

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΝΑΥΤΙΚΗ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΕΠΙΣΤΗΜΗ



**Μελέτη Περιπτώσεων Διάδοσης Πυρκαγιάς σε Κοινόχρηστους
Χώρους Κρουαζιερόπλοιου**

ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΣ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

ΣΟΦΙΑ ΙΩΑΝΝΟΥ

A.M 08115813

ΑΘΗΝΑ 2019

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΝΑΥΤΙΚΗ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ
ΕΠΙΣΤΗΜΗ**

**Μελέτη Περιπτώσεων Διάδοσης Πυρκαγιάς σε Κοινόχρηστους
Χώρους Κρουαζιερόπλοιου**

Σοφία Ιωάννου

Επιβλέπων Καθηγητής
Κωσταντίνος Σπύρου

Μέλη Επιτροπής Αξιολόγησης
Γεώργιος Ζαραφονίτης
Νικόλαος Βεντικός

Η Διατριβή Διπλώματος Ειδίκευσης υποβλήθηκε προς μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων απόκτησης του μεταπτυχιακού τίτλου Ναυτικής και Θαλάσσιας Τεχνολογίας και Επιστήμης της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών.

Αθήνα 2019

Πρόλογος

Η παρούσα διατριβή εκπονήθηκε στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών στη Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Κωσταντίνο Σπύρου για την υποστήριξη αυτής της ιδέας και την παραχώρηση όλων των χρήσιμων πληροφοριών για να ολοκληρωθεί η εργασία. Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω την κ. Ιωάννα Κορομηλά, διδακτορική φοιτήτρια στη Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών για την πολύτιμη καθοδήγηση και τη βοήθεια της στην παρούσα μελέτη.

Περίληψη

Η μελέτη πυρασφάλειας στον τομέα της ναυτιλίας είναι πολύ σημαντική τόσο κατά τη σχεδίαση όσο και στη λειτουργία του πλοίου. Τα τελευταία χρόνια με την εξέλιξη της τεχνολογίας υπάρχει τάση μελέτης σεναρίων πυρκαγιάς με χρήση εργαλείων προσομοίωσης. Έχουν πραγματοποιηθεί ήδη αρκετές και σημαντικές μελέτες στον κατασκευαστικό και ευρύτερο βιομηχανικό τομέα, όμως η επιστημονική κοινότητα τον τομέα της ναυπηγικής άρχισε πολύ πρόσφατα να μελετά σενάρια πυρκαγιάς μέσω προσομοιώσεων. Η παρούσα εργασία έχει ως κύριο στόχο την εφαρμογή μοντέλων προσομοίωσης σε χώρους κρουαζιερόπλοιου για την εκτενέστερη μελέτη σεναρίων πυρκαγιάς. Συγκεκριμένα πραγματοποιούνται δύο μελέτες: α) σενάρια εξέτασης του τρόπου έναρξης της πυρκαγιάς, και β) σενάρια εξέτασης του τρόπου διάδοσης της πυρκαγιάς και των παραγώγων αυτής.

Για την εκπόνηση της εργασίας χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Pyrosim στο οποίο σχεδιάστηκε μοντέλο που περιλαμβάνει δύο καταστρώματα που συνδέονται μεταξύ τους με σκάλες, αλλά και θέατρο που εκτείνεται καθ' ύψος σε δύο καταστρώματα. Για τους χώρους που αναφέρθηκαν σχεδιάστηκαν τα αντικείμενα ως μέρος της επίπλωσης καθώς επίσης καθορίστηκαν τα υλικά και οι θερμικές τους ιδιότητες. Για την πρώτη μελέτη θεωρήθηκε μέρος της αρχικής γεωμετρίας ώστε να μειωθεί ο χρόνος υλοποίησης και να έχουμε αυξημένη ανάλυση και αξιοπιστία στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Για τη δεύτερη μελέτη, απομονώθηκαν τα 2 καταστρώματα για να εξεταστεί η διάδοση από το κάτω κατάστρωμα στο πάνω. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, μεταξύ άλλων η διάδοση της πυρκαγιάς, η εξέλιξη της θερμοκρασίας, του καπνού και άλλων προϊόντων της καύσης στο χώρο, φαίνονται στο λογισμικό Smokeview.

Για κάθε σενάριο που μελετήθηκε κατασκευάστηκαν οι καμπύλες διάδοσης πυρκαγιάς (HRR) και έγινε σύγκριση αυτών. Η πρώτη μελέτη μέσα από τα συγκριτικά διαγράμματα για τις καμπύλες HRR έδειξε το πόσο σημαντικός είναι ο τρόπος έναρξης μιας πυρκαγιάς καθώς καθορίζει την ένταση και το χρόνο ανάπτυξής της. Από τη δεύτερη μελέτη προκύπτει ότι η ποσότητα θερμότητας που εκλύεται από την καύση των αντικειμένων στη πραγματική τους θέση στο χώρο είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση

με την ποσότητα που εκλύεται στη περίπτωση των fuel packages. Έτσι το δεύτερο σενάριο εξελίσσεται πιο γρήγορα σε χρόνο από το πρώτο.

Ως βασικό συμπέρασμα προκύπτει η ορθότητα της μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε για την σύγκριση των σεναρίων, η οποία επαληθεύεται από τις μορφές των καμπυλών HRR, οι οποίες προέκυψαν μετά την ολοκλήρωση των προσομοιώσεων.

Abstract

The fire safety study in the shipping sector is very important both for the ship's design and her operation. In recent years, because of the development of technology, there is a tendency to study fire scenarios using simulation tools. Several and important studies have already been carried out in the construction and wider industrial sector, but the shipbuilding scientific community has recently started studying fire scenarios running simulations. The main objective of the present work is to apply simulation models to cruise ships and study in more detail fire scenarios. Specifically, two studies are carried out: a) scenarios with a difference in the way the fire starts, and b) scenarios with difference in the manner of fire propagation and its derivatives.

To accomplish the study the Pyrosim software was used, in which was designed a vessel model that includes two decks connected by stairs, and a theater that extends on two decks in height. For the mentioned areas, all objects were designed as part of the furnishing as well as their materials and thermal properties. For the implementation of the first part of the study the area was studied was limited to reduce the simulation time and obtain higher analysis and reliability in the results. For the second part of the study, the 2 decks were isolated to examine the spread from the lower deck to the higher. The results of the simulations, including the fire spread, the temperature, smoke propagation and other combustion products, can be seen in Smokeview software.

For each scenario, its HRR curve was created and compared. According the first study, the graphs of the HRR curves, showed how important is the way a fire starts, as it defines its intensity and the time of the development. Through the second study we can conclude that the simulation with all furniture normal placed in the area, is slower and the intensity of heat is higher than the one of the fuel packages set in order inside the room.

The main conclusion is the correctness of the proposed method used for the comparison of the scenarios, which is verified by the final forms of the HRR curves which were created after the completion of the simulations.

Περιεχόμενα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	i
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	ii
ABSTRACT	iv
ΣΧΗΜΑΤΑ	viii
ΠΙΝΑΚΕΣ	x
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	10
1.1 ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΣΤΑ ΠΛΟΙΑ	10
1.2 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΡΟΚΛΗΣΗΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ.....	11
1.3 ΣΗΜΑΝΤΙΚΑ ΝΑΥΤΙΚΑ ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ ΛΟΓΩ ΠΡΟΚΛΗΣΗΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ.....	13
1.3.1 <i>Dona Paz (1987)</i>	14
1.3.2 <i>Scandinavian Star (1990)</i>	14
1.3.3 <i>Norman Atlantic (2014)</i>	15
1.3.4 <i>Ελευθέριος Βενιζέλος (2018)</i>	16
1.4 ΠΕΡΙΓΡΑΦΜΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	17
2 ΣΤΟΧΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	18
2.1 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	18
2.1.1 <i>Μελέτες του εργαστηρίου</i>	18
2.1.2 <i>Μελέτες πυρασφάλειας σε πλοία</i>	18
2.1.3 <i>Μελέτες προσομοίωσης πυρκαγιάς</i>	19
2.2 ΣΤΟΧΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	20
3 ΠΥΡΚΑΓΙΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΑ.....	21
3.1 ΟΡΙΣΜΟΙ	21
3.2 ΦΑΣΕΙΣ ΤΥΠΙΚΗΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ	22
3.2.1 <i>Επώαση</i>	22
3.2.2 <i>Ανάπτυξη πυρκαγιάς</i>	22
3.2.3 <i>Πλήρης ανάπτυξη</i>	23
3.2.4 <i>Απόσβεση</i>	23
3.3 ΔΙΑΔΟΣΗ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ.....	24
3.4 ΚΑΜΠΥΛΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ (HRR).....	25
3.5 ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΚΑΥΣΗΣ. HEAT OF COMBUSTION CONVERSION.....	29
3.6 ΠΑΡΑΓΩΓΑ ΚΑΥΣΗΣ	29
3.6.1 <i>Μονοξείδιο του άνθρακα</i>	30
3.6.2 <i>Διοξείδιο του άνθρακα</i>	30
3.6.3 <i>FED</i>	30
3.6.4 <i>Καπνός</i>	31
3.6.5 <i>Θερμοκρασία</i>	31
4 ΜΕΛΕΤΗ ΠΥΡΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΣΤΑ ΠΛΟΙΑ	33
4.1 ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΠΥΡΑΣΦΑΛΕΙΑΣ	33
4.1.1 <i>Διεθνής σύμβαση SOLAS</i>	34
4.1.2 <i>Κώδικας FSS</i>	37
4.1.3 <i>Κώδικας FTP</i>	38
4.1.4 <i>Ατυχήματα που οδήγησαν στις αλλαγές των κανονισμών</i>	39
4.2 ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ ΠΑΚΕΤΑ.....	40
4.2.1 <i>Μοντέλα ζώνης (Zone Models)</i>	40
4.2.2 <i>Μοντέλα πεδίου (Field Models)</i>	41

4.2.3	<i>Pyrosim</i>	42
5	ΥΛΙΚΑ ΣΕ ΚΡΟΥΑΖΙΕΡΟΠΛΟΙΑ	44
5.1	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	44
5.2	ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ.....	45
6	ΕΦΑΡΜΟΓΗ	47
6.1	ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ.....	47
6.2	ΕΠΙΛΟΓΗ ΥΛΙΚΩΝ.....	49
6.3	ΣΕΝΑΡΙΑ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	50
6.3.1	<i>Μελέτη μεθόδων έναρξης πυρκαγιάς</i>	52
6.3.2	<i>Μελέτη διάδοσης πυρκαγιάς μεταξύ δύο καταστρωμάτων</i>	56
7	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	59
7.1	ΜΕΛΕΤΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΝΑΡΞΗΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ.	59
7.1.1	<i>Απευθείας έναρξη και διάδοση της πυρκαγιάς</i>	59
7.1.2	<i>Έναρξη πυρκαγιάς με ακτινοβολία</i>	61
7.1.3	<i>Έναρξη πυρκαγιάς με αγωγή</i>	63
7.1.4	<i>Σύγκριση μεθόδων</i>	66
7.2	ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ ΜΕΤΑΞΥ ΔΥΟ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΩΝ.	67
7.2.1	<i>Απευθείας έναρξη και διάδοση της πυρκαγιάς</i>	67
7.2.2	<i>Διάδοση της πυρκαγιάς με fuel packages</i>	70
7.2.3	<i>Σύγκριση μεθόδων</i>	74
8	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	75
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	77
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	82

Σχήματα

Σχήμα 1.1: Το <<τρίγωνο>> της φωτιάς.	12
Σχήμα 1.2: Η πυρκαγιά στο <<Dona raz>>.....	14
Σχήμα 1.3: Κατάσβεση πυρκαγιάς στο <<Scandinavian Star>>.	15
Σχήμα 1.4: Η πυρκαγιά στο <<Norman Atlantic>>.	16
Σχήμα 1.5: Το πλοίο <<Ελευθέριος Βενιζέλος>> υπό κλίση.	17
Σχήμα 3.1: Καμπύλη HRR και στάδια ανάπτυξης πυρκαγιάς (Bwalya, 2008).	26
Σχήμα 4.1: Συμβολισμοί ελέγχου πυρκαγιάς (IMO)	34
Σχήμα 4.2: Εξισώσεις Navier-Stokes για ασυμπίεστη ροή.....	41
Σχήμα 4.3: Θεμελιώδης εξισώσεις υπολογιστικής ρευστομηχανικής.....	42
Σχήμα 5.1: Υλικά που χρησιμοποιούνται στα κρουαζιερόπλοια.....	45
Σχήμα 6.1: Καθίσματα θεάτρου.....	47
Σχήμα 6.2: Θέατρο και χώροι άνω καταστρώματος.....	48
Σχήμα 6.3: Θέατρο και χώροι κάτω καταστρώματος.....	48
Σχήμα 6.4: Γεωμετρία που επιλέχθηκε για ανάλυση	49
Σχήμα 6.5: Πλάγια όψη άνω και κάτω καταστρώματος.	49
Σχήμα 6.6: Ορισμός επιφάνειας στο Pyrosim.....	52
Σχήμα 6.7: Ορισμός επιφάνειας που ξεκινάει η φωτιά.	53
Σχήμα 6.8: Περιοχή έναρξης πυρκαγιάς για το σενάριο 1.	53
Σχήμα 6.9: Περιοχή έναρξης πυρκαγιάς για το σενάριο 2.	54
Σχήμα 6.10: Πλάγια όψη αντικειμένου που μεταδίδει θερμότητα για το σενάριο 2.	54
Σχήμα 6.11: Σωματίδιο (στο κίτρινο κύκλο) που προκαλεί ανάφλεξη στο σενάριο 3. .	55
Σχήμα 6.12: Ιδιότητες επιφάνειας του σωματιδίου.....	55
Σχήμα 6.13: Κάτοψη του κάτω καταστρώματος, όπου ξεκινάει η πυρκαγιά.....	56
Σχήμα 6.14: Κάτοψη του κάτω καταστρώματος με χρήση fuel packages.	57
Σχήμα 6.15: Κάτοψη του άνω καταστρώματος με χρήση fuel packages.....	58

Σχήμα 7.1: Διάδοση πυρκαγιάς στο χώρο για το σενάριο 1.....	59
Σχήμα 7.2: Αντικείμενα που επηρεάστηκαν με το πέρας της πυρκαγιάς στο σενάριο 1.	60
Σχήμα 7.3: Διάγραμμα καμπύλης HRR – χρόνου για το σενάριο 1.	60
Σχήμα 7.4: Απεικόνιση μέγιστης θερμοκρασίας στα 1150 sec (σενάριο 1).....	61
Σχήμα 7.5: Εξέλιξη της πυρκαγιάς στα 770 sec (σενάριο 2).....	61
Σχήμα 7.6: Διάγραμμα καμπύλης HRR – χρόνου (σενάριο 2).....	62
Σχήμα 7.7: Απεικόνιση μέγιστης θερμοκρασίας στα 940 sec (σενάριο 2).....	62
Σχήμα 7.8: Απεικόνιση θερμοκρασίας στα 1150 sec (σενάριο 2).	63
Σχήμα 7.9: Εξέλιξη της πυρκαγιάς στα 770 sec (σενάριο 3).....	63
Σχήμα 7.10: Εξέλιξη της πυρκαγιάς στα 1700 sec (σενάριο 3).....	64
Σχήμα 7.11: Διάγραμμα καμπύλης HRR – χρόνου (σενάριο 3).....	64
Σχήμα 7.12: Απεικόνιση μέγιστης θερμοκρασίας στα 2000 sec (σενάριο 3).....	65
Σχήμα 7.13: Απεικόνιση θερμοκρασίας στα 1150 sec (σενάριο 3).	65
Σχήμα 7.14: Συγκριτικό διάγραμμα καμπύλης HRR - χρόνου.....	66
Σχήμα 7.15: Διάδοση πυρκαγιάς στο χώρο του κάτω καταστρώματος στα 1450 sec... ..	70
Σχήμα 7.16: Διάδοση πυρκαγιάς στο χώρο του πάνω καταστρώματος στα 1980 sec ..	71
Σχήμα 7.17: Κλιμάκωση της θερμοκρασίας στο κάτω κατάστρωμα στα 1450 sec.....	72
Σχήμα 7.18: Κλιμάκωση της θερμοκρασίας στο πάνω κατάστρωμα στα 1980 sec.	72
Σχήμα 7.19: Διάγραμμα καμπύλης HRR – χρόνου (με τη χρήση των fuel packages). .	73

Πίνακες

Πίνακας 1: Στοιχεία από καταγεγραμμένες πυρκαγιές πλοίων (19 ^{ος} - 21 ^{ος} αιώνας). ...	13
Πίνακας 2: Θερμοκρασίες ανάφλεξης για διάφορα υλικά (Τάσιος, 1984)	22
Πίνακας 3: Εξισώσεις υπολογισμού του ρυθμού έκλυσης θερμότητας ανά στάδιο. ...	26
Πίνακας 4: Χαρακτηριστικές τιμές των CHF και TRP για διάφορα υλικά (SPFE 2002)..	28
Πίνακας 5: Παράγωγα πυρκαγιάς για διάφορα υλικά (SPFE 2002).	32
Πίνακας 6: Κεφάλαια σύμβασης SOLAS	35
Πίνακας 7: Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στη τελική γεωμετρία.	50
Πίνακας 8: Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν συγκεντρωτικά στα δύο καταστρώματα. ..	50

Κεφάλαιο 1

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Πυρκαγιές στα πλοία

Η πυρκαγιά αποτελεί έναν από τους πιο σημαντικούς κινδύνους για ένα πλοίο, αφού μπορεί να επηρεάσει άμεσα την ασφάλειά του, την υγεία των επιβαινόντων και το εξωτερικό περιβάλλον του, οδηγώντας πολλές φορές σε καταστροφικές συνέπειες.

Η πυρκαγιά σε ένα πλοίο είναι μια ιδιαίτερη περίπτωση, καθώς δύσκολα μπορεί να συγκριθεί με περιστατικά πυρκαγιάς που λαμβάνουν χώρα σε κτήρια ή βιομηχανικές εγκαταστάσεις στη στεριά. Παρά το γεγονός ότι το πλοίο βρίσκεται σε ένα περιβάλλον που το νερό υπάρχει σε πληθώρα, τα υλικά που υπάρχουν σε αυτό δεν επιτρέπουν πολλές φορές την κατάσβεσή της με χρήση νερού. Σε ένα πλοίο υπάρχουν τόνοι υγρών καυσίμων, ηλεκτρολογικός εξοπλισμός, μονάδες κλιματισμού, κινητήρες, λέβητες, αποθήκες εύφλεκτων υλικών και χώροι ενδιαιτήσεων (κουζίνες, σαλόνια, καμπίνες, τουαλέτες κ.α.). Έπειτα σημαντικό είναι και το φορτίο που μεταφέρει κάθε πλοίο. Τα δεξαμενόπλοια περιέχουν μεγάλες ποσότητες πετρελαίου ή υγρού φυσικού αερίου, δύο πολύ επικίνδυνα υλικά σε περίπτωση πυρκαγιάς. Τα πλοία εμπορευματοκιβωτίων ενδέχεται να περιέχουν ηλεκτρολογικό εξοπλισμό, μεγάλες ποσότητες από χαρτί, πλαστικό και άλλα υλικά που είναι εύκολα αναφλέξιμα. Τέλος, τα επιβατηγά πλοία απαιτείται να είναι χρηστικά και αισθητικά όμορφα, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται ποσότητες εύφλεκτων υλικών στους χώρους των ενδιαιτήσεων, όπου σε συνδυασμό με τον ανθρώπινο παράγοντα, και την αμέλειά του, καθιστούν τα πλοία αυτά ιδιαίτερα ευάλωτα σε περιστατικά πυρκαγιάς (Garri, 1992).

Σε περίπτωση έναρξης και διάδοσης πυρκαγιάς στο πλοίο, σημαντικό ρόλο έχει το περιβάλλον στο οποίο λειτουργεί. Το πλοίο βρίσκεται «απομονωμένο» από τις βασικές δυνάμεις πυρόσβεσης της στεριάς και πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα αποτελεσματικής κατάσβεσης με ίδια μέσα, ενώ παράλληλα θα πρέπει να διαφυλαχθεί η ανθρώπινη ζωή από τα παράγωγα της πυρκαγιάς και σε περίπτωση που κριθεί αναγκαίο θα πρέπει να υπάρξει μέριμνα για την γρήγορη και ασφαλή εκκένωση του πλοίου. Επιπλέον σημαντική είναι η γενική διαχείριση του ατυχήματος λόγω πυρκαγιάς

καθώς εκτός από τον ανθρώπινο παράγοντα θα πρέπει να διασφαλιστεί, εάν αυτό είναι δυνατό, η μεταλλική κατασκευή του πλοίου ώστε να προκληθούν οι μικρότερες δυνατές υλικές ζημιές. Παράλληλα, σε περίπτωση χρήσης μεγάλης ποσότητας νερού κατά την πυρόσβεση, είναι δυνατό το πλοίο να πάρει κλίση, να χάσει την ευστάθειά του και να ανατραπεί με αποτέλεσμα όχι μόνο την απώλεια του πλοίου αλλά και πιθανή ρύπανση του θαλάσσιου περιβάλλοντος από την εκροή πετρελαιοειδών (είτε φορτίο, είτε καύσιμο). Τέλος ιδιαίτερα στις περιπτώσεις κρουαζιερόπλοιων ακόμη και μετά την κατάσβεση της πυρκαγιάς πρέπει να έχει διασφαλιστεί ότι δε θα προκληθούν προβλήματα στην ηλεκτροδότηση του πλοίου ώστε μετά το συμβάν η μεταφορά των επιβατών σε αυτό να γίνει όσο πιο άνετα γίνεται και χωρίς ελλείψεις σε βασικές ανάγκες.

1.2 Συνθήκες πρόκλησης πυρκαγιάς

Μια πυρκαγιά απαιτεί την ύπαρξη οξυγόνου, καύσιμης ύλης και θερμότητας, ώστε να δημιουργηθεί και να διατηρήσει τη φλόγα. Οι τρεις αυτές συνθήκες αποτελούν το λεγόμενο «τρίγωνο» της φωτιάς και είναι αναγκαίες για την ανάπτυξη πυρκαγιάς σε οποιονδήποτε χώρο πάνω στο πλοίο (Σχήμα 1.1). Η ύπαρξη θερμότητας είναι απαραίτητη για την προθέρμανση της καύσιμης ύλης μέχρι τουλάχιστον τους 300 °C. Όταν η καύσιμη ύλη προθερμαίνεται παράγει αναφλέξιμα αέρια. Τα αέρια αυτά συνδέονται με το οξυγόνο που υπάρχει στον αέρα με τη χημική αντίδραση της καύσης εκλύοντας κυρίως μεγάλες ποσότητες θερμότητας, διοξειδίου του άνθρακα και υδρατμών. Η φλόγα είναι η περιοχή της καύσης των αερίων η οποία γίνεται ορατή χάρη στην ακτινοβολία που παράγεται και η θερμοκρασία της ξεπερνά τους 1000 °C (Τριπολίτης & Τριάντης, 2016).

Στο χώρο του μηχανοστασίου και λεβητοστάσιου υπάρχει οξυγόνο, ενώ παράλληλα επικρατούν υψηλές θερμοκρασίες λόγω λειτουργίας των διαφόρων μηχανημάτων και λεβήτων, έτσι ένας διαρρηγμένος σωλήνας ή δεξαμενή καυσίμου ή υπολείμματα από λάδια στο δάπεδο είναι δυνατό να συμβάλλουν στην έναρξη πυρκαγιάς. Αντίστοιχα, συμβαίνει το ίδιο με τον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό του πλοίου όπου η μη σωστή εγκατάσταση, η κακή χρήση και κυρίως η κακή συντήρηση μπορεί να οδηγήσει στην δημιουργία πηγής ανάφλεξης.



Σχήμα 1.1: Το <<τρίγωνο>> της φωτιάς.^{xv}

Το τσιγάρο αποτελεί μια από τις βασικές αιτίες έναρξης πυρκαγιάς ιδιαίτερα στα επιβατηγά πλοία καθότι δεν τηρούνται οι κανόνες ασφαλείας σχετικά με τους επιτρεπόμενους χώρους καπνίσματος, ενώ τόσο οι επιβάτες όσο και το πλήρωμα πολλές φορές δείχνουν άγνοια για τον κίνδυνο πυρκαγιάς λόγω αναμμένου τσιγάρου. Το αναμμένο τσιγάρο είναι πηγή θερμότητας και με τις κατάλληλες συνθήκες μπορεί να προκαλέσει πυρκαγιά.

Άλλες σημαντικές αιτίες που συμβάλουν στην έναρξη πυρκαγιάς σε πλοίο περιλαμβάνουν τα πανιά με υπολείμματα λαδιών και τα λεγόμενα θερμόφιλα βακτήρια που δημιουργούνται από τα βιοαποικοδομήσιμα απόβλητα όπως είναι το φαγητό. Αυτά είναι πιθανό να παράγουν θερμότητα στο χώρο της κουζίνας με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια του μαγειρέματος, όπου σε συνδυασμό με τα μαγειρικά λάδια που χρησιμοποιούνται οδηγούν αρκετά συχνά σε περιστατικά πυρκαγιάς.

1.3 Σημαντικά ναυτικά ατυχήματα λόγω πρόκλησης πυρκαγιάς

Η πυρκαγιά βρίσκεται μεταξύ των πιο σημαντικών ατυχημάτων σε επιβατηγά πλοία μαζί με τα περιστατικά σύγκρουσης, προσάραξης, αλλά και μετατόπισης φορτίου. Στον Πίνακα 1, παρουσιάζονται τα πιο σημαντικά ατυχήματα πυρκαγιάς που έχουν συμβεί σε παγκόσμια αναφορά από το 1835 έως σήμερα, ενώ στη συνέχεια αναλύονται μερικά εξ αυτών καθώς είχαν μεγάλο κοινωνικό αντίκτυπο και εξελίξεις σε επίπεδο κανονισμών ασφαλείας.

Πίνακας 1: Στοιχεία από καταγεγραμμένες πυρκαγιές πλοίων (19^{ος} - 21^{ος} αιώνας)^{vii}.

Year	Ship	Country	Life Loss	Year	Ship	Country	Life Loss
2018	Eleftherios Venizelos	Greece	0	1991	Starship Majestic	USA	-
2018	Maersk Kensington	Denmark	0	1991	Eurosun Ship	Finn	-
2018	Maersk Honam	Denmark	1	1990	Star Ship Fire	Scandinavian	159
2014	Norman Atlantic /Anek line	Greece-Italy	11	1987	Doña Paz	Philippines	4000
2006	Cargo ship fire	Canada	-	1983	10th of Ramadan	Egypt	357
2006	Britain Cruise Ship Fire	GB	-	1981	Tamponas II	Indonesian	580
2006	India navy ship fire	India	3	1976	Egyptian liner "Patria"	Egypt	100
2006	Ship catches fire at Alang..	India	9	1972	Queen Elizabeth Ship Fire	Hong Kong	-
2006	Caribbean cruise ship fire	Jamaica.	1	1967	US aircraft carrier "Forrestal"	North Vietnam	134
2006	Egypt Ship Fire	Egypt	1000	1965	Yarmouth Castle Ship Fire	Bermudas	89
2005	30 hurt in ship fire near Egypt port	Egypt	-	1961	British Oceanliner "Dora" Ship Fire	Persian Gulf	236
2005	Danube River Cruise Ship Fire	Slovakia	1	1945	Prince George Ship Fire	Alaska	1
2004	Sun Cruz V Ship Fire	USA	-	1939	Paris Ship Fire	France	-
2003	Kempinski Ganna Fire	Egypt	-	1934	Morro Castle Ship Fire	USA	137
2002	Disney Magic Ship Fire	USA	-	1922	City of Honolulu Ship Fire	USA	-
2002	Princess of Scandinavia Ship Fire	Denmark	-	1918	Kawachi Ship Fire	Japan	500
2002	Statendam Ship Fire	Canada	-	1917	Mont Blanc Ship Fire	France	3000
2000	Ferry Columbia	Alaska	-	1913	Volturno Ship Fire	USA	136
2000	Nieuw Amsterdam Ship Fire	Netherland	-	1911	French battleship "Liberte"	France	285
2000	Carnival Cruise liner Celebration	Jamaica	-	1909	Lucania Ship Fire	England	-
1998	Carnival Cruise liner Ecstasy Fire	Florida	-	1904	General Slocum Ship Fire	USA	1021
1997	MS Romantica	Cypriot	-	1887	Wah Yeung Ship Fire	England	400
1997	Cunard Line	USA	1	1883	Grappler Ship Fire	USA	83
1996	Universe Explorer	Alaska	-	1874	Cospatrick Ship Fire	New Zealand	468
1996	The Golden Princess	USA	-	1869	Stonewall Ship Fire	USA	200
1996	Discovery Cruise Lines	USA	-	1865	Steamboat "Sultana"Ship Fire	USA	1547
1995	Regent Star	Alaska	-	1858	Steamboat "Pennsylvania" Ship Fire	USA	150
1995	Carnival Cruise Lines	USA	-	1858	German steamer "Austria" Ship Fire	German	471
1994	Achille Lauro	Somali	3	1835	The steamship Lexington	USA	140

1.3.1 Dona Paz (1987)

Στις 20 Δεκεμβρίου του 1987 το ferry boat <<Dona Paz>> μεταφορικής ικανότητας 1424 ατόμων (Σχήμα 1.2), κατευθυνόταν από το λιμάνι <<Tacloban>> προς την Μανίλα με τετραπλάσιο σχεδόν φορτίο (περισσότεροι από 4.341 επιβάτες). Στις 22:30 το πλοίο συγκρούστηκε με το δεξαμενόπλοιο <<Vector>> που μετέφερε 8.800 βαρέλια βενζίνης και πετρελαίου. Το φορτίο αμέσως ανεφλέγη και τα δύο πλοία τυλίχτηκαν στις φλόγες. Το <<Dona Paz>> μετά τη πυρκαγιά βυθίστηκε μέσα σε 2 ώρες ενώ το <<Vector >> σε 4.

Ο τελικός απολογισμός ήταν 26 διασωθέντες, 24 επιβάτες του <<Dona Paz>> και 2 μέλη πληρώματος του <<Vector>>. Τα παραπάνω στοιχεία το κατατάσσουν ως το μεγαλύτερο ναυτικό δυστύχημα στην Ιστορία και το πολυπληθέστερο ναυάγιο όλων των εποχών (μεγαλύτερο και από τον Τιτανικό).



Σχήμα 1.2: Η πυρκαγιά στο <<Dona paz>>. ^{xvi}

1.3.2 Scandinavian Star (1990)

Το πλοίο <<Scandinavian Star>> έπλεε μεταξύ Νορβηγίας και Δανίας με 383 επιβάτες και 99 μέλη πληρώματος στις 7 Απριλίου του 1990 (Σχήμα 1.3). Στις 02:00 εντοπίστηκε από επιβάτες φωτιά σε κλινοσκεπάσματα στο τέταρτο κατάστρωμα του πλοίου η οποία κατασβήστηκε άμεσα. Λίγο μετά τις 02:00 ξεκίνησε πυρκαγιά σε χώρο του τρίτου καταστρώματος και η φωτιά εξαπλώθηκε.

Σε αυτό συνετέλεσε ότι δεν υπήρχαν συστήματα αυτόματης πυρόσβεσης και πυρανίχνευσης, ενώ παράλληλα οι πόρτες που οδηγούσαν σε σκάλες και στο γκαράζ βρέθηκαν ανοιχτές. Η φωτιά κατασβήστηκε πλήρως μετά από δύο ημέρες και το αποτέλεσμα ήταν να χαθούν 156 επιβάτες και 2 μέλη πληρώματος.



Σχήμα 1.3: Κατάσβεση πυρκαγιάς στο <<Scandinavian Star>>.xvii

1.3.3 Norman Atlantic (2014)

Στις 28 Δεκεμβρίου το 2014 εκδηλώθηκε πυρκαγιά στο γκαράζ του τέταρτου καταστρώματος του επιβατηγού πλοίου <<Norman Atlantic>>, ενώ έπλεε ανοιχτά της Αδριατικής Θάλασσας (Σχήμα 1.4). Η φωτιά επεκτάθηκε γρήγορα σε όλο το χώρο, πέρασε στα υπόλοιπα καταστρώματα και είχε ως αποτέλεσμα την απώλεια 11 ανθρώπων και να αγνοούνται περισσότεροι από 10.

Η έναρξη της πυρκαγιάς και ο κακός συντονισμός που ακολούθησε αποδόθηκε σε λάθη κατά τη διάρκεια της φόρτωσης, όπου δεν τηρήθηκαν αποστάσεις ασφαλείας μεταξύ των οχημάτων, ενώ η ηλεκτρική σύνδεση των φορτηγών-ψυγείων με το πλοίο εκτελέστηκε από μαθητευόμενο ηλεκτρολόγο που μόλις είχε επιβιβασθεί και όχι από τον αρμόδιο ηλεκτρολόγο του πλοίου. Παράλληλα αναφέρεται ότι δεν έγινε επαρκής έλεγχος για αποφυγή εισόδου και παραμονής λαθρεπιβατών στα γκαράζ. Σημαντικό ήταν το γεγονός ότι υποτιμήθηκαν οι πρώτες ενδείξεις καπνού, δεν ενημερώθηκαν άμεσα οι αρμόδιοι με αποτέλεσμα να επικρατήσει πανικός στην εκκένωση του πλοίου.



Σχήμα 1.4: Η πυρκαγιά στο <<Norman Atlantic>>. ^{xviii}

1.3.4 Ελευθέριος Βενιζέλος (2018)

Ένα από τα πιο πρόσφατα ατυχήματα πυρκαγιάς είναι εκείνο του επιβατηγού οχηματαγωγού πλοίου <<Ελευθέριος Βενιζέλος>>. Στις 28 Αυγούστου του 2018 το πλοίο, που μετέφερε 875 επιβάτες και 140 μέλη πληρώματος, έπλεε ανοιχτά της Ύδρας με προορισμό το λιμάνι των Χανίων. Στις 23:45 εκδηλώθηκε φωτιά στο τρίτο γκαράζ.

Αρχικά δόθηκε η εντολή εκκένωσης του πλοίου εν πλω και όλοι οι επιβάτες μεταφέρθηκαν με ασφάλεια στα ανώτερα καταστρώματα. Όμως επειδή τα μέσα πυρόσβεσης λειτούργησαν άμεσα και η φωτιά τέθηκε υπό έλεγχο στη συνέχεια δόθηκε εντολή το πλοίο να επιστρέψει στο λιμάνι του Πειραιά όπου και έγινε η ασφαλής αποβίβαση όλων των επιβατών και του πληρώματος. Η φωτιά κατασβήστηκε μετά από 4 ημέρες και ενώ το πλοίο ήδη είχε πάρει κλίση λόγω μετατόπισης υδάτων στο εσωτερικό του εξαιτίας της διαδικασίας ξεφόρτωσης οχημάτων από το γκαράζ του (Σχήμα 1.5).



