον καπνό αρχίζει να καίγεται εφόσον συναντά τον φρέσκο αέρα στα διπλανά διαμερίσματα. Υπό αυτές τις συνθήκες παρατηρούνται δομικές βλάβες στα χαλύβδινα ελάσματα από τα οποία είναι κατασκευασμένα τα πολεμικά πλοία. Σε έναν χώρο που η πυρκαγιά βρίσκεται σε στάδιο πλήρους ανάπτυξης δεν είναι εφικτή η είσοδος των πυροσβεστών οπότε η καταπολέμησή της πρέπει να πραγματοποιηθεί με έμμεσους τρόπους (περιφερειακή ψύξη). Ιδιαίτερα σε πυρκαγιές που προκαλούνται από όπλα (βλήματα, πυραύλους) ή από εύφλεκτα υγρά (διαμερίσματα πρόωσης και ενέργειας), μια πυρκαγιά μπορεί να φτάσει στο στάδιο της πλήρους ανάπτυξης πολύ γρήγορα.

#### 2.2.2.4 Στάδιο εξασθένησης (decay)

Εφόσον καταναλωθεί όλο το διαθέσιμο καύσιμο ή όλο το οξυγόνο σε έναν χώρο, η πυρκαγιά σβήνει. Όταν μια πυρκαγιά βρίσκεται στο στάδιο εξασθένησης λόγω χαμηλής περιεκτικότητας οξυγόνου στον χώρο, σχηματίζονται ατμοί είτε λόγω του υγρού καυσίμου που βρίσκεται σε θερμοκρασία πάνω από το flashpoint είτε λόγω του στερεού καυσίμου το οποίο έχει υποστεί πυρόλυση. Εάν τότε παρουσιαστεί ποσότητα φρέσκου αέρα, το πλούσιο σε καπνούς καύσιμο μείγμα που σχηματίζεται μπορεί να προκαλέσει εκρηκτική καύση, την λεγόμενη backdraft. Το φαινόμενο αυτό είναι πολύ επικίνδυνο (Εικόνα 9).



Εικόνα 9 Φαινόμενο backdraft. (πηγή: [www.fire.gr](http://www.fire.gr))

#### 2.2.3 Τρόποι καταπολέμησης πυρκαγιών

Οι τρόποι καταπολέμησης της πυρκαγιάς είναι πολλοί και διαφορετικοί. Ένας βασικός τρόπος κατάσβεσης είναι η φυσική απομάκρυνση της καύσιμης ύλης. Εάν μία πυρκαγιά συντηρείται από αέρια καύσιμα που βρίσκονται κοντά σε αυτήν τότε μπορεί να εξαλειφθεί εάν απλά διακοπεί η παροχή. Ένας επιπλέον τρόπος εξάλειψης της πυρκαγιάς είναι η αφαίρεση του  $O_2$  ή απλά η μείωση σε περιεκτικότητα του αέρα



Εικόνα 10 Κατάκλυση με διοξείδιο του άνθρακα χώρου μηχανοστασίου. (πηγή: [www.delaufire.com](http://www.delaufire.com))

κάτω του 15%. Αρκετά κατασβεστικά μέσα σβήνουν την πυρκαγιά στερώντας της το  $O_2$ . Αυτό είναι πολύ δύσκολο όταν έχει εκδηλωθεί σε ανοιχτό χώρο, διότι η παροχή οξυγόνου είναι συνεχής. Σε κλειστό χώρο ωστόσο, η χρήση  $CO_2$  (Εικόνα 10) μέσω μονίμου συστήματος κατάκλυσης ή πυροσβεστήρα και η ανάμιξη αυτού με τον αέρα μειώνει την περιεκτικότητα σε οξυγόνο. Ακόμα, εάν χρησιμοποιούμε πυροσβεστικό αφρό, τότε δημιουργείται ένα στρώμα πάνω από τα εύφλεκτα υγρά το οποίο αποκλείει το  $O_2$  και εμποδίζει τον σχηματισμό εύφλεκτων ατμών. Επιπρόσθετα ο αφρός ψύχει την υγρή επιφάνεια του καυσίμου, μειώνει τη θερμοκρασία και έχει ως αποτέλεσμα την παρεμπόδιση δημιουργίας επιπλέον ατμών. Το πιο αποτελεσματικό μέσο για απομάκρυνση της θερμότητας από συνήθη στερεά καύσιμα είναι το νερό. Η ψύξη με νερό μπορεί να διακόψει άμεσα το σχηματισμό εύφλεκτων ατμών από στερεά καύσιμα.

Η καύση συνίσταται σε μια σειρά σύνθετων χημικών αλυσιδωτών αντιδράσεων. Αν η αλληλουχία διακοπεί, η πυρκαγιά μπορεί να εξαλειφθεί πολύ γρήγορα. Κοινά κατασβεστικά μέσα που επιδρούν με αυτό τον τρόπο είναι το αέριο Halon και η πυροσβεστική σκόνη. Αυτά τα μέσα επιτίθενται κατευθείαν στη μοριακή δομή των μειγμάτων και επηρεάζουν την ικανότητα της πυρκαγιάς να παράγει φλόγες. Ωστόσο, λόγω του ότι το Halon επιβαρύνει το φαινόμενο της «τρύπας του όζοντος», αν και είναι έως και 6 φορές πιο αποτελεσματικό από τα υπόλοιπα μέσα, σήμερα χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά στην αεροπορική βιομηχανία.

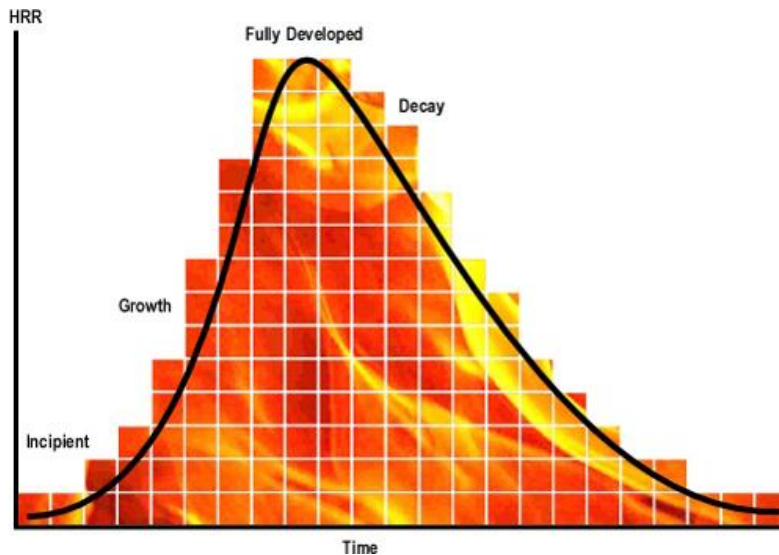
### 2.3 Heat Release Rate Curve

Στην μηχανική της πυρκαγιάς, κάθε σενάριο το οποίο δημιουργείται περιστρέφεται γύρω από τις καμπύλες ρυθμού έκλυσης θερμότητας ή αλλιώς HRR (Heat Release Rate curves). Μέσω αυτών των καμπυλών γίνεται εφικτός ο προσδιορισμός πληροφοριών που έχουν σχέση με τον τύπο της πυρκαγιάς, το μέγεθος, τη διάρκεια, καθώς και τον παράγοντα που προκάλεσε ανάφλεξη. Ωστόσο, προκειμένου να προκύψουν όσο το δυνατόν ορθότερα και ασφαλέστερα συμπεράσματα, θα πρέπει για την κάθε περίπτωση πυρκαγιάς να ληφθούν υπόψη σημαντικές παράμετροι του σεναρίου πυρκαγιάς. Κάθε μία από αυτές τις παραμέτρους έχει και τη δική της πιθανότητα να συμβεί με αποτέλεσμα η προσομοίωση ενός σεναρίου πυρκαγιάς να αποτελεί μια επίπονη και χρονοβόρα διαδικασία.

Γενικότερα, η εξέλιξη μιας πυρκαγιάς είναι άρρηκτα συνδεδεμένη μεταξύ άλλων με την απόδοση των συστημάτων πυρανίχνευσης, την αποτελεσματικότητα των μέσων καταπολέμησης και την εκπαίδευση που έχει λάβει το ανθρώπινο δυναμικό. Η μορφή μιας καμπύλης HRR εξαρτάται από μια σειρά παραμέτρων. Αυτές παρουσιάζονται στη συνέχεια:

1. τον χρόνο που απαιτείται μέχρι να ξεκινήσει η ανάπτυξη της φωτιάς
2. τον μέγιστο ρυθμό έκλυσης θερμότητας που επιτυγχάνεται
3. τον χρόνο που απαιτείται για την επίτευξη του μέγιστου ρυθμού έκλυσης θερμότητας
4. τους περιορισμούς των συνθηκών εξαερισμού
5. τον χρόνο έναρξης φάσεως εξασθένισης της φωτιάς

Ένα τυπικό διάγραμμα καμπύλης HRR απεικονίζεται στην Εικόνα 11.



Εικόνα 11 Τυπική καμπύλη HRR. (Πηγή:cfbt-us.com.)

Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας μιας πυρκαγιάς μπορεί να εκφραστεί μαθηματικά από τις εξισώσεις που παρατίθενται στη συνέχεια και αντιπροσωπεύουν τα τέσσερα στάδια μιας πυρκαγιάς (Themelis & Spyrou, 2010). Στον Πίνακα 3 φαίνονται οι μεταβλητές που επηρεάζουν τον ρυθμό έκλυσης θερμότητας.

- *incipient stage*:  $Q'(t) = Q'(t)_{inc} * \left(\frac{t}{t_{inc}}\right), 0 \leq t \leq t_{inc}$
- *growth stage*:  $Q'(t) = \alpha * (t - t_{inc})^2 + Q'(t)_{inc}, t_{inc} \leq t \leq t_g$
- *full development stage*:  $Q'(t) = Q'(t)_{max}, t_g \leq t \leq t_d$
- *decay stage*:  $Q'(t) = Q'(t)_{max} * e^{-(t - t_d)/\tau}, t > t_d$

Πίνακας 3 Μεταβλητές που επηρεάζουν τον ρυθμό έκλυσης θερμότητας.

$Q'(t)$	Ρυθμός έκλυσης θερμότητας σε KW.	$t_d$	Χρόνος που ξεκινά το στάδιο μαρμασμού, μετράται σε sec.
$Q'(t)_{inc}$	Απαιτούμενος ρυθμός έκλυσης θερμότητας για αυτοσυντηρούμενη φλόγα, μετράται σε KW.	$t_g$	Χρόνος που απαιτείται για να έχουμε τη μέγιστη έκλυση θερμότητας.
$t$	Χρόνος σε sec	$\alpha$	Σταθερά ανάπτυξης της πυρκαγιάς $KW/s^2$
$t_0$	Χρόνος ανάφλεξης σε sec	$Q'(t)_{max}$	Μέγιστος ρυθμός έκλυσης θερμότητας σε KW. Εξαρτάται από ποσότητα και είδος καυσίμου.
$\tau$	Σταθερά εξασθένησης της πυρκαγιάς.		

Προκειμένου λοιπόν να καθοριστεί σωστά μια καμπύλη ρυθμού μεταβολής θερμότητας, θα πρέπει αρχικά να υπάρχει πλήρης γνώση της γεωμετρίας του χώρου, και συγκεκριμένα των διαστάσεών του, των διαστάσεων των θυρών και των ανοιγμάτων, των αεραγωγών και των τοίχων. Επιπλέον θα πρέπει να καθοριστούν οι ομάδες των εύφλεκτων υγρών μέσα στο χώρο καθώς και των ιδιοτήτων τους, και να γίνει ο υπολογισμός του αναφλέξιμου φορτίου.

Το αναφλέξιμο φορτίο ορίζεται ως το άθροισμα της συνολικής ενέργειας που μπορεί να απελευθερωθεί όταν όλα τα διαθέσιμα εύφλεκτα υλικά που βρίσκονται σε έναν χώρο αναφλεγούν. Η πυκνότητα αναφλέξιμου φορτίου είναι ο λόγος του συνολικού αναφλέξιμου φορτίου προς το εμβαδόν του χώρου στον οποίο λαμβάνει χώρα η πυρκαγιά. Αυτή, αποτελεί έναν τρόπο μέτρησης της ενέργειας που αποδίδεται κατά την καύση των εύφλεκτων υλικών σε ένα διαμέρισμα. Μονάδα μέτρησης της πυκνότητας αναφλέξιμου φορτίου είναι το MJ/ m<sup>2</sup>, ενώ ο τύπος υπολογισμού του είναι ο εξής:

$$Q''(MJ/m^2) = \text{Fuel load density} * \sum(mi / mtot) * hi$$

Πίνακας 4 Παράγοντες που σχετίζονται με την πυκνότητα αναφλέξιμου φορτίου.

$m_i$	Στοιχειώδης εύφλεκτη μάζα (kg)
$m_{tot}$	Συνολική εύφλεκτη μάζα (kg)
$h_i$	Θερμογόνος ικανότητα ανά μονάδα μάζας (MJ/kg)
Fuel load density	Πυκνότητα φορτίου καυσίμου (kg/m <sup>2</sup> )

Επομένως, για να υπολογιστεί η πυκνότητα του αναφλέξιμου φορτίου θα πρέπει να υποτεθεί ότι στο διαμέρισμα υπάρχουν ομάδες από εύφλεκτα υλικά ( $m_i$ ). Η συνολική μάζα των υλικών αυτών ( $m_{tot}$ ) μέσα στο χώρο ονομάζεται **φορτίο καυσίμου** (fuel load) και μετράται σε kg. Ωστόσο, προτιμάται ο όρος **πυκνότητα φορτίου καυσίμου** (fuel load density) και μετράται σε kg/m<sup>2</sup>. Η πυκνότητα φορτίου καυσίμου (βάσει MSC/Circ 1003 IMO) ορίζεται από τη σχέση:

$$TCMPA = M_{cmbst}/A$$

Πίνακας 5 Παράγοντες που σχετίζονται με την πυκνότητα φορτίου καυσίμου.

TCMPA	Fuel load density (kg/m <sup>2</sup> )
$M_{CMBST}$	Συνολική μάζα εύφλεκτων υλικών στον χώρο
A	Επιφάνεια δαπέδου στο χώρο (m <sup>2</sup> )

Για τον υπολογισμό της πυκνότητας φορτίου στην περίπτωση ενός πλοίου, λαμβάνονται υπόψη οι παρακάτω ομάδες υλικών:

- Δομικά υλικά: εννοώντας τη μόνωση καλωδίων, τους πλαστικούς σωλήνες και οποιοδήποτε καύσιμο υλικό επιτρέπεται να χρησιμοποιηθεί από τους κανονισμούς του κεφαλαίου II-2 της SOLAS
- Ο εξοπλισμός που πρέπει να εγκατασταθεί κατά τη διάρκεια της κατασκευής
- Ο εξοπλισμός που παρέχεται για το πλήρωμα και τους επιβάτες (όπως οι ηλεκτρικές συσκευές, τα έπιπλα κλπ.)

Για επιβατηγά πλοία τα οποία μεταφέρουν περισσότερους από 36 επιβάτες υπάρχουν ενδεικτικές τιμές του fuel load density για τους χώρους διαμονής και υπηρεσίας, όπως φαίνονται στον Πίνακα 6 (MSC/Circ 1003, IMO).

Πίνακας 6 Ενδεικτικές τιμές fuel load density επιβατικών πλοίων για χώρους διαμονής και υπηρεσίας.

Χώρος	Επιβατηγό που μεταφέρει περισσότερους από 36 επιβάτες	Επιβατηγό που δεν μεταφέρει περισσότερους από 36 επιβάτες	Φορτηγά πλοία
Σκάλες, διάδρομοι	5 kg/m <sup>2</sup>	5 kg/m <sup>2</sup>	5 kg/m <sup>2</sup>
Χώροι φιλοξενίας	Μικρή επικινδυνότητα πυρκαγιάς 15 kg/m <sup>2</sup>	35 kg/m <sup>2</sup>	35 kg/m <sup>2</sup>
	Μεσαία επικινδυνότητα πυρκαγιάς 35 kg/m <sup>2</sup>		
	Μεγάλη επικινδυνότητα πυρκαγιάς 35 kg/m <sup>2</sup>		
Χώροι που περιβάλλονται από διαχωριστικά Α κλάσης.	45 kg/m <sup>2</sup>	45 kg/m <sup>2</sup>	45 kg/m <sup>2</sup>

## Κεφάλαιο 3- SOLAS και πυρασφάλεια

### 3.1 Εισαγωγή

Στον τομέα της ναυτιλίας, οτιδήποτε έχει σχέση με την πυρασφάλεια καλύπτεται από το κεφάλαιο II-2 της διεθνούς σύμβασης για την ασφάλεια της ανθρώπινης ζωής στη θάλασσα, ευρέως γνωστή ως “Safety of Life at Sea (SOLAS)” και τον κώδικα ασφάλειας συστημάτων έναντι πυρκαγιάς, γνωστός ως “Fire Safety Systems Code (FSS)”. Τη σημερινή εποχή δίνεται το ελεύθερο στον σχεδιαστή εκάστου πλοίου να προτείνει ισοδύναμες λύσεις οι οποίες είναι δυνατό να παρέχουν το ίδιο επίπεδο ασφάλειας με αυτό που απαιτεί ο IMO. Στο παρόν Κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη ιστορική αναδρομή της SOLAS από το έτος δημιουργίας της ως σήμερα, καθώς και μια σύγκριση μεταξύ των απαιτούμενων αναφορικά με την πυρασφάλεια σε ένα εμπορικό πλοίο και σε μια φρεγάτα του σήμερα.

### 3.2 Ιστορική αναδρομή της σύμβασης SOLAS

Οι πρώτες απαιτήσεις που αφορούν στην πυροπροστασία σε ένα πλοίο αποτυπώθηκαν κατά την πρώτη συνεδρία της SOLAS (Safety Of Life At Sea) το 1914 με αφορμή το ναυάγιο του «Τιτανικού» το 1912 (IMO, 2016). Επρόκειτο για βασικές απαιτήσεις πυροπροστασίας που έπρεπε να έχει ένα πλοίο και λόγω του Α Παγκοσμίου Πολέμου δεν εφαρμόστηκαν άμεσα, αλλά τέθηκαν σε ισχύ το 1929. Το 1934 εκδηλώθηκε πυρκαγιά στο επιβατηγό πλοίο «Morro Castle» η οποία οδήγησε στον θάνατο 134 επιβατών. Οι μελέτες οι οποίες έγιναν είχαν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία κανονισμών

σχετικά με βραδύκαυστα υλικά από τα οποία πρέπει να είναι κατασκευασμένα τα επιβατηγά πλοία. Σε αυτό, αρωγός ήταν και η σημαντική πρόοδος της τεχνολογίας κατά τον Β Παγκόσμιο Πόλεμο η οποία μάλιστα λήφθηκε υπόψη στη συνδιάσκεψη της SOLAS το 1948. Οι απαιτήσεις πυροπροστασίας που αποφασίστηκε ότι έπρεπε να έχουν τα πλοία από αυτή τη συνδιάσκεψη και μετά εφαρμόστηκαν τόσο σε επιβατηγά όσο και σε πλοία χύδην φορτίου. Αναβάθμιση των όσων θεσπίστηκαν το 1948 έγινε το 1960, όπου προστέθηκαν μερικές ακόμα απαιτήσεις πυρασφάλειας για τα επιβατηγά πλοία. Το 1974, το κεφάλαιο 2 της SOLAS που αφορούσε σε απαιτήσεις αποκλειστικά την πυρασφάλεια, χωρίστηκε σε 2 κεφάλαια, το II-1 το οποίο αφορούσε στην ευστάθεια του πλοίου, την κατασκευή, τον μηχανολογικό και ηλεκτρολογικό εξοπλισμό, καθώς και το κεφάλαιο II-2 το οποίο αφορούσε στην πυροπροστασία, την πυρανίχνευση και την κατάσβεση της πυρκαγιάς. Το 1981 πραγματοποιείται ολική αναθεώρηση του κεφαλαίου II-2 και προστίθενται εδάφια σχετικά με μόνιμα κατασβεστικά μέσα που πρέπει να έχουν τα πλοία και ο κανονισμός 62 περί συστημάτων αδρανών αερίων τα οποία ενδεχομένως να χρησιμοποιούνται για κατάσβεση. Το 1992 η εκδήλωση μιας πυρκαγιάς στο Scandinavian Star οδήγησε στον θάνατο 158 επιβάτες. Τον Δεκέμβριο του ίδιου έτους, ο IMO υιοθέτησε τροποποιήσεις οι οποίες αφορούσαν τόσο σε νεοαναυπηγηθέντα όσο και σε ήδη υπάρχοντα επιβατηγά πλοία. Μερικές από αυτές ήταν η εγκατάσταση σύγχρονων για την εποχή μόνιμων μέσων κατάσβεσης και ανίχνευσης αντίστοιχων αυτών που υπήρχαν στα ξενοδοχεία όπως είναι η χρήση καταιονιστήρων και ανιχνευτών καπνού καθώς και η αναβάθμιση των φρακτών με αντιπυρική προστασία ούτως ώστε να συμπεριλαμβάνουν βραδύκαυστα υλικά. Επιπρόσθετα, δόθηκε ιδιαίτερη μνεία σε ανεύρεση τρόπων ευκολότερης διαφυγής των επιβατών σε περίπτωση συμβάντος όπως για παράδειγμα η χρήση φανών ασφαλείας σε περίπτωση που απαιτηθεί ηλεκτρική απομόνωση σε ένα διαμέρισμα λόγω πυρκαγιάς. Δημιουργήθηκε ο διεθνής κώδικας FTP (Fire Test Procedures) ο οποίος μάλιστα κατέστη υποχρεωτικός από το 1998 και έπειτα. Περιλαμβάνει ελάχιστες απαιτήσεις και απαραίτητες δοκιμές σε εργαστηριακές εγκαταστάσεις που πρέπει να πραγματοποιηθούν μεταξύ άλλων για τα κάτωθι:

- Μη αναφλεξιμότητα υλικών κατασκευής.
- Καπνό και τοξικότητα αυτού σε περίπτωση που τα υλικά αναφλεγούν.
- Δοκιμές για τους τύπους των νομέων A, B και F .
- Δοκιμές για τα καλύμματα που τοποθετούνται επί των καταστρωμάτων.

Το 2000 πραγματοποιήθηκε εκ νέου αναθεώρηση του κεφαλαίου II-2 της SOLAS και η προσοχή στράφηκε προς τη διαμόρφωση σεναρίων πυρκαγιάς και εξέλιξη αυτών. Επίσης, δόθηκε και ιδιαίτερη έμφαση στον ανθρώπινο παράγοντα, αφού λαμβάνεται υπόψη η εκπαίδευση του πληρώματος περί θεμάτων αντιμετώπισης συμβάντων πυρκαγιάς μέσω τακτικών προγραμματισμένων και μη γυμνασίων καθώς και συντήρησης των συστημάτων πυρόσβεσης από το προσωπικό και αρμόδιους φορείς. Επίσης, δημιουργήθηκε ο Διεθνής κώδικας συστημάτων πυρασφάλειας (Fire Safety Systems Code, FSS) με σκοπό την παροχή διεθνώς αναγνωρισμένων χαρακτηριστικών που πρέπει να έχουν τα συστήματα πυροπροστασίας των πλοίων. Ο FSS περιλαμβάνει 15 κεφάλαια και καθίσταται υποχρεωτικός για όλα τα πλοία από δημιουργίας τους.



Το πλήρως αναθεωρημένο κεφάλαιο II-2 χαίρει εφαρμογής από όλα τα νεότευκτα πλοία κατασκευής από την 1 Ιουλίου 2002 και έπειτα. Για πλοία προγενέστερης ναυπήγησης ισχύουν ξεχωριστές απαιτήσεις προκειμένου τελικά να ανταποκρίνονται στον κώδικα FSS. Μερικές από αυτές είναι οι εξής:

- Αναπνευστικές συσκευές διαφυγής (Emergency Escape Breathing Device-EEBD) : Όλα τα υπάρχοντα πλοία θα πρέπει να έχουν στη διάθεσή τους EEBD οι οποίες μάλιστα θα πρέπει να έχουν και συγκεκριμένη κατανομή επί του πλοίου (λ.χ. σε χώρους ενδιαιτήσεων θα πρέπει να υπάρχουν τουλάχιστον 2). Επιπρόσθετα, ιδιαίτερη προσοχή έχει δοθεί στους χώρους που είναι εγκατεστημένος ο μηχανολογικός εξοπλισμός εκάστου πλοίου (μηχανοστάσια), καθόσον οι EEBD θα πρέπει όχι μόνο να είναι ικανές σε αριθμό αλλά θα πρέπει να είναι εύκολα προσβάσιμες και ορατές από το προσωπικό που βρίσκεται στο διαμέρισμα σε περίπτωση συμβάντος. Γενικά οι θέσεις των EEBD θα πρέπει να είναι πλήρως αποτυπωμένες στο σχεδιάγραμμα των καταστρωμάτων του πλοίου και να πληρούν τις προδιαγραφές του FSS.
- Συστήματα HALLON 1301,1211 και 2402: Απαγορεύεται αυστηρά η εγκατάστασή τους σε ήδη υπάρχοντα πλοία λόγω του ότι είναι εχθρικά προς το περιβάλλον(αυξημένη τοξικότητα, καταστρέφει το στρώμα του όζοντος στην ατμόσφαιρα) και τον άνθρωπο (πρόκληση μυρμηγκιασμάτων, αλλεργιών και ζάλης σε συγκέντρωση άνω του 7%) .

### 3.3 Το κεφάλαιο II-2 της SOLAS

Σε αυτό το σημείο, παρατίθεται ο Πίνακας 7, στον οποίο φαίνονται επιγραμματικά όλοι οι κανονισμοί που απαρτίζουν το κεφάλαιο II-2 της SOLAS.

Πίνακας7 Δομή Κεφαλαίου II-2 της SOLAS.

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ II-2</b>		
<b>ΜΕΡΟΣ</b>	<b>ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ</b>	<b>ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ</b>
Α- Γενικά	1	Εφαρμογή.
	2	Στόχοι πυρασφάλειας και λειτουργικές απαιτήσεις.
	3	Ορισμοί.
Β- Πρόληψη πυρκαγιάς και εκρήξεων	4	Πιθανότητα ανάφλεξης.
	5	Πιθανότητα εξάπλωσης της πυρκαγιάς.
	6	Δημιουργία καπνού και τοξικότητα αυτού.
Γ- Περιορισμός της πυρκαγιάς	7	Ανίχνευση και συναγερμός.
	8	Τοποθέτηση ορίων καπνού για έλεγχο εξάπλωσής του.
	9	Περιορισμός πυρκαγιάς.
	10	Καταπολέμηση πυρκαγιάς.
	11	Ακεραιότητα κατασκευής μετά από πυρκαγιά.
Δ- Διαφυγή	12	Ειδοποιήσεις για το πλήρωμα και τους

		επιβαίνοντες.
	13	Τρόποι διαφυγής.
Ε- Λειτουργικές απαιτήσεις	14	Επιχειρησιακή ετοιμότητα και συντήρηση.
	15	Οδηγίες, εκπαίδευση επί πλοίου σε θέματα πυρκαγιάς και διεξαγωγή γυμνασίων.
	16	Πληροφορίες αναφορικά με θέματα πυρασφάλειας κατά τη μεταφορά φορτίου.
F- Εναλλακτικός σχεδιασμός και διάταξη	17	Εναλλακτικοί σχεδιασμοί και διάταξη.
G- Ειδικές απαιτήσεις	18	Συνδρομή προς ελικόπτερο.
	19	Μεταφορά επικίνδυνων υλικών.
	20	Προστασία οχημάτων σε πλοία roll-on-roll-off.

Οι κανονισμοί 2, 7, 8, 9, 10, 11, 12 και 13 είναι εκείνοι οι οποίοι σχετίζονται με την ασφάλεια έναντι πυρκαγιάς σε φρεγάτα και πρόκειται να εξεταστούν αναλυτικότερα.

### 3.4 Πρότυπη δοκιμή φωτιάς σε πλοίο

Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να αναφέρουμε τα βασικά στοιχεία της πρότυπης δοκιμής φωτιάς (**standard fire test**, μια δοκιμή κατά την οποία ελέγχονται δείγματα από φρακτές και καταστώματα έτσι ώστε να διαπιστωθεί η συμπεριφορά τους σε πυρκαγιά.

Πιο αναλυτικά, τα δείγματα τοποθετούνται εντός κλιβάνου και η θερμοκρασία ρυθμίζεται σύμφωνα με τις αντίστοιχες που υπάρχουν στις καμπύλες ρυθμού έκλυσης θερμότητας και κατασκευάζεται η πρότυπη καμπύλη χρόνου φωτιάς βάσει της σχέσης:

$$T = T_0 + 345 * \log(8t + 1)$$

**Πίνακας 8 Παράγοντες που υπεισέρχονται στην κατασκευή της πρότυπης καμπύλης χρόνου - φωτιάς.**

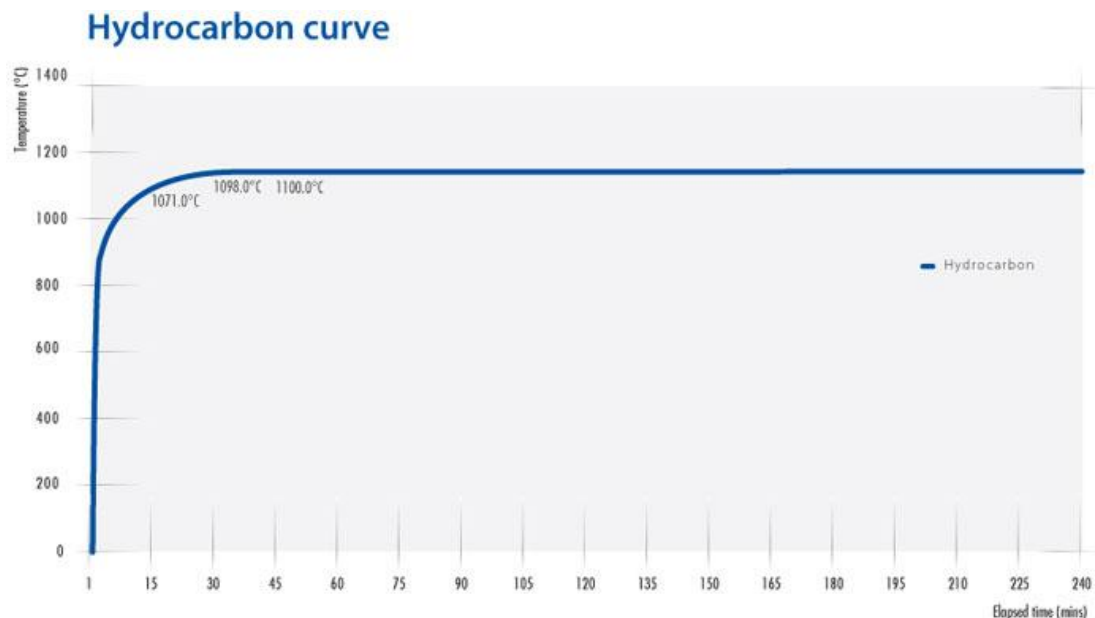
T	Θερμοκρασία κλιβάνου σε οποιαδήποτε στιγμή σε °C
T <sub>0</sub>	Θερμοκρασία κλιβάνου τη χρονική στιγμή 0 σε °C
t	Χρόνος μετρούμενος από την αρχική ανάφλεξη σε min

Κάθε προς εξέταση δοκίμιο τοποθετείται κατά τη διάρκεια των ελέγχων σε κατάλληλη θέση ίδιου προσανατολισμού με αυτόν που έχει η θύρα ή η καταπακτή πάνω στο πλοίο. Αξίζει να αναφερθεί ότι οι διαστάσεις έκαστου δοκίμιου είναι συγκεκριμένες ανάλογα με τον έλεγχο που θα πραγματοποιηθεί.

Προ της διεξαγωγής των δοκιμών, θα πρέπει να αποστέλλονται στο εργαστήριο η ονομασία, τα συστατικά, το ονομαστικό πάχος, η ονομαστική πυκνότητα, η ονομαστική περιεκτικότητα σε υγρασία και η θερμική αγωγιμότητα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος του υπό εξέταση υλικού. Στον κλίβανο, το υλικό παραμένει σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες για ορισμένο χρονικό διάστημα, όπως φαίνεται στον Πίνακα 9. Οπότε κατασκευάζεται και η αντίστοιχη καμπύλη των Standard Fire Test (Εικόνα 12).

Πίνακας 9 Αντιστοιχίες χρόνου- θερμοκρασίας κατά την διεξαγωγή ενός ενδεικτικού Standard Fire Test υλικού φτιαγμένου από υδρογονάνθρακα(Πηγή: [www.microthermgroup.com](http://www.microthermgroup.com).)

Λεπτό	Θερμοκρασία σε °C
15	1071
30	1098
45	1100
75	1100
90	1100



Εικόνα 12 Ενδεικτική καμπύλη Standard Fire Test βάσει των τιμών του πίνακα 9 (Πηγή: [www.microthermgroup.com](http://www.microthermgroup.com))

Τα υλικά, τέλος, κατηγοριοποιούνται σε τρεις τύπους, τους Α, Β και F. Για τα υλικά τύπου Α, θα πρέπει η μέση θερμοκρασία της μη εκτεθειμένης επιφάνειας στην πυρκαγιά να μην ξεπερνάει τους 140 πάνω από την αρχική θερμοκρασία και καθενός τμήματος χωριστά να μην ξεπερνά τους 180 πάνω από την αρχική θερμοκρασία για δεδομένο χρόνο. Επίσης, θα πρέπει το αντίστοιχο στοιχείο (από το οποίο προήλθε το δοκίμιο) να είναι ενισχυμένο επαρκώς και να εμποδίζει την εξάπλωση της πυρκαγιάς και του καπνού για χρονικό διάστημα μίας ώρας από την εκδήλωση του συμβάντος. Στον Πίνακα 10 φαίνονται τα υλικά τύπου Α και ο αντίστοιχος χρόνος καύσης.

Πίνακας 10 Ονοματολογία υλικών τύπου A.

Κατηγορία	Χρόνος καύσης (min)
A-60	60
A-30	30
A-15	15
A-0	0

Για τα υλικά τύπου B και F, θα πρέπει η μέση θερμοκρασία της επιφάνειας που εκτίθεται στη φωτιά να μην ξεπερνά τους 140 πάνω από την αρχική θερμοκρασία και καθενός τμήματος χωριστά να μην ξεπερνά τους 225 πάνω από την αρχική θερμοκρασία για δεδομένο χρόνο. Επίσης, θα πρέπει το αντίστοιχο στοιχείο (από το οποίο προήλθε το δοκίμιο) να είναι ενισχυμένο επαρκώς και να εμποδίζει την εξάπλωση της πυρκαγιάς και του καπνού για χρονικό διάστημα μισής ώρας από την εκδήλωση του συμβάντος. Στον Πίνακα 11 φαίνονται τα υλικά τύπου B και F και ο αντίστοιχος χρόνος καύσης.

Πίνακας 11 Ονοματολογία υλικών τύπου B και F.

Κατηγορία	Χρόνος καύσης (min)
B-30	30
B-15	15
B-0	0
F-30	30
F-15	15
F-0	0

### 3.5 Σύγκριση κανονισμών SOLAS με τα διαθέσιμα μέσα σε πολεμικό πλοίο τύπου φρεγάτας.

Στον πίνακα 12, εξετάζεται εάν τηρούνται οι βασικοί στόχοι της πυρασφάλειας και οι λειτουργικές απαιτήσεις βάσει του κεφαλαίου II-2 της SOLAS. Παράλληλα, εξετάζεται το κατά πόσο τηρούνται οι προδιαγραφές πυρανίχνευσης, συναγερμού και αντιμετώπισης της πυρκαγιάς. Εδώ, πρέπει να αναφερθεί ότι η φρεγάτα είναι κατασκευασμένη βάσει των προτύπων **STANAG (Standardisation Agreements)**.

Πίνακας 12 Σύγκριση μεταξύ κανονισμών SOLAS και των όσων ισχύουν στις φρεγάτες του Ελληνικού Πολεμικού Ναυτικού σχετικά με την πυρασφάλεια. Ο Πίνακας διαμορφώθηκε με επιμέλεια του συγγραφέα της παρούσας εργασίας.

Κανονισμός Νο2- Στόχοι πυρασφάλειας και λειτουργικές απαιτήσεις.			
ΣΤΟΧΟΙ ΠΥΡΑΣΦΑΛΕΙΑΣ			
A/A	SOLAS	Φρεγάτα	ΤΗΡΕΙΤΑΙ;
I	Απαιτήση για ύπαρξη εγχειριδίων που αφορούν την πρόληψη συμβάντος πυρκαγιάς και έκρηξης.	Υπάρχουν επίσημες διαταγές εκδιδόμενες από ανώτερες αρχές αλλά και υπηρεσιακά σημειώματα των αξιωματικών της ίδιας της φρεγάτας στα οποία αναγράφονται τρόποι πρόληψης συμβάντων πυρκαγιάς και έκρηξης. Η εφαρμογή των όσων αναγράφονται στις ανωτέρω διαταγές εξασφαλίζεται με συχνές εφοδείες στους χώρους των μηχανοστασίων από το προσωπικό που εκτελεί βάρδια.	✓

2	Απαίτηση για ύπαρξη εγχειριδίων που αφορούν τον περιορισμό της διακινδύνευσης της ανθρώπινης ζωής λόγω πυρκαγιάς.	Αντίστοιχα, υπάρχουν εγχειρίδια και οδηγίες για ορθό τρόπο καταπολέμησης της πυρκαγιάς χωρίς να τίθεται σε μεγάλο κίνδυνο η ανθρώπινη ζωή.	V
3	Απαίτηση για μείωση του ποσοστού της διακινδύνευσης που μπορεί να προκύψει λόγω πυρκαγιάς στο πλοίο και στο περιβάλλον.	Υπάρχουν επίσημες τακτικές οδηγίες εκδιδόμενες από ανώτερες αρχές οι οποίες αναγράφουν όλες τις υδραυλικές (π.χ. άνοιγμα- κλείσιμο επιστομίων δικτύου πετρελαίου) και μηχανικές (π.χ. κλείσιμο κλαπέ αερισμού στο διαμέρισμα) απομονώσεις οι οποίες πρέπει να πραγματοποιηθούν προκειμένου η πυρκαγιά να περιοριστεί σε έναν συγκεκριμένο χώρο και να μην εξαπλωθεί σε γειτονικά διαμερίσματα.	V
4	Απαίτηση για εκπαίδευση του προσωπικού σε θέματα περιορισμού, ελέγχου και καταπολέμησης της πυρκαγιάς στο χώρο από τον οποίο προήλθε.	Παρομοίως, υπάρχει δόγμα καταπολέμησης της πυρκαγιάς βάσει του οποίου εκπαιδεύεται το πλήρωμα επί καθημερινής βάσης με τέλεση γυμνασίων. Επιπρόσθετα, το Πολεμικό Ναυτικό διαθέτει ειδικές εγκαταστάσεις στο Κέντρο Εκπαίδευσης «Παλάσκας» στις οποίες το προσωπικό των Πολεμικών Πλοίων και των Ναυτικών Υπηρεσιών εκπαιδεύεται σε πραγματικές συνθήκες πυρκαγιάς.	V
5	Παροχή ικανού αριθμού μέσων διαφυγής για το πλήρωμα.	Στη φρεγάτα, υπάρχει ικανός αριθμός αναπνευστικών συσκευών διαφυγής (Emergency Escape Breathing Device-EEBD) για το σύνολο του πληρώματος οι οποίες είναι μάλιστα τοποθετημένες σε εμφανή σημεία για εύκολη πρόσβαση. Αυτές ελέγχονται περιοδικά για λήξη ορίου ζωής και σε περίπτωση που αυτό παρέλθει, αντικαθίστανται. Επιπρόσθετα, υπάρχουν και συσκευές οι οποίες χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για λόγους εκπαίδευσης προκειμένου το πλήρωμα να αποκτήσει εξοικείωση. Εάν υποθεθεί ότι στη φρεγάτα επιβαίνει ο μέγιστος αριθμός ατόμων (204 άτομα), ο συνολικός αριθμός συσκευών διαφυγής που αντιστοιχεί σε ένα άτομο είναι επαρκής. (255 συσκευές, άρα 1,25 συσκευές/ άτομο)	V
<b>ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ</b>			
A/A	<b>SOLAS</b>	<b>Φρεγάτα</b>	<b>ΤΗΡΕΙΤΑΙ;</b>
1	Χωρισμός του πλοίου σε κύριους κατακόρυφους και οριζόντιους νομείς με δομικά και θερμικά όρια.	Είναι χωρισμένη νοητά σε 12 κατακόρυφους τομείς, 7 στο πρωραίο τμήμα και 5 στο πρυμναίο τμήμα, των οποίων οι θύρες και οι καταπακτές εξασφαλίζουν αεροστεγανότητα και υδατοστεγανότητα (κυρίως στα κατώτερα	V

		καταστρώματα όπου υπάρχει κίνδυνος διαρροής αλλά και στα εξωτερικά καταστρώματα όπου υπάρχει κίνδυνος σε περίπτωση ραδιολογικού-βιολογικού-χημικού πολέμου.)	
2	Διαχωρισμός των ενδιαιτήσεων από το υπόλοιπο κομμάτι του πλοίου με δομικά και θερμικά όρια.	Λόγω του ότι η φρεγάτα δεν είναι «πλοίο αναφυχής», άρα δεν έχει ως σκοπό την διασκέδαση των επιβαινόντων αλλά την επιβίωση στη μάχη, οι χώροι είναι ιδιαίτερα περιορισμένοι προκειμένου να εξασφαλίζεται η ευελιξία του πλοίου. Επομένως, πολλοί χώροι ενδιαιτήσεων βρίσκονται ακόμα και πάνω από μηχανοστάσια ή πλησίον διαμερισμάτων με ηλεκτρικούς πίνακες, γεγονός το οποίο αυξάνει την επικινδυνότητα σε περίπτωση πυρκαγιάς.	X
3	Περιορισμένη χρήση αναφλέξιμων υλικών.	Εξασφαλίζεται με χρήση προβλεπόμενων σημάτων κατά IMO ιδιαίτερα σε χώρους υψηλής επικινδυνότητας εμφάνισης πυρκαγιάς αλλά και με εκτέλεση των προβλεπομένων εφοδειών από το προσωπικό του πλοίου.	V
4	Εντοπισμός πυρκαγιάς στη ζώνη προέλευσης.	Επί του πλοίου υφίσταται αυτόματο σύστημα πυρανίχνευσης που, σε περίπτωση ενεργοποίησης, παράγει ηχητικό και οπτικό σήμα στο κέντρο ελέγχου πλοίου στο οποίο υποχρεωτικά εκτελεί βάρδια τουλάχιστον ένα εκπαιδευμένο μέλος του πληρώματος (ειδικότητας μηχανικού ή ηλεκτρολόγου). Μετά ενεργοποίησης του συστήματος, το αυτόματο σύστημα ελέγχου προβάλλει σε οθόνη το διαμέρισμα στο οποίο ενεργοποιήθηκε ο εκάστοτε αισθητήρας θερμότητας και καπνού.	V
5	Περιορισμός και κατάσβεση οποιουδήποτε τύπου πυρκαγιάς στο χώρο προέλευσης.	Όπως αναφέρθη, εκτελούνται καθημερινά γυμνάσια στο σύνολο του πληρώματος προκειμένου να αποκτηθεί η απαραίτητη εξοικείωση για την αντιμετώπιση συμβάντος πυρκαγιάς διαφόρων τύπων σε οποιοδήποτε διαμέρισμα.	V
6	Διαθεσιμότητα μέσω καταπολέμησης πυρκαγιάς.	Εκτός της ύπαρξης ικανού αριθμού πυροσβεστήρων σε όλο το πλοίο, υπάρχει επίσης και μεγάλος αριθμός μανικών και ακροσωληνίων σε καίρια σημεία προκειμένου να καθίσταται εφικτή η άμεση σύνδεση αυτών σε λήψεις για καταπολέμηση της πυρκαγιάς. Τόσο οι μάνικες, όσο και τα ακροσωλήνια ελέγχονται περιοδικά βάσει προβλεπομένου συστήματος περιοδικής συντήρησης για φθορές. Επιπρόσθετα, ετησίως πραγματοποιείται έλεγχος	V

		πυροσβεστήρων από αρμόδιους φορείς για γνωμάτευση καταλληλότητάς τους.	
<b>Κανονισμός Νο7- Ανίχνευση και συναγερμός.</b>			
A/A	SOLAS	Φρεγάτα	ΤΗΡΕΙΤΑΙ;
1	Αρχικοί και περιοδικοί έλεγχοι συστήματος πυρανίχνευσης.	Βάσει του συστήματος περιοδικής συντήρησης, εκτελούνται τακτικοί έλεγχοι στο σύστημα πυρανίχνευσης από αρμόδιο προσωπικό προκειμένου να εξασφαλιστεί η ενεργοποίησή του σε περίπτωση συμβάντος πυρκαγιάς.	V
2	Προστασία μηχανοστασίων, ύπαρξη μόνιμων μέσων κατάσβεσης.	Για το σύνολο των μηχανοστασίων (με εξαίρεση το πυρμναίο αντλιοστάσιο), υπάρχει δυνατότητα κατάκλυσης αυτών με αδρανές αέριο HALON 1301 έτσι ώστε να κατασβεστεί η πυρκαγιά χωρίς να απαιτηθεί η είσοδος προσωπικού στο χώρο. Βέβαια, η άφεση αυτού θα πραγματοποιηθεί μόνο εφόσον δεν δύναται να κατασβηστεί η πυρκαγιά από το προσωπικό του πλοίου.	V
3	Προστασία χώρων ενδιαιτήσεων.	Δυστυχώς, για τους χώρους των ενδιαιτήσεων δεν υπάρχει εγκατεστημένο σύστημα καταιονισμού θαλασσίου ύδατος σε περίπτωση πυρκαγιάς ή οποιοδήποτε άλλο μόνιμο σύστημα. Επομένως, σε συμβάν πυρκαγιάς, η αποτελεσματική καταπολέμησή της βασίζεται αποκλειστικά και μόνο στις ορθές ενέργειες του πληρώματος.	X
4	Εφοδείες για εντοπισμό πυρκαγιάς.	Όπως αναφέρθη, το προσωπικό εκτελεί ωριαίες εφοδείες σε όλους τους χώρους όπου υπάρχουν μηχανήματα σε λειτουργία προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι δεν υπάρχει κίνδυνος πυρκαγιάς λόγω μη ομαλής λειτουργίας αυτών. (π.χ. διαρροή πετρελαίου και ανάφλεξη).	V
5	Σύστημα ειδοποίησης επιβαινόντων σε περίπτωση πυρκαγιάς.	Υφίσταται μεγαφωνικό σύστημα μέσω του οποίου πραγματοποιούνται ανακοινώσεις τόσο στο εσωτερικό όσο και στο εξωτερικό περιβάλλον της φρεγάτας. Κατά αυτόν τον τρόπο, το άγημα πυρκαγιάς μπορεί να ειδοποιηθεί άμεσα και να επέμβει εγκαίρως ενώ παράλληλα δίνεται η δυνατότητα και στα υπόλοιπα πλοία που υπάρχουν πλησίον της φρεγάτας να αποστείλουν εξοπλισμένο προσωπικό για συνδρομή.	V
<b>Κανονισμός Νο8: Τοποθέτηση ορίων καπνού για έλεγχο εξάπλωσής του.</b>			
A/A	SOLAS	Φρεγάτα	ΤΗΡΕΙΤΑΙ;
1	Προστασία χώρων από καπνό(εκτός μηχανοστασίων.)	Αμέσως μετά την εκδήλωση ενός συμβάντος, οι αρχικές ανακοινώσεις που πραγματοποιούνται από το μεγαφωνικό σύστημα του πλοίου περιλαμβάνουν και την τοποθέτηση ορίων καπνού έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η μη εξάπλωση της	V

		πυρκαγιάς αλλά και η ασφαλής διέλευση του προσωπικού. Επιπρόσθετα, μετά το πέρας του συμβάντος πραγματοποιείται εκδίωξη του καπνού, το οποίο μάλιστα βασίζεται σε τυποποιημένα έντυπα, για να αποφευχθεί η διέλευση του καπνού από χώρους ζωτικής σημασίας (π.χ. κέντρο ελέγχου, κέντρο επιχειρήσεων).	
2	Απελευθέρωση καπνού από μηχανοστάσια μετά πέρατος συμβάντος.	Είναι εφικτή με ποικίλους τρόπους, μεταξύ άλλων είναι ο φυσικός εξαερισμός και η χρήση φορητών εξαεριστήρων.	V
<b>Κανονισμοί Νο10 και 11: Περιορισμός και καταπολέμηση της πυρκαγιάς.</b>			
<b>A/A</b>	<b>SOLAS</b>	<b>Φρεγάτα</b>	<b>ΤΗΡΕΙΤΑΙ;</b>
1	Προστασία ανοιγμάτων σε μηχανοστάσια και αντιπυρικούς νομείς.	Δεν προβλέπεται κάποιο μόνιμο σύστημα για την προστασία των ανοιγμάτων. Ωστόσο, βάσει υφιστάμενου δόγματος καταπολέμησης πυρκαγιάς προβλέπεται η τοποθέτηση ατόμου («ship protector») εξοπλισμένου με πυρίμαχο ενδυμασία και μάνικα στη θύρα του διαμερίσματος που έχει πυρκαγιά (αποκλειστικά όμως για καταπακτές) προκειμένου να αποτρέψει την επέκταση της πυρκαγιάς έξω από αυτό αλλά και για να διασφαλιστεί η έξοδος των ατόμων που βρίσκονται μέσα στο χώρο και την καταπολεμούν.	V
3	Σύστημα παροχής θαλασσίου ύδατος. Βάσει SOLAS, θα πρέπει ένα επιβατηγό πλοίο να έχει τουλάχιστον 3 αντλίες παροχής θαλασσίου ύδατος (αντλίες πυρκαγιάς), οι οποίες να έχουν ελάχιστη παροχή 25 m <sup>3</sup> /h και η παροχή τους να ξεπερνά τα 2/3 της παροχής των αντλιών κυτών.	Η φρεγάτα διαθέτει ένα δίκτυο παροχής θαλασσίου ύδατος το οποίο εκτείνεται σε όλα τα μήκη και τα πλάτη του πλοίου και εξυπηρετείται από συνολικά 9 αντλίες. Η παροχή των αντλιών αυτών ξεπερνά κατά πολύ τα 2/3 της παροχής των αντλιών κυτών (70 και 150 m <sup>3</sup> /h η παροχή των αντλιών πυρκαγιάς έναντι 5 m <sup>3</sup> /h των αντλιών κυτών.) Η παροχή επίσης των αντλιών πυρκαγιάς είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτήν που προβλέπει η SOLAS (70 και 150 m <sup>3</sup> /h). Τέλος, ο αριθμός των αντλιών στην φρεγάτα είναι επίσης πολύ μεγαλύτερος από τον ελάχιστο αριθμό που προβλέπεται να έχουν τα επιβατηγά και τα εμπορικά πλοία.	V
3	Μάνικες καταπολέμησης και ακροσωλήνια. Η SOLAS προβλέπει την ύπαρξη μανικών οι οποίες θα φέρουν πιστοποιητικό καταλληλότητας και θα είναι ικανές σε μέγεθος ούτως ώστε να καθίσταται εφικτή η καταπολέμηση της πυρκαγιάς σε	Υπάρχει ικανός αριθμός μανικών και ακροσωληνίων για την άμεση σύνδεση σε λήψεις. Στη φρεγάτα, κάθε φορά που πραγματοποιείται προμήθεια μανικών, δίδονται τα απαραίτητα πιστοποιητικά καταλληλότητας ενώ το μέγεθός τους είναι 15m. Δεν απαιτείται μεγαλύτερο μέγεθος μάνικας καθόσον οι χώροι είναι περιορισμένης έκτασης με εξαίρεση τα μηχανοστάσια, όπου και πάλι η σύνδεση 2 ή και περισσοτέρων μανικών μεταξύ τους συμβάλλει στην αποτελεσματική και ανεμπόδιση καταπολέμηση.	V



	<p>οποιοδήποτε διαμέρισμα. Πιο συγκεκριμένα, για χώρους μηχανοστασίων, το μέγιστο μήκος το οποίο πρέπει να έχει η μάνικα φτάνει τα 15 m ενώ το ελάχιστο για γενική χρήση είναι τα 10 m. Επιπρόσθετα, κάθε μάνικα θα πρέπει να συνοδεύεται και από κατάλληλο ακροσωλήνιο το οποίο προσαρτάται σε αυτήν.</p>		
<b>4</b>	<p>Φορητοί πυροσβεστήρες. Βάσει της SOLAS προβλέπεται η ύπαρξη πυροσβεστήρων σε εμφανή σημεία οι οποίοι μάλιστα να είναι έτοιμοι προς χρήση. Επιπρόσθετα έξω από τους χώρους ενδιαιτήσεων θα πρέπει να υφίσταται πυροσβεστήρας ο οποίος μάλιστα να MHN είναι διοξειδίου του άνθρακα και να έχει ενδείκτη που να φανερώνει εάν έχει χρησιμοποιηθεί ή όχι</p>	<p>Στη φρεγάτα, υπάρχουν πυροσβεστήρες διοξειδίου του άνθρακα και ξηράς κόνεως οι οποίοι είναι τοποθετημένοι σε καίρια σημεία και έχουν τις προαναφερθείσες απαιτήσεις. Επιπρόσθετα, υπάρχει και απόθεμα πυροσβεστήρων σε ειδικούς χώρους για την αντικατάσταση των χρησιμοποιηθέντων.</p>	<b>V</b>
<b>5</b>	<p>Μόνιμα εγκατεστημένα μέσα κατάκλυσης. Από τη SOLAS προβλέπεται η ύπαρξη μόνιμων συστήματος κατάσβεσης διοξειδίου του άνθρακα, πυροσβεστικού αφρού και καταιονισμού με θαλασσινό νερό. Το αδρανές αέριο HALON έχει καταργηθεί από τη SOLAS από το 1994 με τον κανονισμό EC 2037/2000 λόγω των βλαβών που προκαλεί στο στρώμα του όζοντος</p>	<p>Στη φρεγάτα, υφίσταται ακόμα μόνιμο σύστημα κατάκλυσης HALON στους χώρους των μηχανοστασίων ενώ σύστημα καταιονισμού με θαλασσινό νερό υπάρχει μόνο στις πυριταποθήκες. Ακόμη, μόνιμα συστήματα κατάκλυσης με διοξείδιο του άνθρακα και πυροσβεστικού αφρού υπάρχουν αποκλειστικά για κατάσβεση πυρκαγιάς στο ελικόπτερο.</p>	<b>X</b>
<b>6</b>	<p>Πυρίμαχες ενδυμασίες.</p>	<p>Στην φρεγάτα, η οποία είναι μήκους 117 m,</p>	<b>V</b>

	<p>Γενικά, από τη SOLAS, ένα πλοίο θα πρέπει να έχει τουλάχιστον 2 πυρίμαχες ενδυμασίες. Τα επιβατηγά θα πρέπει να έχουν 2 επιπρόσθετες πυρίμαχες ενδυμασίες για κάθε 80 m μήκους χώρων επιβατών. Επίσης, επιβατηγά με αριθμό επιβατών μεγαλύτερο των 36 θα πρέπει να έχουν 2 πρόσθετες πυρίμαχες για κάθε τομέα</p>	<p>υπάρχει ικανός αριθμός πυρίμαχων ενδυμασιών για τον εξοπλισμό 4 ομάδων αντιμετώπισης πυρκαγιάς(συνολικά 20 άτομα), 2 ομάδων καταπολέμησης πυρκαγιάς σε ελικόπτερο (10 άτομα) αλλά και 30 ακόμα σε περίπτωση που απαιτηθεί. Αξίζει να αναφερθεί ότι οι πυρίμαχες ενδυμασίες καθαρίζονται με ειδικό απορρυπαντικό μετά τη χρήση προκειμένου να διατηρούν τις αντιπυρικές τους ιδιότητες και για λόγους υγιεινής.</p>	
<b>Κανονισμός Νο13: Τρόποι διαφυγής</b>			
<b>A/A</b>	<b>SOLAS</b>	<b>Φρεγάτα</b>	<b>ΤΗΡΕΙΤΑΙ;</b>
<b>1</b>	<p>Γενικές απαιτήσεις. Βάσει της SOLAS, θα πρέπει οι σκάλες (με εξαίρεση τους χώρους των μηχανοστασίων) να είναι τοποθετημένες έτσι ώστε να παρέχουν άμεση πρόσβαση στα μέσα διαφυγής τα οποία βρίσκονται στα εξωτερικά καταστρώματα. Επιπρόσθετα, απαγορεύονται οι διάδρομοι και οι χώροι υποδοχής οι οποίοι παρέχουν έναν και μοναδικό τρόπο διαφυγής. Ακόμη όλες οι κλίμακες που βρίσκονται στους χώρους των ενδιαιτήσεων θα πρέπει να είναι κατασκευασμένες από ατσάλι και οι θύρες διαφυγής να ανοίγουν προς τη μεριά της εξόδου.</p>	<p>Το σύνολο των κλιμάκων της φρεγάτας με εξαίρεση τους χώρους των μηχανοστασίων οδηγεί στο χώρο του μεσοστέγου όπου και βρίσκεται το σύνολο των σωστικών μέσων. Ωστόσο υπάρχουν διαμερίσματα, όπως είναι η τραπεζαρία πληρώματος και το καρέ αξιωματικών, οι οποίοι δεν έχουν άλλο τρόπο διαφυγής πέραν της κύριας εισόδου στο διαμέρισμα. Επιπλέον το σύνολο των κλιμάκων επί της φρεγάτας είναι κατασκευασμένες από ναυπηγικό χάλυβα ενώ επίσης όλες ανεξαιρέτως οι θύρες διαφυγής ανοίγουν προς τη μεριά της εξόδου.</p>	<b>X</b>
<b>2</b>	<p>Στα μηχανοστάσια των επιβατηγών πλοίων θα πρέπει να υπάρχουν 2 χωριστά μέσα διαφυγής τα οποία ουσιαστικά είναι οι κλίμακες οι οποίες μάλιστα θα</p>	<p>Στην πλειονότητα των μηχανοστασίων υπάρχουν κλίμακες οι οποίες οδηγούν εξωτερικά του διαμερίσματος. Ωστόσο, στο αντλιοστάσιο ελικοπτέρου υπάρχει μόνο ένας τρόπος εισόδου και εξόδου στο διαμέρισμα με αποτέλεσμα σε περίπτωση πυρκαγιάς οι πιθανότητες επιβίωσης να είναι μηδαμινές.</p>	<b>X</b>

	πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μακρύτερα η μία από την άλλη.		
3	Οι κλίμακες θα πρέπει να έχουν άμεση επικοινωνία με τους διαδρόμους. Όπου είναι εφικτό, οι σκάλες δεν θα πρέπει να παρέχουν άμεση πρόσβαση σε καμπίνες, ντουλάπες ή σε οποιονδήποτε άλλο χώρο ο οποίος είναι κλειστός και όπου μπορεί να προκληθεί πυρκαγιά. Ακόμη, όλες οι κλίμακες θα πρέπει να είναι κατασκευασμένες έτσι ώστε να μην επιτρέπεται η διέλευση του καπνού από το ένα κατάστρωμα στο άλλο.	Στη φρεγάτα, το σύνολο των κλιμάκων στο εσωτερικό του πλοίου έχει άμεση επικοινωνία με τους διαδρόμους ενώ καμία από αυτές δεν οδηγεί σε κλειστό χώρο ο οποίος είναι επίφοβος για πυρκαγιά. Επίσης, όλες οι κλίμακες που οδηγούν από το ένα κατάστρωμα στο άλλο έχουν στο άνω και κάτω μέρος τους καταπακτές που εξασφαλίζουν αεροστεγανότητα με αποτέλεσμα να αποτρέπουν στον καπνό να διαφύγει από το ένα κατάστρωμα στο άλλο.	V
4	Κάθε πλοίο θα πρέπει να έχει τουλάχιστον 2 αναπνευστικές συσκευές διαφυγής στους χώρους ενδιαιτήσεων ενώ κάθε επιβατηγό πλοίο θα πρέπει να έχει τουλάχιστον 2 σε κάθε κύριο κατακόρυφο τομέα.	Η φρεγάτα έξω από τους χώρους των ενδιαιτήσεων έχει τουλάχιστον 5 αναπνευστικές συσκευές διαφυγής και συνολικά σε κάθε κατακόρυφο τομέα έχει κατά μέσο όρο 10.	V
5	Μία εκ των δύο κλιμάκων των μηχανοστασίων των επιβατηγών πλοίων θα πρέπει να περιβάλλεται σε ένα μέρος της με περίβλημα ώστε να προστατεύεται το άτομο που την ανεβαίνει από πυρκαγιά.	Καμία κλίμακα μηχανοστασίου δεν έχει γύρω της προστατευτικό περίβλημα.	X

Από τον παραπάνω συγκριτικό πίνακα, γίνεται άμεσα αντιληπτό ότι η φρεγάτα καλύπτει τους **21 από τους 27 κανονισμούς** περί πυρασφάλειας που αναφέρονται στο κεφάλαιο II-2 της SOLAS. Συγκριτικά με ένα επιβατηγό πλοίο, προκύπτει το συμπέρασμα ότι, τα μέσα που διαθέτει η φρεγάτα, και συγκεκριμένα οι αντλίες πυρκαγιάς, πυρίμαχες ενδυμασίες και τα συστήματα μόνιμης κατάκλισης, σε συνδυασμό με την εκπαίδευση στην οποία υποβάλλεται το προσωπικό μέσω των καθημερινών γυμνασίων, συνεισφέρουν στην πλήρη εναρμόνιση της φρεγάτας με τους απαραίτητους κανονισμούς περί πυρασφάλειας.

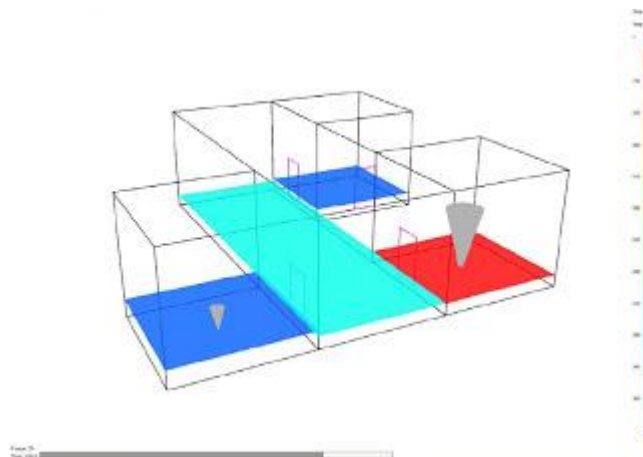
# ΜΕΡΟΣ ΙΙ

## Κεφάλαιο 4- Μοντέλα Προσομοίωσης Πυρκαγιάς

### 4.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί πλήθος υπολογιστικών μοντέλων προσομοίωσης πυρκαγιάς. Τα πιο βασικά, και συνήθως χρησιμοποιούμενα, μοντέλα είναι εκείνα που εξελίσσονται στις τρεις διαστάσεις (McGrattan et al., 2010). Πιο αναλυτικά, τα είδη αυτά είναι:

- **Δικτυακά μοντέλα.** Εδώ έχει πολύ μεγάλη σημασία η έννοια του κόμβου. Ως κόμβος μπορεί να θεωρηθεί ένας χώρος (π.χ. μια καμπίνα σε ένα πλοίο). Κάθε κόμβος ενώνεται με έναν άλλο, και δημιουργείται ένα δικτύωμα μέσα στο οποίο πραγματοποιείται η ανταλλαγή πληροφοριών που προσδιορίζει ουσιαστικά την έκβαση της πυρκαγιάς (Floyd et al., 2005).



Εικόνα 13 Διζωνικό μοντέλο. (πηγή: fseg.gre.ac.uk.)

- **Διζωνικά Μοντέλα.** Εδώ, έκαστο διαμέρισμα είναι χωρισμένο σε δύο ζώνες, την άνω και την κάτω ζώνη, οι οποίες επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω των εξισώσεων ροής. Αν και πιο πολύπλοκα από τα δικτυακά μοντέλα ως προς τη δημιουργία τους, τα αποτελέσματα που μας παρέχουν είναι σαφώς πιο ρεαλιστικά όπως επίσης και η υπολογιστική ισχύς που απαιτούν δεν είναι μεγάλη. Σημειώνεται ότι υπάρχουν και μοντέλα μιας ζώνης τα οποία θεωρούν ότι οι συνθήκες στα πλαίσια ενός διαμερίσματος είναι παντού ομοιόμορφες και χρησιμεύουν στην εξέταση φαινομένων όπως είναι το flash over (πλήρης ανφλεξη).
- **Υπολογιστικά μοντέλα ρευστομηχανικής (Computational Fluid Dynamics-CFD).** Τα συγκεκριμένα μοντέλα επιλύουν τρισδιάστατες διαφορικές εξισώσεις ροής με διαφορετικά επίπεδα πολυπλοκότητας. Υποδιαιρούν τον χώρο σε έναν μεγάλο αριθμό όγκων ελέγχου με αποτέλεσμα να προκύπτουν σωστότερες προβλέψεις για τη ροή και την εξέλιξη των συμβάντων. Ωστόσο, εκεί που υστερούν συγκριτικά με τα προαναφερθέντα μοντέλα είναι αναμφίβολα στον χρόνο εκτέλεσης του προγράμματος, καθόσον πολύπλοκοι υπολογισμοί μπορεί να διαρκέσουν ακόμα και εβδομάδες για παροχή ορθών συμπερασμάτων. Ο χρόνος εκτέλεσης βέβαια, είναι άμεσα συνυφασμένος και με την υπολογιστική ισχύ που έχει στη διάθεσή του ο εκάστοτε χρήστης.

## 4.2 Επιλογή κατάλληλου προγράμματος για την διεξαγωγή της προσομοίωσης

Όσον αφορά στα θέματα αξιολόγησης και αξιοπιστίας των εκάστοτε αριθμητικών μοντέλων που χρησιμοποιούνται για την πυρκαγιά, είναι ζωτικής σημασίας, διότι προσδιορίζουν τις αποδεκτές χρήσεις αλλά και τους περιορισμούς κάθε μοντέλου προσομοίωσης της πυρκαγιάς.

Μέσω της διαδικασίας επικύρωσης, μπορεί να ελεγχθεί η αβεβαιότητα εκάστου μοντέλου. Προκειμένου όμως να επικυρωθεί ένα μοντέλο, υπάρχουν πολλοί οδηγοί οι οποίοι σκοπεύουν να παρέχουν μια μεθοδολογία για να αξιολογηθούν οι δυνατότητες πρόβλεψης του κάθε μοντέλου για μία συγκεκριμένη χρήση. Άρα εάν ένα μοντέλο τελικά επικυρωθεί για μια εφαρμογή, αυτό δεν συνεπάγεται αυτόματα ότι θα τυγχάνει και γενικής επικύρωσης εάν εφαρμοστεί σε διαφορετικά σενάρια.

Βάσει του κανονισμού ASTM E 1355, σαν επικύρωση ορίζουμε τη διαδικασία κατά την οποία καθορίζουμε το κατά πόσο μια υπολογιστική μέθοδος αντιπροσωπεύει επαρκώς τον πραγματικό κόσμο. Αυτό πραγματοποιείται μέσω μιας μελέτης σύγκρισης ανάμεσα στα αποτελέσματα του μοντέλου υπολογισμού και των αποτελεσμάτων από τα πειράματα μεγάλης κλίμακας.

Βάσει λοιπόν του κανονισμού ASTM E 1355 περί αξιολόγησης μοντέλων προβλέψεως πυρκαγιάς, ακολουθείται η εξής διαδικασία (Jones, 2009):

- Καθορίζεται το μοντέλο και το σενάριο στα οποία θα εκτελεστεί η αξιολόγηση.
- Αξιολογείται η καταλληλότητα της θεωρητικής βάσης η οποία θα χρησιμοποιηθεί στο πρόγραμμα.
- Κατόπιν, αξιολογείται η μαθηματική και η αριθμητική δομή του προγράμματος.
- Τέλος, πραγματοποιείται μια ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας και της ακρίβειας των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από το μοντέλο στην πορεία πρόβλεψης των γεγονότων.

Μέχρι στιγμής έχουν γίνει πολλές προσπάθειες σύγκρισης τόσο σε μοντέλα που ανήκουν στην ίδια κατηγορία όσο και σε μοντέλα που ανήκουν σε διαφορετική κατηγορία. Έχουν επίσης διεξαχθεί πειράματα σε κανονική κλίμακα (full scale fire tests) (Steward et. Al., 1992). Για μερικά από αυτά τα πειράματα έχει γίνει προσπάθεια σύγκρισης των αποτελεσμάτων με αυτά ενός μοντέλου προσομοίωσης (Forney et. al. 1996, Reneke et. al. 2001, Dempsey et. Al. 1995). Επίσης, υπάρχει στη βιβλιογραφία και σύγκριση μεταξύ μοντέλων προσομοίωσης πυρκαγιάς διαφορετικής κατηγορίας (Rein et al ,2006, Floyd 2002 Νικόλαου & Σργου 2009). Συμπερασματικά, προκύπτει ότι για πολύπλοκες εφαρμογές, προτιμώνται τα μοντέλα υπολογιστικής ρευστομηχανικής λόγω του ότι τα διζωνικά παύουν να είναι αριθμητικά ευσταθή και παρουσιάζουν αποκλίσεις.

## 4.3 Fire Dynamics Simulator –Smokeview

Η έρευνα των τυρβωδών ροών περιλαμβάνει το θεωρητικό υπόβαθρο, τη διεξαγωγή πειραμάτων και την αριθμητική προσομοίωση. Υπάρχουν δύο βασικές προσεγγίσεις για τη λεπτομερή προσομοίωση της τυρβώδους ροής: η προσέγγιση DNS (Dynamic Numerical Simulation) και η προσέγγιση LES (Large Eddy Simulation). Στην DNS,

πραγματοποιείται η αριθμητική επίλυση των εξισώσεων Navier Stokes για όλες τις δίνες που υπάρχουν σε μια ροή. Αντίθετα, η LES επιλύει αριθμητικά τις τρισδιάστατες εξισώσεις Navier Stokes για τις μεγάλες δίνες σε μια ροή και χρησιμοποιεί ένα συνολικό αθροιστικό μοντέλο επίλυσης για τις μικρότερες δίνες. Η DNS, αν και ακριβέστερη απαιτεί ένα μεγάλο αριθμό υπολογιστικών πόρων προκειμένου να εξαχθούν αποτελέσματα ενώ η LES (λιγότερο ακριβής όμως με πολύ λιγότερες απαιτήσεις σε υπολογιστικούς πόρους), εξάγει αποτελέσματα που προσομοιάζουν αρκετά καλά την πραγματικότητα (Kaiktsis, 1995).

Ο προσομοιωτής FDS(McGratan etal, 2014) είναι ένα πρόγραμμα υπολογιστικής ρευστομηχανικής με το οποίο γίνεται εφικτή η μελέτη εξέλιξης ενός συμβάντος πυρκαγιάς. Ουσιαστικά αποτελεί μια μορφή του προσομοιωτή LES (Large Eddy Simulation) που χρησιμοποιείται στην ανάλυση τυρβωδών ροών και επιλύει τις εξισώσεις Navier- Stokesγια χαμηλής ταχύτητας ροές, οι οποίες, προκύπτουν λόγω θερμότητας δίδοντας παράλληλα ιδιαίτερη έμφαση στον καπνό αλλά και στην μεταφορά θερμότητας λόγω πυρκαγιάς.

Πρόκειται για ένα λογισμικό το οποίο διατίθεται δωρεάν στο διαδίκτυο από το **Εθνικό Ινστιτούτο Προτύπων και Τεχνολογίας** (National Institute of Standards and Technology) των ΗΠΑ, σε συνεργασία με το κέντρο τακτικών ερευνών VTTτης Φινλανδίας. Το πρόγραμμα Smokeview παρέχεται μαζί με τον προσομοιωτή και χρησιμοποιείται για την οπτική απεικόνιση των γεγονότων.

Η πρώτη έκδοση του προσομοιωτή κυκλοφόρησε τον Φεβρουάριο του 2000. Έως και σήμερα, περίπου οι μισές από τις εφαρμογές στις οποίες έχει χρησιμοποιηθεί το λογισμικό αφορούν στον σχεδιασμό συστημάτων εκδίωξης καπνού αλλά και στη σωστή τοποθέτηση αισθητήρων στον χώρο. Κατά τη διάρκεια της ανάπτυξής του, ο FDS είχε ως σκοπό την επίλυση πρακτικών προβλημάτων στη μηχανική πυρασφάλειας ενώ την ίδια στιγμή αποτελεί και ένα εργαλείο μελέτης βασικών αρχών μηχανικής της πυρκαγιάς και της ανάφλεξης.