Σχήμα 1.5: Το πλοίο <<Ελευθέριος Βενιζέλος>> υπό κλίση.^{xix}

1.4 Περιγραφή εργασίας

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στη μελέτη πυρκαγιάς σε επιβατηγά πλοία, και πιο συγκεκριμένα σε κρουαζιερόπλοια. Η δομή της εργασίας διακρίνεται σε 8 κεφάλαια. Συγκεκριμένα, στο κεφάλαιο 2 εξηγείται ο κύριος στόχος της εργασίας μετά από αναφορά των υπάρχουσών μελετών και εργασιών. Στο κεφάλαιο 3 αναλύονται όλοι οι ορισμοί γύρω από την πυρκαγιά και τα παράγωγά της καθώς και τα στάδια και οι παράγοντες που τα επηρεάζουν. Στο κεφάλαιο 4 γίνεται περιγραφή των υφιστάμενων κανονισμών ασφαλείας αλλά και των υπολογιστικών μοντέλων που χρησιμοποιούνται για τη συστηματική μελέτη σεναρίων πυρκαγιάς. Έπειτα στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα υλικά που χρησιμοποιούνται εκτενώς σε κρουαζιερόπλοια καθώς και οι ιδιότητές τους. Στο κεφάλαιο 6 παρατίθεται η εφαρμογή που πραγματοποιήθηκε σε κρουαζιερόπλοιο. Συγκεκριμένα αναλύεται η γεωμετρία που εξετάστηκε, τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και τα σενάρια πυρκαγιάς που μελετήθηκαν. Στο κεφάλαιο 7 αναλύονται τα αποτελέσματα των σεναρίων που μελετήθηκαν και τέλος στο κεφάλαιο 8 δίνονται τα συγκεντρωτικά συμπεράσματα και κάποιες προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Κεφάλαιο 2

2 ΣΤΟΧΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

2.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1.1 Μελέτες του εργαστηρίου

Στον Τομέα Μελέτης Πλοίου και Θαλασσίων μεταφορών της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, έχουν διεξαχθεί από το 2004 και μετά μια σειρά από διπλωματικές εργασίες με αντικείμενο την πυρασφάλεια τόσο σε προπτυχιακό όσο και σε μεταπτυχιακό επίπεδο. Συγκεκριμένα, έχουν πραγματοποιηθεί εργασίες προσομοίωσης πυρκαγιάς σε χώρους καμπινών επιβατηγών πλοίων με χρήση των μοντέλων όπως είναι το CFAST (Consolidated Fire and Smoke Transport), FDS (Fire Dynamic Simulator) και το Pyrosim. Για παράδειγμα έχουν γίνει: α) συγκριτική μελέτη των εργαλείων προσομοίωσης (Ψύλλα, 2010) και β) αξιολόγηση των παραγόντων βιωσιμότητας στο χώρο (Πάλλα, 2012). Μελέτες εκκένωσης σε περίπτωση πυρκαγιάς με χρήση των εργαλείων FDS+enac και Pathfinder, με πυρκαγιές διαφορετικών εντάσεων (Ντούνης, 2017). Μελέτη δείκτη διακινδύνευσης πυρκαγιάς που συνδυάζει τόσο μελέτη πυρκαγιάς όσο και εκκένωσης (Αξαόπουλος, 2015). Όπως φαίνεται, γνώμονας είναι η χρήση ολοένα αναπτυσσόμενων εργαλείων προσομοίωσης, η στοχευμένη έρευνα καθώς και η εξέλιξή της.

2.1.2 Μελέτες πυρασφάλειας σε πλοία

Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει αρκετές μελέτες για της πυρασφάλεια των πλοίων. Καθώς η ερευνητική κοινότητα προσπαθεί να προσεγγίσει τα διάφορα ζητήματα ασφάλειας με πιθανοθεωρητικό τρόπο, οι μελέτες πυρασφάλειας δεν έχουν παρά να ακολουθήσουν αυτό το δρόμο. Οι εργασίες των Spyrou et. al. (2013) και Themelis & Spyrou (2012) αναπτύσσουν ένα νέο πιθανοθεωρητικό μοντέλο για την αξιολόγηση της ασφάλειας πλοίου έναντι πυρκαγιάς. Παρά το γεγονός ότι σε αυτές τις εργασίες διεξάγονται προσομοιώσεις πυρκαγιάς και εκκένωσης, δεν γίνεται εκτενής αναφορά και ανάλυση των αποτελεσμάτων των σεναρίων πυρκαγιάς αφού ο βασικός στόχος είναι η ανάπτυξη του μοντέλου διακινδύνευσης. Υπάρχουν ορισμένες μελέτες στις

οποίες γίνεται χρήση λογισμικών για προσομοίωση πυρκαγιάς σε πλοία, όπως την εργασία του Salem (2013), στην οποία πραγματοποιείται παραμετρική ανάλυση πυρκαγιάς σε καμπίνα πλοίου χρησιμοποιώντας το λογισμικό BRANZFIRE. Οι Kacema et. al. (2017) ασχολήθηκαν με τη μελέτη εξέλιξης και διάδοσης πυρκαγιάς σε πολεμικό πλοίο σε πραγματικό χρόνο. Έτσι ανέπτυξαν μοντέλο πρόβλεψης πυρκαγιάς όπου αρχικά καθορίζονται τα τμήματα του πλοίου, στη συνέχεια χρησιμοποιείται ο κώδικας CFD και μέσω στατιστικής ανάλυσης δημιουργούνται χάρτες διακινδύνευσης βάση της τάσης που έχουν τα διάφορα τμήματα του πλοίου να καούν.

Η πιο πρόσφατη είναι η μελέτη των Kang et. al. (2017) στην οποία έχει δημιουργηθεί ένα πλαίσιο πραγματοποίησης προσομοίωσης πυρκαγιάς με υπολογιστικές μεθόδους στηριζόμενο σε μοντέλο πρόβλεψης πυρκαγιάς κατά τη προμελέτη νέου πλοίου. Η εφαρμογή αυτής της μεθόδου έγινε για πλοίο τύπου Ro-Pax και χρησιμοποιήθηκαν τα προγράμματα CFAST και FDS.

2.1.3 Μελέτες προσομοίωσης πυρκαγιάς

Παράλληλα έχουν πραγματοποιηθεί πολλές μελέτες διάδοσης πυρκαγιάς με χρήση εργαλείων προσομοίωσης, οι οποίες έχουν εφαρμογή σε άλλους τομείς πέρα από τα πλοία. Οι Hietaniemi et. al. (2004) εξέτασαν διάφορα σενάρια πυρκαγιάς προχωρώντας σε προσομοίωσή με χρήση του κώδικα FDS καθώς και σε σύγκριση με πειραματικά αποτελέσματα ώστε να μελετήσει την αξιοπιστία του κώδικα και να προσδιορίσει τρόπους βελτίωσής του. Βασικό σημείο είναι ότι μελέτησε τον ρόλο των υλικών στην εξέλιξη της πυρκαγιάς ανάλογα με το πόσο εύκολα δύναται να καούν. Οι Wang et. al. (2015) και Chen et. al. (2018) πραγματοποίησαν εργασίες με τη χρήση του FDS, οι οποίες αποσκοπούν στην βελτίωση του BIM (building information modelling).

Οι Glasa et. al. (2012) πραγματοποίησαν προσομοιώσεις διάδοσης καπνού σε κοινόχρηστους χώρους, συμπεριλαμβανομένου του χώρου θεάτρου, με χρήση του λογισμικού PyroSim. Επιπλέον οι Glasa et. al. χρησιμοποίησαν το λογισμικό Pathfinder για τη μελέτη μεθόδων διαφυγής σε κάθε περίπτωση. Μια προσέγγιση για τη διάδοση της πυρκαγιάς με χρήση του PyroSim γίνεται επίσης στη μεταπτυχιακή εργασία του Foschia (2017), όπου μελετάται η διάδοση του καπνού με πυρόλυση υλικών σε βαγόνια τραίνου. Ένα άλλο παράδειγμα χρήσης του PyroSim αποτελεί η πρόσφατη μελέτη των Li et. al. (2018) που περιλαμβάνει τη προσομοίωση πυρκαγιάς σε βιβλιοθήκη

πανεπιστημίου, συνοδευόμενη από σενάριο εκκένωσης στην περίπτωση που τα συστήματα πυρόσβεσης δεν λειτουργήσουν.

Μέχρι σήμερα το λογισμικό Pyrosim (διεπαφής για τον κώδικα FDS) χρησιμοποιείται για μοντελοποίηση σεναρίων πυρκαγιάς από πολλές εταιρίες και ακαδημαϊκά ινστιτούτα, όμως δεν έχουν γίνει δημοσιεύσεις σχετικά με τη διάδοση πυρκαγιάς από ένα χώρο σε έναν άλλο. Σημαντικό επίσης είναι πως δεν έχει χρησιμοποιηθεί σε κάποια άλλη ερευνητική εργασία με εφαρμογή σε πλοία.

2.2 Στόχος της εργασίας

Συνολικά οι μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί έχουν να κάνουν με κτηριακές υποδομές και όσες σχετίζονται με πλοία κινούνται γύρω από πιθανοτικά μοντέλα εξέλιξης της πυρκαγιάς, τρόπους βελτιστοποίησης ή μεθόδους διαφυγής των επιβατών. Ακόμη η κοινή συνισταμένη όλων των εργασιών που περιέχουν σενάρια πυρκαγιάς είναι ότι αναλύουν τη διάδοση του καπνού στο χώρο και των παραγώγων της καύσης. Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία έχει ως κύριο στόχο τη μελέτη και επιλογή της κατάλληλης μεθόδου για τον προσδιορισμό των μεταβλητών εισόδου στο λογισμικό PyroSim, οι οποίες επηρεάζουν τον τρόπο διάδοσης της πυρκαγιάς σε ένα χώρο. Πρόκειται να εξεταστούν διαφορετικές μέθοδοι έναρξης πυρκαγιάς βασισμένες στην αρχή μεταφοράς της θερμότητας και να διαπιστωθεί η λειτουργικότητα της κάθε μεθόδου. Αξίζει να σημειωθεί ότι το μοντέλο που θα εξεταστεί περιλαμβάνει τόσο τα αντικείμενα που υπάρχουν στο χώρο όσο και τα διαφορετικά υλικά.

Στη συνέχεια δίνονται συγκεντρωτικά τα βασικά σημεία της μελέτης:

1. Θεώρηση όλων των υλικών του χώρου.
2. Πυρόλυση όλων των υλικών που συμμετέχουν στην πυρκαγιά.
3. Μελέτη διαφόρων μεθόδων έναρξης και διάδοσης της πυρκαγιάς.
4. Πρόταση της βέλτιστης μεθόδου διάδοσης της πυρκαγιάς.
5. Θεώρηση πολύπλοκης γεωμετρίας που περιλαμβάνει μια ζώνη πυρασφάλειας που επεκτείνεται σε δύο κατακόρυφα καταστρώματα.
6. Μελέτη και σύγκριση διάδοσης πυρκαγιάς σε δύο καταστρώματα.

Κεφάλαιο 3

3 ΠΥΡΚΑΓΙΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΑ

3.1 Ορισμοί

Πυρκαγιά (φωτιά). Πρόκειται για μια αντίδραση καύσης, συνοδευόμενη από ταχεία έκλυση σημαντικού ποσού θερμότητας και από ισχυρή φωταύγεια (φλόγες). Από την εκλυόμενη θερμότητα, ένα ποσοστό απορροφάται από τα καίόμενα υλικά (διαβίβαση, αγωγιμότητα) και ένα ποσοστό διαχέεται προς το περιβάλλον, μέσω θερμικής ακτινοβολίας και μέσω της κίνησης του θερμού (ή υπέρθερμου) αέρα (μετάδοση, μεταφορά), ο οποίος παρασύρει σπίθες και καίόμενα υλικά.

Πυροδιαμέρισμα (ΠΔ). Είναι κάθε κλειστός (ή ανοικτός) χώρος ο οποίος περιβάλλεται από όλες τις πλευρές είτε από τοίχους, είτε από πόρτες και παράθυρα. Έτσι, «πυροδιαμέρισμα» είναι ένα δωμάτιο σε ένα διαμέρισμα ή μια αποθήκη ή μια αίθουσα κινηματογράφου.

Καύσιμο φορτίο πυροδιαμερίσματος Είναι το συνολικό ποσό θερμότητας το οποίο απελευθερώνεται κατά την πλήρη καύση όλης της καύσιμης ύλης που περιέχεται μέσα στο πυροδιαμέρισμα. Στην καύσιμη αυτή ύλη περιλαμβάνονται τα κάθε είδους αποθηκευμένα υλικά, έπιπλα, υλικά επικαλύψεως τοίχων, πατώματος και οροφής, καθώς και τα φέροντα (ή μη) στοιχεία του σκελετού τα οποία μπορούν να καούν (π.χ. ξύλινα).

Ανάφλεξη. Η επαφή καύσιμης ύλης με οξυγόνο και κάποια πηγή θερμότητας (π.χ. φλόγα) προκαλεί έναρξη καύσης της καύσιμης ύλης, που καλείται ανάφλεξη. Ως θερμοκρασία αναφλέξεως ενός σώματος ορίζεται η χαμηλότερη θερμοκρασία στην οποία το σώμα αρχίζει να καίγεται μαζί με το οξυγόνο του αέρα (Τάσιος & Δεοδάτης, 1984). Στο Πίνακα 2 παρουσιάζονται θερμοκρασίες ανάφλεξης και αυτανάφλεξης για διάφορα υλικά.

Πίνακας 2: Θερμοκρασίες ανάφλεξης για διάφορα υλικά (Τάσιος & Δεοδάτης, 1984)

	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ, °C	
	ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ	ΑΥΤΑΝΑΦΛΕΞΗΣ
Στάχυα, άχυρα, σε θημωνιές	~ 175	(~ 75)
Εφημερίδες, χαρτί	180 ÷ 220	180 ÷ 220
Ροκανίδια	200 ÷ 220	200 ÷ 220
Μαλλί, μετάξι	200 ÷ 240	—
Βαμβάκι, ξυλεία (πεύκου, έλατου)	230 ÷ 270	~ 255 ÷ 260
Πολυστερίνη, πολυουρεθάνη, πολυαιθυλένιο	300 ÷ 350	350 ÷ 450
PVC	~ 400	~ 450

3.2 Φάσεις τυπικής πυρκαγιάς

3.2.1 *Επώαση*

Μια πυρκαγιά εκδηλώνεται σε ένα πυροδιαμέρισμα όταν η καύσιμη ύλη που βρίσκεται μέσα σε αυτό αποκτήσει ένα ικανό ποσό θερμικής ενέργειας. Οι παράγοντες που παίζουν ρόλο στη διαδικασία της αναφλέξεως (ή αυτανάφλεξης) είναι τα χαρακτηριστικά της πηγής ενέργειας, το είδος και οι γεωμετρικές διαστάσεις της εκτεθειμένης καύσιμης ύλης και ο χρόνος εκθέσεως στην πηγή ενεργείας.

Μετά την έναρξη της πυρκαγιάς, η φωτιά παράγει θερμική ενέργεια. Ένα μέρος της χρησιμεύει για την διατήρηση της καύσεως, ενώ το υπόλοιπο ποσό ενέργειας μεταφέρεται δι' ακτινοβολίας και δια μεταφοράς (μετάδοσης) σε άλλα υλικά, τα οποία αφού θερμανθούν αναφλέγονται, προκαλώντας τη διάδοση της πυρκαγιάς (Τάσιος & Δεοδάτης, 1984).

3.2.2 *Ανάπτυξη πυρκαγιάς*

Μετά την επώαση ακολουθεί η ανάπτυξη της πυρκαγιάς. Η διαδικασία ανάπτυξης και εξάπλωσης εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως είναι το μέγεθος, ο όγκος, η στοίβαξη και οι ιδιότητες καύσεως της διαθέσιμης καύσιμης ύλης, τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά, το μέγεθος και το σχήμα του πυροδιαμερίσματος καθώς και το εγκατεστημένο σύστημα πυρόσβεσης.

Κατά το στάδιο της επώασης, ένα στρώμα υπέρθερμων αερίων συγκεντρώνεται κάτω από την οροφή και υπό ορισμένες συνθήκες, μπορεί να προκαλέσει απότομη εξάπλωση της πυρκαγιάς σε μέρη του καυσίμου υλικού. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται flashover, και δείχνει τη μετάβαση από το στάδιο της επώασης στο στάδιο της πλήρης ανάπτυξης. Το φαινόμενο flashover εμφανίζεται συνήθως σε μικρούς κλειστούς χώρους και αναφλέγεται ξαφνικά όλη η καύσιμη ύλη του πυροδιαμερίσματος.

3.2.3 Πλήρης ανάπτυξη

Αυτό το στάδιο είναι καθοριστικό για την συμπεριφορά των φερόντων μερών της κατασκευής, καθώς και για την εξάπλωση της πυρκαγιάς από πυροδιαμέρισμα σε πυροδιαμέρισμα, από όροφο σε όροφο ή από κτίριο σε κτίριο.

Η πλήρης ανάπτυξη της πυρκαγιάς καθορίζεται από τη ποσότητα, το είδος, το πορώδες και τη στοίβαξη του καυσίμου υλικού, από τον αερισμό και τη γεωμετρία του πυροδιαμερίσματος, αλλά και από τις θερμικές ιδιότητες των επιφανειών που περικλείουν το πυροδιαμέρισμα.

Οι πυρκαγιές σε στάδιο πλήρους αναπτύξεως διαχωρίζονται σε αερο-ελεγχόμενες και σε καυσιμο-ελεγχόμενες. Στην πρώτη κατηγορία, η καύση ελέγχεται μόνο από τον αερισμό του πυροδιαμερίσματος, ενώ στη δεύτερη κατηγορία, η καύση ελέγχεται από τη ποσότητα του καυσίμου υλικού.

3.2.4 Απόσβεση

Το στάδιο της απόσβεσης ακολουθεί την πλήρη ανάπτυξη της πυρκαγιάς. Στην περίπτωση της καυσιμο-ελεγχόμενης πυρκαγιάς, η απόσβεση ξεκινάει όταν καεί το μεγαλύτερο μέρος της καύσιμης ύλης που υπάρχει μέσα στο πυροδιαμέρισμα. Στην περίπτωση της αερο-ελεγχόμενης πυρκαγιάς, η απόσβεση αρχίζει όταν ο διατιθέμενος για την καύση αέρας μειωθεί κάτω από κάποιο όριο.

3.3 Διάδοση πυρκαγιάς

Στις πυρκαγιές επικρατεί μία δυναμική κατάσταση, όπου μπορούμε να παρατηρήσουμε διάφορα γεγονότα (υποβόσκουσα φωτιά, εκτίναξη των σωμάτων που καίγονται, κ.λπ.). Όταν υπάρχει επάρκεια καύσιμης ύλης (αναγωγικού μέσου) και οξυγόνου (οξειδωτικού μέσου, γενικότερα), η εξέλιξη της πυρκαγιάς έχει τις προϋποθέσεις να συνεχισθεί ανεμπόδιστα, εάν δεν επέμβουμε. Η μετάδοση της πυρκαγιάς γίνεται με διακίνηση μάζας, ορμής και ενέργειας δηλαδή με φαινόμενα μεταφοράς τα οποία αναλύονται στη συνέχεια.

Μεταφορά μάζας:

Με τον όρο αυτό νοούμε τη διεργασία στην οποία έχουμε «διακίνηση» μάζας. Η διακίνηση αυτή οφείλεται στη διαφορά συγκέντρωσης των συστατικών του καιόμενου συστήματος που προκαλείται από πυρκαγιά.

Μεταφορά ορμής:

Με τον όρο αυτό νοούμε τη διεργασία στην οποία έχουμε «διακίνηση» ορμής η διακίνηση αυτή δικαιολογείται με τη βοήθεια της μοριακής συμπεριφοράς των αερίων (καύσης, αέρα). Η ορμή που κατέχει ένα μόριο ανταλλάσσεται (μεταβάλλεται) τη στιγμή των συγκρούσεων παρατηρείται τότε, μεταφορά της ορμής από μόριο σε μόριο κατά τις διαμοριακές συγκρούσεις.

Μεταφορά ενέργειας:

Με τον όρο αυτό εννοούμε ό,τι εκφράζουμε λέγοντας «μετάδοση θερμότητας». Μετάδοση θερμότητας σημαίνει «διακίνηση» (διάδοση) θερμότητας από ένα σώμα σε άλλο ή από μία θέση σώματος σε γειτονική της θέση.

Η διακίνηση αυτή οφείλεται στη χαρακτηριστική (θερμοδυναμική) ιδιότητα της ύλης: τη θερμοκρασία καθώς και στο δεύτερο θερμοδυναμικό αξίωμα, σύμφωνα με το οποίο απλή διάδοση θερμικής ενέργειας (θερμότητας) γίνεται πάντοτε από υψηλότερες θερμοκρασιακές καταστάσεις προς χαμηλότερες.

Υπάρχουν τρεις τρόποι διάδοσης της θερμότητας:

1. Με αγωγή

Γίνεται κυρίως στα στερεά σώματα από σημείο σε σημείο (από μόριο σε μόριο) του σώματος, χωρίς μετακίνηση της ύλης αυτού. Το αίτιο είναι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ δύο γειτονικών σωμάτων ή μεταξύ δύο σημείων του σώματος. Παράδειγμα η θέρμανση ράβδου σιδήρου, χαλύβδινων δοκών και κολώνων σε κτιριακές κατασκευές

2. Με μεταφορά

Γίνεται στα υγρά και στα αέρια (ρευστά), όπου η θερμότητα διαδίδεται με μεταφορά θερμών μαζών υγρού ή αερίου προς ψυχρότερες περιοχές (διάδοση θερμότητας με ρεύματα), π.χ. θέρμανση νερού, θέρμανση αέρα δωματίου με το καλοριφέρ.

Η διάδοση θερμότητας με μεταφορά αερίων μαζών (θερμικά προϊόντα της καύσης), εξηγεί σε μεγάλο βαθμό την επέκταση πυρκαγιάς από τους κάτω ορόφους πολυκατοικίας προς τους επάνω, καθόσον τα αέρια αυτά έχουν μικρότερη πυκνότητα από τον αέρα και ως ελαφρότερα ανεβαίνουν προς τα πάνω

3. Με ακτινοβολία

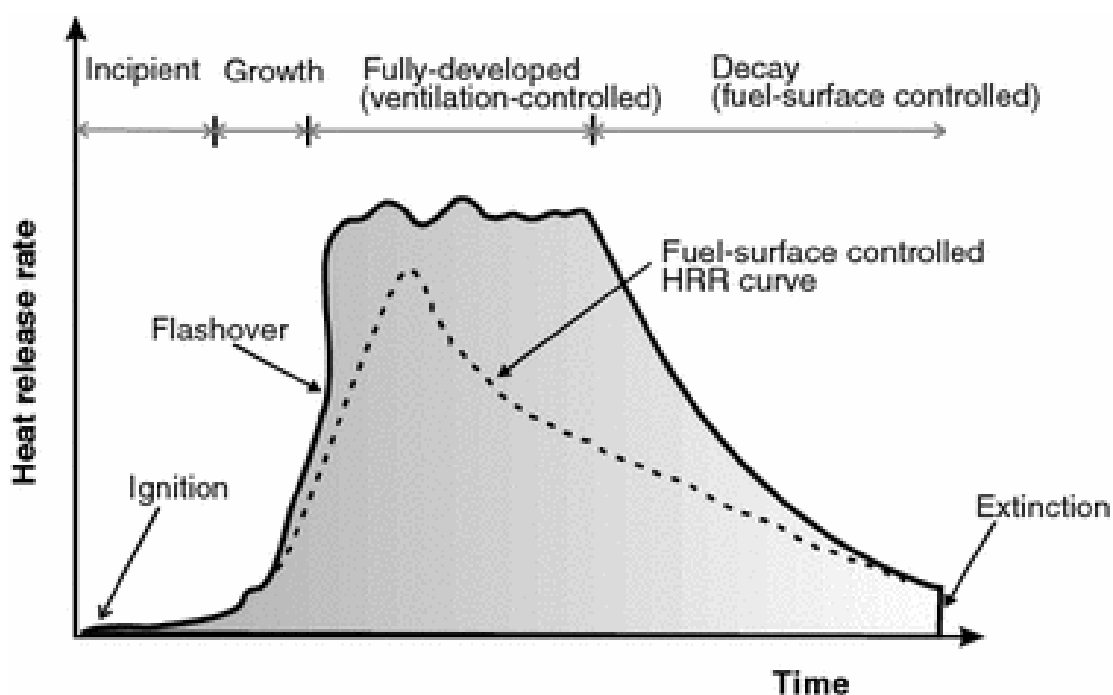
Γίνεται με ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται μέσα στα σώματα καθώς επίσης και μέσα στο κενό. Το χαρακτηριστικό, λοιπόν, του τρόπου αυτού διάδοσης της θερμότητας είναι ότι η θερμότητα «διακινείται» χωρίς απαραίτητα να μεσολαβεί υλικό σώμα.

3.4 Καμπύλη διάδοσης θερμότητας (HRR)

Η ποσότητα θερμότητας που παράγεται κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς, δηλαδή η ενέργεια που απελευθερώνεται, αποτελεί θεμελιώδες χαρακτηριστικό κάθε πυρκαγιάς (Babrauskas & Peacock, 1992). Μια εναλλακτική έκφραση για την ποσότητα ενέργειας που απελευθερώνεται είναι ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας (Heat Release Rate – HRR), δηλαδή η θερμότητα που απελευθερώνεται από ένα υλικό, ομαλοποιημένη με την απώλεια μάζας. Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας μπορεί να υπολογιστεί για κάθε χρονική στιγμή εξέλιξης της πυρκαγιάς, και επομένως για κάθε ένα από τα στάδια που προαναφέρθηκαν δίνοντας έτσι την καμπύλη διάδοσης θερμότητας, ή διαφορετικά την καμπύλη ρυθμού έκλυσης θερμότητας γνωστή ως «HRR

curve». Στο Σχήμα 3.1 φαίνεται μια τυπική μορφή της καμπύλης HRR και διακρίνονται τα στάδια της πυρκαγιάς.

Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας χρησιμοποιείται συνήθως στις εκτιμήσεις μοντελοποίησης πυρκαγιάς για την πρόβλεψη της ποσότητας θερμικής συμβολής ενός συγκεκριμένου καυσίμου. Μπορεί να προσδιοριστεί θεωρητικά ή πειραματικά. Στην πραγματικότητα, ο πραγματικός ρυθμός έκλυσης θερμότητας δεν είναι σταθερός για τα περισσότερα πραγματικά καύσιμα και συνεπώς κανονικά απαιτείται πειραματική αξιολόγηση. Η μαθηματική εκτίμηση του ρυθμού έκλυσης θερμότητας έχει διατυπωθεί στην εργασία των Themelis & Spyrou (2012) και φαίνεται στον Πίνακα 3.



Σχήμα 3.1: Καμπύλη HRR και στάδια ανάπτυξης πυρκαγιάς (Bwalya, 2008).^{xx}

Πίνακας 3: Εξισώσεις υπολογισμού του ρυθμού έκλυσης θερμότητας ανά στάδιο.

	Εξίσωση	Χρονική διάρκεια	Στάδια
$\dot{Q}(t) =$	$\dot{Q}_{inc} \cdot t/t_{inc}$	$0 \leq t \leq t_{inc}$	Επώαση
	$a \cdot (t - t_{inc})^2 + \dot{Q}_{ign}$	$t_{inc} \leq t \leq t_g$	Ανάπτυξη
	\dot{Q}_{max}	$t_g \leq t \leq t_d$	Πλήρης ανάπτυξη
	$\dot{Q}_{max} e^{-\frac{t-t_d}{t}}$	$t > t_d$	Απόσβεση

Όπου,

- Q_{inc} [kW], είναι ο απαιτούμενος ρυθμός έκλυσης θερμότητας ώστε να υπάρχει συνεχής παραγωγή φλόγας και η τιμή του κυμαίνεται μεταξύ των 20 και 30kW.
- a , είναι ο συντελεστής ανάπτυξης της πυρκαγιάς με εύρος τιμών [$0.00293 < a < 0.1874$] για πυρκαγιά με γρήγορη εξέλιξη.
- t_{inc} [sec], είναι η χρονική διάρκεια της αρχικής φάσης της πυρκαγιάς μέχρι την ανάφλεξη και δίνεται από τη παρακάτω σχέση.

$$t_{inc} = \frac{TRP}{(\dot{q}''_e - CHF)^2}$$

- Q_{max} [kW], είναι ο μέγιστος ρυθμός έκλυσης θερμότητας στο στάδιο που η φωτιά είναι πλήρως ανεπτυγμένη.
- t_g [sec], είναι η χρονική στιγμή όπου ο ρυθμός έκλυσης αποκτά τη μέγιστη τιμή.
- t_d [sec], είναι η χρονική στιγμή που ξεκινάει η απόσβεση της πυρκαγιάς.

Απ' ότι φαίνεται παραπάνω ο χρόνος που χρειάζεται μέχρι την ανάφλεξη εξαρτάται από δύο παραμέτρους: την παράμετρο θερμικής απόκρισης (TRP) και την παράμετρο χαρακτηριστικής ροής θερμότητας (CHF), όπου:

TRP (Thermal response parameter) [$\text{kW s}^{1/2}/\text{m}^2$], είναι η παράμετρος θερμικής απόκρισης και δείχνει την αντίσταση στην ανάφλεξη και τη διάδοση της φωτιάς, διότι αντιπροσωπεύει το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας προς το εσωτερικό του υλικού ενώ η επιφάνειά του εκτίθεται σε συνεχή θέρμανση.

CHF (Characteristic heat flux) [kW/m^2], είναι η απαραίτητη ελάχιστη ροή θερμότητας που παρέχεται ώστε να γίνει η έναρξη της πυρκαγιάς.

Στον Πίνακα 4 αναφέρονται χαρακτηριστικές τιμές των παραμέτρων αυτών για διάφορα υλικά.

Πίνακας 4: Χαρακτηριστικές τιμές των CHF και TRP για διάφορα υλικά (SPFE 2002).

Materials	CHF (kW/m ²)			TRP (kW·s ^{1/2} /m ²)			Materials	CHF (kW/m ²)			TRP (kW·s ^{1/2} /m ²)		
	ASTM E2058 Fire Propagation Apparatus			ASTM E2058 Fire Propagation Apparatus				ASTM E2058 Fire Propagation Apparatus			ASTM E1354-90*		
	ASTM E2058 Fire Propagation Apparatus	ASTM E2058 Fire Propagation Apparatus	ASTM E2058 Fire Propagation Apparatus	ASTM E2058 Fire Propagation Apparatus	ASTM E2058 Fire Propagation Apparatus	ASTM E2058 Fire Propagation Apparatus		ASTM E2058 Fire Propagation Apparatus	ASTM E2058 Fire Propagation Apparatus	ASTM E2058 Fire Propagation Apparatus	ASTM E2058 Fire Propagation Apparatus	ASTM E2058 Fire Propagation Apparatus	ASTM E1354-90*
<i>Halogenated materials (cont.)</i>							<i>Foams (wall-ceiling insulation materials, etc.)</i>						
PVC fabric	26		217	—			Polyurethane foams	13–40		55–221	—		
PVC sheets	15		446–590	—			Polystyrene foams	10–15		111–317	—		
Ethylene tetrafluoroethylene (ETFE), Tefzel	27		356	—			Phenolic	20		610	—		
Fluorinated ethylene-propylene (FEP), Teflon	30		602	—			Phenolic laminate—45% glass	—		—	683		
Teflon fabric	50		296	—			Latex foams	10		110–172	—		
Teflon coated on metal	20		486	—			<i>Materials with fiberweb, net-like and multiplex structures</i>						
<i>Composite and fiberglass-reinforced materials</i>							Polypropylenes						
Polyether ether keton—30% fiberglass	—		—	301			Polyester-polypropylene	10		139	—		
Isophthalic polyester 77% fiberglass	—		—	426			Wood pulp-polypropylene	8		90	—		
Polyethersulfone—30% fiberglass	—		—	266			Polyester	8–16		94–383	—		
Polyester 1—fiberglass	—		—	430			Rayon	14–17		161–227	—		
Polyester 2—fiberglass	10		275	—			Polyester-rayon	13–17		119–286	—		
Polyester 3—fiberglass	10		382	—			Wool-nylon	15		293	—		
Polyester 4—fiberglass	15		406	—			Nylon	15		264	—		
Polyester 5—fiberglass	10		336	—			Cellulose	13		159	—		
Epoxy Kevlar (thin sheet)	—		—	120			Cellulose-polyester	13–16		149–217	—		
Epoxy fiberglass (thin sheet)	10		156	198			<i>Electrical cables—power</i>						
Epoxy graphite	15		395	—			PVC/PVC	13–25		156–341	—		
Epoxy 1—fiberglass	10		420	—			PE/PVC	15		221–244	—		
Epoxy 2—fiberglass	15		540	—			PVC/PE	15		263	—		
Epoxy 3—fiberglass	15		500	—			Slimline/PVC	19		217	—		
Epoxy 4—fiberglass	10		386	—			<i>Silicone/cross linked polyolefin (XLPO)</i>						
Epoxy resin—69% fiberglass	—		—	688			XLPO	25–30		435–457	—		
Epoxy graphite 1	—		481	—			EPR (ethylene-propylene rubber/EPR)	20–23		467–567	—		
Epoxy-graphite 1/ceramic coating (CC)	—		2273	—			XLPE/XLPE	20–25		273–386	—		
Epoxy-graphite 1/intumescent coating (IC)	—		962	—			XLPE/EVA (ethyl-vinyl acetate)	12–22		442–503	—		
Epoxy-graphite 1/IC-CC	—		1785	—			XLPE/Neoprene	15		291	—		
Polyvinyl ester 1—60% fiberglass	—		—	444			XLPO/XLPO	16–25		461–535	—		
Polyvinyl ester 2—fiberglass	—		281	—			XLPO/PVF (polyvinylidene fluoride) XLFO	14–17		413–639	—		
Polyvinyl ester 2—fiberglass/CC	—		676	—			EPR/Chlorosulfonated PE	14–19		293–416	—		
Polyvinyl ester 2—fiberglass/IC	—		1471	—			EPR, FR	14–28		289–448	—		
Polyvinyl ester 2—fiberglass/IC-CC	—		1923	—			<i>Electrical cables—communications</i>						
Graphite composite	40		400	—			PVC/PVC	15		131	—		
Phenolic fiberglass (thin sheet)	33		105	172			PE/PVC	20		183	—		
Phenolic fiberglass (thick sheet)	20		610	—			XLPE/XLPE	20		461–535	—		
Phenolic-graphite 1	20		333	—			Si/XLPO	20		457	—		
Phenolic-graphite 2	—		—	400			EPR-FR	19		295	—		
Phenolic kevlar (thin sheet)	20		185	258			Chlorinated PE	12		217	—		
Phenolic kevlar (thick sheet)	15		403	—			ETFE/EVA	22		454	—		
Phenolic-graphite 1/CC	—		1563	—			PVC/PVF	30		264	—		
Phenolic-graphite 1/IC	—		1563	—			FEP/FEP	36		638–652	—		
							<i>Conveyor belts</i>						
							Styrene-butadiene rubber (SBR)	10–15		336–429	—		
							Chloroprene rubber (CR)	20		760	—		
							CR/SBR	15		400	—		
							PVC	15–20		343–640	—		

3.5 Θερμότητα μετατροπής καύσης. Heat of Combustion Conversion

Η θερμότητα που απελευθερώνεται από οποιαδήποτε δοκιμή πυρκαγιάς είναι η σημαντικότερη ποσότητα και πρέπει να προσδιορίζεται με ακρίβεια ώστε να εξασφαλίζεται επαρκής ασφάλεια στα σχέδια. Η θεωρία της θερμιδομέτρησης κατανάλωσης οξυγόνου αναπτύχθηκε αρχικά και δημοσιεύθηκε από τους Parker (1977) και Huggett (1980) για να μετρήσει με μεγαλύτερη ακρίβεια τη θερμότητα που απελευθερώνεται από ένα καύσιμο υλικό. Κεντρικό στοιχείο αυτής της θεωρίας είναι το γεγονός ότι εκτός από την απελευθέρωση θερμότητας, η διαδικασία καύσης καταναλώνει οξυγόνο. Ως εκ τούτου, με τη μέτρηση της ταχύτητας οξυγόνου που καταναλώνεται, μπορεί να υπολογιστεί και ο ρυθμός με τον οποίο παράγεται η θερμότητα. Ο Huggett κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η υπόθεση σταθερού ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας ανά μονάδα μάζας οξυγόνου που καταναλώνεται θα ήταν αρκετά ακριβής για τις περισσότερες πυρκαγιές έως $\pm 5\%$. Για να προσδιοριστεί η ποσότητα ενέργειας που διατίθεται από την καύση μίας μάζας μονάδας καυσίμου, η ενέργεια που απελευθερώνεται διαιρείται με το ρυθμό απώλειας μάζας. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η θερμότητα καύσης που προέρχεται από τη θεωρία κατανάλωσης οξυγόνου παράγει την αποτελεσματική θερμότητα καύσης, αντί της καθαρής θερμότητας καύσης, καθώς η καύση δεν είναι ποτέ πλήρως αποτελεσματική σε φυσικές πυρκαγιές, ακόμη και υπό απεριόριστο αερισμό (Drysdale, 2002).