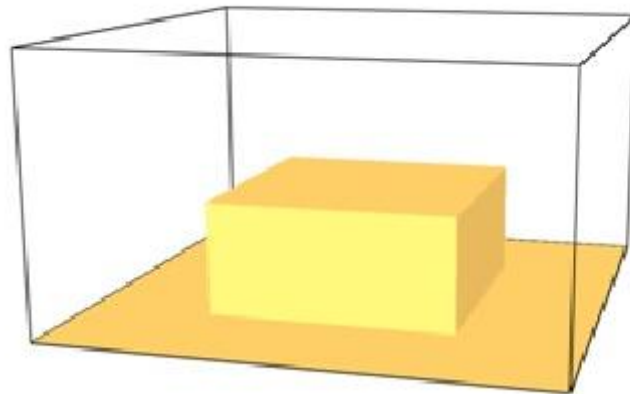
Πιο αναλυτικά, το λογισμικό FDSεπιλύει εξισώσεις οι οποίες περιγράφουν την εξέλιξη της πυρκαγιάς. Είναι γραμμένο σε γλώσσα FORTRANκαι διαβάζει παραμέτρους εισόδου από ένα αρχείο .txt, επιλύει αριθμητικά τις εξισώσεις Navier- Stokes και καταγράφει τιμές εξόδου για τον χρήστη σε αρχεία. Το FDSπροκειμένου να εκτελέσει τους υπολογισμούς χωρίζει τον χώρο που εμείς του καθορίζουμε σε έναν μεγάλο αριθμό όγκων ελέγχου οι οποίοι ανταλλάσσουν πληροφορίες μεταξύ τους. Με δεδομένες τις υψηλές απαιτήσεις χωρικής διακριτοποίησης στην τυρβώδη ροή, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι οι απαιτήσεις σε υπολογιστικό χρόνο είναι αυξημένες.

Το Smokeview (ForneyG, 2007)είναι ένα λογισμικό οπτικοποίησης αποτελεσμάτων, και μπορεί να συνδεθεί με το FDS για απεικόνιση ενδιάμεσων αποτελεσμάτων σε πραγματικό χρόνο. Είναι γραμμένο σε γλώσσα Cκαι FORTRAN,και αποτελείται από 90000 γραμμές κώδικα. Όπως είναι αναμενόμενο, το τμήμα της Cείναι υπεύθυνο για τη γραφική αναπαράσταση ενώ το τμήμα της FORTRANαναγνωρίζει τον κώδικα του FDS. Οι τεχνικές οι οποίες χρησιμοποιεί το Smokeviewγια την αναπαράσταση αυτή είναι μεταξύ άλλων η χρήση κινούμενων σωματιδίων που ακολουθούν τη ροή, σκιασμένα δισδιάστατα και τρισδιάστατα περιγράμματα που απεικονίζουν τις ποσότητες της ροής καθώς και κινούμενα διανύσματα ροής τα οποία αναπαριστούν την κατεύθυνση της ροής.

Στις Εικόνες 14-17 απεικονίζεται η μορφή που πρέπει να έχει ο κώδικας μιας απλής προσομοίωσης για να μπορέσει να γίνει αντιληπτή από το λογισμικό FDS, καθώς και μερικές εικόνες οι οποίες ουσιαστικά είναι τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το Smokeview. Αξίζει να σημειωθεί ότι, το Smokeview μπορεί να απεικονίσει αποτελέσματα προ ενάρξεως του συμβάντος, πράγμα πολύ χρήσιμο αφού γίνεται εφικτός ο έλεγχος της γεωμετρίας του χώρου αλλά και των λοιπών παραμέτρων του, κατά τη διάρκεια του συμβάντος αλλά και μετά το πέρας αυτού, όπου εκεί μπορούμε να δούμε τα τελικά αποτελέσματα.

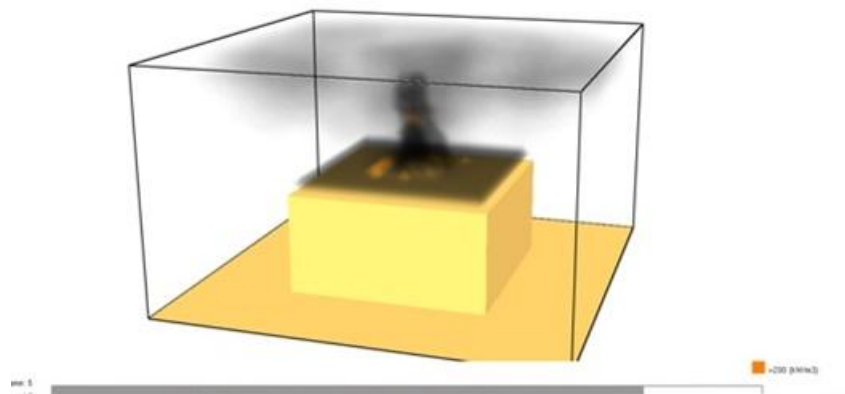
```
&HEAD CHID='NEW', TITLE='NEW' /
&MESH IJK=170,20,20, XB=0.00,80.00,0.00,16.00,0.00,2.20, ID='MESH' /
&TIME T_END=700.0, DT=0.5 /
&REAC ID='AVERAGE',
  FYI='NFPA Babrauskas',
  FUEL='REAC_FUEL',
  C=6.3,
  H=7.1,
  O=2.1,
  N=1.0,
  CO_YIELD=0.0331,
  SOOT_YIELD=0.0541 /
&SURF ID='Fire',
  COLOR='RED',
  HRRPUA=1846,
  &RAMP ID='Fire_RAMP_QE', T=0.0, F=0.0 /
&RAMP ID='Fire_RAMP_QE', T=104.0, F=0.065 /
&RAMP ID='Fire_RAMP_QE', T=258.0, F=0.271 /
```

Εικόνα 14 Κώδικας απλού προγράμματος FDS, κατά το οποίο καίγεται ένα ορθογώνιο αντικείμενο σε ένα διαμέρισμα (Πηγή: Ο κώδικας είναι επιμέλεια του συγγραφέα).

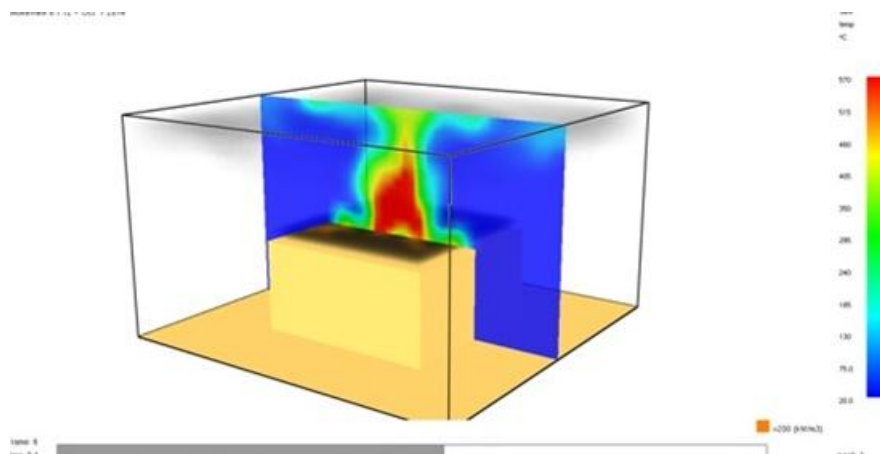


Εικόνα 15 Σχηματική απεικόνιση αντιπροσωπευτικού όγκου ελέγχου, με χρήση του λογισμικού Smokeview (Πηγή: Η Εικόνα είναι αποτέλεσμα προσομοιώσεων του συγγραφέα.)





Εικόνα 16 Σχηματική απεικόνιση στιγμιαίας κατανομής συγκέντρωσης καπνού (Πηγή: Η Εικόνα είναι αποτέλεσμα προσομοιώσεων του συγγραφέα.).



Εικόνα 17 Σχηματική απεικόνιση στιγμιαίας κατανομής συγκέντρωσης θερμοκρασίας (Πηγή: Η Εικόνα είναι αποτέλεσμα προσομοιώσεων του συγγραφέα.).

## Κεφάλαιο 5 – Προσομοίωση πυρκαγιάς σε πλοίο

### 5.1 Εισαγωγή

Στο (παρόν) Κεφάλαιο 5, γίνεται περιγραφή της προσομοίωσης η οποία πραγματοποιείται με τη χρήση του προγράμματος FDS. Αναφέρονται στοιχεία όπως είναι οι κύριες διαστάσεις του καταστρώματος, οι συντελεστές που επηρεάζουν την επιβίωση του αγήματος αλλά και οι οριακές τους τιμές.

### 5.2 Αντικειμενικός Σκοπός

Σε ένα πολεμικό πλοίο τύπου φρεγάτας, η οργάνωση του αγήματος πυρκαγιάς στηρίζεται σε στρατιωτικά εγχειρίδια. Βάσει αυτών λοιπόν, ένα άγημα αποτελείται από τρεις «ομάδες επίθεσης». Η πρώτη ομάδα επίθεσης, αποτελούμενη από 2 άτομα, με το που γνωστοποιηθεί από το μεγαφωνικό σύστημα η ύπαρξη πυρκαγιάς, παίρνει πυροσβεστήρες και μεταβαίνει γρήγορα στον χώρο. Το πρώτο άτομο της ομάδας αυτής καταπολεμά την πυρκαγιά με τη χρήση πυροσβεστήρων ενώ το άλλο συνδέει μάνικες θαλάσσης στις κοντινότερες λήψεις για αποτελεσματικότερη καταπολέμηση. Τα μέλη της, ωστόσο, δεν είναι εξοπλισμένα ούτε με πυρίμαχο ενδυμασία ούτε με αναπνευστική συσκευή. Η δεύτερη ομάδα επίθεσης, αποτελείται εξίσου από 2 άτομα, είναι εξοπλισμένη με αναπνευστική συσκευή και πυροσβεστήρες και πρέπει να μεταβεί στον χώρο του συμβάντος σε χρόνο λιγότερο από 120 sec, προκειμένου να αντικαταστήσει την πρώτη ομάδα επίθεσης. Εάν έχουν συνδεθεί οι μάνικες από την πρώτη ομάδα επίθεσης, καταπολεμά την πυρκαγιά με τη χρήση μανικών, διαφορετικά το ένα άτομο συνεχίζει τη σύνδεση μανικών ενώ το άλλο καταπολεμά την πυρκαγιά πάλι με τη χρήση πυροσβεστήρων. Τέλος, η τρίτη ομάδα επίθεσης, η οποία απαρτίζεται από 5 άτομα και είναι εξοπλισμένη τόσο με πυρίμαχο ενδυμασία όσο και με αναπνευστική συσκευή, θα πρέπει, εντός 360 sec από την είσοδο της δεύτερης ομάδας επίθεσης στον χώρο του συμβάντος, να έχει μεταβεί εκεί για να την αντικαταστήσει (United States Navy, -), . Επομένως, σκοπός των προσομοιώσεων που διεξήχθησαν στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εξέταση επιβίωσης των ατόμων που απαρτίζουν την πρώτη ομάδα επίθεσης από τα παράγωγα της πυρκαγιάς. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζεται εάν τα μέλη της επιβιώνουν λόγω αυξημένης ποσότητας καπνού, υψηλής θερμοκρασίας ή συσσώρευσης τοξικών ουσιών. Μάλιστα, όπως γίνεται φανερό και στη συνέχεια, επισημαίνεται πόσο κρίσιμη είναι η όσο το δυνατόν γρηγορότερη κινητοποίηση του αγήματος.

### 5.3 Περιγραφή του χώρου και της πυρκαγιάς

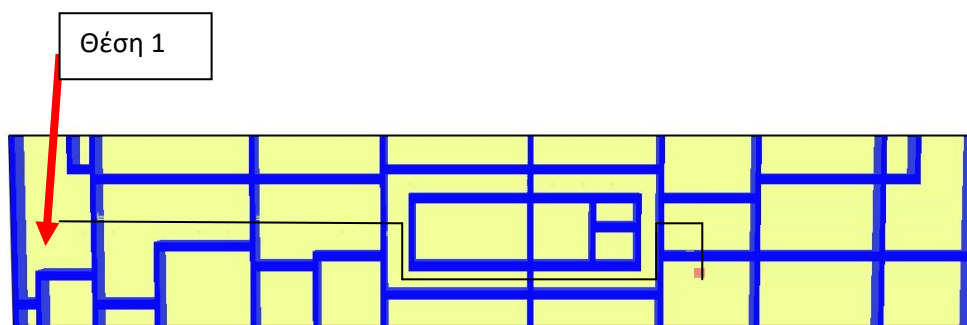
Αρχικά, γίνεται επιλογή του καταστρώματος No2 της υπό εξέταση φρεγάτας διότι αφενός μεν, σε κανονικές συνθήκες ταξιδιού (όχι δηλαδή σε εμπόλεμη κατάσταση) σχεδόν το σύνολο του προσωπικού κινείται σε αυτό και επομένως βρίσκεται σε άμεσο κίνδυνο πυρκαγιάς, και αφετέρου η αφετηρία του αγήματος αντιμετώπισης πυρκαγιάς βρίσκεται στο εν λόγω κατάστρωμα. Οι πραγματικές διαστάσεις του καταστρώματος φαίνονται στον πίνακα 13, ενώ το σύνολο του καταστρώματος και η διαδρομή του αγήματος φαίνονται στην εικόνα 17.

Πίνακας 13 Κύριες διαστάσεις καταστρώματος.

ΔΙΑΣΤΑΣΗ	ΤΙΜΗ (m)
Μήκος	80
Πλάτος	16
Ύψος	2.20
Πάχος τοιχωμάτων	0.004

Να σημειωθεί ότι στο FDS, η κλίμακα σχεδίασης που χρησιμοποιείται στη συγκεκριμένη προσομοίωση είναι 1:1.

Το FDS, προκειμένου να εξαγάγει τα επιθυμητά αποτελέσματα, θεωρεί τον χώρο που θέλουμε να εξετάσουμε σαν ένα πλέγμα (mesh). Κάθε πλέγμα διαιρείται σε ορθογώνια κελιά, το πλήθος των οποίων εξαρτάται από την ανάλυση του πεδίου ροής. Εφόσον το πρόγραμμα επιλύει διαφορικές εξισώσεις Poisson βασισμένο σε Fast Fourier Transformations στις κατευθύνσεις γ και z, θα πρέπει οι διαστάσεις του πλέγματος να είναι της μορφής  $2^i \times 3^m \times 5^n$ , όπου i,m,n είναι ακέραιοι αριθμοί. Ωστόσο, στη συγκεκριμένη προσομοίωση, λόγω του μεγάλου αριθμού θυρών που περιλαμβάνει το κατάστρωμα, ανάλογα με τους συνδυασμούς των x,y,z κάποιες θύρες παρέμεναν ανοιχτές και κάποιες άλλες κλειστές κάθε φορά, με αποτέλεσμα την παρεμπόδιση της διαδρομής που θα ακολουθήσει το άγημα. Κατόπιν αρκετών δοκιμών, βρέθηκε ότι στη συγκεκριμένη προσομοίωση ο συνδυασμός 170 X 20 X 20 αφήνει ανοιχτές όλες τις θύρες που περιλαμβάνονται στη διαδρομή του αγήματος.



Εικόνα 17 : Το κατάστρωμα No2 της φρεγάτας. Το κόκκινο τετράγωνο είναι ο χώρος στον οποίο τοποθετήθηκε η πυρκαγιά. Η θέση 1 είναι η το σημείο στο οποίο βρίσκεται το άγημα πυρκαγιάς. Με μαύρο χρώμα απεικονίζεται η διαδρομή του αγήματος.

Για το υλικό των τοιχωμάτων που χρησιμοποιείται, λήφθηκαν υπόψη 3 ιδιότητές αυτού:

- 1) **Πυκνότητα:** Το ποσό της μάζας που περιέχεται σε συγκεκριμένο όγκο ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
- 2) **Θερμική αγωγιμότητα:** Η ικανότητα ενός υλικού να μεταφέρει θερμότητα ( $\text{W}/\text{mK}$ )
- 3) **Ειδική θερμοχωρητικότητα:** Η θερμότητα που απαιτείται για να ανέλθει η θερμοκρασία ενός γραμμαρίου ενός υλικού κατά έναν βαθμό Kelvin ( $\text{KJ}/\text{kgK}$ )

Το διαχωριστικό που χρησιμοποιείται στην προσομοίωση είναι γαλβανισμένος χάλυβας πάχους 4 χιλιοστών, πυκνότητας  $7850 \text{ kg}/\text{m}^3$ , θερμικής αγωγιμότητας  $51.9 \text{ W}/\text{mK}$  και ειδικής θερμότητας  $0.483 \text{ KJ}/\text{kgK}$ . Με βάση τα όσα αναφέρονται στο Κεφάλαιο 1, θεωρείται ότι το διαχωριστικό είναι τύπου B-15.

Λόγω του ότι ο χώρος, από άποψη επίπλωσης και διαμόρφωσης, μοιάζει αρκετά με μια καμπίνα, θεωρείται ότι αποτελείται από τα υλικά που παρουσιάζονται στον πίνακα 14. Τα δεδομένα της καύσιμης ύλης λαμβάνονται ως ο μέσος όρος των υλικών που βρίσκονται εντός του χώρου. Η πυρκαγιά που τοποθετείται στον χώρο μεταβάλλεται με τον χρόνο, και έχει διαφορετική μέγιστη τιμή έντασης ανάλογα με το σενάριο, ενώ καλύπτει επιφάνεια 1 m<sup>2</sup>. Τέλος, θεωρείται, ότι στο χώρο δεν βρίσκεται προσωπικό.

**Πίνακας 14 Ομάδες καυσίμων υλικών εντός μίας καμπίνας. Τα χαρακτηριστικά του Average χρησιμοποιήθηκαν ως καύσιμη ύλη. (Spyrou et al, 2013).**

Υλικά	% επί μάζας	Μέσο heat of combustion (MJ/kg)	Yield CO (g/g)	Yield CO <sub>2</sub> (g/g)	Yield soot (g/g)
Υφάσματα	28	22.5	0.051	1.42	0.065
Ξύλινα	34	17.33	0.004	1.28	0.015
Πλαστικά	38	24.81	0.046	1.832	0.081
Average	100	21.62	0.0331	1.52	0.0541

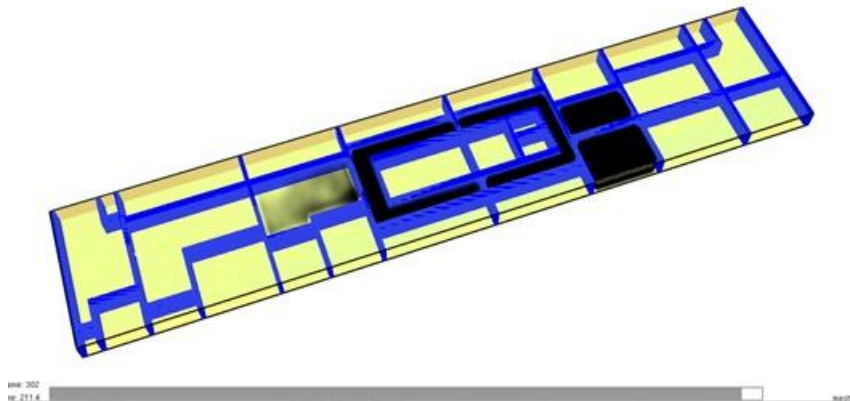
## 5.4 Προσομοίωση πυρκαγιάς και θεωρήσεις

Σημαντικό, στο σημείο αυτό, είναι να αναφέρουμε τη διαδικασία που ακολουθήθηκε καθώς και τις διάφορες θεωρήσεις που έγιναν για την προσομοίωση της πυρκαγιάς και την καταπολέμησή της από το πλήρωμα της φρεγάτας.

Αρχικά, γράφεται ο κώδικας σε περιβάλλον FDS στον οποίο μοντελοποιείται το κατάστρωμα No2 της φρεγάτας και κατά μήκος αυτού τοποθετούνται 26 αισθητήρες σε ύψος 1.5 m οι οποίοι απέχουν μεταξύ τους διαμήκη απόσταση 2.4 m. Οι αισθητήρες καταγράφουν την ποσότητα οξυγόνου, μονοξειδίου του άνθρακα, διοξειδίου του άνθρακα, τη θερμοκρασία και την ορατότητα (σημείωση: η ορατότητα από το FDS προκύπτει από τον τύπο  $S=C/K$ , όπου C είναι μια αδιάστατη σταθερά που είναι χαρακτηριστική κάθε αντικειμένου που βλέπουμε π.χ. C = 3 για έναν φωσφορίζον σήμα, και K είναι η σταθερά light extinction coefficient η οποία εξαρτάται από την πυκνότητα του καπνού στη δεδομένη θέση), με χρονικό βήμα δειγματοληψίας  $\Delta t=0.7s$ .

Θεωρείται ότι το άγημα αντιμετώπισης πυρκαγιάς έχει αφετηρία τη θέση 1 (η οποία φαίνεται στην Εικόνα 17) και κατευθύνεται στο χώρο της πυρκαγιάς (το κόκκινο τετράγωνο στην Εικόνα 17) ακολουθώντας τη διαδρομή που φαίνεται στην Εικόνα 17. Η συγκεκριμένη διαδρομή επιλέχθηκε διότι είναι η συντομότερη δυνατή που μπορεί να ακολουθήσει το άγημα για να φτάσει στο χώρο της πυρκαγιάς. Η ταχύτητα με την οποία κινείται το άγημα προς την πυρκαγιά ορίστηκε  $u=1.2$  m/s. Η ταχύτητα αυτή αποτελεί την μέση ταχύτητα κίνησης σε οριζόντιο επίπεδο για ενήλικους άντρες και γυναίκες που έχει οριστεί στο FDS (Korhonen & Hostikka, 2010). Η απόσταση από τη Θέση 1, που ξεκινά το άγημα αντιμετώπισης, μέχρι το χώρο που έχει εκδηλωθεί η πυρκαγιά, είναι 60 m, άρα απαιτείται χρόνος  $t=50$  s μέχρι το άγημα να φτάσει στο χώρο. Μελετώνται 4 διαφορετικές εντάσεις πυρκαγιάς (500-900-1846-2500 KW) οι οποίες εμφανίζουν τη μέγιστή τους τιμή σε χρόνο 750 s (εξού και η ονομασία RAMP 750). Επιπρόσθετα, μελετάται 1 περίπτωση ελαφρώς διαφοροποιημένης καμπύλης HRR στα 1846 KW (RAMP 750 Alternative) αλλά και 1 περίπτωση που η μέγιστη τιμή της έντασης των 1846 KW της πυρκαγιάς εμφανίζεται στα 700 s (RAMP 700). Όπως ήδη αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1.3, ο τρόπος εξέλιξης της πυρκαγιάς σε συνάρτηση με τον χρόνο είναι η καμπύλη HRR- χρόνου, η οποία δείχνει πότε

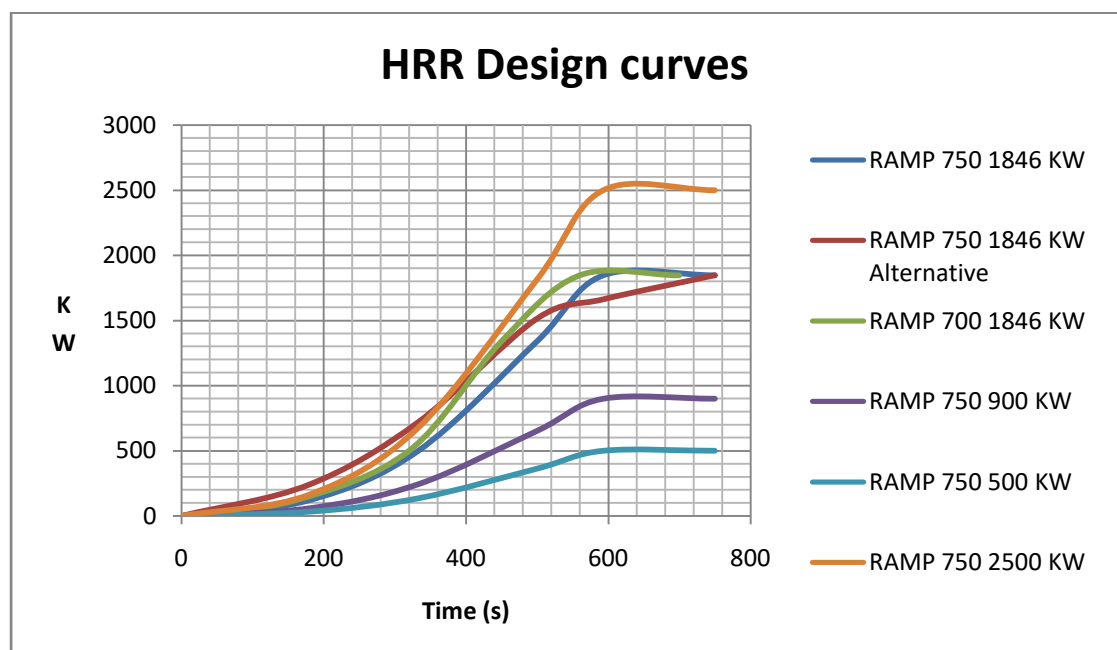
μια πυρκαγιά διέρχεται από την εκάστοτε φάση της, δηλαδή το εναρκτήριο στάδιο, την εξέλιξη, την πλήρη ανάπτυξη και τον μαρασμό.



Εικόνα 18 Η απεικόνιση του καταστρώματος στο Smokeview, κοντά στο τέλος της προσομοίωσης.

Για κάθε προσομοίωση στο FDS προκύπτουν δύο αρχεία excel με τα αποτελέσματα της κάθε προσομοίωσης. Στο πρώτο αρχείο εξάγονται ανά χρονικό βήμα στοιχεία όπως ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας (HRR), η μετάδοση θερμότητας λόγω ακτινοβολίας (RAD\_LOS), λόγω συναγωγής (CON\_LOS) και λόγω αγωγής (COND\_LOS) καθώς και η κατανάλωση ανά μονάδα χρόνου της καύσιμης ύλης. Στο δεύτερο αρχείο, εξάγονται ανά χρονικό βήμα στοιχεία για την περιεκτικότητα CO, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, για τη θερμοκρασία και την ορατότητα και όλα αυτά ανά αισθητήρα.

Στη συνέχεια και με σκοπό τόσο να επεξεργαστούμε τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων όσο και να εξετάσουμε την αντοχή ή όχι του αγήματος στις διάφορες εντάσεις πυρκαγιάς χρησιμοποιήθηκε το μαθηματικό υπολογιστικό πακέτο Mathematica.



Εικόνα 19 Απεικόνιση καμπυλών HRR όλων των σεναρίων πυρκαγιάς που εξετάστηκαν.

## Κεφάλαιο 6 – Επιβίωση Αγήματος

### 6.1 Επεξεργασία αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4, επεξεργάστηκαν με χρήση του μαθηματικού πακέτου Mathematica. Το Mathematica, είναι ένα συμβολικό μαθηματικό υπολογιστικό πακέτο το οποίο χρησιμοποιείται σε πλήθος επιστημονικών εφαρμογών. Στηρίζεται πάνω στις γλώσσες προγραμματισμού C, C++, Java αλλά κυρίως στην Wolfram, η οποία πήρε το όνομά της από τον ίδιο της το δημιουργό, τον Stephen Wolfram το 1986. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, το Mathematica χρησιμοποιήθηκε για αυτοματοποίηση εξαγωγής αποτελεσμάτων με βάσει αρχεία excel που προέκυψαν από τον κώδικα FDS. Το σύνολο των διαγραμμάτων που απεικονίζονται στη συνέχεια (με εξαίρεση τις καμπύλες HRR), είναι αποτέλεσμα κώδικα γραμμένου σε γλώσσα Mathematica, ο οποίος αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας.

Συγκεκριμένα, το δεύτερο αρχείο excel που προκύπτει από την εκάστοτε προσομοίωση FDS και παρέχει για κάθε αισθητήρα τις τιμές περιεκτικότητας σε CO, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, τη θερμοκρασία και την ορατότητα, χρησιμοποιείται ως αρχείο εισόδου στο Mathematica με σκοπό να υπολογιστούν οι τιμές των εξεταζόμενων κριτηρίων επιβίωσης του αγήματος, βάσει των κάτωθι εξισώσεων (Niotis&Spyrou, 2010):

$$\begin{aligned} & \text{➤ } FED\ CO = \sum_1^n 4.607 * (10^{-7}) * ((C_{CO} * (10^6))^{\wedge}(1.036)) * \Delta t \\ & \text{➤ } FEDO2 = \sum_1^n \frac{\Delta t}{60 \exp[8.13 - 0.54(20.1 - C_{O2})]} \\ & \text{➤ } HVCO2 = \frac{\exp[0.1930 C_{CO2} + 2.0004]}{7.1} \\ & \text{➤ } FEC\ SMOKE = \frac{OD}{m}, \text{ όπου } OD = \frac{3}{2.3 * S} \\ & \text{➤ } FED\ IN = (FED\ CO * HVCO2) + FEDO2 \end{aligned}$$

Όπου:

- FEDCO, είναι ο συντελεστής κλασματικής δραστικής δόσης μονοξειδίου του άνθρακα (fractional effective dose).
- FEDO2, είναι ο συντελεστής κλασματικής δραστικής δόσης οξυγόνου.
- FEDIN, είναι η συνολική κλασματική δραστική δόση που λαμβάνει ο άνθρωπος.
- HVCO2, είναι η αύξηση συγκέντρωσης τοξικών αερίων λόγω υπεραερισμού (hyperventilation factor).
- FECSMOKE, είναι ο συντελεστής κλασματικής δραστικής συγκέντρωσης καπνού (fractional effective concentration).
- OD, είναι η οπτική πυκνότητα (optical density).
- S, είναι η ορατότητα σε m.
- m, είναι ο συντελεστής κριτηρίου ορατότητας και ισούται με 0.39, 0.33, 0.29, 0.25 για κριτήριο ορατότητας τα 2.5, 3, 3.5 και 4m αντίστοιχα.
- C<sub>co</sub>, είναι η συγκέντρωση μονοξειδίου του άνθρακα.
- C<sub>co2</sub>, είναι η συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα.
- C<sub>o2</sub>, είναι η συγκέντρωση οξυγόνου.

Οι συντελεστές FED IN, FED O2 και FED CO είναι αθροιστικοί και ξεκινούν από την εκκίνηση του αγήματος. Η θερμοκρασία (TEMP) και ο συντελεστής FEC SMOKE είναι στιγμιαίοι. Οι τιμές των εν λόγω συντελεστών συγκρίνονται με τις αποδεκτές οριακές τιμές που παρουσιάζονται στον Πίνακα 15.

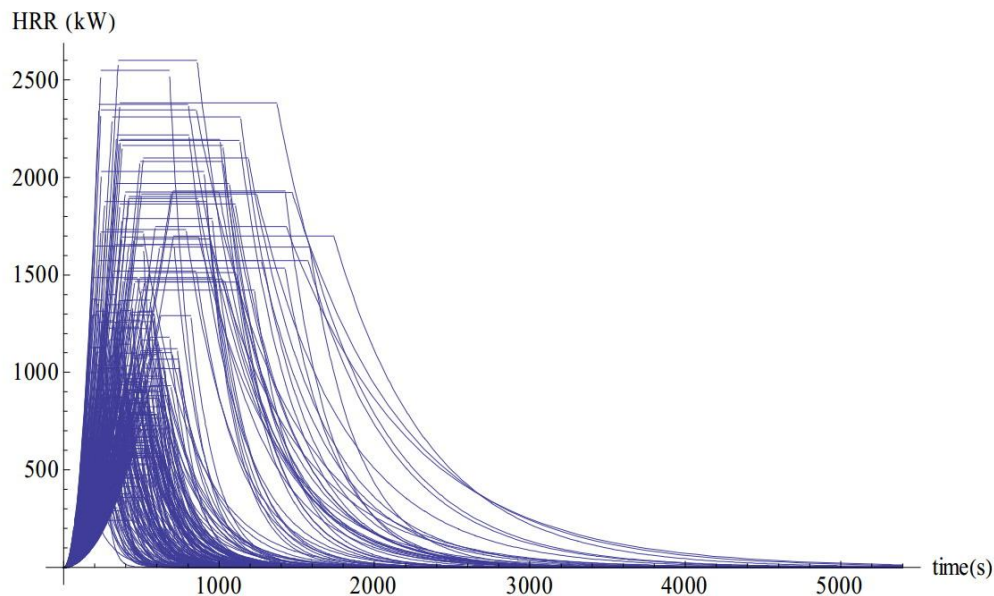
Πίνακας 15 Αποδεκτές οριακές τιμές συντελεστών επιβίωσης (Πηγή: Spyrou et al 2013).

A/A	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ	ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ	ΟΡΙΑ
1	FEDIN	Απεικονίζει τη συνολική ποσότητα βλαβερών ουσιών που εισπνέει το άτομο.	1) $0.3 < \text{FED IN} < 0.7$ : Ελαφρύς τραυματισμός 2) $0.7 < \text{FED IN} < 1$ : Βαρύς τραυματισμός 3) $\text{FED IN} > 1$ : Θάνατος
2	TEMPERATURE	Η θερμοκρασία που έχει το συγκεκριμένο σημείο κάθε χρονική στιγμή.	$\text{TEMP}_{\text{crit}} = 60^\circ\text{C}$
3	FEC SMOKE	Συντελεστής ορατότητας.	$\text{FEC SMOKE}_{\text{crit}} < 1$

Είναι σημαντικό στο σημείο αυτό να αναφερθεί η γενική λογική πίσω από τη δημιουργία του κώδικα σε περιβάλλον Mathematica. Στον Πίνακα 16 φαίνεται ένα απόσπασμα από τα αρχεία excel που παρουσιάζουν τα αποτελέσματα του προσομοιωτή FDS. Η πρώτη στήλη του πίνακα περιλαμβάνει τις χρονικές στιγμές δειγματοληψίας. Η πρώτη γραμμή του πίνακα περιλαμβάνει τις μονάδες μέτρησης των μεγεθών. Η δεύτερη γραμμή, (με εξαίρεση το κελί {2,1}) περιλαμβάνει σε κάθε κελί της την ονομασία του αισθητήρα και το μετρούμενο μέγεθος. Όπως φαίνεται, τα στοιχεία ομαδοποιούνται κατά πεντάδες. Για παράδειγμα οι στήλες από 2 έως και 6 περιλαμβάνουν όλα τα μετρούμενα μεγέθη που αφορούν στον αισθητήρα M1. Έχοντας ως δεδομένο ότι η ταχύτητα του αγήματος είναι  $1.2 \text{ m/s}$ , οι αισθητήρες απέχουν μεταξύ τους απόσταση  $2.4 \text{ m}$  και ότι το χρονικό βήμα είναι  $0.7 \text{ s}$ , μπορεί με ασφάλεια να ειπωθεί ότι 3 διαδοχικές χρονικές στιγμές αποτελούν μία θέση για το άγημα. Για τον λόγο αυτόν, η επιλογή των δεδομένων στο excel είναι με μορφή διαγωνίου. Για παράδειγμα, για χρόνο από 0 έως και  $1.41 \text{ s}$ , το άγημα βρίσκεται στον αισθητήρα M1 οπότε και επηρεάζεται από τα μετρούμενα μεγέθη του. Για χρόνο από  $2.1 \text{ s}$  έως και  $3.51 \text{ s}$ , βρίσκεται στον αισθητήρα M2 οπότε αντίστοιχα επηρεάζεται από τα μετρούμενα μεγέθη αυτού. Ο τελευταίος αισθητήρας είναι ο M26, ο οποίος βρίσκεται ουσιαστικά μέσα στο χώρο. Επομένως, για χρόνο  $50 \text{ s}$  από την έναρξη της προσομοίωσης (όσος είναι δηλαδή ο χρόνος που θέλει το άγημα με αυτή την ταχύτητα να φτάσει από τη θέση 1 στον χώρο της πυρκαγιάς) και έπειτα, το άγημα επηρεάζεται μόνο από τα μετρούμενα μεγέθη αυτού. Με κατάλληλη τροποποίηση στο αρχείο excel, πραγματοποιήθηκε εισαγωγή των δεδομένων στο Mathematica και με κατάλληλη επεξεργασία με χρήση πινάκων και δεικτών προκύπτουν τα τελικά διαγράμματα. Να σημειωθεί τέλος ότι, αυτή η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε αντί του κώδικα EVAC διότι το συγκεκριμένο πρόγραμμα προσομοιάζει ΜΟΝΟ την απομάκρυνση των ανθρώπων από την πυρκαγιά και όχι την κατεύθυνσή τους προς αυτή για να πραγματοποιηθεί κατάσβεση.

Πίνακας 16 Απόσπασμα αρχείου excel του προσομοιωτή FDS.

s	mol/mol	mol/mol	mol/mol	C	m	mol/mol	mol/mol	mol/mol	C	m
Time	M1-CO	M1-CO2	M1-O2	M1-T	M1-V	M2-CO	M2-CO2	M2-O2	M2-T	M2-V
0.00	0.00	0.00	0.21	20.00	30.00	0.00	0.00	0.21	20.00	30.00
0.71	0.00	0.00	0.21	20.00	30.00	0.00	0.00	0.21	20.00	30.00
1.41	0.00	0.00	0.21	20.01	30.00	0.00	0.00	0.21	20.01	30.00
2.10	0.00	0.00	0.21	20.10	30.00	0.00	0.00	0.21	20.10	30.00
2.81	0.00	0.00	0.21	20.23	30.00	0.00	0.00	0.21	20.23	30.00
3.51	0.00	0.00	0.21	20.35	30.00	0.00	0.00	0.21	20.35	30.00
4.20	0.00	0.00	0.21	20.49	30.00	0.00	0.00	0.21	20.49	30.00
4.90	0.00	0.00	0.21	20.62	30.00	0.00	0.00	0.21	20.62	30.00

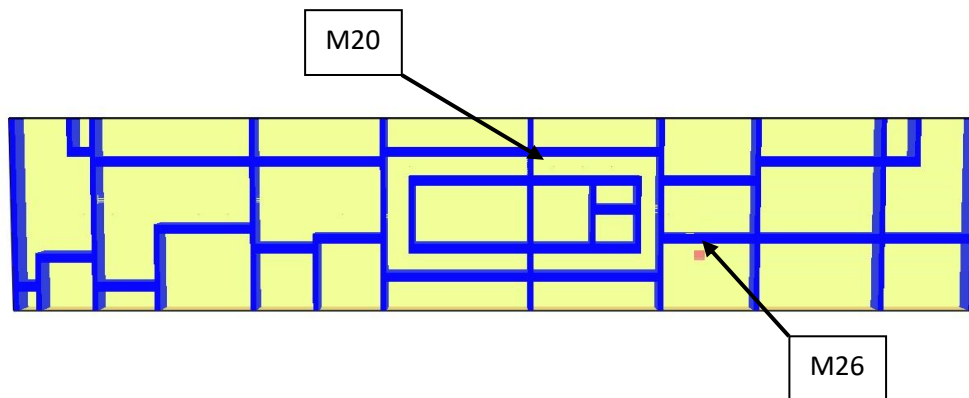


Εικόνα 20 Διαγράμματα που απεικονίζουν μια πλειάδα καμπυλών HRRσε συνάρτηση με το χρόνο. Από αυτό το διάγραμμα, γίνεται και η επιλογή των εντάσεων πυρκαγιάς που εξετάζονται ( Πηγή: Spyrou et Themelis, 2012.)

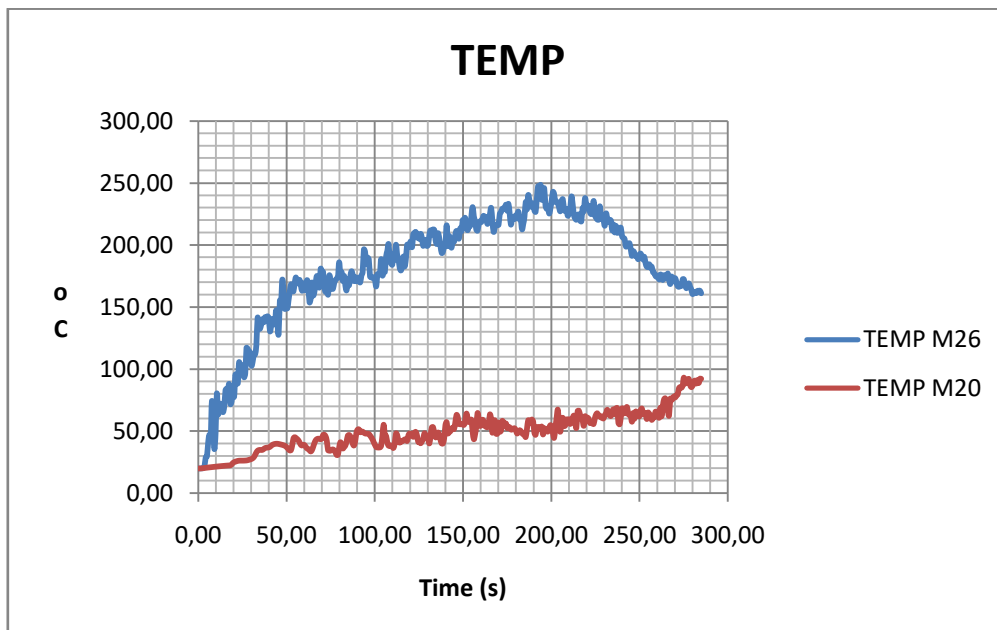
## 6.2 Επιβίωση αγήματος στα υπό μελέτη σενάρια

Στις εικόνες 22 μέχρι και 26, παρουσιάζονται συγκριτικά διαγράμματα της θερμοκρασίας, της ορατότητας και των συγκεντρώσεων CO, CO<sub>2</sub> και O<sub>2</sub> σε συνάρτηση με το χρόνο μεταξύ των αισθητήρων M26 και M20 (Εικόνα 22) για το σενάριο RAMP750 καθαρά για εποπτικούς λόγους. Επόμενο είναι, όσο πιο κοντά βρισκόμαστε στην πυρκαγιά, οι περιεκτικότητες σε CO, CO<sub>2</sub> να αυξάνονται πιο γρήγορα και η περιεκτικότητα του οξυγόνου να μειώνεται πιο γρήγορα. Ακόμα, η ορατότητα κοντά στην πυρκαγιά μειώνεται πιο γρήγορα και η θερμοκρασία αυξάνεται γρηγορότερα, όπως άλλωστε ήταν αναμενόμενο.

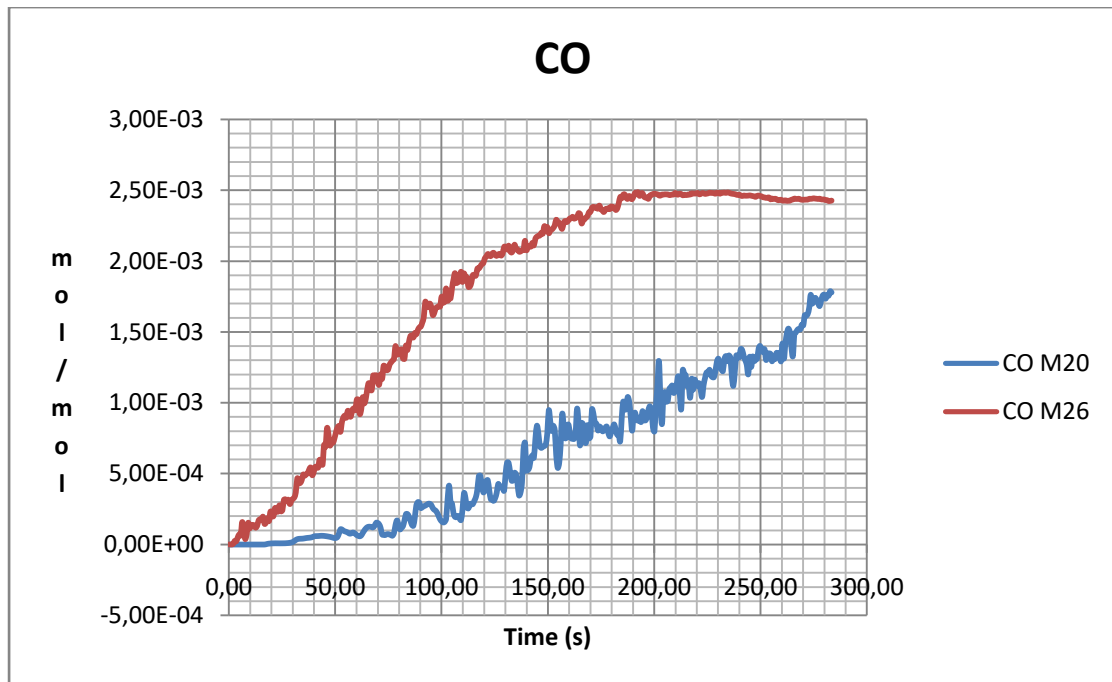




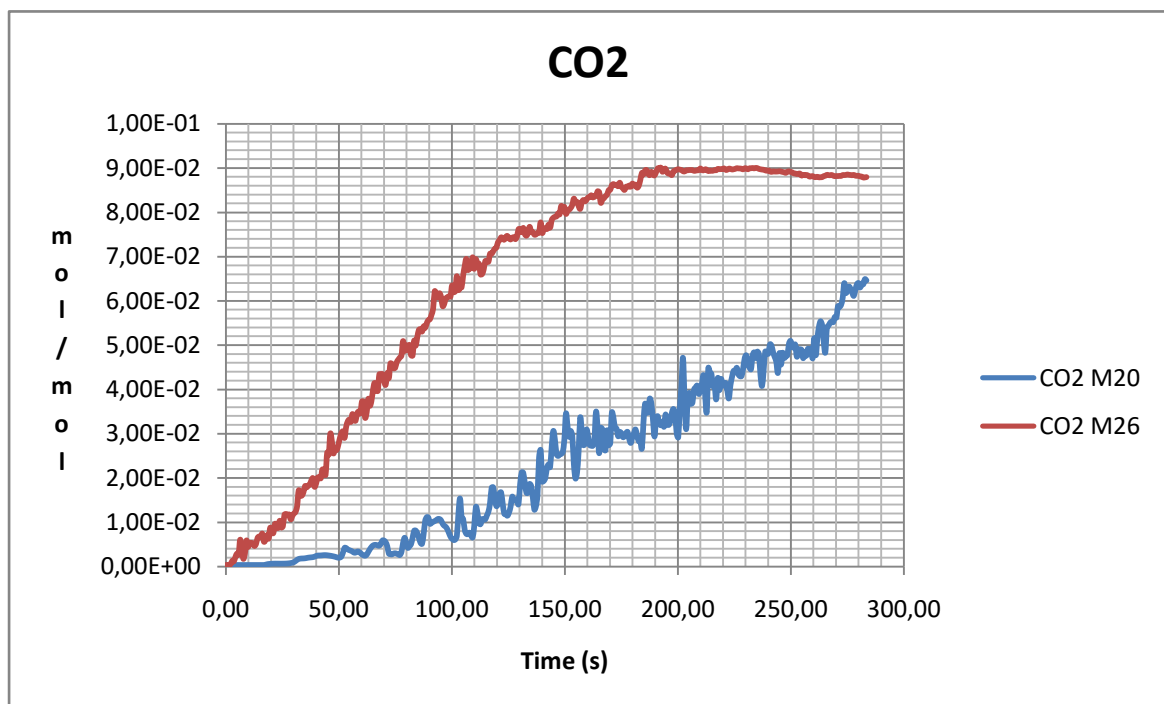
Εικόνα 20 Θέση αισθητήρων M26, M20.



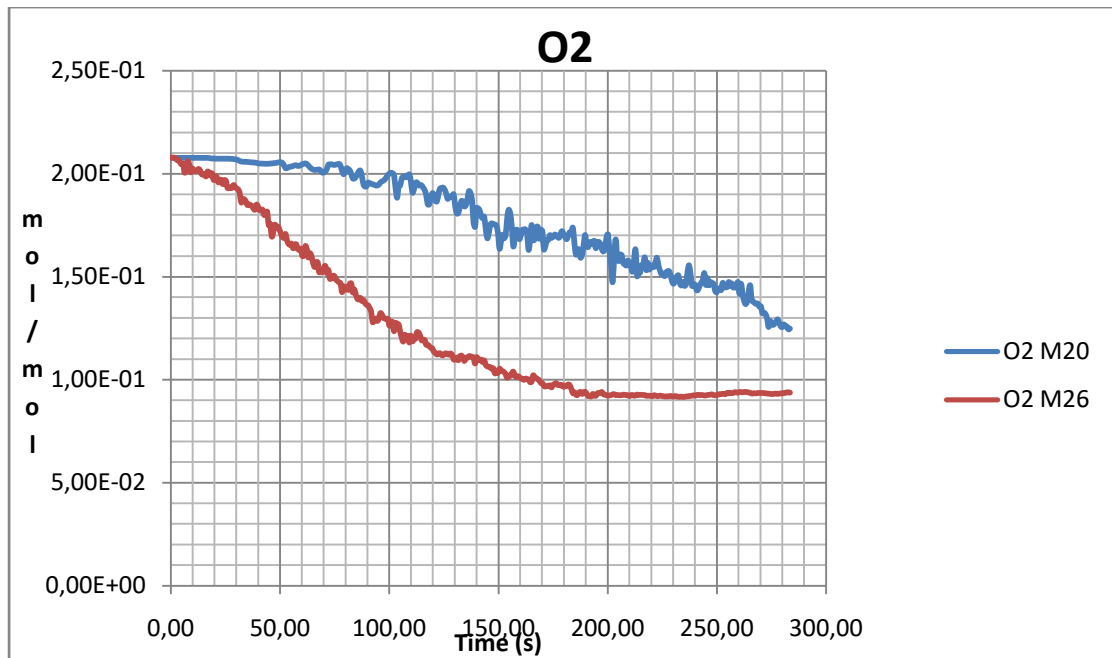
Εικόνα 21 Συγκριτικό διάγραμμα εξέλιξης της θερμοκρασίας μεταξύ των αισθητήρων M26 και M20 για το σενάριο RAMP 750.



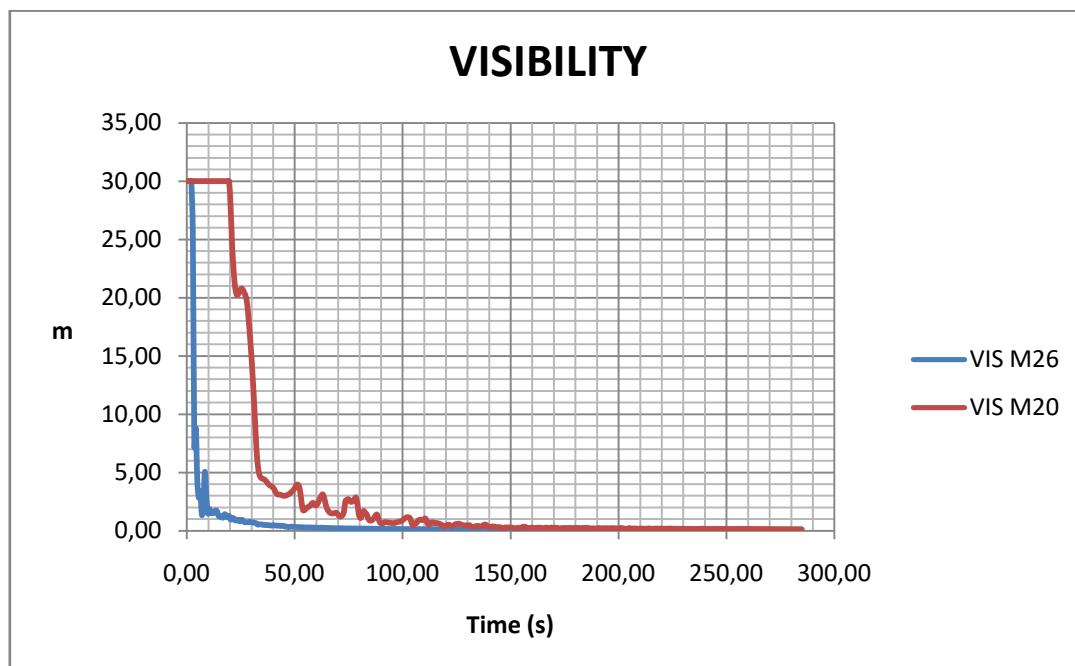
Εικόνα 22 Συγκριτικό διάγραμμα εξέλιξης του μοριακού κλάσματος του CO μεταξύ των αισθητήρων M26 και M20 για το σενάριο RAMP 750.



Εικόνα 23 Συγκριτικό διάγραμμα εξέλιξης της περιεκτικότητας σε CO<sub>2</sub> μεταξύ των αισθητήρων M26 και M20 για το σενάριο RAMP750.



Εικόνα 24 Συγκριτικό διάγραμμα εξέλιξης του μοριακού κλάσματος O2 μεταξύ των αισθητήρων M26 και M20 για το σενάριο RAMP 750 .



Εικόνα 25 Συγκριτικό διάγραμμα εξέλιξης της ορατότητας μεταξύ των αισθητήρων M26 και M20 για το σενάριο RAMP 750.

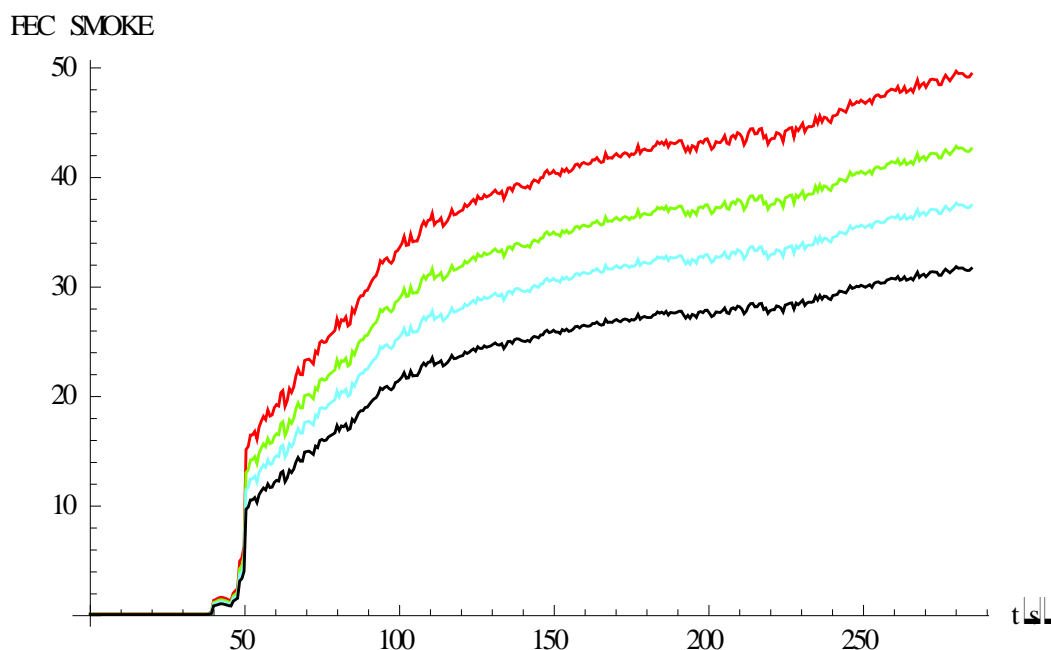
## 6.2.1 RAMP 700 με μέγιστη ένταση 1846 KW

### 6.2.1.1 Χρόνος εκκίνησης 0 sec

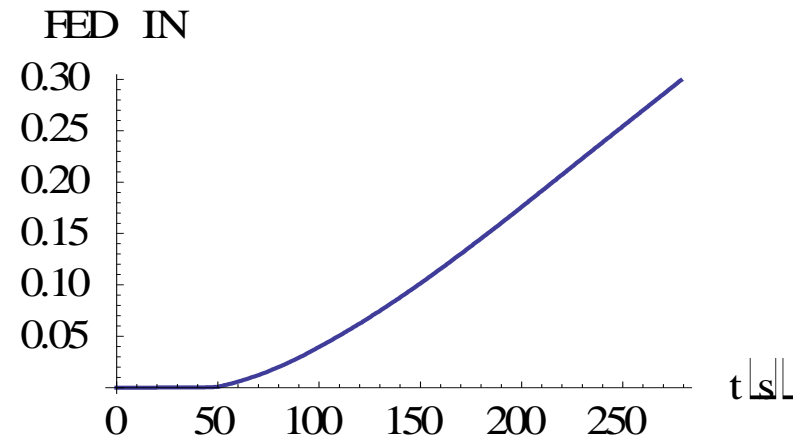
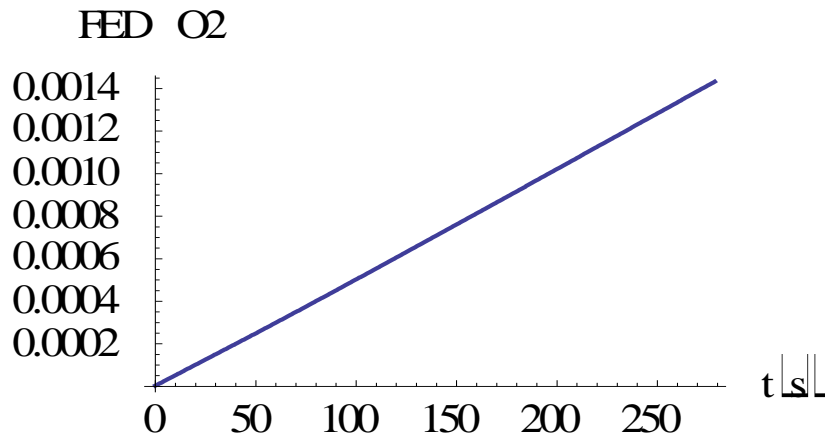
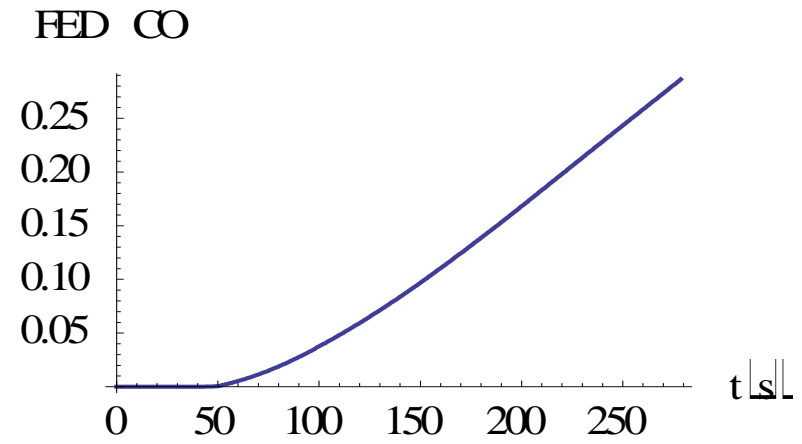
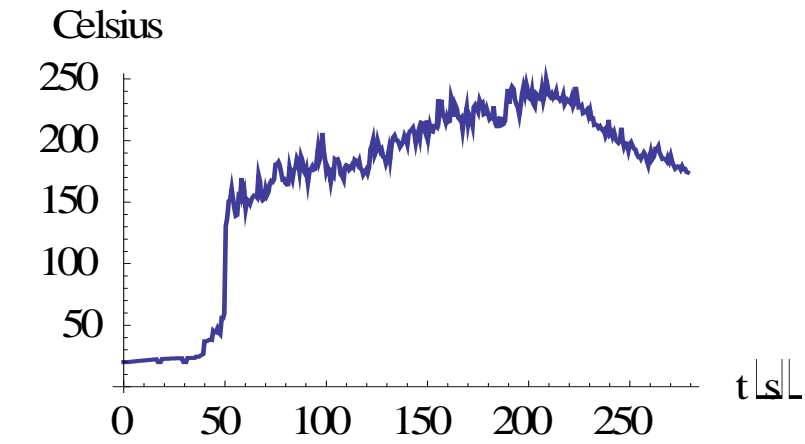
Η περίπτωση αντίδρασης του αγήματος σε μηδενικό χρόνο από την εκδήλωση του συμβάντος είναι ιδεατή, καθόσον είναι λογική η ύπαρξη μίας καθυστέρησης τουλάχιστον 5-10sec μεταξύ ενεργοποίησης του συστήματος πυρανίχνευσης και ανακοίνωσης του

συμβάντος από το μεγαφωνικό σύστημα του πλοίου. Χρησιμοποιείται ωστόσο για εποπτικούς σκοπούς. Γίνεται αντιληπτό από τα διαγράμματα που παρουσιάζονται ότι με την πάροδο του χρόνου τόσο η θερμοκρασία όσο και οι συντελεστές FECSMOKE και FEDIN παρουσιάζουν ανοδική τάση. Πιο αναλυτικά, η θερμοκρασία ξεπερνά τα επιτρεπτά όρια για χρόνο  $t=50.4s$  από το χρόνο έναρξης του συμβάντος ενώ ο FECSMOKE (για το αυστηρότερο κριτήριο ορατότητας που είναι τα 4 m) για χρόνο  $t=39.9s$ . Ο συντελεστής FEDIN, αν και παρουσιάζει ανοδική τάση, δεν ξεπερνά την οριακή τιμή για την πρόκληση ελαφρού τραυματισμού για τη χρονική διάρκεια της προσομοίωσης.

Επίσης, από το συγκριτικό διάγραμμα των συντελεστών FECSMOKE όλων των κριτηρίων ορατότητας για χρόνο εκκίνησης  $t=0s$ , γίνεται αντιληπτό ότι όσο πιο αυστηρό γίνεται το κριτήριο ορατότητας τόσο μεγαλύτερες είναι οι τιμές που λαμβάνει ο συντελεστής FECSMOKE.



Εικόνα 26 Συγκριτικό διάγραμμα FECSMOKE του σεναρίου RAMP 700 και των τεσσάρων κριτηρίων ορατότητας για χρόνο εκκίνησης 0s. Κόκκινο χρώμα = 4m, Πράσινο χρώμα = 3.5 m, Θαλασσί χρώμα= 3m, Μαύρο χρώμα = 2.5 m

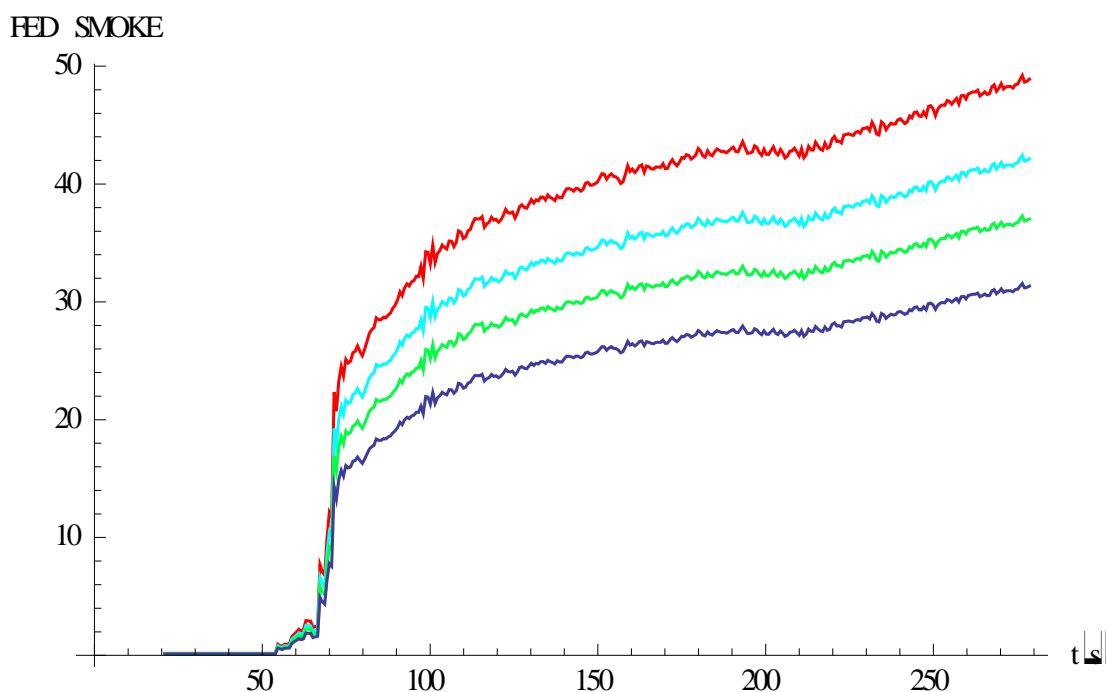


Εικόνα 27 Διαγράμματα TEMP, FEDCO, FEDO2, FEDIN του σεναρίου RAMP 700 για χρόνο εκκίνησης 0 s.

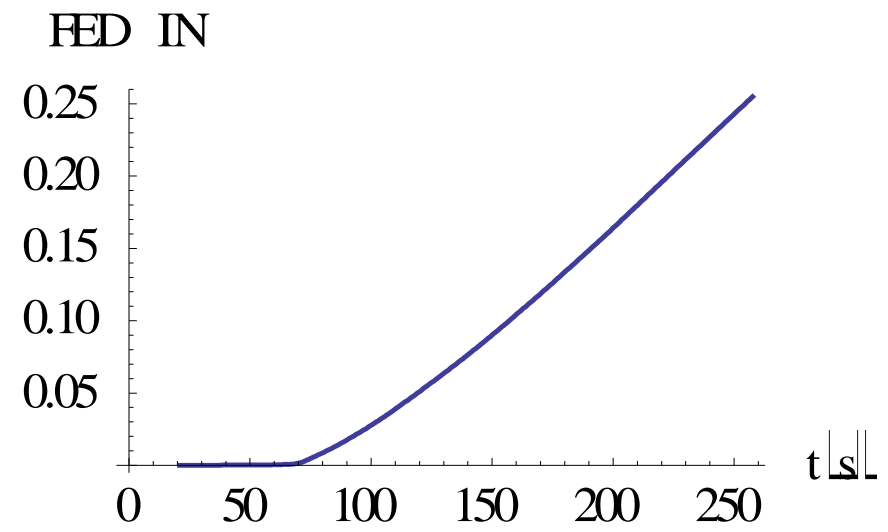
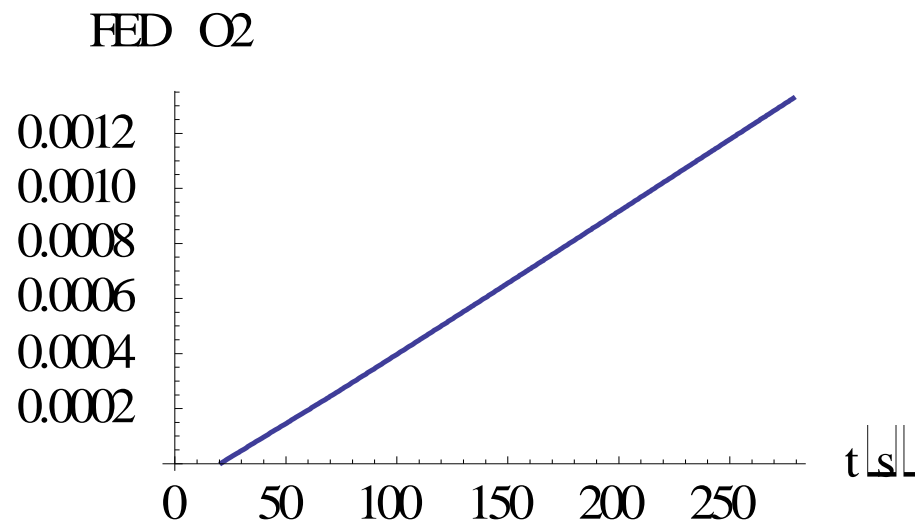
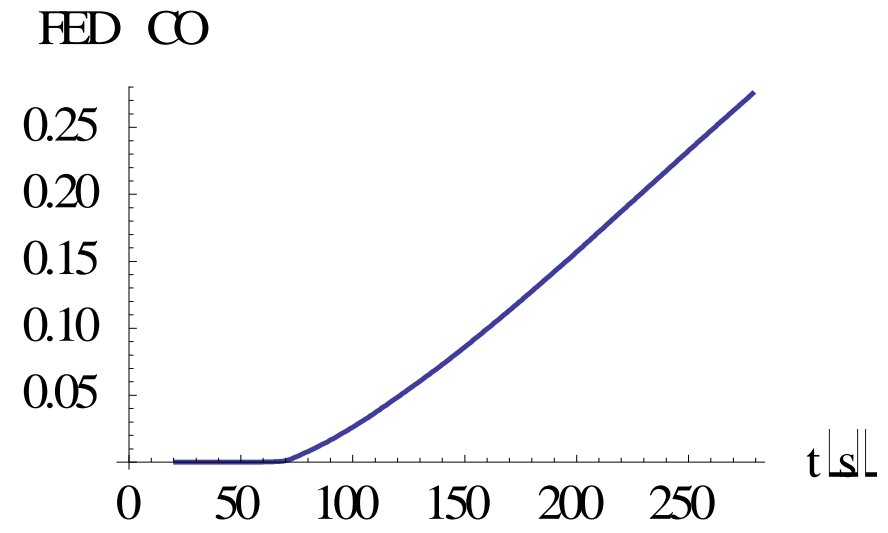
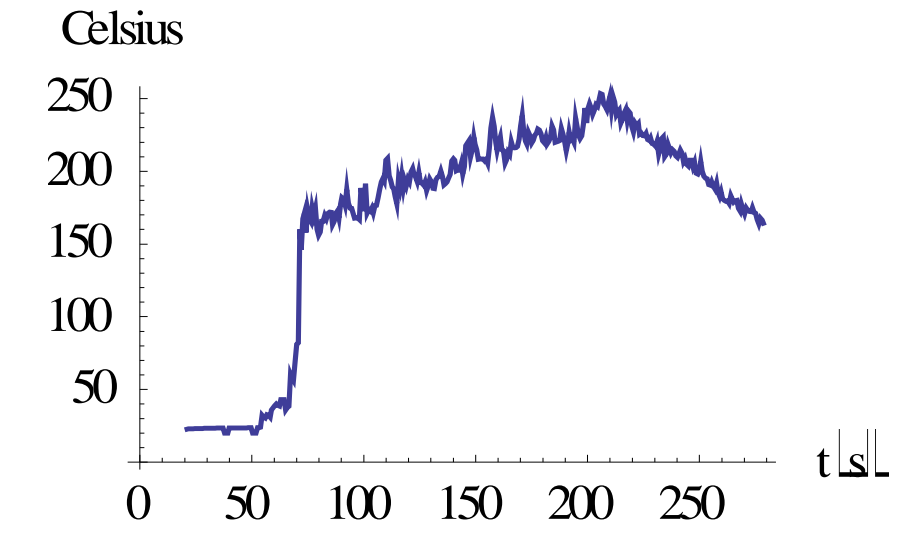
### 6.2.1.2 Χρόνος εκκίνησης 21 sec

Η περίπτωση αντίδρασης του αγήματος σε χρόνο 21 sec είναι φυσιολογική, δεδομένου του χρόνου που απαιτείται για την ενεργοποίηση του συστήματος πυρανίχνευσης, την ανακοίνωση από το μεγαφωνικό σύστημα και την παραλαβή των πυροσβεστήρων από τα άτομα του αγήματος. Γίνεται αντιληπτό από τα διαγράμματα ότι, με την πάροδο του χρόνου τόσο η θερμοκρασία όσο και οι συντελεστές FECSMOKE και FEDIN παρουσιάζουν ανοδική τάση και μάλιστα, αυτή τη φορά η πορεία του αγήματος αποκόπτεται συντομότερα. Πιο αναλυτικά, η θερμοκρασία ξεπερνά τα επιτρεπτά όρια για χρόνο  $t=48.3s$  από το χρόνο κινητοποίησης του αγήματος ενώ ο FECSMOKE (για το αυστηρότερο κριτήριο ορατότητας) για χρόνο  $t=16.1s$ . Ο συντελεστής FEDIN, αν και παρουσιάζει ανοδική τάση, δεν ξεπερνά και εδώ την οριακή τιμή για τη χρονική διάρκεια της προσομοίωσης.

Στην Εικόνα 30, φαίνεται το συγκριτικό διάγραμμα των συντελεστών FECSMOKE όλων των κριτηρίων ορατότητας για χρόνο εκκίνησης  $t=21s$ . Από το διάγραμμα, γίνεται αντιληπτό ότι όσο πιο αυστηρό γίνεται το κριτήριο ορατότητας τόσο μεγαλύτερες είναι οι τιμές που λαμβάνει ο συντελεστής FECSMOKE.