3.6 Παράγωγα καύσης

Κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς παράγονται διάφορα προϊόντα καύσης που ενδέχεται να προκαλέσουν τον τραυματισμό ή ακόμα και το θάνατο των ανθρώπων που βρίσκονται στο χώρο. Τα κύρια προπαντά της καύσης είναι η ακτινοβολία, το μονοξείδιο του άνθρακα το διοξείδιο του άνθρακα, ο καπνός καθώς και η υψηλή θερμοκρασία. Έτσι, κάτω από επαρκώς υψηλή έκθεση σε ακτινοβολία ή κατά την εισπνοή του καυτού καπνού, η ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών ενδέχεται να κάψει τις αναπνευστικές οδούς και το εκτεθειμένο δέρμα προκαλώντας σοβαρό πόνο και τραυματισμό, που μπορεί τελικά να οδηγήσει σε θάνατο. Στη συνέχεια αναφέρονται επιγραμματικά τα βασικά παράγωγα της καύσης.

3.6.1 Μονοξείδιο του άνθρακα

Το αέριο που προκαλεί κυρίως ασφυξία κατά τη διάρκεια πυρκαγιάς είναι το μονοξείδιο του άνθρακα, το οποίο έχει επίσης αναγνωριστεί ως η κύρια αιτία θανάτου (Babrauskas, 2008). Είναι πάντοτε παρών σε όλες τις πυρκαγιές ακόμη και σε χαμηλή ποσότητα εξαιτίας της ατελούς καύσης, ειδικά σε μειωμένες συνθήκες εξαερισμού, όπως το περιβάλλον ενός δωματίου. Καθώς τα μόρια του μονοξειδίου του άνθρακα συνδέονται με την αιμοσφαιρίνη στο αίμα καλύτερα από το οξυγόνο, μειώνεται η παροχή οξυγόνου στο σώμα, ειδικά στον εγκέφαλο. Αυτό προκαλεί απώλεια συνείδησης, καθώς και μείωση της δυνατότητας διαφυγής των επιβατών, για να επηρεάσει ή και να αποτρέψει μια επιτυχημένη διαφυγή (Purser, 2002). Ένα κρίσιμο χαρακτηριστικό της ασφυξίας είναι ότι προκύπτει ξαφνικά με συνέπεια την ανικανότητα των ανθρώπων να αντιδράσουν και έτσι η διαφυγή γίνεται σχεδόν αδύνατη εφόσον οι άνθρωποι μπορεί να τείνουν να κοιμούνται παρά να προσπαθήσουν να διαφύγουν.

3.6.2 Διοξείδιο του άνθρακα

Το διοξείδιο του άνθρακα αν και δεν είναι ένα αέριο που προκαλεί ασφυξία από μόνο του, η χαμηλή συγκέντρωση οξυγόνου (κάτω από 15 %) και πολύ υψηλές συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα (πάνω από 5 %) μπορούν να προκαλέσουν την ασφυξία. Η παρουσία διοξειδίου του άνθρακα επίσης διεγείρει την αναπνοή, προκαλώντας υπεραερισμό, ζάλη, υπνηλία και απώλεια των αισθήσεων που υπερτερεί στις αναπνευστικές επιδράσεις. Σε ένα τοξικό περιβάλλον, μια υψηλή συγκέντρωση CO₂ θα αυξήσει την πρόσληψη ασφυκτικών αερίων και θα μειώσει σημαντικά το χρόνο να φτάσει κάποιος στην ανικανότητα μετακίνησης (Purser, 2002).

3.6.3 FED

Τα τοξικά αέρια που παράγονται από μια πυρκαγιά (CO, CO₂ και η μειωμένη ποσότητα O₂ μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα, ακόμη και το θάνατο στους ανθρώπους οι οποίοι βρίσκονται εκτεθειμένοι σε αυτά. Έχει αναπτυχθεί ένα μαθηματικό μοντέλο, το οποίο προσδιορίζει εάν το περιβάλλον που δημιουργείται από τη πυρκαγιά είναι δυνητικά επιβλαβές για τους ανθρώπους που εκτίθενται σε αυτό και ονομάζεται κλασματική δραστική δόση τοξικής ουσίας (fractional effective dose – FED).

Συγκεκριμένα αυτό το μοντέλο μετράει τους αερομεταφερόμενους ρύπους που απορροφώνται από ένα επιβάτη και υπολογίζεται ως εξής:

$$FED_{IN} = FED_{CO} * V_{CO_2} + FED_{O_2}$$

FED_{CO} , Ο συντελεστής κλασματικής δραστικής δόσης μονοξειδίου του άνθρακα.

V_{CO_2} , η αύξηση συγκέντρωσης τοξικών αερίων λόγω υπεραερισμού

FED_{O_2} , ο συντελεστής κλασματικής δραστικής δόσης οξυγόνου

3.6.4 Καπνός

Ο όρος καπνός (soot) ορίζεται ως "το αερόλυμα καπνού ή το συστατικό της συμπυκνωμένης φάσης του προϊόντος της καύσης". Με απλούστερους όρους, είναι τα στερεά σωματίδια άνθρακα που υπάρχουν στον καπνό (Glassman, 1986).

Πρόκειται για προϊόν πυρόλυσης, που γενικά σχηματίζεται στα σημεία της φλόγας που είναι πλούσια σε καύσιμο. Τα σωματίδια αιθάλης αναπτύσσονται σε μέγεθος "μέσω αντιδράσεων αερίου-στερεού, ακολουθούμενη από οξείδωση (καύση) για την παραγωγή αερίων προϊόντων, όπως CO και CO₂" (SPFE, 2002). Μπορεί να μετρηθεί βάση της κατανομής της μάζας και του μεγέθους των σωματιδίων. Ωστόσο, οι κύριες ιδιότητες του καπνού είναι η ελαφρά εξάφάνιση και η ορατότητα. Ως εκ τούτου, αναφέρονται συχνότερα ως οπτική σκίαση ή οπτική πυκνότητα. Η εκπομπή καπνού είναι ένα από τα κρίσιμα στοιχεία που χαρακτηρίζουν μια πυρκαγιά, επηρεάζοντας την ορατότητα κατά τη διαφυγή και τις αλλαγές στην ανθρώπινη συμπεριφορά. Η παρουσία ενός πυκνού καπνού όχι μόνο μειώνει σημαντικά την ταχύτητα διαφυγής, προκαλεί επίσης συναισθηματικές πιέσεις, επηρεάζοντας τις ταχύτητες διαφυγής των επιβατών.

3.6.5 Θερμοκρασία

Για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας που προκύπτει κατά την καύση ενός καυσίμου, λαμβάνεται υπόψη ότι η χημική ενέργεια που βρίσκεται μέσα στο καύσιμο μετατρέπεται σε αισθητή θερμότητα που αυξάνει τη θερμοκρασία του καυσαερίου. Όταν από την καύση που προκαλεί φωτιά παράγεται αρκετή θερμότητα τότε

δημιουργούνται φλόγες από το χρώμα των οποίων ξεχωρίζει και η θερμοκρασία που επικρατεί.

Στη μελέτη SPFE (2002) συγκεντρώθηκαν αποτελέσματα για τις τιμές διαφόρων προϊόντων καύσης και για διάφορα είδη καυσίμων (Πίνακας 4 & Πίνακας 5). Οι περισσότερες δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με τη συσκευή διάδοσης φωτιάς ASTM E2058 (2009), ενώ λίγες από αυτές με δοκιμή θερμιδόμετρου κώνου ASTM E1354 (2010) και πραγματοποιήθηκαν κάτω από κατάλληλες συνθήκες εξαερισμού και σε περιπτώσεις με περιορισμένες συνθήκες εξαερισμού προέβησαν στις κατάλληλες διορθώσεις.

Πίνακας 5: Παράγωγα πυρκαγιάς για διάφορα υλικά (SPFE 2002).

Material	ΔH_T (kJ/g)	Y_{CO_2}	Y_{CO}	Y_{CH_4}	Y_S	ΔH_{CH}	ΔH_{CO}	ΔH_{SO_2}
		(g/g)						
<i>Natural materials</i>								
Tissue paper	—	—	—	—	—	11.4	6.7	4.7
Newspaper	—	—	—	—	—	14.4	—	—
Wood (red oak)	17.1	1.27	0.004	0.001	0.015	12.4	7.8	4.6
Wood (Douglas fir)	16.4	1.31	0.004	0.001	—	13.0	8.1	4.9
Wood (pine)	17.9	1.33	0.005	0.001	—	12.4	8.7	3.7
Corrugated paper	—	—	—	—	—	13.2	—	—
Wood (hemlock) ^b	—	—	—	—	0.015	13.3	—	—
Wool 100% ^b	—	—	—	—	0.008	19.5	—	—
<i>Synthetic materials—solids (abbreviations/names in the nomenclature)</i>								
ABS ^b	—	—	—	—	0.105	30.0	—	—
POM	15.4	1.40	0.001	0.001	—	14.4	11.2	3.2
PMMA	25.2	2.12	0.010	0.001	0.022	24.2	16.6	7.6
PE	43.6	2.76	0.024	0.007	0.060	38.4	21.8	16.6
PP	43.4	2.79	0.024	0.006	0.059	38.6	22.6	0
PS	39.2	2.33	0.060	0.014	0.164	27.0	11.0	16.0
Silicone	21.7	0.96	0.021	0.006	0.065	10.6	7.3	3.3
Polyester-1	32.5	1.65	0.070	0.020	0.091	20.6	10.8	9.8
Polyester-2	32.5	1.56	0.080	0.029	0.089	19.5	—	—
Epoxy-1	28.8	1.59	0.080	0.030	—	17.1	8.5	8.6
Epoxy-2	28.8	1.16	0.086	0.026	0.098	12.3	—	—
Nylon	30.8	2.06	0.038	0.016	0.075	27.1	16.3	10.8
Polyamide-6 ^b	—	—	—	—	0.011	28.8	—	—
IPST ^b	—	—	—	—	0.080	23.3	—	—
PVEST ^b	—	—	—	—	0.076	22.0	—	—
Silicone rubber	21.7	0.96	0.021	0.005	0.078	10.9	—	—
<i>Polyetheretherketone</i>								
(PEEK-CH _{0.65} O _{0.16})	31.3	1.6	0.029	—	0.008	17.5	—	—
Polysulfone (PSO-CH _{0.81} O _{0.15} S _{0.04})	29.0	1.8	0.034	—	0.020	24.3	—	—
Polyethersulfone (PES-CH _{0.67} O _{0.21} S _{0.08})	25.2	1.5	0.040	—	0.021	20.4	—	—
Polyetherimide (PEI-CH _{0.68} N _{0.05} O _{0.14})	30.1	2.0	0.026	—	0.014	27.2	—	—
Polycarbonate (PC-CH _{0.88} O _{0.13})	31.6	1.5	0.054	—	0.112	18.4	—	—
<i>Polyurethane (flexible) foams</i>								
GM21	26.2	1.55	0.010	0.002	0.131	17.8	8.6	9.2
GM23	27.2	1.51	0.031	0.005	0.227	19.0	10.3	8.7
GM25	24.6	1.50	0.028	0.005	0.194	17.0	7.2	9.8
GM27	23.2	1.57	0.042	0.004	0.198	16.4	7.6	8.8
<i>Polyurethane (rigid) foams</i>								
GM29	26.0	1.52	0.031	0.003	0.130	16.4	6.8	9.6
GM31	25.0	1.53	0.038	0.002	0.125	15.8	7.1	8.8
GM35	28.0	1.58	0.025	0.001	0.104	17.6	7.8	9.8
GM37	28.0	1.63	0.024	0.001	0.113	17.9	8.7	9.2
GM41	26.2	1.18	0.046	0.004	—	15.7	5.7	10.0
GM43	22.2	1.11	0.051	0.004	—	14.8	6.4	8.4
<i>Polystyrene foams</i>								
GM47	38.1	2.30	0.060	0.014	0.180	25.9	11.4	14.5
GM49	38.2	2.30	0.065	0.016	0.210	25.6	9.9	15.7
GM51	35.6	2.34	0.058	0.013	0.185	24.6	10.4	14.2

Κεφάλαιο 4

4 ΜΕΛΕΤΗ ΠΥΡΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΣΤΑ ΠΛΟΙΑ

4.1 Κανονισμοί πυρασφάλειας

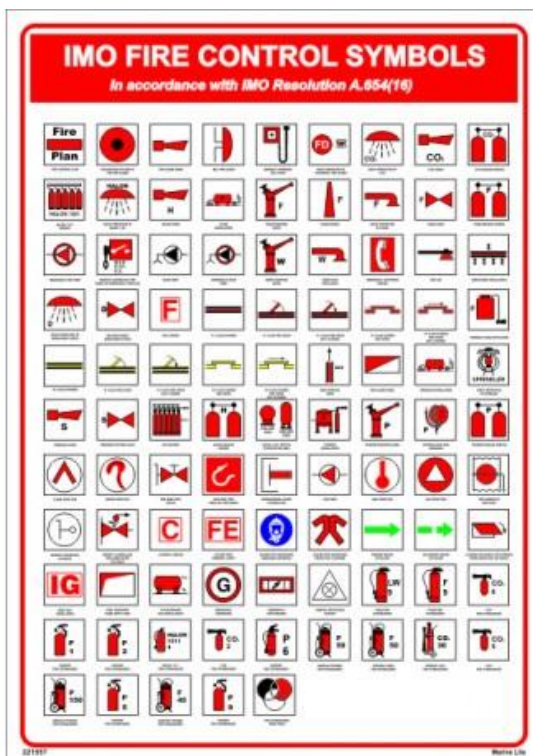
Οι πυρκαγιές σε ένα πλοίο μπορεί να φέρουν καταστροφικά αποτελέσματα και ιδιαίτερα σε ένα επιβατηγό πλοίο όπου υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός ανθρώπων και η διαφυγή τους θα είναι πιο δύσκολη. Εξίσου μεγάλος κίνδυνος υπάρχει και για τα πλοία που μεταφέρουν εύφλεκτο φορτίο και έτσι οι κίνδυνοι για το πλήρωμά τους αλλά και για τα λιμάνια στα οποία δένουν είναι πολύ μεγάλοι.

Λόγω των ανωτέρω κινδύνων στις 1 Ιουλίου 2002 τέθηκε σε εφαρμογή μια νέα τροποποιημένη και ολοκληρωμένη σειρά από προδιαγραφές σχετικά με την πυρασφάλεια, την πυρανίχνευση αλλά και την αντιμετώπιση της πυρκαγιάς στα πλοία, η οποία αποτελεί το αναθεωρημένο Κεφάλαιο II-2 της διεθνούς συνθήκης για την ασφάλεια της ανθρώπινης ζωής στη θάλασσα (IMO, 2009) εντάσσοντας τεχνολογικές καινοτομίες αλλά και μαθήματα που πάρθηκαν μετά από ατυχήματα πλοίων λόγω πυρκαγιάς κατά την διάρκεια των χρόνων.

Οι κανονισμοί έχουν θεσπιστεί πρωτίστως για να αποτρέψουν την πιθανότητα έναρξης πυρκαγιάς σε κάποιο πλοίο για παράδειγμα χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα διαχωριστικά στους τοίχους καθώς επίσης και κατάλληλα υλικά, όπως χαλιά και επικαλύψεις τοίχων, ώστε να μειωθεί ο κίνδυνος πρόκλησης και επέκτασης πυρκαγιάς. Ακόμη οι κανονισμοί στοχεύουν στην γρήγορη ανίχνευση πυρκαγιάς και τέλος στην άμεση αντιμετώπιση, περιορισμό και κατάσβεσή της.

Ο διεθνής ναυτιλιακός οργανισμός (IMO), εκτός από τη SOLAS, έχει εκδώσει και επιπλέον κάποιους κώδικες που αναφέρονται επιγραμματικά στις απαιτήσεις για πυρασφάλειας πλοίων, και συγκεκριμένα το Fire Safety Systems code (IMO, 2015) και το Fire Test Procedures code (IMO, 2010). Παράλληλα έχει δημιουργήσει διάφορα μαθήματα προς εκπαίδευση όλων των εμπλεκόμενων μερών. Αυτά είναι το Model Course 1.20 Fire Prevention & Fire Fighting, το Model Course 2.03 - Advanced Fire Fighting, και το Model Course 3.05 - Survey of Fire Appliances. Τέλος έχει εκδώσει και το «Symbols for Fire Control Plans» όπου αναφέρονται όλοι οι συμβολισμοί που

χρησιμοποιούνται στο απαιτούμενο πλάνο ελέγχου πυρκαγιάς (Σχήμα 4.1). Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στους σημαντικότερους εξ αυτών.



Σχήμα 4.1: Συμβολισμοί ελέγχου πυρκαγιάς (IMO).^{xxi}

4.1.1 Διεθνής σύμβαση SOLAS

Η Διεθνής Σύμβαση για την Ασφάλεια της Ανθρώπινης Ζωής στη Θάλασσα (SOLAS) είναι η πιο σημαντική για την ασφάλεια στη ναυτιλία. Το πρώτο κείμενο τέθηκε σε ισχύ στις 20 Ιανουαρίου 1914, ενώ το δεύτερο το 1933 και τροποποιήθηκε ξανά το 1948. Το ίδιο έτος υπεγράφη στη Γενεύη διεθνής συνθήκη για τη σύσταση του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (International Maritime Organization), ο οποίος ανέλαβε πλέον την πρωτοβουλία και επιμέλεια της διεθνούς νομοθεσίας για τα τεχνικά θέματα που αφορούν την ασφάλεια στη ναυσιπλοΐα.

Το 1974 ψηφίστηκε η νέα σύμβαση SOLAS, που περιείχε την παλαιότερη έκδοση του 1960 και όλες τις τροποποιήσεις της, καθώς και διάφορες βελτιώσεις. Η σύμβαση αυτή τέθηκε σε ισχύ στις 25 Μαΐου 1980 και είναι αυτή που ισχύει σήμερα με συνεχείς βελτιώσεις.

Η SOLAS θέτει κάποια ελάχιστα πρότυπα ασφαλείας σχετικά με την κατασκευή, τον εξοπλισμό και τη λειτουργία των πλοίων, τα μέτρα πυρασφάλειας, τη μεταφορά των φορτίων ακόμα και την ασφάλεια της ναυσιπλοΐας. Επίσης καθορίζει τα πιστοποιητικά που αποδεικνύουν την τήρηση αυτών των ελαχίστων προτύπων ασφαλείας καθώς και τους ελέγχους που θα βεβαιώνουν την τήρησή τους. Τα βασικά κεφάλαια της SOLAS φαίνονται στον Πίνακα 6.

Πίνακας 6: Κεφάλαια σύμβασης SOLAS

ΚΕΦΑΛΑΙΟ I.	ΓΕΝΙΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ
ΚΕΦΑΛΑΙΟ II-1.	ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ - ΔΟΜΗ, ΥΠΟΔΙΑΙΡΕΣΗ & ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ, ΜΗΧΑΝΟΛ. & ΗΛΕΚΤΡΟΛ. ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ
ΚΕΦΑΛΑΙΟ II-2.	ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ - ΠΥΡΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑ, ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΒΕΣΗ ΠΥΡΚΑΪΑΣ
ΚΕΦΑΛΑΙΟ III.	ΣΩΣΤΙΚΑ ΜΕΣΑ. Κ.Λ.Π.
ΚΕΦΑΛΑΙΟ IV.	ΡΑΔΙΟΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ
ΚΕΦΑΛΑΙΟ V.	ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΝΑΥΣΙΠΛΟΙΑΣ
ΚΕΦΑΛΑΙΟ VI.	ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΦΟΡΤΙΩΝ ΚΑΙ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ
ΚΕΦΑΛΑΙΟ VII.	ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ
ΚΕΦΑΛΑΙΟ VIII.	ΠΥΡΗΝΟΚΙΝΗΤΑ ΠΛΟΙΑ
ΚΕΦΑΛΑΙΟ IX.	ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΣΦΑΛΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΠΛΟΙΩΝ
ΚΕΦΑΛΑΙΟ X.	ΜΕΤΡΑ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΤΑΧΥΠΛΟΩΝ ΣΚΑΦΩΝ
ΚΕΦΑΛΑΙΟ XI 1.	ΕΙΔΙΚΑ ΜΕΤΡΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ ΤΗΣ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ
ΚΕΦΑΛΑΙΟ XI 2.	ΕΙΔΙΚΑ ΜΕΤΡΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ ΤΗΣ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ
ΚΕΦΑΛΑΙΟ XII.	ΠΡΟΣΘΕΤΑ ΜΕΤΡΑ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΓΙΑ ΦΟΡΤΗΓΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΧΥΜΑ ΦΟΡΤΙΩΝ
ΚΕΦΑΛΑΙΟ XIII.	ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΣΥΜΜΟΡΦΩΣΗΣ

Στο πίνακα 6 βλέπουμε πως το Κεφάλαιο II-2 της SOLAS πραγματεύεται την κατασκευή-πυροπροστασία, ανίχνευση και κατάσβεση πυρκαγιάς και έχει ως βασικούς στόχους τους κάτωθι:

- Αποτροπή της εκδήλωσης πυρκαγιάς ή έκρηξης
- Μείωση τη πιθανότητας έκθεσης της ανθρώπινης ζωής σε κίνδυνο λόγω πυρκαγιάς.
- Μείωση πιθανότητας πρόκλησης ζημιάς στο φορτίο του πλοίου ή στο περιβάλλον λόγω πυρκαγιάς.
- Περιορισμός και καταστολή της πυρκαγιάς στο χώρο που ξεκίνησε.
- Παροχή κατάλληλων και εύκολα προσβάσιμων τρόπων διαφυγής για τους επιβάτες και το πλήρωμα.

Οι λειτουργικές απαιτήσεις που θέτει το Κεφάλαιο II-2 είναι οι εξής:

- Διαχωρισμός του πλοίου σε κύριες οριζόντιες και κατακόρυφες ζώνες με θερμικά και κατασκευαστικά όρια
- Διαχωρισμός των χώρων ενδιαίτησης από το υπόλοιπο πλοίο με θερμικά και κατασκευαστικά όρια.
- Περιορισμένη χρήση εύφλεκτων υλικών.
- Ανίχνευση της πυρκαγιάς στη ζώνη που ξεκίνησε.
- Περιορισμός και καταστολή της πυρκαγιάς στο χώρο που ξεκίνησε.
- Προστασία των μέσων διαφυγής και πρόσβασης στον εξοπλισμό πυρασφάλειας.
- Άμεση ετοιμότητα των μέσων/συσκευών πυροπροστασίας.
- Ελαχιστοποίηση της πιθανότητας ανάφλεξης λόγω εύφλεκτου φορτίου.

Στους κανονισμούς 5 και 6 ορίζονται ειδικές απαιτήσεις για τα υλικά που χρησιμοποιούνται, πιο συγκεκριμένα:

- Μη εύφλεκτα υλικά για την πυροπροστασία της κατασκευής (καταστρώματα, τοίχοι, πόρτες κτλ.)

- Χαρακτηριστικά χαμηλής διάδοσης της πυρκαγιάς (επιφάνειες τελειώματος συμπεριλαμβανομένων των χρωμάτων, δαπέδων, πλαστικών σωλήνων κτλ.)
- Περιορισμός της πρόκλησης καπνού και τοξικών αερίων (επιφάνειες τελειώματος, δάπεδα, πλαστικοί σωλήνες κτλ.)
- Αποφυγή αναφλεξιμότητας (κουρτίνες, υφάσματα, καλύμματα κτλ.)

4.1.2 Κώδικας FSS

Ο διεθνής κώδικας για τα συστήματα ασφαλείας ενάντια πυρκαγιάς (FSS Code) υιοθετήθηκε από την επιτροπή θαλάσσιας ασφαλείας (Maritime Safety Committee - MSC) στην 73η σύνοδό της το Δεκέμβριο του 2000 με σκοπό να παρέχει διεθνής προδιαγραφές για τα συστήματα ασφαλείας ενάντια πυρκαγιάς και εξοπλισμού όπως απαιτείται από το Κεφάλαιο II-2 της SOLAS. Ο κώδικας τέθηκε σε ισχύ την 1 Ιουλίου 2002. Οι περισσότερες από τις απαιτήσεις του κώδικα προστέθηκαν έπειτα από μεγάλες καταστροφές επιβατηγών πλοίων τον περασμένο αιώνα. Από την πρώτη μέρα εφαρμογής του μέχρι σήμερα έχουν γίνει πολλές προσθήκες και αναθεωρήσεις. Οι τροποποιήσεις αυτές αναφέρονται στη συνέχεια:

1. Από τις τροποποιήσεις το Δεκέμβριο του 2006 οι οποίες υιοθετήθηκαν από την απόφαση MSC.217(82) και τέθηκαν σε ισχύ την 1 Ιουλίου 2008 και 1 Ιουλίου 2010.
2. Από τις τροποποιήσεις το Μάιο του 2010 οι οποίες υιοθετήθηκαν από την απόφαση MSC.292(87) και τέθηκαν σε ισχύ την 1 Ιανουαρίου 2012.
3. Από τις τροποποιήσεις το Δεκέμβριο του 2010 οι οποίες υιοθετήθηκαν από την απόφαση MSC.311(88) και τέθηκαν σε ισχύ την 1 Ιουλίου 2012.
4. Από τις τροποποιήσεις το Μάιο του 2012 οι οποίες υιοθετήθηκαν από την απόφαση MSC.327(90) και τέθηκαν σε ισχύ την 1 Ιανουαρίου 2014.
5. Από τις τροποποιήσεις το Νοέμβριο του 2012 οι οποίες υιοθετήθηκαν από την απόφαση MSC.339(91) και τέθηκαν σε ισχύ την 1 Ιουλίου 2014.
6. Από τις τροποποιήσεις το Μάιο του 2014 οι οποίες υιοθετήθηκαν από την απόφαση MSC.367(93) και τέθηκαν σε ισχύ την 1 Ιανουαρίου 2016.

4.1.3 Κώδικας FTP

Ο διεθνής κώδικας για την εφαρμογή των διαδικασιών δοκιμής πυρκαγιάς (FTP, 2010), υιοθετήθηκε από την επιτροπή ασφάλειας θάλασσας (MSC) με την απόφαση MSC.307(88) και είναι αποτέλεσμα ενός πενταετούς προγράμματος εργασίας που ξεκίνησε το 2006 από την ειδική υπό-επιτροπή Προστασίας από πυρκαγιές του IMO. Ο κώδικας σχεδιάστηκε και εγκρίθηκε από τον IMO και καθίσταται ως υποχρεωτικός κάτω από την ομπρέλα του Κεφαλαίου II-2 της SOLAS. Η νέα έκδοση του κώδικα που τέθηκε σε εφαρμογή από τη 1 Ιουλίου 2012 έχει δομή εναρμονισμένη με αυτή της προηγούμενης, αλλά επιπρόσθετα αποτελεί ένα αυτοτελή εργαλείο σχεδιασμένο για άμεση εφαρμογή από την βιομηχανία.

Ο κώδικας περιέχει τις εξής απαιτήσεις για την υλοποίηση των δοκιμών:

- εργαστηριακές μετρήσεις
- τη μορφοποίηση των τελικών αναφορών
- τη διαδικασία επιλογής των υλικών και ότι άλλο απαιτείται για ναυτιλιακές εφαρμογές.

Λαμβάνοντας υπόψη τους εναλλακτικούς σχεδιασμούς και διατάξεις που είναι εφικτοί σύμφωνα με τον κανονισμό της SOLAS II-2/17, ο κώδικας παρέχει επίσης την δυνατότητα εφαρμογής διαφορετικών δοκιμών με τη προϋπόθεση ότι το επίπεδο ασφαλείας των υλικών και όλων των κατασκευών που έχουν οριστεί ακολουθώντας τη συνθήκη δεν συμβιβάζονται και ανταποκρίνονται στο ελάχιστο που περιέχεται στις προδιαγραφές τους.

Το παράρτημα 1 του κώδικα καθορίζει τις δοκιμές πυρκαγιάς ως εξής:

- ❖ δοκιμή μη-καύσης (non- combustibility test)
- ❖ δοκιμή καπνού και τοξικότητας
- ❖ δοκιμές για τα συστήματα ελέγχου στις πόρτες πυρασφάλειας
- ❖ δοκιμές για την ευφλεκτότητα των επιφανειών
- ❖ δοκιμές για τα κάθετα υποστηριζόμενα υφάσματα
- ❖ δοκιμές για τα καλύμματα των επίπλων
- ❖ δοκιμές για τα κλινοσκεπάσματα

- ❖ δοκιμές για αντιπυρικά υλικά στα ταχύπλοα
- ❖ δοκιμές στα πυρίμαχα μέρη των ταχύπλων

Τα παραρτήματα 2 και 4 στοχεύουν στο να είναι βάση αναφοράς για τους χρήστες του κώδικα FTP, τους σχεδιαστές, τους κατασκευαστές, τους οργανισμούς που πραγματοποιούν τις δοκιμές, τους πλοιοκτήτες, και τους διαχειριστές ώστε να τους παρέχουν επιπλέον πληροφορίες και καθοδήγηση για το πως να καθορίζουν τη προσέγγιση των δοκιμών ανάλογος των διάφορων υλικών, αλλά και να συμβαδίζουν με τους κανονισμούς της SOLAS.

Ο κώδικας FTP έχει ως σκοπό να χρησιμοποιείται από την διοίκηση και την αρμόδια αρχή του κράτους σημαίας (flag state) κατά την έγκριση προϊόντων που θα εγκατασταθούν στα πλοία, τα οποία φέρουν τη σημαία του κράτους και είναι σε συμφωνία με τις απαιτήσεις ασφαλείας για πυρκαγιές της SOLAS.

4.1.4 Ατυχήματα που οδήγησαν στις αλλαγές των κανονισμών

Τα περιεχόμενα της SOLAS έχουν διαμορφωθεί σταδιακά βάση ατυχημάτων που οδήγησαν σε υιοθέτηση νέων κανονισμών ή αλλαγές υφιστάμενων. Ορισμένα από αυτά τα ατυχήματα περιγράφονται παρακάτω:

- ◆ Το ναυάγιο του Τιτανικού (1912) το οποίο οδήγησε στην εφαρμογή των πρώτων απαιτήσεων πυρασφάλειας στα πλοία στη σύμβαση SOLAS 1914, η οποία λόγω του πρώτου παγκοσμίου πολέμου τέθηκε σε ισχύ αργότερα ως σύμβαση SOLAS 1929.
- ◆ Το 1934 προκλήθηκε πυρκαγιά στο πλοίο Morro Castle η οποία οδήγησε στη δημιουργία νέων κανονισμών που προστέθηκαν στη σύμβαση SOLAS 1948 μετά το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο.
- ◆ Το 1990 η καταστροφή του MS Scandinavian Star disaster οδήγησε σε αναδιάρθρωση του Κεφαλαίου II-2 της διεθνούς σύμβασης SOLAS στις 1 Νοεμβρίου του 1974 που υπογράφηκε στο Λονδίνο στις 10 Απριλίου 1992.

4.2 Λογισμικά πακέτα

Όπως έχει γίνει κατανοητό έως τώρα, η πυρκαγιά αποτελεί ένα περίπλοκο φαινόμενο κατά τη διάρκεια του οποίου πραγματοποιούνται διάφορες φυσικές και χημικές διαδικασίες διαφορετικής έντασης και μπορεί να ξεκινήσει απρόβλεπτα σε χώρους συγκέντρωσης πολλών ανθρώπων. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί διάφορα εργαλεία για τη μελέτη της πυρκαγιάς, μεταξύ άλλων και λογισμικά προγράμματα προσομοίωσης πυρκαγιάς. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι με τέτοια εργαλεία δίνεται η δυνατότητα σχεδιασμού συγκεκριμένων σεναρίων πυρκαγιάς για τη μελέτη εξέλιξης τόσο της πυρκαγιάς όσο και των παραγώγων αυτής. Έχοντας κανείς τη δυνατότητα να προσομοιώσει μια πυρκαγιά μπορεί επιπλέον να προχωρήσει στη διεξαγωγή διαφόρων μελετών όπως σύγκριση ασφάλειας έναντι πυρκαγιάς για συγκεκριμένες διατάξεις γεωμετρίας. Τα προγράμματα προσομοίωσης πυρκαγιάς που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: α) μοντέλα ζώνης και β) μοντέλα πεδίου. Τα μοντέλα αυτά αναλύονται στη συνέχεια.

4.2.1 Μοντέλα ζώνης (Zone Models)

Τα μοντέλα ζώνης διαχωρίζουν τους χώρους σε μία ή περισσότερες ζώνες. Συνήθως ο διαχωρισμός γίνεται σε δύο ζώνες, το άνω στρώμα που βρίσκονται τα προϊόντα καύσης και το κάτω στρώμα που αποτελείται από ψυχρότερο αέρα σχετικά απαλλαγμένο από προϊόντα καύσης (Traveli et. al., 2014). Μειονέκτημα αποτελεί η εφαρμογή τους που περιορίζεται στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τα οποία μελετάται το μοντέλο και έτσι χρησιμοποιούνται για ανάλυση σε δωμάτια ή απλά κτήρια, αλλά και πως η προσομοίωση που πραγματοποιείται είναι της τάξεως των δευτερολέπτων σε χρόνο. Το CFAST (Consolidated Model of Fire and Smoke Transport) είναι μοντέλο ζώνης και χρησιμοποιείται για τη προσομοίωση των επιπτώσεων παλαιών ή νέων πιθανών σεναρίων πυρκαγιάς σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον. Το πρόγραμμα υπολογίζει τη κατανομή του καπνού και των αερίων καθώς και τη θερμοκρασία στο χώρο για το χρόνο που δίνεται από το χρήστη. Άλλα λογισμικά στην ίδια κατηγορία είναι το FIRST (FIRE Simulation Technique), το CCFM (Consolidated Compartment Fire Model version VENTS) και το BRANZFIRE.