Εικόνα 28 Συγκριτικό διάγραμμα FECSMOKE όλων των κριτηρίων ορατότητας του σεναρίου RAMP 700 για χρόνο εκκίνησης 21 s. Κόκκινο= 4m, Θαλασσί= 3.5m, Πράσινο= 3m, Μπλε= 2.5m

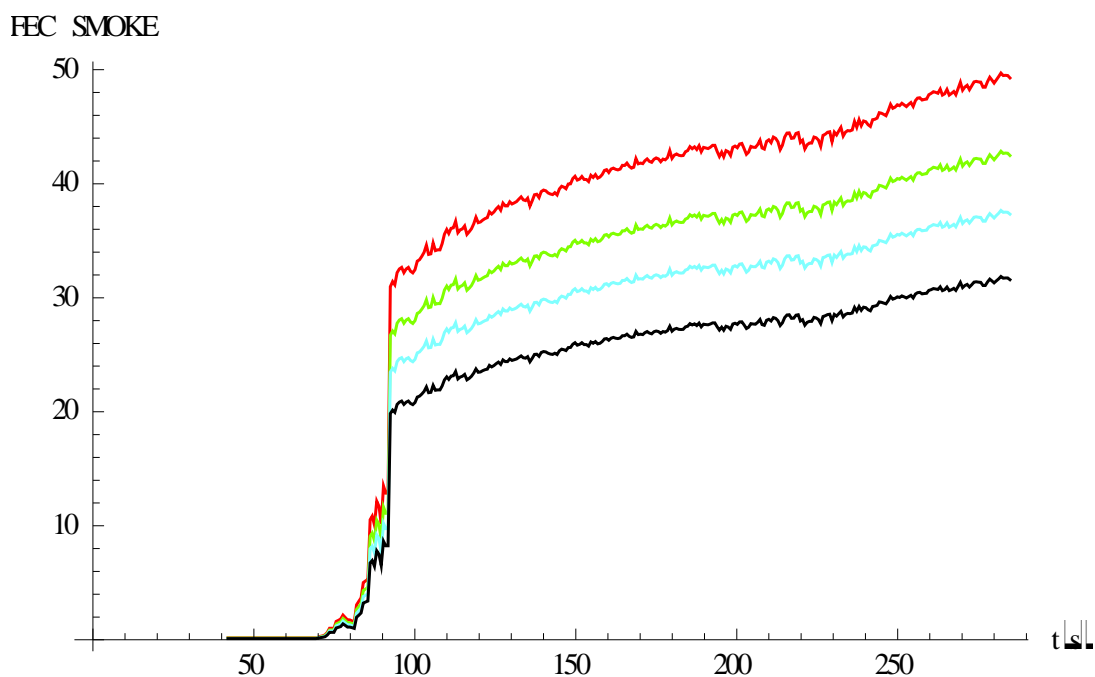


Εικόνα 29 Διαγράμματα TEMP, FEDCO, FEDO2, FEDIN του σεναρίου RAMP 700 για χρόνο εκκίνησης 21s.

### 6.2.1.3 Χρόνος Εκκίνησης 42 sec

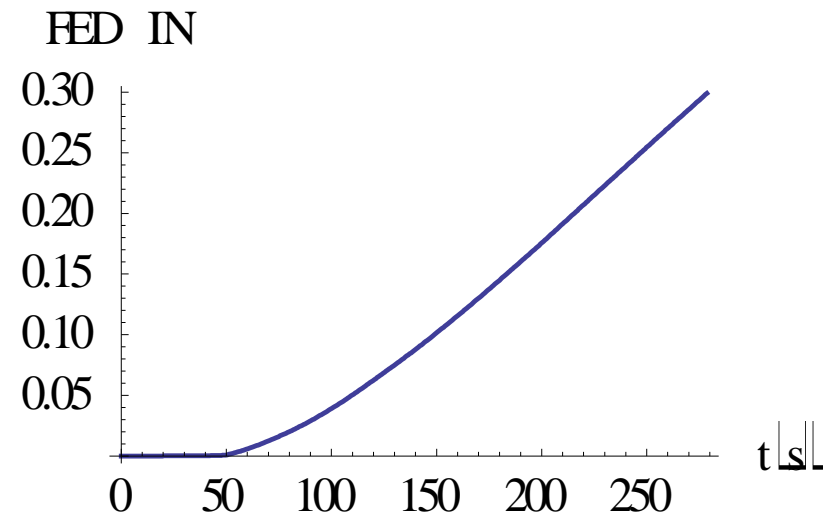
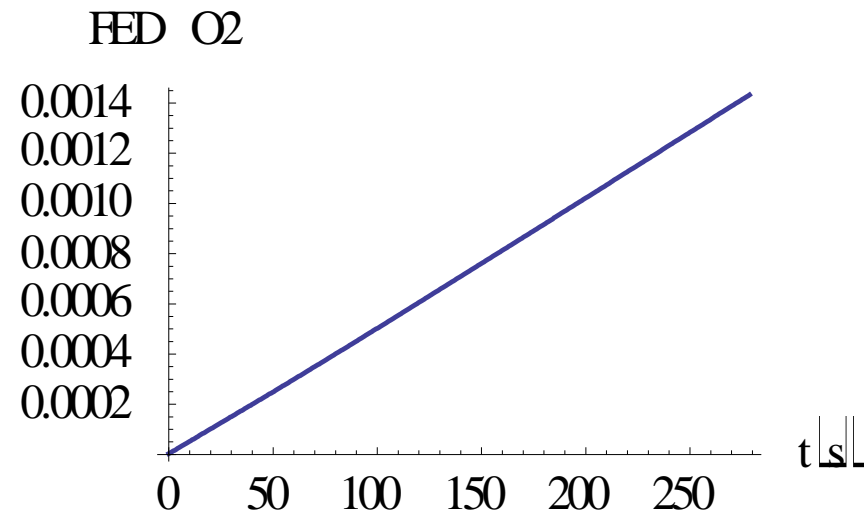
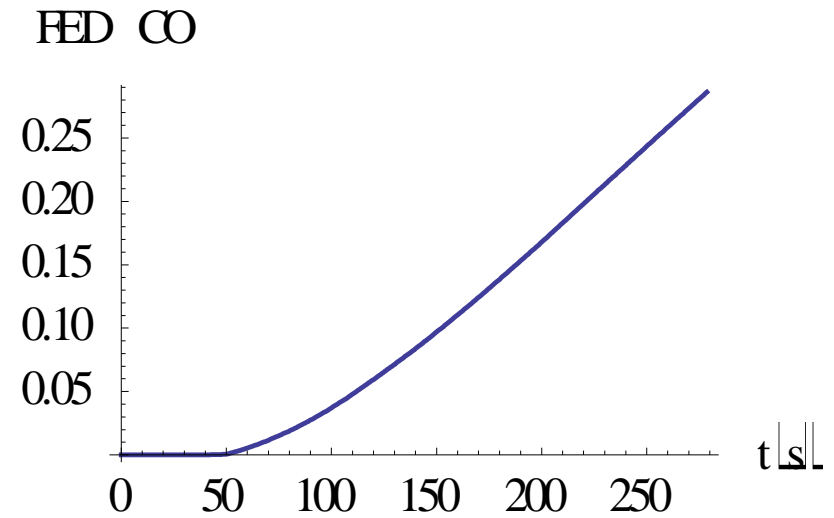
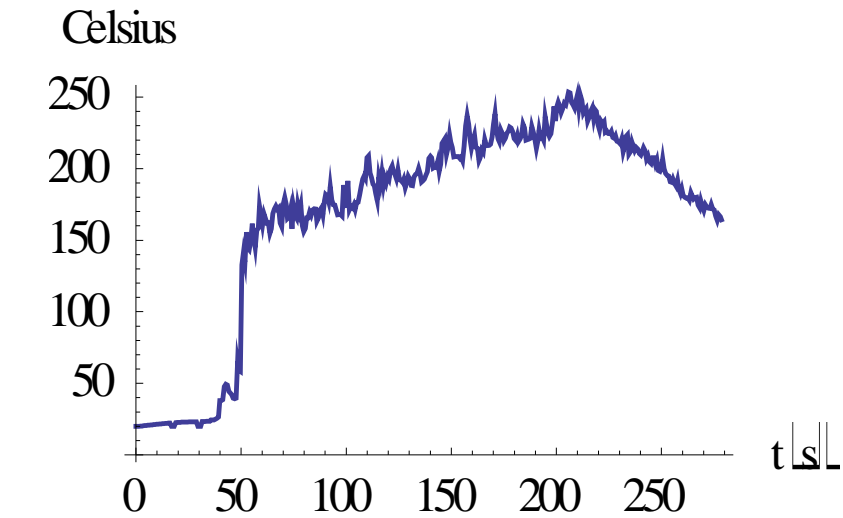
Ο χρόνος εκκίνησης 42 sec αφορά καθυστερημένη αντίδραση του αγήματος. Και εδώ, γίνεται αντιληπτό από τα διαγράμματα ότι, με την πάροδο του χρόνου τόσο η θερμοκρασία όσο και οι συντελεστές FECSMOKE και FEDIN παρουσιάζουν ανοδική τάση και μάλιστα, αναφορικά με το FECSMOKE, το άγημα δεν προλαβαίνει καν να ξεκινήσει την πορεία του. Πιο αναλυτικά, η θερμοκρασία ξεπερνά τα επιτρεπτά όρια για χρόνο  $t=36.9s$  από το χρόνο κινητοποίησης του αγήματος ενώ ο FEDSMOKE (για το αυστηρότερο κριτήριο ορατότητας) για χρόνο  $t=0s$ . Ο συντελεστής FEDIN, αν και παρουσιάζει ανοδική τάση, δεν ξεπερνά και εδώ την οριακή τιμή για τη χρονική διάρκεια της προσομοίωσης.

Στην Εικόνα 32, φαίνεται το συγκριτικό διάγραμμα των συντελεστών FECSMOKE όλων των κριτηρίων ορατότητας για χρόνο εκκίνησης  $t=42s$ . Από το διάγραμμα, γίνεται αντιληπτό ότι όσο πιο αυστηρό γίνεται το κριτήριο ορατότητας τόσο μεγαλύτερες είναι οι τιμές που λαμβάνει ο συντελεστής FECSMOKE.



Εικόνα 30 Συγκριτικό διάγραμμα όλων των κριτηρίων ορατότητας του σεναρίου RAMP 700 για χρόνο εκκίνησης 42 s.





Εικόνα 31 Διαγράμματα TEMP, FEDCO, FEDO2, FEDIN του σεναρίου RAMP 700 για χρόνο εκκίνησης 42 s.

Πίνακας 17 Συγκεντρωτικός πίνακας οριακών τιμών για το σενάριο RAMP700.

Τ <sub>εκκίνησης</sub> (s)	Συντελεστής	Κρίσιμη τιμή	Χρόνος που αντέχει το άγλημα από τη στιγμή εκκίνησης(s)
0	Θερμοκρασία (°C)	60	<b>50.4</b>
	FEC SMOKE	4 m: 1	<b>39.9</b>
		3.5 m: 1	<b>39.9</b>
		3 m: 1	<b>39.9</b>
		2.5 m: 1	<b>44.1</b>
FED IN	0.3	-	
21	Θερμοκρασία (°C)	60	<b>48.3</b>
	FEC SMOKE	4 m: 1	<b>16.1</b>
		3.5 m: 1	<b>16.8</b>
		3 m: 1	<b>17.2</b>
		2.5 m: 1	<b>17.9</b>
FED IN	0.3	-	
42	Θερμοκρασία (°C)	60	<b>46.9</b>
	FEC SMOKE	4 m: 1	<b>0</b>
		3.5 m: 1	<b>0</b>
		3 m: 1	<b>0</b>
		2.5 m: 1	<b>0</b>
FED IN	0.3	-	

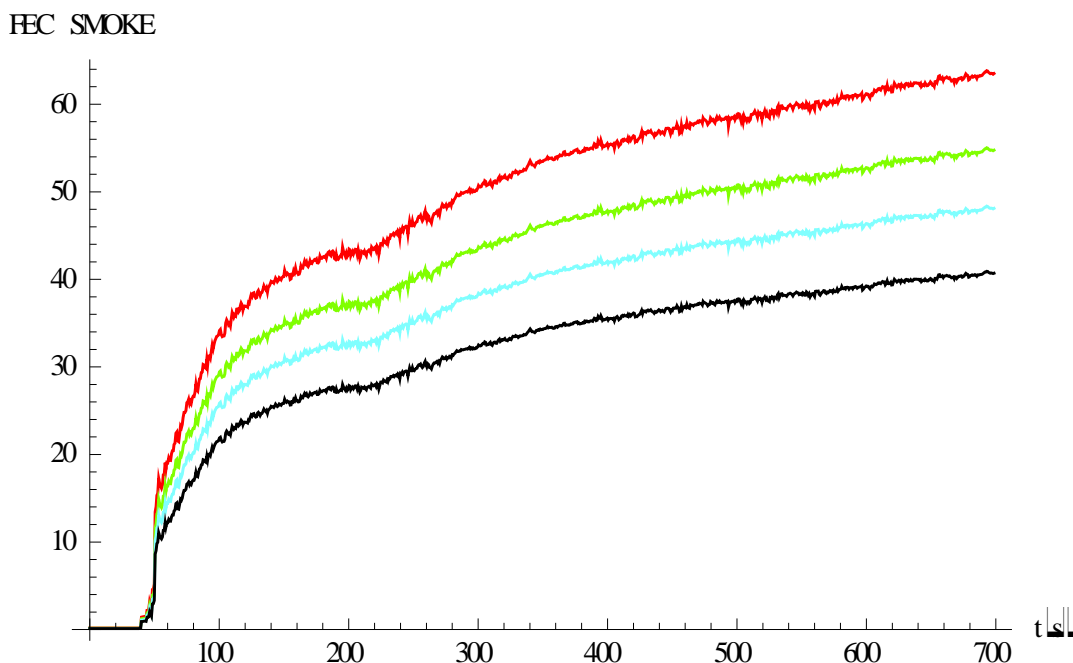
### 6.2.2 RAMP 750 με μέγιστη ένταση 1846 KW

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η προσομοίωση έτρεξε για χρόνο 750 sec με μοναδικό σκοπό να εντοπιστεί ο χρόνος στον οποίο το άγημα θα δεχτεί τελικά κάποια επίδραση από τον συντελεστή FEDIN.

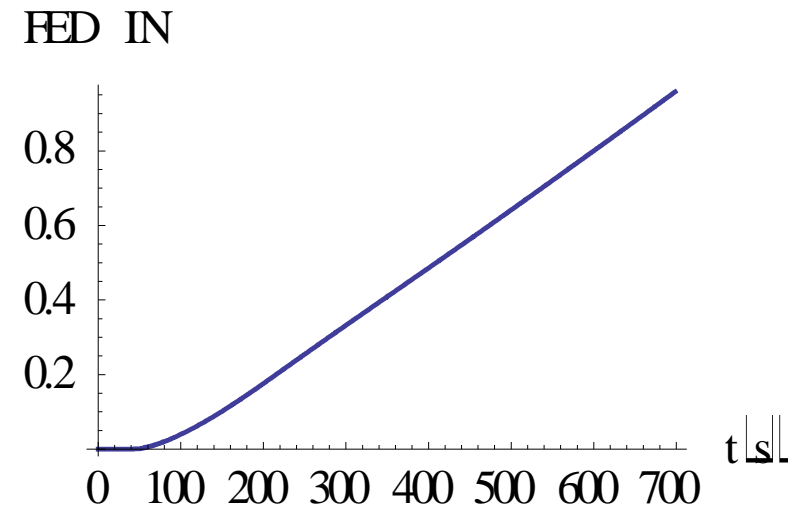
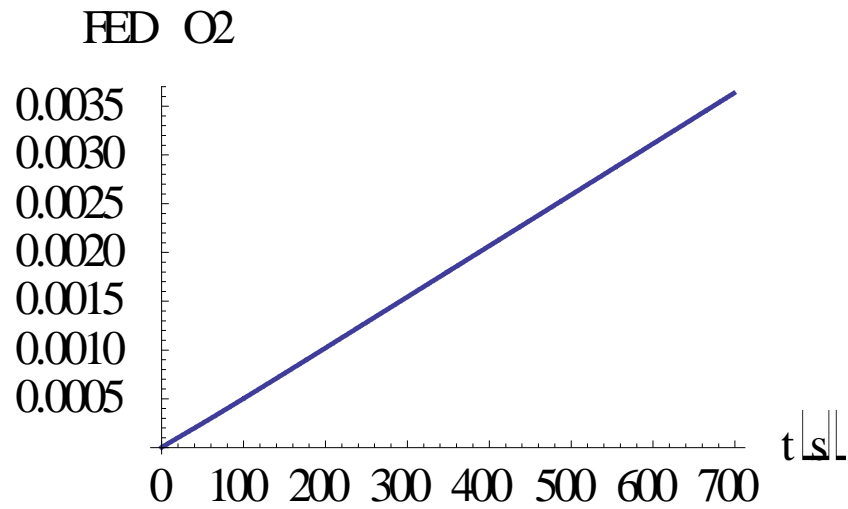
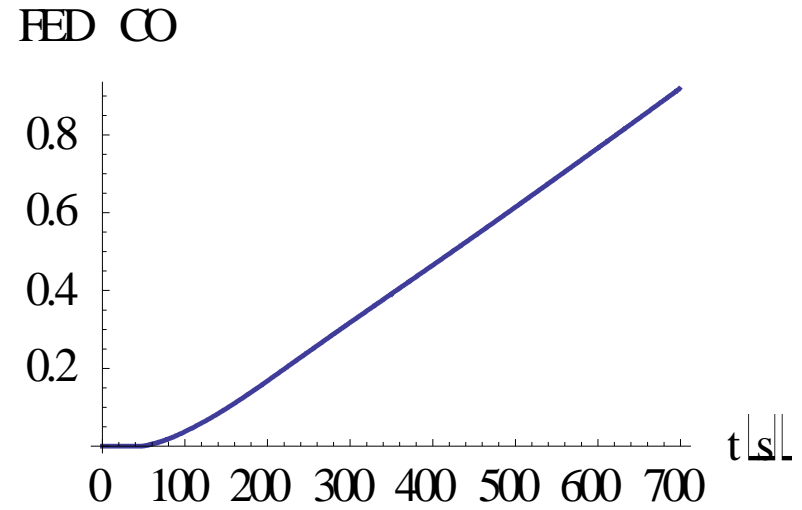
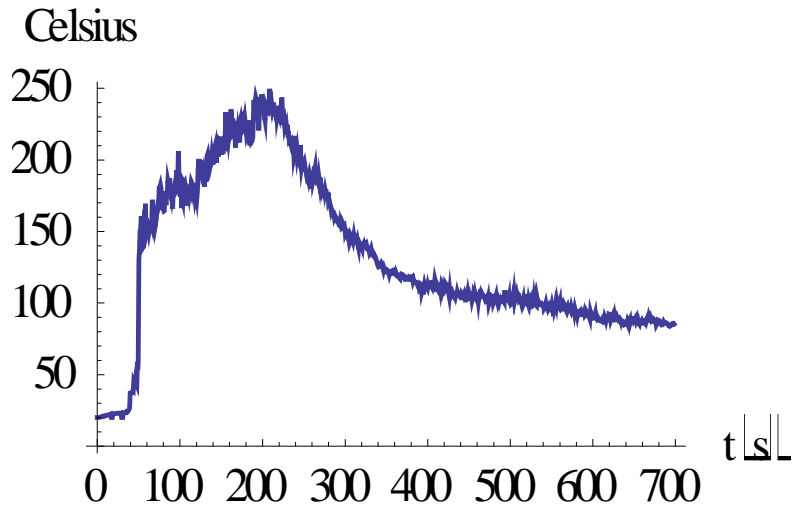
#### 6.2.2.1 Χρόνος εκκίνησης 0s

Η περίπτωση αντίδρασης του αγήματος σε μηδενικό χρόνο από την εκδήλωση του συμβάντος είναι ιδεατή, καθόσον είναι λογική η ύπαρξη μιας καθυστέρησης τουλάχιστον 5 sec μεταξύνεργοποίησης του συστήματος πυρανίχνευσης και ανακοίνωσης του συμβάντος από το μεγαφωνικό σύστημα του πλοίου. Χρησιμοποιείται ωστόσο για εποπτικούς σκοπούς. Γίνεται αντιληπτό από τα διαγράμματα ότι, με την πάροδο του χρόνου τόσο η θερμοκρασία όσο και οι συντελεστές FECSMOKE και FEDIN παρουσιάζουν ανοδική τάση. Πιο αναλυτικά, η θερμοκρασία ξεπερνά τα επιτρεπτά όρια για χρόνο  $t=50.4s$  από το χρόνο έναρξης του συμβάντος ενώ ο FECSMOKE (για το αυστηρότερο κριτήριο ορατότητας που είναι τα 4 m) για χρόνο  $t=39.9$ . Ο συντελεστής FEDIN, ξεπερνά την οριακή τιμή για ελαφρύ τραυματισμό για χρόνο 298.3 s.

Στην Εικόνα 34 φαίνεται το συγκριτικό διάγραμμα των συντελεστών FECSMOKE όλων των κριτηρίων ορατότητας για χρόνο εκκίνησης  $t=0s$ . Από το διάγραμμα, γίνεται αντιληπτό ότι όσο πιο αυστηρό γίνεται το κριτήριο ορατότητας τόσο μεγαλύτερες είναι οι τιμές που λαμβάνει ο συντελεστής FECSMOKE.



Εικόνα 32 Συγκριτικό διάγραμμα και των τεσσάρων κριτηρίων ορατότητας του σεναρίου RAMP 750 για χρόνο εκκίνησης 0s. Κόκκινο χρώμα= 4m, πράσινο χρώμα= 3.5 m, θαλασσί χρώμα= 3m, μαύρο χρώμα = 2.5 m.

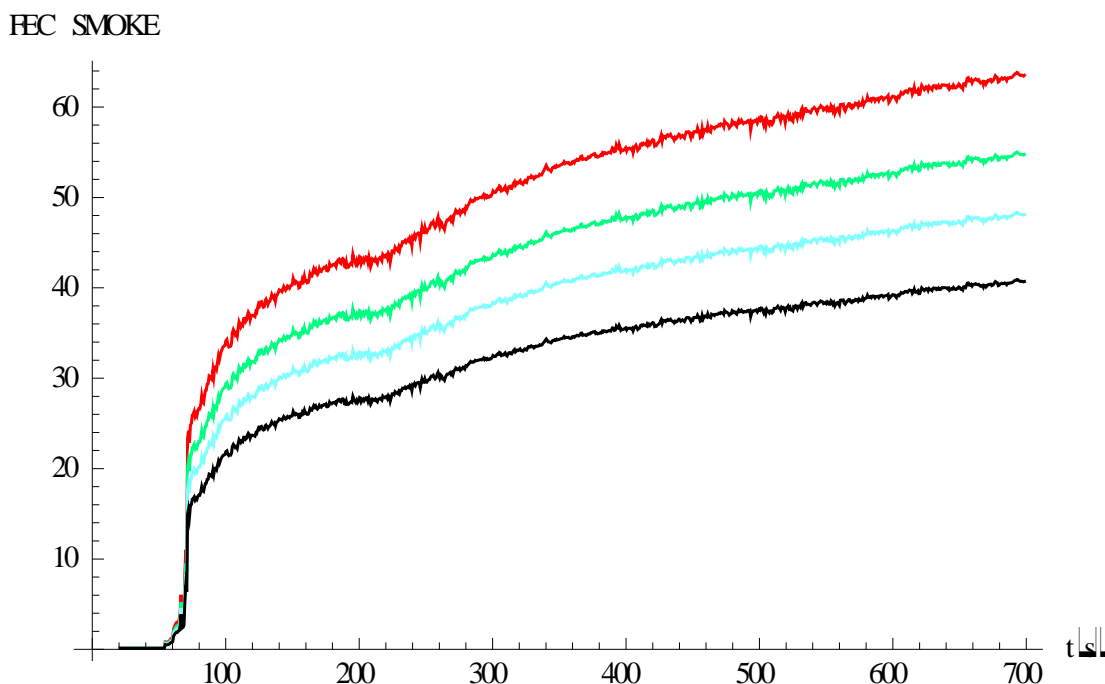


Εικόνα 33 Διαγράμματα TEMP, FEDCO, FEDO2, FEDIN του σεναρίου RAMP 750 για χρόνο εκκίνησης 0 s.

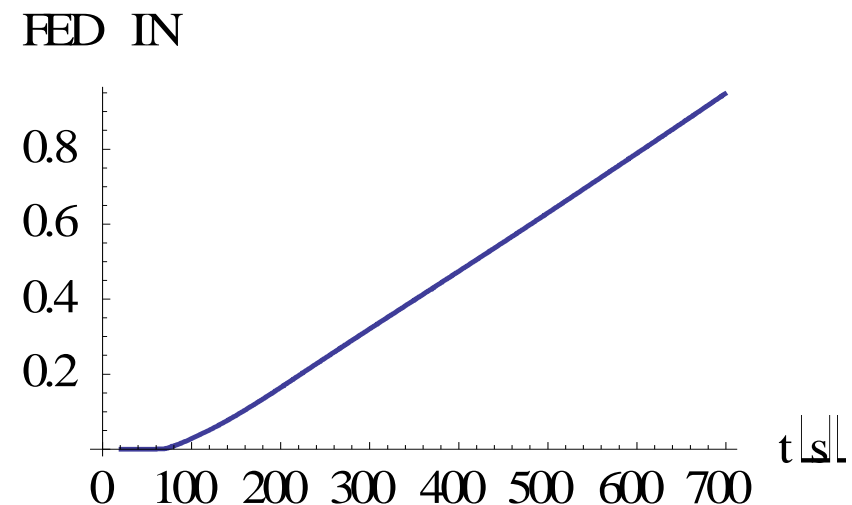
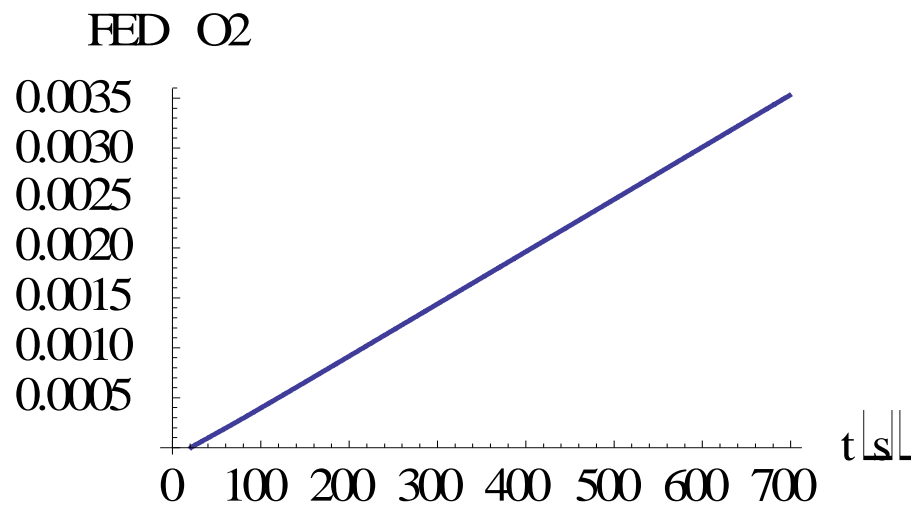
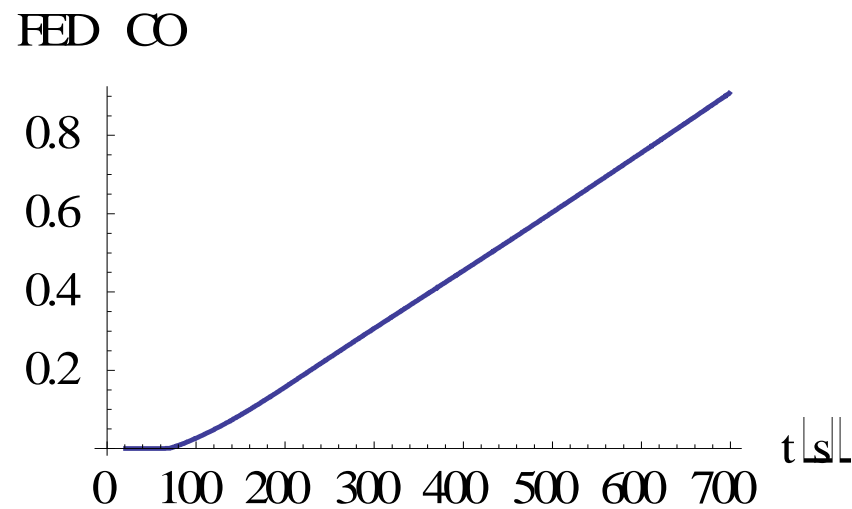
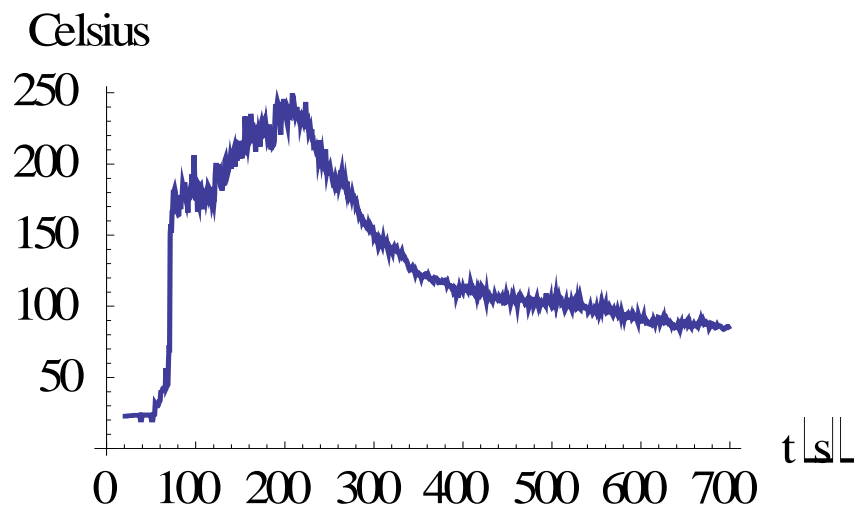
### 6.2.2.2 Χρόνος εκκίνησης 21 s

Η περίπτωση αντίδρασης του αγήματος σε χρόνο 21 sec είναι φυσιολογική, δεδομένου του χρόνου που απαιτείται για την ενεργοποίηση του συστήματος πυρανίχνευσης, την ανακοίνωση από το μεγαφωνικό σύστημα και την παραλαβή των πυροσβεστήρων από τα άτομα του αγήματος. Γίνεται αντιληπτό από τα διαγράμματα ότι, με την πάροδο του χρόνου τόσο η θερμοκρασία όσο και οι συντελεστές FECSMOKE και FEDIN παρουσιάζουν ανοδική τάση και μάλιστα, αυτή τη φορά η πορεία του αγήματος αποκόπτεται συντομότερα. Πιο αναλυτικά, η θερμοκρασία ξεπερνά τα επιτρεπτά όρια για χρόνο  $t=46.9$  s από τον χρόνο κινητοποιήσεως του αγήματος ενώ ο FECSMOKE (για το αυστηρότερο κριτήριο ορατότητας) για χρόνο  $t=14.7$  s. Οι χρόνοι που η θερμοκρασία και οι συντελεστές φτάνουν τις οριακές τους τιμές είναι πολύ κοντά με αυτούς των προηγούμενων RAMPS. Ωστόσο, ο συντελεστής FEDIN ξεπερνά την τιμή 0.3 (ελαφρύς τραυματισμός) για χρόνο  $t=287$ s από την κινητοποίηση του αγήματος.

Στην εικόνα 41, φαίνεται το συγκριτικό διάγραμμα των συντελεστών FECSMOKE όλων των κριτηρίων ορατότητας για χρόνο εκκίνησης  $t=21$  s. Από το διάγραμμα, γίνεται αντιληπτό ότι όσο πιο αυστηρό γίνεται το κριτήριο ορατότητας τόσο μεγαλύτερες είναι οι τιμές που λαμβάνει ο συντελεστής FECSMOKE.



Εικόνα 34 Συγκριτικό διάγραμμα FECSMOKE όλων των κριτηρίων ορατότητας για το σενάριο πυρκαγιάς RAMP 750 για χρόνο εκκίνησης 21 s. Κόκκινο χρώμα= 4m, πράσινο χρώμα= 3.5 m, θαλασσί χρώμα= 3m, μαύρο χρώμα = 2.5 m.

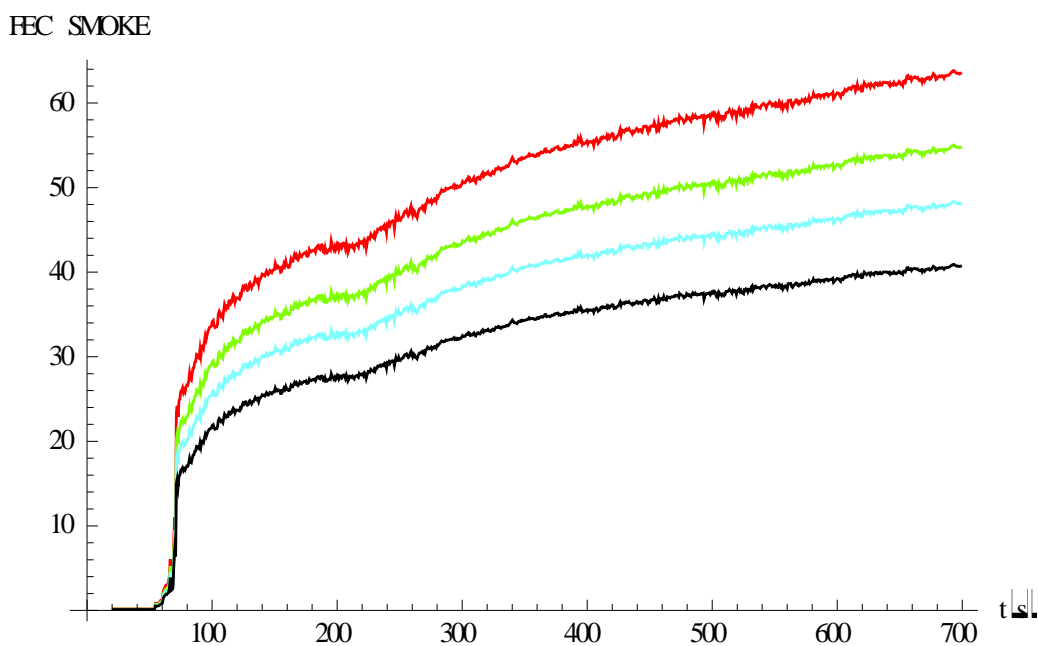


Εικόνα 35 Διαγράμματα TEMP, FEDCO, FEDO2, FEDIN για χρόνο εκκίνησης 21 s

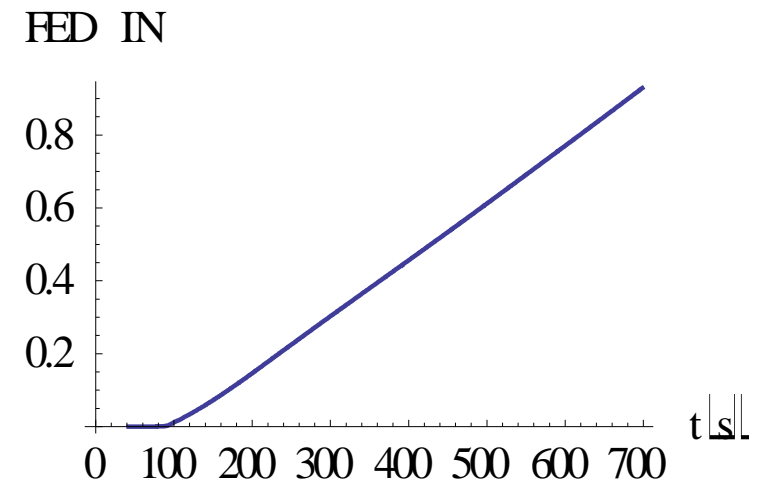
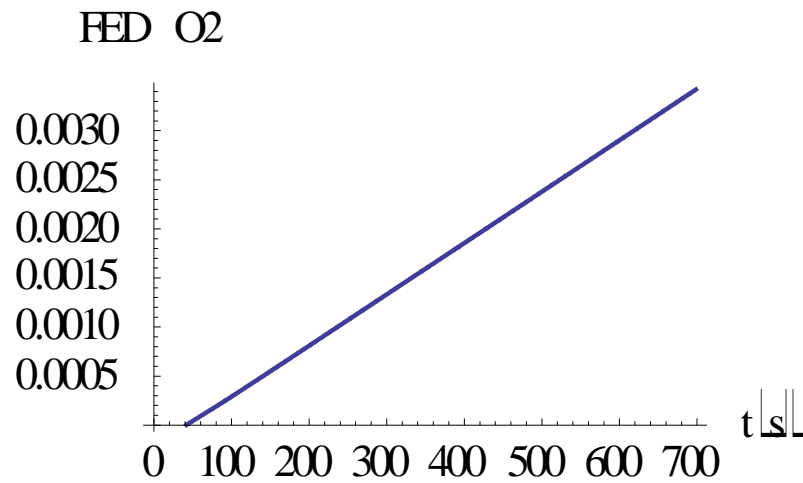
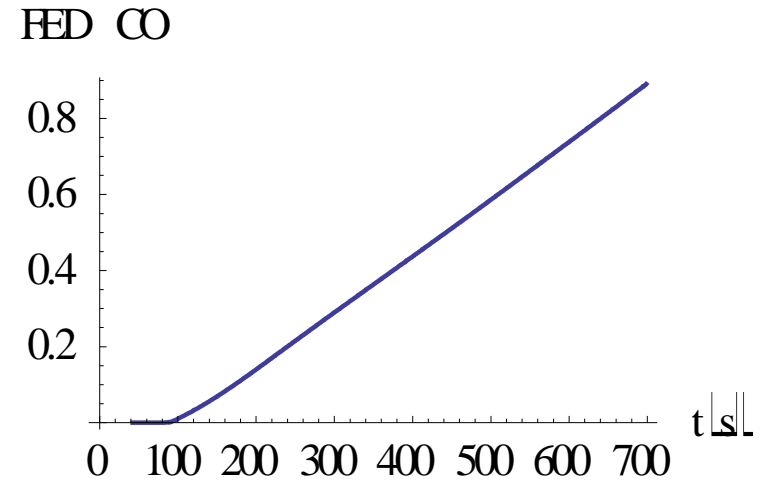
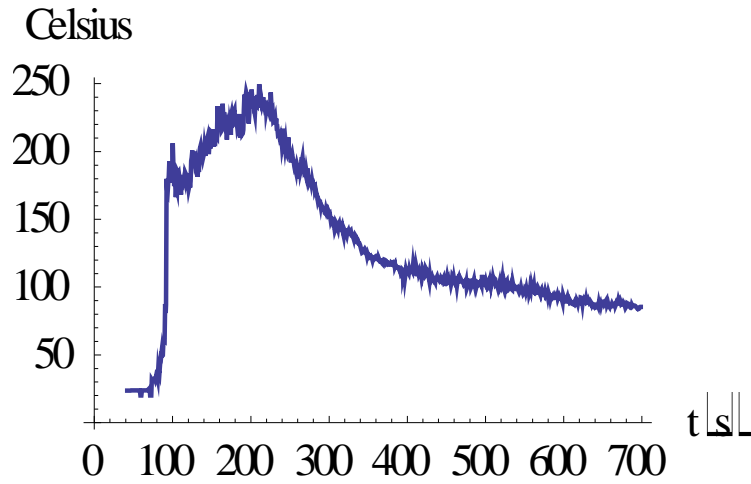
### 6.2.2.3 Χρόνος εκκίνησης 42 s

Ο χρόνος εκκίνησης 42 sec αφορά καθυστερημένη αντίδραση του αγήματος. Και εδώ, γίνεται αντιληπτό από τα διαγράμματα ότι, με την πάροδο του χρόνου τόσο η θερμοκρασία όσο και οι συντελεστές FEC SMOKE και FED IN παρουσιάζουν ανοδική τάση και μάλιστα, αναφορικά με το FEC SMOKE, το άγημα δεν προλαβαίνει καν να ξεκινήσει την πορεία του. Πιο αναλυτικά, η θερμοκρασία ξεπερνά τα επιτρεπτά όρια για χρόνο  $t=36.9$  s από το χρόνο κινητοποίησης του αγήματος ενώ ο FEC SMOKE (για το αυστηρότερο κριτήριο ορατότητας) για χρόνο  $t=0$  s. Ωστόσο, ο συντελεστής FEDIN ξεπερνά την τιμή 0.3 (ελαφρύς τραυματισμός) για χρόνο  $t=279$  s από την κινητοποίηση του αγήματος.

Στην εικόνα 43, φαίνεται το συγκριτικό διάγραμμα των συντελεστών FEC SMOKE όλων των κριτηρίων ορατότητας για χρόνο εκκίνησης  $t=0$ s. Από το διάγραμμα, γίνεται αντιληπτό ότι όσο πιο αυστηρό γίνεται το κριτήριο ορατότητας τόσο μεγαλύτερες είναι οι τιμές που λαμβάνει ο συντελεστής FEC SMOKE.



Εικόνα 36 Συγκριτικό διάγραμμα FEC SMOKE όλων των κριτηρίων ορατότητας για το σενάριο πυρκαγιάς RAMP 750 για χρόνο εκκίνησης 42 sec. Κόκκινο χρώμα= 4m, πράσινο χρώμα= 3.5 m, θαλασσί χρώμα= 3m, μαύρο χρώμα = 2.5 m.



Εικόνα 37 Διαγράμματα TEMP, FEDCO, FEDO2, FEDIN του σεναρίου RAMP 750 για χρόνο εκκίνησης 42 s.



Πίνακας 18 Πίνακας στοιχείων για RAMP 750

$T_{\text{εκκίνησης}}(s)$	Συντελεστής	Κρίσιμη τιμή	Χρόνος που αντέχει το άγημα από τη στιγμή εκκίνησης (s)
0	Θερμοκρασία (°C)	60	<b>50.4</b>
	FEC SMOKE	4 m: 1	<b>39.9</b>
		3.5 m: 1	<b>39.9</b>
		3 m: 1	<b>39.9</b>
		2.5 m: 1	<b>44.1</b>
FED IN	0.3	<b>298.3</b>	
21	Θερμοκρασία (°C)	60	<b>48.3</b>
	FEC SMOKE	4 m: 1	<b>16.1</b>
		3.5 m: 1	<b>16.8</b>
		3 m: 1	<b>18.2</b>
		2.5 m: 1	<b>18.9</b>
FED IN	0.3	<b>287</b>	
42	Θερμοκρασία (°C)	60	<b>36.9</b>
	FEC SMOKE	4 m: 1	<b>0</b>
		3.5 m: 1	<b>0</b>
		3 m: 1	<b>0</b>
		2.5 m: 1	<b>0</b>
FED IN	0.3	<b>278</b>	

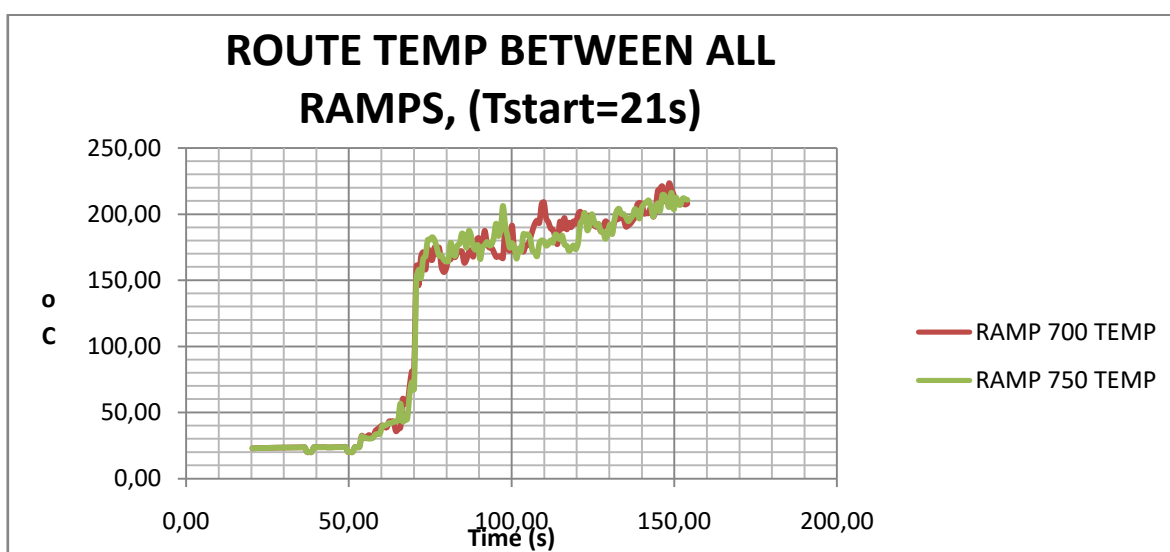
Πίνακας 19 Συγκριτικός πίνακας σεναρίων RAMP 700 και RAMP 750 για τα 1846 KW.

$T_{\text{εκκίνησης}}(s)$	Συντελεστής	Κρίσιμη τιμή	<b>RAMP 700 1846 KW</b> Χρόνος που αντέχει το άγλημα από τη στιγμή εκκίνησης (s)	<b>RAMP 750 1846 KW</b> Χρόνος που αντέχει το άγλημα από τη στιγμή εκκίνησης (s)
0	Θερμοκρασία (°C)	60	<b>50.4</b>	<b>50.4</b>
	FEC SMOKE	4 m: 1	<b>39.9</b>	<b>39.9</b>
		3.5 m: 1	<b>39.9</b>	<b>39.9</b>
		3 m: 1	<b>39.9</b>	<b>39.9</b>
		2.5 m: 1	<b>44.1</b>	<b>44.1</b>
FED IN	0.3	-	<b>298.3</b>	
21	Θερμοκρασία (°C)	60	<b>48.3</b>	<b>48.3</b>
	FEC SMOKE	4 m: 1	<b>16.1</b>	<b>16.1</b>
		3.5 m: 1	<b>16.8</b>	<b>16.8</b>
		3 m: 1	<b>17.2</b>	<b>18.2</b>
		2.5 m: 1	<b>17.9</b>	<b>18.9</b>
FED IN	0.3	-	<b>287</b>	
42	Θερμοκρασία (°C)	60	<b>46.9</b>	<b>46.9</b>
	FEC SMOKE	4 m: 1	<b>0</b>	<b>0</b>
		3.5 m: 1	<b>0</b>	<b>0</b>
		3 m: 1	<b>0</b>	<b>0</b>
		2.5 m: 1	<b>0</b>	<b>0</b>
FED IN	0.3	-	<b>278</b>	

### 6.2.3 Σύγκριση μεταξύ των σεναρίων RAMP 700 και RAMP 750 για τα 1846 KW.

Από τον συγκριτικό πίνακα 19 μεταξύ των 2 αυτών σεναρίων προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

1. Για αντιστοιχία περιπτώσεων, οι οριακές τιμές των συντελεστών τόσο για το ένα όσο και για το άλλο σενάριο, ξεπερνιούνται για τον ίδιο ακριβώς χρόνο. Για παράδειγμα, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 41, για χρόνο εκκίνησης 21 s, η οριακή θερμοκρασία και στο RAMP 700 και στο RAMP 750 ξεπερνιέται ταυτόχρονα (χωρίς αυτό να σημαίνει ότι πρόκειται για την ίδια περίπτωση!). Αυτό είναι λογικό, αφού οι design HRR καμπύλες είναι πολύ κοντά. Μεγάλες διαφοροποιήσεις παρατηρούνται μεταξύ των χρόνων εκκίνησης. Όσο καθυστερεί η ενεργοποίηση του αγήματος, τόσο λιγότερο χρόνο μπορεί να αντέξει το άγημα στα παράγωγα της καύσης. Αξίζει να αναφερθεί ότι για χρόνο  $t=42$  s το άγημα δεν προλαβαίνει καν να ξεκινήσει από τη θέση 1, καθόσον η πορεία του ανακόπτεται λόγω υπέρβασης της οριακής τιμής του συντελεστή FECSMOKE.
2. Όσο αυστηρότερο γίνεται το κριτήριο ορατότητας (τα 4 m είναι το αυστηρότερο όλων), τόσο γρηγορότερα ανακόπτεται η πορεία του αγήματος.
3. Κατά χρονική σειρά υπέρβασης των συντελεστών, πρώτα ξεπερνιέται η critical τιμή του FECSMOKE για όλα τα κριτήρια ορατότητας και έπειτα η critical τιμή της θερμοκρασίας. Τέλος, ο συντελεστής FEDIN (σε περίπτωση βέβαια που οι υπόλοιποι συντελεστές δεν ληφθούν καν υπόψιν), ξεπερνάει την οριακή του τιμή για πολύ μεταγενέστερο χρόνο.

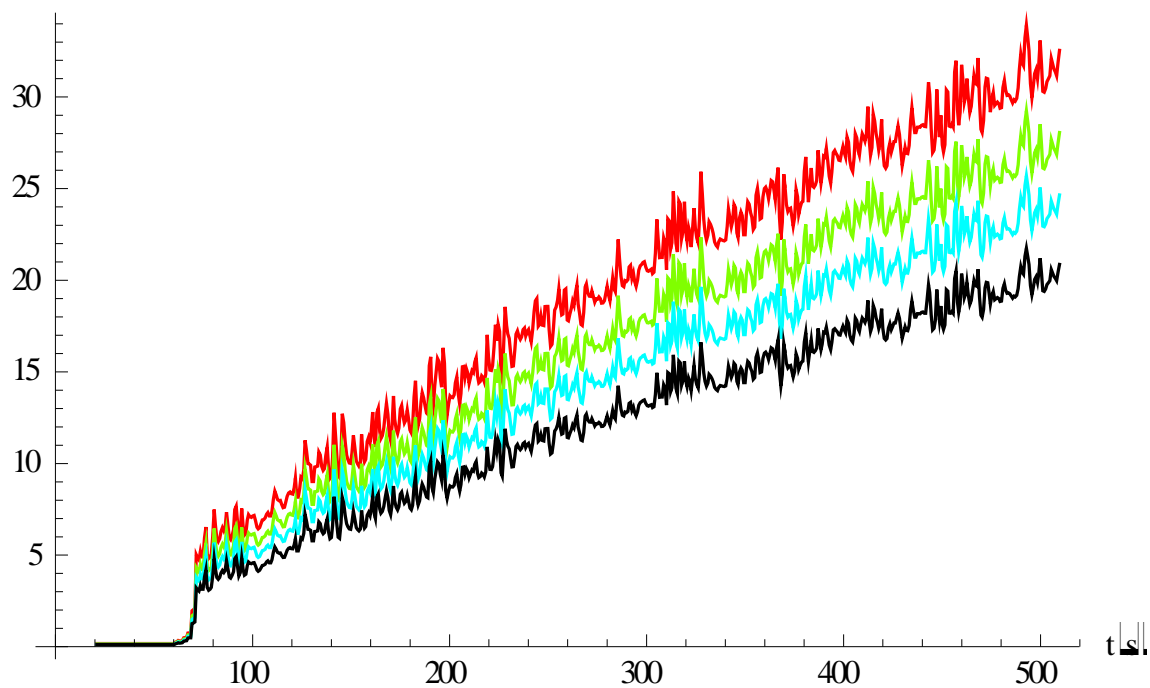


Εικόνα 38 Συγκριτικό διάγραμμα εξέλιξης της θερμοκρασίας για χρόνο εκκίνησης 21 s μεταξύ των σεναρίων RAMP 700 και 750 για τα 1846 KW.

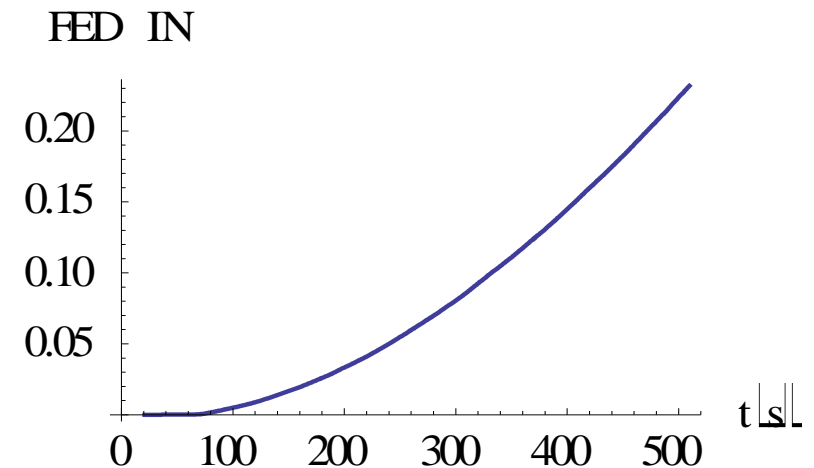
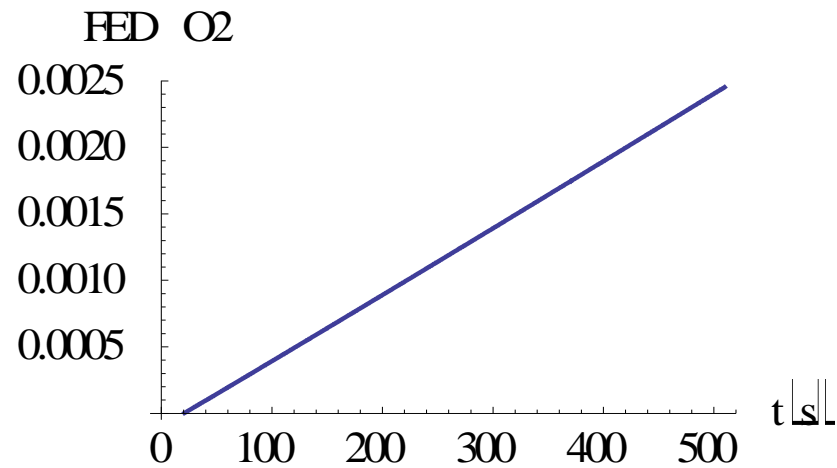
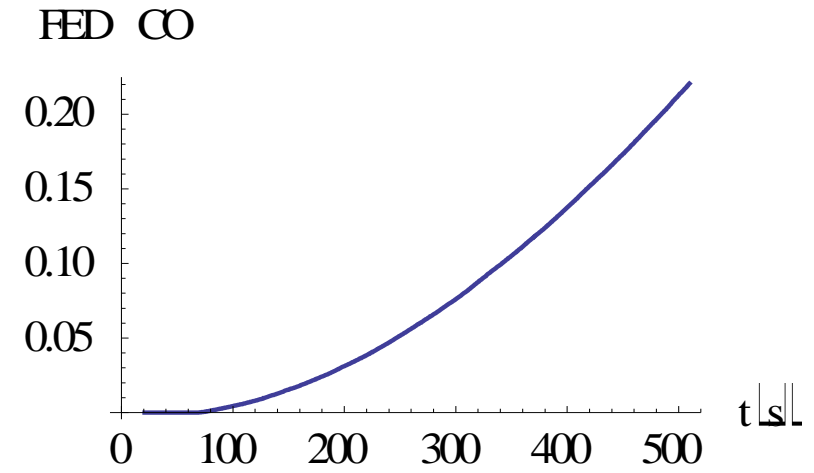
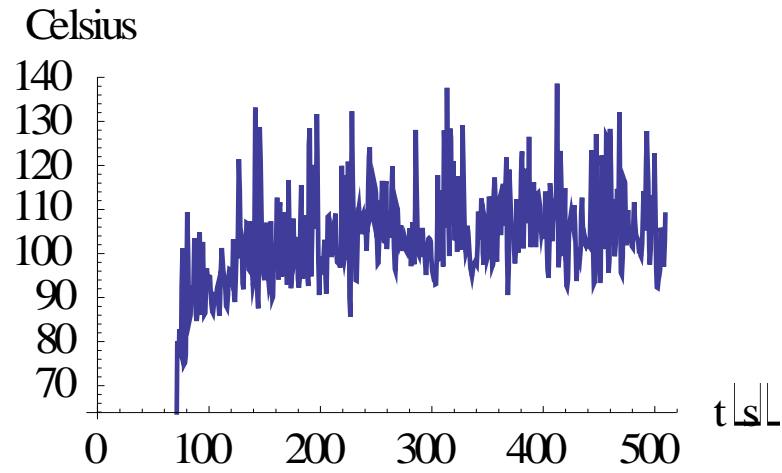
Στη συνέχεια ακολουθούν τα αποτελέσματα των υπολοίπων σεναρίων πυρκαγιάς (λήφθηκε υπόψιν μόνο ο χρόνος εκκίνησης 21 sec καθόσον θεωρείται ο ρεαλιστικότερος), από τα οποία τα 4 είναι διαφορετικής εντάσεως το καθένα και η καμπύλη HRR του άλλου είναι μια παραλλαγή της καμπύλης HRR του σεναρίου RAMP 750- 1846 KW. Αρχικά, παρουσιάζονται τα διαγράμματα που προέκυψαν από το Mathematica για την κάθε περίπτωση και στη συνέχεια μέσω τελικού συγκριτικού πίνακα και συγκριτικών διαγραμμάτων, ακολουθεί ο τελικός σχολιασμός των αποτελεσμάτων.

### 6.2.4 RAMP 750 μέγιστης εντάσεως 500 KW

HEC SMOKE



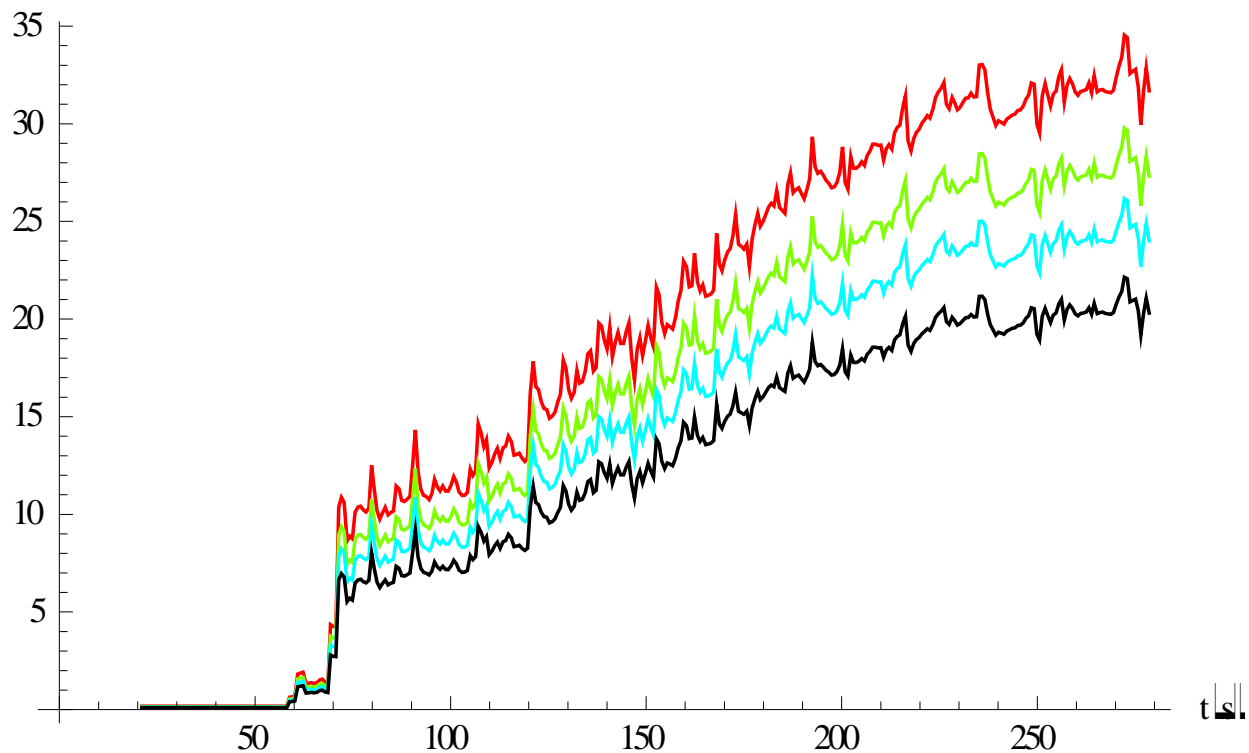
Εικόνα 39 Τιμές του συντελεστή FECSMOKE συναρτήσει με το χρόνο για όλα τα κριτήρια ορατότητας. Κόκκινο χρώμα= 4 m, Πράσινο χρώμα= 3.5 m, Θαλασσί χρώμα= 3m, Μαύρο χρώμα=2.5 m.



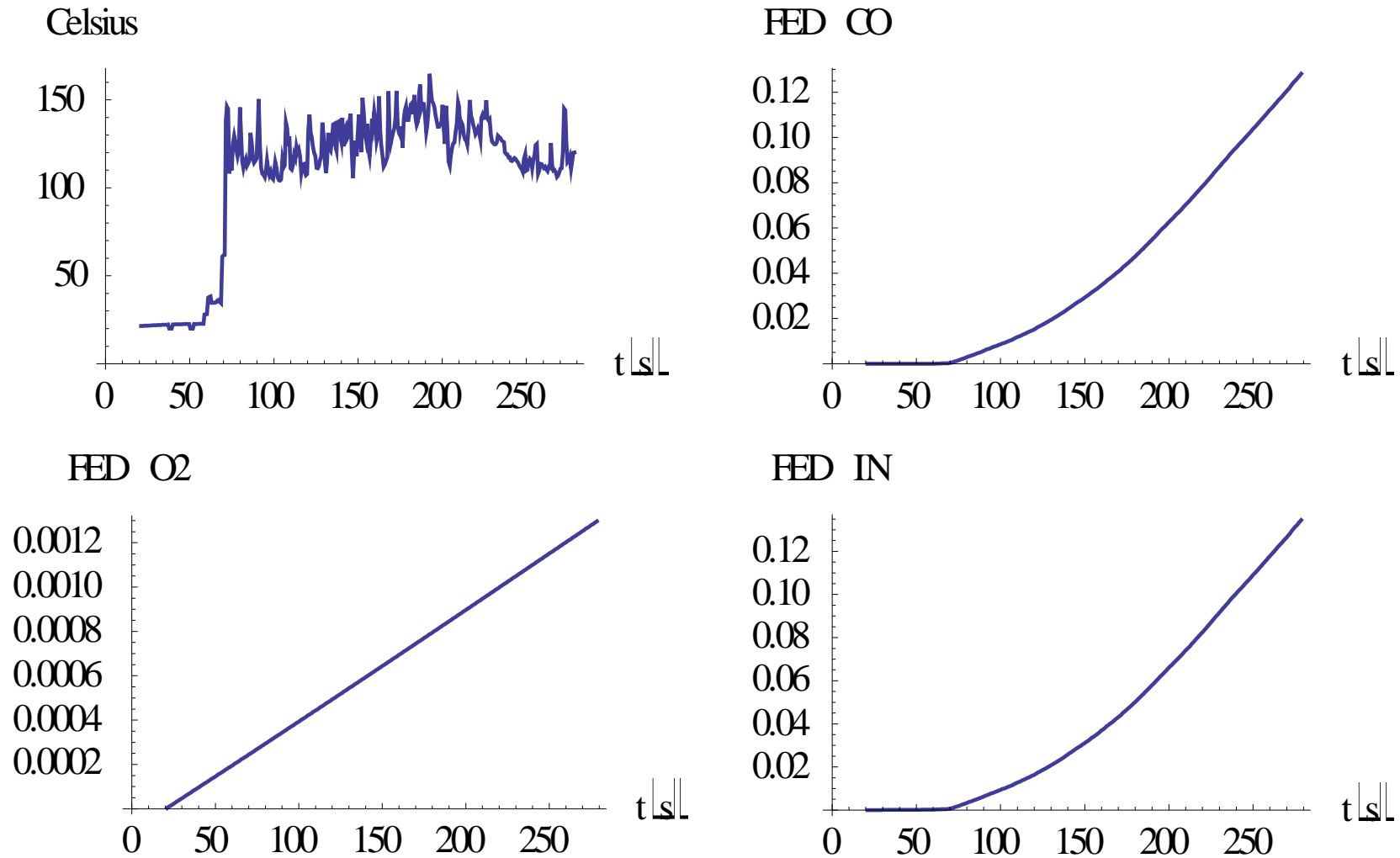
Εικόνα 40 Διαγράμματα συντελεστών TEMP, FEDCO, FEDO2 και FEDIN συναρτήσει με το χρόνο για το σενάριο RAMP 750 500 KW.

### 6.2.5 RAMP 750 μέγιστης εντάσεως 900 KW

FEC SMOKE



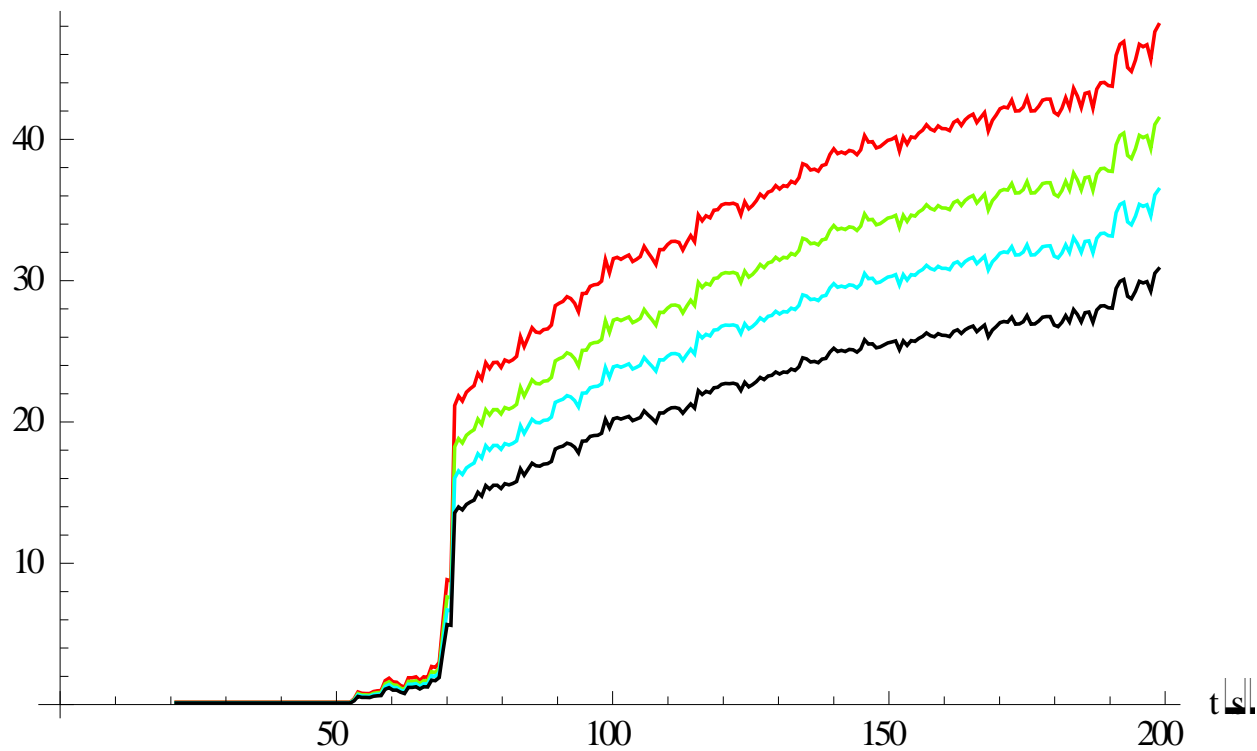
Εικόνα 41 Σύγκριση μεταξύ των τεσσάρων κριτηρίων ορατότητας για το σενάριο RAMP 750 900 KW. (Κόκκινο χρώμα=4m, Πράσινο χρώμα=3.5 m, Θαλασσί χρώμα=3 m, Μαύρο χρώμα=2.5 m.)



Εικόνα 42 Διαγράμματα συντελεστών TEMP, FEDCO, FEDO2 και FEDIN συναρτήσει με το χρόνο για το σενάριο RAMP 750 900 KW.

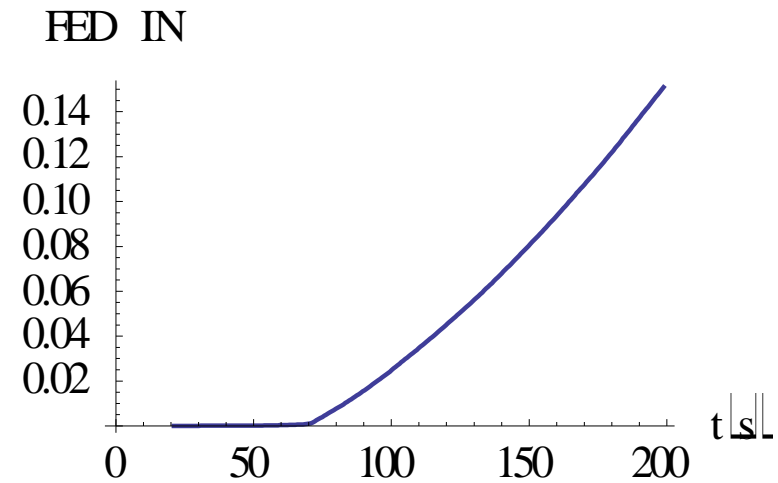
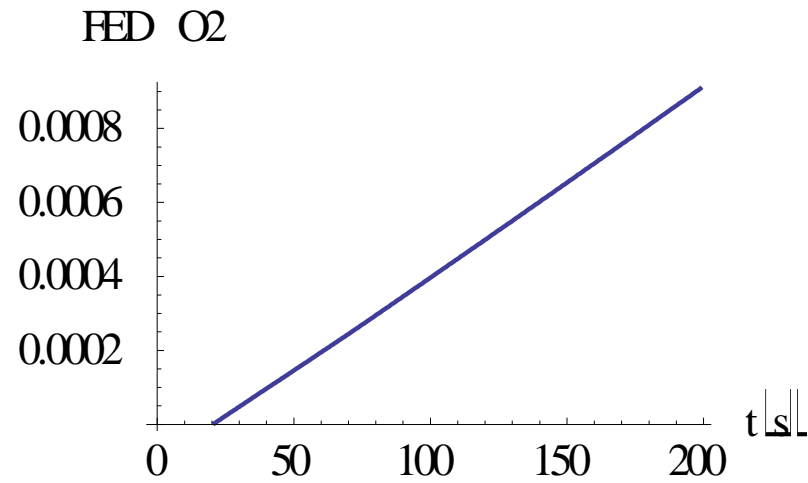
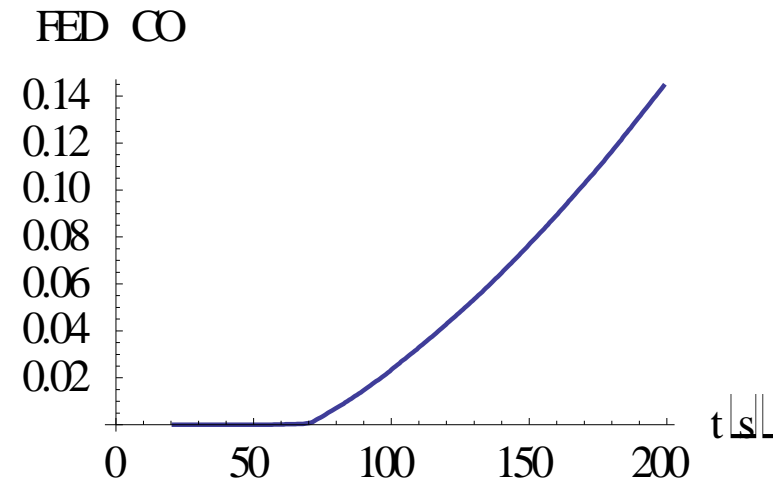
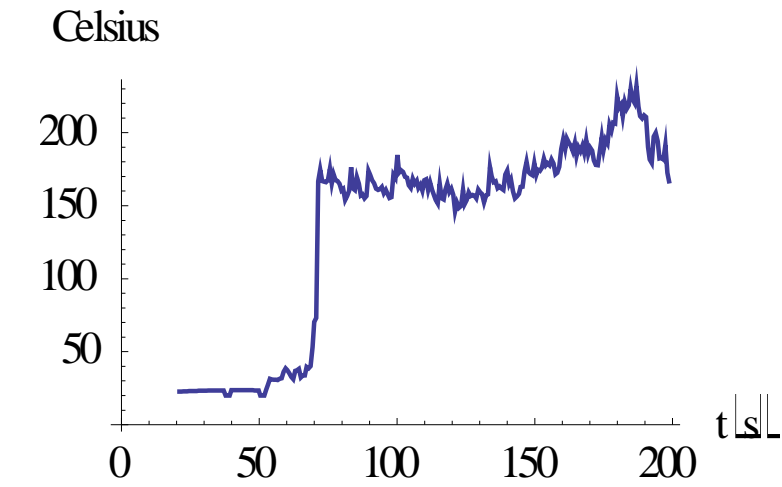
### 6.2.6 RAMP 750 1846 KW Alternative HRR

FEC SMOKE



Εικόνα 43 Διάγραμμα του συντελεστή FEC SMOKE και των τεσσάρων κριτηρίων ορατότητας για το σενάριο RAMP 750 1846 KW Alternative HRR. Κόκκινο χρώμα: 4m, Πράσινο χρώμα=3.5 m, Θαλασσί χρώμα=3 m, Μαύρο χρώμα=2.5 m.