4.2.2 Μοντέλα πεδίου (*Field Models*)

Τα μοντέλα πεδίου χρησιμοποιούν εξισώσεις υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) με βασικό σημείο τη δημιουργία πλέγματος αποτελούμενο από μικρά κελιά στο οποίο χτίζεται η γεωμετρία που είναι προς μελέτη. Με τη χρήση πλέγματος η ανάλυση έχει μεγαλύτερη ακρίβεια, καθώς οι υπολογισμοί γίνονται σε κελί, γεγονός που το καθιστά λειτουργικό ακόμη και σε πολύπλοκες γεωμετρίες (Traveli et al., 2014).

Το Fluent είναι λογισμικό πρόγραμμα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής για ασυμπίεστες και ήπια συμπιεστές ροές. Μπορούν να δημιουργηθούν φυσικά μοντέλα σε μη δομημένα πλέγματα με αποτέλεσμα να είναι πιο απλοποιημένη η διαδικασία και να υπάρχει ακρίβεια λόγω της δυνατότητας προσαρμογής του πλέγματος. Το SMARTFIRE είναι ένα άλλο πρόγραμμα μοντέλου πεδίου που έχει δημιουργηθεί αποκλειστικά για προσομοιώσεις πυρκαγιάς από the Fire Safety Engineering Group (FSEG) στο Πανεπιστήμιο του Greenwich. Το ANSYS-CFX παρέχει ακρίβεια και αξιοπιστία σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών υπολογιστικής ρευστοδυναμικής και πολύπλευρων φυσικών μοντέλων. Τέλος, ένα από τα πιο διαδεδομένα και σημαντικά προγράμματα με χρήση μοντέλου πεδίου είναι το FDS (Fire Dynamics Simulator).

Το FDS είναι ένα πρόγραμμα υπολογιστικής ρευστομηχανικής, το οποίο δημιουργήθηκε από το NIST (National Institute of Standards and Technology) και αποτελεί έναν ανοιχτό κώδικα προς χρήση (open source). Το συγκεκριμένο πρόγραμμα λύνει αριθμητικά εξισώσεις Navier-Stokes για πυρκαγιές με χαμηλή ταχύτητα διάδοσης που προκαλούν ροές με έμφαση στη μεταφορά του καπνού και θερμότητας από τη πυρκαγιά και περιλαμβάνει χημικές και θερμικές διεργασίες. Οι εξισώσεις Navier-Stokes (Σχήμα 4.2) για ασυμπίεστη ροή νευτώνειων υγρών έχουν ως εξής:

$$\rho \left(\frac{\partial U_1}{\partial t} + U_1 \frac{\partial U_1}{\partial x_1} + U_2 \frac{\partial U_1}{\partial x_2} + U_3 \frac{\partial U_1}{\partial x_3} \right) = \rho f_1 - \frac{\partial P}{\partial x_1} + \mu \nabla^2 U_1$$

$$\rho \left(\frac{\partial U_2}{\partial t} + U_1 \frac{\partial U_2}{\partial x_1} + U_2 \frac{\partial U_2}{\partial x_2} + U_3 \frac{\partial U_2}{\partial x_3} \right) = \rho f_2 - \frac{\partial P}{\partial x_2} + \mu \nabla^2 U_2$$

$$\rho \left(\frac{\partial U_3}{\partial t} + U_1 \frac{\partial U_3}{\partial x_1} + U_2 \frac{\partial U_3}{\partial x_2} + U_3 \frac{\partial U_3}{\partial x_3} \right) = \rho f_3 - \frac{\partial P}{\partial x_3} + \mu \nabla^2 U_3$$

Σχήμα 4.2: Εξισώσεις Navier-Stokes για ασυμπίεστη ροή

Οι υπολογισμοί που λαμβάνουν χώρα κατά την επίλυση του προβλήματος στο FDS αποτελούν προσομοίωση μεγάλων δινών (Large Eddy Simulation-LES) με αποτέλεσμα να δημιουργείται άλλο μοντέλο σε υπο-πλέγμα για τα παράγωγα που διαχέονται. Παράλληλα υπάρχουν και υπολογισμοί άμεσης αριθμητικής προσομοίωσης (Direct Numerical Simulation) όπου υπολογίζονται άμεσα όλες οι παράμετροι που διαχέονται. Στην περίπτωση που ο χρήστης τροποποιήσει το αρχικό πλέγμα που περιλαμβάνει τη γεωμετρία η μέθοδος υπολογισμού για τη προσομοίωση αλλάζει από LES σε DNS.

Τέλος το FDS, αποτελώντας κώδικα CFD, δεν μπορεί παρά να εφαρμόζει τις θεμελιώδεις εξισώσεις που χαρακτηρίζουν ένα νευτώνειο υγρό, οι οποίες δίνονται στο Σχήμα 4.3.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \rho u = \dot{m}_b^{\#} \quad (\text{Διατήρησης μάζας})$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \nabla \rho u u + \nabla p = \rho g + f_b + \nabla t_{ij} \quad (\text{Διατήρησης ορμής})$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \rho h u = \frac{Dp}{Dt} + \dot{q}^{\#} - \dot{q}_b^{\#} - \nabla \dot{q}^{\#} + \varepsilon \quad (\text{Διατήρησης ενέργειας})$$

$$p = \frac{\rho RT}{W} \quad (\text{Ιδανικού αερίου})$$

Σχήμα 4.3: Θεμελιώδεις εξισώσεις υπολογιστικής ρευστομηχανικής

4.2.3 Pyrosim

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, επιλέχθηκε η χρήση του κώδικα FDS λόγω τόσο των πολλών δυνατοτήτων που έχει για τη μελέτη πυρκαγιάς, όσο και λόγω της χρηστικότητάς του καθώς είναι τύπου open source.

Συγκεκριμένα για την εκπόνηση της διατριβής χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πακέτο «Pyrosim», το οποίο έχει δημιουργηθεί από την Αμερικανική εταιρία «Thunderhead Engineering Consultants» για να διευκολύνει την προετοιμασία των δεδομένων για τις προσομοιώσεις του FDS. Ο λόγος που επιλέχθηκε αυτό το λογισμικό για την εκπόνηση της παρούσης μελέτης είναι ότι αποτελεί ένα γραφικό περιβάλλον χρήστη στο οποίο μπορεί να γίνει δημιουργία και διαχείριση των λεπτομερειών πολύπλοκων μοντέλων πυρκαγιάς.

Οι κύριες λειτουργίες του Pyrosim, που αποτελεί ένα εναλλακτικό τρόπο δημιουργίας σύνθετων μοντέλων, είναι η εισαγωγή των ήδη υπάρχοντων μοντέλων FDS, η εισαγωγή αρχείων Pyrosim και αρχείων CAD. Επιπλέον, το PyroSim προσφέρει τη δυνατότητα δημιουργίας γεωμετρίας 2D και 3D υψηλού επιπέδου, όπως διαγώνιοι τοίχοι, εικόνες φόντου για σκιαγράφηση, ομαδοποίηση αντικειμένων και ευέλικτες επιλογές εμφάνισης. Ακόμη υπάρχει η επιλογή της παράλληλης προσομοίωσης για πολλά πλέγματα ταυτόχρονα όταν υπάρχει υπολογιστής με πολλούς πυρήνες.

Οι μελέτες που γίνονται με χρήση του PyroSim αποσκοπούν σε διάφορα ζητήματα, μεταξύ άλλων και στα παρακάτω:

- Διασφάλιση της ασφάλειας των χώρων/κτηρίων πριν ξεκινήσει η κατασκευή τους.
- Αξιολόγηση των επιλογών ασφαλείας σε υφιστάμενα κτήρια ή κατασκευές
- Αναπαράσταση πυρκαγιών για εξιχνίαση αιτιών ατυχημάτων. με πυρκαγιές
- Βοήθεια στην εκπαίδευση για κατασβέσεις πυρκαγιών.

Κεφάλαιο 5

5 ΥΛΙΚΑ ΣΕ ΚΡΟΥΑΖΙΕΡΟΠΛΟΙΑ

5.1 Περιγραφή των υλικών

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε χερσαίες κατασκευές ποικίλουν και υπάρχουν πολλές επιλογές σε ποιότητα και σχέδια. Όμως για την περίπτωση των κρουαζιερόπλοιων υπάρχουν πολλοί περιορισμοί στην επιλογή των υλικών ώστε να ανταποκρίνονται στις προδιαγραφές σχετικές με την ασφάλεια και την πρόληψη πυρκαγιάς. Τα υλικά κατασκευής αλλά και αυτά που χρησιμοποιούνται στους εσωτερικούς χώρους των επιβατηγών πλοίων και των κρουαζιερόπλοιων πρέπει να υπακούν στους κανόνες και τους κανονισμούς της SOLAS και του IMO και να συνοδεύονται από πιστοποιητικό εγκεκριμένο από τις αρμόδιες αρχές.

Οι χώροι στα κρουαζιερόπλοια αποτελούνται από στοιχεία εσωτερικού σχεδιασμού και οι τελικές τους μορφές είναι συνδυασμός αυτών των στοιχείων. Αυτά τα στοιχεία που αποτελούν το σχεδιασμό επικεντρώνονται στο να δημιουργούν χώρο και δημιουργούν διάφορα μοτίβα στους εσωτερικούς χώρους. Η θερμομόνωση και η ηχομόνωση αποτελούν πολύ σημαντικές παραμέτρους για την επιλογή των υλικών στους εκάστοτε χώρους. Ειδικότερα η θερμομόνωση αποτελεί ένα πολύ σημαντικό παράγοντα με υψηλές απαιτήσεις για τα κρουαζιερόπλοια που πλέουν κάτω από διαφορετικές συνθήκες. Η καλή ηχομόνωση είναι απαραίτητη για την άνεση των επιβατών στους χώρους του πλοίου καθότι μέσα σε αυτό υπάρχει βαρύς μηχανολογικός εξοπλισμός αλλά ειδικότερα στα κρουαζιερόπλοια υπάρχουν πολλοί χώροι δραστηριοτήτων και χώροι που συγκεντρώνεται μεγάλος αριθμός ατόμων (Bygh, 2006). Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζονται διάφορα υλικά που χρησιμοποιούνται στα μέρη ενός κρουαζιερόπλοιου.

ΤΟΙΧΟΙ	
Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την επένδυση αλλά και για τα διαχωριστικά στους τοίχους πρέπει να έχουν εξαιρετική αντοχή, ηχομόνωση, θερμομόνωση και λειτουργικότητα.	
<i>Vermiculite – hard core panels</i> , βερμικουλίτης- πάνελ σκληρού πυρίνα	
<i>Mineral wool – softcore panels</i> , ορυκτοβάμβακας- πάνελ μαλακού πυρήνα	
<i>Aluminum – metal sandwich panels</i> , αλουμίνιο – μεταλλικά πάνελ τύπου σάντουιτς	
ΔΑΠΕΔΑ	ΟΡΟΦΕΣ
Κεραμικά πλακάκια	Επαναλαμβανόμενες
Φύλλα Βυνιλίου	Πλακάκια/Κασέτας
Ξύλο	Πλέγματος/σχάρας
Φυσική ή τεχνητή πέτρα	Κατά παραγγελία
Τα χαλιά πρέπει να έχουν ειδικές προδιαγραφές οι οποίες είναι να αποτελούνται από 70-80% μαλλί, 20-30% νάιλον, βάρος /στιβάδα 1600 g/m ² και ύψος στιβάδας 7mm για να μειωθούν τα τοξικά αέρια σε περίπτωση πυρκαγιάς.	
ΠΟΡΤΕΣ & ΠΑΡΑΘΥΡΑ	ΔΙΑΚΟΣΜΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ
Ατσάλι	Κουρτίνες
Γυαλί	Υφάσματα
Αλουμίνιο	Καλύμματα
ΕΞΩΤΕΡΙΚΑ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΑ	
Ξύλο Teak	
<i>Plywood</i> - Κόντρα πλακέ	
ΕΠΙΠΛΩΣΗ	
Τα έπιπλα που τοποθετούνται στα κρουαζιερόπλοια κατηγοριοποιούνται σε κατά παραγγελία και σε προκατασκευασμένα. Τα έπιπλα που παραγγέλλονται είναι αυτά που τοποθετούνται εξαρχής στα ατσάλινα καταστρώματα και στις καμπίνες των επιβατών και δεν μετακινούνται. Τα έτοιμα έπιπλα μπορούν να μετακινηθούν στους χώρους του πλοίου και υπάρχουν μοντέρνα, αλλά και κλασικά σχέδια τέτοιας επίπλωσης.	

Σχήμα 5.1: Υλικά που χρησιμοποιούνται στα κρουαζιερόπλοια.

5.2 Ιδιότητες υλικών

Θερμική αγωγιμότητα / λ (λάμδα): Η θερμική αγωγιμότητα μετρά την ευκολία με την οποία η θερμότητα μπορεί να ταξιδέψει μέσα από ένα υλικό μέσω αγωγής. Η αγωγιμότητα είναι η κύρια μορφή μεταφοράς θερμότητας μέσω μόνωσης και συχνά ονομάζεται τιμή λ (λάμδα).

Θερμική αντίσταση (R): Η θερμική αντίσταση είναι ένας αριθμός που συνδέει τη θερμική αγωγιμότητα ενός υλικού με το πλάτος του και εκφράζεται σε αντίσταση ανά μονάδα επιφάνειας (m²K / W). Μεγαλύτερο πάχος σημαίνει μικρότερη ροή θερμότητας και έτσι υπάρχει χαμηλότερη αγωγιμότητα. Αυτές οι παράμετροι μαζί αποτελούν τη θερμική αντίσταση της κατασκευής. Ένα στρώμα κατασκευής με υψηλή θερμική αντοχή είναι ένας καλός μονωτής, ενώ ένα με χαμηλή θερμική αντίσταση είναι κακός μονωτής.

$$\text{Θερμική αντίσταση (m}^2\text{K/W)} = \text{Πάχος(m)} / \text{Αγωγιμότητα (W/mK)}$$

Ειδική θερμοχωρητικότητα: Η ειδική θερμοχωρητικότητα ενός υλικού είναι η ποσότητα θερμότητας που απαιτείται για την αύξηση της θερμοκρασίας του 1kg του υλικού κατά 1K (ή κατά 1°C). Ένας καλός μονωτής έχει υψηλότερη ειδική θερμοχωρητικότητα επειδή χρειάζεται χρόνος για να απορροφήσει περισσότερη θερμότητα πριν θερμανθεί (αύξηση της θερμοκρασίας) για να μεταφερθεί η θερμότητα. Η υψηλή ειδική θερμοχωρητικότητα είναι χαρακτηριστικό των υλικών που παρέχουν θερμική απομόνωση (Decrement Delay).

Πυκνότητα: Η πυκνότητα αναφέρεται στη μάζα (ή βάρος) ανά μονάδα όγκου ενός υλικού και μετράτε σε kg / m³. Ένα υλικό υψηλής πυκνότητας μεγιστοποιεί το συνολικό βάρος και είναι μια παράμετρος της «χαμηλής» θερμικής διάχυσης και της «υψηλής» θερμικής μάζας.

Θερμική διάχυση: Η θερμική διάχυση μετρά την ικανότητα ενός υλικού να μεταφέρει θερμική ενέργεια σε σχέση με την ικανότητά του να αποθηκεύει θερμική ενέργεια. Για παράδειγμα, τα μέταλλα μεταδίδουν ταχεία θερμική ενέργεια (κρύο στην αφή), το ξύλο είναι αργός πομπός, ενώ οι μονωτές έχουν χαμηλή θερμική διάχυση.

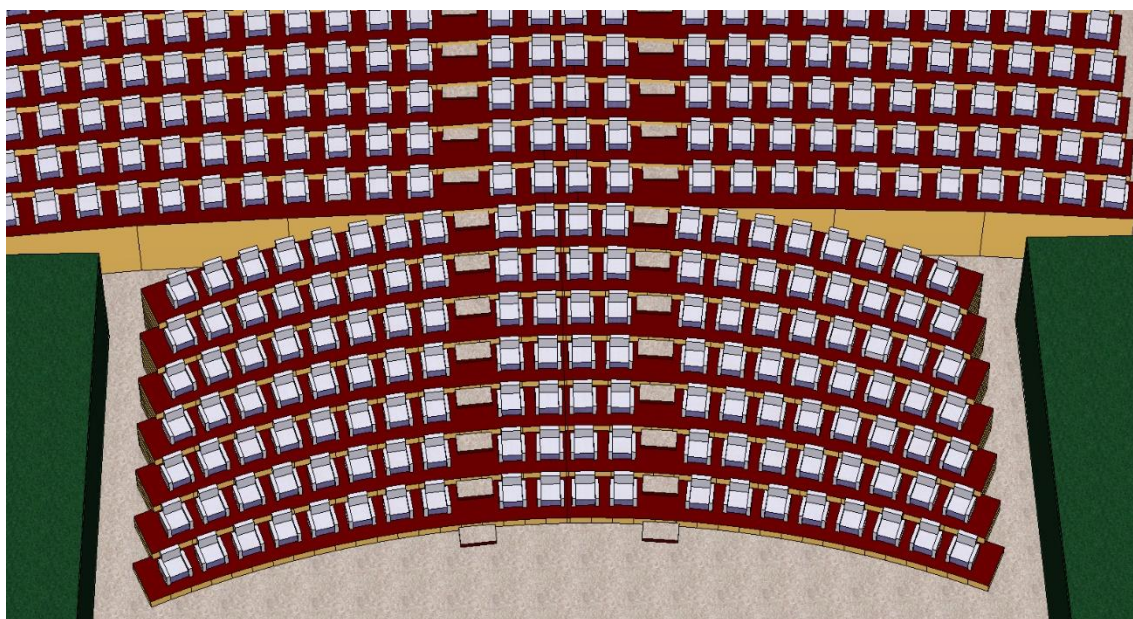
$$\text{Θερμική διάχυση (mm}^2 / \text{s)} = \text{Θερμική Αγωγιμότητα} / \text{Πυκνότητα} \times \text{Ειδική Θερμοκρασία}$$

Κεφάλαιο 6

6 ΕΦΑΡΜΟΓΗ

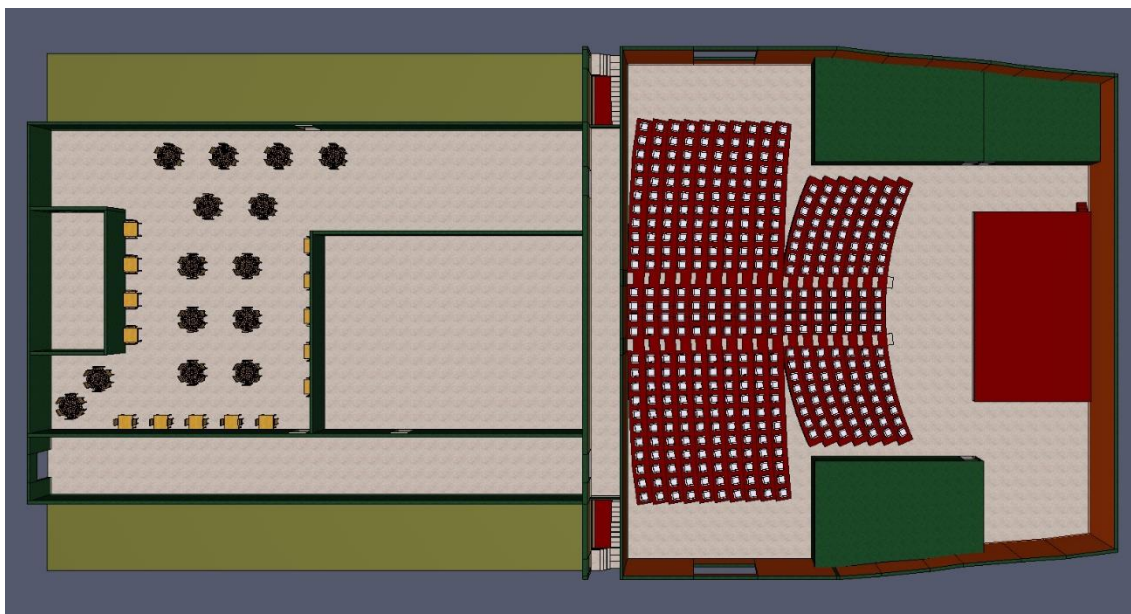
6.1 Γεωμετρία

Το σχέδιο που δημιουργήθηκε για την εκπόνηση της παρούσης εργασίας περιλαμβάνει κοινόχρηστους χώρους επιβατών, οι οποίοι εκτείνονται σε 2 καταστρώματα σε ένα κρουαζιερόπλοιο. Πιο συγκεκριμένα στο κάτω κάτω κατάστρωμα υπάρχει καζίνο, ένα εσωτερικό καφέ-εστιατόριο, και ένα κατάστημα. Το επάνω κατάστρωμα οδηγεί σε δυο εξωτερικά καταστρώματα και εσωτερικά του υπάρχει ένα εστιατόριο και χώρος παρουσίασης εκθεμάτων. Επιπλέον έχει σχεδιαστεί θέατρο το οποίο εκτείνεται καθ' ύψος σε δυο καταστρώματα και συνδέεται με τους γειτονικούς χώρους μέσω διαδρόμου και εσωτερικού κλιμακοστάσιου. Οι διαστάσεις του συνολικού μοντέλου είναι 67.9*33.2*6.5 m.

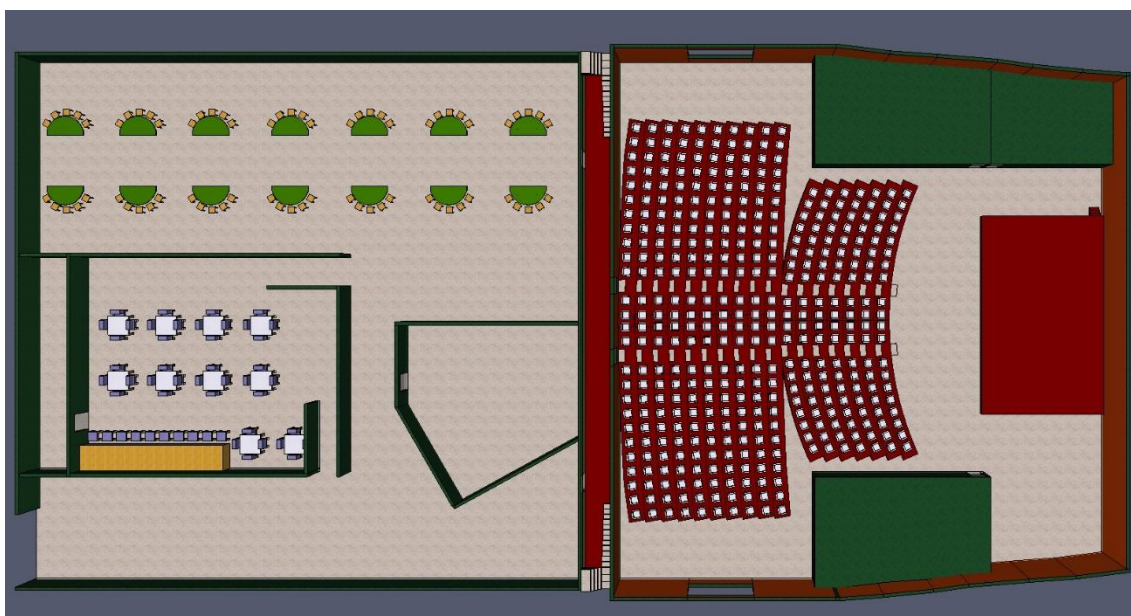


Σχήμα 6.1: Καθίσματα θεάτρου

Το άνω κατάστρωμα έχει χωρητικότητα 120 ατόμων στο εστιατόριο, 50 άτομα στο χώρο εκθεμάτων και περίπου 30 διερχόμενοι επιβάτες. Το κάτω κατάστρωμα έχει χωρητικότητα 200 ατόμων και 40 διερχόμενων επιβατών. Τέλος το θέατρο έχει χωρητικότητα 400 επιβάτες (Σχήματα 6.1-6.3) και περίπου 30 άτομα θίασο και εργαζομένους.

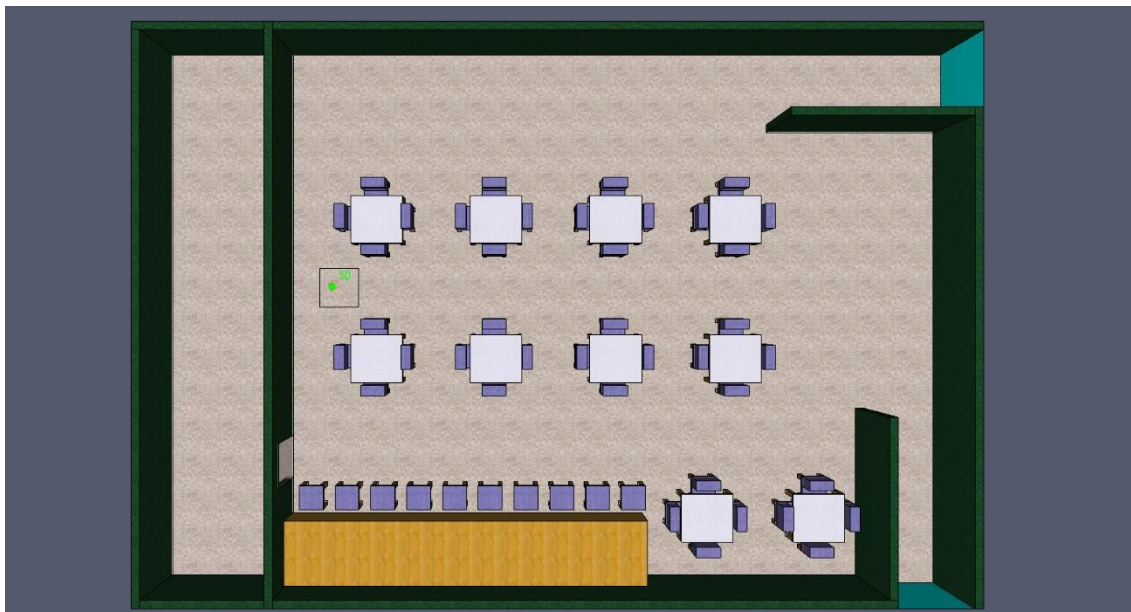


Σχήμα 6.2: Θέατρο και χώροι άνω καταστρώματος.



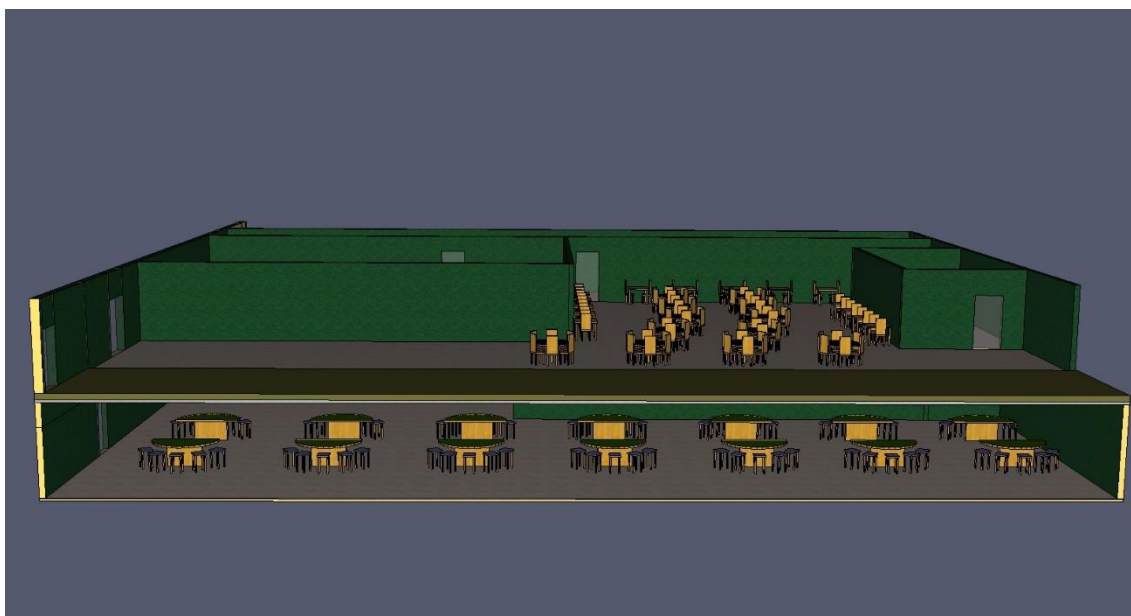
Σχήμα 6.3: Θέατρο και χώροι κάτω καταστρώματος.

Οι διαστάσεις της γεωμετρίας, η πολυπλοκότητα αλλά και η πληθώρα υλικών που υπάρχουν στο χώρο απαιτούν πλέγμα με μεγάλο όγκο κελιών ώστε να αναγνωρίζονται τα στοιχεία της γεωμετρίας. Με σκοπό να ολοκληρωθούν οι προσομοιώσεις σε ένα εύλογο χρονικό διάστημα και να μην χαθεί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων, επιλέχθηκε μέρος της γεωμετρίας, και συγκεκριμένα το καφέ-εστιατόριο του κάτω ορόφου, ώστε να πραγματοποιηθεί η αρχική μελέτη. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.4 ο χώρος αποτελείται από 10 τραπέζια, σκαμπό για 11 άτομα και την κουζίνα του εσωτερικά.



Σχήμα 6.4: Γεωμετρία που επιλέχθηκε για ανάλυση

Αφού γίνει η αρχική μελέτη για τον τρόπο διάδοσης πυρκαγιάς, θα ακολουθήσει εκτενέστερη μελέτη για γεωμετρία που θα αποτελείται από το κάτω και άνω καταστρώματα της αρχικής γεωμετρίας. (Σχήμα 6.5)



Σχήμα 6.5: Πλάγια όψη άνω και κάτω καταστρώματος.

6.2 Επιλογή υλικών

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 5 υπάρχει μια πληθώρα υλικών που χρησιμοποιούνται στο σχεδιασμό κρουαζιερόπλοιων τα οποία πρέπει να τηρούν τους κανονισμούς ασφαλείας. Για το μοντέλο που σχεδιάστηκε έχει επιλεγεί PVC για τους τοίχους και το ταβάνι του κάτω καταστρώματος, ενώ για το πάτωμα χαλί που

αποτελείται από 80% μαλλί και 20% νάilon. Για την επίπλωση έχει επιλεγεί ξύλο τύπου balsa ενώ για τα εξωτερικά καταστρώματα ξύλο τύπου teak. Ακόμη θεωρείται ότι τα καθίσματα έχουν μέσα αφρολέξ με επένδυση υφάσματος και τα τραπέζια είναι καλυμμένα με υφασμάτινο τραπεζομάντηλο. Στους Πίνακες 7 και 8 δίνονται αναλυτικά οι ποσότητες των υλικών που υπάρχουν σε κάθε χώρο καθώς και οι ιδιότητες τους.

Πίνακας 7: Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στη τελική γεωμετρία.

Material	Density (kg/m ³)	Specific heat (kJ/(kg·K))	Conductivity (W/(m·K))	Emissivity	heat of combustion (MJ/kg)	Yield CO (g/g)	Yield CO ₂ (g/g)	Yield soot (g/g)	CHF	TRP
carpet	157	1,36	0,04	0,9	24,8	0,0588	1,748	0,0214	15	243,4
wool (80%)					23,5	0,064	1,67	0,008	15	239
nylon (20%)					30	0,038	2,06	0,075	15	261
plywood	545	1,215	0,12	0,86	17	0,06	1,4	0,017	10	190
fabric	140	1,4	0,03	0,7	32,5	0,08	1,56	0,089	26	217
foam	28	1,7	0,05	0,9	34	0,042	1,57	0,227	30	220
pvc	1380	1,5	0,14	0,95	20	0,9	1,42	0,39	15	500
teak wood	720	2,1	0,085	0,8	17	0,05	1,33	0,015	10	140
felt	180	1,38	0,06	0,62	37	0,07	1,65	0,091	26	217
balsa wood	200	2,5	0,058	0,08	16	0,005	1,31	0,015	8	90

Πίνακας 8: Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν συγκεντρωτικά στα δύο καταστρώματα.

Material	Density (kg/m ³)	Specific heat (kJ/(kg·K))	Conductivity (W/(m·K))	Emissivity	heat of combustion (MJ/kg)	Yield CO (g/g)	Yield CO ₂ (g/g)	Yield soot (g/g)	CHF	TRP
carpet	157	1,36	0,04	0,9	24,8	0,0588	1,748	0,0214	15	243,4
wool (80%)					23,5	0,064	1,67	0,008	15	239
nylon (20%)					30	0,038	2,06	0,075	15	261
plywood	545	1,215	0,12	0,86	17	0,06	1,4	0,017	10	190
fabric	140	1,4	0,03	0,7	32,5	0,08	1,56	0,089	26	217
foam	28	1,7	0,05	0,9	34	0,042	1,57	0,227	30	220
pvc	1380	1,5	0,14	0,95	20	0,9	1,42	0,39	15	500
teak wood	720	2,1	0,085	0,8	17	0,05	1,33	0,015	10	140
felt	180	1,38	0,06	0,62	37	0,07	1,65	0,091	26	217
balsa wood	200	2,5	0,058	0,08	16	0,005	1,31	0,015	8	90

6.3 Σενάρια μελέτης

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 6.1 της Γεωμετρίας η συγκεκριμένη μελέτη αποτελείται από δύο σκέλη. Αρχικά σε μικρή γεωμετρία (Σχήμα 6.4) πραγματοποιούνται τρεις προσομοιώσεις πυρκαγιάς με διαφορετικό τρόπο έναρξης και διάδοσης της (βλ. παράγραφος 2.3), ώστε να συγκριθούν οι τελικές καμπύλες HRR που προκύπτουν από την καύση των υλικών στο χώρο. Το δεύτερο σκέλος της μελέτης περιλαμβάνει τη μελέτη διάδοσης πυρκαγιάς με δύο διαφορετικούς τρόπους κατανομής των υλικών ανάμεσα σε δυο καταστρώματα (Σχήμα 6.5).

Συνοπτικά για να δημιουργηθεί ένα σενάριο θα πρέπει να ορισθούν τιμές για μια πληθώρα παραμέτρων, οι οποίες διαχωρίζονται σε τέσσερις κύριες κατηγορίες:

1. Σημείο έναρξης της πυρκαγιάς
2. Ιδιότητες πυρκαγιάς
3. Συνθήκες αερισμού
4. Ρυθμίσεις εκκένωσης

Τα σενάρια που μελετώνται στη παρούσα εργασία διαφέρουν ως προς τις ιδιότητες της πυρκαγιάς και πιο συγκεκριμένα τον τρόπο που ξεκινάει η πυρκαγιά κάθε φορά. Το σημείο έναρξης της πυρκαγιάς είναι κοινό σε κάθε σενάριο, όπως και οι συνθήκες αερισμού. Πιο συγκεκριμένα για τα τρία πρώτα σενάρια που ανήκουν στο πρώτο σκέλος της μελέτης το σημείο έναρξης της πυρκαγιάς είναι πάνω στο χαλί και στο κέντρο του τετραγώνου που φαίνεται στο Σχήμα 6.4. Σε ύψος 1,5m υπάρχει ανιχνευτής καπνού, ο οποίος φαίνεται με πράσινο χρώμα. Οι δυο πόρτες που φαίνονται με ουρανό χρώμα έχουν οριστεί ως εξαεριστήρες και απορροφούν το καπνό κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Οι πόρτες είναι και σημεία εξόδου για τα άτομα που υπάρχουν στο χώρο αλλά στη συγκεκριμένη εργασία δεν θα γίνει μελέτη εκκένωσης του χώρου.

Για τη διάδοση της πυρκαγιάς ανάμεσα στα δύο καταστρώματα και για τα δυο σενάρια που μελετήθηκαν το σημείο έναρξης της πυρκαγιάς είναι ακριβώς το ίδιο με αυτό της “απομονωμένης” γεωμετρίας, αλλά υπάρχουν περισσότεροι εξαεριστήρες καθώς και τα εξωτερικά καταστρώματα του πάνω ορόφου έχουν την ιδιότητα της απορρόφησης του καπνού κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Σε αυτό το δεύτερο σκέλος των προσομοιώσεων στη πραγματικότητα ο στόχος είναι να γίνει σύγκριση ενός σεναρίου διάδοσης πυρκαγιάς στο χώρο στην οποία συμμετέχουν όλα τα υλικά με το σενάριο διάδοσης της πυρκαγιάς με την τοποθέτηση fuel packages στους δύο ορόφους. Με την έννοια fuel packages, εννοείται η συγκέντρωση του συνόλου των υλικών σε πακέτα καύσιμης ύλης που τοποθετούνται αντί για τα (ξεχωριστά) αντικείμενα στο χώρο που μελετάται. Τέλος τα συγκεκριμένα αποτελέσματα παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς αξιολογείται η δυνατότητα εισαγωγής της τυχαιότητας της θέσης των αντικειμένων στο χώρο, κατά τη μελέτη σχεδίασης των πλοίων. Παράλληλα αξιολογείται και ο τρόπος διάδοσης της πυρκαγιάς στα ανώτερα καταστρώματα.

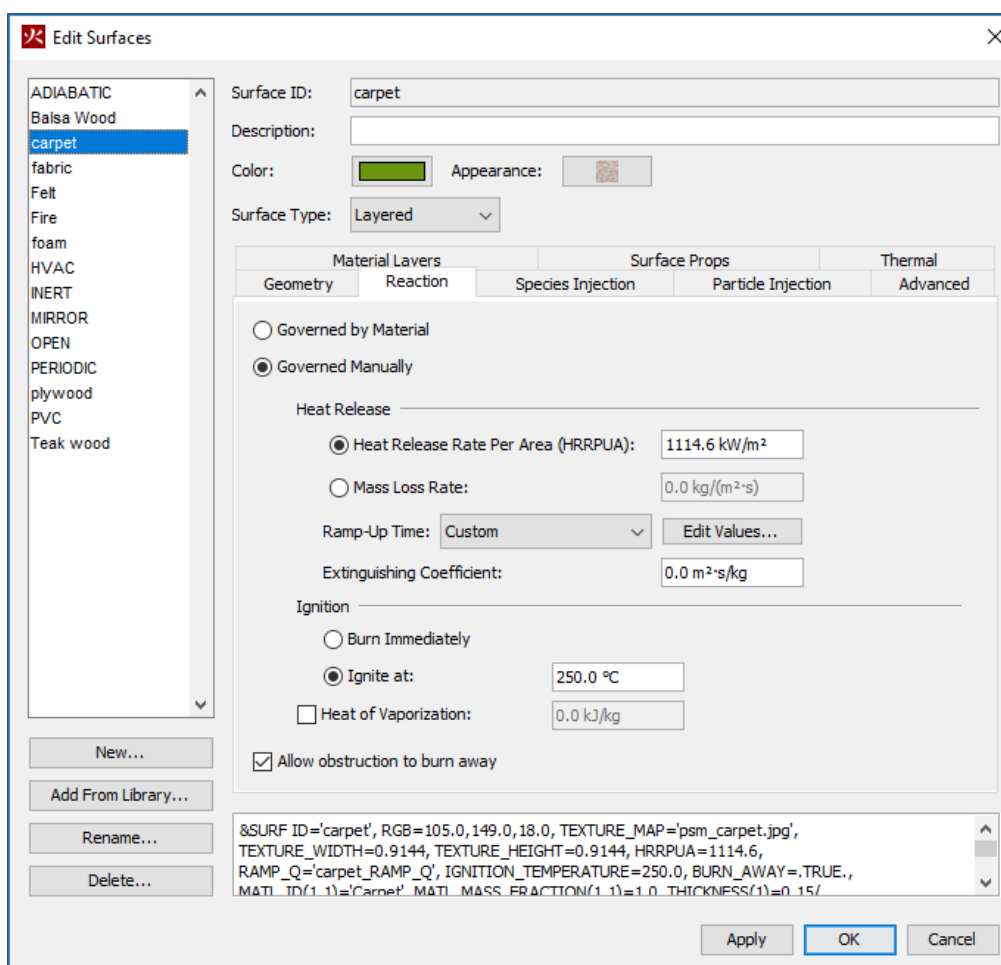
6.3.1 Μελέτη μεθόδων έναρξης πυρκαγιάς.

Για την υλοποίηση των σεναρίων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Pyrosim όπως έχει αναφερθεί στη παράγραφο 3.2.6. Για να μπορέσει να γίνει διάδοση της πυρκαγιάς από το ένα αντικείμενο σε ένα άλλο υπολογίστηκαν αναλυτικά οι τιμές HRR για κάθε υλικό και για επιφάνεια 1m^2 (βλ. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ). Στο Pyrosim ορίστηκαν οι επιφάνειες (Σχήμα 6.6) βάση του υλικού, την HRR και τη θερμοκρασία αυτανάφλεξης του κάθε υλικού.

Έτσι, μελετήθηκαν τρία σενάρια με διαφορετικό τρόπο έναρξης πυρκαγιάς:

1. Απευθείας έναρξη και διάδοση της πυρκαγιάς
2. Έναρξη πυρκαγιάς με ακτινοβολία
3. Έναρξη πυρκαγιάς με αγωγή

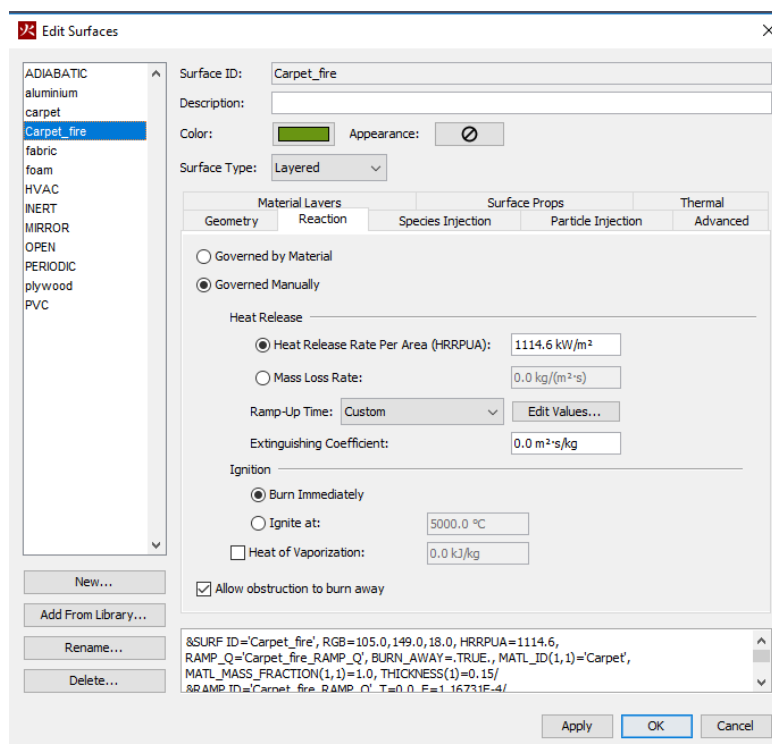
Τα σενάρια αυτά αναφέρονται αναλυτικά στη συνέχεια.



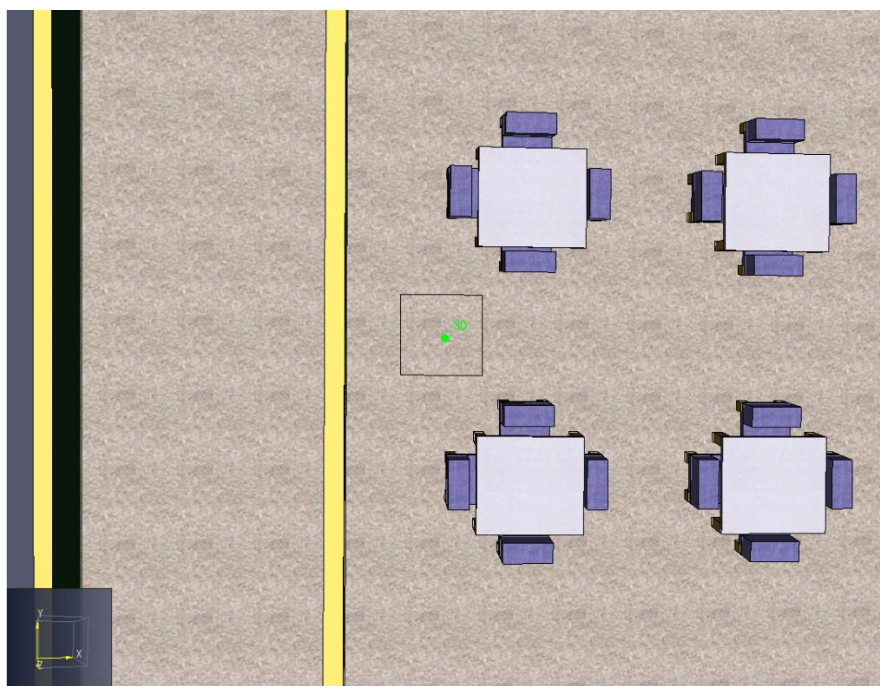
Σχήμα 6.6: Ορισμός επιφάνειας στο Pyrosim.

6.3.1.1 Απευθείας έναρξη και διάδοση της πυρκαγιάς

Σε αυτό το σενάριο η πυρκαγιά ορίστηκε να ξεκινάει από ένα σημείο του χαλιού και έπειτα διαδίδεται μέσω αυτού (Σχήμα 6.8). Επομένως “απομονώθηκε” και ορίστηκε ξεχωριστά η επιφάνεια 1m^2 όπου ξεκινάει η πυρκαγιά (Σχήμα 6.7) και αφού η φωτιά κάλυψε ολόκληρη την επιφάνεια, συνέχισε στο υπόλοιπο χαλί και έπειτα στα έπιπλα.



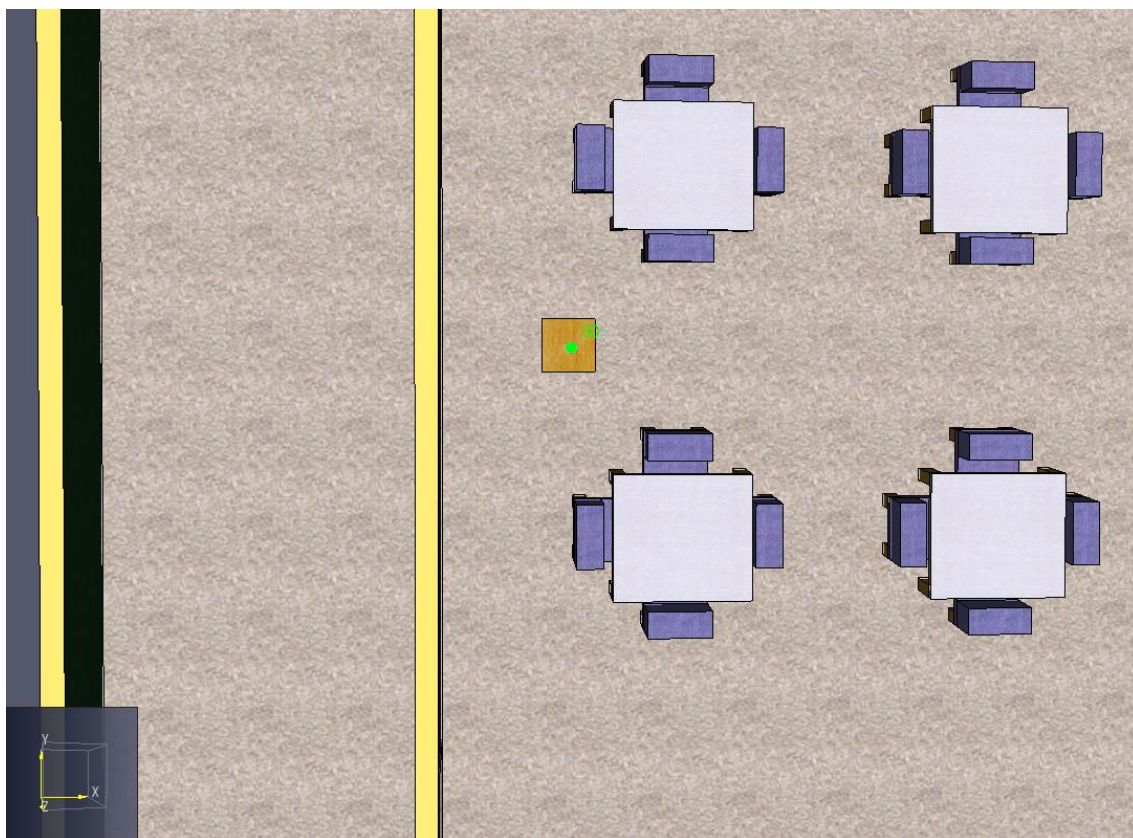
Σχήμα 6.7: Ορισμός επιφάνειας που ξεκινάει η φωτιά.



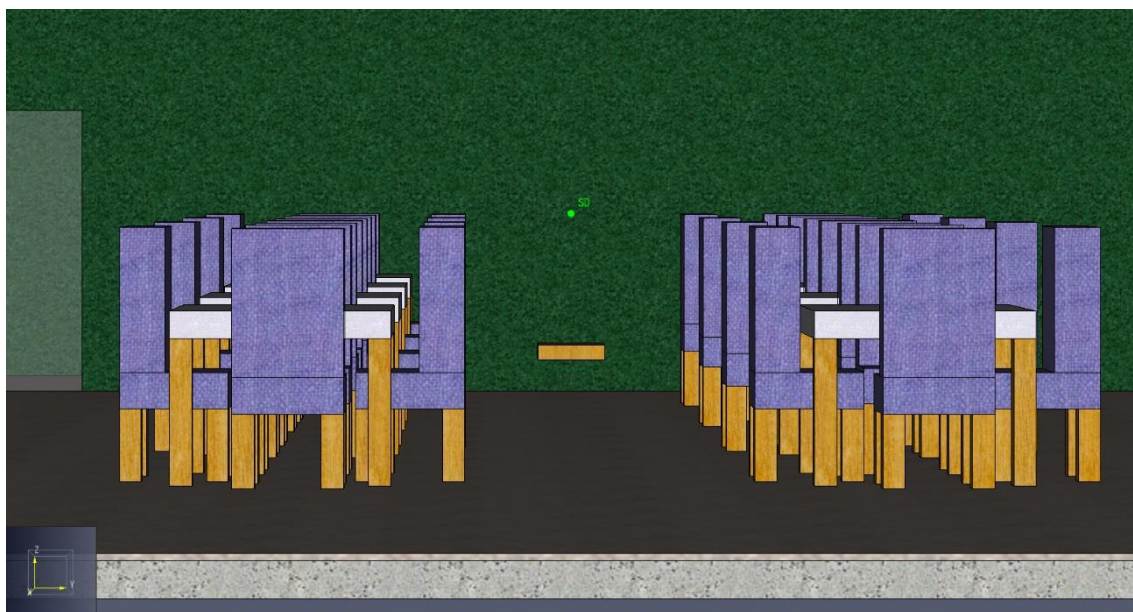
Σχήμα 6.8: Περιοχή έναρξης πυρκαγιάς για το σενάριο 1.

6.3.1.2 Έναρξη πυρκαγιάς με ακτινοβολία

Σε αυτή τη περίπτωση υπάρχει ένα σώμα σε απόσταση από το χαλί το οποίο παράγει θερμότητα και στη συνέχεια το χαλί αυταναφλέγεται (Σχήμα 6.9 & 6.10). Το σώμα έχει επιφάνεια 1m^2 όσο και η επιφάνεια του χαλιού που “απομονώθηκε” στο πρώτο σενάριο.



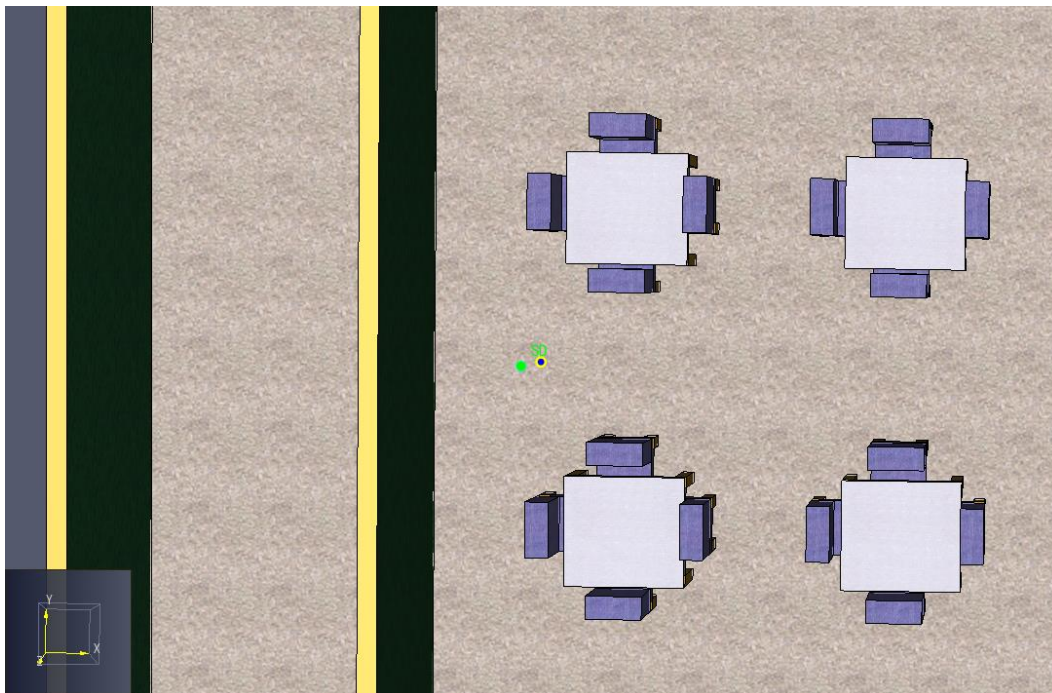
Σχήμα 6.9: Περιοχή έναρξης πυρκαγιάς για το σενάριο 2.



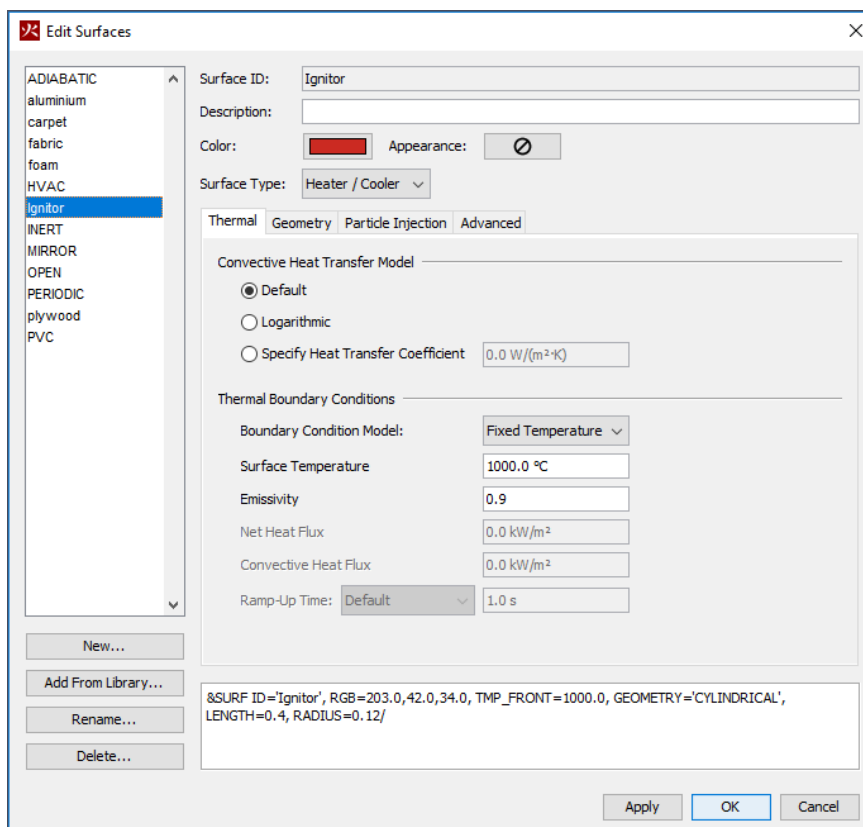
Σχήμα 6.10: Πλάγια όψη αντικειμένου που μεταδίδει θερμότητα για το σενάριο 2.

6.3.1.3 Έναρξη πυρκαγιάς με αγωγή

Σε αυτό το σενάριο έχει τοποθετηθεί σωματίδιο που παράγει θερμότητα πάνω στο χαλί (Σχήμα 6.11) και έτσι το χαλί αυταναφλέγεται και η φωτιά διαδίδεται στον υπόλοιπο χώρο. Στο Σχήμα 6.12 δίνονται αναλυτικά οι ιδιότητες του σωματιδίου.



Σχήμα 6.11: Σωματίδιο (στο κίτρινο κύκλο) που προκαλεί ανάφλεξη στο σενάριο 3.



Σχήμα 6.12: Ιδιότητες επιφάνειας του σωματιδίου.

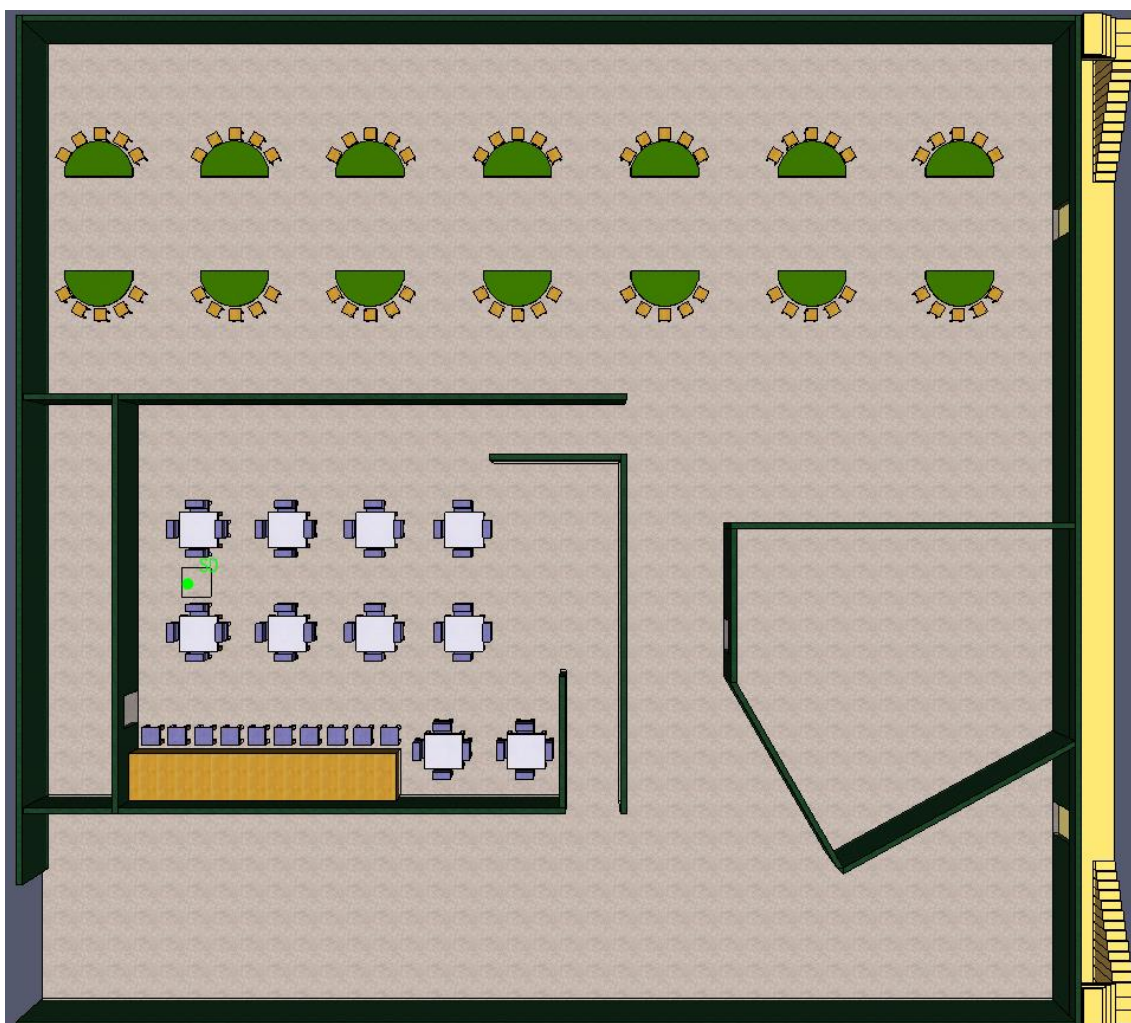
6.3.2 Μελέτη διάδοσης πυρκαγιάς μεταξύ δύο καταστρώματων.

Εδώ μελετήθηκαν δυο σενάρια με διαφορετικό τρόπο τοποθέτησης του συνόλου του υλικού (το οποίο έχει οριστεί στα αντικείμενα όπως επίπλωση, τοίχοι, πατώματα κτλ.) που υπάρχει στο χώρο. Ο τρόπος που διαδίδεται η πυρκαγιά είναι ο ίδιος που περιεγράφηκε στη παράγραφο 6.3.1 δηλαδή ορίζοντας για κάθε υλικό που συμμετέχει, τη δική του HRR. Τα σενάρια που πραγματοποιήθηκαν είναι:

1. Απευθείας έναρξη και διάδοση της πυρκαγιάς
2. Διάδοση της πυρκαγιάς με fuel packages.

Ακολούθως δίνεται πιο λεπτομερής περιγραφή και ανάλυση για το κάθε σενάριο.

6.3.2.1 Απευθείας έναρξη και διάδοση της πυρκαγιάς

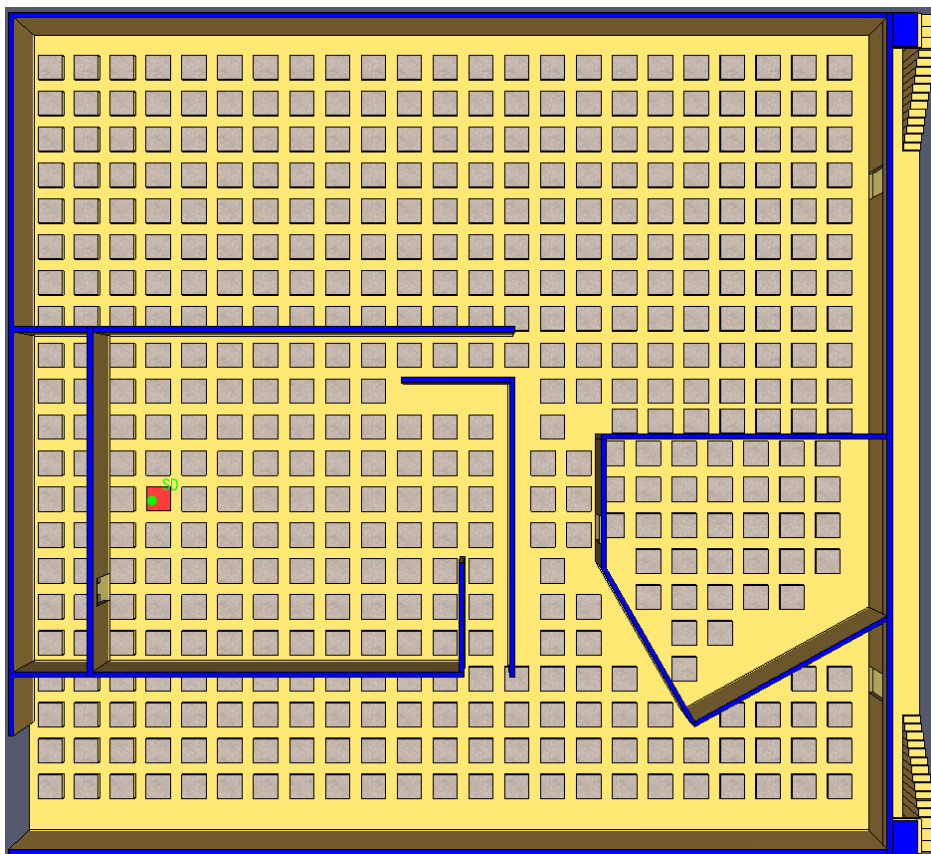


Σχήμα 6.13: Κάτοψη του κάτω καταστρώματος, όπου ξεκινάει η πυρκαγιά.

Η μια από τις δυο μελέτες διάδοσης της πυρκαγιάς μεταξύ των δύο καταστρωμάτων βασίστηκε στο πρώτο σενάριο (παρ. 6.3.1.1) όπου η φωτιά ξεκινάει απευθείας από ένα σημείο του χαλιού, εξαπλώνεται σε αυτό και διαδίδεται στον υπόλοιπο χώρο. Σε αυτή τη περίπτωση το σημείο έναρξης της πυρκαγιάς είναι το ίδιο με όλα τα προηγούμενα σενάρια (Σχήμα 6.13).

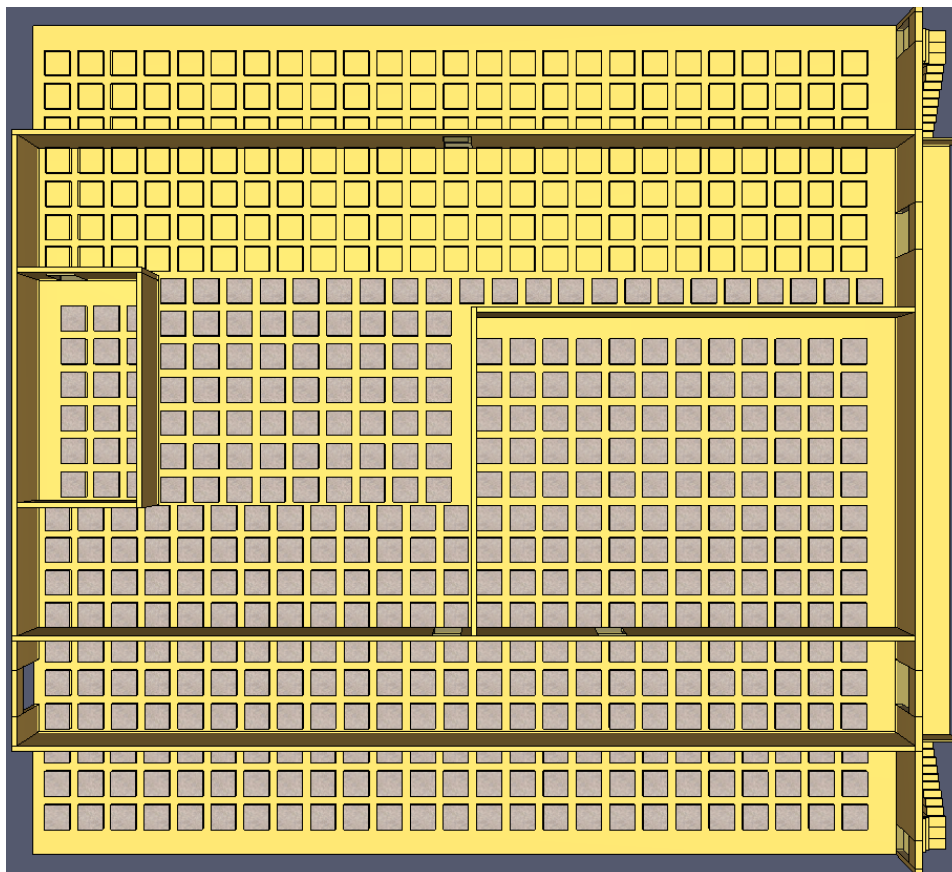
Ο διάδρομος και οι σκάλες στη δεξιά πλευρά του σχεδίου είναι βοηθητικά ως προς την διέξοδο του καπνού και των επιβατών, παρόλο που δεν πραγματοποιείται μελέτη εκκένωσης των χώρων στη παρούσα εργασία και δεν συμμετέχουν στη πυρόλυση.

6.3.2.2 Διάδοση της πυρκαγιάς με fuel packages



Σχήμα 6.14: Κάτοψη του κάτω καταστρώματος με χρήση fuel packages.

Σε αυτό το σενάριο τα αντικείμενα στο χώρο αντικαθίστανται από fuel packages. Τα fuel packages αντιπροσωπεύουν το σύνολο των υλικών και έχουν υπολογιστεί για κάθε όροφο ξεχωριστά ανάλογα την ποσότητα των υλικών σε κάθε κατάστρωμα γι' αυτό και έχουν διαφορετική απόσταση μεταξύ τους για το πάνω (Σχήμα 6.15) και για το κάτω κατάστρωμα (Σχήμα 6.14). Το σημείο έναρξης της πυρκαγιάς είναι όπως και στα προηγούμενα σενάρια στο κάτω κατάστρωμα στο χώρο του εστιατορίου.



Σχήμα 6.15: Κάτοψη του άνω καταστρώματος με χρήση fuel packages.

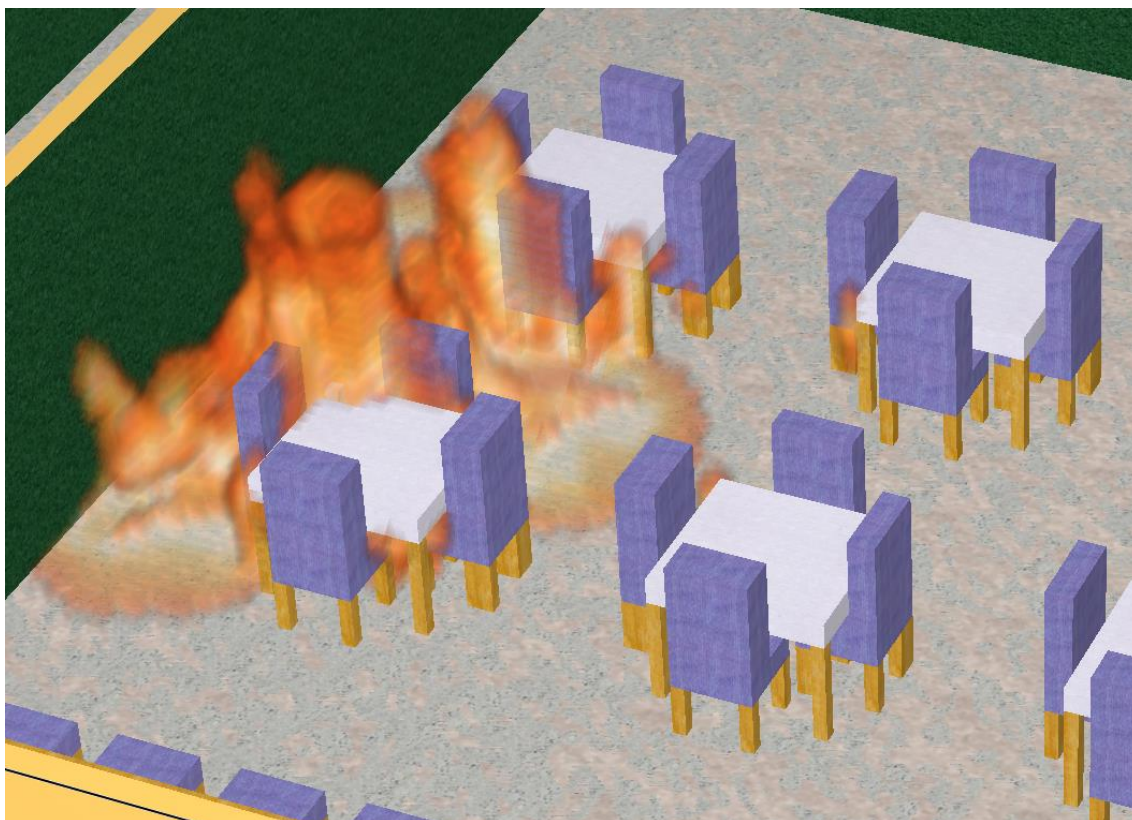
Κεφάλαιο 7

7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

7.1 Μελέτη μεθόδων έναρξης πυρκαγιάς.

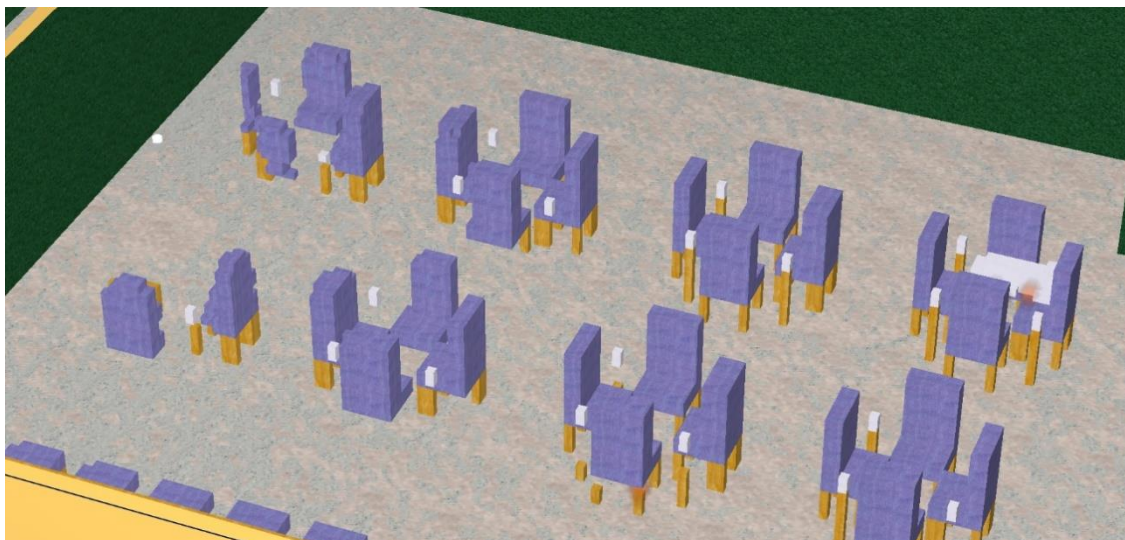
7.1.1 Απευθείας έναρξη και διάδοση της πυρκαγιάς

Στη πρώτη προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο η πυρκαγιά ορίστηκε να ξεκινάει σε πλαίσιο 1m² στο χαλί ανάμεσα από δυο τραπέζια. Στο Σχήμα 7.1 βλέπουμε το πως εξελίσσεται η πυρκαγιά στο χώρο. Γύρω στα 360 sec τα ξύλινα πόδια από τις 4 καρέκλες που περικλείουν το σημείο που ξεκίνησε η πυρκαγιά αρχίζουν να αυταναφλέγονται. Εκείνη τη στιγμή η θερμοκρασία στη περιοχή που καίγεται ξεπερνά τα 250°C και η θερμοκρασία αυτανάφλεξης του ξύλου είναι 220 °C. Μετά από περίπου 100 sec, συγκεκριμένα στα 432 sec η φωτιά επεκτείνεται από το αρχικό πλαίσιο του 1m² που ορίστηκε στο υπόλοιπο χαλί και με την άνοδο της θερμοκρασίας αρχίζουν να καίγονται και τα υπόλοιπα αντικείμενα στο χώρο.

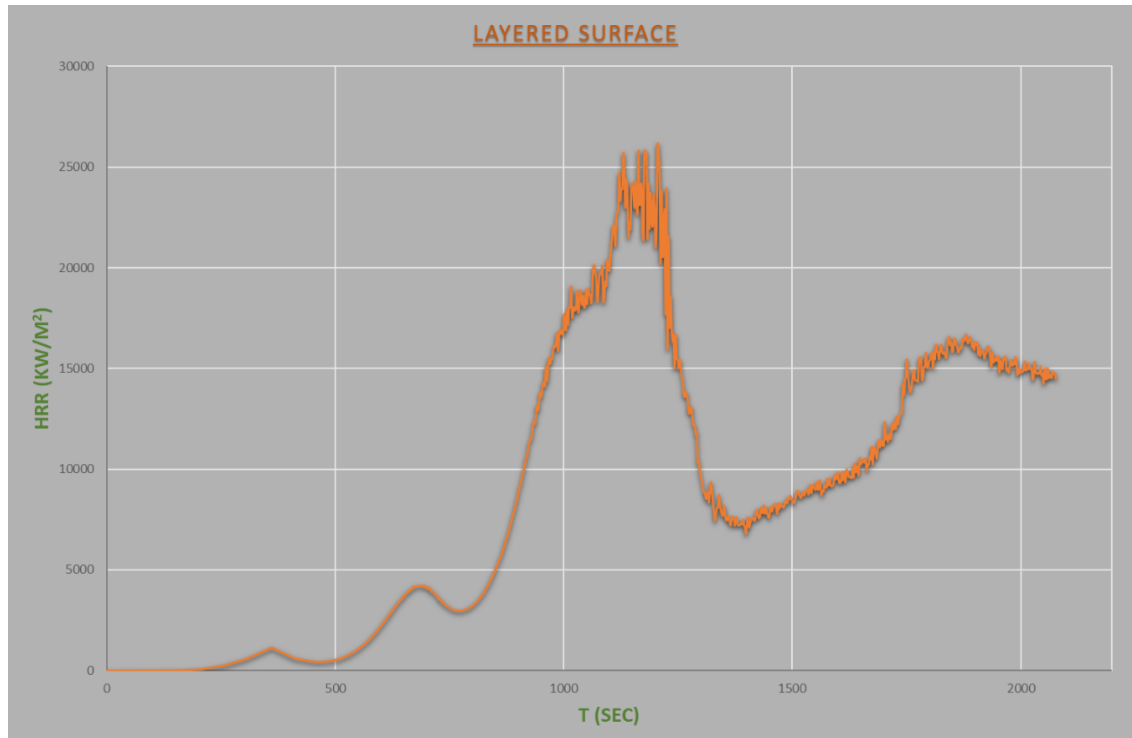


Σχήμα 7.1: Διάδοση πυρκαγιάς στο χώρο για το σενάριο 1.

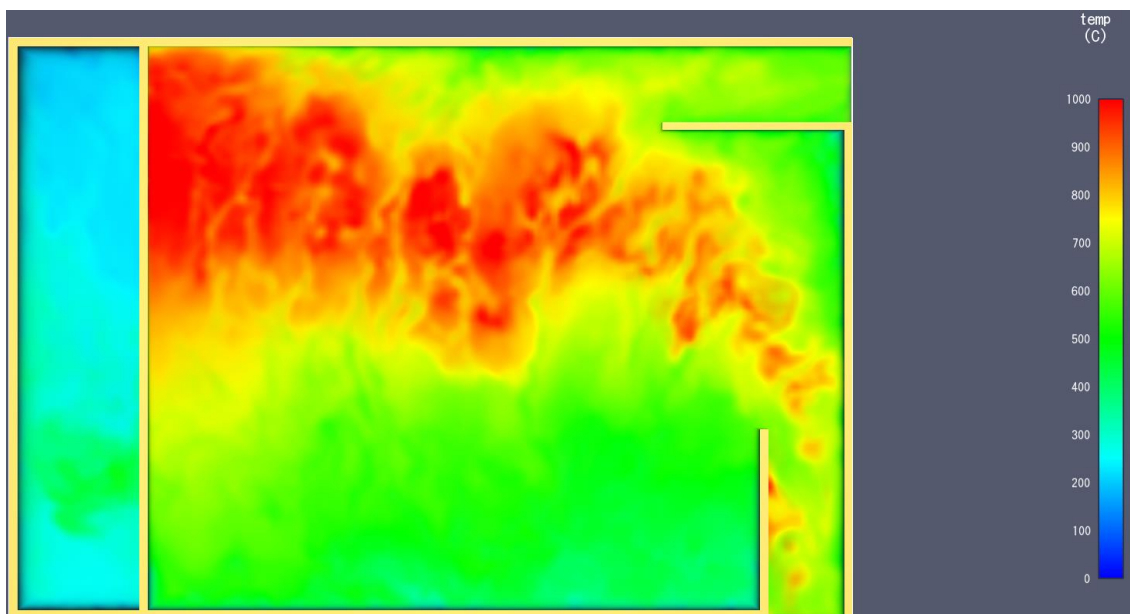
Στο Σχήμα 7.2 φαίνονται τα αντικείμενα που κήκαν μετά την υλοποίηση της προσομοίωσής (στα 1200 sec) για το πρώτο σενάριο. Στο σχήμα 7.3 φαίνεται η καμπύλη HRR που προκύπτει μετά από τη προσομοίωση της πυρκαγιάς με τη μέγιστη τιμή της να είναι στα 26123 kW/m² σε χρόνο 1205 sec, περίπου 20 λεπτά. Στο Σχήμα 7.4 δίνεται η στιγμή που η θερμοκρασία βρίσκεται στο μέγιστο.



Σχήμα 7.2: Αντικείμενα που επηρεάστηκαν με το πέρας της πυρκαγιάς στο σενάριο 1.

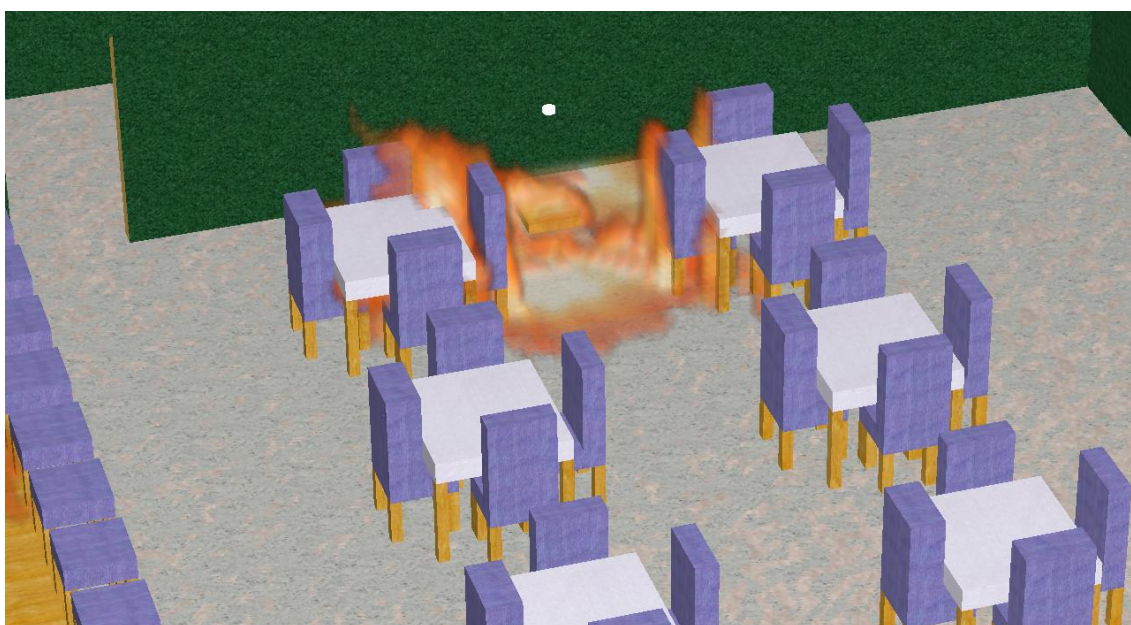


Σχήμα 7.3: Διάγραμμα καμπύλης HRR – χρόνου για το σενάριο 1.



Σχήμα 7.4: Απεικόνιση μέγιστης θερμοκρασίας στα 1150 sec (σενάριο 1).

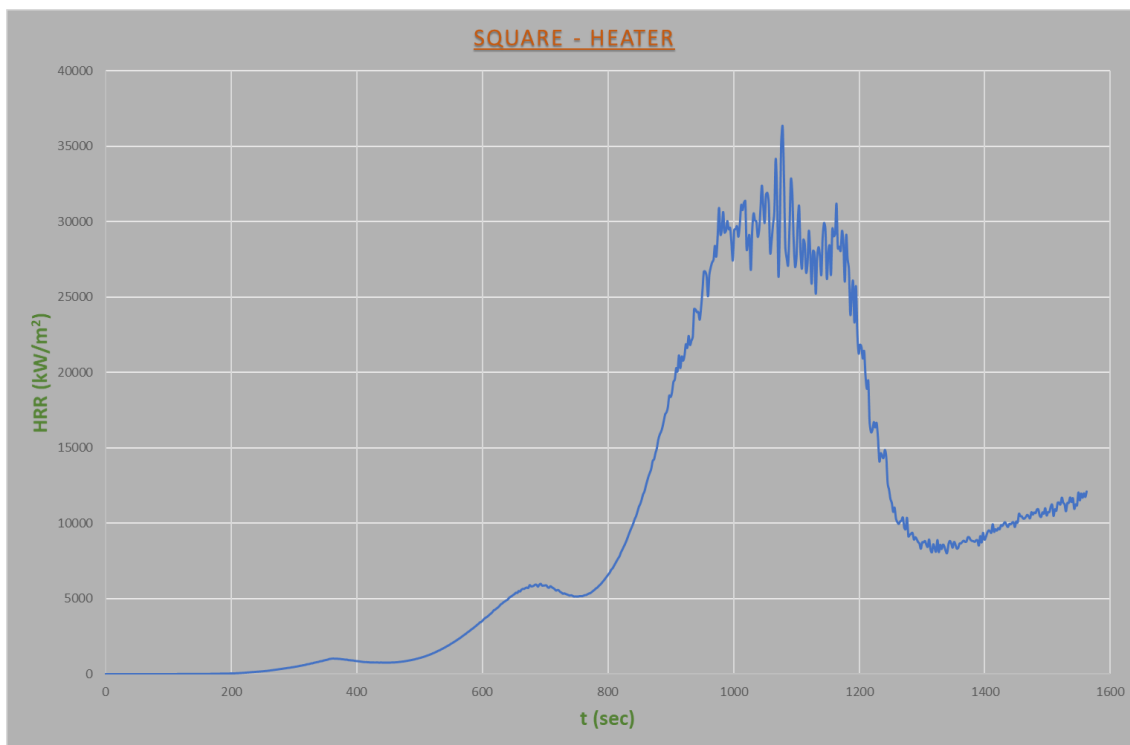
7.1.2 Έναρξη πυρκαγιάς με ακτινοβολία



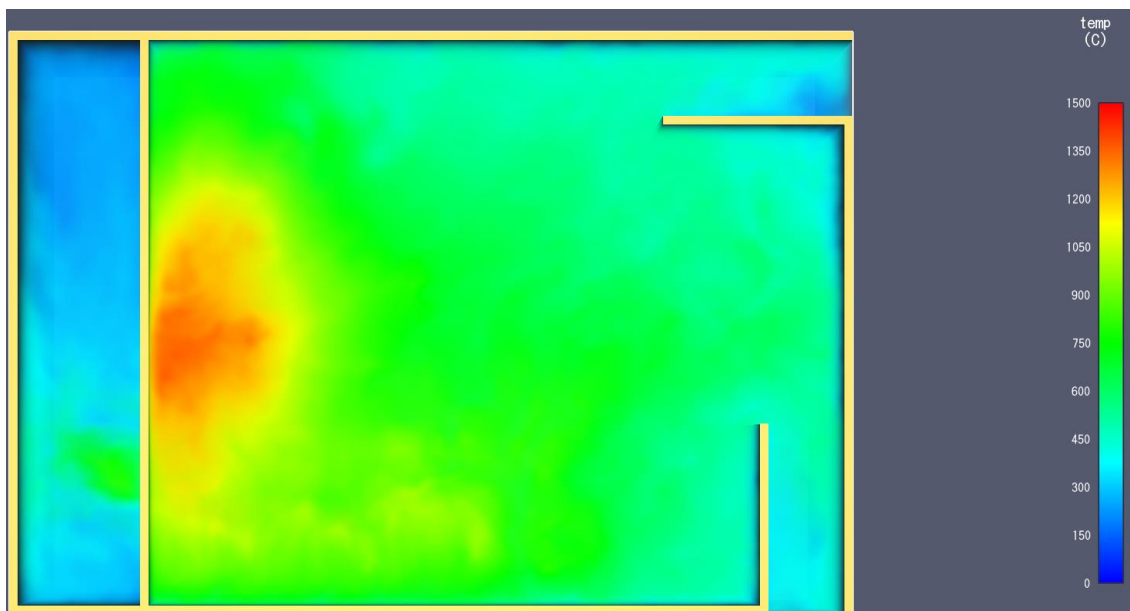
Σχήμα 7.5: Εξέλιξη της πυρκαγιάς στα 770 sec (σενάριο 2).

Στο δεύτερο σενάριο υπάρχει ένα σώμα το οποίο παράγει θερμότητα και το χαλί αρχίζει να αυταναφλέγεται περίπου στα 15 sec, όταν δηλαδή ο ανιχνευτής καπνού ενεργοποιείται και ανοίγουν οι εσωτερικές πόρτες. Η φλόγα όμως αρχίζει και φαίνεται στα 100 sec και έπειτα επεκτείνεται στο χαλί και στα υπόλοιπα αντικείμενα (Σχήμα 7.5). Η μέγιστη τιμή της καμπύλης HRR είναι 36330 kW/m^2 στα 1078 sec (Σχήμα 7.6). Από τα Σχήματα 7.7 και 7.8 βλέπουμε πώς η θερμοκρασία έχει μεγαλύτερες τιμές στα γύρω

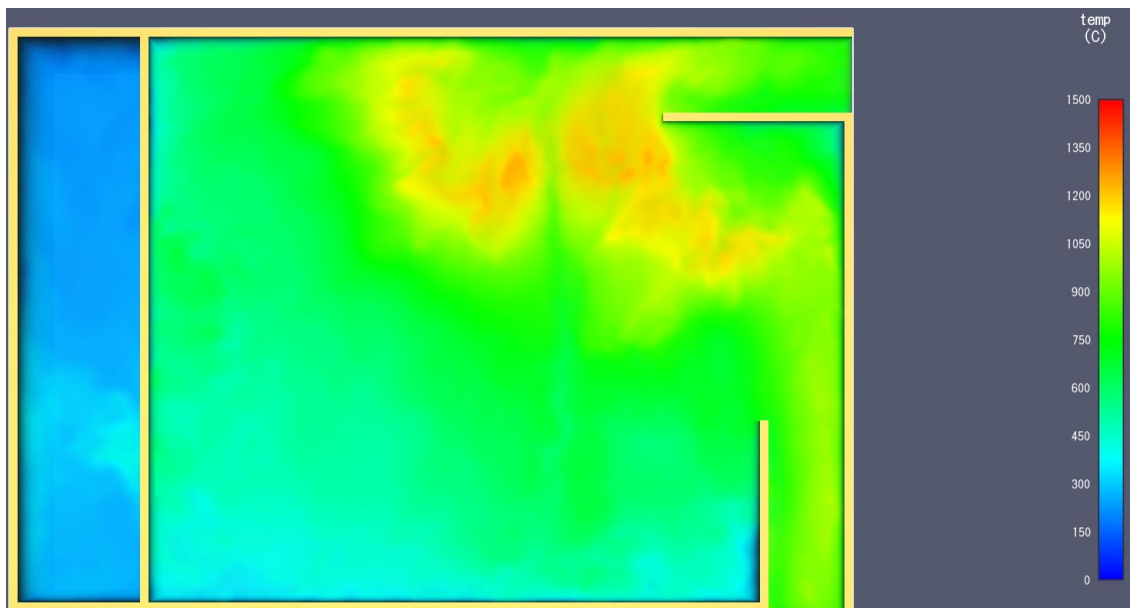
στα 940 sec δηλαδή περίπου 3,5 λεπτά νωρίτερα από το πρώτο σενάριο που ήταν στα 1150 sec.



Σχήμα 7.6: Διάγραμμα καμπύλης HRR – χρόνου (σενάριο 2).

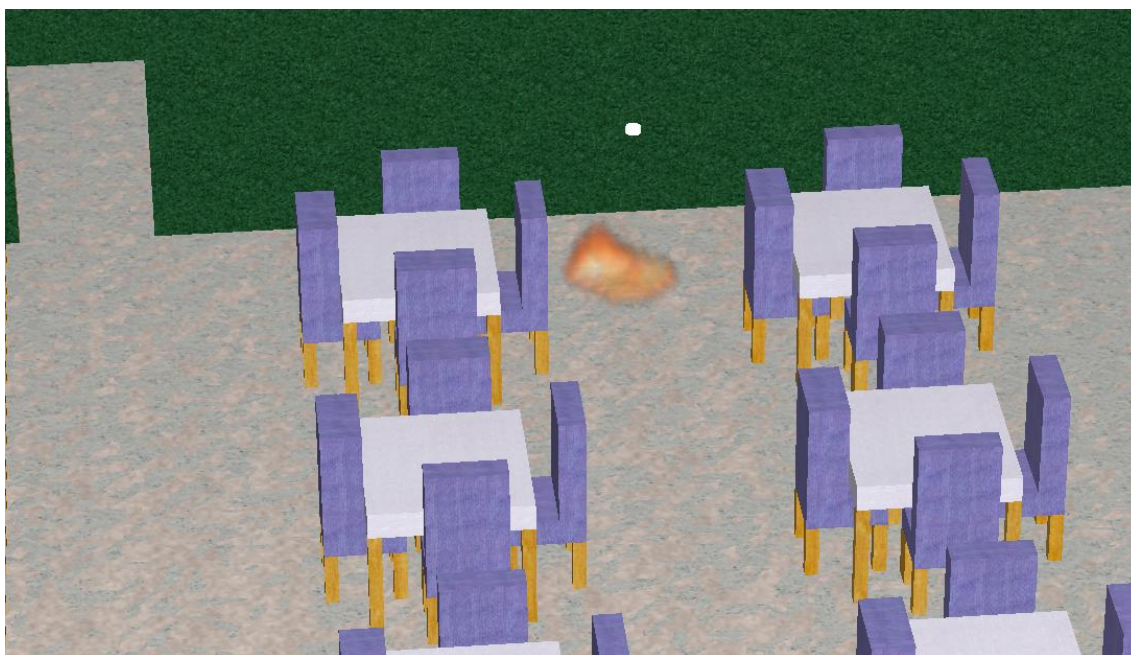


Σχήμα 7.7: Απεικόνιση μέγιστης θερμοκρασίας στα 940 sec (σενάριο 2).



Σχήμα 7.8: Απεικόνιση θερμοκρασίας στα 1150 sec (σενάριο 2).

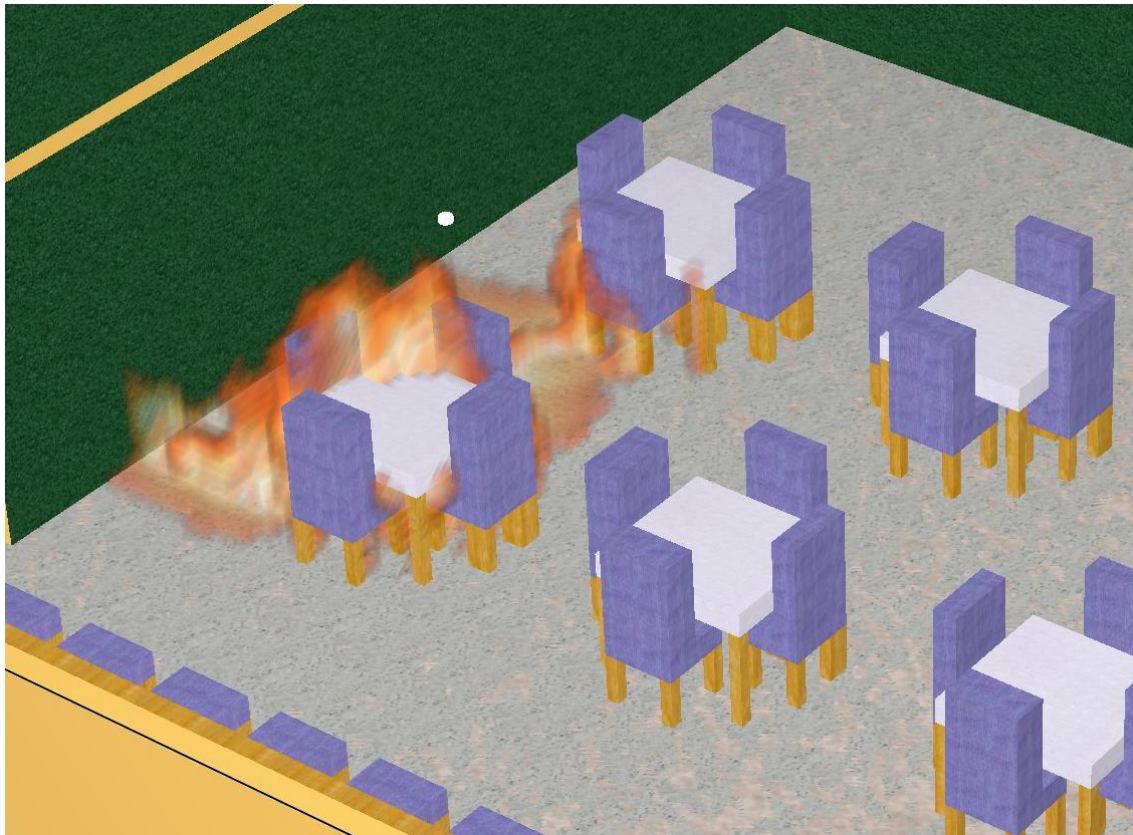
7.1.3 Έναρξη πυρκαγιάς με αγωγή



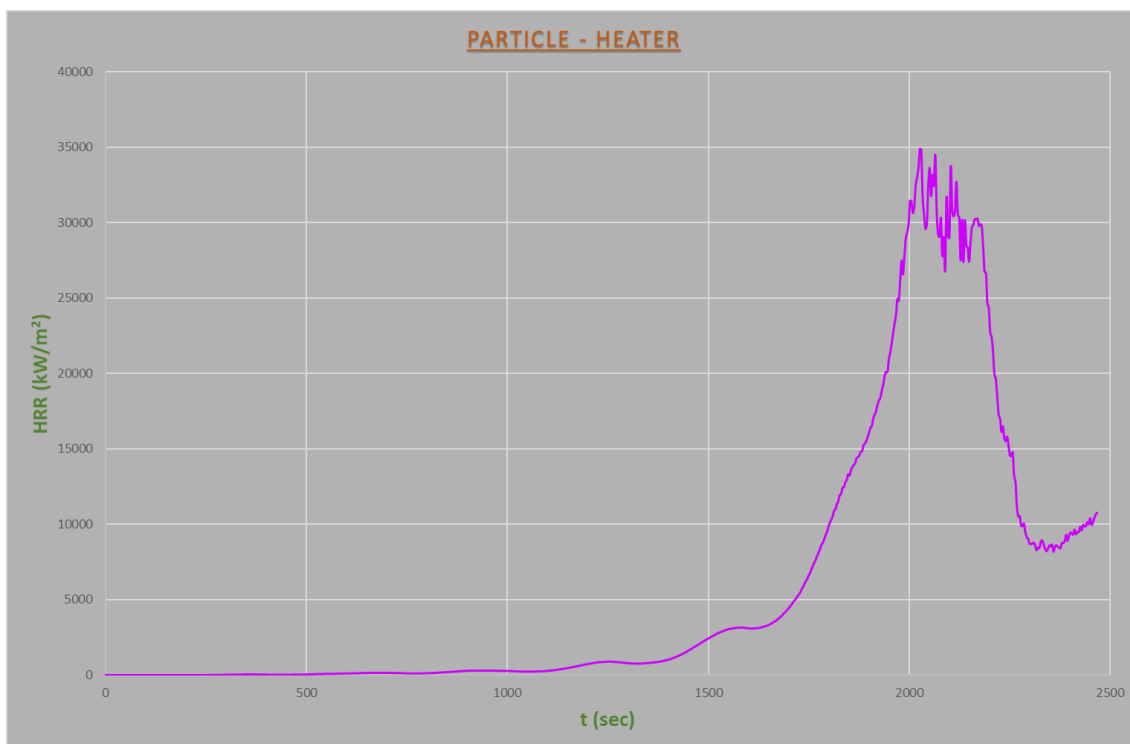
Σχήμα 7.9: Εξέλιξη της πυρκαγιάς στα 770 sec (σενάριο 3).

Το τρίτο σενάριο είναι ίσως και το πιο ρεαλιστικό καθώς θα μπορούσε να είναι η περίπτωση που ένα αναμμένο τσιγάρο πέσει ή πεταχτεί στο πάτωμα. Ο καπνός ανιχνεύεται στα 18 sec και η φωτιά ξεκινάει στα 190 sec. Τα πρώτα πόδια από τη διπλανή καρέκλα αρχίζουν να καίγονται στα 1015 sec και η φωτιά επεκτείνεται συνεχώς στο χαλί και τα υπόλοιπα αντικείμενα (Σχήμα 7.9 & Σχήμα 7.10) προκαλώντας την μέγιστη τιμή της HRR 34828 kW/m^2 στα 2030 sec (Σχήμα 7.11). Εδώ η θερμοκρασία

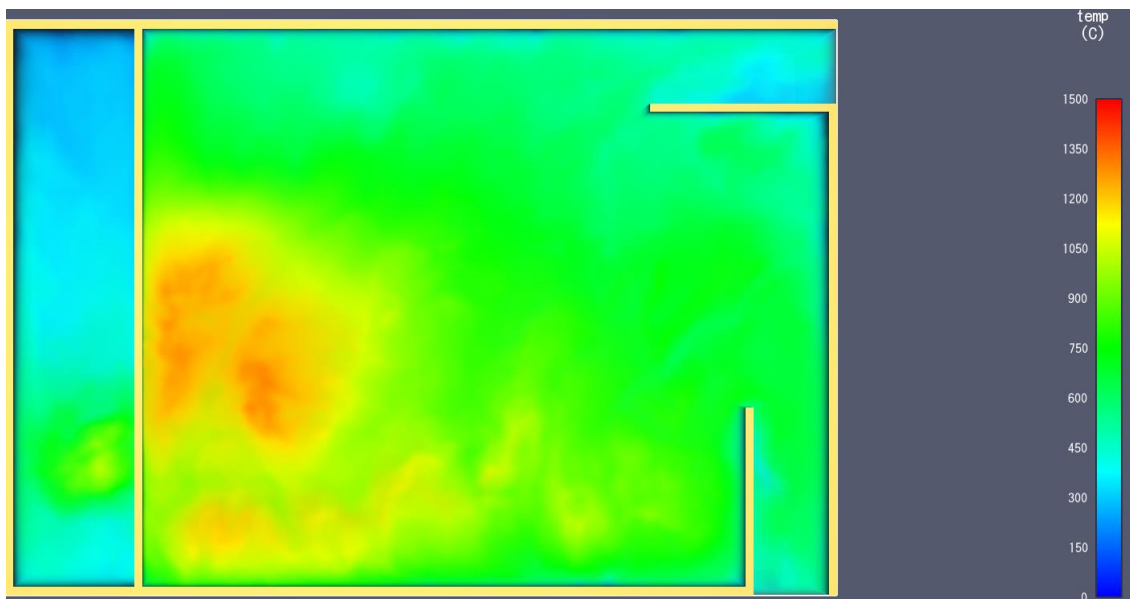
φτάνει στο μέγιστο στα 2000 sec περίπου, πολύ αργότερα από το αντίστοιχο μέγιστο για το πρώτο σενάριο (Σχήμα 7.12 & Σχήμα 7.13).



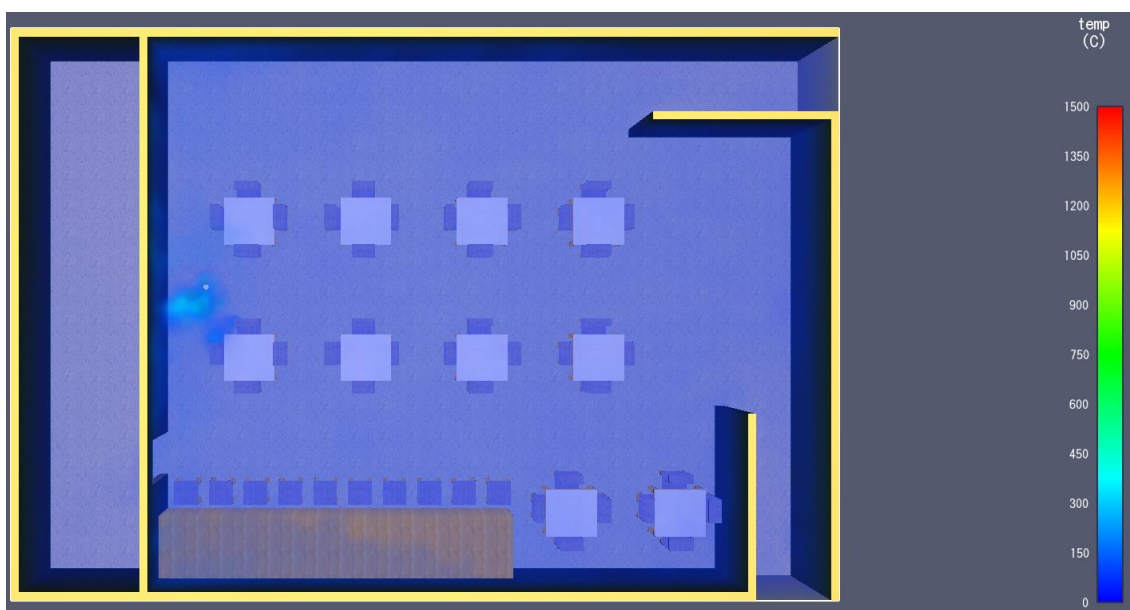
Σχήμα 7.10: Εξέλιξη της πυρκαγιάς στα 1700 sec (σενάριο 3).



Σχήμα 7.11: Διάγραμμα καμπύλης HRR – χρόνου (σενάριο 3).

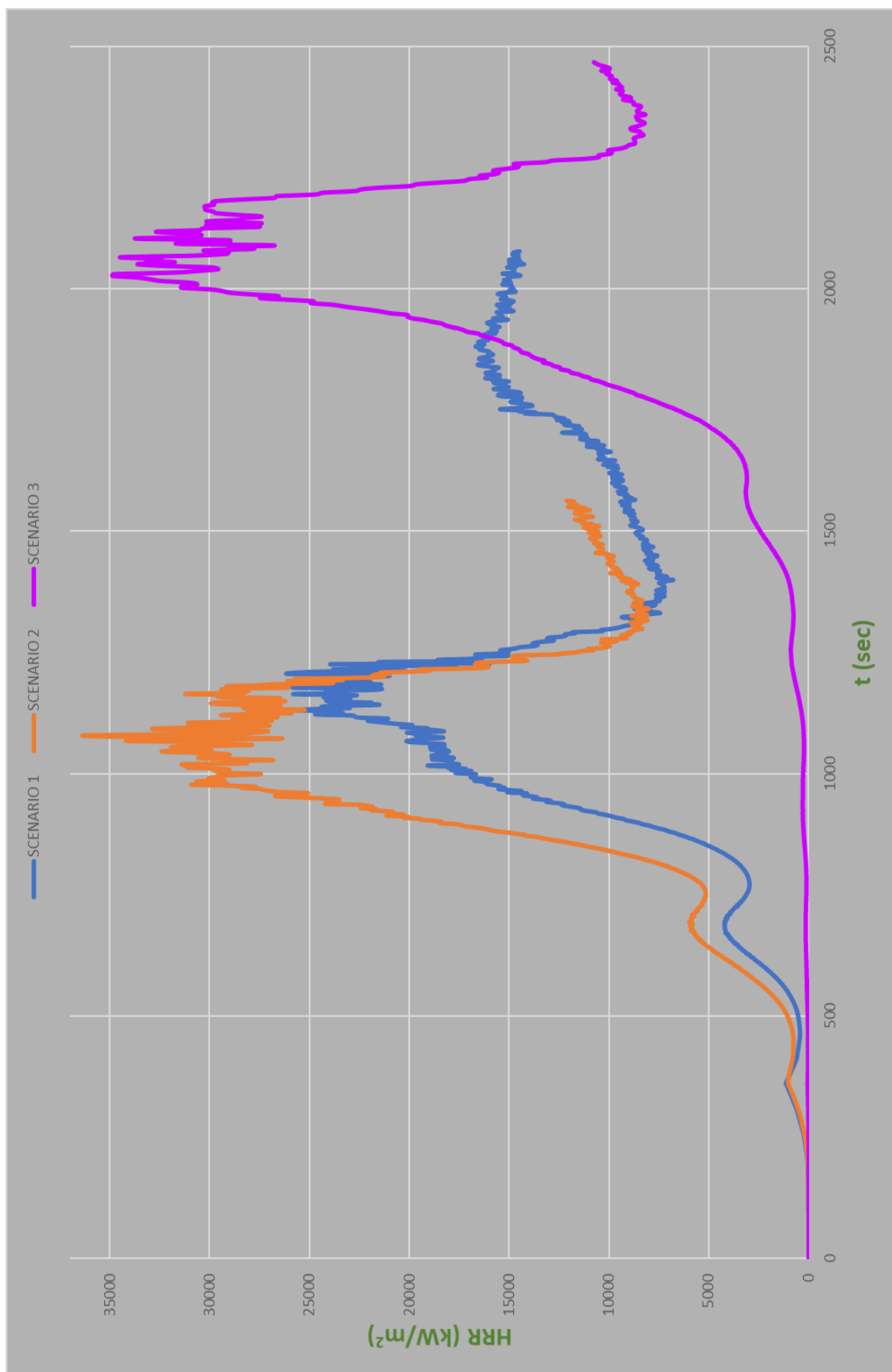


Σχήμα 7.12: Απεικόνιση μέγιστης θερμοκρασίας στα 2000 sec (σενάριο 3).



Σχήμα 7.13: Απεικόνιση θερμοκρασίας στα 1150 sec (σενάριο 3).

7.1.4 Σύγκριση μεθόδων



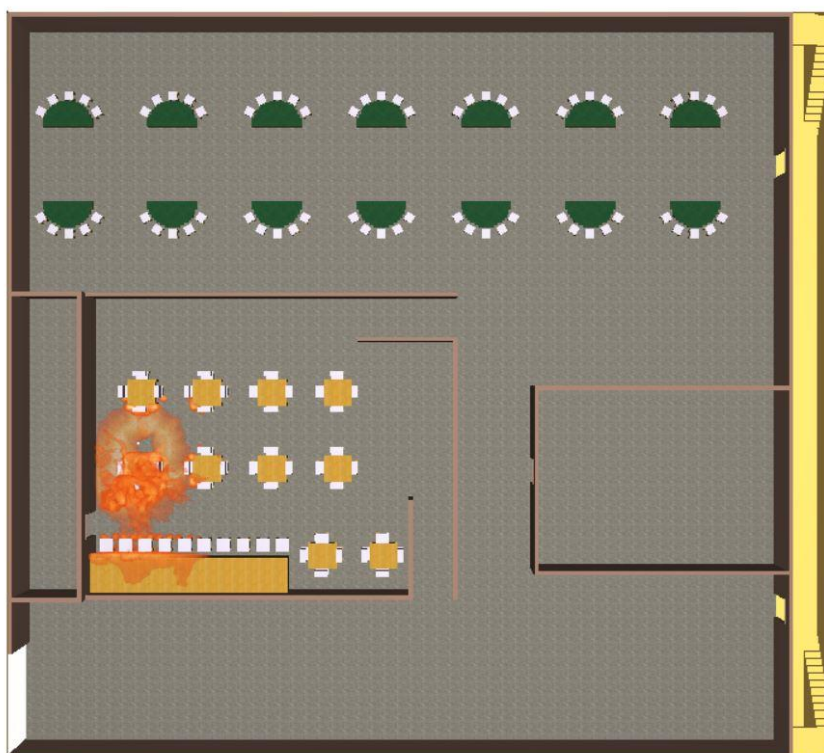
Σχήμα 7.14: Συγκριτικό διάγραμμα καμπύλης HRR - χρόνου (με διαφορετικό τρόπο έναρξης πυρκαγιάς).

Στο σχήμα 7.14 φαίνεται ότι οι καμπύλες HRR έχουν την μορφή όπως περιεγράφηκε στο Κεφάλαιο 3 που σημαίνει ότι η εξέλιξη των προσομοιώσεων είναι λογική. Παρατηρείται πως τα 2 πρώτα σενάρια εξελίσσονται στον ίδιο χρόνο, λαμβάνοντας την μέγιστη τιμή με περίπου 4 λεπτά διαφορά, όμως έχουν μεγάλη διαφορά στις τιμές του ρυθμού έκλυσης θερμότητας με τη μέγιστη διαφορά να είναι της τάξεως των 10000 kW/m².

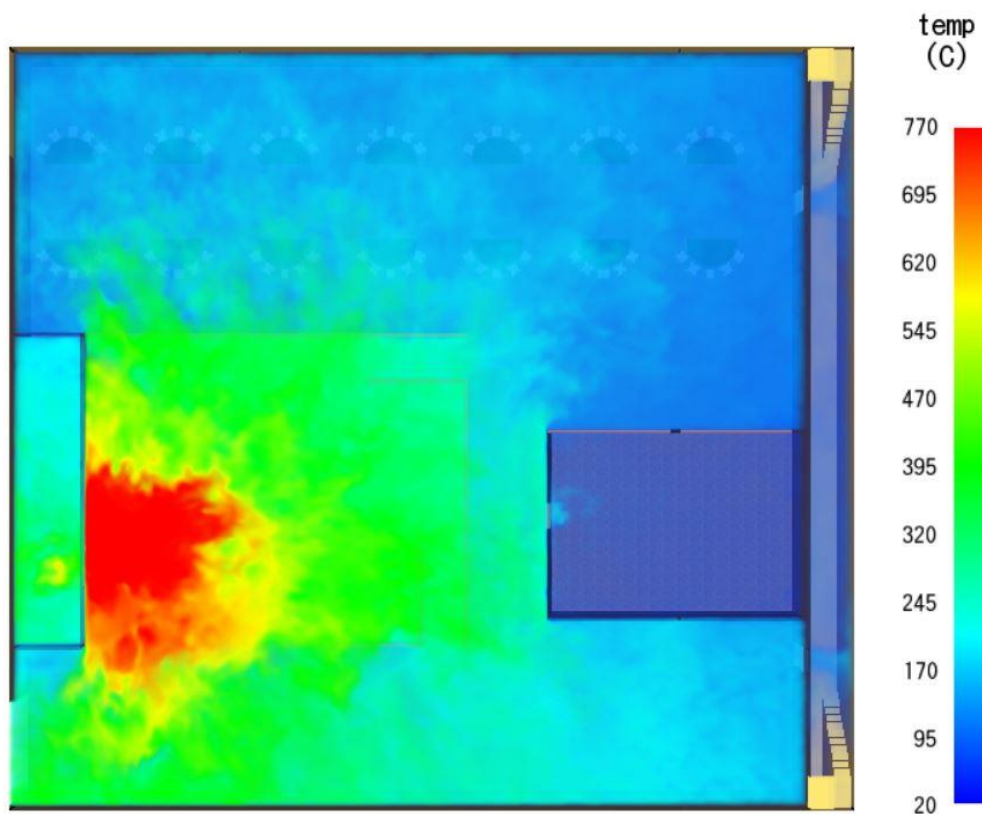
Στο σενάριο 3 όπου η θερμότητα μεταφέρεται με αγωγή από ένα σωματίδιο στο χαλί η πυρκαγιά εξελίσσεται πολύ πιο αργά από τα δυο προηγούμενα και η μέγιστη τιμή της HRR επιτυγχάνεται με 15 λεπτά διαφορά από τα 2 πρώτα. Ακόμη βλέπουμε πως η φωτιά αναπτύσσεται μετά τα 1100 sec στο χρόνο δηλαδή περίπου που στα δύο πρώτα σενάρια η HRR βρίσκεται στο μέγιστο. Παρόλα αυτά η ένταση της HRR είναι στο ίδιο εύρος τιμών με αυτές που προκύπτουν στο δεύτερο σενάριο και η μέγιστη τιμή του σεναρίου 3 φτάνει τα 34828 kW/m² σε χρόνο 2030 sec.

7.2 Μελέτη διάδοσης πυρκαγιάς μεταξύ δύο καταστρωμάτων.

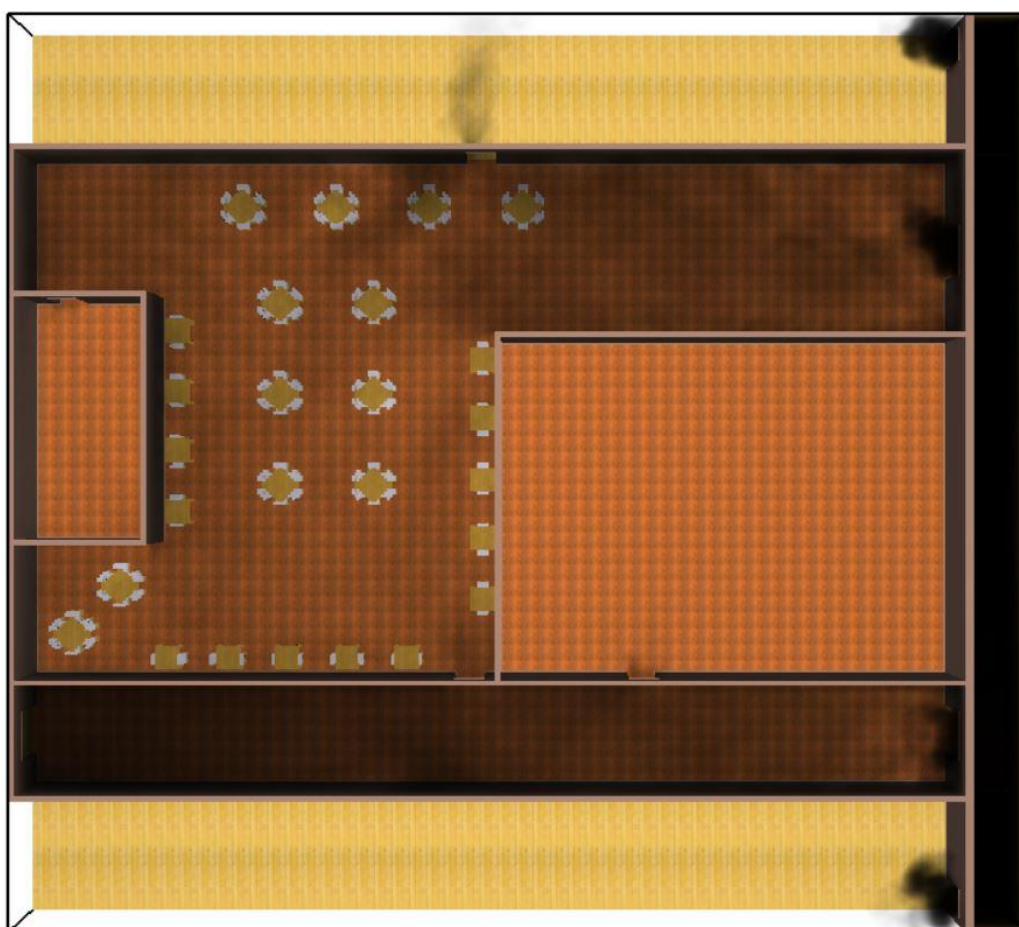
7.2.1 Απευθείας έναρξη και διάδοση της πυρκαγιάς



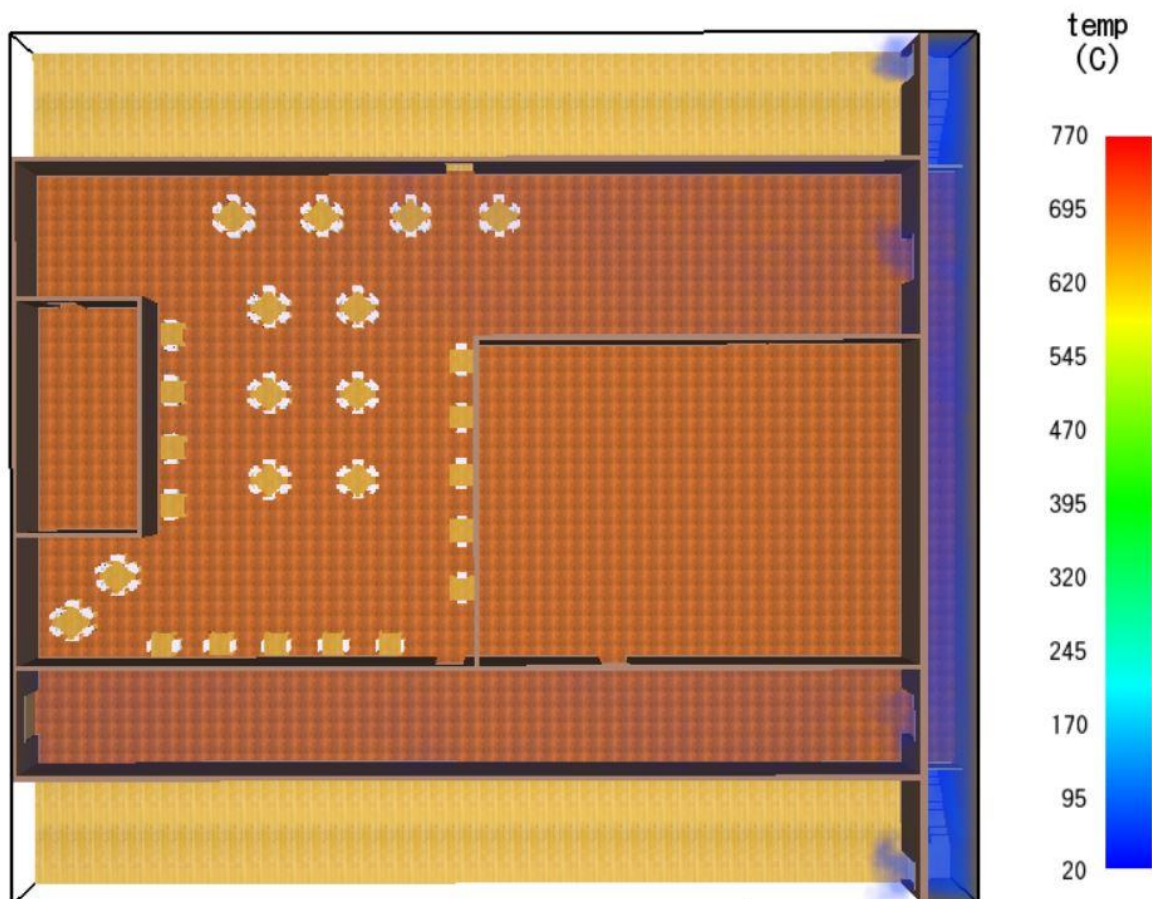
Σχήμα 7.15: Διάδοση πυρκαγιάς στο χώρο του κάτω καταστρώματος στα 800 sec.



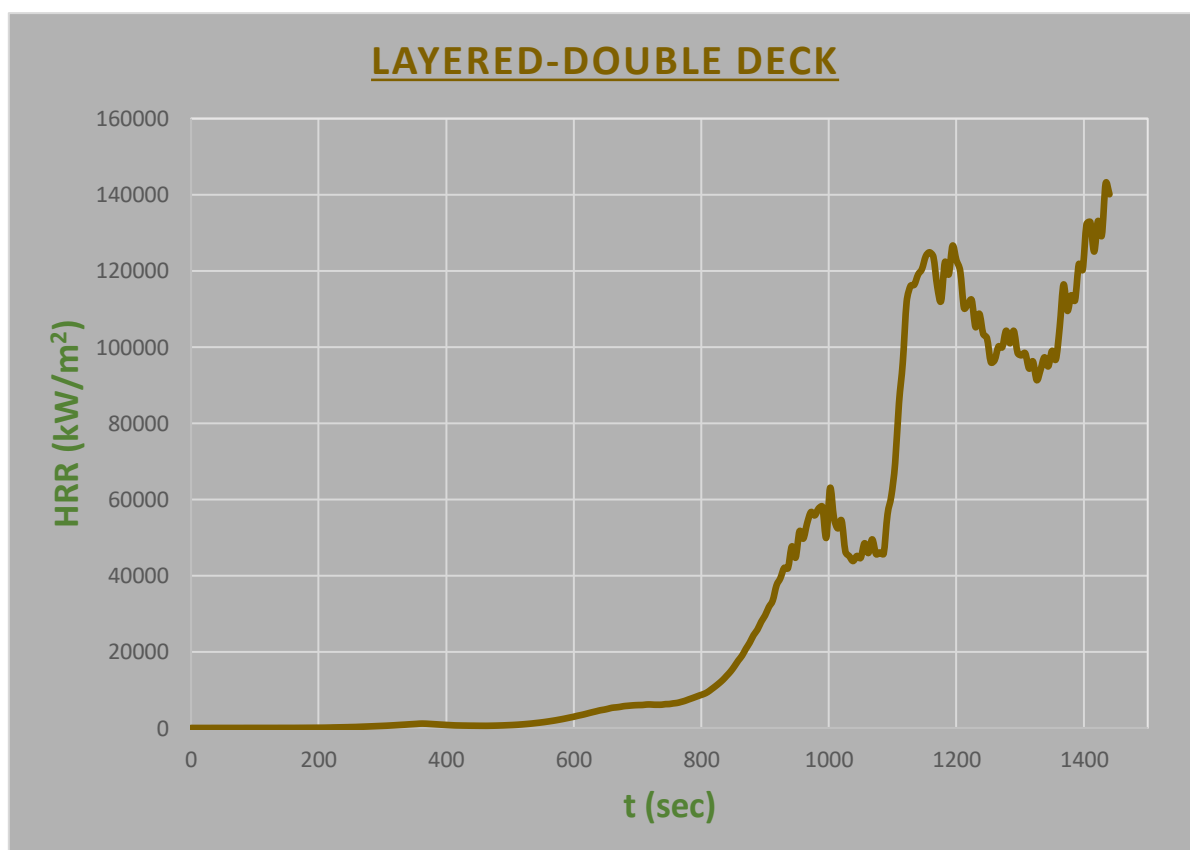
Σχήμα 7.16: Εξέλιξη θερμοκρασίας στο κάτω κατάστρωμα στα 800 sec.



Σχήμα 7.17: Διάδοση καπνού στο χώρο του πάνω καταστρώματος στα 800 sec.



Σχήμα 7.18: Εξέλιξη θερμοκρασίας στο πάνω κατάστρωμα στα 800 sec.

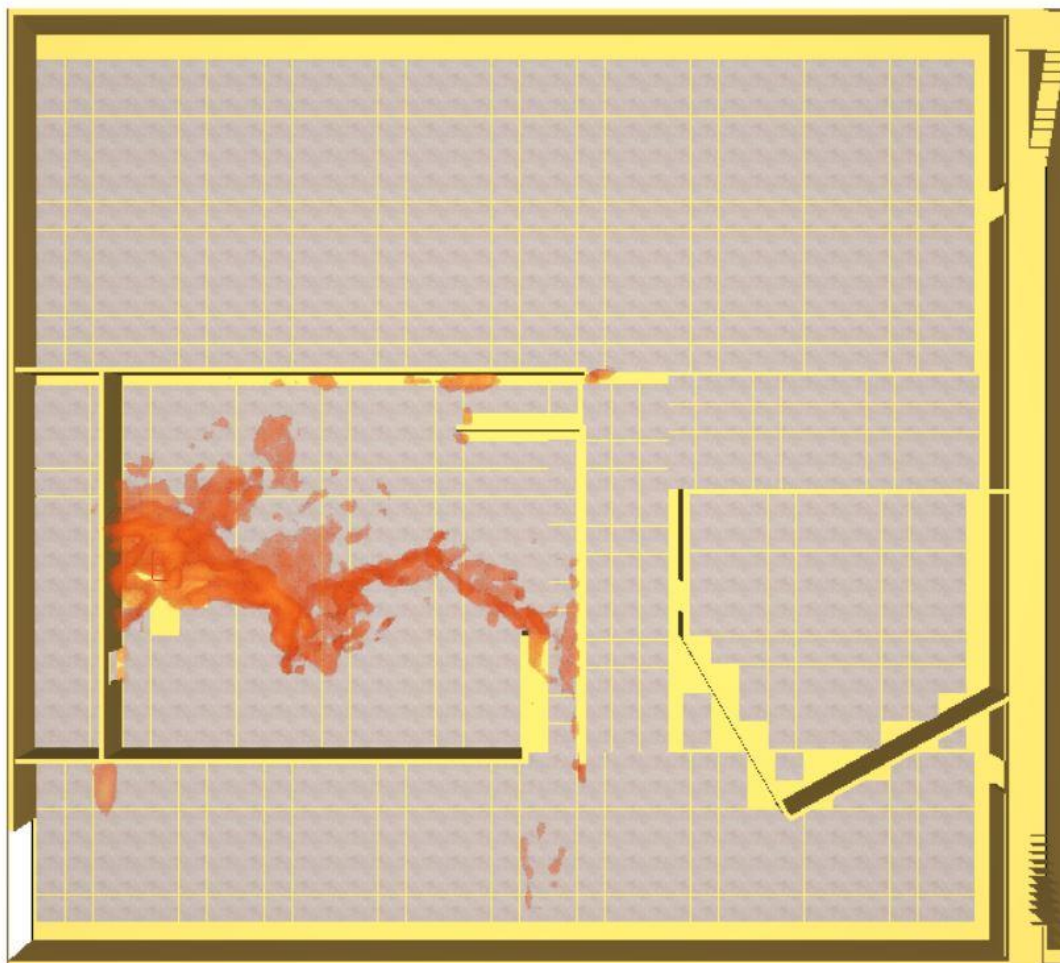


Σχήμα 7.19: Διάγραμμα καμπύλης HRR – χρόνου

Αυτό το σενάριο περιλαμβάνει τη μεγαλύτερη γεωμετρία από όλα που μελετώνται με περισσότερα υλικά. Υπάρχουν αντικείμενα και στα δυο καταστρώματα και συνολικά και οι δυο όροφοι αποτελούν χώρους που κινούνται εκατοντάδες επιβάτες (Σχήμα 6.5). Στα Σχήματα 7.15 και 7.17 φαίνεται η διάδοση της πυρκαγιάς για το πάνω και το κάτω κατάστρωμα αντίστοιχα σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Αντίστοιχα στα Σχήματα 7.16 και 7.18 δίνεται η θερμοκρασία σε κάθε κατάστρωμα για τις ίδιες χρονικές στιγμές.

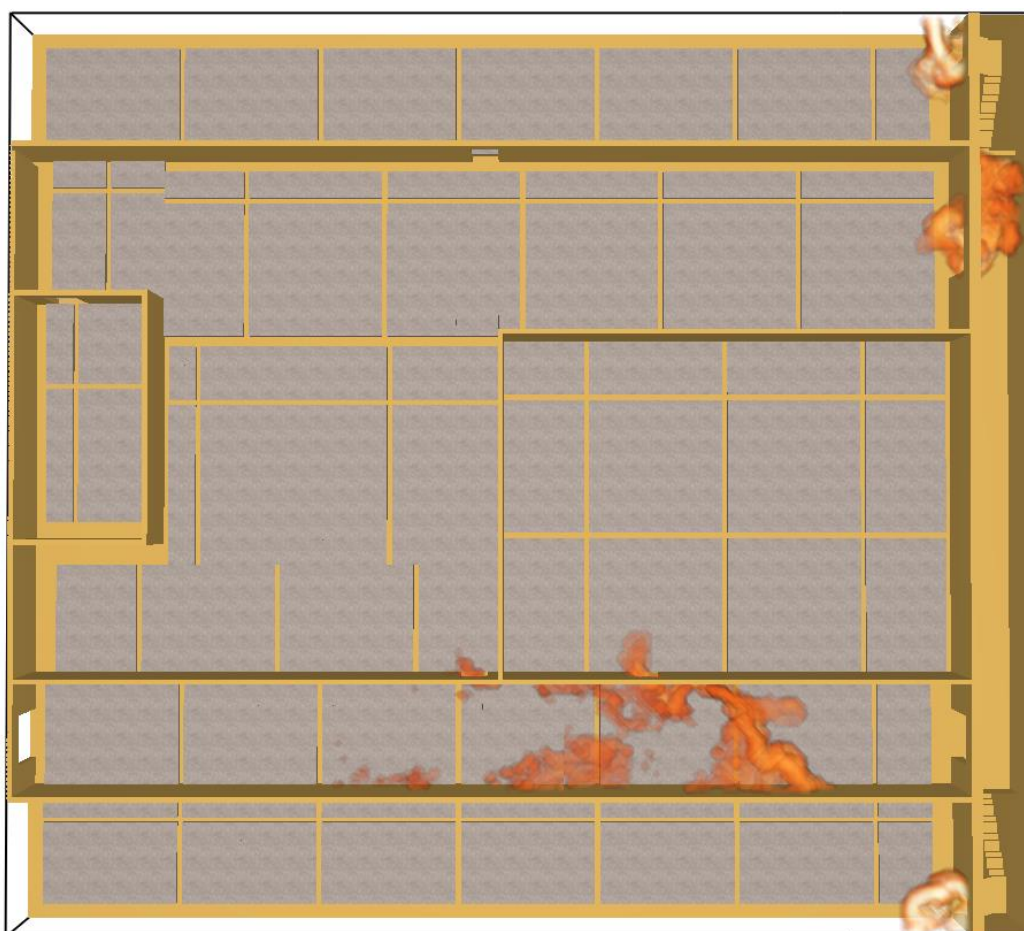
Στο Σχήμα 7.19 φαίνεται ότι η καμπύλη HRR έχει πάρει τη χαρακτηριστική της μορφή και υπάρχουν τρία μέγιστα λόγω της σταδιακής αυτανάφλεξης των υλικών που υπάρχουν στο χώρο και κατευθύνουν την εξέλιξη της φωτιάς. Παράλληλα, παρατηρείται ότι η καμπύλη έχει χαμηλές τιμές για τα πρώτα 600 sec και μετά αλματώδη αύξηση μέχρι τα 1000 sec περίπου και έπειτα συνεχίζει με μέγιστα λόγω των υλικών που αυτανάφλεγονται στην εξέλιξη της φωτιάς.

7.2.2 Διάδοση της πυρκαγιάς με *fuel packages*

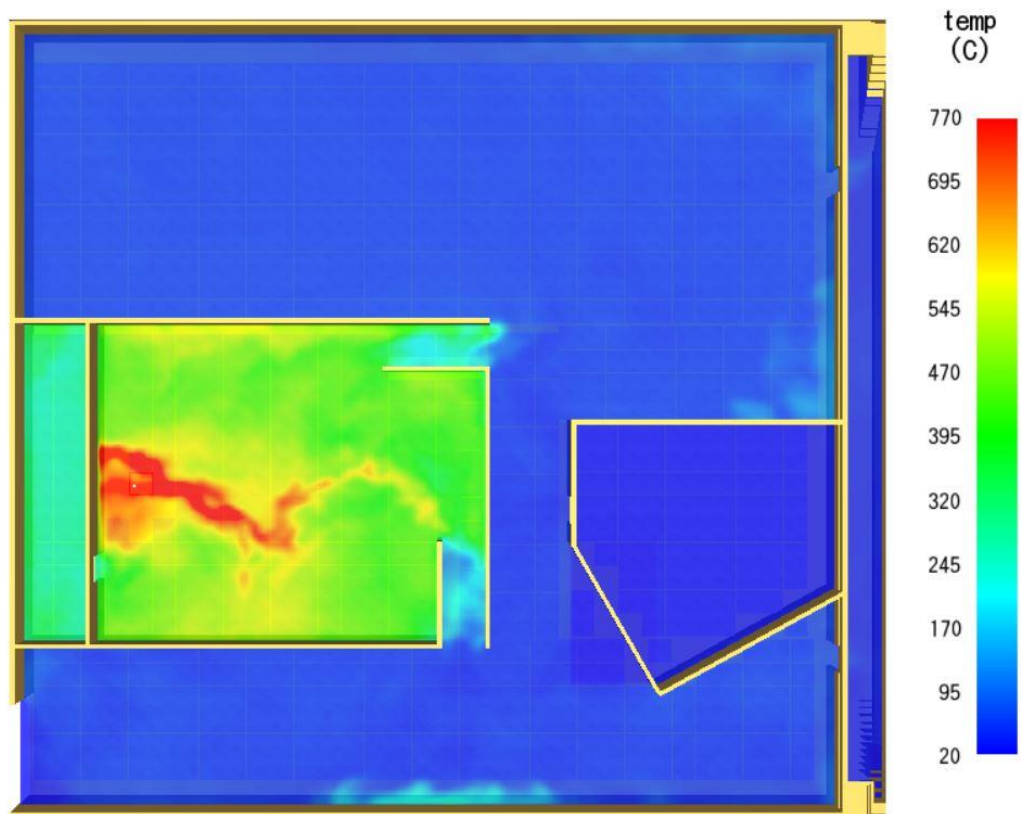


Σχήμα 7.20: Διάδοση πυρκαγιάς στο χώρο του κάτω καταστρώματος στα 1450 sec.

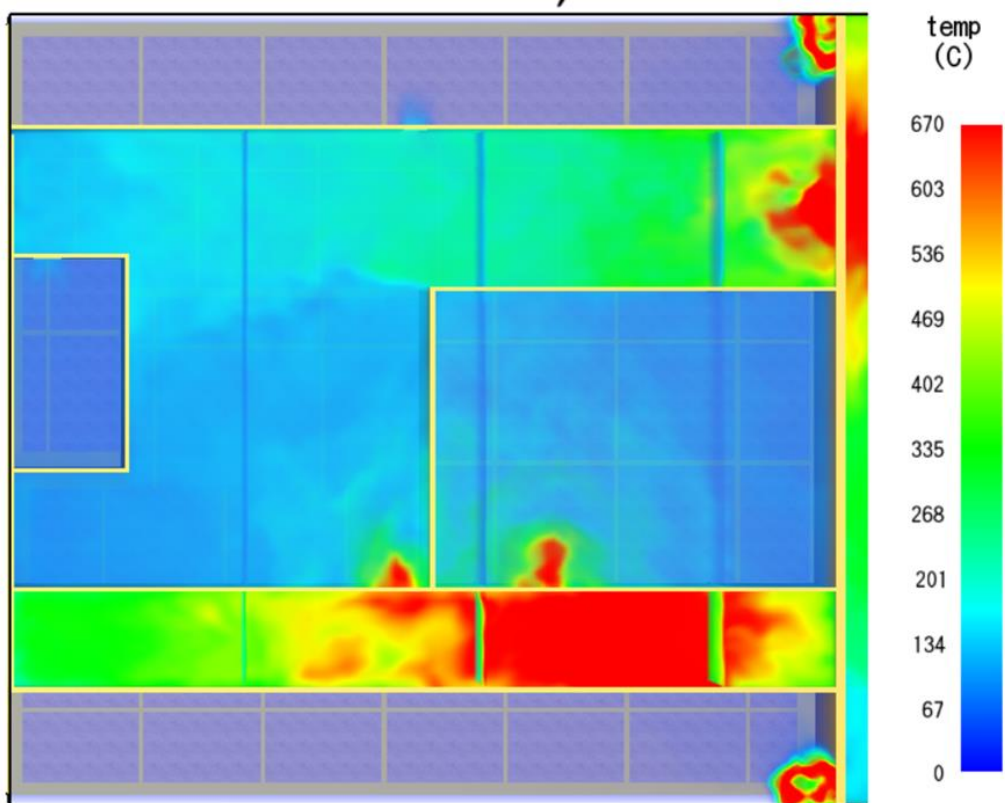
Τα δύο πρώτα σχήματα απεικονίζουν την εξέλιξη της πυρκαγιάς σε χώρο που έχουν τοποθετηθεί fuel packages. Στο σχήμα 7.20 η φωτιά προσπαθεί να φύγει από τους εσωτερικούς τοίχους στο χώρο στα 1450 sec περίπου. Αυτή τη χρονική στιγμή είναι κοντά στο πρώτο μέγιστο της HRR όπως φαίνεται από τη καμπύλη της HRR στο Σχήμα 7.24 αλλά και στο μέγιστο της θερμοκρασίας που επικρατεί στο κάτω κατάστρωμα (Σχήμα 7.22). Λίγο αργότερα η φωτιά περνάει από τις διαθέσιμες εξόδους στο σχέδιο και διαδίδεται στο πάνω κατάστρωμα όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.21 για χρόνο 1980 sec, κοντά στο τρίτο μέγιστο της καμπύλης HRR. Η θερμοκρασία στο χώρο του πάνω καταστρώματος για εκείνη τη χρονική στιγμή δίνεται στην εικόνα 7.23.



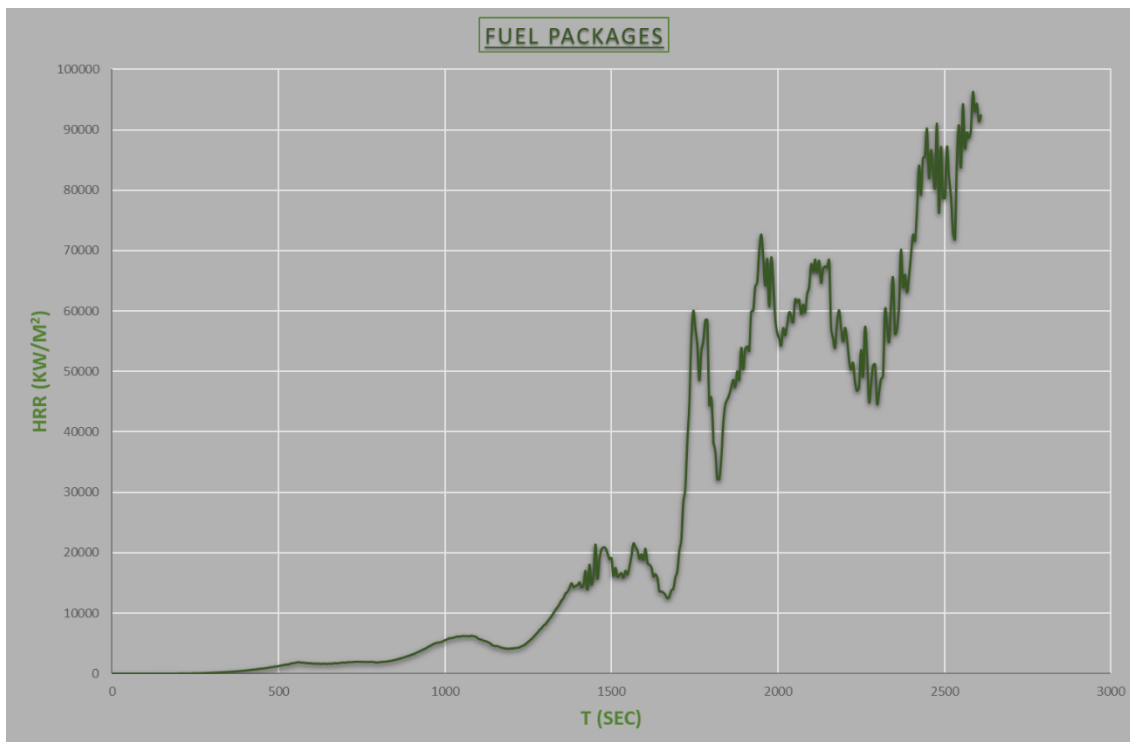
Σχήμα 7.21: Διάδοση πυρκαγιάς στο χώρο του πάνω καταστρώματος στα 1980 sec



Σχήμα 7.22: Κλιμάκωση της θερμοκρασίας στο κάτω κατάστρωμα στα 1450 sec.



Σχήμα 7.23: Κλιμάκωση της θερμοκρασίας στο πάνω κατάστρωμα στα 1980 sec.

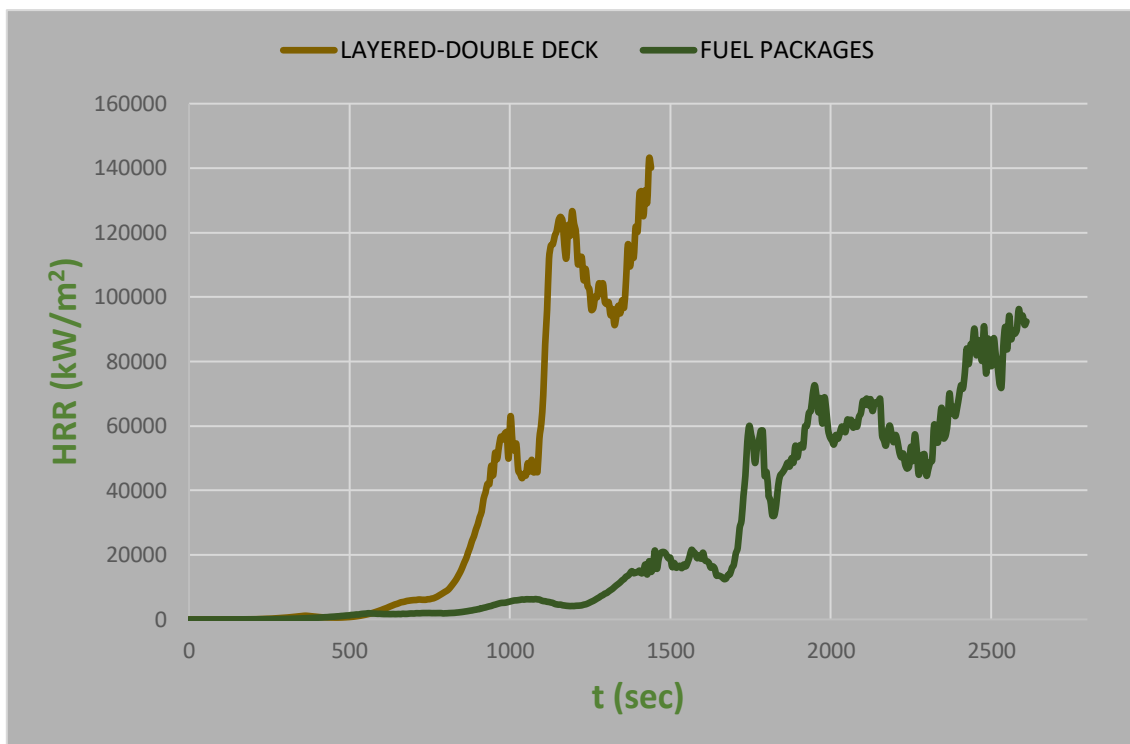


Σχήμα 7.24: Διάγραμμα καμπύλης HRR – χρόνου (με τη χρήση των fuel packages).

Στο διάγραμμα της HRR (Σχήμα 7.24) παρατηρούμε ότι η καμπύλη δεν έχει το ακριβές σχήμα όπως παρουσιάστηκε στη παράγραφο 3.4. Αυτό είναι λογικό και δείχνει στην πραγματικότητα τη διαδικασία της διάδοσης της πυρκαγιάς στα παρακείμενα fuel packages. Στο διάγραμμα φαίνεται ότι η πυρκαγιά αφού ξεκινήσει αναπτύσσεται πλήρως και φτάνει κοντά σε μέγιστο σημείο αλλά εκεί σταματάει και δεν ακολουθεί η φάση της απόσβεσης. Αυτό συμβαίνει διότι για την υλοποίηση της προσομοίωσης δόθηκε ο ίδιος χρόνος όπως και στα τρία σενάρια με τη μικρή γεωμετρία. Το συγκεκριμένο μοντέλο είναι αρκετά μεγαλύτερο σε μέγεθος οπότε η πλήρης ανάλυση του απαιτεί περισσότερο χρόνο και αξίζει να σημειωθεί ότι ο χρόνος υλοποίησης αυξάνεται όσο η φωτιά διαδίδεται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Μπορεί εύκολα να γίνει αντιληπτό ότι ο χρόνος επώασης της πυρκαγιάς διαρκεί σχεδόν 8,5 λεπτά και έπειτα ξεκινάει η πλήρης ανάπτυξη της πυρκαγιάς, ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας της οποίας φτάνει σε πολύ υψηλές τιμές με μέγιστη τα 96236 Kw/m². Η τιμή αυτή είναι σχεδόν τριπλάσια των μέγιστων τιμών που υπολογίσθηκαν στα τρία προηγούμενα σενάρια.

7.2.3 Σύγκριση μεθόδων



Σχήμα 7.25: Συγκριτικό διάγραμμα καμπύλης HRR - χρόνου (με διαφορετικό τρόπο τοποθέτησης του συνόλου του υλικού)

Η ποσότητα θερμότητας που εκλύεται στο πρώτο σενάριο, όπου τα αντικείμενα βρίσκονται στη πραγματική τους θέση στο χώρο είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με την ποσότητα που εκλύεται στη περίπτωση με τα fuel packages. Ακόμη η διαδικασία της καύσης είναι πολύ πιο γρήγορη σε σχέση με το σενάριο με τα fuel packages καθώς κοντά στο σημείο που ξεκινάει η πυρκαγιά υπάρχουν καρέκλες κ τραπέζια που αυταναφλέγονται και έτσι η πυρκαγιά εξελίσσεται πιο άμεσα. Ακόμη στο Σχήμα 7.25 φαίνεται ότι στο πρώτο σενάριο υπάρχουν μεγαλύτερα και πιο απότομα μέγιστα ενώ στο σενάριο με τα fuel packages η πυρκαγιά εξελίσσεται πιο ομαλά (φαίνεται να έχει πιο γραμμική συμπεριφορά), καθώς τα fuel packages είναι ίδιου μεγέθους και σε ίση απόσταση και έτσι η καύση γίνεται περισσότερο <<ομοιόμορφα>>.

Κεφάλαιο 8

8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όπως αναφέρεται στη παράγραφο 6.3.1 αρχικά ορίστηκαν οι HRR και οι χρόνοι αυτανάφλεξης για κάθε υλικό σε κάθε σενάριο. Το κύριο συμπέρασμα της εργασίας είναι πως η μέθοδος που προτάθηκε είναι λειτουργική και έτσι οδηγηθήκαμε στην ολοκλήρωση της μελέτης εφόσον η φωτιά μπόρεσε να επεκταθεί στους υπόλοιπους χώρους αλλά και στα αντικείμενα. Ιδιαίτερα σημαντικό είναι το γεγονός ότι η μέθοδος ουσιαστικά επαληθεύεται από τα τελικά διαγράμματα των καμπυλών HRR για όλα τα σενάρια.

Ακόμη καταλήγουμε στο πόσο σημαντικός είναι ο τρόπος έναρξης μιας πυρκαγιάς ο οποίος εν τέλη καθορίζει την ένταση της και το χρόνο ανάπτυξής της. Αυτό έχει άμεση επιρροή στον επικείμενο χρόνο αντίδρασης των επιβατών και τη δυνατότητα κατάσβεσης της ή περιορισμού της.

Επιπλέον παρατηρήθηκε ότι στο λογισμικό που πραγματοποιήθηκε η μελέτη, η κατεύθυνση της πυρκαγιάς επηρεάζεται από τα vents που έχουν οριστεί ως πόρτες και από τα ανοιχτά όρια (open boundaries) του σχεδίου καθώς αυτά <<απορροφούν>> τον καπνό. Ο καπνός έχει τη τάση να οδηγείται προς αυτά τα σημεία και μάλιστα όσο περισσότερα ή μεγαλύτερα vents τοποθετηθούν σε ένα χώρο, τόσο περισσότερο μειώνεται ο χρόνος ολοκλήρωσης ή ακόμη είναι σε θέση να πραγματοποιηθεί μια προσομοίωση.

Τέλος για όλα τα σενάρια δόθηκε η εντολή κατάσβεσης πυρκαγιάς μετά την πλήρη ανάπτυξη της αρχικής που ορίστηκε στην επιφάνεια έναρξής της και αυτός είναι ο λόγος που δεν βλέπουμε πλήρη διάδοση της σε όλους τους χώρους και στα αντικείμενά που υπάρχουν σε αυτούς. Η οικονομία χρόνου και η υπολογιστική δυνατότητα είναι οι λόγοι που δεν πραγματοποιήθηκαν πιο εκτενείς προσομοιώσεις. Αυτό όμως δεν επηρεάζει το κύριο σκοπό της εργασίας και οι HRR λήφθηκαν ολοκληρωμένες σε όλες τις περιπτώσεις.

Όπως τονίστηκε και στο κεφάλαιο 2, η εργασία έχει ως κύριο στόχο την ανάπτυξη μεθόδου για πλήρη διάδοση της πυρκαγιάς σε υπολογιστικό περιβάλλον. Ακόμη από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση διαπιστώθηκε ότι δεν έχουν γίνει αντίστοιχες μελέτες

και ειδικότερα να έχουν σχέση με πλοία. Επομένως η μέθοδος που προτάθηκε και κατέληξε λειτουργική θα μπορέσει να αποτελέσει χρήσιμο εργαλείο για την υλοποίηση πολλών σεναρίων αλλά και θεωριών διαφόρων μοντέλων και δεικτών διακινδύνευσης. Στη συνέχεια δίνονται κάποιες προτάσεις για την αξιοποίηση και επέκταση της παρούσης μελέτης:

1. Μπορεί να γίνει προσομοίωση κάποιου σεναρίου χωρίς την επιλογή κατάσβεσης της φωτιάς ώστε να παρατηρηθεί πως αυτή θα εξελιχθεί σε αυτή τη περίπτωση.

2. Η υλοποίηση του σεναρίου διάδοσης της φωτιάς από το θέατρο (που εκτείνεται σε ύψος δύο καταστρωμάτων στους γειτονικούς χώρους).

3. Εφαρμογή σεναρίων με ίδιες αρχικές συνθήκες (σημείο έναρξης πυρκαγιάς, τρόπος έναρξης κτλ.) αλλά με διαφορετικά υλικά ή διαφορετικούς τύπους υλικών στο χώρο.

4. Υπάρχει η δυνατότητα εφαρμογής σχεδίου εκκένωσης στο χώρο με τη χρήση του λογισμικού Pathfinder. Αυτό θα ήταν ιδιαίτερα ενδιαφέρον ειδικά για το σενάριο που υπάρχουν όλα τα αντικείμενα στο χώρο και στα δυο καταστρώματα, ώστε να ληφθούν συμπεράσματα για το χρόνο αντίδρασης των επιβατών και τη συμπεριφορά τους από το ένα κατάστρωμα στο άλλο.

5. Για οποιοδήποτε από τα σενάρια που υλοποιήθηκαν στην εργασία θα μπορούσε να γίνει επιπλέον μοντελοποίηση σε λογισμικό με την χρήση πεπερασμένων στοιχείων δίνοντας όλα τα στοιχεία για τις θερμοκρασιακές μεταβολές και τα αντικείμενα που επηρεάστηκαν με στόχο την ανάλυση των παραμορφώσεων που προκύπτουν. Αυτή η μέθοδος όπως και η δεύτερη που προτάθηκε θα μπορούσε να δώσει απαντήσεις για τη σωστή επιλογή των υλικών στο χώρο.

6. Υπάρχει η δυνατότητα εφαρμογής της μεθόδου με την χρήση όλων των μέσων πυρόσβεσης που υπάρχουν σε ένα χώρο κρουαζιερόπλοιου σύμφωνα με τους κανονισμούς ασφαλείας

7. Θα μπορούσε να γίνει εφαρμογή των ίδιων σεναρίων, αλλά με τη δυνατότητα εκτόξευσης πυροκλαστικών σωματιδίων από τη φωτιά που εξελίσσεται, τα οποία θα παίζουν σημαντικό ρόλο στη διάδοσή της.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] V. Babrauskas, R.D. Peacock, Heat release rate: the single most important variable in fire hazard, *Fire Saf J*, 18 (1992), pp. 255-272
- [2] V. Babrauskas, *ASTM Fire Standards and Related Technical Material*, 7th ed., 2 Vols. American Society for Standards and Materials, West Conshohocken, USA (2007). 3080pp. *Fire Safety Journal - FIRE SAFETY J.* 43 (2008)
- [3] L.-S. Byun, Peculiarity of interior design materials for accommodation areas of cruise ships: A state-of-the-art review, *Ships and Offshore Structures*, 1:3, (2006) pp. 171-183
- [4] CEB, "Fire Design of Concrete Structures", *Bulletin d' Information No. 145/1982*, No. 174/1986 και No. 208/1991
- [5] X.S. Chen, C.C. Liu, I.C. Wu, A BIM-based visualization and warning system for fire rescue, *Advanced Engineering Informatics*, Vol. 37, (2018), pp. 42-53
- [6] P. J. DiNenno, *SFPE Handbook of Protection Engineering*, Massachusetts, (2002) , pp. 3,162 – 3,193
- [7] D. D. Drysdale, Short editorial, *Fire Safety Journal*, ISSN: 0379-7112, 2002, vol. 37, issue 4
- [8] M. Foschia, Assessment of the software Fire Dynamics Simulator (FDS) for fire simulation in train convoys, Master thesis, University of Padova, (2017)
- [9] FSS Code (2015). International Code for Fire Safety Systems. London: IMO. Resolution MSC.98(73)
- [10] FTP Code (2010). International code for application of fire test procedures. London: IMO. Resolution MSC.307(88)
- [11] Garri G., Fire on board ship. In: Masellis M., Gunn S. (eds) *The Management of Mass Burn Casualties and Fire Disasters*. Springer, Dordrecht, (1992)
- [12] C. Huggett, Estimation of rate of heat release by means of oxygen consumption measurements, *FAM Journal*, Vol. 4, (1980), pp. 61-65

- [13] M. J. Hurley, R. W. Bukowski, Fire Hazards Analysis Techniques, Section 3
- [14] J. Glasa, L. Valasek, P. Weisepacher, L. Halada, Use of Pyrosim for Simulation of Cinema Fire, *Int. J. on Recent Trends in Eng. And Technology*, Vol. 7, No. 2, (2012), pp. 51-56.
- [15] I. Glassman, Soot formation in combustion processes, 22 (1988), pp. 295-311
- [16] J. Hietaniemi, S. Hostikka, J. Vaari, FDS simulation of fire spread-comparison of model results with experimental data, *VTT Building and Transport*, (2004), pp. 1459-768
- [17] International Maritime Organization (IMO), International Convention for the Safety of Life At Sea, 1 November 1974, 1184 UNTS.
- [18] A. Kacema, C. Lallemand, N. Girauda, et. al., A small-world network model for the simulation of fire spread onboard naval vessels, *Fire Safety Journal*, Vol. 91, (2017), pp. 441-450.
- [19] Kang et al., H.J. Kang, J. Choi, D. Lee, B.J. Park, A framework for using computational fire simulations in the early phases of ship design, *Ocean Eng.*, 129 (2017), pp. 335-342
- [20] M.X Li, S.B. Zhu, J.H Wang, Z. Zhou, Research on Fire Safety Evacuation in a University Library in Nanjing, *Procedia Engineering*, Vol. 211, 2018, pp. 372-378
- [21] A. Ntounis, Fire Safety and Evacuation Analysis of a Passenger Ship, Dissertation, NTUA, Athens, (2017)
- [22] W. J. Parker, An Investigation of the Fire Environment in the ASTM E 84 Tunnel Test, NBS Technical Note 945, National Bureau of Standards, Washington, DC, (1977).
- [23] Purser, D.A., "Toxicity Assessment Of Combustion Products and Modelling of Toxic and Thermal Hazards in Fire", in *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. In press.
- [24] A.M. Salem, Parametric analysis of a cabin fire using a zone fire model, *Alexandria Eng. J.*, 52 (4) (2013), pp. 627-636

- [25] J.K. Seo, S.E. Lee, J.S. Park, A method for determining fire accidental loads and its application to thermal response analysis for optimal design of offshore thin-walled structures, *Fire Safety Journal* 92 (2017), pp. 107-121
- [26] K.J. Spyrou, N. Themelis, N. Nikolaou, Towards risk – based fire safety assessment of passenger ships, In proceedings of the 15th International Congress of the International Maritime Association of the Mediterranean (IMAM 2013), La Coruna, Spain, (2013)
- [27] S.H. Wang, WC. Wang, K.C. Wang, S.Y. Shin, Applying building information modeling to support fire safety management, *Automation in Construction*, Vol. 59, (2015), pp. 158-167
- [28] Society of Fire Protection Engineers (SPFE), *The SPFE Handbook of Fire Protection Engineering*, NPFA International, 3rd edition, Bethesda, MD,(2002)
- [29] S.Tavelli, R. Rota, M. Derudi, A critical comparison between CFD and zone models for the consequence analysis of fires in congested environments, *Chemical Engineering Transactions*, 36, 247-252 DOI: 10.3303/CET1436042, (2014)
- [30] N. Themelis, S. Niotis, K. Spyrou, 2011. Managing uncertainty in performance-based fire safety assessments of ship. Proceedings, 14th Conference of the International Maritime Association of the Mediterranean, 13-16 September (2011), Genoa, Italy
- [31] N. Themelis, K.J. Spyrou, Probabilistic fire safety assessment on passenger ships, *Journal of Ship Research*, 56(4) (2012), 252-275
- [32] Thunderhead Engineering, *Pyrosim User Manual 2018*, Thunderhead Eng., Manhattan, USA, (2018)
- [33] N. Αξάπουλος, Υπολογισμός δείκτη διακινδύνευσης έναντι πυρκαγιάς για επιβατηγά πλοία, Μεταπτυχιακή Εργασία, Ε.Μ.Π, Αθήνα, (2015)
- [34] Α. Πάλλα, Μελέτη πυρκαγιάς σε επιβατηγό πλοίο: αποτελεσματικότητα διαχωριστικών και μεταβολή παραμέτρων βιωσιμότητας, Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π, Αθήνα, (2012)
- [35] Ε. Ψύλλα, Προσομοίωση πυρκαγιάς σε επιβατηγό πλοίο, Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π, Αθήνα, (2010)

- [36] Θ.Π. Τάσιος, Γ. Δεοδάτης, *Πρακτικός Σχεδιασμός Κατασκευών από Ωπλ. Σκυρόδεμα έναντι Πυρκαγιάς*, Εργαστήριο Ω.Σ./Ε.Μ.Π., Αθήνα, (1984)
- [37] Κ. Τριπολίτης, Γ. Τριάντης, *Ναυτική Τέχνη – Έκτακτες Ανάγκες*, Εκδόσεις: Ινστιτούτο Τεχνολογίας Υπολογιστών & Εκδόσεων 'Διόφαντος' (ΙΤΥΕ), (2016)

ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΟΙ ΙΣΟΤΟΠΟΙ

- i. <https://www.ansys.com/>
- ii. <https://blueskytv.grtext>
- iii. <https://www.cruiseshipfires.com/>
- iv. <http://fashion2apparel.blogspot.com/2016/12/important-textile-fibers-densities.html>
- v. <https://fseg.gre.ac.uk/>
- vi. <https://gcaptain.com>
- vii. <http://www.iklimnet.com>
- viii. <http://www.imo.org/en/Pages/Default.aspx>
- ix. <https://www.isalos.net/>
- x. <https://www.marineinjurylaw.com/>
- xi. <https://www.marineinsight.com/>
- xii. <https://www.nist.gov/>
- xiii. <http://www.pi-schools.gr/>
- xiv. <https://www.swedishclub.com/>

ΕΙΚΟΝΕΣ

- xv. <http://www.fria.gr/CMT/downloads/Image/fire.jpg>
- xvi. <https://www.elitereaders.com/wp-content/uploads/2017/11/dona-paz3.jpg>

- xvii. https://3kbo302xo3lg2i1rj8450xje-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2016/02/sstar_lysekil3-800x450.jpg
- xviii. http://newpost.gr/storage/photos/c_1140px_600px/201503/norman324.jpg
- xix. https://blueskytv.gr/wp-content/uploads/2018/08/4536275_iefimerida-696x464.jpg
- xx. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10694-007-0031-7>
- xxi. http://www.imostickers.com/2583-large_default/imo-symbol-poster-imo-fire-control-symbols-poster45-x-32-cm-221557wv.jpg

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Carpet	
Qmax [kW]	1114,60
Qmax[kW/m ²]	1114,60
a [growth coef.]	0,0287
t incipient	355,26
t decay	355,26
F	time
0,0001167	0
0,0059533	50
0,0117898	100
0,0176264	150
0,0620037	200
0,2319170	250
0,5304800	300
0,9576920	350
1,000000000	355,26
0,477101000	405,26
0,227626000	455,26
0,108601000	505,26
0,051813500	555,26
0,024720300	605,26
0,011794100	655,26
0,005626970	705,26
0,002684630	755,26
0,001280840	805,26
0,000611092	855,26
0,000291553	905,26
0,000139100	955,26
0,000066365	1005,26
0,000031663	1055,26
0,000015106	1105,26
0,000007207	1155,26
0,000003439	1205,26
0,000001641	1255,26
0,000000783	1305,26
0,000000373	1355,26
0,000000178	1405,26
0,000000085	1455,26
0,000000041	1505,26
0,000000019	1555,26

Plywood	
Qmax [kW]	1248,93
Qmax[kW/m ²]	1248,93
a [growth coef.]	0,0130
t incipient	355,05
t decay	355,05
F	time
0,000449480	0
0,022014900	50
0,050315300	100
0,130780000	150
0,263408000	200
0,448201000	250
0,685157000	300
0,974277000	350
1,000000000	355,05
0,620794000	405,05
0,385385000	455,05
0,239245000	505,05
0,148522000	555,05
0,092201400	605,05
0,057238100	655,05
0,035533100	705,05
0,022058700	755,05
0,013693900	805,05
0,008501110	855,05
0,005277440	905,05
0,003276200	955,05
0,002033850	1005,05
0,001262600	1055,05
0,000783814	1105,05
0,000486587	1155,05
0,000302070	1205,05
0,000187523	1255,05
0,000116413	1305,05
0,000072269	1355,05
0,000044864	1405,05
0,000027851	1455,05
0,000017290	1505,05
0,000010734	1555,05
0,000006663	1605,05
0,000004137	1655,05

Fabric	
Qmax [kW]	274,41
Qmax{kW/m ² }	274,41
a [growth coef.]	0,0016
t incipient	703,60
t decay	703,60
F	time
0,000350785	0
0,017890100	50
0,035429300	100
0,052968600	150
0,070507800	200
0,088047100	250
0,105586000	300
0,118609000	350
0,157488000	400
0,224823000	450
0,320614000	500
0,444861000	550
0,597564000	600
0,778723000	650
0,988338000	700
1,000000000	703,60
0,751752000	753,60
0,565130000	803,60
0,424838000	853,60
0,319372000	903,60
0,240089000	953,60
0,180487000	1003,60
0,135681000	1053,60
0,101999000	1103,60
0,076677700	1153,60
0,057642600	1203,60
0,043332900	1253,60
0,032575600	1303,60
0,024488700	1353,60
0,018409400	1403,60
0,013839300	1453,60
0,010403700	1503,60
0,007821020	1553,60
0,005879460	1603,60
0,004419900	1653,60
0,003322660	1703,60
0,002497820	1753,60
0,001877740	1803,60
0,001411590	1853,60
0,001061170	1903,60
0,000797734	1953,60
0,000599698	2003,60

Foam	
Qmax [kW]	833,63
Qmax{kW/m ² }	833,63
a [growth coef.]	0,0039
t incipient	693,95
t decay	693,95
F	time
0,000112705	0
0,005747980	50
0,011383200	100
0,017018500	150
0,022653800	200
0,027613200	250
0,045178700	300
0,086206700	350
0,150697000	400
0,238650000	450
0,350065000	500
0,484943000	550
0,643283000	600
0,825085000	650
1,000000000	693,95
0,733258000	743,95
0,537667000	793,95
0,394248000	843,95
0,289086000	893,95
0,211974000	943,95
0,155432000	993,95
0,113971000	1043,95
0,083570400	1093,95
0,061278700	1143,95
0,044933000	1193,95
0,032947500	1243,95
0,024159000	1293,95
0,017714800	1343,95
0,012989500	1393,95
0,009524640	1443,95
0,006984020	1493,95
0,005121080	1543,95
0,003755070	1593,95
0,002753440	1643,95
0,002018980	1693,95
0,001480430	1743,95
0,001085540	1793,95
0,000795979	1843,95
0,000583657	1893,95
0,000427971	1943,95
0,000313813	1993,95
0,000230106	2043,95

PVC	
Qmax [kW]	1069,19
Qmax{kW/m ² }	1069,19
a [growth coef.]	0,0042
t incipient	998,76
t decay	998,76
F	time
0,000050990	0
0,002600470	50
0,005149960	100
0,007699440	150
0,010248900	200
0,012798400	250
0,015347900	300
0,017897400	350
0,020446900	400
0,022996300	450
0,025432800	500
0,036255100	550
0,066524100	600
0,116240000	650
0,185402000	700
0,274011000	750
0,382067000	800
0,509569000	850
0,656518000	900
0,822914000	950
1,000000000	998,76
0,756219000	1048,76
0,571867000	1098,76
0,432457000	1148,76
0,327032000	1198,76
0,247308000	1248,76
0,187019000	1298,76
0,141427000	1348,76
0,106950000	1398,76
0,080877600	1448,76
0,061161200	1498,76
0,046251200	1548,76
0,034976100	1598,76
0,026449600	1648,76
0,020001700	1698,76
0,015125600	1748,76
0,011438300	1798,76
0,008649860	1848,76
0,006541190	1898,76
0,004946570	1948,76
0,003740690	1998,76
0,002828780	2048,76

Felt	
Qmax [kW]	1561,50
Qmax{kW/m ² }	1561,50
a [growth coef.]	0,0095
t incipient	571,71
t decay	571,71
F	time
0,000103861	0
0,005296890	50
0,010489900	100
0,015683000	150
0,023484000	200
0,057533800	250
0,122035000	300
0,216989000	350
0,342394000	400
0,498251000	450
0,684559000	500
0,901319000	550
1,000000000	571,71
0,696128000	621,71
0,484594000	671,71
0,337340000	721,71
0,234831000	771,71
0,163473000	821,71
0,113798000	871,71
0,079217900	921,71
0,055145800	971,71
0,038388600	1021,71
0,026723300	1071,71
0,018602900	1121,71
0,012950000	1171,71
0,009014840	1221,71
0,006275480	1271,71
0,004368540	1321,71
0,003041060	1371,71
0,002116970	1421,71
0,001473680	1471,71
0,001025870	1521,71
0,000714137	1571,71
0,000497131	1621,71
0,000346067	1671,71
0,000240907	1721,71
0,000167702	1771,71
0,000116742	1821,71
0,000081267	1871,71
0,000056573	1921,71
0,000039382	1971,71
0,000027415	2021,71

Teakwood	
Qmax [kW]	1120,39
Qmax{kW/m ² }	1120,39
a [growth coef.]	0,0043
t incipient	527,28
t decay	527,28
F	time
0,001149610	0
0,027666300	50
0,048571700	100
0,088518600	150
0,147507000	200
0,225537000	250
0,322608000	300
0,438720000	350
0,573874000	400
0,728069000	450
0,901306000	500
1,000000000	527,28
0,750680000	577,28
0,563521000	627,28
0,423024000	677,28
0,317556000	727,28
0,238383000	777,28
0,178949000	827,28
0,134334000	877,28
0,100842000	927,28
0,075699900	977,28
0,056826400	1027,28
0,042658500	1077,28
0,032022900	1127,28
0,024039000	1177,28
0,018045600	1227,28
0,013546500	1277,28
0,010169100	1327,28
0,007633710	1377,28
0,005730480	1427,28
0,004301760	1477,28
0,003229240	1527,28
0,002424130	1577,28
0,001819750	1627,28
0,001366050	1677,28
0,001025470	1727,28
0,000769797	1777,28
0,000577871	1827,28
0,000433797	1877,28
0,000325643	1927,28
0,000244454	1977,28

Balsa	
Qmax [kW]	947,15
Qmax{kW/m ² }	947,15
a [growth coef.]	0,0121
t incipient	375,65
t decay	375,65
F	time
0,000221804	0
0,011312000	50
0,022024800	100
0,056436900	150
0,154783000	200
0,317063000	250
0,543277000	300
0,833425000	350
1,000000000	375,65
0,593574000	425,65
0,352330000	475,65
0,209134000	525,65
0,124136000	575,65
0,073684200	625,65
0,043737000	675,65
0,025961100	725,65
0,015409900	775,65
0,009146890	825,65
0,005429360	875,65
0,003222720	925,65
0,001912920	975,65
0,001135460	1025,65
0,000673981	1075,65
0,000400057	1125,65
0,000237464	1175,65
0,000140952	1225,65
0,000083666	1275,65
0,000049662	1325,65
0,000029478	1375,65
0,000017497	1425,65
0,000010386	1475,65
0,000006165	1525,65
0,000003659	1575,65
0,000002172	1625,65
0,000001289	1675,65
0,000000765	1725,65
0,000000454	1775,65
0,000000270	1825,65
0,000000160	1875,65
0,000000095	1925,65
0,000000056	1975,65
0,000000033	2025,65
0,000000020	2075,65
0,000000012	2125,65
0,000000007	2175,65
0,000000004	2225,65
0,000000002	2275,65
0,000000001	2325,65

F.P - Upper deck	
Qmax [kW]	697,70
Qmax[kW/m ²]	697,70
a [growth coef.]	0,0041
t incipient	563,51
t decay	563,51
F.P. distance	0,341
F	time
0,000202308	0
0,010317700	50
0,020433100	100
0,030548500	150
0,043507700	200
0,084530900	250
0,154643000	300
0,253843000	350
0,382132000	400
0,539509000	450
0,725975000	500
0,941529000	550
1,000000000	563,51
0,706275000	613,51
0,498824000	663,51
0,352306000	713,51
0,248825000	763,51
0,175739000	813,51
0,124120000	863,51
0,087662700	913,51
0,061913900	963,51
0,043728200	1013,51
0,030884100	1063,51
0,021812700	1113,51
0,015405700	1163,51
0,010880700	1213,51
0,007684750	1263,51
0,005427540	1313,51
0,003833330	1363,51
0,002707390	1413,51
0,001912160	1463,51
0,001350510	1513,51
0,000953830	1563,51
0,000673666	1613,51
0,000475793	1663,51
0,000336040	1713,51
0,000237337	1763,51
0,000167625	1813,51
0,000118389	1863,51
0,000083615	1913,51

F.P - Lower deck	
Qmax [kW]	1502,49
Qmax[kW/m ²]	1502,49
a [growth coef.]	0,0115
t incipient	549,68
t decay	549,68
F.P. distance	0,486
F	time
0,000098689	0
0,005033150	50
0,009967620	100
0,014902100	150
0,019555300	200
0,045359500	250
0,109596000	300
0,212264000	350
0,353364000	400
0,532896000	450
0,750860000	500
1,000000000	549,68
0,667394000	599,68
0,445414000	649,68
0,297267000	699,68
0,198394000	749,68
0,132407000	799,68
0,088367500	849,68
0,058975900	899,68
0,039360200	949,68
0,026268700	999,68
0,017531600	1049,68
0,011700500	1099,68
0,007808820	1149,68
0,005211560	1199,68
0,003478160	1249,68
0,002321300	1299,68
0,001549220	1349,68
0,001033940	1399,68
0,000690046	1449,68
0,000460533	1499,68
0,000307357	1549,68
0,000205128	1599,68
0,000136901	1649,68
0,000091367	1699,68
0,000060978	1749,68
0,000040696	1799,68
0,000027160	1849,68
0,000018127	1899,68
0,000012098	1949,68