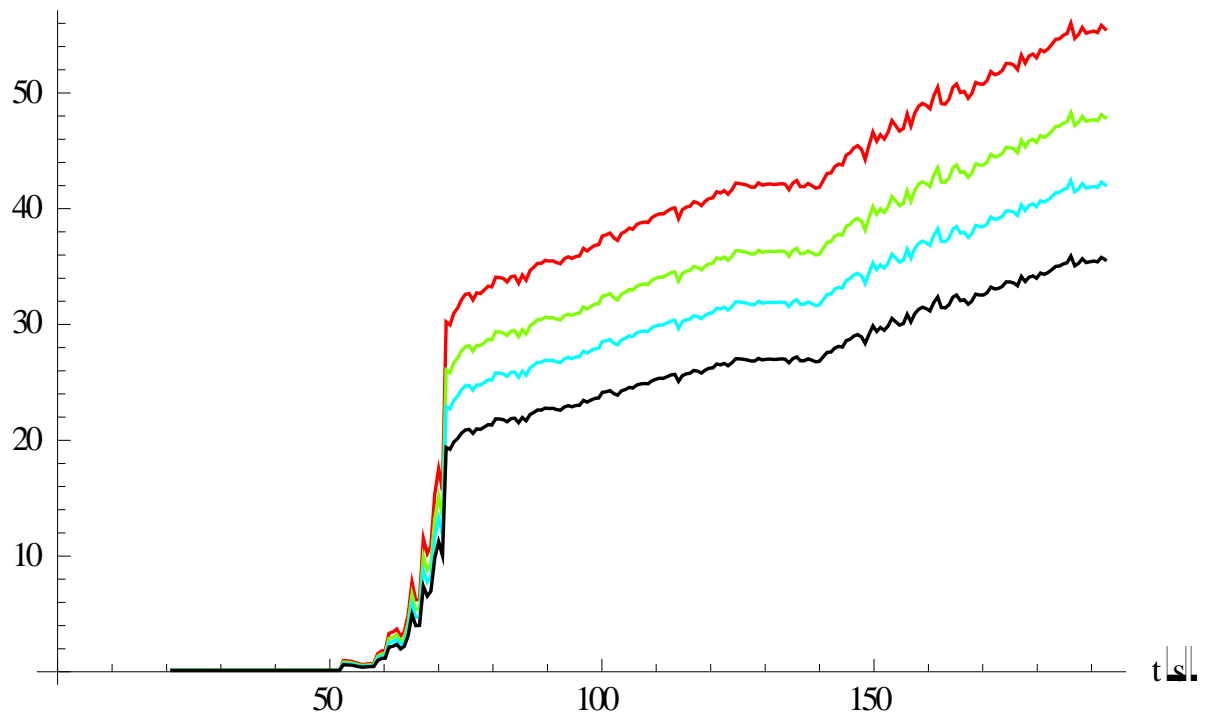




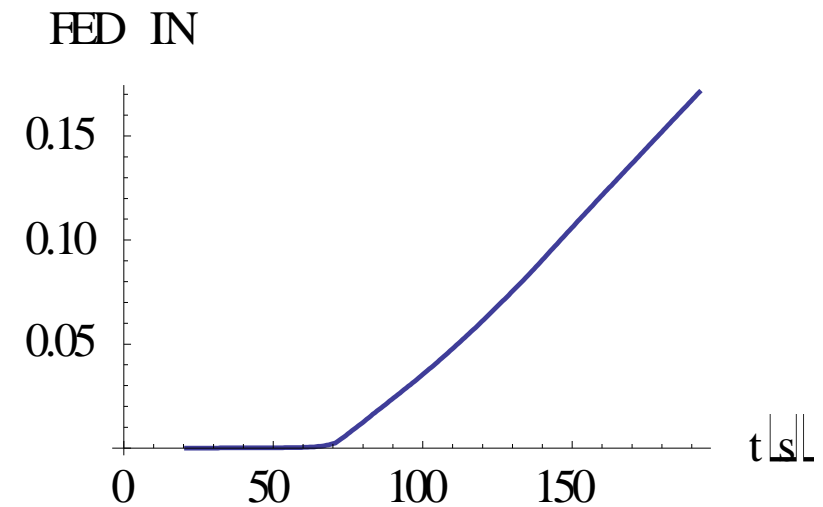
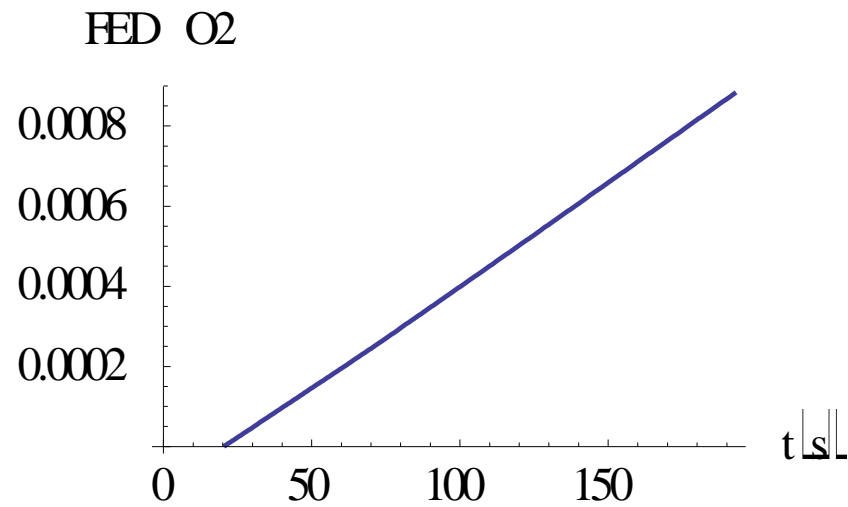
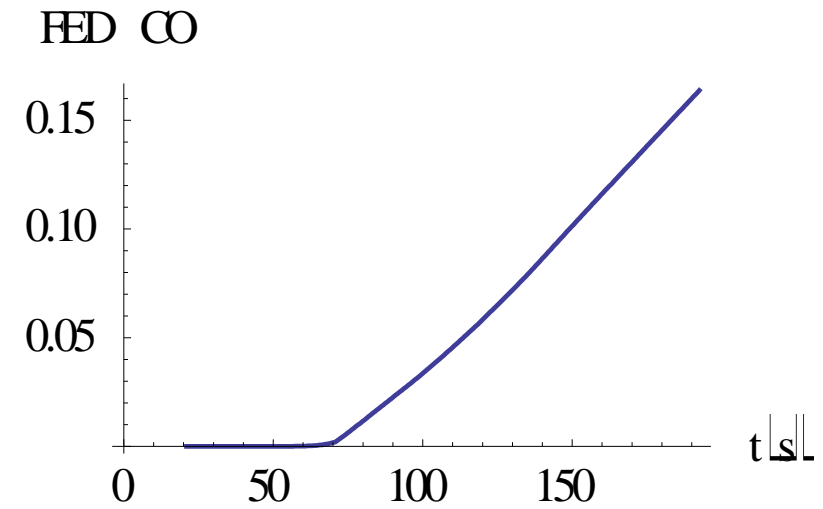
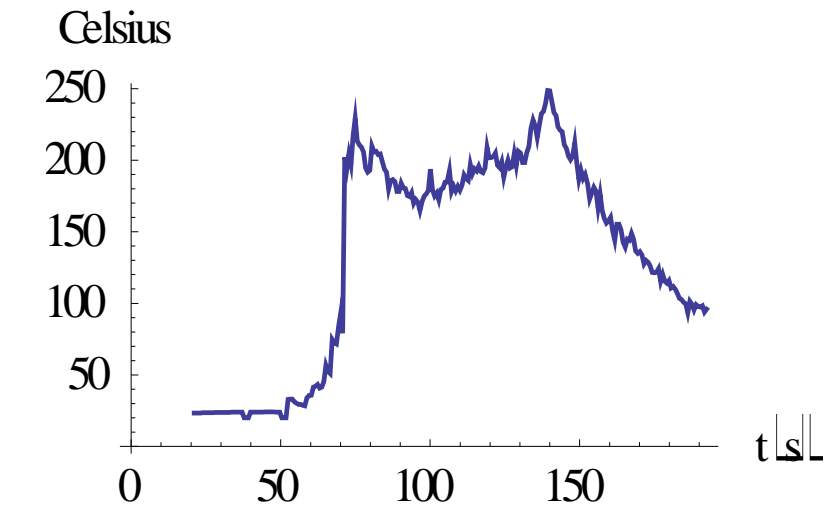
Εικόνα 44 Διαγράμματα των συντελεστών TEMP, FEDCO, FEDO2 και FEDIN σε συνάρτηση με το χρόνο για το σενάριο RAMP 750 1846 KW Alternative.

### 6.2.7 RAMP 750 μέγιστης εντάσεως 2500 KW

FEC SMOKE



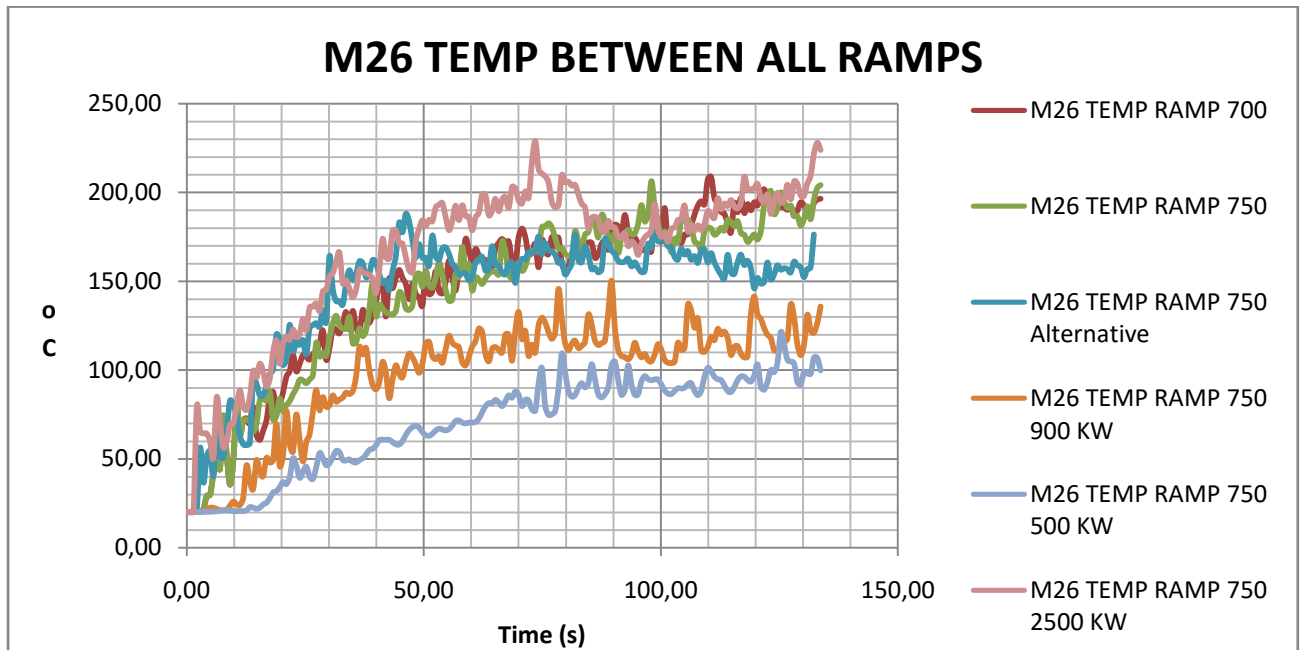
Εικόνα 45 Συγκριτικό διάγραμμα των συντελεστών FEC SMOKE καί των τεσσάρων κριτηρίων ορατότητας για το σενάριο RAMP 750 2500 KW.



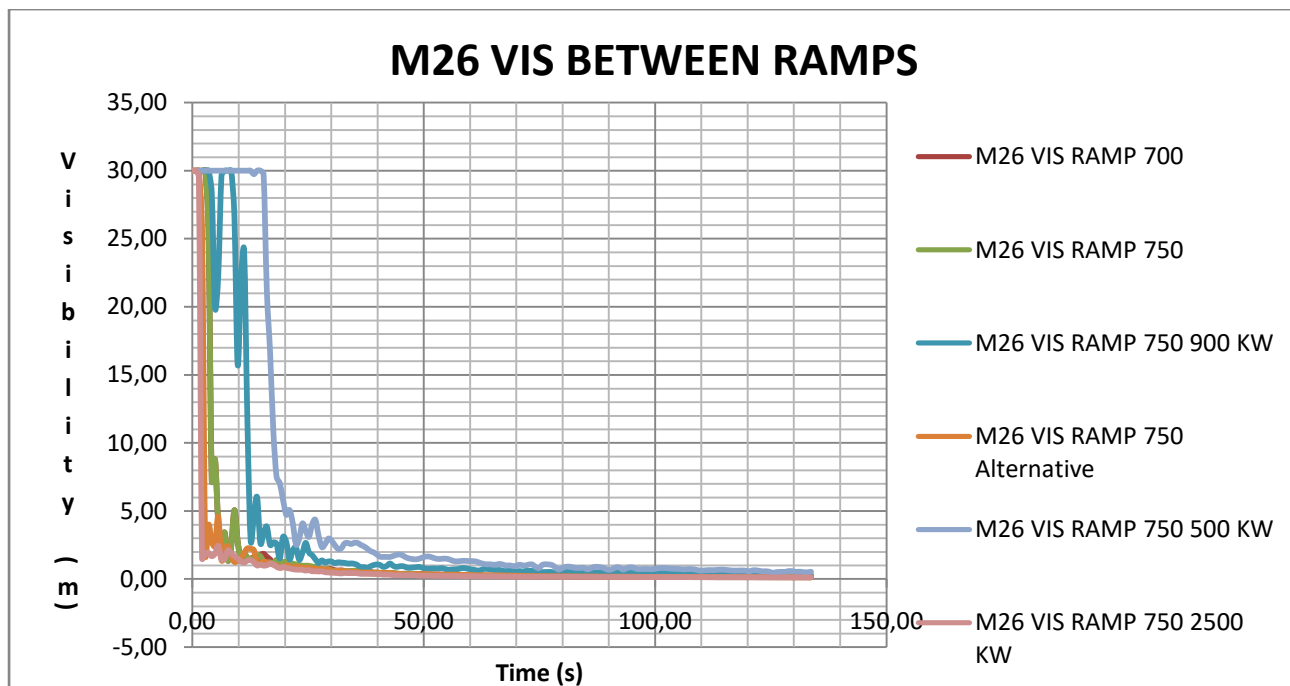
Εικόνα 46 Διαγράμματα των συντελεστών TEMP, FEDCO, FEDO2 και FEDIN σε συνάρτηση με το χρόνο για το σενάριο RAMP 750 2500 KW.

### 6.3 Συγκριτικά αποτελέσματα για την επιβίωση του αγήματος

Στην Εικόνα 50 φαίνεται η διακύμανση της θερμοκρασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο στη θέση του αισθητήρα M26. Αυτός ο αισθητήρας επελέγη διότι βρίσκεται στην είσοδο του χώρου και είναι ουσιαστικά το σημείο στο οποίο το άγημα είναι ακριβώς έξω από τον χώρο. Όπως ήταν αναμενόμενο, όσο αυξάνεται η ένταση της πυρκαγιάς, τόσο αυξάνονται και οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται. Ακόμη, διαφοροποιήσεις εντοπίζονται και μεταξύ των RAMP 750 και RAMP 750Alternative, κυρίως λόγω του ότι οι design HRR καμπύλες τους (Εικόνα 19) δεν είναι ίδιες.

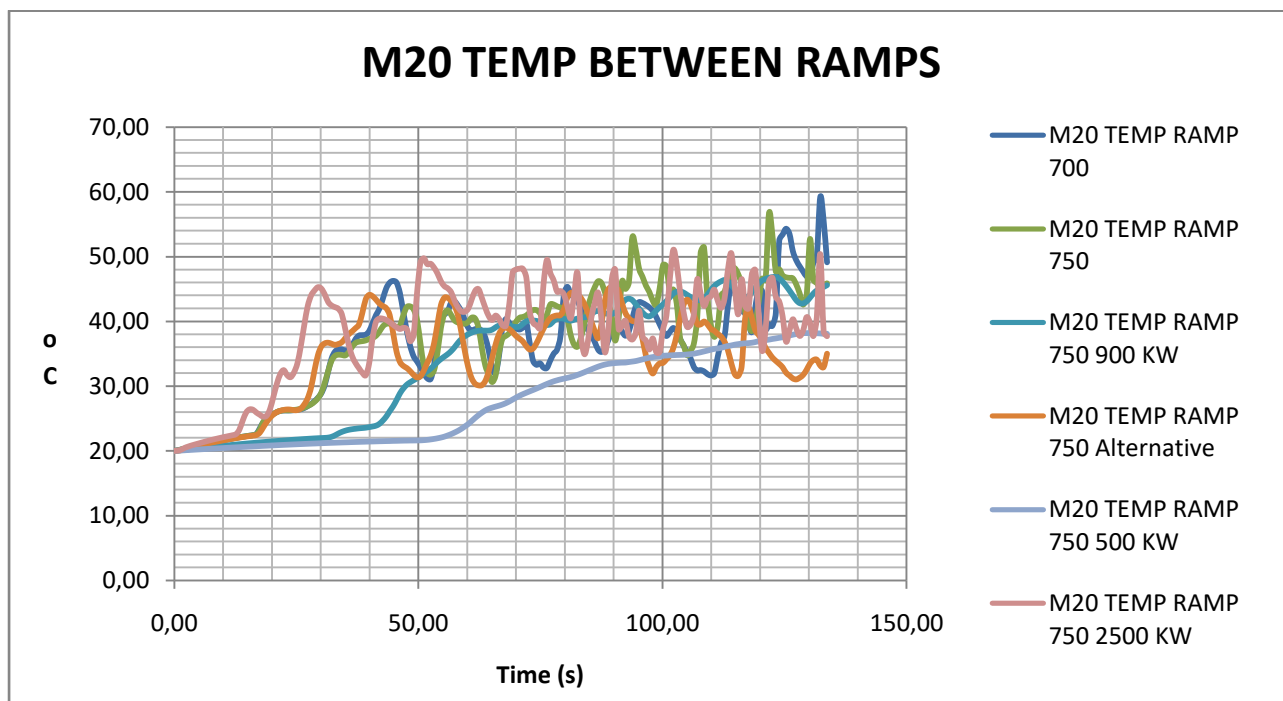


Εικόνα 47 Μεταβολή της θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο στη θέση του αισθητήρα M26.



Εικόνα 48 Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο για όλα τα σενάρια πυρκαγιάς για τον αισθητήρα M26.

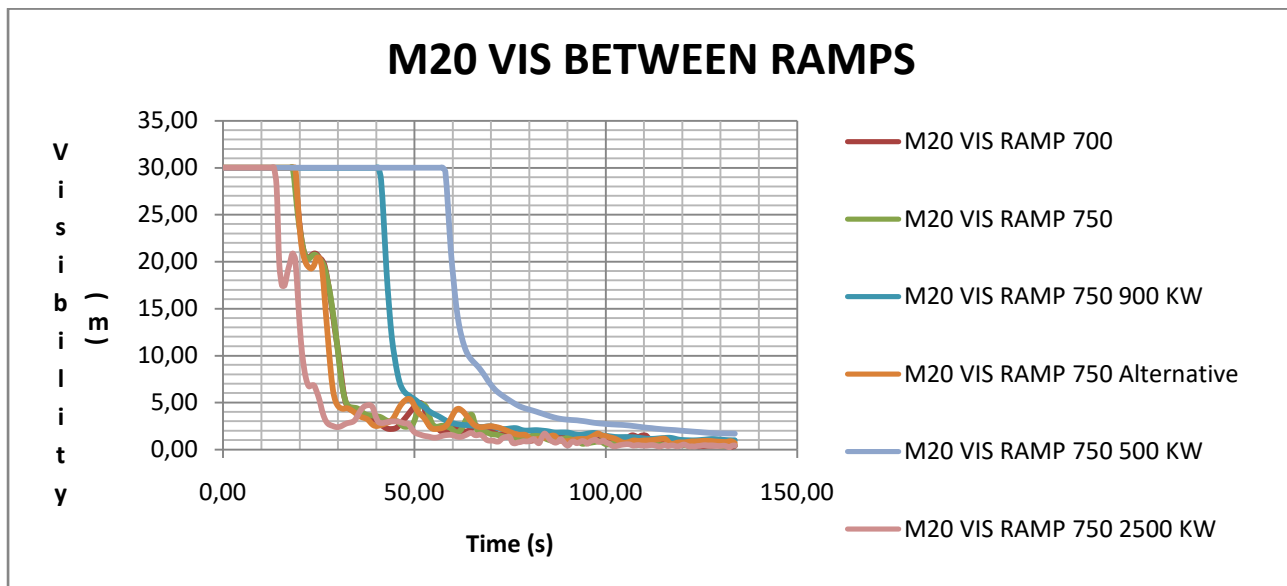
Όπως επίσης ήταν αναμενόμενο, και η ορατότητα επηρεάζεται διαφορετικά από τη διαφορετικότητα της έντασης της πυρκαγιάς. Για πιο ισχυρές πυρκαγιές, η ορατότητα μειώνεται ακόμα πιο γρήγορα.



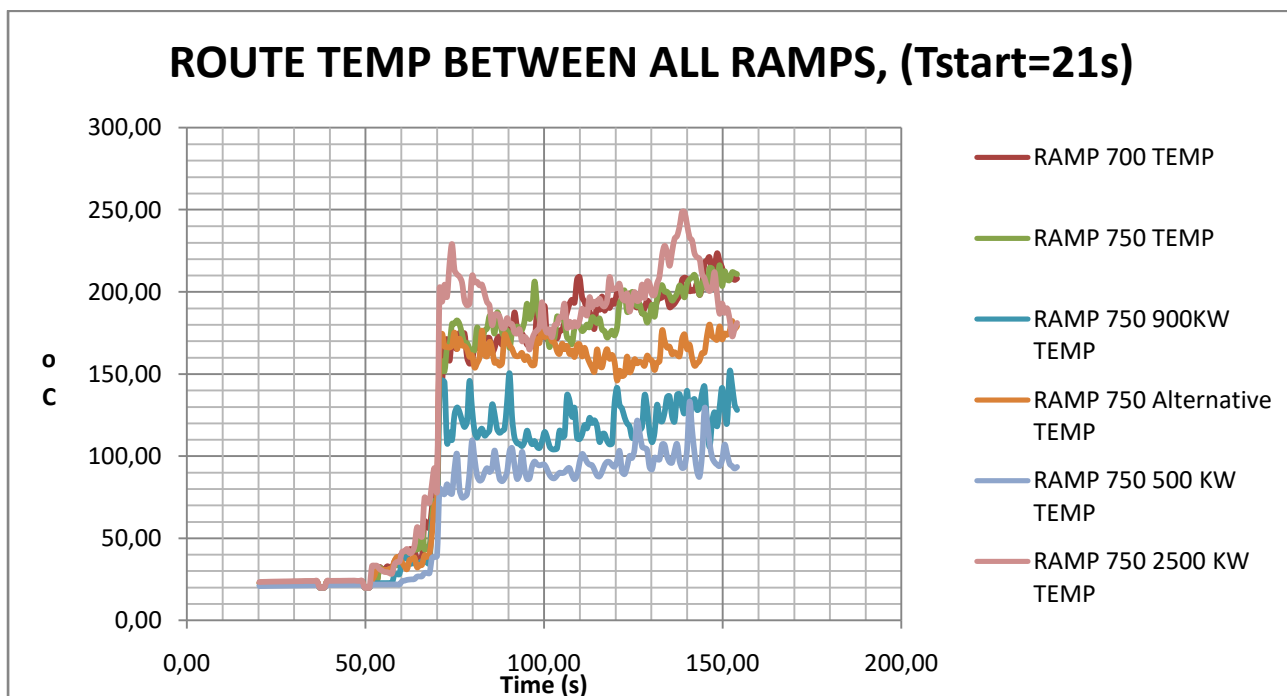
Εικόνα 49 Διάγραμμα θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο για όλα τα σενάρια για τον αισθητήρα M20.

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται η διακύμανση της θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο για τον αισθητήρα M20. Αυτός ο αισθητήρας επελέγη διότι βρίσκεται περί το μέσο της διαδρομής του αγήματος. Επόμενο είναι, επειδή αυτός ο αισθητήρας βρίσκεται μακρύτερα από τον

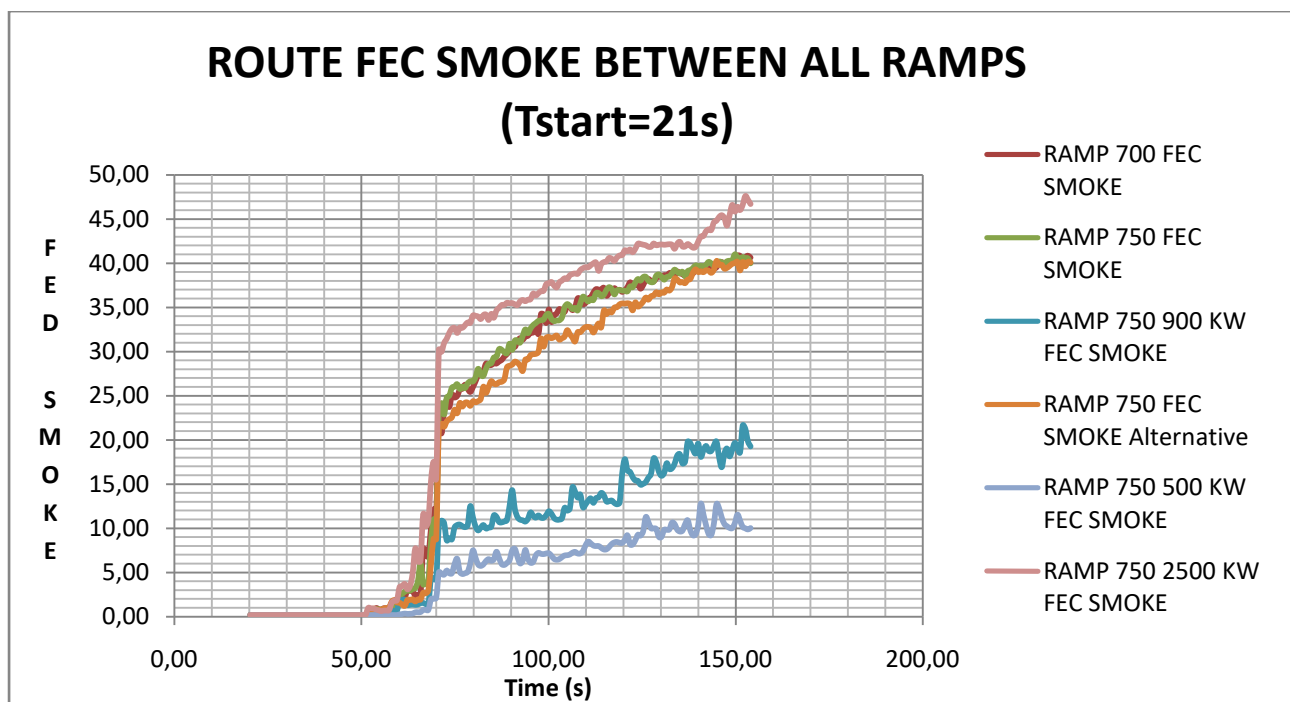
M26, οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται να είναι και μικρότερες. Και εδώ παίζει πολύ μεγάλο ρόλο η ένταση της πυρκαγιάς, καθόσον για μεγαλύτερη ένταση η θερμοκρασία αυξάνεται πολύ πιο γρήγορα. Αντίθετα, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 53, αύξηση της έντασης της πυρκαγιάς προκαλεί μείωση της ορατότητας.



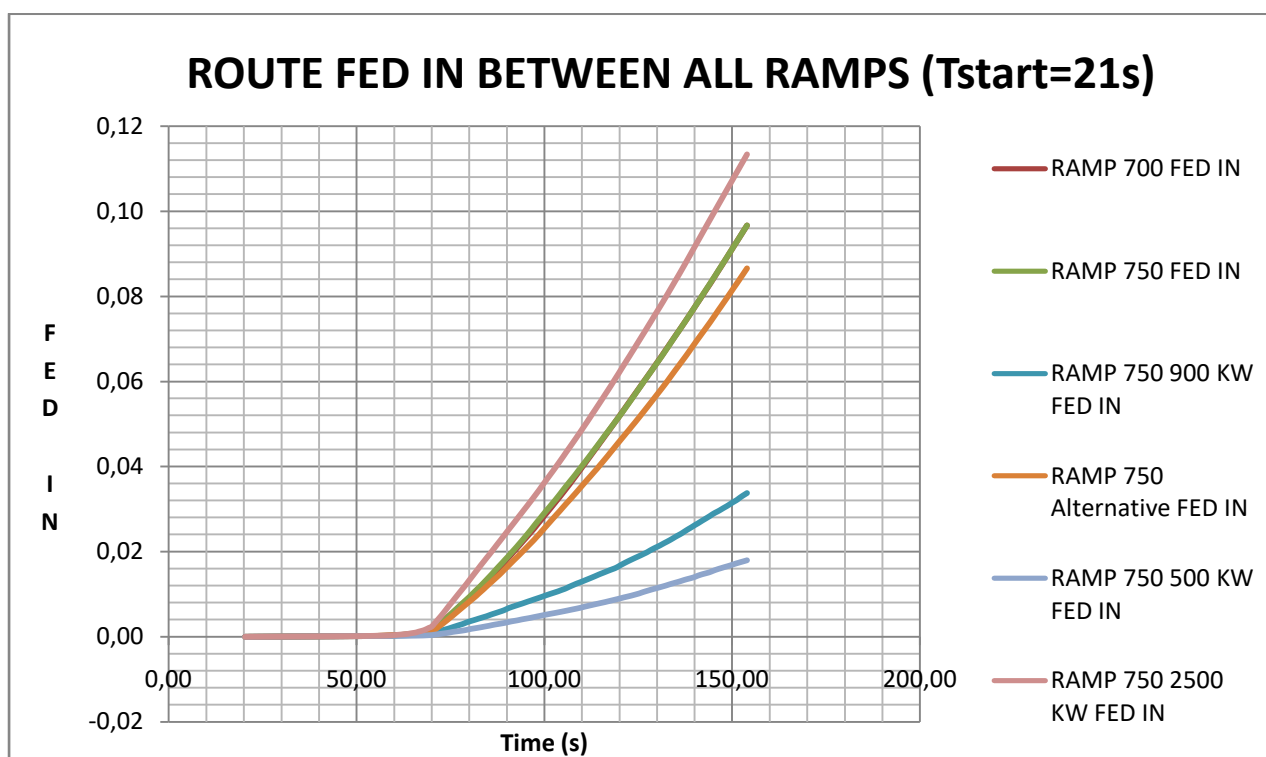
Εικόνα 50 Διάγραμμα που απεικονίζει την ορατότητα σε συνάρτηση με τον χρόνο.



Εικόνα 51 Διαγραμματική απεικόνιση της θερμοκρασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο κατά τη διαδρομή του αγήματος.



Εικόνα 52 Διαγραμματική απεικόνιση της διακύμανσης του συντελεστή FEC SMOKE σε συνάρτηση με το χρόνο κατά τη διαδρομή του αγήματος (ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Λήφθηκε υπόψη μόνο το αυστηρότερο κριτήριο ορατότητας που είναι τα 4 m).



Εικόνα 53 Διαγραμματική απεικόνιση του συντελεστή FED IN σε συνάρτηση με το χρόνο κατά τη διαδρομή του αγήματος για όλα τα σενάρια πυρκαγιάς.

Τα διαγράμματα 54, 55 και 56 αφορούν στη διαδρομή του αγήματος. Τόσο η θερμοκρασία, όσο και οι συντελεστές FEC SMOKE και FED IN εμφανίζουν μεγαλύτερες τιμές όσο αυξάνεται η ένταση της πυρκαγιάς κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο.

T εκκίνησης (s)	Μέγεθος	Κρίσιμη τιμή	<b>RAMP 750 500 KW</b> Χρόνος που αντέχει το άγημα από τη στιγμή εκκίνησης (s)	<b>RAMP 750 900 KW</b> Χρόνος που αντέχει το άγημα από τη στιγμή εκκίνησης (s)	<b>RAMP 700 1846 KW</b> Χρόνος που αντέχει το άγημα από τη στιγμή εκκίνησης (s)	<b>RAMP 750 1846 KW</b> Χρόνος που αντέχει το άγημα από τη στιγμή εκκίνησης (s)	<b>RAMP 750 1846 KW Alternative</b> Χρόνος που αντέχει το άγημα από τη στιγμή εκκίνησης (s)	<b>RAMP 750 2500 KW</b> Χρόνος που αντέχει το άγημα από τη στιγμή εκκίνησης (s)
21	Θερμοκρασία (°C)	60	<b>50.4</b>	<b>48.3</b>	<b>48.3</b>	<b>48.3</b>	<b>49</b>	<b>46.2</b>
	FEC SMOKE	4 m: 1	<b>27.3</b>	<b>18.9</b>	<b>16.1</b>	<b>16.1</b>	<b>16.8</b>	<b>16.1</b>
		3.5 m: 1	<b>27.3</b>	<b>18.9</b>	<b>16.8</b>	<b>16.8</b>	<b>16.8</b>	<b>16.8</b>
		3 m: 1	<b>27.3</b>	<b>18.9</b>	<b>17.2</b>	<b>18.2</b>	<b>16.8</b>	<b>16.8</b>
		2.5 m: 1	<b>27.3</b>	<b>18.9</b>	<b>17.9</b>	<b>18.9</b>	<b>16.8</b>	<b>17.5</b>
FED IN	0.3	-	-	-	<b>287</b>	-	-	

Εικόνα 54 Τελικός συγκριτικός πίνακας όλων των σεναρίων.

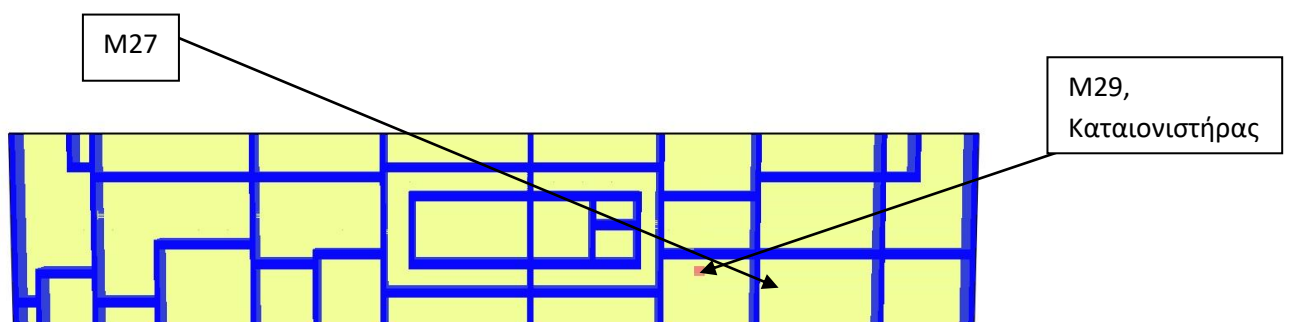
Από τον συγκριτικό πίνακα της Εικόνας 57 γίνεται αντιληπτό ότι όσο η ένταση της πυρκαγιάς αυξάνεται, τόσο μειώνεται και η χρονική αντοχή του αγήματος. Ωστόσο, επειδή οι οριακές τιμές των συντελεστών που εξετάζονται είναι πολύ μικρότερες συγκριτικά με τις τιμές των συντελεστών που πραγματικά αναπτύσσονται, παρατηρούμε ότι οι αντίστοιχες διαφορές αντοχής του αγήματος μεταξύ των σεναρίων είναι μικρές (με εξαίρεση βέβαια την περίπτωση RAMP 750 500 KW).



## Κεφάλαιο 7 – Προσομοίωση Πυρκαγιάς με Ενεργοποίηση συστήματος Κατάσβεσης

### 7.1 Εισαγωγή

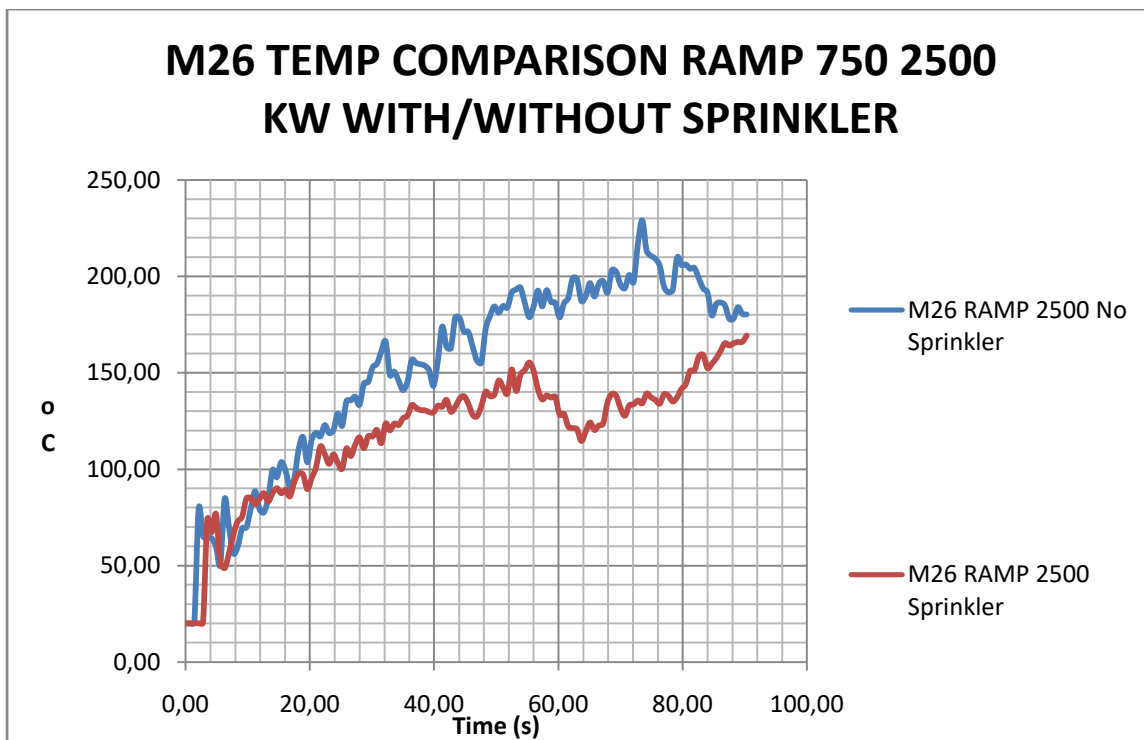
Στο (παρόν) κεφάλαιο 7, εξετάζεται ένα σενάριο κατά το οποίο, στο ήδη υπάρχον κατάστρωμα τοποθετείται ένας καταιονιστήρας ύδατος ο οποίος βρίσκεται ακριβώς επάνω από το σημείο της πυρκαγιάς. Επιπρόσθετα τοποθετούνται 2 ακόμα αισθητήρες θερμοκρασίας, ένας ακριβώς επάνω από το σημείο της πυρκαγιάς και ένας σε διπλανό δωμάτιο, προκειμένου να εντοπιστεί αν και εφόσον τα τοιχώματα αντέχουν τη θερμική καταπόνηση (Εικόνα 58).



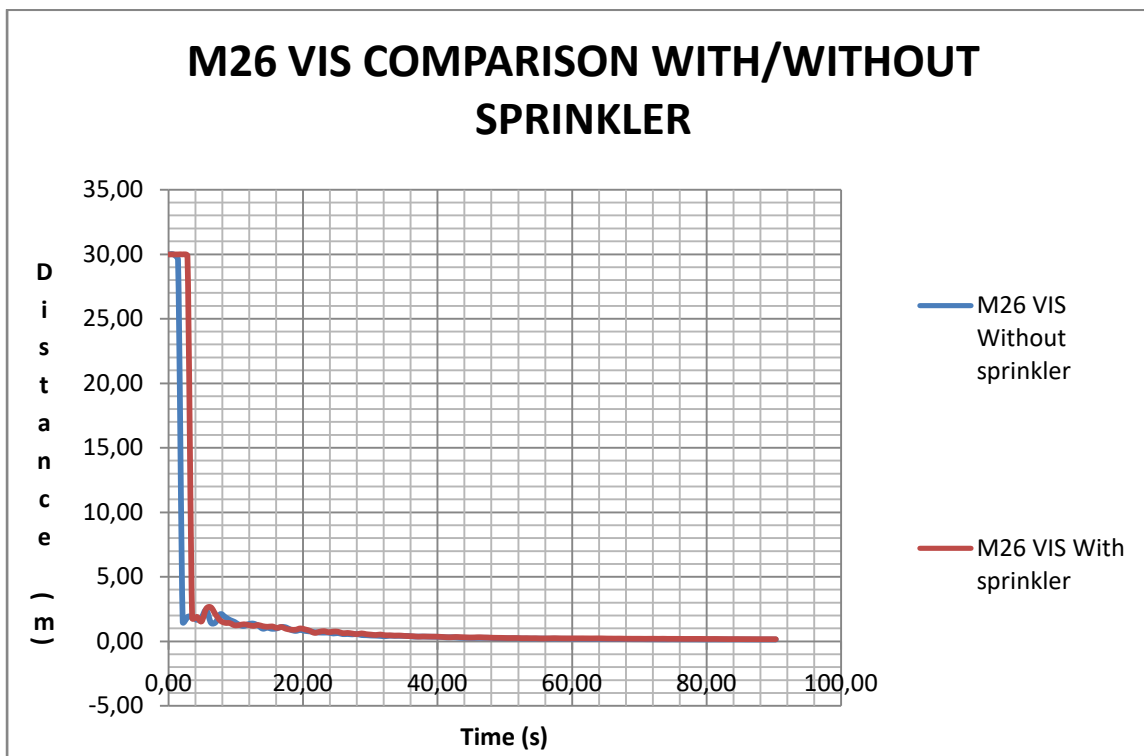
Εικόνα 55 Θέσεις αισθητήρων θερμοκρασίας M29, M27 καθώς και του καταιονιστήρα ύδατος.

### 7.2 – Τοποθέτηση καταιονιστήρα

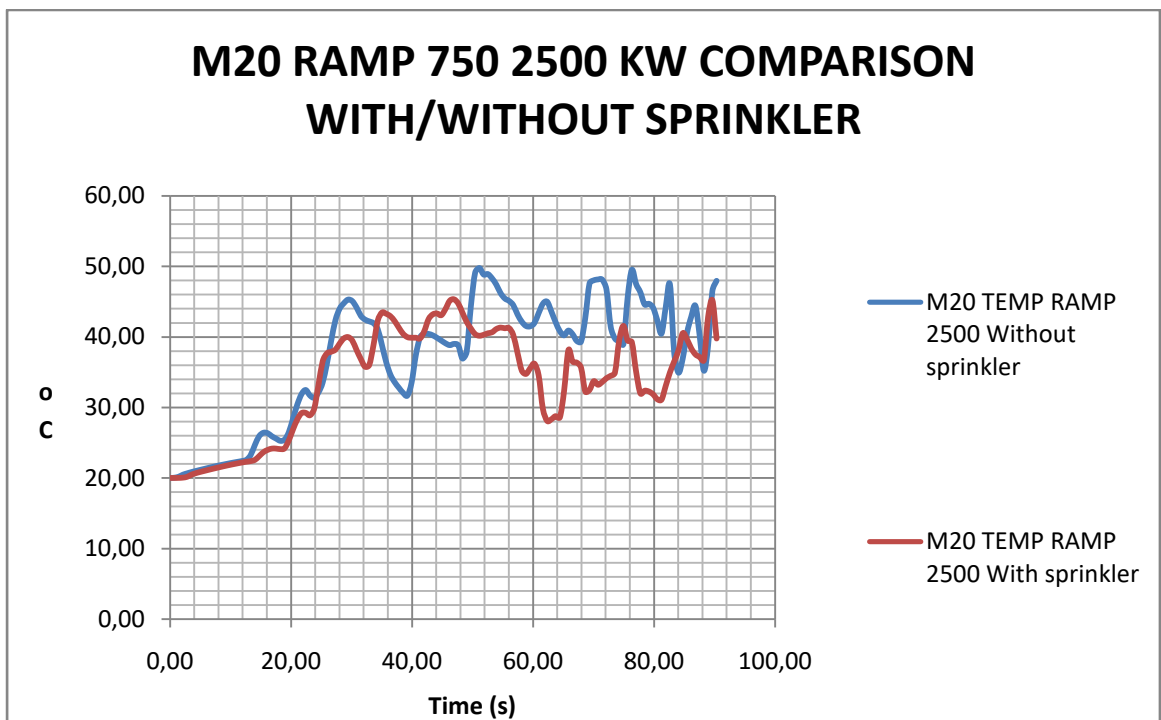
Προκειμένου να εντοπιστεί αν η παρουσία ενός καταιονιστήρα ύδατος θα περιορίζε τις τιμές των συντελεστών που προκύπτουν λόγω των παραγώγων της πυρκαγιάς, στο σενάριο RAMP 750 2500 KW τοποθετήθηκε ένα sprinkler ακριβώς επάνω από τη θέση της πυρκαγιάς. Ο συγκεκριμένος ενεργοποιείται για θερμοκρασία  $68^{\circ}\text{C}$  και απελευθερώνει νερό πάνω στην πυρκαγιά. Όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα 59 έως και 65, η παρουσία του καταιονιστήρα μειώνει αισθητά τις τιμές των συντελεστών των παραγώγων της πυρκαγιάς. Η παροχή του νερού είναι 20 gpm και ο χρόνος ψεκασμού είναι 30 sec.



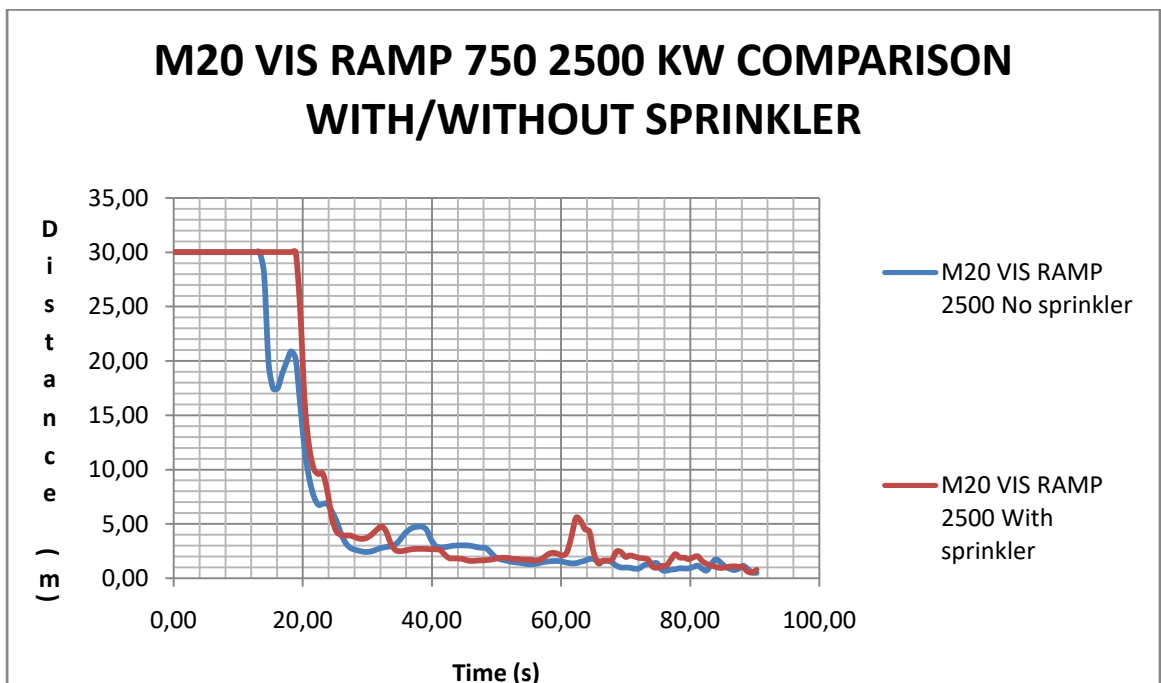
Εικόνα 56 Θερμοκρασία σε συνάρτηση με τον χρόνο για τον αισθητήρα M26 με και χωρίς την παρουσία του καταιονιστήρα.



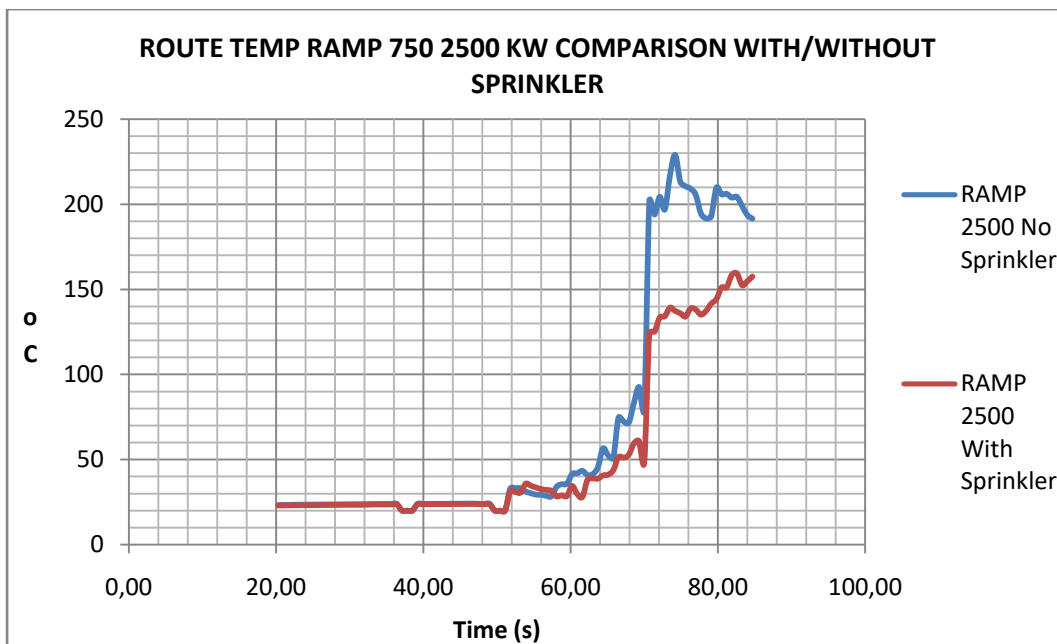
Εικόνα 57 Διάγραμμα ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο για τον αισθητήρα M26 με και χωρίς την παρουσία του καταιονιστήρα.



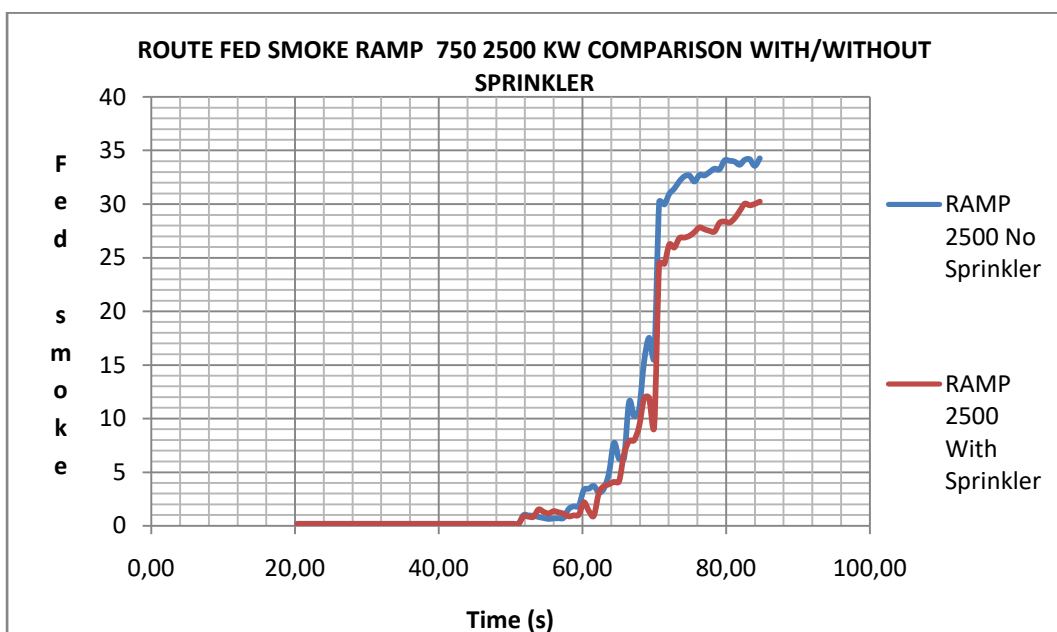
Εικόνα 58 Θερμοκρασία σε συνάρτηση με τον χρόνο για τον αισθητήρα M20 με και χωρίς την παρουσία του καταιονιστήρα.



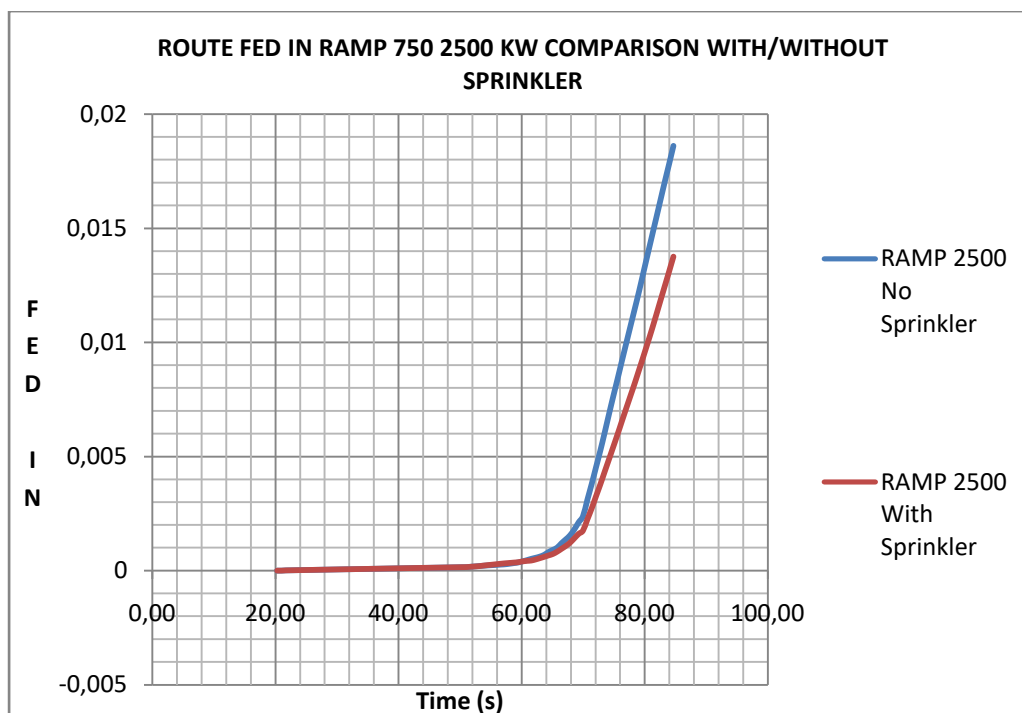
Εικόνα 59 Ορατότητα σε συνάρτηση με το χρόνο για τον αισθητήρα M20 με και χωρίς την παρουσία του καταιονιστήρα.



Εικόνα 60 Θερμοκρασία σε συνάρτηση με τον χρόνο για την διαδρομή του αγήματος με και χωρίς την παρουσία του καταιονιστήρα.

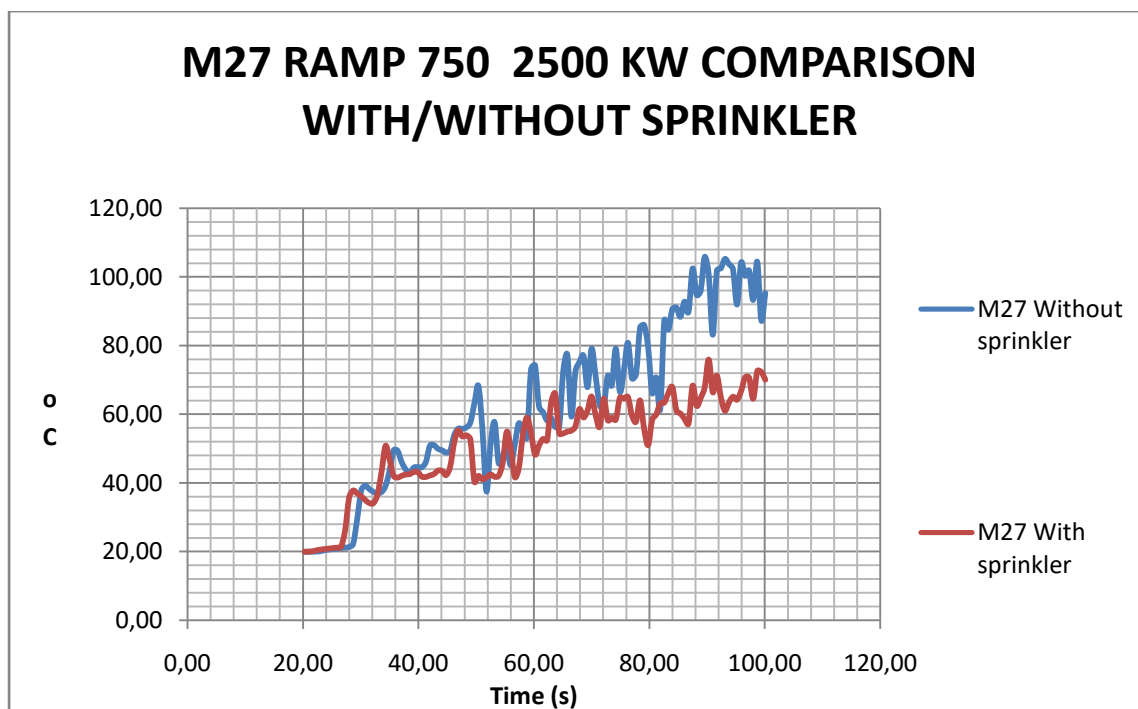


Εικόνα 61 Συντελεστής FED SMOKE για το αυστηρότερο κριτήριο ορατότητας σε συνάρτηση με το χρόνο κατά τη διαδρομή του αγήματος με και χωρίς την παρουσία του καταιονιστήρα.

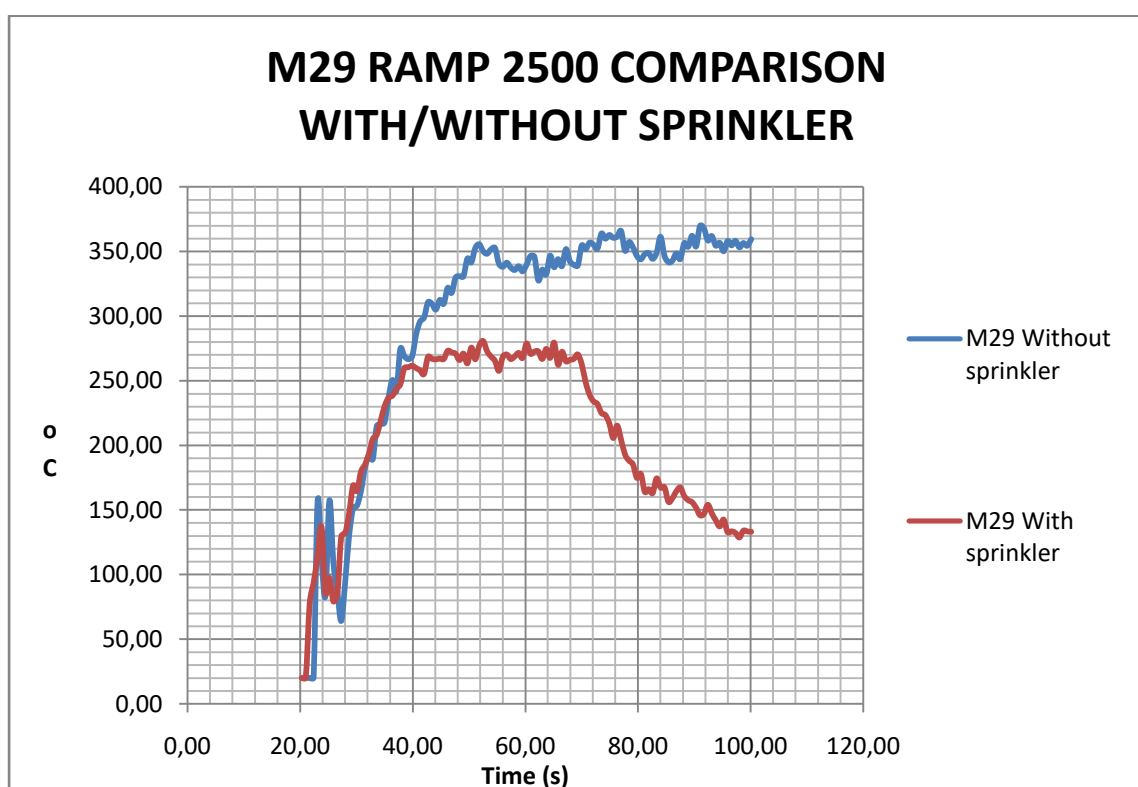


Εικόνα 62 Συντελεστής FEDIN σε συνάρτηση με το χρόνο κατά τη διαδρομή του αγήματος με και χωρίς την παρουσία καταιονιστήρα.

Στα διαγράμματα 66 και 67, απεικονίζεται η θερμοκρασία σε συνάρτηση με τον χρόνο για έναν αισθητήρα που βρίσκεται πάνω ακριβώς από την πυρκαγιά (M29) και για έναν ο οποίος βρίσκεται σε διπλανό χώρο (M27). Αρχικά, γίνεται αντιληπτό ότι η μέγιστη θερμοκρασία που αναπτύσσεται είναι πολύ μικρότερη συγκριτικά με το σημείο τήξης του γαλβανισμένου χάλυβα (περίπου  $1500^{\circ}\text{C}$ ) ενώ επίσης η μέγιστη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στο άλλο δωμάτιο είναι περίπου το 1/3 της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο χώρο της πυρκαγιάς. Τέλος επόμενο είναι η παρουσία του καταιονιστήρα να μειώσει ακόμα περισσότερο τη θερμοκρασία τόσο του αισθητήρα M27 όσο και του M29.



Εικόνα 63 Θερμοκρασία σε συνάρτηση με τον χρόνο για τον αισθητήρα M27 με και χωρίς την παρουσία του καταιονιστήρα.



Εικόνα 64 Θερμοκρασία σε συνάρτηση με το χρόνο για τον αισθητήρα M29 με και χωρίς την παρουσία του καταιονιστήρα.

## Κεφάλαιο 8- Σύνοψη - Μελλοντικά βήματα

### 8.1 Εισαγωγή

Στο (παρόν) κεφάλαιο 8, παρατίθενται μια σύνοψη των όσων αναλύθηκαν στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία καθώς και προτάσεις για μελλοντική έρευνα και πιθανές σχεδιαστικές αλλαγές.

### 8.2 Σύνοψη

Αρχικά, στο Μέρος 1 της παρούσας διπλωματικής εργασίας έγινε μια αναλυτική παρουσίαση της πυρκαγιάς, όπου γίνεται περιγραφή θεμάτων όπως είναι τα συστατικά της, οι τρόποι καταπολέμησής της κ.ο.κ. Εν συνεχεία πραγματοποιήθηκε σύγκριση των κανονισμών του Κεφαλαίου II-2 της SOLAS που αφορά στην πυρασφάλεια στα επιβατικά πλοία και των όσων ισχύουν σε μια φρεγάτα του πολεμικού ναυτικού όπου διαπιστώθηκε τελικά ότι το εν λόγω πλοίο τους πληροί σε αρκετά μεγάλο ποσοστό. Κατόπιν στο Μέρος 2, γίνεται μια γενική περιγραφή των μοντέλων προσομοίωσης πυρκαγιάς που υπάρχουν σήμερα και μια ειδικότερη για τον προσομοιωτή FDS που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία. Γίνεται αναλυτική περιγραφή των συνθηκών προσομοίωσης και διεξάγονται έξι διαφορετικά σενάρια πυρκαγιάς. Οι διαφορές μεταξύ των σεναρίων αφορούν στη μέγιστη ένταση της πυρκαγιάς, τον χρόνο που αυτή εμφανίζεται, τους διαφορετικούς χρόνους ενεργοποίησης του αγήματος κ.ο.κ. Προκύπτει ότι, όσο αυξάνεται η ένταση της πυρκαγιάς και όσο καθυστερεί η ενεργοποίηση του αγήματος, τόσο λιγότερο χρόνο αντέχει το άγημα μέσα στον χώρο. Τέλος, η τοποθέτηση ενός καταιονιστήρα ύδατος ακριβώς πάνω από το σημείο της πυρκαγιάς, μειώνει κατά πολύ τις τιμές των παραγώγων της καύσης.

### 8.3 Προτάσεις έρευνας - Σχεδιαστικές αλλαγές

Από τα συμπεράσματα της παραγράφου 6.2, έγινε αντιληπτό ότι ο μεγαλύτερος κίνδυνος για ένα άγημα αντιμετώπισης σε ένα πολεμικό πλοίο τύπου φρεγάτας δεν είναι τόσο οι βλαβερές ουσίες που εισπνέει το προσωπικό του αγήματος μέχρι να φτάσει στον χώρο, αλλά ο καπνός, που περιορίζει την ορατότητα, και η θερμοκρασία. Επίσης, όσο νωρίτερα αντιδράσει το άγημα στην ανακοίνωση για συμβάν πυρκαγιάς από το μεγαφωνικό σύστημα, τόσο αυξάνεται η πιθανότητα κατάσβεσης αλλά και η ίδια η επιβίωση του αγήματος. Στο πλαίσιο αυτό, οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα είναι οι εξής:

- Εφόσον το πλοίο ήδη έχει ένα επαρκές δίκτυο πυρκαγιάς το οποίο μάλιστα εξυπηρετείται από 9 αντλίες μεγάλης παροχής, προτείνεται η δημιουργία ενός δικτύου σωληνώσεων το οποίο να φέρει θαλασσινό νερό το οποίο να εκτείνεται σε όλο το μήκος του πλοίου και να έχει πάνω του σποραδικά τοποθετημένους καταιονιστήρες (sprinklers). Άλλωστε, όπως εξετάστηκε και στο Κεφάλαιο 7, η παρουσία ενός και μόνο καταιονιστήρα μειώνει δραματικά τις τιμές των συντελεστών των παραγώγων της καύσης. Ο έλεγχος αυτών θα μπορεί να πραγματοποιείται από το κέντρο ελέγχου πλοίου, το οποίο, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2, είναι μόνιμα επανδρωμένο. Έτσι, σε περίπτωση πυρκαγιάς μικρής εκτάσεως, θα γίνεται ενεργοποίηση του συστήματος αυτού με αποτέλεσμα άμεση

κατάσβεση. Ωστόσο, ακόμα και στην περίπτωση συμβάντος μεγάλης πυρκαγιάς, ο περιοδικός ψεκασμός νερού μπορεί να περιορίσει τον καπνό και να μειώσει τη θερμοκρασία και κατ' επέκταση να διευκολύνει τη διέλευση του αγήματος προς τον εκάστοτε χώρο. Να σημειωθεί όμως, ότι το άγημα ενόσω βρίσκεται σε χώρο υψηλών θερμοκρασιών δεν θα πρέπει να βρέχεται συνεχώς, διότι λόγω των υψηλών θερμοκρασιών, το νερό που έχει πέσει πάνω στο δέρμα εξατμίζεται προκαλώντας σοβαρά εγκαύματα.

- Η τοποθέτηση ενός κλειστού κυκλώματος παρακολούθησης με κάμερες σε καίρια σημεία μπορεί να βοηθήσει ακόμα περισσότερο. Αφενός, θα εξετάζεται πλέον και οπτικά για το αν το ηχητικό σήμα ενεργοποίησης του συστήματος πυρανίχνευσης είναι αληθές και αφετέρου θα μπορούμε να έχουμε ζωτικές πληροφορίες για την πυρκαγιά προτού καν φτάσει το άγημα στον χώρο. Οι πληροφορίες αφορούν στον τύπο της πυρκαγιάς (στερεών, υγρών καυσίμων κ.ο.κ.), την έκτασή της, τις βλάβες που έχει προξενήσει στο χώρο (λίωσιμο κλιμάκων, βλάβη σε μηχανήματα κ.ο.κ.), τη θέση της κ.ο.κ. Τέλος, σε περίπτωση τοποθέτησης ενός δικτύου όπως αυτό που αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, ο χειρισμός των καταιονιστήρων θα γίνει ασφαλέστερος, αφού μέσα από τις κάμερες θα μπορεί να προσδιορίζεται πολύ εύκολα η θέση του αγήματος.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Floyd J.E., Hunt S.P., Williams F.W., Tatm P.A. (2005) A Network Fire Model for the Simulation of Fire Growth and Smoke Spread in Multiple Compartments with Complex Ventilation. *Journal of Fire Protection Engineering* 15:199 - 229
2. Forney G.P.(2007)User's Guide for Smokeview Version 5 - A Tool for Visualizing Fire DynamicsSimulation Data, NIST Special Publication 1017-1, Government Printing Office
3. F.R. Steward, L. Morrison, J. Mehaffey, (1992), Full Scale Fire Tests for Ship Accommodation Quarters, *Fire Technology*, 28; 31-47
4. Hellenic Aerospace Industry (HAI), April 2013, Industrial Safety and FOD training manual, Chalkida, Greece
5. IMO, History of Solas. Διαθέσιμοστοδιαδικτυακότοπωwww.imo.org (lastaccess 28/2/2016)
6. IMO, MSC/CIRC.1003, Guidelines on a simplified calculation for the total amount of combustible materials per unit area in accommodation and service spaces, June 2001
7. 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
8. Kaiktsis L. (1995), Direct and Large Eddy Simulation: An Overview, Institut fur Enegietechnik, Zurich, Switzerland
9. Korhonen T., Hostikka, S.(2010) Fire Dynamics Simulation with Evacuation: FDS+Evac - Technical Reference and User's Guide. VTT Technical Research Centre of Finland
10. McGrattan K., McDermott R., Hostikka S., Floyd J. (2010) NIST Special Publication 1019-5 Fire Dynamics Simulator (Version 5), User's Guide. Washington: U.S. Government Printing Office press, ISBN: 0-8493-1300-7
11. McGrattan K., Hostikka S., McDermott R., Floyd J., Weinschenk C., Overholt K. (2014) NIST Special Publication 1018 - Fire Dynamics Simulator -Technical Reference Guide - Volume 1: Mathematical Model. Maryland, USA: NationalInstitue of Standards and Technology.
12. N.A. Dembsey, P.J. Pagni, R.B. Williamson, (1995), Compartment fire experiments: Comparison with Models, *Fire Safety Journal*, 25; 187-227.
13. Naval Standarisation Technical Manual, Chapter 079, Damage Control, United States Navy.
14. N.Nikolaou, K.Spyrou ,(2009),Numerical fire modeling for passenger ships, IMAMInternational Maritime Association of the Mediterranean, Istanbul.
15. 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.
16. Spyrou K., Themelis N.,Nikolaou N.(2013) Towards risk-based fire safety assessment ofpassengerships.In Proceedings of the 15th Conference of the International Maritime Association ofthe Mediterranean (IMAM 2013), 14-17 October 2013, A Curuna, Spain, IMAM 2013.
17. Themelis N., Niotis, K.J. Spyrou (2010) , Managing uncertainty in performance-based fire safety assessments of ships, School of naval Architecture and Marine Engineering
18. Themelis N., Spyrou J.(2012) Probabilistic Fire Safety Assessment of Passenger Ships.*JournalofShipResearch*, SNAME, 56 (4): 252-275.
19. W.W. Jones, R.D. Peacock, G.P. Forney, P.A. Reneke, CFAST – Consolidated Model Of Fire Growth and Smoke TRANSPORT (Version 6), User's Guide, NIST Special Publication 1041, April 2009.

20. Αξαόπουλος Ν. (2015) Υπολογισμός δείκτη διακινδύνευσης για επιβατικά πλοία. Διπλωματική εργασία. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών.
21. Αρχηγείο Στόλου (2008) Τεχνικές Αντιμετώπισης Πυρκαγιάς (ΤΕΑΠ), Σαλαμίνα: Ναύσταθμος Σαλαμίνας.
22. Πάλλα Α.(2012) Μελέτη πυρκαγιάς σε επιβατηγό πλοίο: Αποτελεσματικότητα διαχωριστικών και μεταβολή παραμέτρων βιωσιμότητας. Διπλωματική εργασία. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών.
23. Σημιτσής Δ. (2013), Μονοξείδιο του Άνθρακα, Ο Σιωπηλός Δολοφόνος, ΕΑΠΣ, Αθήνα.
24. Ψύλλα Ε. (2010) Προσομοίωση πυρκαγιάς σε επιβατηγό πλοίο με χρήση των προγραμμάτων CFAST & FDS. Διπλωματική εργασία. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών.