ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΛΟΙΟΥ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελέτη της εξάπλωσης πυρκαγιάς σε Containership με χρήση αριθμητικού κώδικα προσομοιώσεων

Σανέτσης Ανδρέας

Nm13407

Επιβλέπων : Νικόλαος Θεμελής

Αθήνα, Δεκέμβριος 2022

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Θεμελή για την πολύτιμη βοήθεια και την καθοδήγηση που μου έδωσε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου που είναι πάντα δίπλα μου και με στηρίζει.

Περίληψη

Στην εν λόγω διπλωματική εργασία μελετάται η εξάπλωση της πυρκαγιάς σε πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων με τη χρήση αριθμητικού κώδικα προσομοιώσεων. Αρχικά, στο πρώτο κεφάλαιο του θεωρητικού μέρους παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των πυρκαγιών, εστιάζοντας ιδιαίτερα στον τρόπο με τον οποίο μεταδίδεται η θερμότητα και στους μηχανισμούς εκκίνησης και εξάπλωσης μιας πυρκαγιάς. Στη συνέχεια, αναφέρεται το ισχύον κανονιστικό πλαίσιο σχετικά με την πυρασφάλεια πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. Στο ίδιο κεφάλαιο, δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στα συστήματα πυρόσβεσης και πυρανίχνευσης. Επιπλέον, παρουσιάζονται μελέτες πρόσφατων ατυχημάτων και στατιστικών στοιχείων. Ακολουθεί η εκπόνηση της έρευνας, η οποία στηρίχτηκε σε αριθμητική προσομοίωση πυρκαγιάς μέσω του προγράμματος Pyrosim. Αναλυτικότερα, διερευνήθηκε η πιθανότητα εξάπλωσης πυρκαγιάς μεταξύ δύο εμπορευματοκιβωτίων διαστάσεων TEU στο κατάστρωμα καιρού ενός πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων θεωρώντας φυσικό εξαερισμό. Πιο συγκεκριμένα, διερευνήθηκε το ερώτημα εάν μια πυρκαγιά η οποία ξεκινά από την καύση λόγω αυτοθέρμανσης ενός επικίνδυνου υλικού εντός ενός εμπορευματοκιβωτίου δύναται να εξαπλωθεί μέσω της οροφής του σε ένα εμπορευματοκιβώτιο στοιβαγμένο αμέσως επάνω από αυτό εξετάζοντας παράλληλα διαφορετικές συνθήκες εξαερισμού στο εμπορευματοκιβώτιο. Η εξέταση του ερωτήματος υλοποιήθηκε μέσω υπολογιστικών προσομοιώσεων CFD στο πρόγραμμα Pyrosim θεωρώντας ως επικίνδυνο υλικό τον ξυλάνθρακα (charcoal). Με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων δεν κατέστη δυνατή η εξάπλωση της πυρκαγιάς στο αμέσως από πάνω εμπορευματοκιβώτιο διαμέσω της οροφής του κάτωθεν εμπορευματοκιβωτίου. Αντίθετα, η πυρκαγιά εξαπλώθηκε με την καύση του μονωτικού υλικού των πορτών του κάτω εμπορευματοκιβωτίου και εν συνεχεία την καύση του μονωτικού υλικού των πορτών του άνω εμπορευματοκιβωτίου και διαδοχικά την εξάπλωση της πυρκαγιάς στο εσωτερικό του. Τέλος, παρατίθενται τα συμπεράσματα της έρευνας και της μελέτης συνολικά, καθώς και προτάσεις για μελλοντική εξέλιξή της.

Abstract

In the present thesis, the spread of fire in a container ship cargo area is studied using a numerical simulation code. Initially, the first chapter of the theoretical part presents the characteristics of fires, focusing in particular on the way in which heat is transferred and on the mechanisms that cause and spread a fire. Next, the current regulatory framework regarding fire safety of container ships is mentioned. In the same chapter special emphasis is given on fire extinguishing and fire detection systems. In addition, recent accident reports and statistical data are presented. In the following chapter, the conducted experimental research, which was based on numerical fire simulation using the Pyrosim software is being presented. In more detail, the possibility of fire spread between two TEU containers on the weather deck of a container ship was investigated considering natural ventilation. More specifically, the hypothesis investigated was whether a fire which starts due to combustion because of the self-heating of a dangerous cargo inside a container can spread through its steel roof to a container stacked immediately above while examining different ventilation conditions of the containers. To test the hypothesis, CFD simulations were carried out using Pyrosim considering charcoal as the dangerous cargo. Based on the results of the simulations, it was not possible for the fire to spread to the immediately above container through the steel roof of the container below. Instead, the fire spread by burning the insulating material of the door gasket of the lower container and consequently by burning the door gasket of the upper container and successively spreading the fire inside it. Finally, the conclusions of the thesis are listed, as well as suggestions for potential future research.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Ευχαριστίες 1
Περίληψη 2
Abstract 3
1 Εισαγωγή 11
1.1 Άλλα άρθρα και μελέτες 11
1.2 Στόχοι μελέτης 18
1.3 Τύποι πλοίων που θα εξεταστούν 18
1.3.1 Κατηγορίες πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων 19
1.3.2 Σχεδιασμός εμπορευματοκιβωτίων για το θαλάσσιο εμπόριο. 22
2 Χαρακτηριστικά πυρκαγιών 27
2.1 Μετάδοση θερμότητας 27
2.2 Στάδια πυρκαγιάς 29
2.3 Ρυθμός Ανάπτυξης πυρκαγιάς 34
2.3 Πλήρως ανεπτυγμένη πυρκαγιά και ο παράγοντας εξαερισμού. 35
3 Κανονισμοί και απαιτήσεις 37
3.1 Πηγές 37
3.2 Ορισμοί 39
3.3 Κανονιστικό πλαίσιο συστημάτων ανίχνευσης και συναγερμού 39
3.3.1 Γενικές απαιτήσεις του κανονισμού SOLAS CHAPTER II-2/7. 39
3.3.2 Χειροκίνητα σημεία κλήσης και ανιχνευτές 41
3.3.2.1 Απαιτήσεις διάταξης εγκατεστημένων ανιχνευτών: 41
3.3.2.2 Τοποθέτηση ανιχνευτών. 42
3.3.2.3 Οπτικά και ακουστικά σήματα ανίχνευσης 42
3.4 Περιορισμός πυρκαγιάς 43
3.5 Συστήματα πυρόσβεσης 43
3.5.1 Συστήματα παροχής νερού 43
3.5.1.1 Πυροσβεστικά δίκτυα και κρουνοί 43
3.5.1.2 Διάμετρος αγωγού κύριου πυροσβεστικού δικτύου. 44
3.5.1.3 Αριθμός και θέση πυροσβεστικών κρουνών. 44
3.5.1.4 Πίεση στους κρουνούς 44
3.5.1.5 Σημεία χερσαίας σύνδεσης 45
3.5.1.6 Πυροσβεστικές αντλίες και συστήματα σωληνώσεων 45
3.5.2 Πυροσβεστικοί σωλήνες και ακροφύσια 47

3.5.3 Πρόσθετες απαιτήσεις (σύμφωνα με τις τροποποιήσεις στην σύμβαση SOLAS με την απόφαση MSC.365(93)). 47
3.5.4 Σταθερά συστήματα πυρόσβεσης 50
3.5.4.1 Είδη συστημάτων 50
3.5.4.2 Μη επιτρεπόμενες ουσίες προς χρήση για την πυρόσβεση. 50
3.5.4.3 Ανοίγματα στους προστατευόμενους χώρους 51
3.5.5 Διατάξεις πυρόσβεσης σε χώρους φορτίου 51
3.5.5.1 Σύστημα πυρόσβεσης σε χώρους φορτίου φορτηγών πλοίων 51
3.5.5.2 Σταθερά συστήματα κατάσβεσης διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) 51
3.5.5.3 Σταθερά συστήματα πυρόσβεσης αερίου για πλοία που μεταφέρουν επικίνδυνα εμπορεύματα 52
3.5.5.4 Απαιτήσεις για χώρους ξηρού φορτίου που προορίζονται για μεταφορά επικίνδυνων εμπορευμάτων 52
4 Μελέτη πρόσφατων ατυχημάτων και στατιστικών 56
4.1 Γενικά 56
4.2 Στατιστική ανάλυση ατυχημάτων 60
4.3 Ανάλυση ατυχημάτων λόγω πυρκαγιάς 66
4.3.1 Ατυχήματα και αιτίες 66
4.4 Η περίπτωση του YANTIAN EXPRESS 71
4.4.1 Γενικά 73
4.5 Η περίπτωση του MAERSK HONAM 77
4.5.1 Γενικά 80
4.5.2 Ευρήματα 82
4.6 Η περίπτωση του X-PRESS PEARL 84
4.6.1 Περίληψη των κυριότερων σημείων 84
4.6.2 Αιτία του ατυχήματος 85
4.6.3 Ιστορικό και Πεδίο Αποστολής 85
4.6.4 Πλαίσιο 86
4.6.5 Πρωτοφανής διαρροή πλαστικού 87
4.6.6 Χρονοδιάγραμμα του Συμβάντος 87
5 Αριθμητικές προσομοιώσεις πυρκαγιάς 89
5.1 Fire Dynamics Simulator (FDS) 89
5.2 PyroSim 90
5.3 Το μοντέλο 91
5.3.1 Εισαγωγή 91
5.3.2 Υπόθεση που εξετάστηκε 91

5.3.3 Γεωμετρία εμπορευματοκιβωτίου....92
5.3.4 Επιλογή πλέγματος....93
5.3.5 Ιδιότητες των υλικών και HRR....95
5.3.6 Χρόνος προσομοίωσης και συσκευές καταγραφής....99
5.3.7 Αποτελέσματα προσομοίωσης....101
5.3.8 Συμπεράσματα από τις αριθμητικές προσομοιώσεις....112
6 Συμπεράσματα και παρατηρήσεις....113
Βιβλιογραφία....116
Παραρτήματα....119
Παράρτημα Α – Ορισμοί....119
Παράρτημα Β – Λεπτομέρειες χρήσης προγράμματος Pyrosim....122
Παράρτημα Γ – Εξέταση της επίδρασης της διάταξης ανοιγμάτων εξαερισμού στην εξέλιξη της πυρκαγιάς....131

ΛΙΣΤΑ ΜΕ ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 1 Κύριες κατηγορίες πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. [27] 19
Πίνακας 2 Σύγκριση πλοίων αναφοράς. [18] 21
Πίνακας 3 Είδη, κύριες διαστάσεις και μέγιστο φορτίο τυπικών εμπορευματοκιβωτίων θαλάσσιων μεταφορών. [31] 24
Πίνακας 4 Επιδράσεις θερμικής ακτινοβολίας. [10] 28
Πίνακας 5 Παράγοντες που επηρεάζουν τον ρυθμό εξάπλωσης της πυρκαγιάς σε εύφλεκτα στερεά υλικά. [10] 30
Πίνακας 6 Συντελεστές ανάπτυξης πυρκαγιών που προσεγγίζουν παραβολική ανάπτυξη. [10] 35
Πίνακας 7 Αποστάσεις για τους ανιχνευτές. [FSS Ch. 9 §2.4.2.2 TABLE 9.1] 42
Πίνακας 8 Σύντομη περίληψη των φορτίων που προκάλεσαν μεγάλα περιστατικά πυρκαγιάς. [9] 67
Πίνακας 9 Περιστατικά πυρκαγιάς κατηγοριοποιημένα βάσει του φορτίου που προκάλεσε την πυρκαγιά. [9] 67
Πίνακας 10 Κατάλογος πλοίων που είχαν μεγάλες πυρκαγιές λόγω υποχλωριώδους ασβεστίου. [28] 69
Πίνακας 11 Βασικές πληροφορίες του πλοίου YANTIAN EXPRESS. [8] 72
Πίνακας 12 Λεπτομέρειες του ταξιδιού του πλοίου YANTIAN EXPRESS. [8] 72
Πίνακας 13 Λεπτομέρειες του περιστατικού του ατυχήματος στο YANTIAN EXPRESS. [8] 73
Πίνακας 14 Λεπτομέρειες και διαστάσεις του πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων MAERSK HONAM. [42] 78
Πίνακας 15 Συστήματα πυρόσβεσης και εξοπλισμός πυρασφάλειας του πλοίου MAERSK HONAM. [42] 79
Πίνακας 16 Συστήματα διάσωσης πλοίου MAERSK HONAM. [42] 79
Πίνακας 17 Κατάσταση του πλοίου MAERSK HONAM κατά την αναχώρηση από τη Σιγκαπούρη και κατά τη στιγμή του ατυχήματος. [42] 80
Πίνακας 18 Εξωτερικές διαστάσεις εμπορευματοκιβωτίου TEU που σχεδιάστηκε. 92
Πίνακας 19 Παράμετροι αντίδρασης καύσης. 98
Πίνακας 20 Ιδιότητες των υλικών της προσομοίωσης. 99

ΛΙΣΤΑ ΜΕ ΕΙΚΟΝΕΣ ΚΑΙ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

Εικόνα 1 Feeder vessel – General arrangement plan, side and top view. [18] 20
Εικόνα 2 4,400 TEU Post-Panamax container vessel, side view. [18].....20
Εικόνα 3 Γενική όψη ενός τυπικού πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. [16] 21
Εικόνα 4 Τυπική διάταξη κύτους φορτίου για ένα πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. [16].....22
Εικόνα 5 Δομή εμπορευματοκιβωτίου θαλάσσιων μεταφορών. [23].....23
Εικόνα 6 Standard ventilator opening and vent cover. [31] 25
Εικόνα 7 Technical drawing of a 20 ft standard container. [31].....25
Εικόνα 8 20 ft standard container interior view. [31].....26
Εικόνα 9 Τυπικό μοντέλο εξάπλωσης πυρκαγιάς. [31] 28
Εικόνα 10 Ανάπτυξη πυρκαγιάς σε ένα διαμέρισμα εκφρασμένη ως ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας (Heat Release Rate) συναρτήσει του χρόνου. [11] 31
Εικόνα 11 Εξάρτηση του ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας από τα χαρακτηριστικά του καυσίμου και τον εξαερισμό. [11] 32
Εικόνα 12 Παραβολική ανάπτυξη πυρκαγιάς με αρχή το τέλος της περιόδου επώασης και σύμφωνα με την εξίσωση 1 για τις διάφορες τιμές των συντελεστών ανάπτυξης πυρκαγιάς του πίνακα 6. [10] 34
Εικόνα 13 Αύξηση μεγέθους και χωρητικότητας πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων τα τελευταία 50 χρόνια. [6].....57
Εικόνα 14 Συχνότητα αποζημιώσεων λόγω πυρκαγιάς ή έκρηξης ανά τύπο και μέγεθος πλοίου κατά το χρονικό διάστημα 2010-2019. [37]. 60
Εικόνα 15 Πυρκαγιές σε πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων- Αριθμός περιστατικών ανά μέγεθος πλοίου και έτος ατυχήματος. [39] 61
Εικόνα 16 Συχνότητα εκδήλωσης πυρκαγιάς σε πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων συναρτήσει του μεγέθους και του έτους του ατυχήματος. [39].....62
Εικόνα 17 Συχνότητα εκδήλωσης πυρκαγιών σε χώρους φορτίου πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων μικτής χωρητικότητας (Gross tons) άνω των 50.000 τόνων [37].....63
Εικόνα 18 Συχνότητα εκδήλωσης πυρκαγιών σε πλοία εμπορευματοκιβωτίων ανά έτος των ατυχημάτων. Το γράφημα περιλαμβάνει όλων των ειδών πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (πλήρως κυψελοειδή πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων και συνδυασμένων μεταφορών 'combination carriers' όπως πλοία RoRo δυνατότητα μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων). [39] 63
Εικόνα 19 Συχνότητα πυρκαγιών/εκρήξεων ανά είδος πλοίου, ανά έτος και για αποζημιώσεις μεγαλύτερες των 500.000 δολαρίων (USD). Στο γράφημα αυτό στα πλοία 'Car/RoRo' περιλαμβάνονται πλοία RoRo με δυνατότητα μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων ενώ το 'Container' αναφέρεται σε πλήρως κυψελοειδή πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων 'fully cellular container vessels'. [39] 64
Εικόνα 20 Συχνότητα πυρκαγιών σε πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων ανά είδος πυρκαγιάς και ανά έτος. [39] 65
Εικόνα 21 Χρονική ιστορία ατυχημάτων λόγω πυρκαγιάς σε πλοία container χρονικής περιόδου 2000-2008. [26].....70
Εικόνα 22 Χρονική ιστορία ατυχημάτων λόγω πυρκαγιάς σε πλοία container χρονικής περιόδου 2009-2015. [26].....70
Εικόνα 23 Χρονική ιστορία ατυχημάτων λόγω πυρκαγιάς σε πλοία container χρονικής περιόδου 2016-2019. [26].....71

Εικόνα 24 Φωτογραφία του πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων YANTIAN EXPRESS. [8].....71
Εικόνα 25 Γεωγραφική θέση του σημείου του ατυχήματος. [8] 73
Εικόνα 26 Πυρκαγιά πάνω από το κύτος (Hold) 2 του πλοίου Yantian Express. [8] 74
Εικόνα 27 Καμένα εμπορευματοκιβώτια κατά την αποφόρτωση του πλοίου Yantian Express στο λιμάνι Freeport στις Μπαχάμες. [8].....75
Εικόνα 28 Πακεταρισμένοι κύβοι του υλικού pyrochar ευρισκόμενοι ανάμεσα στα συντρίμμια της πυρκαγιάς. [8].....75
Εικόνα 29 Φωτογραφία του εσωτερικού του ύποπτου για την πυρκαγιά εμπορευματοκιβωτίου. [8].....76
Εικόνα 30 Φωτογραφία του πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων MAERSK HONAM. [42].....77
Εικόνα 31 Maersk Honam upper deck plan indicating no.3 cargo hold consisting of bays 17-23.....80
Εικόνα 32 Φωτογραφία της πυρκαγιάς στο κύτος φορτίου (cargo hold) 3 του πλοίου MAERSK HONAM (1). [29] 81
Εικόνα 33 Φωτογραφία της πυρκαγιάς στο κύτος φορτίου (cargo hold) 3 του πλοίου MAERSK HONAM (2). [29] 81
Εικόνα 34 Θέση που ήταν τοποθετημένα σε μπλοκ (το ένα παρακείμενα του άλλου) τα εμπορευματοκιβώτια με το υλικό SDID. [42] 82
Εικόνα 35 Τοποθεσία της πυρκαγιάς σε σχέση με την υπερκατασκευή ενδιαιτήσεων του πλοίου MAERSK HONAM. [29].....84
Εικόνα 36 Φωτογραφία του βυθισμένου πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων X-Press Pearl. [32].....84
Εικόνα 37 Φωτογραφίες της ορατής πετρελαιοκηλίδας από το πλοίο X-PRESS PEARL. [12] 86
Εικόνα 38 Εμπρόσθια όψη των εμπορευματοκιβωτίων και των χαρακτηριστικών τους. 92
Εικόνα 39 Δομή της εξωτερικής κατασκευής του πατώματος του εμπορευματοκιβωτίου.....93
Εικόνα 40 Χαρακτηριστικά του υπολογιστικού πλέγματος. 94
Εικόνα 41 Συνολικός ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας κατά την διάρκεια της υπολογιστικής προσομοίωσης. [14].....95
Εικόνα 42 Καμπύλη προγεγραμμένου ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας (Heat Release Rate) συναρτήσει του χρόνου. 96
Εικόνα 43 Ιδιότητες επιφάνειας burner. 97
Εικόνα 44 Επιφάνεια vent (κόκκινο χρώμα) επί του πατώματος του κάτωθεν εμπορευματοκιβωτίου. 98
Εικόνα 45 Θερμοζεύγη καταγραφής θερμοκρασίας. 99
Εικόνα 46 Διδιάστατα επίπεδα καταγραφής θερμοκρασίας. 100
Εικόνα 47 Ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας στη χρονική διάρκεια της προσομοίωσης. 101
Εικόνα 48 Ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας (HRR) συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης και προγεγραμμένος ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας. 101
Εικόνα 49 Θερμοκρασιακή κατανομή σε δισδιάστατο επίπεδο στα 55 δευτερόλεπτα προσομοίωσης.....103
Εικόνα 50 Θερμοκρασιακή κατανομή σε δισδιάστατο επίπεδο στα 200 δευτερόλεπτα προσομοίωσης.....103
Εικόνα 51 Φλόγες στα ανοίγματα εξαερισμού του κάτω εμπορευματοκιβωτίου. 104

Εικόνα 52 Θερμοκρασιακή κατανομή σε δισδιάστατο επίπεδο στα 460 δευτερόλεπτα προσομοίωσης.....105
Εικόνα 53 Ύψος φλόγας και μονωτικό υλικό EPDM πριν την ικανοποίηση της συνθήκης 'burn away'. 106
Εικόνα 54 Αφαίρεση από το FDS κελιών που αναπαριστούν το μονωτικό υλικό EPDM λόγω ικανοποίησης συνθήκης 'burn away'. 106
Εικόνα 55 Μονωτικό υλικό EPDM του άνω εμπορευματοκιβωτίου πριν την καύση του. ...107
Εικόνα 56 Αφαίρεση κελιών του μονωτικού υλικού του άνω εμπορευματοκιβωτίου εξαιτίας της καύσης του μέσω της ικανοποίησης της συνθήκης 'burn away'. 107
Εικόνα 57 Θερμοκρασιακή κατανομή σε δισδιάστατο κάθετο επίπεδο στα 1800 δευτερόλεπτα προσομοίωσης. 108
Εικόνα 58 Θερμοκρασιακή κατανομή σε δισδιάστατο οριζόντιο επίπεδο στα 1800 δευτερόλεπτα προσομοίωσης. 109
Εικόνα 59 Θερμοκρασία συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης στο καθ' ύψος διάκενο μεταξύ των δύο εμπορευματοκιβωτίων. 110
Εικόνα 60 Καταγεγραμμένη θερμοκρασία οροφής εσωτερικά του κάτω εμπορευματοκιβωτίου σε ύψος z=2.3 m.....110
Εικόνα 61 Θέση των δύο ανιχνευτών επί του κόντρα πλακέ πατώματος του άνω εμπορευματοκιβωτίου.....111
Εικόνα 62 Καταγεγραμμένη θερμοκρασία συναρτήσει του χρόνου από τους δύο ανιχνευτές επί του κόντρα πλακέ πατώματος του άνω εμπορευματοκιβωτίου σε ύψος z=2.7 m. 111
Εικόνα 63 Γραφικό περιβάλλον του Pyrosim στην 3D προβολή. 122
Εικόνα 64 Χρησιμοποιώντας την λίστα λειτουργιών στην προβολή πλοήγησης. 123
Εικόνα 65 Δημιουργώντας ένα υπολογιστικό πλέγμα στο Pyrosim.....124
Εικόνα 66 Δημιουργία και επεξεργασία υλικών στο Pyrosim.....125
Εικόνα 67 Επιλογή επεξεργασίας επιφανειών στο PyroSim. 126
Εικόνα 68 Δεσμευμένες - προϋπάρχουσες επιφάνειες προς επιλογή στο PyroSim. 127
Εικόνα 69 Λίστα επιλογής με τις 8 επιφάνειες που ο χρήστης δύναται να δημιουργήσει στο Pyrosim. 127
Εικόνα 70 Καρτέλες προσδιορισμού ιδιοτήτων κατά τη δημιουργία νέας επιφάνειας στο Pyrosim. 128
Εικόνα 71 Ορισμός αντίδρασης καύσης στο PyroSim. 129
Εικόνα 72 Προσθήκη αντίδρασης καύσης από την βιβλιοθήκη του Pyrosim.....129
Εικόνα 73 Διάταξη ανοιγμάτων εξαερισμού στα δύο εμπορευματοκιβώτια (δεξιά πλευρά). 131
Εικόνα 74 Διάταξη ανοιγμάτων εξαερισμού στα δύο εμπορευματοκιβώτια (αριστερή πλευρά). 132
Εικόνα 75 Σύγκριση ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας των δύο πειραμάτων. 132
Εικόνα 76 Θερμοκρασιακή κατανομή σε δισδιάστατο επίπεδο σε απόσταση Y=1.2 m.....133
Εικόνα 77 Ικανοποίηση συνθήκης burn away για το μονωτικό υλικό EPDM και αφαίρεση από το πρόγραμμα τμήματος αυτού.....134

1 Εισαγωγή

Τις τελευταίες δεκαετίες το μέγεθος των πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων έχει αυξηθεί σε σημαντικό βαθμό καθώς οι ναυτιλιακές εταιρείες επιδιώκουν οικονομίες κλίμακας και ενεργειακή αποδοτικότητα στον τομέα της κατανάλωσης καυσίμων, μια τάση που είναι πιθανό να συνεχιστεί δεδομένων των συνεχώς αυξανόμενων περιβαλλοντικών πιέσεων. Οι πυρκαγιές σε χώρους φορτίου πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων ειδικά με τον όγκο του φορτίου που μεταφέρεται την σύγχρονη εποχή, μπορούν να αποτελέσουν σημαντικό κίνδυνο για την ασφάλεια του πληρώματος και του πλοίου. Ο αυξανόμενος κίνδυνος πυρκαγιών στα εν λόγω πλοία και ειδικότερα αυτών που εκδηλώνονται στα μεταφερόμενα εμπορευματοκιβώτια αποτελεί μια ιδιαίτερα ανησυχητική τάση. Σε αντίθεση με τις πυρκαγιές στο μηχανοστάσιο, αυτές που ξεκινούν από την περιοχή φορτίου ενός πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων έχει αποδειχθεί ότι είναι δύσκολο να εντοπιστούν και να κατασβηστούν. Η τοποθεσία της πυρκαγιάς ενδέχεται να είναι δύσκολο να προσεγγιστεί ενώ οι δυνατότητες και τα μέσα καταπολέμησης της πυρκαγιάς είναι περιορισμένα και συχνά ανεπαρκή για την αποτροπή της εξάπλωσης της πυρκαγιάς, θέτοντας με τον τρόπο αυτό το πλήρωμα όσο και το ίδιο το πλοίο σε σοβαρό κίνδυνο. Οι πυρκαγιές που ξεκινούν στους χώρους φορτίου των πλοίων αυτών μπορεί να είναι αποτέλεσμα ελλιπούς ή εσφαλμένης καταγραφής των επικίνδυνων μεταφερόμενων φορτίων. Εάν το μεταφερόμενο φορτίο δηλωθεί ως επικίνδυνο αγαθό, το κόστος μεταφοράς αυτού του εμπορευματοκιβωτίου αυξάνεται μειώνοντας έτσι τα κέρδη του ιδιοκτήτη του φορτίου. Για το λόγο αυτό, υπάρχει ο κίνδυνος να δοθεί στο φορτίο μια ελαφρώς διαφορετική δήλωση, ώστε να μην εμφανίζεται ή να εμφανίζεται ως κατηγορία επικίνδυνου εμπορεύματος. Σε περίπτωση εσφαλμένης καταγραφής , τα εν λόγω φορτία ή προϊόντα ενδέχεται να συσκευαστούν και να αποθηκευτούν με λανθασμένο τρόπο επί του πλοίου γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε ανάφλεξη και εκδήλωση πυρκαγιάς και να περιπλεχτεί ο εντοπισμός και η πυρόσβεση. Ένας άλλος καθοριστικός παράγοντας είναι οι δυνατότητες πυρανίχνευσης και πυρόσβεσης αναλογικά με το μέγεθος του πλοίου. Μεγάλα ατυχήματα έδειξαν ότι οι πυρκαγιές σε εμπορευματοκιβώτια μπορούν εύκολα να βγουν εκτός ελέγχου και να οδηγήσουν το πλήρωμα να εγκαταλείψει το σκάφος για λόγους ασφαλείας, αυξάνοντας έτσι το μέγεθος της απώλειας. Οι αρχές που αφορούν την πυρασφάλεια και τις διατάξεις ασφαλείας είναι ο κύριος στόχος αυτής της μελέτης.

1.1 Άλλα άρθρα και μελέτες

Ο αυξανόμενος κίνδυνος πυρκαγιάς σε πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων καθώς και η πληθώρα πυρκαγιών που έχουν καταγραφεί τα τελευταία χρόνια εντοπιζόμενες κατά κύριο λόγο στους χώρους φορτίου αποτελεί μια ανησυχητική τάση η οποία και έχει οδηγήσει στην δημοσίευση αρκετών μελετών και ερευνών. Οι μελέτες αυτές ποικίλουν, με την καθεμία από αυτές να εξετάζει διαφορετικές εστίες του προβλήματος. Μεταξύ άλλων οι αναφορές και μελέτες που έχουν δημοσιευθεί επικεντρώνονται σε θέματα όπως διερεύνηση των μηχανισμών εξάπλωσης μιας πυρκαγιάς στους χώρους φορτίου, πειράματα προσομοιώσεων πυρκαγιάς πλήρους κλίμακας σε εμπορευματοκιβώτια, αριθμητικές προσομοιώσεις πυρκαγιάς, στατιστικές καταγραφές ατυχημάτων και των βασικότερων αιτιών τους, διερεύνηση των πιο επικίνδυνων φορτίων κατά την μεταφορά και αποθήκευση αναφορικά με την εκδήλωση πυρκαγιάς σε χώρους φορτίου, εξεύρεση τρόπων και τεχνολογιών για τη

μείωση της συχνότητας εκδήλωσης , τον καλύτερο εντοπισμό και την κατάσβεση μιας πυρκαγιάς.

Εν συνεχεία αναλύονται μερικές από αυτές τις μελέτες συνοδευόμενες από συμπεράσματα και παρατηρήσεις που απορρέουν από αυτές.

Σε μελέτη [30] που δημοσιεύτηκε αναφερόμενη στο θέμα των πυρκαγιών σε πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων διερευνήθηκαν τα σημαντικότερα ατυχήματα πυρκαγιάς στους χώρους φορτίου αυτών των πλοίων τα τελευταία χρόνια σε συνδυασμό με το ισχύον κανονιστικό πλαίσιο που διέπει τις διαδικασίες αποθήκευσης και μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων καθώς και των διαδικασιών καταπολέμησης πυρκαγιών που προκύπτουν λόγω αυτών. Από την μελέτη προέκυψε ότι κάποια υλικά και συγκεκριμένα αυτά που αναφλέγονται αυθόρμητα λόγω του φαινομένου της αυτοθέρμανσης τους, έχουν εμπλακεί σε πολλά περιστατικά πυρκαγιάς σε χώρους φορτίου πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. Το κάρβουνο φαίνεται να είναι ένα από το κοινά υλικά που είναι υπεύθυνα για την εκδήλωση πυρκαγιών στους χώρους φορτίου των πλοίων αυτών. Στο πλαίσιο αυτό εξετάστηκαν οι φυσικοί μηχανισμοί εκδήλωσης πυρκαγιών εντός εμπορευματοκιβωτίων λόγω μεταφοράς κάρβουνου εντός αυτών αναλύοντας το φαινόμενο της αυτοθέρμανσης και της αυθόρμητης ανάφλεξης καθώς και των τρόπων εξάπλωσης μιας τέτοιας πυρκαγιάς. Αναλυτικότερα, πραγματοποιήθηκαν κατάλληλες αριθμητικές προσομοιώσεις πυρκαγιάς CFD (Computational Fluid Dynamics) χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα Pyrosim για την ανάλυση των χαρακτηριστικών της αναπτυσσόμενης πυρκαγιάς. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές προσομοιώσεις θεωρώντας ένα εμπορευματοκιβώτιο διαστάσεων FEU (Forty Foot Equivalent Unit) το οποίο περιείχε κάρβουνο και εξετάστηκαν ποικίλες συνθήκες εξαερισμού αυτού και εύρη πυρόλυσης.
Με βάση το θεωρητικό τμήμα της έρευνας προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Υπάρχει ένα κρίσιμο χρονικό διάστημα γνωστό και ως χρόνος επαγωγής (induction time) που απαιτείται ώστε να προκύψει σε ένα υλικό αυθόρμητη καύση. Αυτό αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα από την έναρξη της οξείδωσης του υλικού σε θερμοκρασία περιβάλλοντος μέχρι και τη χρονική στιγμή που αυτανάφλεξης.
- Μεγάλη ποσότητα άνθρακα χαμηλής υγρασίας απαιτείται να εκτεθεί σε κατάλληλες συνθήκες για αρκετές ημέρες ώστε να φτάσει σε θερμοκρασία αυτανάφλεξης.
- Προκειμένου να αποφευχθεί η ανάφλεξη του κάρβουνου κατά τη μεταφορά του με το πλοίο, ο συνολικός χρόνος αποθήκευσης και μεταφοράς πρέπει να είναι μικρότερος από τον χρόνο επαγωγής.
- Η κρίσιμη θερμοκρασία περιβάλλοντος στην οποία συμβαίνει αυτανάφλεξη του κάρβουνου εξαρτάται από τον όγκο του φορτίου μέσα από την έννοια του χαρακτηριστικού μήκους. Το χαρακτηριστικό μήκος αντιπροσωπεύει τον όγκο του φορτίου διαιρεμένο με την επιφάνειά του. Όσο πιο μεγάλο είναι το χαρακτηριστικό μήκος του όγκου του κάρβουνου που μεταφέρεται μέσα στο εμπορευματοκιβώτιο, τόσο χαμηλότερη είναι η κρίσιμη θερμοκρασία περιβάλλοντος στην οποία μπορεί να συμβεί αυθόρμητη ανάφλεξη.

Με βάση τις αριθμητικές προσομοιώσεις πυρκαγιάς που πραγματοποιήθηκαν προέκυψαν επίσης τα ακόλουθα σημαντικά συμπεράσματα:

- Η πυρκαγιά ξεκίνησε από το κέντρο εσωτερικά του εμπορευματοκιβωτίου και οι μέγιστοι ρυθμοί απελευθέρωσης θερμότητας HRR (Heat Release Rates) ανήλθαν στις τιμές των 15-25 MW για την περίπτωση ενός ανοίγματος εξαερισμού στο

εμπορευματοκιβώτιο και στα 35 MW για την περίπτωση των δύο ανοιγμάτων εξαερισμού στο εμπορευματοκιβώτιο.
- Για τα διάφορα εύρη πυρόλυσης που εξετάστηκαν, η πυρκαγιά αναπτύχθηκε σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Όσο πιο υψηλή ήταν η τιμή του εύρους πυρόλυσης τόσο πιο γρήγορα αναπτύχθηκε η πυρκαγιά.

Σε μελέτη [35] που δημοσιεύτηκε σχετικά με πυρκαγιές σε επιβατηγά οχηματαγωγά πλοία, πραγματοποιήθηκε μία ανάλυση των σημαντικότερων παραμέτρων που επιδρούν στην εξάπλωση μιας πυρκαγιάς στο κατάστρωμα ενός επιβατηγού οχηματαγωγού πλοίου RoPAX. Πιο συγκεκριμένα εξετάστηκε η επίδραση της απόστασης μεταξύ των οχημάτων καθώς και της ύπαρξης ανοιγμάτων εξαερισμού αναφορικά με την εξάπλωση της πυρκαγιάς. Επιπλέον, διερευνήθηκε η επίδραση της τοποθέτησης των οχημάτων πλησίον των ανοιγμάτων εξαερισμού του καταστρώματος καθώς επίσης και ο παράγοντας της ύπαρξης και της κατεύθυνσης του ανέμου στην εξάπλωση της πυρκαγιάς. Για τον σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές προσομοιώσεις πυρκαγιάς CFD στο πρόγραμμα Pyrosim ,όπου μοντελοποιήθηκε το κατάστρωμα ενός επιβατηγού οχηματαγωγού πλοίου καθώς και ένας αριθμός φορτηγών οχημάτων επί αυτού. Η παρακολούθηση της εξάπλωσης της πυρκαγιάς για τα διάφορα σενάρια που θεωρήθηκαν πραγματοποιήθηκε με τον υπολογισμό του ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας συναρτήσει του χρόνου , των θερμοκρασιών σε διάφορα επιλεγμένα ύψη του χώρου του καταστρώματος και τέλος του φορτίου της πυρκαγιάς. Με βάση τις αριθμητικές αυτές προσομοιώσεις προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η ύπαρξη ανοιγμάτων εξαερισμού και η τοποθέτηση των φορτηγών του καταστρώματος κοντά σε αυτά δύναται να αποτρέψει την ανάπτυξη και την εξάπλωση της πυρκαγιάς. Στην περίπτωση που το κατάστρωμα δεν είναι πλήρως φορτωμένο με φορτηγά το συμπέρασμα αυτό μπορεί να αποτελέσει αρωγό στην κατάλληλη τοποθέτηση των οχημάτων αυτών με σκοπό τον περιορισμό της ανάπτυξης μιας ενδεχόμενης πυρκαγιάς.
- Μέσω της αύξησης της απόστασης μεταξύ των φορτηγών μπορεί να αποφευχθεί η ανάφλεξη παρακείμενων φορτηγών και να αποφευχθεί η εξάπλωση της πυρκαγιάς από το φορτηγό που αυτή ξεκίνησε.
- Οι χώροι με ανοίγματα εξαερισμού έχουν μεγαλύτερη επικινδυνότητα αναφορικά με την τελική κατάληξη της πυρκαγιάς συγκριτικά με τους χώρους χωρίς ανοίγματα εξαερισμού.
- Ο άνεμος και η κατεύθυνση του σε συνδυασμό με τον προσανατολισμό των ανοιγμάτων εξαερισμού του καταστρώματος μπορούν να οδηγήσουν στο να καταστεί μια πυρκαγιά ανεξέλεγκτη.

Το Danish Institute of Fire and Security Technology πραγματοποίησε μια έρευνα [14] με σκοπό τη διερεύνηση των μηχανισμών εξάπλωσης μιας πυρκαγιάς μεταξύ των εμπορευματοκιβωτίων στο χώρο φορτίου ενός πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης έρευνας αναπτύχθηκαν έξι υποθέσεις βασιζόμενες στα περιστατικά που έχουν καταγραφεί, σε σχετική βιβλιογραφία και εκτενείς συζητήσεις με άλλους ερευνητές. Ο έλεγχος της εγκυρότητας αυτών των υποθέσεων πραγματοποιήθηκε με την ανάπτυξη ενός πειραματικού προγράμματος. Στην παρούσα έρευνα εξετάζεται η πρώτη εκ των υποθέσεων που αφορά στην κατακόρυφη εξάπλωση της πυρκαγιάς με την ανάφλεξη του ξύλινου κόντρα πλακέ δαπέδου του εμπορευματοκιβωτίου που βρίσκεται άνωθεν του εμπορευματοκιβωτίου στο οποίο έχει εκδηλωθεί πυρκαγιά.

Με βάση τα αποτελέσματα του πειραματικού προγράμματος αποδείχθηκε ότι:

- Η υπόθεση η οποία εξετάστηκε είναι απολύτως εύλογη και πιθανή.
- Η εξάπλωση της πυρκαγιάς είναι πιθανή λόγω της υψηλής θερμοκρασίας του άνω μέρους του εμπορευματοκιβωτίου στο αμέσως από πάνω εμπορευματοκιβώτιο ακόμη και χωρίς την ύπαρξη κάποιας άμεσης πηγής ανάφλεξης. Δεδομένης της τιμής της κρίσιμης ροής θερμότητας που μετρήθηκε μπορεί να υπάρξει ανάφλεξη στην περίπτωση αυτή ακόμη και σε χαμηλές θερμοκρασίες των 500^{o} C στην χαλύβδινη οροφή του εμπορευματοκιβωτίου.
- Η ανάφλεξη δύναται να συμβεί και σε χαμηλότερες θερμοκρασίες καθώς παρατηρήθηκε κατά το πείραμα ότι προέκυψε ανάφλεξη σε θερμοκρασίες των 350-400 ^{o} C.

Στην ίδια μελέτη υπογραμμίζεται επίσης ότι μία από τις κύριες αιτίες εκδήλωσης πυρκαγιάς σε φορτηγά πλοία αποτελεί η αυτοθέρμανση κάποιων υλικών (self-heating). Όπως αναφέρει το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται όταν συμβαίνει μία εξώθερμη χημική αντίδραση σε ένα φορτίο. Ο μόνος τρόπος διαφυγής της παραγόμενης θερμότητας είναι στα παρακείμενα αντικείμενα του περιβάλλοντος του. Σε έναν περιορισμένο κλειστό χώρο αυτό οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας και ενδεχόμενη εκδήλωση πυρκαγιάς.

Σε μελέτη που εκπονήθηκε σχετικά με τη διερεύνηση πυρκαγιών εντός εμπορευματοκιβωτίων [28], πραγματοποιήθηκε μια σειρά πειραμάτων πυρκαγιάς πλήρους κλίμακας σε δύο φορτωμένα θαλάσσια εμπορευματοκιβώτια διαστάσεων 20ft προκειμένου να γίνει εκτίμηση των κινδύνων λόγω πυρκαγιάς για τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, να αξιολογηθεί η συμπεριφορά της εκτεθειμένης χαλύβδινης κατασκευής σε πυρκαγιά και να εξαχθούν δεδομένα για την επικύρωση αριθμητικών μεθόδων προσομοιώσεων. Οι συνθήκες των δοκιμών κυμάνθηκαν από μια πυρκαγιά σε ένα κλειστό εμπορευματοκιβώτιο με πολύ μικρή παροχή αέρα έως και πυρκαγιές πέραν του σημείου flashover με ισχυρές φλόγες και υψηλές θερμοκρασίες. Αναλυτικότερα πραγματοποιήθηκαν πειράματα για τις ακόλουθες περιπτώσεις:

- Πυρκαγιά σε εμπορευματοκιβώτιο με άθικτο πάτωμα.
- Πυρκαγιά σε εμπορευματοκιβώτιο με ένα μικρό άνοιγμα.
- Πυρκαγιά σε εμπορευματοκιβώτιο με μεγάλο άνοιγμα.
- Πυρκαγιά σε εμπορευματοκιβώτιο χωρίς πάτωμα.

Στην μελέτη διερευνήθηκε η επίδραση της δομικής ακεραιότητας του εμπορευματοκιβωτίου στην ανάπτυξη της πυρκαγιάς και η συμπεριφορά της κατασκευής σε πυρκαγιά με σκοπό την αξιολόγηση της πιθανότητας διάδοσης της πυρκαγιάς σε παρακείμενα εμπορευματοκιβώτια. Παρακάτω παρατίθενται τα συμπεράσματα της μελέτης:

- Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι σε κανένα από τα πειράματα δεν προέκυψε καταστροφή ή κάποιου είδους ζημιά στα εμπορευματοκιβώτια η οποία να δύναται να θέσει σε κίνδυνο την ακεραιότητα του εμπορευματοκιβωτίου ή την ασφάλεια της στοιβασίας.

Σε άρθρο που δημοσιεύτηκε σχετικά με ατυχήματα λόγω πυρκαγιάς που έλαβαν χώρα σε πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων [9], εντοπίσθηκαν συνολικά και επιβεβαιώθηκαν 39 ατυχήματα λόγω πυρκαγιάς κατά την χρονική περίοδο 1996 έως και το 2017. Από την

εμπεριστατωμένη ανάλυση των βασικότερων κινδύνων αναδείχθηκαν τέσσερα είδη επικίνδυνων φορτίων που επέφεραν τις δυσμενέστερες συνέπειες τα οποία είναι:

1. Υποχλωριώδες ασβέστιο (calcium hypochlorite)
2. Προϊόντα μπρικέτας συμπιεσμένου άνθρακα (compressed charcoal briquette products)
3. Επαναφορτιζόμενες μπαταρίες (rechargeable batteries)
4. Διβινυλοβενζόλιο (divinylbenzene)

Επιπλέον πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις αιτιών-συνεπειών (cause-consequences analyses) των ατυχημάτων πυρκαγιάς με του τέσσερις αυτούς τύπους φορτίων που ανέδειξαν όλα τα πιθανά σενάρια κλιμάκωσης των ατυχημάτων ξεκινώντας από μια αιτία και καταλήγοντας σε μια συνέπεια. Εκτιμήθηκε επίσης η συχνότητα εμφάνισης μεγάλων πυρκαγιών. Περαιτέρω διερευνήθηκαν ποικίλες διαφορετικές λύσεις για τη μείωση του χρόνου ανίχνευσης της πυρκαγιάς και υποστηρίχθηκαν μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων πυρκαγιάς.

Στο πλαίσιο της μελέτης αυτής εξήχθησαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η μεταφορά σε εμπορευματοκιβώτια υποχλωριώδους ασβεστίου και προϊόντων μπρικέτας συμπιεσμένου άνθρακα αναγνωρίστηκαν ως οι κυριότεροι κίνδυνοι.
- Τα δύο αυτά προϊόντα αποτέλεσαν την αιτία σχεδόν του 50% όλων των ατυχημάτων λόγω πυρκαγιάς που ερευνήθηκαν.
- Η μεταφορά σε εμπορευματοκιβώτια και η αποθήκευση επαναφορτιζόμενων μπαταριών και διβινυλοβενζολίου αποτελούν επίσης κινδύνους που μπορούν να επιφέρουν δυσμενείς συνέπειες, συμπέρασμα που απορρέει από τη σοβαρότητα των ατυχημάτων πυρκαγιάς και την εκτεταμένη ζημιά που προκάλεσαν οι δύο τύποι αυτοί φορτίου τόσο στα πλοία όσο και στο πλήρωμά τους.
- Η συνολική συχνότητα εμφάνισης μεγάλων πυρκαγιών σε πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων την περίοδο 2011-2016 υπολογίστηκε $6{,}86 \cdot 10^4$ ανά έτος πλοίου (ship year) , με πιθανότητα 90% η πραγματική συχνότητα να είναι εντός του διαστήματος $4{,}56 \cdot 10^4$ και $9{,}94 \cdot 10^4$.
- Από την μελέτη στο πλαίσιο διερεύνησης τεχνολογιών μείωσης του χρόνου ανίχνευσης πυρκαγιάς, δύο λύσεις θεωρήθηκαν άξιες περαιτέρω διερεύνησης:

    1. Τοποθέτηση αισθητήρων θερμοκρασίας μέσα ή πάνω σε όλα τα εμπορευματοκιβώτια
    2. Εγκατάσταση οπτικού ανιχνευτή καπνού μέσα σε όλα τα εμπορευματοκιβώτια.

    Για την παροχή μιας βάσης για την αξιολόγηση αυτών των λύσεων, πραγματοποιήθηκε μια μελέτης προσομοίωσης πυρκαγιάς η οποία διεξήχθη μέσω του λογισμικού Fire Dynamics Simulator (FDS) από όπου προέκυψαν τα ακόλουθα :

    - Ο αισθητήρας θερμοκρασίας που τοποθετήθηκε μέσα στο εμπορευματοκιβώτιο ήταν σε θέση να ανιχνεύσει μια αύξηση θερμοκρασίας περίπου 27 δευτερόλεπτα μετά την εκδήλωση της πυρκαγιάς . Το γεγονός αυτό συνιστά βελτίωση του χρόνου ανίχνευσης κατά 50% συγκριτικά με το σύστημα ανίχνευσης μέσω εξαγωγής δείγματος καπνού (Sample Extraction Smoke Detection System – SESD) , καθότι το διάστημα ανίχνευσης από τέτοια συστήματα ανίχνευσης κυμαίνεται στα 60 έως 74 δευτερόλεπτα.

- Η τοποθέτηση οπτικού ανιχνευτή καπνού εντός του εμπορευματοκιβωτίου έχει ως αποτέλεσμα την ανίχνευση καπνού εντός 30 δευτερολέπτων.
- Διαπιστώθηκε πως οι δύο λύσεις είναι βιώσιμες από πρακτική άποψη και εμπειρία και η εφαρμογή τους δείχνει σημαντική μείωση του χρόνου ανίχνευσης της πυρκαγιάς στο χώρο φορτίου.

Σε μελέτη σχετικά με την πυρασφάλεια σε χώρους φορτίου πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων [31], κύριοι στόχοι ήταν η πρόβλεψη της απόδοσης για καινοτόμους σχεδιασμούς χώρων φορτίου αναφορικά με περιπτώσεις πυρκαγιάς και εκρήξεων στους χώρους αυτούς και η ανάπτυξη διαδικασιών σχεδιασμού ή/και εργαλείων για αυτή την πρόβλεψη. Καταρχάς η μελέτη συνέλλεξε δεδομένα και πληροφορίες για μια ποιοτική ανάλυση στην οποία συμπεριλαμβάνονται και στατιστικά ατυχημάτων για την εκτίμηση της πιθανότητας και των πιο κοινών αιτιών εκδήλωσης πυρκαγιάς και εκρήξεων σε χώρους φορτίου πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων , καθώς και του εξοπλισμού κατάσβεσης και των μέτρων πυρόσβεσης. Μετά την συλλογή όλων των απαραίτητων δεδομένων για μια ποιοτική ανάλυση πραγματοποιήθηκε μια έρευνα αναγνώρισης των κινδύνων που οδηγούν σε πυρκαγιές και εκρήξεις στους χώρους φορτίου πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων αναφερόμενη και ως HAZID (Hazard Identification). Η έρευνα HAZID χωρίστηκε σε τρία μέρη που αφορούσαν :

1. Κλειστούς χώρους φορτίου σε κύτη με στόμια κυτών.
2. Χώρους φορτίου επί του καταστρώματος.
3. Χώρους φορτίου σε κύτη με ανοιχτό άνω μέρος.

Η παραπάνω έρευνα στους χώρους φορτίου οδήγησε στην εξαγωγή των ακόλουθων συμπερασμάτων:

- Συγκρίνοντας τις τρεις διαφορετικές περιοχές φορτίου που αναλύθηκαν και διερευνήθηκαν, προκύπτει ότι σε όλες τις περιπτώσεις η ανάφλεξη μέσα σε ένα εμπορευματοκιβώτιο και η εξάπλωση της πυρκαγιάς μέσα στο χώρο του φορτίου είναι οι πιο σημαντικοί κίνδυνοι.
- Εξαιτίας της απουσίας μέσων ανίχνευσης φωτιάς ή καπνού μέσα στα εμπορευματοκιβώτια, η ανάφλεξη εντός αυτών είναι δύσκολο να ανιχνευθεί με αποτέλεσμα να μην λαμβάνονται ή να ενεργοποιούνται μέτρα πυρόσβεσης.
- Η καταστολή της εξάπλωσης της πυρκαγιάς εντός ενός χώρου φορτίου καθίσταται δύσκολη εάν η πυρκαγιά σε ένα εμπορευματοκιβώτιο έχει αναπτυχθεί πλήρως.
- Ο χώρος φορτίου επί του καταστρώματος είναι ιδιαίτερα ευάλωτος όσον αφορά την εξάπλωση της πυρκαγιάς λόγω της απεριόριστης παροχής αέρα και της έλλειψης δομικών μέτρων περιορισμού της πυρκαγιάς.

Στην μελέτη αυτή πραγματοποιήθηκε επίσης ένας προσδιορισμός κινδύνων με μια διαδικασία αναφερόμενη ως FMEA (Failure Modes and Effects Analyses), η οποία χρησιμοποιεί αριθμούς απόδοσης ρίσκου (risk priority numbers). Στόχος της διαδικασίας ήταν να εντοπιστούν γεγονότα και περιστάσεις που οδηγούν σε ορισμένους κινδύνους για το πλοίο και το μεταφερόμενο φορτίο. Η διαδικασία FMEA είναι μια μέθοδος για τον εντοπισμό πιθανών προβλημάτων αξιοπιστίας ή ασφάλειας σε πρωτογενές στάδιο ανάπτυξης. Η FMEA χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό πιθανών τρόπων αστοχίας , τον προσδιορισμό της επίδρασής τους στη λειτουργία του προϊόντος και την ασφάλεια και τέλος την εύρεση τρόπων για τον περιορισμό των συνεπειών σε περίπτωση αστοχίας.

Στη μελέτη αυτή επιλέχθηκε μια προσέγγιση FMEA με αριθμούς απόδοσης διακινδύνευσης. Ως εκ τούτου η σοβαρότητα κάθε επίδρασης λόγω αστοχίας, η πιθανότητα εμφάνισης για κάθε αιτία αστοχίας και η πιθανότητα ανίχνευσης εκτιμάται από την ομάδα ανάλυσης. Το μαθηματικό γινόμενο αυτών των μεγεθών οδηγεί σε ένα αριθμό απόδοσης ρίσκου (risk priority number) που υποδεικνύει πιθανές περιοχές εστίασης κατά την προσπάθεια μείωσης των κινδύνων. Η μελέτη επικεντρώθηκε γενικά σε τρεις περιοχές με διαφορετικές συνθήκες στοιβασίας του φορτίου. Αυτές είναι:

1. Εμπορευματοκιβώτια σε κλειστούς χώρους φορτίου με καλύμματα (hatch covers) κυτών.
2. Εμπορευματοκιβώτια επί του καταστρώματος.
3. Εμπορευματοκιβώτια σε κύτος φορτίου με ανοίγματα στο άνω μέρος.

Ακολούθως παρατίθεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων για τις τρεις αυτές περιοχής εστίασης στο πλοίο:

- Και για τις τρεις περιπτώσεις η ανάφλεξη εντός του εμπορευματοκιβωτίου καθώς και η εξάπλωση της πυρκαγιάς επισημαίνονται με τους υψηλότερους αριθμούς απόδοσης διακινδύνευσης RPN (Risk Priority Numbers). Ο χώρος φορτίου επί του καταστρώματος είναι ιδιαίτερα ευάλωτος αναφορικά με την εξάπλωση της πυρκαγιάς λόγω της απεριόριστης παροχής αέρα και της απουσίας μηχανισμών και μέτρων περιορισμού πυρκαγιάς.

Αποτελέσματα δίχως να λαμβάνεται υπόψιν ο παράγοντας της ανίχνευσης:

- Οι κύριοι τρόποι αστοχίας και στις τρεις περιπτώσεις χωρίς να ληφθεί υπόψιν η ανίχνευση βρίσκονται στην ανάπτυξη της πυρκαγιάς (fire growth) και στην καταπολέμηση της πυρκαγιάς (fire fighting) . Σε σύγκριση με τα αποτελέσματα που προκύπτουν λαμβάνοντας τον παράγοντα της ανίχνευσης , η ανάφλεξη μέσα σε ένα εμπορευματοκιβώτιο δεν αναγνωρίζεται ως κύριος κίνδυνος. Η αιτία για αυτή τη διαφορά είναι κατά κύριο λόγο η επίδραση που δημιουργεί η απουσία μέσων ανίχνευσης πυρκαγιάς μέσα στο εμπορευματοκιβώτιο.

Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα λαμβάνοντας ή μη την ανίχνευση υπόψιν καταδεικνύουν ότι οι κυριότεροι κίνδυνοι για ένα πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων είναι :

1. Η ανάφλεξη μέσα σε ένα εμπορευματοκιβώτιο.
2. Η ανάπτυξη της πυρκαγιάς συμπεριλαμβανομένης της αποτυχίας των μέτρων παθητικής και ενεργητικής πυρασφάλειας.

1.2 Στόχοι μελέτης

Οι πυρκαγιές σε χώρους φορτίου πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων αποτελούν ένα πολύ συνηθισμένο φαινόμενο από τις αρχές τις δεκαετίας του 1990. Αποτελούν περιπτώσεις ατυχημάτων με δυσμενείς συνέπειες και μπορούν να στοιχίσουν μέχρι και ανθρώπινες ζωές. Συνεπώς κρίνεται επιτακτική η μελέτη του προβλήματος των πυρκαγιών σε χώρους φορτίου πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων με σκοπό την αντιμετώπιση του. Στην παρούσα εργασία αντικείμενο αποτελεί η διερεύνηση των αιτιών εκδήλωσης εξετάζοντας περιπτώσεις σχετικών ατυχημάτων, η παρουσίαση του πλαισίου των κανονισμών που διέπουν το θέμα της πυρασφάλειας στα πλοία αυτά, των σημαντικότερων αλλαγών που έχουν επέλθει σε αυτούς τα τελευταία χρόνια και η ανασκόπηση στατιστικών στοιχείων που αφορούν πρόσφατα ατυχήματα.

Με σκοπό την ανάλυση των παραμέτρων που οδηγούν στην έναρξη και εξάπλωση της πυρκαγιάς, θα υλοποιηθούν υπολογιστικές προσομοιώσεις CFD με τη χρήση του προγράμματος Pyrosim που έχει ως βάση το λογισμικό FDS.

Μέσω της διεξαγωγής αυτών των προσομοιώσεων διερευνάται πως η προσομοίωση πυρκαγιάς μπορεί να δώσει πληροφορίες σχετικά με την εξάπλωση του καπνού και της πυρκαγιάς στο χώρο φορτίου ενός πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. Πιο συγκεκριμένα, η μελέτη αυτή εξετάζει εάν μια πυρκαγιά που ξεκινάει από την καύση ενός επικίνδυνου υλικού μπορεί να εξαπλωθεί σε ένα εμπορευματοκιβώτιο στοιβαγμένο αμέσως επάνω από αυτό. Τέλος, στην ίδια υπόθεση εξετάζεται η επίδραση του αριθμού των ανοιγμάτων εξαερισμού του εμπορευματοκιβωτίου στην ανάπτυξη και διάδοσης της πυρκαγιάς.

1.3 Τύποι πλοίων που θα εξεταστούν

Η παρούσα μελέτη αναφέρεται σε πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, όπου ως πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων ορίζεται ένα πλοίο ειδικά σχεδιασμένο, κατασκευασμένο και εξοπλισμένο με τις κατάλληλες εγκαταστάσεις για τη μεταφορά εμπορευματοκιβωτίων φορτίου (cargo containers). Τα εμπορευματοκιβώτια αυτά στοιβάζονται σε χώρους φορτίου κάτω ή και πάνω στο κατάστρωμα [2]. Ένα πλήρως κυψελοειδές (fully cellular) πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων μεταφέρει μόνο εμπορευματοκιβώτια. Διαθέτει οδηγούς κυψελών (cell guides) κάτω από το κατάστρωμα και τα απαραίτητα εξαρτήματα και εξοπλισμό στο κατάστρωμα. Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται πλοία στα οποία μπορούν να τοποθετηθούν εμπορευματοκιβώτια με ψύξη αποκαλούμενα και ως ‘reefer’ σε ειδικές θέσεις με δυνατότητα ηλεκτρικής σύνδεσης, γνωστές ως ‘reefer plugs’ . Οι θέσεις αυτές μπορεί να βρίσκονται στο κατάστρωμα η στο κύτος φορτίου (hold) , ωστόσο στην εξωτερική σειρά στοιβασίας δεν τοποθετούνται reefer εμπορευματοκιβώτια. [2],[18]

Η χωρητικότητα ενός πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων συνήθως δηλώνεται μέσω του μέγιστου αριθμού εμπορευματοκιβωτίων μεγέθους TEU τα οποία μπορούν να στοιβαχθούν επί αυτού. Ο όρος TEU μεταφράζεται ως ‘twenty-foot equivalent unit’ και πρόκειται για το τυπικό μέγεθος εμπορευματοκιβωτίου όπως αυτό ορίζεται από τον διεθνή οργανισμό προτύπων ISO (International Standards Organization). Το μήκος των 20 ποδιών

αντιστοιχεί σε περίπου 6 μέτρα και το πλάτος και ύψος του είναι περίπου 2.44 μέτρα. Οι διαστάσεις του πλοίου, ειδικά το πλάτος, εξαρτώνται επομένως από τον αριθμό των εμπορευματοκιβωτίων που τοποθετούνται στο κατάστρωμα και στα αμπάρια. Έτσι η τοποθέτηση ενός επιπλέον εμπορευματοκιβώτιου κατά το πλάτος δεδομένου ενός συγκεκριμένου σχεδιασμού συνεπάγεται αύξηση στο πλάτος του πλοίου κατά περίπου 2.5 μέτρα. [27]

1.3.1 Κατηγορίες πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων

Ανάλογα με την χωρητικότητα σε TEU και τις διαστάσεις, τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων μπορούν να χωριστούν στις κατηγορίες που αναγράφονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 1 Κύριες κατηγορίες πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. [27]

Typical main classes of container carriers with approximate measurements				
Class	TEU	Typical LOA [m]	Typical max. breadth [m]	Typical scantling draught[m]
Small	<1000	>150	>22	8
Feeder	1000-2800	150-210	22-32,2	8-12
Old-panamax	2800-5100	294,1 (965 ft)	32,2 (106 ft)	12,04 (39.5 ft)
Post-panamax	5500-10000	280-340	40-48	14-15
New-panamax	12000-14500	366	51	15,2
ULCV	>14500	400	61,5	16

Ακολούθως παρουσιάζονται εν συντομία δύο χαρακτηριστικά σχέδια για δύο είδη πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων:

1. Για ένα πλοίο ‘feeder’
2. Για ένα πλοίο δρομολογίου ανοιχτής θαλάσσης (ocean-going vessel).

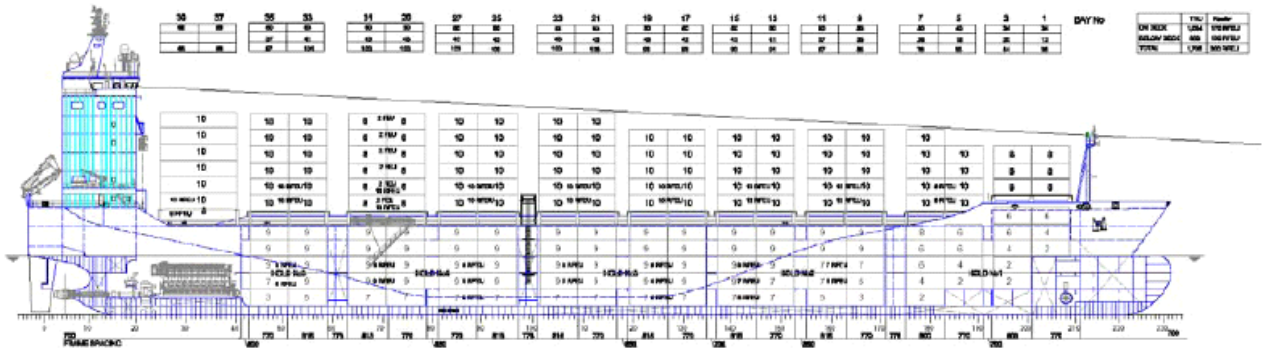
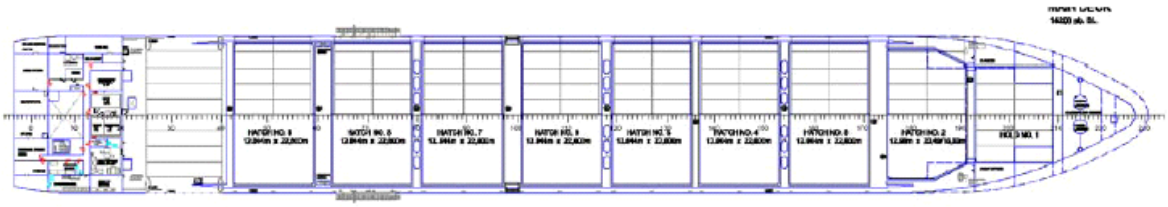
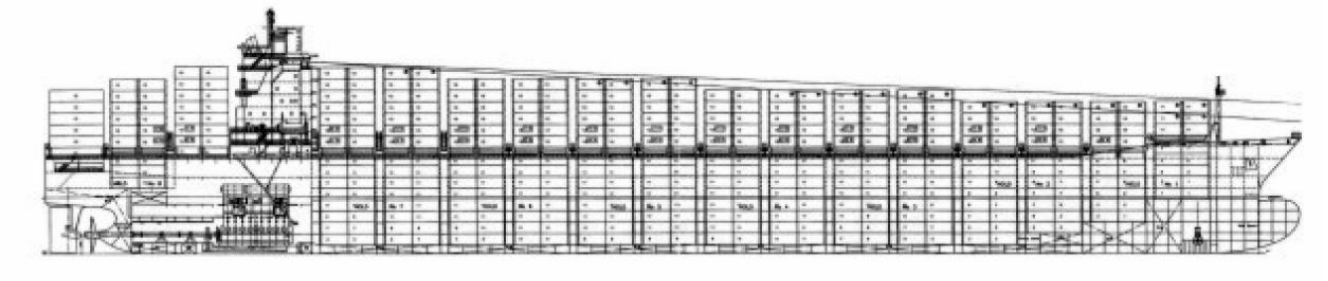


Figure 12: General arrangement plan, side view



Εικόνα 1 Feeder vessel – General arrangement plan, side and top view. [18]



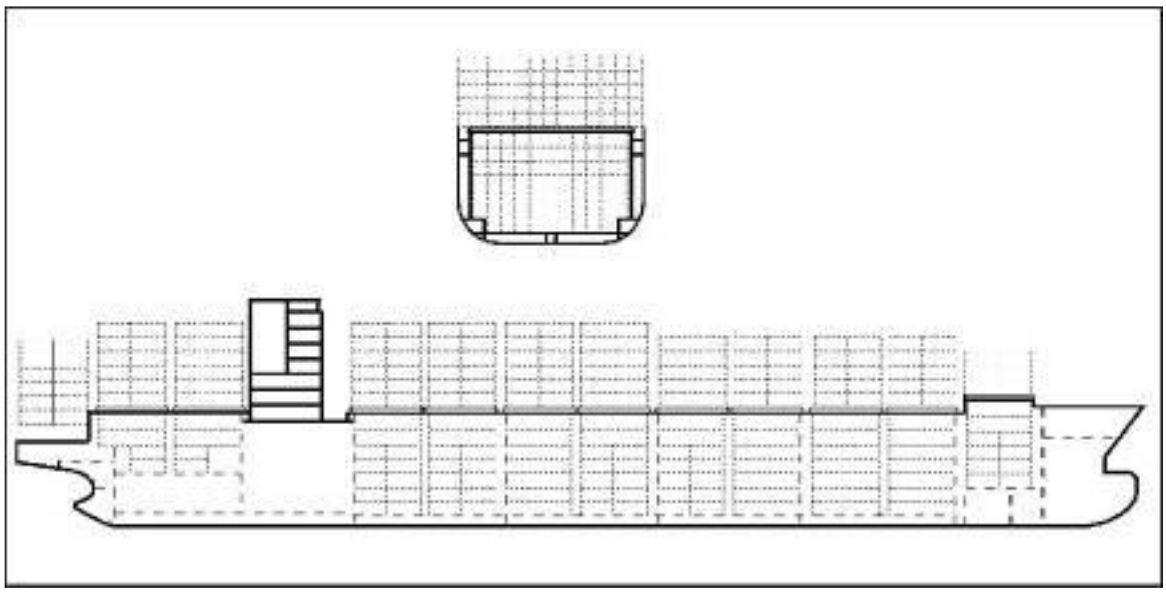
Εικόνα 2 4,400 TEU Post-Panamax container vessel, side view. [18]

Ακολούθως στον πίνακα 2 γίνεται μια συγκριτική ανάλυση δύο τέτοιων πλοίων αναφοράς.

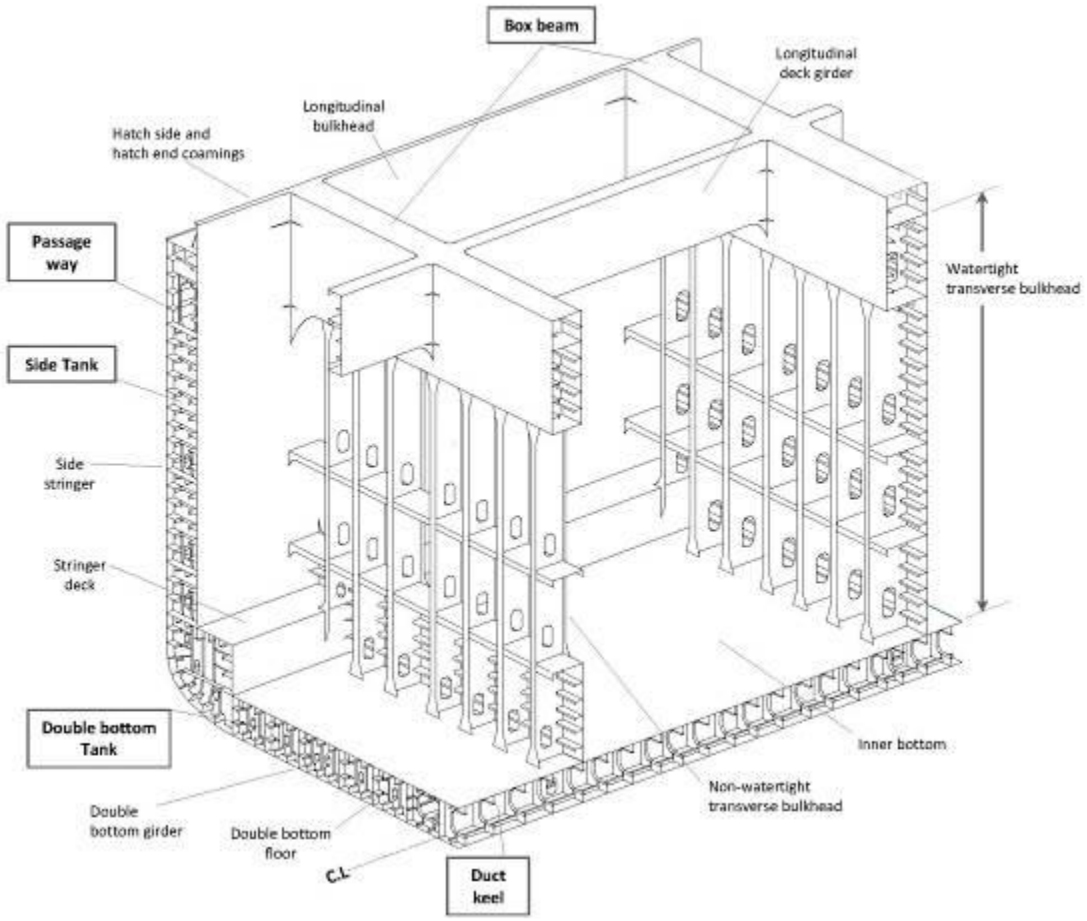
Πίνακας 2 Σύγκριση πλοίων αναφοράς. [18]

Comparison reference vessels of generic container ship		
	Vessel 1	Vessel 2
Operating Profile	Feeder	Liner
Capacity (TEU)	1,706	4,444
- in hold	652	2,051
-on deck	1,054	2,393
-at 14 t homog. load	1,250	3,1
Length (m)	173	271
Deadweight (t)	21,750	58,255
Speed (kn)	20,2	25,5
Crew	20	20
Market price 2005, /35/	$36,000,000	$67,000,000

Εν συνεχεία στα δύο παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται η γενικότερη δομή ενός τυπικού πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, το οποίο διαθέτει ένα μόνο κατάστρωμα, διπλά πλευρικά τοιχώματα, περάσματα και διπλό πυθμένα στον χώρο φορτίου και το οποίο προορίζεται αποκλειστικά για την μεταφορά φορτίου σε εμπορευματοκιβώτια τα οποία βρίσκονται στα κύτη φορτίου, στο κατάστρωμα και επί των καλυμμάτων των κυτών. [16]



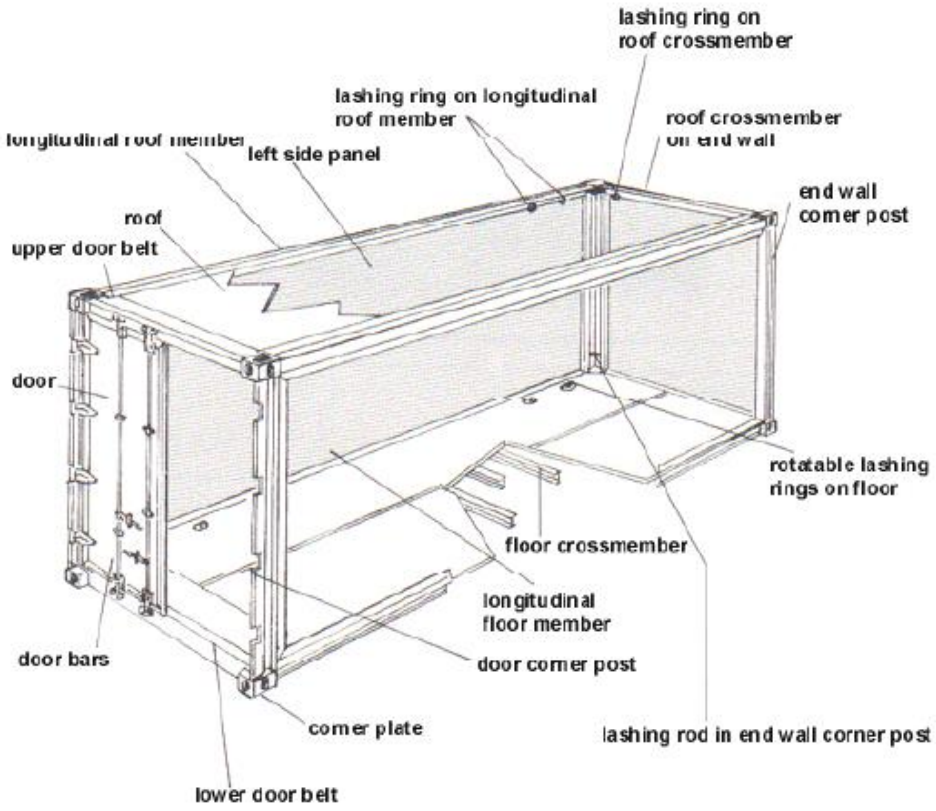
Εικόνα 3 Γενική όψη ενός τυπικού πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. [16]



Εικόνα 4 Τυπική διάταξη κύτους φορτίου για ένα πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. [16]

1.3.2 Σχεδιασμός εμπορευματοκιβωτίων για το θαλάσσιο εμπόριο.

Τα εμπορευματοκιβώτια έχουν σχεδιαστεί για τη μεταφορά γενικού φορτίου καθώς επίσης και για σιδηροδρομικές, οδικές και θαλάσσιες μεταφορές. Ο σχεδιασμός τους είναι τέτοιος ώστε να επιτυγχάνεται δομική ακεραιότητα και στεγανότητα σε ένα εύρος θερμοκρασιών από -30^{o}C έως και +80 ^{o}C. Η κύρια δομή ενός εμπορευματοκιβωτίου παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα. [31]



Εικόνα 5 Δομή εμπορευματοκιβωτίου θαλάσσιων μεταφορών. [23]

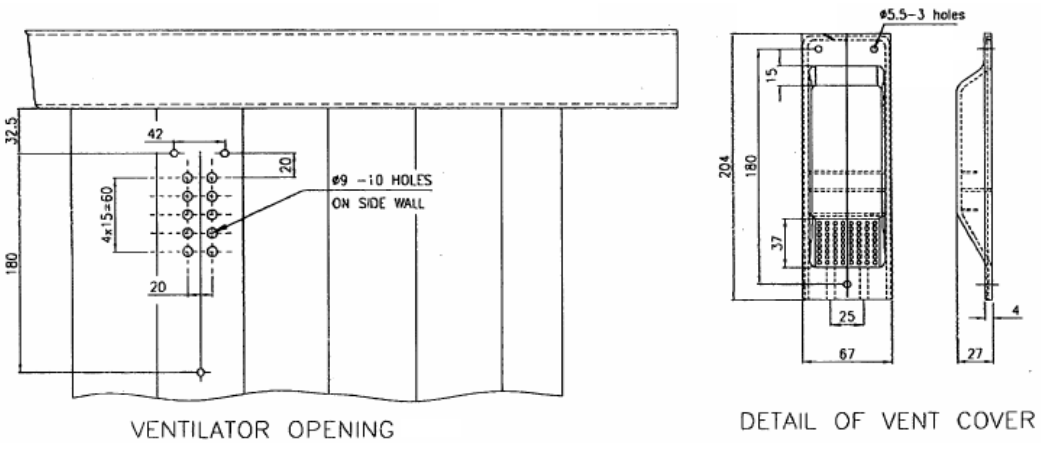
Αντίστοιχα στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται οι κύριες διαστάσεις των διαφόρων ειδών εμπορευματοκιβωτίων που χρησιμοποιούνται για το θαλάσσιο εμπόριο καθώς και το μέγιστο φορτίο που αυτά δύνανται να μεταφέρουν.

Πίνακας 3 Είδη, κύριες διαστάσεις και μέγιστο φορτίο τυπικών εμπορευματοκιβωτίων θαλάσσιων μεταφορών. [31]

Container type	Dimensions, volume and maximum load	
20 ft Standard Container	Outside dimensions (L x W x H)	6058 x 2438 x 2591 mm
	Inside dimensions (L x W x H)	5895 x 2350 x 2392 mm
	Door opening	2340 x 2292 mm
	Volume	33.1 m^3
	Maximum load	28230 kg
40 ft Standard Container	Outside dimensions (L x W x H)	12192 x 2438 x 2591 mm
	Inside dimensions (L x W x H)	12029 x 2350 x 2392 mm
	Door opening (W x H)	2340 x 2292 mm
	Volume	67,6 m^3
	Maximum load	26700
20 ft Reefer 8'6	Outside dimensions (L x W x H)	6058 x 2438 x 2591 mm
	Inside dimensions (L x W x H)	5534 x 2316 x 2331 mm
	Door opening	2316 x 2290 mm
	Volume	29,9 m^3
	Maximum load	27450 kg
20 ft Reefer 8'6	Outside dimensions (L x W x H)	12192 x 2438 x 2591 mm
	Inside dimensions (L x W x H)	11563 x 2294 x 2261 mm
	Door opening	2288 x 2188 mm
	Volume	60,0 m^3
	Maximum load	29400 kg

Το κοινό δάπεδο ενός εμπορευματοκιβωτίου είναι κατασκευασμένο από κόντρα πλακέ πάχους 28 mm στηριγμένο σε χαλύβδινες δοκούς. Η κάτω πλευρά είναι ολόκληρη επικαλυμμένη με αστάρι και κηρώδες ή ασφαλτώδες υπόστρωμα. Όλες οι ρωγμές του εμπορευματοκιβωτίου είναι σφραγισμένες με ελαστικό στεγανοποιητικό υλικό. Τα περισσότερα κοινά εμπορευματοκιβώτια διαστάσεων 40 ft διαθέτουν 2 ανοίγματα για εξαερισμό (2 ventilator openings) τα οποία βρίσκονται και στα 2 πλευρικά τοιχώματα. Κάθε ένα από αυτά διαθέτουν 10 τρύπες διαμέτρου 9 mm. Τέλος τα τυπικά εμπορευματοκιβώτια διαστάσεων 20 ft διαθέτουν στην πλειοψηφία τους ένα μόνο άνοιγμα εξαερισμού στο ένα πλευρικό τοίχωμα. [30]

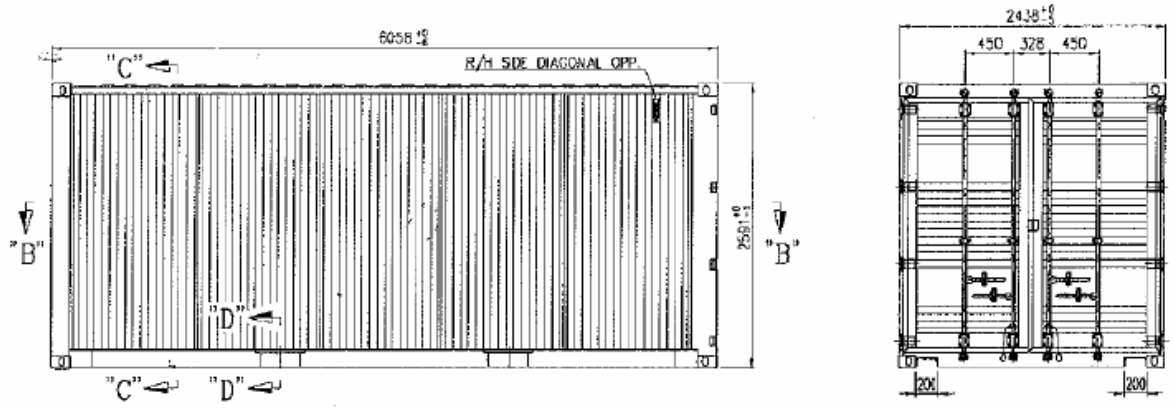
Τα προαναφερθέντα φαίνονται ευκρινώς στην ακόλουθη εικόνα:



Εικόνα 6 Standard ventilator opening and vent cover. [31]

Το πιο συνηθισμένο είδος εμπορευματοκιβωτίου είναι το εμπορευματοκιβώτιο γενικής χρήσης (general purpose container) το οποίο και έχει σχεδιαστεί για την μεταφορά ομοιογενών φορτίων. Πέραν αυτού του είδους εμπορευματοκιβωτίου υπάρχουν και εμπορευματοκιβώτια ψυγεία καθώς επίσης και εμπορευματοκιβώτια ψυγεία με αεραγωγούς (ducted reefer containers) τα οποία χρειάζονται σύνδεση με ενσωματωμένες μονάδες ψύξης επί του πλοίου. Άλλα είδη εμπορευματοκιβωτίων μπορεί να έχουν ανοιχτή οροφή, σκληρή οροφή, πλατφόρμα, επίπεδες ή και αναδιπλούμενες σχάρες. Επιπλέον υπάρχουν εμπορευματοκιβώτια για μεταφορά χύδην φορτίου, για μεταφορά φορτίου που απαιτεί ψύξη και τέλος εμπορευματοκιβώτια ειδικής χρήσης όπως για παράδειγμα για περιπτώσεις μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων. Υπάρχουν δύο τυπικά μεγέθη αναφορικά με τα εμπορευματοκιβώτια, αυτά των 20 και 40 ποδιών (feet ή ft) . Αυτά χαρακτηριστικά αναφέρονται ως TEU (Twenty-Foot Equivalent Unit) και FEU (Forty-Foot Equivalent Unit) αντίστοιχα. Τέλος υπάρχουν και άλλα μεγέθη εμπορευματοκιβωτίων, ωστόσο είναι πολύ λιγότερο κοινά και συνεπώς δεν θα αναλυθούν περαιτέρω. [18]

Ακολούθως παρατίθεται ένα τεχνικό σχέδιο ενός εμπορευματοκιβώτιου διαστάσεων 20 ft καθώς και μια φωτογραφία της εσωτερικής δομής του.



Εικόνα 7 Technical drawing of a 20 ft standard container. [31]

Εικόνα 8 20 ft standard container interior view. [31]

2 Χαρακτηριστικά πυρκαγιών

2.1 Μετάδοση θερμότητας

Η ερμηνεία των φαινομένων μιας πυρκαγιάς απαιτεί την κατανόηση ποικίλων φυσικών μηχανισμών. Ανάμεσα σε αυτά περιλαμβάνονται η μηχανική των ρευστών καθώς επίσης και οι τρόποι μετάδοσης μάζας και θερμότητας. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω θεωρήθηκε χρήσιμο να παρουσιαστούν στο συγκεκριμένο κεφάλαιο οι θεμελιώδεις αρχές μετάδοσης θερμότητας με σκοπό την κατανόηση των μηχανισμών εκκίνησης και εξάπλωσης μια πυρκαγιάς.

Υπάρχουν τρεις βασικοί μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας. Αυτοί είναι :

- Η αγωγή
- Η μεταφορά
- Η ακτινοβολία

Η μετάδοση θερμότητας με αγωγή (αγωγιμότητα) λαμβάνει χώρα όταν υπάρχει θερμοκρασιακή διαφορά μέσα σε ένα σώμα στερεό, υγρό ή αέριο, χωρίς να συνοδεύεται από αλλαγή φάσης καθώς και στην περίπτωση δύο σωμάτων που βρίσκονται σε απόλυτη επαφή χωρίς σχετική κίνηση. Στα στερεά σώματα, η μετάδοση θερμότητας πραγματοποιείται μέσω μοριακών ταλαντώσεων είτε μέσω ελεύθερων ηλεκτρονίων. Η μεταφορά θερμότητας με αγωγή αφορά κυρίως στερεά σώματα. [1]

Η μεταφορά (συναγωγή) σχετίζεται με τη μετάδοση θερμότητας μέσω της κίνησης ενός ρευστού (υγρού ή αέριου σώματος). Συμβαίνει μεταξύ της επιφάνειας ενός στερεού και ενός ρευστού που έρχονται σε επαφή και έχουν διαφορετική θερμοκρασία. Μεταφέρεται θερμική ενέργεια εκτός από τις τυχαίες κινήσεις των μορίων, τη διάχυση και με τη μακροσκοπική κίνηση του ρευστού, κατά την οποία μετακινείται συλλογικά μεγάλος αριθμός μορίων. Η κίνηση του ρευστού μπορεί να προκύπτει ‘φυσικά’ όταν οφείλεται σε διαφορές πυκνοτήτων του ρευστού λόγω θερμοκρασιακών διαφορών. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται ο όρος ‘ελεύθερη συναγωγή’. Στην περίπτωση που η κίνηση του ρευστού οφείλεται σε εξωτερικά αίτια, για παράδειγμα έναν ανεμιστήρα , η συναγωγή χαρακτηρίζεται ως εξαναγκασμένη. Στην περίπτωση μιας πυρκαγιάς σε ανοιχτό χώρο το μεγαλύτερο τμήμα της θερμότητας που εκλύεται απομακρύνεται από τις επιφάνειες που καίγονται μέσω μιας ροής ελεύθερης συναγωγής. Στην περίπτωση ενός κλειστού χώρου τα θερμά αέρια ανεβαίνουν μεταφέροντας θερμότητα στους παρακείμενους τοίχους και την οροφή. Η μεταφορά αποτελεί έναν από τους βασικούς τρόπους εξάπλωσης της πυρκαγιάς. [1],[10]

Η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία πραγματοποιείται μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων με το φως του ηλίου να αποτελεί το πιο οικείο παράδειγμα. Βασίζεται στην ικανότητα αρκετών σωμάτων να απορροφούν μέρος της ακτινοβολίας που δέχονται και να την επανεκπέμπουν. Σε αντίθεση με τους προαναφερθέντες τρόπους μετάδοσης θερμότητας με αγωγή και μεταφορά, στην ακτινοβολία δεν απαιτείται η ύπαρξη υλικού μέσου για να πραγματοποιηθεί η μετάδοση θερμότητας η οποία ενισχύεται στο κενό. Αποτελεί τον κυρίαρχο τρόπο μεταφοράς θερμότητας στις πυρκαγιές καθώς η επιφάνεια καύσης γίνεται

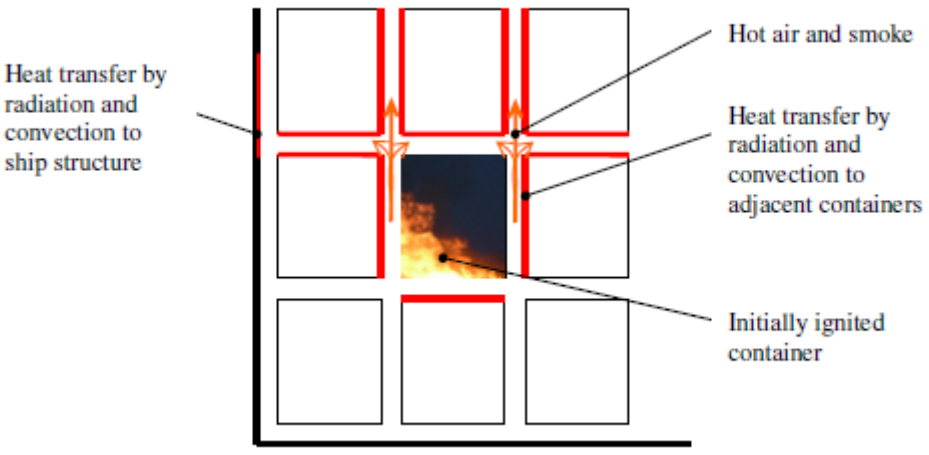
μεγαλύτερη των 0.3 μέτρων και καθορίζει την ανάπτυξη και την εξάπλωση των πυρκαγιών μέσα σε κλειστά διαμερίσματα. Πρόκειται ουσιαστικά για τον μηχανισμό με τον οποίο θερμαίνονται αντικείμενα που βρίσκονται σε μια συγκεκριμένη απόσταση από την φωτιά. Μια σημαντική ποσότητα θερμότητας που εκλύεται στις φλόγες μιας πυρκαγιάς μεταδίδεται με ακτινοβολία στο περιβάλλον. Καθώς ένα σώμα θερμαίνεται και η θερμοκρασία του ανεβαίνει χάνει θερμότητα εν μέρει με μεταφορά και εν μέρει με ακτινοβολία. [1],[10]

Στον πίνακα 4 φαίνεται η επίδραση της θερμικής ακτινοβολίας συνοδευόμενη από κάποιες ενδεικτικές τιμές.

Πίνακας 4 Επιδράσεις θερμικής ακτινοβολίας. [10]

Effects of thermal radiation	
Radiant heat flux (kW/m^2)	Observed effect
0,67	Summer Sunshine in UK
1	Maximum for indefinite skin exposure
6,4	Pain after 8 s skin exposure
10,4	Pain after 3 s exposure
12,5	Volatiles from wood may be ignited by pilot after prolonged exposure
16	Blistering of skin after 5s
29	Wood ignites spontaneously after prolonged exposure
52	Fibreboard ignites spontaneously in 5 s

Στην ακόλουθη εικόνα παρουσιάζεται και ένα τυπικό μοντέλο και οι μηχανισμοί εξάπλωσης της πυρκαγιάς η οποία ξεκινάει σε ένα εμπορευματοκιβώτιο, στο χώρο φορτίου του πλοίου :



Εικόνα 9 Τυπικό μοντέλο εξάπλωσης πυρκαγιάς. [31]

Στην εικόνα αυτή απεικονίζεται ο χώρος φορτίου ενός πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων κάτω από το κατάστρωμα καιρού στον οποία η πυρκαγιά ξεκινάει από ένα εμπορευματοκιβώτιο στο μέσο του χώρου αυτού. Παρατηρείται ότι υπάρχει μετάδοση θερμότητας στα παρακείμενα εμπορευματοκιβώτια διαμέσω συναγωγής και ακτινοβολίας. Επιπλέον, διαφαίνεται πως ο καπνός και ο θερμός αέρας διαδίδονται διαμέσω των κενών μεταξύ των εμπορευματοκιβωτίων κάθετα προς τα πάνω, αλλά και στην οριζόντια διεύθυνση στο χώρο φορτίου. Τέλος, λόγω της διάδοσης του θερμού καπνού και αέρα καθώς και λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας της κατασκευής των παρακείμενων εμπορευματοκιβωτίων μεταδίδεται θερμότητα λόγω ακτινοβολίας και συναγωγής και στην κατασκευή του πλοίου που οριοθετεί το χώρο φορτίου. Με βάση το σχήμα αυτό συμπεραίνεται ότι η πυρκαγιά σε ένα εμπορευματοκιβώτιο δεν επηρεάζει απλώς τα παρακείμενα σε αυτό εμπορευματοκιβώτια αλλά και πολλά άλλα ταυτόχρονα συμπεριλαμβανομένων και δομικών στοιχείων του πλοίου.

2.2 Στάδια πυρκαγιάς

Έναρξη της καύσης- ανάφλεξη

Η ανάφλεξη μπορεί να οριστεί ως εκείνη η διαδικασία με την οποία ξεκινά μια ταχεία, εξώθερμη αντίδραση, η οποία στη συνέχεια διαδίδεται και προκαλεί αλλαγές στο εμπλεκόμενο υλικό παράγοντας θερμοκρασίες πολύ υψηλότερες από αυτές του περιβάλλοντος. Έτσι για παράδειγμα η ανάφλεξη ενός στοιχειομετρικού μίγματος προπάνιου- αέρα πυροδοτεί μια αντίδραση οξείδωσης η οποία διαδίδεται ως φλόγα μέσω του μείγματος, μετατρέποντας τον υδρογονάνθρακα σε διοξείδιο του άνθρακα και υδρατμούς, σε θερμοκρασίες στην περιοχή των 2000-2500K. Διακρίνονται δύο τύποι ανάφλεξης:

- Η πιλοτική στην οποία η φλόγα ξεκινά σε ένα εύφλεκτο μείγμα ατμών-αέρα από έναν <<πιλότο>> όπως για παράδειγμα ένας ηλεκτρικό σπινθηριστή ή μια ανεξάρτητη φλόγα.
- Η ανεξάρτητη (αυθόρμητη) στην οποία η φλόγα αναπτύσσεται αυθόρμητα μέσα στο μείγμα.

Για να επιτευχθεί καύση υγρών και στερεών απαιτείται εξωτερική πηγή μετάδοσης θερμότητας με εξαίρεση την περίπτωση της πιλοτικής ανάφλεξης εύφλεκτων υγρών τα οποία έχουν σημείο ανάφλεξης σε θερμοκρασία χαμηλότερη από αυτή του περιβάλλοντος. [10]

Διάδοση της φλόγας

Ο ρυθμός με τον οποίο θα αναπτυχθεί μια πυρκαγιά εξαρτάται από το πόσο γρήγορα μπορεί να εξαπλωθεί η φλόγα από το σημείο ανάφλεξης ώστε να περιλαμβάνει ολοένα και μεγαλύτερη περιοχή με διαθέσιμο καύσιμο υλικό. Σε ένα κλειστό χώρο η επίτευξη μιας πλήρως ανεπτυγμένης πυρκαγιάς απαιτεί την ανάπτυξη της φωτιάς πέρα από ένα κρίσιμο μέγεθος πέραν του οποίου παράγονται υψηλές θερμοκρασίες της τάξης μεγέθους 600^{o}C και μεγαλύτερες στο επίπεδο της οροφής του κλειστού χώρου. Αν και τα ενισχυμένα επίπεδα ακτινοβολίας αυξάνουν τον τοπικό ρυθμό καύσης, την μεγαλύτερη επίδραση στο μέγεθος και τον ρυθμό της καύσης έχει η αυξανόμενη περιοχή της φωτιάς. Η εξάπλωση της φλόγας μπορεί να θεωρηθεί ως ένα προχωρημένο μέτωπο ανάφλεξης στο οποίο η αιχμή της φλόγας

λειτουργεί και ως πηγή θερμότητας και ως πηγή πιλοτικής ανάφλεξης. Ο ρυθμός εξάπλωσης εξαρτάται τόσο από τις φυσικές ιδιότητες ενός υλικού όσο και από τη χημική του σύνθεση. Στον ακόλουθο πίνακα παρατίθενται οι διάφοροι παράγοντες που είναι γνωστό ότι είναι σημαντικοί για τον προσδιορισμό του ρυθμού εξάπλωσης σε εύφλεκτα στερεά υλικά. [10]

Πίνακας 5 Παράγοντες που επηρεάζουν τον ρυθμό εξάπλωσης της πυρκαγιάς σε εύφλεκτα στερεά υλικά. [10]

Material factors		**Environmental factors**
Chemical	Physical	
Composition of fuel Presence of retardants	Initial temperature	Composition of atmosphere
	Surface orientation	Pressure of atmosphere
	Direction of propagation	Temperature
	Thickness	Imposed heat flux
	Thermal capacity	Air velocity
	Thermal conductivity	
	Density	
	Geometry	
	Continuity	

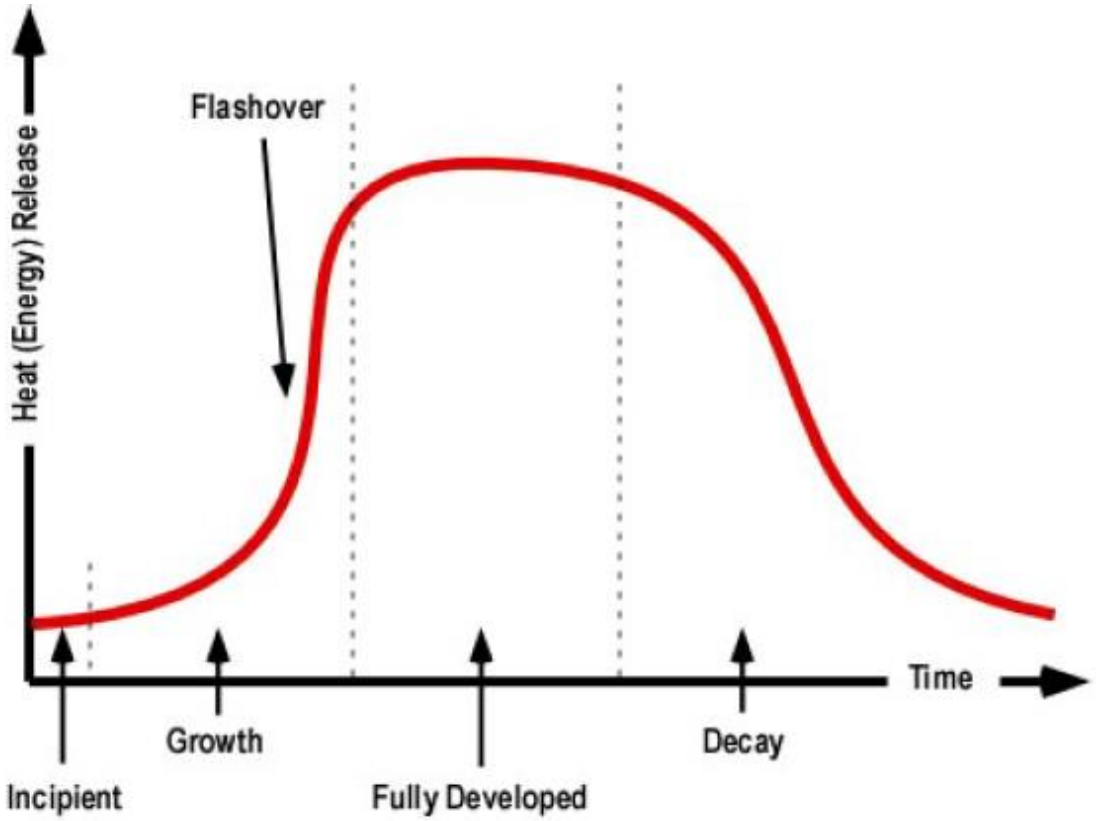
Διάδοση της φλόγας – ο παράγοντας της ακτινοβολίας.

Η ακτινοβολούμενη θερμότητα διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην εξάπλωση της πυρκαγιάς. Όταν ο παράγοντας της ροής θερμότητας (radiant heat flux) στο επίπεδο του δαπέδου φθάσει την τιμή των 20kW/m^2 εμφανίζεται μια πολύ ταχεία αλλαγή στο χαρακτήρα της πυρκαγιάς, από τοπική καύση σε εμπλοκή ολόκληρου του κλειστού χώρου όπου καίγονται όλα τα εύφλεκτα αντικείμενα. Η μετάβαση αυτή είναι γνωστή και ως flashover και απαιτεί η πυρκαγιά να έχει ξεπεράσει ένα συγκεκριμένο ελάχιστο μέγεθος κυρίως όσον αφορά τον παράγοντα της εξάπλωσης της πυρκαγιάς.

Μετά την ανάφλεξη και ενώ ακόμη είναι μικρή , η φωτιά καίει ελεύθερα και ο ρυθμός πυρόλυσης και απελευθέρωσης ενέργειας επηρεάζονται μόνο από την καύση του ίδιου του καυσίμου (του υλικού) και όχι από την παρουσία των ορίων του κλειστού χώρου . Εάν είναι δυνατό να αυξηθεί σε μέγεθος, είτε ως αποτέλεσμα της εξάπλωσης της φλόγας στο αντικείμενο που αναφλέχθηκε πρωταρχικά, είτε με την εξάπλωση σε κοντινά αντικείμενα, θα φτάσει σε ένα στάδιο όπου ο περιορισμός του χώρου θα επηρεάσει την ανάπτυξη της πυρκαγιάς. Εάν υπάρχει επαρκής εξαερισμός ώστε να επιτραπεί η συνέχιση της ανάπτυξης της πυρκαγιάς, η φωτιά δύναται να περιγραφεί βάσει του μεγέθους του ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας (ισχύς της πυρκαγιάς) HRR (Heat Release Rate) σαν συνάρτηση με το χρόνο όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα. Ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας (HRR) αποτελεί το βασικό χαρακτηριστικό που περιγράφει ποσοτικά «Πόσο μεγάλη είναι η φωτιά». Αυτό είναι τόσο σημαντικό που έχει περιγραφεί ως η πιο σημαντική μεταβλητή στον κίνδυνο πυρκαγιάς. Ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας ενός αντικειμένου που καίγεται μετριέται σε κιλοβάτ (kW). Είναι ο ρυθμός με τον οποίο οι αντιδράσεις καύσης παράγουν

θερμότητα . Ο όρος ρυθμός καύσης συναντάται επίσης συχνά. Αυτός είναι ένας λιγότερο συγκεκριμένος όρος και μπορεί να υποδηλώνει είτε το HRR είτε το ποσοστό απώλειας μάζας. [10],[15]

Οι καμπύλες HRR παίζουν στις μέρες μας πολύ σημαντικό ρόλο στον τομέα του fire safety engineering. Περιγράφουν τα χαρακτηριστικά του αρχικού σταδίου (incipient) της φωτιάς, της ανάπτυξης (growth), του σταδίου της πλήρους ανάπτυξης (full development) και τέλος της επώασης (decay). Η επιλογή μιας συγκεκριμένη καμπύλης HRR ελέγχει χαρακτηριστικά πυρκαγιάς όπως η θερμοκρασία θερμών αερίων. Επιπλέον, ενσωματώνει ποσοτικά κρίσιμες παραμέτρους. όπως η ισχύς της πηγής ανάφλεξης, το φορτίο πυρκαγιάς και τον τύπο, το μέγεθος και τη διάρκεια της πυρκαγιάς. [36]



Εικόνα 10 Ανάπτυξη πυρκαγιάς σε ένα διαμέρισμα εκφρασμένη ως ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας (Heat Release Rate) συναρτήσει του χρόνου. [11]

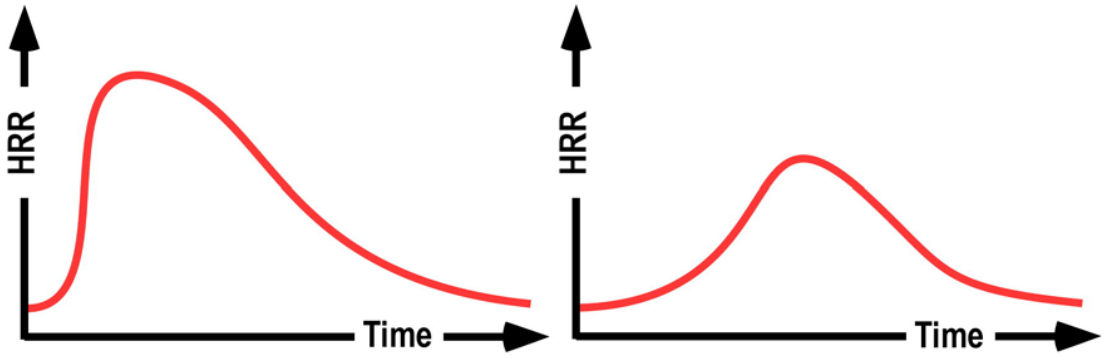
Με βάση το σχήμα αυτό η ανάπτυξη της πυρκαγιάς σε ένα κλειστό χώρο (διαμέρισμα) μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από τέσσερα στάδια:

- Το αρχικό στάδιο (incipient)
- Το στάδιο ανάπτυξης (growth) ή στάδιο πριν το σημείο flashover στο οποίο η μέση θερμοκρασία του κλειστού χώρου είναι σχετικά χαμηλή και η φωτιά εντοπίζεται κοντά στο σημείο εκκίνησης της.
- Το στάδιο της πλήρως ανεπτυγμένης πυρκαγιάς (fully developed) ή διαφορετικά το στάδιο πέραν του σημείου flashover κατά την διάρκεια του οποίου εμπλέκονται όλα τα εύφλεκτα αντικείμενα του διαμερίσματος και οι φλόγες φαίνεται να γεμίζουν ολόκληρο τον κλειστό χώρο.

- Την φθίνουσα περίοδο (decay) η οποία συχνά καθορίζεται ως εκείνο το στάδιο της πυρκαγιάς όπου η μέση θερμοκρασία έχει πέσει στο 80% της μέγιστης τιμής της.

Αναφορικά με το flashover, δεν πρόκειται για ένα στάδιο ανάπτυξης, αλλά απλώς για μια ταχεία μετάβαση μεταξύ των σταδίων της ανάπτυξης και της πλήρους ανάπτυξης.

Οι πυρκαγιές των διαμερισμάτων δεν ακολουθούν πάντα την απλή, εξιδανικευμένη καμπύλη ανάπτυξης πυρκαγιάς που απεικονίζεται στην εικόνα 10. Η ταχύτητα με την οποία αναπτύσσεται η πυρκαγιά, ο μέγιστος ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας και η διάρκεια της καύσης εξαρτώνται τόσο από τα χαρακτηριστικά του καυσίμου που εμπλέκεται όσο και από το προφίλ εξαερισμού (διαθέσιμο οξυγόνο) όπως φαίνεται στην εικόνα 11. [11]



Εικόνα 11 Εξάρτηση του ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας από τα χαρακτηριστικά του καυσίμου και τον εξαερισμό. [11]

Αρχικό στάδιο

Επιστρέφοντας στα βασικά της συμπεριφοράς της φωτιάς, η ανάφλεξη απαιτεί θερμότητα, καύσιμο και οξυγόνο. Μόλις ξεκινήσει η καύση, η ανάπτυξη μιας πυρκαγιάς εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα χαρακτηριστικά και τη διαμόρφωση του καυσίμου που εμπλέκεται (φωτιά ελεγχόμενη από καύσιμο). Ο αέρας στο διαμέρισμα παρέχει επαρκές οξυγόνο για να συνεχιστεί η ανάπτυξη της φωτιάς. Κατά τη διάρκεια αυτής της αρχικής φάσης ανάπτυξης της φωτιάς, η ακτινοβολούμενη θερμότητα θερμαίνει το παρακείμενο καύσιμο και συνεχίζει τη διαδικασία της πυρόλυσης. Ένα νέφος από καυτά αέρια και φλόγα αναδύεται από τη φωτιά και αναμιγνύεται με τον ψυχρότερο αέρα μέσα στο δωμάτιο. Αυτή η μεταφορά ενέργειας αρχίζει να αυξάνει τη συνολική θερμοκρασία στο δωμάτιο. Καθώς το στρώμα αυτό φτάνει στην οροφή, τα θερμά αέρια αρχίζουν να εξαπλώνονται οριζόντια σε όλη την οροφή. Η μετάβαση πέρα από το αρχικό στάδιο είναι δύσκολο να προσδιοριστεί με ακριβείς όρους. Ωστόσο, καθώς οι φλόγες πλησιάζουν στην οροφή, το στρώμα των καυτών αερίων καθίσταται πιο ξεκάθαρο και αυξάνεται σε όγκο, η φωτιά έχει μετακινηθεί πέρα από την αρχική της φάση και (με την παροχή επαρκούς οξυγόνου) θα συνεχίσει να αναπτύσσεται πιο γρήγορα. [11]

Στάδιο ανάπτυξης

Εάν υπάρχει επαρκές οξυγόνο εντός του διαμερίσματος θα εμπλακεί επιπλέον καύσιμο και ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας από τη φωτιά θα αυξηθεί. Αν και πολύ πιο περίπλοκες, οι θερμοκρασίες των αερίων εντός του διαμερίσματος μπορούν να περιγραφούν από δύο στρώματα: Ένα ζεστό στρώμα που εκτείνεται προς τα κάτω από την οροφή και ένα πιο ψυχρό στρώμα πιο κάτω προς το δάπεδο. Η μεταφορά θερμότητας που προκύπτει από το στρώμα καπνού και τη θερμή οροφή μαζί με την ακτινοβολούμενη θερμότητα από τη φωτιά και τα καυτά σωματίδια στον καπνό αυξάνουν τη θερμοκρασία των επενδύσεων του διαμερίσματος και άλλων αντικειμένων στο χώρο. . Η φωτιά μπορεί να συνεχίσει να αναπτύσσεται μέσω της εξάπλωσης της φλόγας ή με την ανάφλεξη άλλου καυσίμου μέσα στο διαμέρισμα. Καθώς η φωτιά προχωρά περαιτέρω στο στάδιο ανάπτυξης, ο κυρίαρχος μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας μέσα στο διαμέρισμα πυρκαγιάς μετατοπίζεται από τη μεταφορά στην ακτινοβολία. Η ακτινοβολούμενη μεταφορά θερμότητας αυξάνει τη ροή θερμότητας (heat flux) στο επίπεδο του δαπέδου. Η μετάβαση στο δεύτερο στάδιο της πλήρους ανεπτυγμένης πυρκαγιάς αναφέρεται και ως <<flashover>> και περιλαμβάνει μια ταχεία μετάβαση σε μια κατάσταση συνολικής εμπλοκής των επιφανειών όλων των εύφλεκτων υλικών μέσα στο διαμέρισμα. Συγκριτικά με τη διάρκεια των βασικών σταδίων της πυρκαγιάς, η μετάβαση είναι συνήθως σύντομη και μερικές φορές θεωρείται ένα καλά καθορισμένο γεγονός όπως θεωρείται και η ανάφλεξη. [10],[11]

Κατά την διάρκεια του σταδίου της πλήρως ανεπτυγμένης πυρκαγιάς ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας HRR (Heat Release Rate) φτάνει στη μέγιστη τιμή και η απειλή για τα γειτονικά διαμερίσματα και παρακείμενα κτίρια ή κατασκευές είναι μεγαλύτερη. Τα άκαυστα αέρια συσσωρεύονται στο επίπεδο της οροφής και συχνά καίγονται καθώς διαφεύγουν από το διαμέρισμα, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται φλόγες από τις πόρτες ή τα παράθυρα, μεταδίδοντας έτσι την φωτιά στο υπόλοιπο κτίριο ή αντίστοιχα το πλοίο είτε εσωτερικά μέσω ανοιχτών θυρών είτε εξωτερικά διαμέσω των παραθύρων ή ανοιγμάτων. Η μέση θερμοκρασία αερίων μέσα σε ένα διαμέρισμα κατά τη διάρκεια μιας πλήρως ανεπτυγμένης πυρκαγιάς κυμαίνεται από 700 –1200^{o} C Κατά την φάση αυτή μπορεί να προκληθούν σημαντικές δομικές ζημιές. Κατά την διάρκεια του τρίτου σταδίου δηλαδή της φθίνουσας περιόδου ή περιόδου ψύξης , ο ρυθμός καύσης μειώνεται καθώς ελαττώνεται η συγκέντωση των πτητικών του καυσίμου. Τελικά η φλόγα θα σταματήσει αφήνοντας πίσω μια μάζα λαμπερών χοβόλων που θα συνεχίσουν να καίγονται αν και αργά για κάποιο χρονικό διάστημα, διατηρώντας υψηλές τοπικές θερμοκρασίες. [10],[11]

Το στάδιο της ανάπτυξης και η έννοια του flashover

Η διαρκής τοπική καύση σε ένα σημείο του χώρου μπορεί να οδηγήσει στις ακόλουθες τρεις καταστάσεις:

- Η φωτιά ενδέχεται να σβήσει μόνη της δίχως την εμπλοκή άλλων στοιχείων εύφλεκτου υλικού, ιδιαίτερα αν το αντικείμενο που καίγεται βρίσκεται σε απομονωμένη θέση.
- Στην περίπτωση ανεπαρκούς αερισμού η φωτιά μπορεί να σβήσει από μόνη της ή να συνεχίσει να καίει με πολύ αργό ρυθμό, ο οποίος υπαγορεύεται από τη διαθεσιμότητα οξυγόνου.

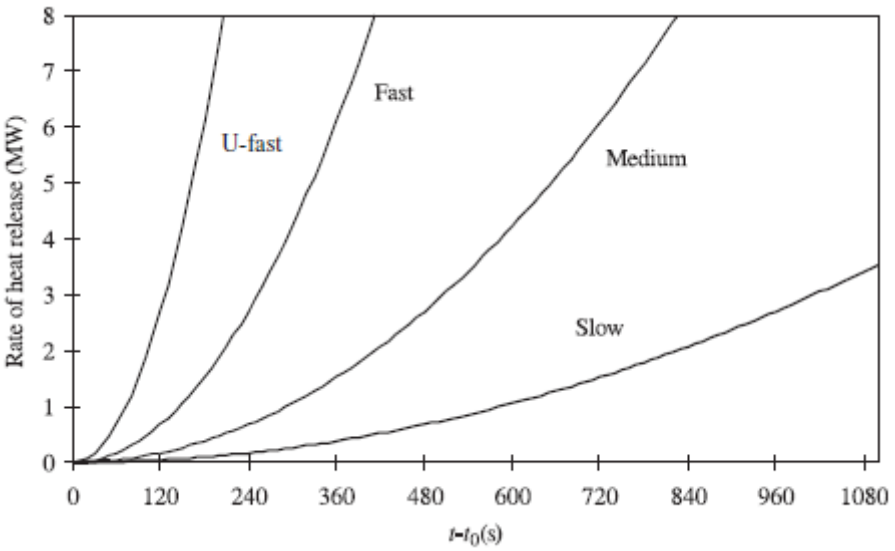
- Εάν υπάρχει επαρκής ποσότητα καυσίμου και αερισμού , η φωτιά μπορεί να εξελιχθεί και να οδηγήσει σε πλήρη εμπλοκή όλου του κλειστού χώρου όπου καίγονται όλες οι εκτεθειμένες εύφλεκτες επιφάνειες.

2.3 Ρυθμός Ανάπτυξης πυρκαγιάς

Έχει διαπιστωθεί ότι οι ρυθμοί ανάπτυξης πολλών πυρκαγιών προσεγγίζουν μια παραβολική ανάπτυξη ('t^2 fire') μετά από μια αρχική περίοδο επώασης επομένως:

$$Q = \alpha_f (t - t_0)^2$$

Όπου ως α_f ορίζεται ο συντελεστής ανάπτυξης πυρκαγιάς (kW/s^2) και t_0 είναι η διάρκεια της περιόδου επώασης (decay period) (s) . Αυτό φαίνεται σχηματικά στην εικόνα 12. Ο συντελεστής α_f βρίσκεται στην περιοχή τιμών 10^{-3} kW/s^2 για πυρκαγιές που αναπτύσσονται πολύ αργά έως 1 kW/s^2 για πολύ γρήγορη ανάπτυξη πυρκαγιάς (Πίνακας 6). [10]



Εικόνα 12 Παραβολική ανάπτυξη πυρκαγιάς με αρχή το τέλος της περιόδου επώασης και σύμφωνα με την εξίσωση 1 για τις διάφορες τιμές των συντελεστών ανάπτυξης πυρκαγιάς του πίνακα 6. [10]

Πίνακας 6 Συντελεστές ανάπτυξης πυρκαγιών που προσεγγίζουν παραβολική ανάπτυξη. [10]

Description	**Typical scenario**	**αf (kW/s^2)**
Slow	Densely packed paper products[a]	0,00293
Medium	Traditional mattress/boxspring	0,01172
	Traditional armchair	
Fast	PU mattress (horizontal)[a]	0,0169
	PE pallets, stacked 1 m high	
Ultrafast	High-rack storage	0,1876
	PE rigid foam stacked 5m high	
[a]National Fire Protection Association (2010).		

2.3 Πλήρως ανεπτυγμένη πυρκαγιά και ο παράγοντας εξαερισμού.

Μετά την εμφάνιση του flashover, οι εκτεθειμένες επιφάνειες όλων των εύφλεκτων αντικειμένων στο χώρο προέλευσης θα καούν και ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας θα αυξηθεί στο μέγιστο . Θα επιτευχθούν υψηλές θερμοκρασίες, συνήθως 900–1100◦C, αλλά κάτω από ορισμένες συνθήκες μπορούν να επιτευχθούν πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες. Αυτή είναι η πλήρως ανεπτυγμένη φωτιά που θα συνεχιστεί έως ότου ο ρυθμός παραγωγής εύφλεκτων πτητικών αρχίζει να μειώνεται ως αποτέλεσμα της κατανάλωσης του καυσίμου. Κατά τα στάδια της πυρκαγιάς μετά το flashover, τα στοιχεία της δομής της κατασκευής του κλειστού χώρου μπορεί να θερμανθούν σε θερμοκρασίες στις οποίες δεν είναι πλέον σε θέση να εκπληρώσουν τη λειτουργία τους, όπως για παράδειγμα να φέρουν το σχεδιαστικό τους φορτίο. Ανάλογα με τον τύπο της κατασκευής, αυτό μπορεί να προκαλέσει τοπική ή γενικότερη κατάρρευση. Οι τοίχοι διαμερισμάτων (όρια) που μπορεί να φέρουν είτε να μην φέρουν φορτίο μπορεί επίσης να «αστοχήσουν» επιτρέποντας την εξάπλωση της φωτιάς σε παρακείμενους χώρους με διείσδυση φλόγας ή υπερβολική μετάδοση θερμότητας. [10]

Στο στάδιο της πλήρως ανεπτυγμένης πυρκαγιάς η εκλυόμενη θερμότητα φτάνει σχεδόν μια σταθερή τιμή, η οποία συνήθως περιορίζεται από την ποσότητα του οξυγόνου στο διαμέρισμα. Στην περίπτωση αυτή η φωτιά χαρακτηρίζεται ως «ελεγχόμενη από εξαερισμό» («ventilation controlled»). Ο ρυθμός απώλειας μάζας ελέγχεται από το ρυθμό με τον οποίο ο αέρας εισέρχεται στο χώρο μέσω των ανοιγμάτων εξαερισμού. Αν ο χώρος είναι καλά εξαεριζόμενος, ο μέγιστος ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας θα καθορίζεται από την ποσότητα του καυσίμου. Μόλις όλη η ποσότητα του διαθέσιμου καυσίμου της πυρκαγιάς καταναλωθεί ξεκινάει το στάδιο της επώασης (decay stage). Το στάδιο αυτό μπορεί επίσης να είναι ελεγχόμενο από το μέγεθος της επιφάνειας του καυσίμου (fuel surface controlled). [36]

Είναι σημαντικό να μπορεί να γίνει διάκριση μεταξύ αυτών των δύο καθεστώτων, καθώς η ελεγχόμενη από καύσιμο φωτιά είναι γενικά λιγότερο σοβαρή από την πυρκαγιά ελεγχόμενη από εξαερισμό, εκτός από περιπτώσεις στις οποίες ο εξαερισμός είναι πολύ περιορισμένος. [10]

Φορτίο πυρκαγιάς

Το συνολικό φορτίο πυρκαγιάς Q [MJ] που αντιστοιχεί σε ένα διαμέρισμα είναι ένα μέτρο της ενέργειας που μπορεί να απελευθερωθεί από την καύση όλου του εύφλεκτου υλικού στον κλειστό χώρο. Έτσι η γνώση του φορτίου πυρκαγιάς ενός χώρου παρέχει μια ένδειξη για τη διάρκεια της πυρκαγιάς. [36]

3 Κανονισμοί και απαιτήσεις

Σκοπός του κεφαλαίου αυτού αποτελεί η παρουσίαση των κανονισμών καθώς επίσης και των απαιτήσεων που αφορούν στην πυρασφάλεια των πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων με έμφαση στους χώρους φορτίου των πλοίων αυτών.

3.1 Πηγές

Παρακάτω παρατίθενται οι κύριες πηγές των κανονισμών που χρησιμοποιήθηκαν :

- Safety of Life at Sea (SOLAS) Chapter II-2 Construction - Fire protection, fire detection and fire extinction [33]
- IMO Fire Safety System (FSS) Code [17]
- ABS Guide For Fire-Fighting Systems For Cargo Areas Of Container Carriers [2]
- ABS Rules for Building and Classing Marine Vessels [3], [4]

Τα πρώτα δύο έγγραφα ανήκουν στον IMO και εμπεριέχουν τις βασικότερες πληροφορίες και κανονισμούς που πρωταρχικά θα πρέπει να ικανοποιούνται για κάθε πλοίο στο οποίο αναφέρονται. Οι απαιτήσεις του SOLAS CHAPTER II-2 Regulation 10 αναθεωρήθηκαν έπειτα από το ψήφισμα MSC 365(93) της επιτροπής του IMO και τέθηκαν σε ισχύ για πλοία που έχουν σχεδιαστεί να μεταφέρουν εμπορευματοκιβώτια στο κατάστρωμα καιρού και που έχουν κατασκευαστεί από την 1η Ιανουαρίου του 2016 και έπειτα. Δεδομένων των αλλαγών αυτών κάποιες απαιτήσεις που θα παρουσιαστούν ακολούθως ενδεχομένως να μην έχουν ισχύουν για παλαιότερα πλοία.

Ο οδηγός ABS Guide For Fire-Fighting Systems For Cargo Areas Of Container Carriers [2] αναπτύχθηκε από τον Αμερικανικό Νηογνώμονα ABS με σκοπό την περεταίρω βελτίωση της πυρασφάλειας και των δυνατοτήτων πυρόσβεσης αναφορικά με τους χώρους μεταφοράς φορτίου των πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων πέρα από αυτές που απαιτούνται από τη σύμβαση SOLAS.

Ακολούθως παρουσιάζονται οι σημαντικότερες αλλαγές που έχουν πραγματοποιηθεί στον κανονισμό SOLAS και στον κώδικα FSS στα πλαίσια των ποικίλων συνεδριάσεων της επιτροπής MSC του IMO αναφορικά με τις πυρκαγιές σε πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. Η επιτροπή ναυτικής ασφάλειας (Maritime Safety Committee – MSC) ασχολείται με όλα τα θέματα που σχετίζονται με την ασφάλεια στη θάλασσα που εμπίπτουν στο πεδίο εφαρμογής του IMO καλύπτοντας τόσο τα επιβατηγά πλοία όσο και όλα τα είδη φορτηγών πλοίων. Αυτό περιλαμβάνει την ενημέρωση της σύμβασης SOLAS και των σχετικών κωδίκων όπως αυτοί που καλύπτουν επικίνδυνα εμπορεύματα, σωστικές συσκευές και συστήματα πυρασφαλείας. Η MSC ασχολείται επίσης με θέματα ανθρωπίνου στοιχείου, συμπεριλαμβανομένων των τροποποιήσεων της σύμβασης STWC για την εκπαίδευση και την πιστοποίηση των ναυτικών.

Ακολούθως παρουσιάζονται οι σημαντικότερες αλλαγές που έχουν πραγματοποιηθεί στη σύμβαση SOLAS Chapter II-2 αναφορικά με θέματα πυρκαγιάς σε πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων.

Σύνοψη σημαντικότερων αλλαγών:

1. Submission MSC 83/25/5 in 2007: Revision of SOLAS Regulation II-2/10
    - Subsequent discussion in the FP Sub-Committee
    - Formal Safety Assessment. FP 54/Inf.2

2. Ψήφισμα MSC.365(93). Η Επιτροπή Ναυτικής Ασφάλειας (Maritime Safety Committee), στην ενενηκοστή τρίτη σύνοδό της που πραγματοποιήθηκε το χρονικό διάστημα 14 έως 23 Μαΐου το 2014 ενέκρινε τροποποιήσεις στον κανονισμό II-2/10 της SOLAS σχετικά με πρόσθετα μέτρα πυρασφάλειας για πλοία που έχουν σχεδιαστεί και κατασκευαστεί για να μεταφέρουν πέντε ή περισσότερες σειρές (Tiers[1]) εμπορευματοκιβωτίων επί του καταστρώματος καιρού, μέτρα που σχεδιάστηκαν από την Υποεπιτροπή Πυροπροστασίας (Sub-Committee on Fire Protection) στην πεντηκοστή έκτη σύνοδό της (7 έως 11 Ιανουαρίου 2013). Οι τροποποιήσεις, που εφαρμόζονται σε πλοία που κατασκευάζονται από την 1η Ιανουαρίου 2016 ή μετά, περιέχουν, μεταξύ άλλων, απαιτήσεις για φορητούς εκτοξευτήρες νερού που χρησιμοποιούνται για την προστασία χώρων φορτίου στο κατάστρωμα. Ταυτόχρονα η επιτροπή ενέκρινε τις κατευθυντήριες οδηγίες (Guidelines) για το σχεδιασμό την απόδοση, τη δοκιμή και την έγκριση φορητών εκτοξευτήρων νερού, χρησιμοποιούμενων για την προστασία χώρων φορτίου στο κατάστρωμα πλοίων που έχουν σχεδιαστεί και κατασκευαστεί για να μεταφέρουν πέντε οι περισσότερες σειρές εμπορευματοκιβωτίων στο κατάστρωμα καιρού. [20]
   Οι σχετικές οδηγίες σχετικά με τον σχεδιασμό, την απόδοση τη δοκιμή και την έγκριση τέτοιων φορητών εκτοξευτήρων νερού (water mobile monitors) περιέχονται στην εγκύκλιο MSC.1/Circ. 1472 [20] με ισχύ από την 1.1.2016.

3. Συνεδρίαση MSC 103 αναφορικά με τις πυρκαγιές σε πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων : Η επιτροπή MSC συμφώνησε να συμπεριλάβει στην διετή ατζέντα (2022-2023) της Υποεπιτροπής Συστημάτων και Εξοπλισμού Πλοίων (SSE), ένα νέο θέμα ημερήσιας διάταξης με τίτλο «Ανάπτυξη τροποποιήσεων στο κεφάλαιο II-2 της SOLAS και στον κώδικα FSS σχετικά με τον εντοπισμό και έλεγχο πυρκαγιών σε αμπάρια φορτίου και στο κατάστρωμα φορτίου των πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων», στοχεύοντας να ολοκληρώσει το εγχείρημα το 2025, σε συνεργασία με την Υποεπιτροπή CCC όπως και όταν ζητηθεί από την Υποεπιτροπή SSE. Επακόλουθο της κίνησης ήταν η δημιουργία συζήτησης για έναν αριθμό υποβολών που πρότειναν να αντιμετωπιστούν σε ειδικό πλαίσιο οι πυρκαγιές σε πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. Η επιτροπή MSC σημείωσε συγκεκριμένα την ανάγκη ευρύτερης προσέγγισης του θέματος με γνώμονα την πρόληψη και τον περιορισμό των κινδύνων κατά τη δημιουργία τροποποιήσεων στις συμβάσεις. [24]

[1] Tier: Tier is an indication of the vertical position of a container in a stack. The first tier is the lowest or bottommost position in the stack. [2]
Stack: Stack is a single vertical row of containers containing one or more tiers. Also referred to as a row. [2]

3.2 Ορισμοί

Στο σημείο αυτό κρίθηκε αναγκαίο να παρατεθούν κάποια ορισμοί με σκοπό την ευχερέστερη κατανόηση του πλαισίου των κανονισμών που παρατίθεται αμέσως μετά. Οι ορισμοί αυτοί παρατίθενται αναλυτικά στο Παράρτημα Α αυτής της μελέτης.

3.3 Κανονιστικό πλαίσιο συστημάτων ανίχνευσης και συναγερμού

Σύμφωνα με τον κανονισμό SOLAS CHAPTER II-2/7, ο σκοπός είναι ο εντοπισμός της πυρκαγιάς στον χώρο προέλευσης και η έγκαιρη ειδοποίηση με στόχο την ασφαλή διαφυγή και άμεση δραστηριοποίηση αναφορικά με την πυρόσβεση. Για τον σκοπό αυτό ο κανονισμός αναφέρει ότι θα πρέπει να πληρούνται οι ακόλουθες λειτουργικές απαιτήσεις:

- Θα πρέπει να υπάρχει ένα σταθερό σύστημα πυρανίχνευσης και συναγερμού, κατάλληλο για την φύση του χώρου στον οποίο είναι εγκατεστημένο, το δυναμικό ανάπτυξης μιας ενδεχόμενης πυρκαγιάς και την πιθανή παραγωγή καπνού και αερίων.
- Τα χειροκίνητα σημεία κλήσης πρέπει να τοποθετούνται αποτελεσματικά έτσι ώστε να διασφαλίζεται ένα εύκολα προσβάσιμο μέσο ειδοποίησης.
- Οι περιπολίες πυρκαγιάς πρέπει να αποτελούν ένα αποτελεσματικό μέσο για τον εντοπισμό πυρκαγιών και την ειδοποίηση της γέφυρας ναυσιπλοΐας και των πυροσβεστικών ομάδων.

3.3.1 Γενικές απαιτήσεις του κανονισμού SOLAS CHAPTER II-2/7.

- Πρέπει να παρέχεται ένα σταθερό σύστημα πυρανίχνευσης και συναγερμού σύμφωνα με τις διατάξεις του παρόντος κανονισμού. [SOLAS CHAPTER II-2/7 §2.1]
- Το σταθερό σύστημα πυρανίχνευσης και συναγερμού και το σύστημα εξαγωγής δείγματος καπνού που απαιτούνται στον παρόντα κανονισμό πρέπει να είναι εγκεκριμένου τύπου και να συνάδει με τις απαιτήσεις του κώδικα FSS (Fire Safety Systems Code). [SOLAS CHAPTER II-2/7 §2.2]
- Όταν απαιτείται σταθερό σύστημα πυρανίχνευσης και συναγερμού πυρκαγιάς για την προστασία χώρων διαφορετικών από αυτούς που καθορίζονται στην παράγραφο 5.1 του κανονισμού, τουλάχιστον ένας ανιχνευτής που συμμορφώνεται με τον Κώδικα FSS πρέπει να εγκατασταθεί σε κάθε τέτοιο χώρο. [SOLAS CHAPTER II-2/7 §2.3]

Σύστημα ανίχνευσης πυρκαγιάς σε πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων

Η πιο συνηθισμένη μορφή ανίχνευσης και κατάσβεσης πυρκαγιάς που χρησιμοποιείται στους κλειστούς χώρους φορτίου στα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, είναι ο συνδυασμός συστήματος εξαγωγής καπνού και συστήματος πυρόσβεσης διοξειδίου του άνθρακα (CO_2). Ο αέρας στους κλειστούς χώρους φορτίου εξάγεται συνεχώς μέσω του συστήματος σωληνώσεων και ελέγχεται για σωματίδια καπνού από ανιχνευτές καπνού στο χώρο CO_2 . Στο χώρο του CO_2 καθώς και στη γέφυρα και το χώρο ελέγχου του μηχανοστασίου υπάρχει ένας πίνακας ανίχνευσης που υποδεικνύει σε ποιο χώρο φορτίου έχει παραχθεί καπνός. Έπειτα από εντολή του υπεύθυνου του πλοίου μπορεί να απελευθερωθεί μέσω

απομακρυσμένου ελέγχου διοξείδιο του άνθρακα CO_2 σε συγκεκριμένο κύτος φορτίου με στόχο την κατάσβεση της πυρκαγιάς. Ανιχνευτές θερμότητας ή φλόγας δεν συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται καθότι δεν απαιτούνται συνήθως για πλοία ξηρού φορτίου από την SOLAS. [24]

Το κεφάλαιο 10 του κώδικα FSS [17] περιγράφει λεπτομερώς τις προδιαγραφές των συστημάτων ανίχνευσης μέσω εξαγωγής δείγματος καπνού σε χώρους φορτίου όπως απαιτείται από το κεφάλαιο II-2 της σύμβασης SOLAS. Οι απαιτήσεις αυτού του κεφαλαίου του κώδικα εκτός και αν ορίζεται διαφορετικά, ισχύουν για πλοία που έχουν ναυπηγηθεί από την 1η Ιανουαρίου του 2012 και μετά.

Επιπροσθέτως στο Ch. 9 §2.1.2 του κώδικα FSS προσδιορίζονται οι ακόλουθες απαιτήσεις:

Το σύστημα ανίχνευσης της πυρκαγιάς θα πρέπει να είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να δύναται να πραγματοποιεί τις ακόλουθες λειτουργίες:

- Τον έλεγχο και την παρακολούθηση των σημάτων εισόδου από όλους τους συνδεδεμένους ανιχνευτές πυρκαγιάς και καπνού και των χειροκίνητων σημείων κλήσης.
- Την παροχή σημάτων εξόδου στη γέφυρα πλοήγησης, στον συνεχώς επανδρωμένο κεντρικό σταθμό ελέγχου ή στο κέντρο ασφαλείας με σκοπό την ειδοποίηση του πληρώματος για τις συνθήκες της πυρκαγιάς και της βλάβης.
- Την παρακολούθηση των παροχών ηλεκτρικής ισχύος και των κυκλωμάτων που είναι απαραίτητα για τη λειτουργία του συστήματος, για τυχόν περιπτώσεις απώλειας ισχύος ή ύπαρξης σφάλματος.
- Το σύστημα θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα να παρέχει σε περίπτωση που διευθετηθεί με τον τρόπο αυτό, σήματα εξόδου και προς άλλα συστήματα πυρασφαλείας.

Σύμφωνα με το Ch. 9 §2.1.6 του κώδικα FSS τα σταθερά συστήματα πυρανίχνευσης και συναγερμού πυρκαγιάς με εξατομικευμένης αναγνώρισης ανιχνευτές πυρκαγιάς πρέπει να είναι διατεταγμένα έτσι ώστε:

1. Να παρέχονται μέσα που διασφαλίζουν ότι τυχόν σφάλμα (π.χ. διακοπή ρεύματος, βραχυκύκλωμα, γείωση κ.λπ.) που εμφανίζεται στον τομέα δεν θα εμποδίσει τη συνεχή εξατομικευμένη αναγνώριση των υπολοίπων συνδεδεμένων ανιχνευτών του τομέα.

2. Να γίνονται όλες οι ρυθμίσεις για να επιτραπεί η επαναφορά της αρχικής διαμόρφωσης του συστήματος σε περίπτωση βλάβης (π.χ. ηλεκτρικό, ηλεκτρονικό, κ.λπ.).

3. Ο πρώτος συναγερμός πυρκαγιάς να μην εμποδίσει κανέναν άλλο ανιχνευτή να ενεργοποιήσει περαιτέρω συναγερμούς πυρκαγιάς.

4. Κανένα τμήμα δεν θα περάσει από ένα κενό δύο φορές. Όταν αυτό δεν είναι εφικτό (π.χ. για μεγάλους κοινόχρηστους χώρους), το τμήμα του τομέα που κατ' ανάγκη διέρχεται από το χώρο για δεύτερη φορά θα τοποθετείται στη μέγιστη δυνατή απόσταση από τα άλλα μέρη του τομέα.

3.3.2 Χειροκίνητα σημεία κλήσης και ανιχνευτές

Τα χειροκίνητα σημεία κλήσης που ικανοποιούν τις απαιτήσεις του κώδικα FSS θα πρέπει να εγκαθίστανται σε όλους τους χώρους ενδιαίτησης, τους χώρους εργασίας και τους σταθμούς ελέγχου. Σε κάθε έξοδο θα πρέπει να βρίσκεται ένα χειροκίνητο σημείο κλήσης. Τα χειροκίνητα σημεία κλήσης πρέπει να είναι εύκολα προσβάσιμα στους διαδρόμους κάθε καταστρώματος έτσι ώστε κανένα τμήμα του διαδρόμου να μην απέχει περισσότερο από 20 μέτρα από ένα χειροκίνητο σημείο κλήσης. [SOLAS CHAPTER II-2/7]

Άλλες λειτουργίες πυρασφάλειας, όπως σήματα συναγερμού από τις βαλβίδες καταιωνιστήρων, ενδέχεται να επιτρέπονται εάν υπάρχουν σε ξεχωριστούς τομείς.

Ακολούθως παρατίθενται οι γενικές απαιτήσεις για τους ανιχνευτές σύμφωνα με το Ch. 9 §2.3 του κώδικα FSS:

- Οι ανιχνευτές πρέπει να λειτουργούν με θερμότητα, καπνό ή άλλα προϊόντα καύσης, φλόγα ή οποιονδήποτε συνδυασμό αυτών των παραγόντων. Οι ανιχνευτές που λειτουργούν από άλλους παράγοντες που υποδεικνύουν πυρκαγιές σε αρχικό στάδιο μπορούν να γίνουν αποδεκτά από την Σημαία, υπό τον όρο ότι δεν είναι λιγότερο ευαίσθητοι από αυτούς τους ανιχνευτές. [FSS Ch. 9 §2.3.1.1]
- Όλοι οι ανιχνευτές πρέπει να είναι τέτοιου τύπου ώστε να μπορούν να ελεγχθούν για σωστή λειτουργία και να αποκαθίσταται μετέπειτα η κανονική επιτήρηση χωρίς την ανανέωση οποιουδήποτε εξαρτήματος. [FSS Ch. 9 §2.3.1.6]
- Οι ανιχνευτές που είναι τοποθετημένοι σε επικίνδυνες περιοχές πρέπει να δοκιμάζονται και να εγκρίνονται για τέτοιου είδους λειτουργία. Οι ανιχνευτές που απαιτούνται από τον κανονισμό SOLAS II-2/20.4 και είναι εγκατεστημένοι σε χώρους που συμμορφώνονται με τον κανονισμό SOLAS II-2/20.3.2.2 δεν χρειάζεται να είναι κατάλληλοι για επικίνδυνους χώρους. Οι ανιχνευτές που είναι τοποθετημένοι σε χώρους που μεταφέρουν επικίνδυνα εμπορεύματα, που απαιτούνται από τον κανονισμό SOLAS II-2/19, πίνακας 19.3, και σύμφωνα με τον κανονισμό SOLAS II-2/19.3.2, πρέπει να είναι κατάλληλοι για επικίνδυνους χώρους. [FSS Ch. 9 §2.3.1.8]

3.3.2.1 Απαιτήσεις διάταξης εγκατεστημένων ανιχνευτών:

Οι ανιχνευτές και τα χειροκίνητα σημεία κλήσης πρέπει να ομαδοποιούνται σε τομείς. [FSS Ch. 9 §2.4.1.1]

Ένας τομέας με δυνατότητα εξατομικευμένης αναγνώρισης πρέπει να είναι διαρρυθμισμένος έτσι ώστε να μην μπορεί να υποστεί ζημιά σε περισσότερα από ένα σημεία σε περίπτωση πυρκαγιάς. [FSS Ch. 9 §2.4.3.2]

3.3.2.2 Τοποθέτηση ανιχνευτών.

Οι ανιχνευτές πρέπει να τοποθετούνται με στόχο τη βέλτιστη απόδοση σε κατάλληλες θέσεις. Θέσεις κοντά σε δοκούς και αγωγούς εξαερισμού, ή άλλες θέσεις όπου τα πρότυπα ροής αέρα θα μπορούσαν να επηρεάσουν αρνητικά την απόδοση και θέσεις όπου είναι πιθανή η ζημιά λόγω χτυπήματος ή κάποιας άλλης φυσικής αιτίας πρέπει να αποφεύγονται. Οι ανιχνευτές πρέπει να βρίσκονται στο εναέριο τμήμα σε ελάχιστη απόσταση 0,5 m μακριά από φρακτές, εκτός από τους διαδρόμους, τους φοριαμούς και τις σκάλες. [FSS Ch. 9 §2.4.2.1**]**

Η μέγιστη απόσταση μεταξύ των ανιχνευτών σύμφωνα με το FSS Ch. 9 §2.4.2.2 πρέπει να είναι όπως φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 7 Αποστάσεις για τους ανιχνευτές. [FSS Ch. 9 §2.4.2.2 TABLE 9.1]

Type of detector	Maximum floor area per detector (m^2)	Maximum distance apart between centers (m)	Maximum distance away from bulkheads
Heat	37	9	4,5
Smoke	74	11	5,5

Χώροι όπου δεν απαιτείται εγκατάσταση ανιχνευτών

Όπου απαιτείται σταθερό σύστημα πυρανίχνευσης και συναγερμού πυρκαγιάς από τον κανονισμό SOLAS II-2/7.5, οι χώροι που έχουν μικρό ή καθόλου κίνδυνο πυρκαγιάς δεν χρειάζεται να είναι εξοπλισμένοι με ανιχνευτές. Στους χώρους αυτούς περιλαμβάνονται κενοί χώροι χωρίς αποθηκευμένα εύφλεκτα υλικά, ιδιωτικά μπάνια, δημόσιες τουαλέτες, αποθήκες πυροσβεστικών μέσων, ντουλάπια εργαλείων καθαρισμού (στα οποία δεν αποθηκεύονται εύφλεκτα υγρά), χώροι επί των ανοιχτών καταστρωμάτων (open deck spaces) και κλειστοί χώροι διάβασης με μικρό ή καθόλου κίνδυνο πυρκαγιάς και που αερίζονται φυσικά από μόνιμα ανοίγματα. [FSS Ch. 9 §2.4.2.5]

3.3.2.3 Οπτικά και ακουστικά σήματα ανίχνευσης

Η ενεργοποίηση οποιουδήποτε ανιχνευτή ή χειροκίνητου σημείου κλήσης θα πρέπει να εκκινεί ένα οπτικό και ηχητικό σήμα συναγερμού πυρανίχνευσης στον πίνακα ελέγχου και στις μονάδες ένδειξης. Εάν τα σήματα δεν επιβεβαιωθούν εντός 2 λεπτών, θα πρέπει να ηχεί αυτόματα ένας ηχητικός συναγερμός πυρκαγιάς στους χώρους ενδιαίτησης και εργασίας του πληρώματος, στους σταθμούς ελέγχου και στους χώρους μηχανοστασίου κατηγορίας Α. Αυτό το σύστημα ηχητικού συναγερμού δεν είναι υποχρεωτικό να αποτελεί αναπόσπαστο μέρος του συστήματος ανίχνευσης. [FSS Ch. 9 §2.5.1.1]

3.4 Περιορισμός πυρκαγιάς

Σύμφωνα με τον κανονισμό SOLAS CHAPTER II-2/9 ο οποίος αναφέρεται στις μεθόδους περιορισμού της πυρκαγιάς, στόχος αποτελεί η ανάσχεση της πυρκαγιάς στον χώρο προέλευσής της. Για τον σκοπό αυτό πρέπει να πληρούνται οι ακόλουθες λειτουργικές απαιτήσεις:

- Το πλοίο θα πρέπει να υποδιαιρείται τόσο από θερμικά όσο και δομικά όρια.
- Στην θερμομόνωση των ορίων αυτών πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στον κίνδυνο πυρκαγιάς του χώρου και των παρακείμενων χώρων.
- Η πυρασφάλεια των διαχωριστικών πρέπει να διατηρείται στα ανοίγματα και τις οπές.

Τα πλοία όλων των τύπων θα πρέπει να υποδιαιρούνται σε χώρους με θερμικά και δομικά τμήματα λαμβάνοντας υπόψη τους κινδύνους πυρκαγιάς του χώρου. [SOLAS CHAPTER II-2/9 §2.1]

3.5 Συστήματα πυρόσβεσης

Σύμφωνα με τον κανονισμό SOLAS CHAPTER II-2/10, στόχος αποτελεί η καταστολή και ταχεία κατάσβεση της πυρκαγιάς στον χώρο προέλευσης της. Για τον σκοπό αυτό πρέπει να πληρούνται οι ακόλουθες λειτουργικές απαιτήσεις:

- Πρέπει να εγκατασταθούν σταθερά πυροσβεστικά συστήματα, λαμβάνοντας υπόψη το δυναμικό ανάπτυξης μιας ενδεχόμενης πυρκαγιάς στον χώρο που μελετάται.
- Τα συστήματα πυρόσβεσης πρέπει να είναι άμεσα διαθέσιμα.

3.5.1 Συστήματα παροχής νερού

Τα πλοία πρέπει να είναι εφοδιασμένα με πυροσβεστικές αντλίες, πυροσβεστικά δίκτυα, κρουνούς και εύκαμπτους σωλήνες που συμμορφώνονται με τις ισχύουσες απαιτήσεις του παρόντος κανονισμού. [SOLAS CHAPTER II-2/10 §2]

3.5.1.1 Πυροσβεστικά δίκτυα και κρουνοί

Γενικά

Υλικά που εύκολα καθίστανται αναποτελεσματικά από τη θερμότητα δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται για πυροσβεστικά δίκτυα και κρουνούς, εκτός εάν προστατεύονται επαρκώς. Οι σωλήνες και οι κρουνοί πρέπει να είναι τοποθετημένοι έτσι ώστε οι πυροσβεστικοί σωλήνες να μπορούν να συνδεθούν εύκολα με αυτούς. Η διάταξη των σωλήνων και των κρουνών πρέπει να είναι τέτοια ώστε να αποφεύγεται η πιθανότητα παγώματος. Πρέπει να προβλέπονται κατάλληλες παροχές αποστράγγισης για τις κύριες

σωληνώσεις πυρκαγιάς. Θα πρέπει να υπάρχουν ανεπίστροφες βαλβίδες για όλους τους κύριους κλάδους πυρκαγιάς ανοιχτού καταστρώματος που χρησιμοποιούνται για σκοπούς διαφορετικούς από την πυρόσβεση. Σε πλοία όπου μπορεί να μεταφερθεί φορτίο στο κατάστρωμα, οι θέσεις των κρουνών πρέπει να είναι τέτοιες ώστε να είναι πάντα εύκολα προσβάσιμοι και οι σωλήνες πρέπει να είναι τοποθετημένοι με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγεται ο κίνδυνος ζημιάς από το μεταφερόμενο φορτίο. [SOLAS CHAPTER II-2/10 §2.1.1]

Σε ένα περιοδικά αφύλακτο χώρο μηχανοστασίου ή στην περίπτωση που απαιτείται μόνο ένα άτομο σε επιφυλακή, θα πρέπει να υπάρχει άμεση παροχή νερού από το κύριο πυροσβεστικό δίκτυο σε κατάλληλη πίεση είτε με απομακρυσμένη εκκίνηση μίας εκ των κύριων πυροσβεστικών αντλιών από τη γέφυρα ναυσιπλοΐας και σταθμό ελέγχου πυρκαγιάς εάν υπάρχει ή με μόνιμη ύπαρξη πίεσης του κύριου δικτύου πυρκαγιάς από μία από τις κύριες πυροσβεστικές αντλίες εκτός εάν η Σημαία εξαιρέσει τα φορτηγά πλοία ολικής χωρητικότητας μικρότερης των 1600 τόνων από την απαίτηση, εάν η διάταξη εκκίνησης της πυροσβεστικής αντλίας στον χώρο μηχανοστασίου είναι σε θέση εύκολα προσβάσιμη. [SOLAS CHAPTER II-2/10 §2.1.2.2.2]

3.5.1.2 Διάμετρος αγωγού κύριου πυροσβεστικού δικτύου.

Η διάμετρος του αγωγού του κύριου πυροσβεστικού δικτύου και των σωλήνων παροχής νερού πρέπει να είναι επαρκής για την αποτελεσματική κατανομή της μέγιστης απαιτούμενης παροχής σε δύο πυροσβεστικές αντλίες που λειτουργούν ταυτόχρονα. Στην περίπτωση φορτηγών πλοίων η διάμετρος πρέπει να είναι τέτοια ώστε η παροχή νερού να είναι 140 m^3/h. [SOLAS CHAPTER II-2/10 §2.1.3]

3.5.1.3 Αριθμός και θέση πυροσβεστικών κρουνών.

Ο αριθμός και η θέση των κρουνών πρέπει να είναι τέτοια ώστε τουλάχιστον δύο πίδακες νερού που δεν προέρχονται από τον ίδιο κρουνό, ένας από τους οποίους πρέπει να είναι από έναν μόνο σωλήνα, να μπορούν να φτάσουν σε οποιοδήποτε μέρος του πλοίου που είναι συνήθως προσβάσιμο στους επιβάτες ή το πλήρωμα κατά την διάρκεια υπηρεσίας του πλοίου και οποιοδήποτε μέρος οποιουδήποτε χώρου φορτίου όταν είναι άδειο, οποιοδήποτε χώρο ro-ro ή οποιουδήποτε χώρου οχημάτων, όπου στην τελευταία περίπτωση οι δύο πίδακες νερού πρέπει να φτάνουν σε οποιοδήποτε μέρος του χώρου, το καθένα από ένα μόνο μήκος εύκαμπτου πυροσβεστικού σωλήνα. Επιπλέον, τέτοιοι κρουνοί θα πρέπει να τοποθετούνται κοντά στις προσβάσεις των προστατευόμενων χώρων. [SOLAS CHAPTER II-2/10 §2.1.5.1]

3.5.1.4 Πίεση στους κρουνούς

Σύμφωνα με την παράγραφο SOLAS CHAPTER II-2/10 §2.1.6.2, με τις δύο αντλίες να παρέχουν ταυτόχρονα νερό μέσω των ακροφυσίων που καθορίζονται στην παράγραφο

SOLAS CHAPTER II-2/10 §2.3.3, με την ποσότητα νερού όπως ορίζεται στην παράγραφο SOLAS CHAPTER II-2/10 §2.1.3, μέσω οποιουδήποτε παρακείμενου κρουνού, οι ακόλουθες ελάχιστες πιέσεις πρέπει να διατηρούνται σε όλους τους κρουνούς:

Για φορτηγά πλοία:

- Ολικής χωρητικότητας 6000 τόνων και άνω : 0.27 N/mm²
- Ολικής χωρητικότητας μικρότερης των 6000 τόνων : 0.25 N/mm²

Χειρισμός εύκαμπτων πυροσβεστικών σωλήνων

Η μέγιστη πίεση σε οποιοδήποτε κρουνό δεν πρέπει να υπερβαίνει εκείνη στην οποία μπορεί να αποδειχθεί μη αποτελεσματικός ο έλεγχος ενός εύκαμπτου πυροσβεστικού σωλήνα. [SOLAS CHAPTER II-2/10 §2.1.6.3]

3.5.1.5 Σημεία χερσαίας σύνδεσης

Γενικά

Τα πλοία ολικής χωρητικότητας 500 τόνων και άνω πρέπει να διαθέτουν τουλάχιστον ένα σημείο σύνδεσης διεθνών προδιαγραφών με την ξηρά σύμφωνα με τον κώδικα FSS. [SOLAS CHAPTER II-2/10 §2.1.7.1]

Διαθεσιμότητα και αναμονή στις δύο πλευρές του πλοίου

Πρέπει να υπάρχουν διαθέσιμες εγκαταστάσεις που επιτρέπουν τη χρήση μιας τέτοιας σύνδεσης και στις δύο πλευρές του πλοίου. [SOLAS CHAPTER II-2/10 §2.1.7.2]

Η διεθνούς τύπου σύνδεση με την ξηρά, τοποθετημένη τόσο στους λιμένες όσο και στη δεξιά πλευρά του πλοίου στην περιοχή του καταστρώματος, είναι υψίστης σημασίας για την παροχή εξωτερικής βοήθεια στα λιμάνια. Η πυροσβεστική μπορεί να συνδέσει έναν πυροσβεστικό σωλήνα στο τυποποιημένο σημείο χερσαίας σύνδεσης και να τροφοδοτήσει το σύστημα κατάσβεσης θαλασσινού νερού του πλοίου με νερό για την πυρόσβεση. [24]

3.5.1.6 Πυροσβεστικές αντλίες και συστήματα σωληνώσεων

Αντλίες αποδεκτές ως πυροσβεστικές αντλίες:

Οι αντλίες υγιεινής, έρματος, αποστράγγισης ή γενικής χρήσης μπορούν να γίνουν δεκτές ως πυροσβεστικές αντλίες, υπό τον όρο ότι δεν χρησιμοποιούνται κανονικά για άντληση πετρελαίου και ότι εάν υπόκεινται σε περιστασιακή εργασία για τη μεταφορά ή την άντληση καυσίμου πετρελαίου, πρέπει να έχουν γίνει κατάλληλες ρυθμίσεις για την εναλλαγή. [SOLAS CHAPTER II-2/10 §2.2.1]

Αριθμός πυροσβεστικών αντλιών

Τα πλοία πρέπει να διαθέτουν ανεξάρτητες πυροσβεστικές αντλίες και συγκεκριμένα όπως αναφέρει ο κανονισμός για φορτηγά πλοία ολικής χωρητικότητας (Gross Tonnage) άνω των 1000 τόνων θα πρέπει να υπάρχουν τουλάχιστον δύο. [SOLAS CHAPTER II-2/10 §2.2.2]

Πρόσθετες αντλίες για φορτηγά πλοία

Επιπλέον, σε φορτηγά πλοία όπου άλλες αντλίες, όπως γενικής χρήσης, αποστράγγισης και έρματος, κ.λπ., τοποθετούνται σε χώρους μηχανοστασίου, πρέπει να γίνονται ρυθμίσεις ώστε να διασφαλίζεται ότι τουλάχιστον μία από αυτές τις αντλίες, οι οποίες έχουν την παροχή και πίεση που αναγράφεται στις παραγράφους 2.1.6.2 και 2.2.4.2 του κανονισμού SOLAS CHAPTER II-2/10 είναι ικανή να παρέχει νερό στο πυροσβεστικό δίκτυο. [SOLAS CHAPTER II-2/10 §2.2.3.3]

Παροχή πυροσβεστικών αντλιών

Συνολική παροχή των απαιτούμενων πυροσβεστικών αντλιών

Οι απαιτούμενες πυροσβεστικές αντλίες πρέπει να είναι ικανές να παρέχουν για πυροσβεστικούς σκοπούς ποσότητα νερού, στην πίεση που καθορίζεται στην παράγραφο SOLAS CHAPTER II-2/10 §2.1.6, ως εξής:

Αντλίες στα φορτηγά πλοία, εκτός από οποιαδήποτε αντλία έκτακτης ανάγκης:

Η ποσότητα νερού δεν θα πρέπει να είναι μικρότερη από τα τέσσερα τρίτα της ποσότητας που απαιτείται σύμφωνα με τον κανονισμό SOLAS II-1/21 να παρέχεται από καθεμία από τις ανεξάρτητες αντλίες αποστράγγισης σε ένα επιβατηγό πλοίο ίδιων διαστάσεων όταν πραγματοποιείται άντληση από τις αντλίες αποστράγγισης, υπό την προϋπόθεση ότι σε κανένα φορτηγό πλοίο δεν χρειάζεται η συνολική απαιτούμενη ικανότητα των πυροσβεστικών αντλιών να υπερβαίνει τα 180 m^3/h. [SOLAS CHAPTER II-2/10 §2.2.4.1.2]

Κάθε μία από τις απαιτούμενες πυροσβεστικές αντλίες (εκτός από οποιαδήποτε αντλία έκτακτης ανάγκης που απαιτείται στην παράγραφο SOLAS CHAPTER II-2/10 §2.2.3.1.2 για φορτηγά πλοία) πρέπει να έχει παροχή τουλάχιστον 80% της συνολικής απαιτούμενης παροχής διαιρεμένη με τον ελάχιστο αριθμό απαιτούμενων πυροσβεστικών αντλιών, αλλά σε κάθε περίπτωση όχι μικρότερη από 25 m^3/h, και κάθε τέτοια αντλία πρέπει σε κάθε περίπτωση να είναι ικανή να παρέχει τουλάχιστον τους δύο απαιτούμενους πίδακες νερού. Αυτές οι πυροσβεστικές αντλίες πρέπει να είναι ικανές να τροφοδοτούν το κύριο πυροσβεστικό δίκτυο υπό τις απαιτούμενες συνθήκες. Όταν εγκαθίστανται περισσότερες αντλίες από τις ελάχιστες απαιτούμενες, αυτές οι πρόσθετες αντλίες πρέπει να έχουν παροχή τουλάχιστον 25 m^3/h και να μπορούν να παρέχουν τουλάχιστον τους δύο πίδακες νερού που απαιτούνται στην παράγραφο SOLAS CHAPTER II-2/10 §2.1.5.1 . [SOLAS CHAPTER II-2/10 §2.2.4.2]

3.5.2 Πυροσβεστικοί σωλήνες και ακροφύσια

Γενικές προδιαγραφές

Σύμφωνα με την παράγραφο SOLAS CHAPTER II-2/10 §2.3.1 οι πυροσβεστικοί σωλήνες πρέπει να είναι από μη φθειρόμενο υλικό εγκεκριμένο από την Σημαία και να είναι επαρκείς σε μήκος για να εκτοξεύουν πίδακα νερού σε οποιονδήποτε από τους χώρους στους οποίους μπορεί να χρειαστεί να χρησιμοποιηθούν. Κάθε σωλήνας πρέπει να είναι εφοδιασμένος με ένα ακροφύσιο και τους απαραίτητους συνδέσμους. Οι εύκαμπτοι πυροσβεστικοί σωλήνες που καθορίζονται σε αυτό το κεφάλαιο ως "σωλήνες πυρόσβεσης", μαζί με τυχόν απαραίτητα εξαρτήματα και εργαλεία, πρέπει να διατηρούνται έτοιμοι για χρήση σε εμφανείς θέσεις κοντά στους κρουνούς ή τις συνδέσεις της παροχής νερού. Οι πυροσβεστικοί σωλήνες πρέπει να έχουν μήκος τουλάχιστον 10 m, αλλά όχι περισσότερο από:

- 15 m σε χώρους μηχανοστασίου.
- 20 m σε άλλους χώρους και ανοιχτά καταστρώματα.
- 25 m για ανοιχτά καταστρώματα σε πλοία με μέγιστο πλάτος άνω των 30 m.

Σε φορτηγά πλοία ολικής χωρητικότητας 1000 τόνων και άνω ο αριθμός των εύκαμπτων πυροσβεστικών σωλήνων που παρέχονται θα πρέπει να είναι ένας για κάθε 30 μέτρα μήκους του πλοίου και ένας εφεδρικός , αλλά σε καμία περίπτωση λιγότεροι από πέντε συνολικά. Στον αριθμό αυτό δεν περιλαμβάνονται σωλήνες που απαιτούνται σε οποιοδήποτε μηχανοστάσιο ή λεβητοστάσιο. Η Σημαία μπορεί να αυξήσει τον αριθμό των εύκαμπτων πυροσβεστικών σωλήνων που απαιτούνται ώστε να διασφαλίσει ότι είναι διαθέσιμοι και προσβάσιμοι επαρκείς σε αριθμό σωλήνες ανά πάσα στιγμή λαμβάνοντας υπόψη τον τύπο του πλοίου και τη φύση του εμπορίου στο οποίο χρησιμοποιείται. Τα πλοία που μεταφέρουν επικίνδυνα εμπορεύματα σύμφωνα με τον κανονισμό 19 πρέπει να διαθέτουν τρεις εύκαμπτους σωλήνες και ακροφύσια, επιπλέον των απαιτούμενων παραπάνω. [SOLAS CHAPTER II-2/10 §2.3.2.3.1]

3.5.3 Πρόσθετες απαιτήσεις (σύμφωνα με τις τροποποιήσεις στην σύμβαση SOLAS με την απόφαση MSC.365(93)).

Στους χώρους φορτίου με άνοιγμα στο άνω μέρος και στους χώρους φορτίου επί του καταστρώματος πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων κατασκευασμένων από την 1^{η} Ιανουαρίου 2016 και μετά θα πρέπει να υπάρχουν διατάξεις πυροπροστασίας με σκοπό τον περιορισμό της πυρκαγιάς στο χώρο ή την περιοχή προέλευσής της και την ψύξη των παρακείμενων χώρων για την αποτροπή εξάπλωσής της και τον περιορισμό των δομικών ζημιών. [SOLAS CHAPTER II-2/10 §7.1.2]

Στην παράγραφο SOLAS CHAPTER II-2/10 §7.3 παρατίθενται οι διατάξεις πυροπροστασίας για πλοία με ημερομηνία κατασκευής την 1^{η} Ιανουαρίου 2016 και μετά που έχουν σχεδιαστεί για να μεταφέρουν εμπορευματοκιβώτια επί του καταστρώματος καιρού:

- Τα πλοία πρέπει να φέρουν επιπρόσθετα του εξοπλισμού και των διατάξεων που απαιτούνται από τις παραγράφους 1 και 2 , τουλάχιστον ένα ακροσωλήνιο ομίχλης νερού (water mist lance). [SOLAS CHAPTER II-2/10 §7.3.1]
- Το ακροσωλήνιο ομίχλης νερού (water mist lance) θα πρέπει να αποτελείται από ένα σωλήνα με ένα ακροφύσιο διάτρησης ικανό να διεισδύει στο τοίχωμα ενός εμπορευματοκιβωτίου και να παράγει νέφος νερού σε ένα περιορισμένο χώρο (εμπορευματοκιβώτιο κ.λπ.) όταν συνδέεται στο πυροσβεστικό δίκτυο. [SOLAS CHAPTER II-2/10 §7.3.1.1]
- Σύμφωνα με την παράγραφο SOLAS CHAPTER II-2/10 §7.3.2, πλοία που έχουν σχεδιαστεί να μεταφέρουν πέντε ή περισσότερες σειρές (tiers) εμπορευματοκιβωτίων επί του καταστρώματος καιρού θα πρέπει να φέρουν επιπλέον των απαιτούμενων από την παράγραφο 7.3.1, φορητούς εκτοξευτήρες νερού (mobile water monitors) ως εξής:
    1. Τα πλοία με πλάτος λιγότερο των 30 μέτρων τουλάχιστον 2 φορητούς εκτοξευτήρες νερού (mobile water monitors)
    2. Τα πλοία με πλάτος 30 μέτρα ή περισσότερο τουλάχιστον 4 φορητούς εκτοξευτήρες νερού.
- Οι φορητοί εκτοξευτήρες νερού, όλοι οι απαραίτητοι εύκαμπτοι σωλήνες , τα εξαρτήματα και η απαιτούμενη στερέωση θα πρέπει να διατηρούνται έτοιμα για χρήση σε θέση έξω από το χώρο φορτίου που δεν είναι πιθανό να αποκοπεί σε περίπτωση πυρκαγιάς στους χώρους φορτίου. [SOLAS CHAPTER II-2/10 §7.3.2.1]
- Σύμφωνα με την παράγραφο SOLAS CHAPTER II-2/10 §7.3.2.2, πρέπει να παρέχεται επαρκής αριθμός πυροσβεστικών κρουνών έτσι ώστε:
    1. Όλα οι παρεχόμενοι φορητοί εκτοξευτήρες νερού να μπορούν να λειτουργούν ταυτόχρονα για τη δημιουργία αποτελεσματικών υδάτινων φραγμάτων εμπρός και πίσω από κάθε container bay[2].
    2. Οι δύο πίδακες νερού που απαιτούνται από την παράγραφο 2.1.5.1 να μπορούν να τροφοδοτούνται με την πίεση που απαιτείται από την παράγραφο 2.1.6.
    3. Κάθε ένας από τους φορητούς εκτοξευτήρες νερού να τροφοδοτείται από ξεχωριστούς κρουνούς με την πίεση που απαιτείται ώστε να φτάνει στην ανώτερη σειρά (tier) εμπορευματοκιβωτίων στο κατάστρωμα.
- Οι φορητοί εκτοξευτήρες νερού μπορούν να τροφοδοτούνται από το κύριο πυροσβεστικό δίκτυο με την προϋπόθεση ότι η παροχή των πυροσβεστικών αντλιών και η διάμετρος του πυροσβεστικού δικτύου είναι επαρκή για την ταυτόχρονη λειτουργία των κινητών μόνιτορ νερού και δύο πιδάκων νερού από πυροσβεστικούς σωλήνες στις απαιτούμενες πιέσεις. Στην περίπτωση μεταφοράς επικίνδυνων εμπορευμάτων, η παροχή των πυροσβεστικών αντλιών και η διάμετρος του πυροσβεστικού δικτύου θα πρέπει να συμμορφώνονται επίσης με τον κανονισμό 19.3.1.5, σε ότι αφορά τους χώρους φορτίου επί του καταστρώματος. [SOLAS CHAPTER II-2/10 §7.3.2.3]
- Η λειτουργική απόδοση κάθε φορητού εκτοξευτήρα νερού πρέπει να ελέγχεται κατά την αρχική επιθεώρηση επί του πλοίου προς ικανοποίηση της αρχής. Ο έλεγχος θα πρέπει να επαληθεύει ότι:

[2] A bay is an athwartship block of containers associated with a hatch or hatch cover containing multiple stacks extending longitudinally between two adjacent bridges or lashing stations. [2]

1. Ο φορητός εκτοξευτήρας νερού μπορεί να στερεωθεί με ασφάλεια στο πλοίο διασφαλίζοντας την ασφαλή και αποτελεσματική λειτουργία.
2. Ο πίδακας νερού από τον φορητό εκτοξευτήρα νερού φτάνει την ανώτερη σειρά (tier) των εμπορευματοκιβωτίων ενώ λειτουργούν ταυτόχρονα όλα οι απαιτούμενοι φορητοί εκτοξευτήρες νερού και πίδακες νερού από τους πυροσβεστικούς σωλήνες.

Ο νηογνώμονας ABS θέτει στους κανονισμούς του [2] τις ακόλουθες εξής απαιτήσεις για πλοία προοριζόμενα να μεταφέρουν εμπορευματοκιβώτια επί του καταστρώματος καιρού:

Ανεξάρτητη παροχή νερού

Σε περιπτώσεις όπου οι φορητοί εκτοξευτήρες νερού που ορίζονται στο [ABS MVR 5C-5-7/3.5.2] τροφοδοτούνται από ξεχωριστές αντλίες και σύστημα σωληνώσεων, η συνολική παροχή των κύριων πυροσβεστικών αντλιών δεν χρειάζεται να υπερβαίνει τα 180m^3/h (792 gpm) και η διάμετρος των σωληνώσεων χρειάζεται να είναι τόση ώστε να είναι επαρκής για παροχή 140m^3/h (616 gpm). [ABS MVR 5C-5-7/3.5.4 (b)]

Ως διάμετρος των σωληνώσεων ορίζεται η διάμετρος του κύριου πυροσβεστικού δικτύου και των σωληνώσεων παροχής νερού. [ABS MVR 5C-5-7/3.5.4 (a)]

Παροχή νερού από τις κύριες πυροσβεστικές αντλίες

Σε περιπτώσεις που οι φορητοί εκτοξευτήρες νερού τροφοδοτούνται από τις κύριες πυροσβεστικές αντλίες, η συνολική παροχή των απαιτούμενων κύριων πυροσβεστικών αντλιών και η διάμετρος των σωληνώσεων πρέπει να είναι επαρκής για την ταυτόχρονη τροφοδότηση του απαιτούμενου αριθμού εύκαμπτων πυροσβεστικών σωλήνων και των κινητών μόνιτορ νερού που καθορίζονται στο κεφάλαιο ABS MVR 5C-5-7/3.5.2, ευρισκόμενα στην πιο απομακρυσμένη υδραυλική διάταξη. Εντούτοις η παροχή δεν πρέπει να είναι μικρότερη από αυτή που ορίζεται στο ABS MVR 4-7-3/1.3. [ABS MVR 5C-5-7/3.5.4(c)]

Μεταφορά επικίνδυνων φορτίων

Σύμφωνα με την παράγραφο ABS MVR 5C-5-7/3.5.4(d) όπου πρόκειται να μεταφερθούν επικίνδυνα εμπορεύματα και οι φορητοί εκτοξευτήρες νερού και το «σύστημα ψεκασμού νερού» (σταθερή διάταξη ακροφυσίων ψεκασμού νερού ή πλημμύρας του χώρου φορτίου με νερό) που απαιτούνται από το ABS MVR 4-7-2/7.3.1(c) τροφοδοτούνται από τις κύριες πυροσβεστικές αντλίες, η συνολική παροχή των κύριων πυροσβεστικών αντλιών και η διάμετρος των σωληνώσεων χρειάζεται να είναι επαρκής μόνο για την τροφοδοσία όποιου από τα παρακάτω είναι μεγαλύτερο:

1. Οι φορητοί εκτοξευτήρες νερού του ABS MVR 5C-5-7/3.5.2 και τα τέσσερα ακροφύσια που απαιτούνται από ABS MVR 4-7-2/7.3.1(b)
2. Τα τέσσερα ακροφύσια που απαιτούνται από το ABS MVR 4-7-2/7.3.1(b) και το σύστημα ψεκασμού νερού που απαιτείται από το ABS MVR 4-7-2/7.3.1(c). Ωστόσο, η συνολική χωρητικότητα δεν πρέπει να είναι μικρότερη από αυτή που καθορίζεται στο ABS MVR 4-7-3/1.3 ή 180 m^3/h (792 gpm), όποιο από τα δύο είναι μικρότερο.

Παροχή πυροσβεστικής αντλίας έκτακτης ανάγκης

Η συνολική παροχή της πυροσβεστικής αντλίας έκτακτης ανάγκης δεν χρειάζεται να υπερβαίνει τα 72 m^3/h (317 gpm) . [ABS MVR 5C-5-7/3.5.4(e)]

Πρότυπα

Οι φορητοί εκτοξευτήρες νερού πρέπει να συμμορφώνονται με τις οδηγίες IMO MSC.1/Circ.1472 (Guidelines for the design, performance, testing and approval of mobile water monitors used for the protection of on-deck cargo areas of ships designed and constructed to carry five or more tiers of containers on or above the weather deck) ή ισοδύναμα διεθνή πρότυπα. [ABS MVR 5C-5-7/3.5.2(c)]

3.5.4 Σταθερά συστήματα πυρόσβεσης

3.5.4.1 Είδη συστημάτων

Ένα σταθερό σύστημα πυρόσβεσης που απαιτείται από την παράγραφο 5 του κανονισμού SOLAS CHAPTER II-2/10 μπορεί να είναι οποιοδήποτε από τα ακόλουθα συστήματα:

- Ένα σταθερό σύστημα πυρόσβεσης αερίου που συμμορφώνεται με τις διατάξεις του Κώδικα FSS. [SOLAS CHAPTER II-2/10 §4.1.1.1]
- Ένα σταθερό σύστημα πυρόσβεσης με αφρό υψηλής διαστολής που συμμορφώνεται με τις διατάξεις του Κώδικα FSS. [SOLAS CHAPTER II-2/10 §4.1.1.2]
- Ένα Σύστημα πυρόσβεσης σταθερής πίεσης με ψεκασμό νερού που συμμορφώνεται με τις διατάξεις του FSS. [SOLAS CHAPTER II-2/10 §4.1.1.3]
- Όταν εγκαθίσταται ένα σταθερό πυροσβεστικό σύστημα που δεν απαιτείται από το παρόν κεφάλαιο, θα πρέπει να πληροί τις απαιτήσεις των σχετικών κανονισμών αυτού του κεφαλαίου SOLAS CHAPTER II-2/10 §4 και του FSS.

3.5.4.2 Μη επιτρεπόμενες ουσίες προς χρήση για την πυρόσβεση.

Απαγορεύονται τα συστήματα πυρόσβεσης που χρησιμοποιούν Halon 1211, 1301 και 2402 και υπερφθοράνθρακες. [SOLAS CHAPTER II-2/10 §4.1.3]

Γενικά, η Σημαία δεν θα πρέπει να επιτρέπει τη χρήση ατμού ως μέσου πυρόσβεσης σε σταθερά πυροσβεστικά συστήματα. Όταν η χρήση ατμού επιτρέπεται από την Σημαία, θα χρησιμοποιείται μόνο σε περιορισμένες περιοχές ως προσθήκη στο απαιτούμενο σύστημα πυρόσβεσης και θα συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις του κώδικα FSS. [SOLAS CHAPTER II-2/10 §4.1.4]

3.5.4.3 Ανοίγματα στους προστατευόμενους χώρους

Μέθοδοι απομόνωσης για σταθερά συστήματα πυρόσβεσης αερίου.

Όταν χρησιμοποιείται ένα σταθερό σύστημα πυρόσβεσης αερίου, τα ανοίγματα που επιτρέπουν την εισαγωγή αέρα σε έναν προστατευμένο χώρο ή επιτρέπουν τη διαφυγή αερίου από αυτόν πρέπει να μπορούν να κλείνονται από έξω από τον προστατευόμενο χώρο. [SOLAS CHAPTER II-2/10 §4.2]

Πρέπει να παρέχεται διακόπτης πίεσης ή άλλη συσκευή για την αυτόματη απενεργοποίηση του ηλεκτρικού εξαερισμού που εξυπηρετεί τον προστατευόμενο χώρο πριν από την απόρριψη του μέσου πυρόσβεσης στον χώρο. Διακόπτες πίεσης ή άλλες συσκευές πρέπει να βρίσκονται εκτός του προστατευόμενου χώρου. [ABS MVR 4-7-3/3.1.3]

3.5.5 Διατάξεις πυρόσβεσης σε χώρους φορτίου

3.5.5.1 Σύστημα πυρόσβεσης σε χώρους φορτίου φορτηγών πλοίων

Εκτός από τους χώρους ro-ro και οχημάτων, οι χώροι φορτίου σε φορτηγά πλοία ολικής χωρητικότητας 2000 τόνων και άνω θα πρέπει να προστατεύονται από σταθερό σύστημα πυρόσβεσης διοξειδίου του άνθρακα ή αδρανούς αερίου που συμμορφώνεται με τις διατάξεις του Κώδικα FSS ή με σύστημα πυρόσβεσης που παρέχει ισοδύναμη προστασία. [SOLAS CHAPTER II-2/10 §7.1.3]

3.5.5.2 Σταθερά συστήματα κατάσβεσης διοξειδίου του άνθρακα (CO_2)

Ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) για τους χώρους φορτίου.

Για χώρους φορτίου, η διαθέσιμη ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα πρέπει να είναι, εκτός εάν προβλέπεται διαφορετικά, επαρκής για να δώσει ελάχιστο όγκο ελεύθερου αερίου ίσο με το 30% του ακαθάριστου όγκου (gross volume) του μεγαλύτερου χώρου φορτίου που πρέπει να προστατεύεται στο πλοίο. [ABS MVR 4-7-3/3.3]

Ρυθμός απελευθέρωσης διοξειδίου του άνθρακα (CO_2).

Για τους χώρους μηχανοστασίου, το σταθερό σύστημα σωληνώσεων πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να μπορεί να εκκενωθεί το 85% του αερίου στο χώρο μέσα σε 2 λεπτά. Για εμπορευματοκιβώτια και γενικούς χώρους φορτίου (που προορίζονται κυρίως για τη μεταφορά ποικίλων φορτίων χωριστά ασφαλισμένων ή συσκευασμένων) το σταθερό σύστημα σωληνώσεων πρέπει να είναι τέτοιο ώστε τουλάχιστον τα δύο τρίτα του αερίου να μπορεί να εκκενωθεί στον χώρο εντός 10 λεπτών. Για χώρους φορτίου στερεών χύδην το σταθερό σύστημα σωληνώσεων πρέπει να είναι τέτοιο ώστε τουλάχιστον τα δύο τρίτα του αερίου να μπορούν να εκκενωθούν στο χώρο εντός 20 λεπτών. Τα χειριστήρια του

συστήματος πρέπει να είναι διατεταγμένα έτσι ώστε να επιτρέπουν το ένα τρίτο, τα δύο τρίτα ή ολόκληρη την ποσότητα του αερίου να εκκενωθεί με βάση την κατάσταση φόρτωσης του κύτους φορτίου. [ABS MVR 4-7-3/3.3.4]

Ηχητικός συναγερμός προειδοποίησης απελευθέρωσης πυροσβεστικού μέσου.

Πρέπει να παρέχονται μέσα για την αυτόματη ηχητική και οπτική προειδοποίηση κατά την απελευθέρωση του πυροσβεστικού μέσου σε οποιουσδήποτε χώρους ro-ro, κύτη φορτίου εμπορευματοκιβωτίων με εμπορευματοκιβώτια reefer , χώρους προσβάσιμους από πόρτες ή καταπακτές και άλλους χώρους στους οποίους συνήθως εργάζεται το προσωπικό ή στους οποίους έχει πρόσβαση. Οι ηχητικοί συναγερμοί πρέπει να τοποθετούνται έτσι ώστε να ακούγονται σε όλο τον προστατευμένο χώρο με όλα τα μηχανήματα σε λειτουργία, και οι συναγερμοί πρέπει να διακρίνονται από άλλους ηχητικούς συναγερμούς με ρύθμιση της ηχητικής πίεσης ή των ηχητικών μοτίβων. Ο συναγερμός πριν από την απελευθέρωση πρέπει να ενεργοποιείται αυτόματα, π.χ. ανοίγοντας την πόρτα του θαλάμου απελευθέρωσης. Ο συναγερμός πρέπει να λειτουργεί για το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την εκκένωση του χώρου, αλλά σε καμία περίπτωση λιγότερο από 20 δευτερόλεπτα πριν απελευθερωθεί το μέσο. [ABS MVR 4-7-3/3.1.5]

3.5.5.3 Σταθερά συστήματα πυρόσβεσης αερίου για πλοία που μεταφέρουν επικίνδυνα εμπορεύματα

Ένα πλοίο που μεταφέρει επικίνδυνα εμπορεύματα σε οποιουσδήποτε χώρους φορτίου πρέπει να είναι εφοδιασμένο με σταθερό σύστημα πυρόσβεσης διοξειδίου του άνθρακα ή αδρανούς αερίου σύμφωνα με τις διατάξεις του κώδικα FSS ή με σύστημα πυρόσβεσης το οποίο, κατά τη γνώμη της Σημαίας, παρέχει ισοδύναμη προστασία για τα μεταφερόμενα φορτία. [SOLAS CHAPTER II-2/10 §7.2]

3.5.5.4 Απαιτήσεις για χώρους ξηρού φορτίου που προορίζονται για μεταφορά επικίνδυνων εμπορευμάτων

Τα πλοία αυτά θα πρέπει να πληρούν τις απαιτήσεις του SOLAS CHAPTER II-2/10 §7.2. Επιπλέον σύμφωνα με τον ABS τα πλοία αυτά πρέπει επίσης να συμμορφώνονται με τις απαιτήσεις που αναγράφονται στο κεφάλαιο ABS MVR 4-7-2/7.3.

Ακολούθως παρατίθενται οι απαιτήσεις του εν λόγω κεφαλαίου του ABS οι οποίες εμπίπτουν σε χώρους ξηρού φορτίου πλοίων που προορίζονται για μεταφορά επικίνδυνων εμπορευμάτων.

Πέραν της συμμόρφωσης με το κεφάλαιο 4-7-2/7.1.2 του Marine Vessel Rules της ABS (που ισοδυναμεί με την απαίτηση SOLAS CHAPTER II-2/10 §7.2), οι απαιτήσεις που καθορίζονται στα κεφάλαια ABS MVR 4-7-3/7.3.1 έως 4-7-2/7.3.10 ισχύουν για πλοία και χώρους φορτίου που προορίζονται για τη μεταφορά επικίνδυνων εμπορευμάτων, εκτός από τις περιπτώσεις μεταφοράς επικίνδυνων εμπορευμάτων σε περιορισμένες ποσότητες και

εξαιρούμενων ποσοτήτων όπως αναφέρεται στα κεφάλαια του κώδικα IMDG (International Maritime Dangerous Goods Code) του IMO αντίστοιχα. [ABS MVR 4-7-2/7.3]

Πλοία εξειδικευμένων μεταφορών, όπως πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, πλοία ro-ro και μεταφοράς οχημάτων (vehicle carriers) και πλοία μεταφοράς φορτίου χύδην που προορίζονται για τη μεταφορά επικίνδυνων εμπορευμάτων πρέπει να συμμορφώνονται με τις ισχύουσες απαιτήσεις των κεφαλαίων 4-7-2/7.3.1 έως και 4-7-2/7.3.10 όπως υποδεικνύεται και στο κεφάλαιο ABS MVR 5C για κάθε έναν από αυτούς του συγκεκριμένους τύπους πλοίων. [ABS MVR 4-7-2/7.3]

Παροχή νερού. (water supplies).

Διαθεσιμότητα νερού:

Θα πρέπει να έχουν γίνει ρυθμίσεις για την εξασφάλιση άμεσης διαθεσιμότητας παροχής νερού από το πυροσβεστικό δίκτυο στην απαιτούμενη πίεση είτε με ύπαρξη μόνιμης πίεσης είτε με κατάλληλα τοποθετημένες διατάξεις απομακρυσμένης εκκίνησης για τις πυροσβεστικές αντλίες. Η συνολική απαιτούμενη παροχή νερού για πυρόσβεση πρέπει να ικανοποιεί τα κεφάλαια ABS MVR 4-7-2/7.3.1(b) και 4-7-2/7.3.1(c) που υπολογίζεται ταυτόχρονα για τον μεγαλύτερο καθορισμένο χώρο φορτίου. [ABS MVR 4-7-2/7.3.1(a)]

Ποσότητα νερού:

Η ποσότητα του νερού που παρέχεται πρέπει να μπορεί να τροφοδοτήσει τέσσερα ακροφύσια σε πίεση και μέγεθος όπως καθορίζονται στα κεφάλαια ABS MVR 4-7-3/1.7 και ABS MVR 4-7-3/1.15 ικανά να φτάνουν σε οποιοδήποτε μέρος του χώρου φορτίου όταν είναι άδειο. Αυτή η ποσότητα νερού μπορεί να εφαρμοστεί με ισοδύναμα μέσα, οι οποίες διατάξεις των μέσων αυτών θα πρέπει να υποβληθούν για έγκριση στον ABS. Η απαιτούμενη παροχή πρέπει να καλύπτεται από τη συνολική παροχή των κύριων πυροσβεστικών αντλιών χωρίς να περιλαμβάνεται η παροχή της πυροσβεστικής αντλίας έκτακτης ανάγκης. [ABS MVR 4-7-2/7.3.1(b)]

Ψύξη χώρου φορτίου κάτω από το κατάστρωμα

Πρέπει να παρέχονται μέσα για την αποτελεσματική ψύξη του καθορισμένου χώρου φορτίου κάτω από το κατάστρωμα κατά τουλάχιστον 5 liters/min/m^2 (0,12 gal/min/ft^2) στην οριζόντια περιοχή των χώρων φορτίου, είτε με σταθερή διάταξη ακροφυσίων ψεκασμού νερού, είτε πλημμυρίζοντας το χώρο φορτίου με νερό. [ABS MVR 4-7-2/7.3.1(c)]

Οι εύκαμπτοι πυροσβεστικοί σωλήνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το σκοπό αυτό σε μικρούς χώρους φορτίου και σε μικρούς χώρους μεγαλύτερων χώρων φορτίου. Ωστόσο, οι διατάξεις αποστράγγισης και άντλησης πρέπει να είναι τέτοιες που να αποτρέπουν τη συσσώρευση ελεύθερων επιφανειών. Το σύστημα αποστράγγισης πρέπει να έχει τέτοιο μέγεθος ώστε να αφαιρεί τουλάχιστον το 125% της συνδυασμένης παροχής τόσο των αντλιών του συστήματος ψεκασμού νερού όσο και του απαιτούμενου αριθμού ακροφυσίων. Οι βαλβίδες του συστήματος αποστράγγισης πρέπει να μπορούν να λειτουργούν από το εξωτερικό του προστατευμένου χώρου σε μια θέση μέσα και κοντά στον χώρο χειρισμού του συστήματος πυρόσβεσης. Τα φρεάτια αποστράγγισης πρέπει να έχουν επαρκή χωρητικότητα

και πρέπει να είναι διατεταγμένα στο πλευρικό έλασμα του πλοίου σε απόσταση όχι μεγαλύτερη το ένα από το άλλο, από 40 m (131 πόδια) σε κάθε στεγανό διαμέρισμα. Εάν αυτό δεν είναι δυνατό, οι δυσμενείς επιπτώσεις στην ευστάθεια του προστιθέμενου βάρους και της ελεύθερης επιφάνειας του νερού πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για την έγκριση των στοιχείων ευστάθειας. [ABS MVR 4-7-2/7.3.1(c)]

Πηγές ανάφλεξης

Ο ηλεκτρικός εξοπλισμός και η καλωδίωση δεν πρέπει να τοποθετούνται σε κλειστούς χώρους φορτίου εκτός εάν είναι απαραίτητο για λειτουργικούς σκοπούς. Ωστόσο, εάν σε τέτοιους χώρους τοποθετείται ηλεκτρικός εξοπλισμός, πρέπει να είναι πιστοποιημένου και ασφαλούς τύπου για χρήση σε επικίνδυνα περιβάλλοντα στα οποία μπορεί να εκτεθεί εκτός και αν είναι δυνατή η πλήρης απομόνωση του ηλεκτρικού συστήματος (με αφαίρεση συνδέσμων στο σύστημα, εκτός από ασφάλειες). Οι οπές των καλωδίων στα καταστρώματα και τις φρακτές πρέπει να σφραγίζονται ώστε να μην είναι δυνατή η διέλευση αερίου ή ατμού. Οι διαδρομές των καλωδίων και τα καλώδια εντός των χώρων φορτίου πρέπει να προστατεύονται από φυσικές ζημιές. Οποιοσδήποτε άλλος εξοπλισμός που μπορεί να αποτελέσει πηγή ανάφλεξης για εύφλεκτους ατμούς δεν επιτρέπεται. [ABS MVR 4-7-2/7.3.2]

Σύστημα ανίχνευσης

Οι χώροι φορτίου πρέπει να είναι εξοπλισμένοι είτε με σταθερό σύστημα ανίχνευσης και συναγερμού πυρκαγιάς εγκεκριμένου τύπου σύμφωνα με κεφάλαιο ABS 4-7-3/11 ή σύστημα ανίχνευσης δείγματος εξαγωγής καπνού εγκεκριμένου τύπου σύμφωνα με κεφάλαιο ABS MVR 4-7-3/13. Εάν έχει τοποθετηθεί ένα σύστημα ανίχνευσης εξαγωγής καπνού, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στο κεφάλαιο ABS MVR 4-7-3/13.1.3 προκειμένου να αποτραπεί η διαρροή τοξικών αναθυμιάσεων στις περιοχές διαμονής και εργασίας. [ABS MVR 4-7-2/7.3.3]

Σύστημα εξαερισμού

Αριθμός αλλαγών αέρα

Σε κλειστούς χώρους φορτίου πρέπει να παρέχεται επαρκής μηχανικός εξαερισμός. Η διάταξη πρέπει να είναι τέτοια ώστε να παρέχει τουλάχιστον έξι αλλαγές αέρα ανά ώρα στο χώρο φορτίου με βάση ένα άδειο χώρο φορτίου και για την κατάλληλη απομάκρυνση ατμών από τα πάνω ή κάτω μέρη του χώρου φορτίου . Εάν οι παρακείμενοι χώροι δεν διαχωρίζονται από τους χώρους φορτίου με στεγανές φρακτές ή καταστρώματα, οι απαιτήσεις εξαερισμού για τέτοιους χώρους ισχύουν όπως και για τον ίδιο τον χώρο φορτίου. [ABS MVR 4-7-2/7.3.4]

Ανεμιστήρες

Οι ανεμιστήρες πρέπει να είναι τύπου που δεν σπινθηρίζουν ώστε να αποφεύγεται η πιθανότητα ανάφλεξης μειγμάτων εύφλεκτων αερίων. Κατάλληλα προστατευτικά από συρμάτινο πλέγμα μέγιστου διακένου 13 mm (0,5 in.) πρέπει να τοποθετούνται πάνω από τα ανοίγματα εισόδου και εξόδου εξαερισμού. [ABS MVR 4-7-2/7.3.4(b)]

Κλείσιμο ανοιγμάτων εξαερισμού και διακοπή ηλεκτρικού αερισμού.

Όλα τα ανοίγματα εξαερισμού σε κάθε αμπάρι φορτίου πρέπει να μπορούν να κλείνονται από το ανοιχτό κατάστρωμα. Τα μέσα κλεισίματος πρέπει να είναι εύκολα προσβάσιμα και γρήγορης λειτουργίας. Όπου οι τοπικές διατάξεις κλεισίματος για τα ανοίγματα ενδέχεται να μην είναι προσβάσιμες λόγω θερμότητας ή καπνού σε περίπτωση πυρκαγιάς πρέπει να παρέχονται απομακρυσμένα μέσα κλεισίματος. Ένα πλακάτ θα πρέπει να είναι τοποθετημένο στα χειριστήρια για τις συσκευές κλεισίματος που να προσδιορίζει σαφώς τη λειτουργία και το άνοιγμα που εξυπηρετείται. [ABS MVR 4-7-2/7.3.4(c)]

Φυσικός εξαερισμός

Πρέπει να παρέχεται φυσικός εξαερισμός σε κλειστούς χώρους φορτίου που προορίζονται για τη μεταφορά επικίνδυνων στερεών εμπορευμάτων χύδην, όπου δεν υπάρχει πρόβλεψη για μηχανικό εξαερισμό. Το κλείσιμο των ανοιγμάτων εξαερισμού θα πρέπει να πραγματοποιείται σύμφωνα με την παράγραφο ABS MVR 4-7-2/7.3.4(c). [ABS MVR 4-7-2/7.3.4(d)]

Φορητοί πυροσβεστήρες

Φορητοί πυροσβεστήρες συνολικής χωρητικότητας τουλάχιστον 12 kg (26,4 lb) ξηρής σκόνης ή ισοδύναμου μέσου πρέπει να παρέχονται για τους χώρους φορτίου. Αυτοί οι πυροσβεστήρες πρέπει να είναι επιπρόσθετοι των φορητών πυροσβεστήρων που απαιτούνται σε άλλα σημεία αυτής της ενότητας. [ABS MVR 4-7-2/7.3.7]

Μόνωση ορίων μηχανοστασίου

Οι φρακτές που σχηματίζουν όρια μεταξύ χώρων φορτίου και μηχανοστασίου κατηγορίας Α πρέπει να είναι μονωμένες σύμφωνα με το πρότυπο μόνωσης κλάσης «A-60» εκτός εάν τα επικίνδυνα εμπορεύματα στοιβάζονται τουλάχιστον 3 μέτρα (10 πόδια) οριζόντια μακριά από τέτοια διαφράγματα. Άλλα διαχωριστικά μεταξύ τέτοιων χώρων πρέπει να είναι μονωμένα σύμφωνα με το πρότυπο μόνωσης κλάσης «A-60». Ακόμη και με απόσταση διαχωρισμού 3 m (10 πόδια), η φρακτή μεταξύ του μηχανοστασίου κατηγορίας Α και του χώρου φορτίου που περιέχει την κατηγορία 1 επικίνδυνων προϊόντων εκτός από την κλάση 1.4S (explosives [TABLE 1 SECTION 4.7.2]) πρέπει να είναι κλάσης «A-60». [ABS MVR 4-7-2/7.3.8].

4 Μελέτη πρόσφατων ατυχημάτων και στατιστικών

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται πρωταρχικά μια παρουσίαση στατιστικών των ατυχημάτων που έχουν λάβει χώρα τα τελευταία χρόνια σε πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων και συγκεκριμένα στους χώρους φορτίου αυτών. Πριν την μετάβαση στο κομμάτι των πειραμάτων μέσω υπολογιστικών προσομοιώσεων κρίθηκε σημαντικό να εξαχθούν κάποια συμπεράσματα τα οποία είναι δυνατό να προκύψουν βασιζόμενα σε πρόσφατες στατιστικές μελέτες καθώς επίσης και σε τεχνικές αναφορές και άρθρα που έχουν δημοσιοποιηθεί για τα εν λόγω ατυχήματα.

Εν συνεχεία στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αναλυτικότερα 3 πρόσφατα ατυχήματα για τα οποία και έχουν δημοσιοποιηθεί εκτεταμένες τεχνικές αναφορές. Σκοπός της παρουσίασης των ατυχημάτων αποτελεί η εμπεριστατωμένη ανάλυση και κατανόηση των περιστάσεων και προβλημάτων που οδηγούν στην εξέλιξη μιας απλής πυρκαγιάς ακόμα και στην ολική απώλεια του πλοίου.

4.1 Γενικά

Ο αριθμός των πυρκαγιών σε μεγάλα πλοία έχει αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια. Το έτος 2019 σημειώθηκε αριθμός ρεκόρ 40 πυρκαγιών που σχετίζονται με χώρους φορτίου με την καθεμία να λαμβάνει χώρα ανά 10 ημέρες. Το 2020, ο αριθμός των περιστατικών μειώθηκε ελαφρά, αλλά παρέμεινε πάνω από τον μέσο όρο. Το μέγεθος του πλοίου έχει άμεση σχέση με το δυνητικό μέγεθος απώλειας. Τα πλοία μεταφοράς αυτοκινήτων, Ro-Ro και τα μεγάλα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων διατρέχουν υψηλότερο κίνδυνο πυρκαγιάς με πιθανές μεγαλύτερες συνέπειες στην περίπτωση εκδήλωσης της πυρκαγιάς. Οι πυρκαγιές σε πλοία εμπορευματοκιβωτίων ξεκινούν συχνά σε εμπορευματοκιβώτια, οι οποίες μπορεί να είναι αποτέλεσμα μη δήλωσης ή εσφαλμένης δήλωσης επικίνδυνου φορτίου, όπως ξυλάνθρακα ικανό υπό συνθήκες να αναφλεγεί μόνο του, χημικά και μπαταρίες. Όταν δηλώνονται εσφαλμένα, μπορεί να συσκευαστούν και να αποθηκευτούν με μη κατάλληλο τρόπο επί του πλοίου, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε ανάφλεξη ή/και να περιπλέξει τον εντοπισμό και την πυρόσβεση. Ο άλλος παράγοντας που διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο είναι οι ικανότητες πυρανίχνευσης και πυρόσβεσης σε σχέση με το μέγεθος του πλοίου. Μεγάλα περιστατικά έχουν δείξει ότι οι πυρκαγιές σε εμπορευματοκιβώτια μπορούν εύκολα να ξεφύγουν από τον έλεγχο και να οδηγήσουν το πλήρωμα να εγκαταλείψει το σκάφος για λόγους ασφαλείας αυξάνοντας έτσι το μέγεθος της απώλειας. Το πρόβλημα των εσφαλμένα δηλωθέντων φορτίων δεν αντιμετωπίζεται τόσο εύκολα επειδή τα προβλήματα βρίσκονται συχνά εντός των αλυσίδων εφοδιασμού. [5]

Τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων έχουν αυξηθεί σε μέγεθος τις τελευταίες δεκαετίες καθώς οι ναυτιλιακές εταιρείες αναζητούν οικονομίες κλίμακας και απόδοση καυσίμου, μια τάση που είναι πιθανό να συνεχιστεί με την κλιματική αλλαγή και την εισαγωγή στόχων μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου για τη βιομηχανία. Παρά την πανδημία του Covid-19, ολοένα και μεγαλύτερα πλοία είναι σε παραγγελία. Τον

Δεκέμβριο του 2020, η Ocean Network Express παρήγγειλε έξι νέα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων με χωρητικότητα άνω των 24.000 TEU. Το HMM Algeciras, που παρουσιάστηκε τον Απρίλιο του 2020, θεωρείται επί του παρόντος το μεγαλύτερο πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων στον κόσμο με χωρητικότητα λίγο κάτω από 24.000 TEU. [5]

Στην ακόλουθη εικόνα παρουσιάζεται συγκριτικά για τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων η αύξηση του μεγέθους και της χωρητικότητας φορτίου τους τα τελευταία 50 χρόνια. Η χωρητικότητα έχει αυξηθεί περίπου 1500% από το 1969 και έχει σχεδόν διπλασιαστεί την τελευταία δεκαετία. Όλο και μεγαλύτερα πλοία είναι σε παραγγελία.

Εικόνα 13 Αύξηση μεγέθους και χωρητικότητας πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων τα τελευταία 50 χρόνια. [6]

Το μέγεθος του πλοίου έχει άμεση σχέση με το δυνητικό μέγεθος απώλειας. Τα μεγάλα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων διατρέχουν υψηλότερο κίνδυνο πυρκαγιάς με πιθανές μεγαλύτερες συνέπειες σε περίπτωση πυρκαγιάς, σύμφωνα με την ανάλυση της Νορβηγικής Ένωσης Ναυτιλιακών Ασφαλιστών Cefor. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των

εμπορευματοκιβωτίων στο πλοίο, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα τουλάχιστον ένα να αναφλεγεί και να προκαλέσει πυρκαγιά και τόσο πιο δύσκολο είναι να περιοριστεί και να σβήσει η φωτιά. [5]

Ενώ ο αριθμός των σοβαρών ναυτιλιακών ατυχημάτων παγκοσμίως έχει μειωθεί μακροπρόθεσμα, τα περιστατικά που αφορούν μεγάλα πλοία και συγκεκριμένα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, πλοία μεταφοράς αυτοκινήτων και roll-on roll-off (ro-ro) έχουν ως αποτέλεσμα δυσανάλογα υψηλές απώλειες. [6]

Το περασμένο έτος (2021), οι πυρκαγιές στο roll-on roll-off (ro-ro) carrier πλοίο Felicity Ace και στο πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων X-Press Pearl είχαν ως αποτέλεσμα την ολική απώλεια τους. Οι πυρκαγιές στους χώρους φορτίου εγείρουν υψηλή ανησυχία στο χώρο της ναυτιλίας. Χαρακτηριστικό αυτών αποτελεί η γρήγορη εξάπλωσή τους και η δυσκολία να ελεγχθούν. Έχουν αναφερθεί πάνω από 70 πυρκαγιές μόνο σε πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων τα τελευταία πέντε χρόνια. Αυτές οι πυρκαγιές ξεκινούν συχνά σε εμπορευματοκιβώτια και μπορεί να είναι αποτέλεσμα εσφαλμένης ή ακόμη και μη δήλωσης επικίνδυνου φορτίου, όπως χημικά και μπαταρίες. Υπολογίζεται ότι περίπου το 5% των εμπορευματοκιβωτίων που μεταφέρονται ότι περιέχουν αδήλωτα επικίνδυνα εμπορεύματα. Αυτά μπορεί να είναι ακατάλληλα συσκευασμένα και στοιβαγμένα επί του πλοίου, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε ανάφλεξη ή/και να περιπλέξει τον εντοπισμό και την πυρόσβεση. Όσο περισσότερα εμπορευματοκιβώτια βρίσκονται στο πλοίο, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα τουλάχιστον ένα να αναφλεγεί και να προκαλέσει πυρκαγιά και τόσο πιο δύσκολο είναι να περιοριστεί και να σβήσει. [6]

Ανεξάρτητα από την αιτία ενός περιστατικού, όταν τα μεγάλα πλοία αντιμετωπίζουν προβλήματα, η αντιμετώπιση έκτακτης ανάγκης και η εύρεση ενός λιμανιού καταφυγής μπορεί να είναι δύσκολη. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η εμπειρία του πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων X-Press Pearl, το οποίο τελικά βυθίστηκε μετά την άρνηση δύο λιμανιών να προσφύγει σε αυτά έπειτα από την εκδήλωση πυρκαγιάς. Πολύ συχνά, αυτό που θα έπρεπε να είναι ένα διαχειρίσιμο περιστατικό σε ένα μεγάλο πλοίο καταλήγει σε ολική απώλεια. Αυτό το περιστατικό ήταν το τελευταίο σε έναν αυξανόμενο κατάλογο πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων που δυσκολεύτηκαν να βρουν λιμάνι για καταφυγή μετά από πυρκαγιές ή προβλήματα με το φορτίο. Τα κράτη λιμένα και άλλοι ενδιαφερόμενοι πρέπει να βρουν τρόπους για να φιλοξενήσουν πλοία που βρίσκονται σε κίνδυνο. Οι αλλαγές στις διαδικασίες και στα συστήματα διαχείρισης ασφάλειας ενδέχεται να βοηθήσουν στην αποφυγή επανάληψης αυτών των περιστατικών. [6]

Οι πυρκαγιές μπορούν να εκδηλωθούν, να εξαπλωθούν και τέλος να επικρατήσουν γρήγορα, ωστόσο τα πληρώματα πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων είναι σχετικά μικρά σε αριθμό, ενώ η ανίχνευση, ο εντοπισμός και η πρόσβαση σε μια πυρκαγιά μέσα σε μια στοίβα (stack) εμπορευματοκιβωτίων είναι χρονοβόρα. Ο εξοπλισμός πυρόσβεσης που απαιτείται επί του παρόντος βάσει της Διεθνούς Σύμβασης για την Ασφάλεια της Ζωής στη Θάλασσα (SOLAS) συνεπάγεται ότι το πλήρωμα αντιμετωπίζει σημαντικούς κινδύνους κατά την αντιμετώπιση πυρκαγιάς σε κοντέινερ και συχνά δεν είναι σε θέση να το κάνει με επιτυχία. [6]

Η μείωση του κινδύνου πυρκαγιάς σε μεγάλα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων απαιτεί συνδυασμό ρυθμιστικών μέτρων και πρωτοβουλιών του κλάδου και υπάρχουν ενθαρρυντικά σημάδια ότι τέτοιες πρωτοβουλίες βρίσκονται σε εξέλιξη. Μετά από προτάσεις

της διεθνούς ένωσης ναυτιλιακών ασφαλίσεων IUMI, των ενώσεων πλοιοκτητών και των κρατών σημαίας της Γερμανίας και των Μπαχαμών [20],[21], η Επιτροπή Ναυτιλιακής Ασφάλειας MSC (Maritime Safety Committee) του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO) συμφώνησε πέρυσι να τροποποιήσει τη σύμβαση SOLAS με στόχο την ενίσχυση των δυνατοτήτων ανίχνευσης και καταπολέμησης πυρκαγιάς σε νέα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. Αν και η αναθεώρηση ανεστάλη λόγω του Covid-19, οι τροποποιήσεις αναμένεται να τεθούν σε ισχύ την 1η Ιανουαρίου 2028. [6]

Εσφαλμένη δήλωση φορτίου (Cargo mis-declaration)

Ένας αριθμός πυρκαγιών στη θάλασσα τα τελευταία χρόνια έχει εντοπιστεί σε εύφλεκτα ή εσφαλμένα δηλωμένα φορτία σε εμπορευματοκιβώτια, συμπεριλαμβανομένων μπαταριών, άνθρακα και χημικών ουσιών όπως το υποχλωριώδες ασβέστιο, ένα συστατικό που εντοπίζεται σε προϊόντα καθαρισμού. [6]

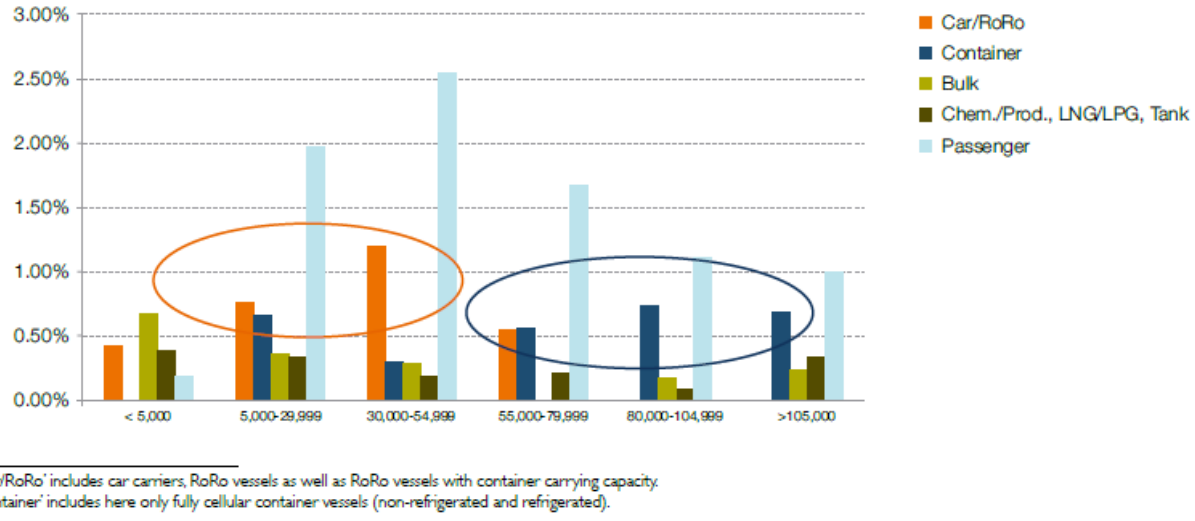
Υπολογίζεται ότι περίπου το 10% όλων των εμπορευματοκιβωτίων που φορτώνονται στα πλοία περιέχουν δηλωμένο επικίνδυνο φορτίο. Ωστόσο, περίπου το 5% των εμπορευματοκιβωτίων που αποστέλλονται αποτελούνται από μη δηλωμένα επικίνδυνα εμπορεύματα είτε λόγω διοικητικού λάθους είτε λόγω εσφαλμένης δήλωσης. Για παράδειγμα, αυτό ισοδυναμεί με 1.000 TEU ή περισσότερο αδήλωτο επικίνδυνο φορτίο σε ένα πολύ μεγάλο πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (ultra large container vessel-ULCV) 24.000 TEU. [6]

Το 2019 η Διεθνής Ένωση Ναυτιλιακών Ασφαλίσεων (IUMI) και άλλοι ενδιαφερόμενοι πραγματοποίησαν μια υποβολή στην Υποεπιτροπή του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO). Η υποβολή αυτή σχετίζεται με τη μεταφορά φορτίων και εμπορευματοκιβωτίων (Sub Committee of Carriage of Cargoes and Containers) και προτείνει μια ολοκληρωμένη αναθεώρηση του Διεθνούς Κώδικα Επικίνδυνων Ναυτιλιακών Εμπορευμάτων (IMDG Code), στην οποία καθορίζονται και ταξινομούνται τα επικίνδυνα εμπορεύματα, καθώς και οι διαδικασίες δήλωσης. Επί του παρόντος, ορισμένα από αυτά τα εμπορεύματα δεν θεωρούνται επικίνδυνα και δεν χρειάζεται να δηλωθούν ως τέτοια από τον αποστολέα στον μεταφορέα. [6]

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου επηρεάζουν ολοένα και περισσότερο την ασφάλεια της ναυτιλίας, με έναν σημαντικό αριθμό πυρκαγιών. Το θέμα εγείρει ερωτήματα για τις δυνατότητες σχεδιασμού και πυρόσβεσης των πλοίων ro-ro που μεταφέρουν ηλεκτρικά οχήματα (EVs), καθώς και για τη δήλωση, τη στοιβασία και τη συσκευασία φορτίων μπαταριών σε εμπορευματοκιβώτια. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι ένα γνωστό ζήτημα για τη ναυτιλιακή βιομηχανία και την ευρύτερη βιομηχανία logistics, όπου υπήρξαν πολλά σχεδόν ατυχήματα στα λιμάνια και κατά τη μεταφορά. Οι μπαταρίες δεν είναι μόνο πιθανή αιτία πυρκαγιάς, αλλά επιδεινώνουν επίσης το πρόβλημα, καθώς οι πυρκαγιές μπαταριών είναι πολύ δύσκολο να σβήσουν και είναι πιθανό να αναζωπυρωθούν μέρες ή εβδομάδες αργότερα. [6]

4.2 Στατιστική ανάλυση ατυχημάτων

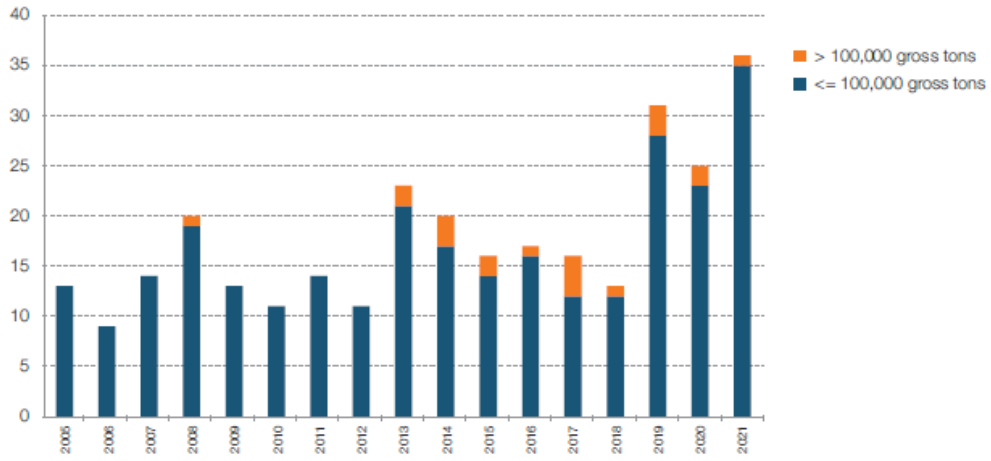
Μια ανάλυση της συχνότητας των πυρκαγιών ανά τύπο και μέγεθος πλοίου (εικόνα 14) καταδεικνύει ότι η υψηλότερη συχνότητα πυρκαγιάς μεταξύ όλων των τύπων πλοίων μπορεί να παρατηρηθεί σε μεσαίου μεγέθους επιβατηγά πλοία.. Για τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, μπορεί να παρατηρηθεί υψηλή συχνότητα πυρκαγιών κατά την περίοδο 2010-2019 ειδικά για τα μεγαλύτερα πλοία πάνω από 50.000 τόνους μεικτής χωρητικότητας (Gross Tonnage). Η κατηγορία Car/RoRo, η οποία περιλαμβάνει και πλοία RoRo με ικανότητα μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων καθώς επίσης και pure car carriers και RoRo πλοία, παρουσιάζει επίσης υψηλή συχνότητα πυρκαγιάς. Οι υψηλότερες συχνότητες πυρκαγιάς μπορούν να παρατηρηθούν για μεγέθη πλοίων μεταξύ 5.000 και 80.000 τόνων μικτής χωρητικότητας, καθώς δεν υπάρχει σχεδόν κανένα πλοίο στις ζώνες μεγέθους άνω των 80.000 τόνων μικτής χωρητικότητας. Το γεγονός ότι η συχνότητα πυρκαγιάς στα πλοία κοντέινερ και RoRo αυξάνεται με το μέγεθος του πλοίου μπορεί να εξηγηθεί από το φορτίο. Εάν υπάρχει μια συγκεκριμένη πιθανότητα να ξεκινήσει μια πυρκαγιά σε ένα εμπορευματοκιβώτιο, η πιθανότητα να ξεκινήσει μια πυρκαγιά σε τουλάχιστον ένα από τα εμπορευματοκιβώτια θα αυξηθεί σχεδόν σε άμεση αναλογία με τον αριθμό των εμπορευματοκιβωτίων. Αυτό σημαίνει ότι εάν στοιβαχθούν αρκετά κοντέινερ με «τυχαίο» περιεχόμενο σε ένα χώρο, όπως ένα πλοίο ή λιμάνι, τουλάχιστον ένα από τα κοντέινερ είναι πιθανό να περιέχει κάτι που δύναται να αναφλεγεί μόνο του και να προκαλέσει πυρκαγιά. Το ίδιο φαινόμενο μπορεί επίσης να εξηγηθεί σε διαφορετικό στατιστικό πλαίσιο. Εάν είναι γνωστό ότι ανάμεσα σε ένα εκατομμύρια εμπορευματοκιβώτια που πρόκειται να μεταφερθούν από μια τοποθεσία Α σε μια τοποθεσία Β, ένα από αυτά περιέχει κάτι που πρόκειται να εκραγεί, ο κίνδυνος, δηλαδή η πιθανότητα να φορτωθεί αυτό το κοντέινερ στο πλοίο είναι μεγαλύτερος όσο μεγαλύτερο είναι το πλοίο. Επιπλέον, όσο μεγαλύτερο είναι το πλοίο, τόσο πιο σοβαρές θα είναι οι συνέπειες του χειρότερου σεναρίου πυρκαγιάς σε αυτό το πλοίο. Εν ολίγοις, όσο μεγαλύτερο είναι το πλοίο, τόσο μεγαλύτερος είναι ο κίνδυνος πυρκαγιάς και τόσο πιο σοβαρές είναι οι πιθανές συνέπειες μιας τέτοιας πυρκαγιάς. [37]



[1] 'Car/RoRo' includes car carriers, RoRo vessels as well as RoRo vessels with container carrying capacity.
'Container' includes here only fully cellular container vessels (non-refrigerated and refrigerated).

Εικόνα 14 Συχνότητα αποζημιώσεων λόγω πυρκαγιάς ή έκρηξης ανά τύπο και μέγεθος πλοίου κατά το χρονικό διάστημα 2010-2019. [37].

Όλα τα ακόλουθα γραφήματα περιλαμβάνουν εκτός από τα πλήρως κυψελοειδή πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων και combination carriers, δηλαδή RoRo πλοία με ικανότητα μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. Πρόθεση είναι να συλληφθεί η πλήρης έκταση όλων των πυρκαγιών που εκδηλώθηκαν τα τελευταία χρόνια σε οποιονδήποτε τύπο πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, και ιδιαίτερα εκείνων που ξεκίνησαν σε εμπορευματοκιβώτιο επί του πλοίου. Το πρώτο τρίμηνο του 2019 καταγράφηκε ασυνήθιστα μεγάλος αριθμός τέτοιων πυρκαγιών. Το 2020, ο αριθμός μειώθηκε ελαφρώς, αλλά παρέμεινε πάνω από τον μέσο όρο των ετών πριν από το 2019. Το 2021 τα αποτελέσματα δείχνουν περαιτέρω αύξηση. Ιδιαίτερη ανησυχία προκαλεί ο αυξανόμενος αριθμός αυτών των πυρκαγιών σε πλοία άνω των 100.000 μικτών τόνων (εικόνα 15), όπου η πιθανότητα πρόκλησης ζημιών στο φορτίο και τραυματισμού των μελών του πληρώματος είναι ακόμη μεγαλύτερη εάν η φωτιά δεν μπορεί να σβήσει πριν επεκταθεί σε άλλες περιοχές. Η αύξηση του απόλυτου αριθμού πυρκαγιών σε μεγάλα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων οφείλεται εν μέρει στην αύξηση του αριθμού αυτών των πλοίων στον παγκόσμιο στόλο. Η ανάλυση των πυρκαγιών σε σχέση με τον στόλο των πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, που αντικατοπτρίζεται από τη συχνότητα των αποζημιώσεων και το κόστος αποζημιώσεων ανά πλοίο , επιβεβαιώνει μια πραγματική ανοδική τάση στη συχνότητα των πυρκαγιών σε πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων , ιδιαίτερα σε μεγάλα. [37],[38],[39].

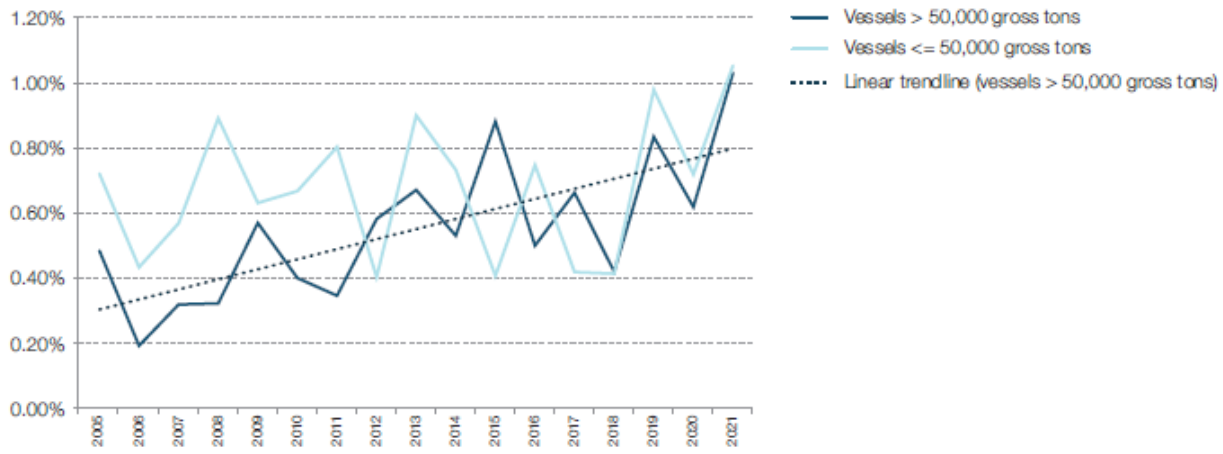


Εικόνα 15 Πυρκαγιές σε πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων- Αριθμός περιστατικών ανά μέγεθος πλοίου και έτος ατυχήματος. [39]

Το γράφημα της εικόνας 16 συγκρίνει τη συχνότητα όλων των πυρκαγιών/εκρήξεων σε πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων κάτω των 50.000 τόνων μεικτής χωρητικότητας (Gross Tonnage) (Panamax) με εκείνα άνω των 50.000 τόνων. Όσον αφορά την χωρητικότητα των πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, μικτή χωρητικότητα (Gross Tonnage) 50.000 τόνων μεταφράζεται σε περίπου 4.500 TEU. Στο γράφημα της εικόνας 16, ο αριθμός των αναφερόμενων περιστατικών σχετίζεται με τον αριθμό των ασφαλισμένων πλοίων αυτού του μεγέθους στο χαρτοφυλάκιο NoMIS[3]. Για τα μεγαλύτερα πλοία υπήρξε

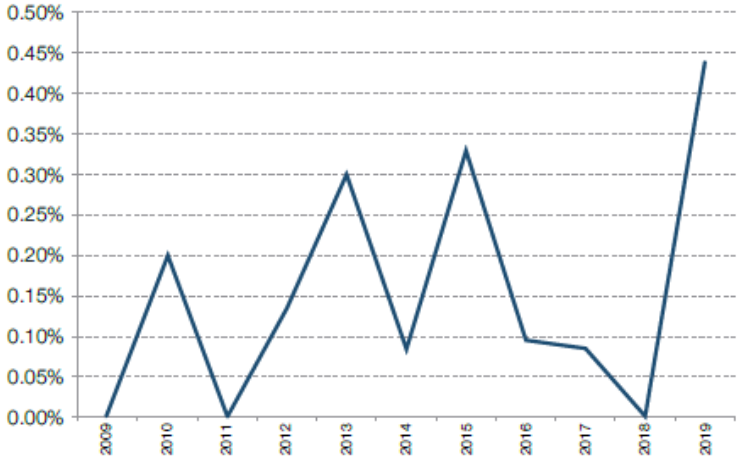
[3] Nordic Marine Insurance Statistics (NoMIS).

σαφής τάση για περισσότερες πυρκαγιές τα τελευταία δεκαπέντε χρόνια. Από τη γραμμή τάσης μπορεί κανείς να συμπεράνει ότι σε όλη την περίοδο από το 2005 έως το 2021, η συχνότητα των πυρκαγιών σε πλοία άνω των 50.000 τόνων έχει αυξηθεί κατά έναν πολλαπλασιαστή 2,6. Το 2021, η συχνότητα πυρκαγιάς σε μικρότερα πλοία παρουσίασε επίσης μικρή αύξηση. Μια μικρή μείωση της συχνότητας το 2020 δεν αναιρεί τη γενική ανοδική τάση και βρίσκεται εντός του εύρους της κανονικής διακύμανσης. Ιδιαίτερη ανησυχία προκαλεί η συνεχής αύξηση της συχνότητας πυρκαγιών σε πλοία ενός συγκεκριμένου μέγεθος, όπου η πιθανότητα τραυματισμού των μελών του πληρώματος και ζημιών στο φορτίο είναι ιδιαίτερα μεγάλη εάν η φωτιά δεν μπορεί να σβήσει προτού επεκταθεί σε άλλες περιοχές. [32]



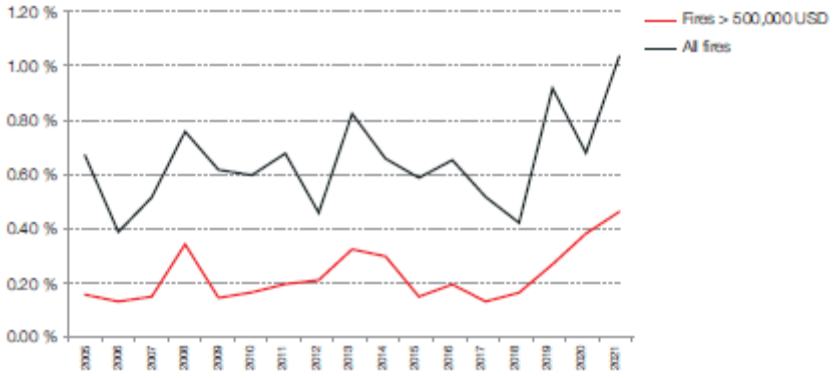
Εικόνα 16 Συχνότητα εκδήλωσης πυρκαγιάς σε πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων συναρτήσει του μεγέθους και του έτους του ατυχήματος. [39]

Το γράφημα της εικόνας 17 δείχνει ότι η συχνότητα τέτοιων πυρκαγιών, ιδιαίτερα σε μεγαλύτερα πλοία, αυξήθηκε σημαντικά το 2019 σε σύγκριση με τα προηγούμενα χρόνια. Ειδικά το πρώτο τρίμηνο του 2019 σημειώθηκε υψηλή εκδήλωση σοβαρών πυρκαγιών σε πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. [37]



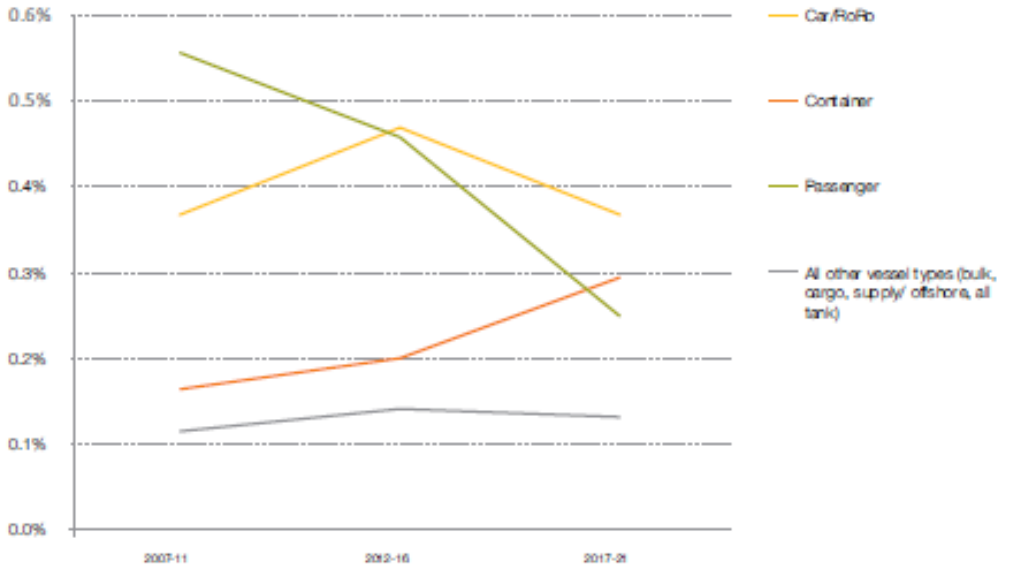
Εικόνα 17 Συχνότητα εκδήλωσης πυρκαγιών σε χώρους φορτίου πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων μικτής χωρητικότητας (Gross tons) άνω των 50.000 τόνων [37]

Το έτος 2021 δεν παρουσιάζει καμία αλλαγή τάσης στη συχνότητα των πυρκαγιών. Σε αντίθεση με άλλους τύπους ατυχημάτων, παραμένει περίπου στο ίδιο επίπεδο με το 2019 και το 2020, επιβεβαιώνοντας ότι οι πυρκαγιές συμπεριφέρονται διαφορετικά από άλλα είδη ατυχημάτων. Μια ιδιαίτερα ανησυχητική τάση είναι η αύξηση της συχνότητας πυρκαγιών άνω των 500.000 USD σε πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (γραφική παράσταση εικόνας 18). Στο γράφημα της εικόνας 19 περιλαμβάνονται όλοι οι τύποι πυρκαγιών. Για να βελτιωθεί η πρόληψη των απωλειών, είναι σημαντικό να γίνεται διάκριση μεταξύ πυρκαγιών στο μηχανοστάσιο και πυρκαγιών που ξεκινούν στην περιοχή φορτίου ενός πλοίου. Αν και η συχνότητα πυρκαγιάς/έκρηξης είναι χαμηλού ποσοστού σε σύγκριση με άλλους τύπους ατυχημάτων, το κόστος τέτοιων περιστατικών είναι συνήθως υψηλό και συνεπώς επηρεάζει την συνολικό ετήσιο κόστος αποζημιώσεων. [39]



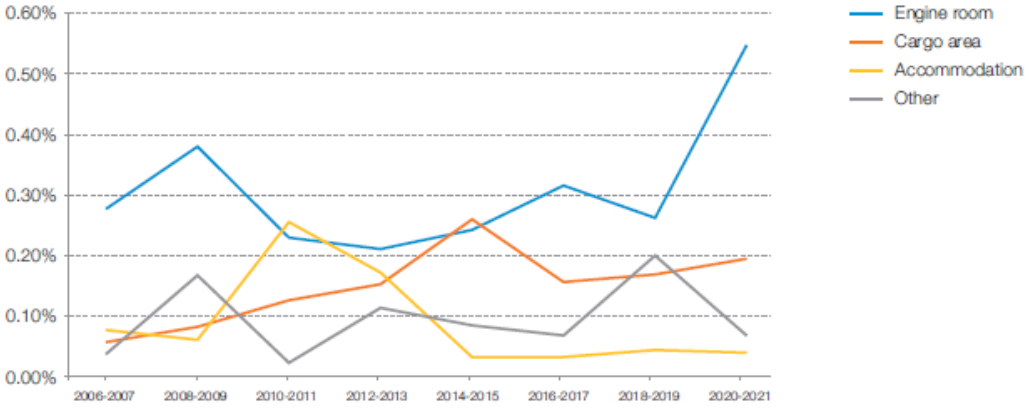
Εικόνα 18 Συχνότητα εκδήλωσης πυρκαγιών σε πλοία εμπορευματοκιβωτίων ανά έτος των ατυχημάτων. Το γράφημα περιλαμβάνει όλων των ειδών πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (πλήρως κυψελοειδή πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων και συνδυασμένων μεταφορών 'combination carriers' όπως πλοία RoRo δυνατότητα μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων). [39]

Το γράφημα της εικόνας 19 δείχνει ότι η υψηλότερη συχνότητα πυρκαγιάς μπορεί να παρατηρηθεί σε επιβατηγά πλοία, πλοία μεταφοράς αυτοκινήτων, RoRo και πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. Για τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, η συχνότητα των πυρκαγιών παρουσιάζει αυξητική τάση. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για πυρκαγιές με κόστος άνω των 500.000 USD όπως και πριν.



Εικόνα 19 Συχνότητα πυρκαγιών/εκρήξεων ανά είδος πλοίου, ανά έτος και για αποζημιώσεις μεγαλύτερες των 500.000 δολαρίων (USD). Στο γράφημα αυτό στα πλοία 'Car/RoRo' περιλαμβάνονται πλοία RoRo με δυνατότητα μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων ενώ το 'Container' αναφέρεται σε πλήρως κυψελοειδή πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων 'fully cellular container vessels'. [39]

Το γράφημα της εικόνας 20 δείχνει ότι, ενώ τα έτη 2020 και 2021 επηρεάστηκαν σε μεγάλο βαθμό από πυρκαγιές στο μηχανοστάσιο, οι πυρκαγιές στον χώρο φορτίου των πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων παρουσίασαν επίσης σταθερή αύξηση τα τελευταία χρόνια. Από την άποψη της γραμμής τάσης, εξομαλύνοντας τις αποκλίσεις των μεμονωμένων ετών, παρατηρείται μια αύξηση κατά έναν πολλαπλασιαστή 2,4 περίπου σε όλη την περίοδο 2005 έως 2021. Όπως εξηγήθηκε παραπάνω, αυτή η αύξηση πρέπει να εξεταστεί υπό το πρίσμα της αύξησης των μεγεθών των πλοίων , που με τη σειρά τους αυξάνουν την πιθανότητα πυρκαγιών στον χώρο φορτίου και δυσκολεύουν την κατάσβεσή τους. Σε αντίθεση με τις πυρκαγιές στο μηχανοστάσιο, οι πυρκαγιές που ξεκινούν στον χώρο φορτίου είναι δύσκολο να εντοπιστούν και να σβήσουν.



Εικόνα 20 Συχνότητα πυρκαγιών σε πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων ανά είδος πυρκαγιάς και ανά έτος. [39]

4.3 Ανάλυση ατυχημάτων λόγω πυρκαγιάς

Μαζί με την αύξηση της ικανότητας μεταφοράς φορτίου των πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, έχουν λάβει χώρα ορισμένα μεγάλα ατυχήματα που σχετίζονται με πυρκαγιές. Στο πλαίσιο εμπεριστατωμένης έρευνας [28] κατέστη δυνατή η εκτενής ανάλυση 39 μεγάλων ατυχημάτων λόγω πυρκαγιάς σε χώρους φορτίου πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων και που σημειώθηκαν την περίοδο 1996-2017. Οι απώλειες που προκλήθηκαν από τις αναγραφόμενες πυρκαγιές δεν είναι γνωστές σε όλες τις περιπτώσεις. Ωστόσο, δεν σημειώθηκε συνολική απώλεια πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων κατά την περίοδο που αναλύθηκε. Παρακάτω παρατίθενται κάποια σημαντικά στοιχεία της εν λόγω μελέτης.

4.3.1 Ατυχήματα και αιτίες

Μια σύντομη περίληψη των δεδομένων που συλλέχθηκαν για τα αίτια των μεγάλων πυρκαγιών σε εμπορευματοκιβώτια σε χώρους φορτίου παρουσιάζεται στον Πίνακα 8. Ένας πιο λεπτομερής πίνακας που περιέχει το έτος του συμβάντος και το όνομα των πλοίων, μαζί με την αιτία της πυρκαγιάς, παρατίθεται αμέσως μετά τον πίνακα 8. Τα δεδομένα που συλλέγονται επιτρέπουν τον απλό προσδιορισμό του κινδύνου με ένδειξη της συχνότητας των αιτιών πυρκαγιάς.

Πίνακας 8 Σύντομη περίληψη των φορτίων που προκάλεσαν μεγάλα περιστατικά πυρκαγιάς. [9]

Cause of fire accident	Number of accidents
Calcium hypochlorite	13
Charcoal	7
Batteries	2
Pentane and isopentane	1
Petroleum based cleaning fluid	1
PRS-80 & NA-125	1
Thiourea Dioxide	1
Methyl ethyl ketone	1
Divinylbenzene	1
Textiles	1
Sodium hydroxide	1
Fertilizer	1
Cardboard bales	1
Not known	7
Total	39

Πίνακας 9 Περιστατικά πυρκαγιάς κατηγοριοποιημένα βάσει του φορτίου που προκάλεσε την πυρκαγιά. [9]

Year	Ship	Cargo	Year	Ship	Cargo
1997	CONTSHIP FRANCE	Calcium Hypochlorite	**2006**	HYUNDAI FORTUNE	Petroleum-based cleaning fluid
1998	ACONCAGUA	Calcium Hypochlorite	**2004**	NYK ARGUS	PRS-80 & NA-125
1998	DG HARMONY	Calcium Hypochlorite	**2004**	CSAV ITAJAI	Thiourea Dioxid
1999	CMA DJAKARTA	Calcium Hypochlorite	**2010**	CHARLOTTE MAERSK	Methyl ethyl ketone
2002	HANJIN PENSYLVANIA	Calcium Hypochlorite	**2012**	MSC FLAMINIA	Divinylbenzene
2012	SEA ELEGANCE	Calcium Hypochlorite	**2013**	EUGEN MAERSK	Textiles
2013	AMSTERDAM BRIDGE	Calcium Hypochlorite	**2015**	CAPE MORETON	Sodium hydroxide
2014	HANSA BRANDENBURG	Calcium Hypochlorite	**2015**	PURPLE BEACH	Fertilizer
2014	HANJIN ATHENS	Calcium Hypochlorite	**2015**	ALULA	Cardboard bales
2015	NORTHERN GUARD	Calcium Hypochlorite	**2006**	YM GREEN	Not uncovered
2015	HANJIN GREAN EARTH	Calcium Hypochlorite	**2009**	MOL PROSPERITY	Not uncovered
1996	MAERSK SEOUL	Calcium Hypochlorite	**2013**	MAERSK KAMPALA	Not uncovered
1996	MAERSK LONDRINA	Calcium Hypochlorite	**2013**	CMA CGM LILAC	Not uncovered
1996	HANSA CLIPPER	Charcoal	**2015**	KAMALA	Not uncovered
1996	MARLENE S.	Charcoal	**2015**	BARZAN	Not uncovered
1997	BELLATRIX	Charcoal	**2017**	MSC DANIELA	Under investigation
2015	CAROLINE MAERSK	Charcoal			
2015	MARENO	Charcoal			
2015	MSC KATRINA	Charcoal			
2016	LUDWIGSHAFEN EXPRESS	Charcoal			
2005	CMV PUNJAB SENATOR	Batteries			
2016	CMA CGM ROSSINI	Batteries			
1998	SEA-LAND MARINER	Pentane & isopentane			

Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 8, τουλάχιστον τρεις αιτίες επαναλαμβάνονται κατά το χρονικό διάστημα στο οποίο συλλέχτηκαν τα δεδομένα: αυτές είναι η μεταφορά υποχλωριώδους ασβεστίου, ξυλάνθρακα και μπαταριών. Περαιτέρω, το ατύχημα πυρκαγιάς που έλαβε χώρα στο MSC Flaminia το 2012 μελετήθηκε διεξοδικά λόγω της σοβαρότητάς του και του γεγονότος ότι το διβινυλοβενζόλιο είναι αντιπροσωπευτικό ενός φάσματος χημικών ουσιών που μπορεί να πολυμεριστούν βίαια εάν αντιμετωπιστούν με ακατάλληλο

τρόπο. Παρακάτω παρατίθεται μια σύντομη περίληψη αντιπροσωπευτικών περιπτώσεων που αφορούν τα παραπάνω περιγραφόμενα υλικά:

2003 - MV Sea Elegance

Το υποχλωριώδες ασβέστιο, $Ca(ClO)_2$, θα συμβολίζεται ως CHIO. Το MV Sea Elegance είναι ένα πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων μήκους 171 μέτρων σημαίας Σιγκαπούρης. Στις 11 Οκτωβρίου 2003, κατά τη διάρκεια του ταξιδιού από το Πορτ Λούις (Δημοκρατία του Μαυρικίου) στο Ντέρμπαν (Νότια Αφρική), σημειώθηκε έκρηξη. Η έκρηξη προήλθε από το αμπάρι νούμερο 6, ακριβώς πίσω από την υπερκατασκευή των ενδιαιτήσεων. Η φωτιά εικάζεται ότι προήλθε από κοντέινερ που ήταν αποθηκευμένο κάτω από το κατάστρωμα το οποίο περιείχε 20 τόνους CHIO. Το φορτίο αποθηκεύτηκε κάτω από το κατάστρωμα, καθώς δεν είχε δηλωθεί ως επικίνδυνο φορτίο. Τα υπόλοιπα εμπορευματοκιβώτια στο κύτος φορτίου μετέφεραν πλαστικά, καουτσούκ και χάρτινα είδη. Οι θερμοκρασίες περιβάλλοντος στο χώρο αποθήκευσης φορτίου ήταν 35^{o}C κατά μέσο όρο και το εμπορευματοκιβώτιο είχε τοποθετηθεί απέναντι από τις δεξαμενές αποθήκευσης βαρέως καυσίμου μαζούτ (HFO), οι οποίες παράγουν επίσης θερμότητα.

2015 – Caroline Maersk

Αιτία ατυχήματος: ξυλάνθρακας-Κάρβουνο. Το Caroline MAERSK είναι ένα πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων μήκους 347 μέτρων, σημαίας Δανίας. Το πλήρωμα του πλοίου ήταν συνολικά 22 άτομα, με διαφορετικές εθνικότητες. Στις 26 Αυγούστου 2015 κατά τη διάρκεια του ταξιδιού από το Chiwan (Κίνα) προς το Tanjung Pelepas (Μαλαισία), περίπου 50 ναυτικά μίλια από την ακτή του Βιετνάμ, ανακαλύφθηκε πυρκαγιά στο κύτος φορτίου (cargo hold) 9 σε θέση κοντά στο μέσο νομέα του πλοίου. Η πυρκαγιά εντοπίστηκε μέσω σήματος συναγερμού καπνού που έδειχνε καπνό στο αντίστοιχο αμπάρι. Ως πρώτη ενέργεια , η ταχύτητα του πλοίου μειώθηκε και η πορεία του πλοίου άλλαξε για να κατευθύνει αλλού τον καπνό από το κατάστρωμα. Ο εξαερισμός στο αμπάρι τερματίστηκε και διακόπηκε η παροχή ισχύος. Το φορτίο που προκάλεσε την πυρκαγιά στο κοντέινερ αναγνωρίστηκε αργότερα ως ξυλάνθρακας ναργιλέ. Το κοντέινερ είχε αποσταλεί από έναν κατασκευαστή στην Κίνα και φορτώθηκε στο πλοίο στο Μπουσάν (Νότια Κορέα) 10 ημέρες πριν από την εκδήλωση της πυρκαγιάς. Η αιτία της ανάφλεξης φέρεται να οφείλεται σε αυτοθέρμανση του ξυλάνθρακα.

2016 - CMA CGM Rossini

Αιτία ατυχήματος : Μπαταρίες ιόντων λιθίου . Το CMA CGM Rossini είναι ένα πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων μήκους 277 μέτρων, γαλλικής σημαίας. Το πλήρωμα του πλοίου ήταν συνολικά 29 άτομα με απροσδιόριστες εθνικότητες. Η έκρηξη και η επακόλουθη πυρκαγιά σημειώθηκαν στις 15 Αυγούστου 2016 ενώ το πλοίο εκτελούσε εμπορικές δραστηριότητες στο λιμάνι του Κολόμπο στη Σρι Λάνκα. Τα εμπορευματοκιβώτια ήταν δύο συνηθισμένα εμπορευματοκιβώτια 40ft γενικής χρήσης, βάρους 16.692 και 17.417 τόνων. Τα δοχεία μετέφεραν 26 και 25 παλέτες με 104 και 100 βαρέλια μπαταριών ιόντων λιθίου αντίστοιχα που προορίζονταν για ανακύκλωση. Μια ένδειξη της πυρκαγιάς

ανακαλύφθηκε αρχικά από μέλη του πληρώματος που έκαναν εργασίες γύρω από το κύτος φορτίου 5 (τοποθεσία της πυρκαγιάς). Πριν προλάβουν να ενημερώσουν τον αξιωματικό σε επιφυλακή, σημειώθηκε έκρηξη. Τις επόμενες ημέρες επιχειρήθηκε μια σειρά τεχνικών κατάσβεσης, αρχικά χρησιμοποιήθηκε νερό και διοξείδιο του άνθρακα CO_2, αλλά δεν είχαν το επιθυμητό αποτέλεσμα. Καθώς το πλοίο βρισκόταν στο αγκυροβόλιο, η πυροσβεστική υπηρεσία της ξηράς μπόρεσε να παράσχει στο πλοίο έναν πυροσβεστικό αφρό υψηλής διαστολής, ο οποίος κατάφερε να σβήσει τη φωτιά.

2012 - MSC Flaminia

Αιτία ατυχήματος: διβινυλοβενζόλιο, το οποίο θα συμβολίζεται ως DVB. Το MSC Flaminia είναι ένα πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων μήκους 300 μέτρων γερμανικής σημαίας. Κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς και της έκρηξης που ακολούθησε, το πλοίο είχε 23 μέλη πληρώματος και 2 επιβάτες που ταξίδευαν στην Ευρώπη. Η φωτιά εκδηλώθηκε κατά τη διάρκεια ταξιδιού από το Τσάρλεστον των Ηνωμένων Πολιτειών στην Αμβέρσα του Βελγίου και πιο συγκεκριμένα σε ανοιχτή θάλασσα στον Βόρειο Ατλαντικό Ωκεανό. Ως αποτέλεσμα, τρία μέλη του πληρώματος έχασαν τη ζωή τους, δύο τραυματίστηκαν σοβαρά ενώ το πλοίο και το φορτίο υπέστησαν εκτεταμένες ζημιές. Το πρωί της 14^{ης} Ιουλίου εντοπίστηκε καπνός. Το σύστημα ανίχνευσης καπνού μέσω εξαγωγής δείγματος στη γέφυρα έδειξε παρουσία καπνού στο αμπάρι 4. Εκείνη τη στιγμή μόνο δύο μέλη του πληρώματος βρίσκονταν σε βάρδια. Μετά από επιθεώρηση, ο ναυτικός επιβεβαίωσε ότι έβγαινε καπνός από το αμπάρι. Για να ειδοποιηθεί το υπόλοιπο πλήρωμα σήμανε συναγερμός πυρκαγιάς, το πλήρωμα συγκεντρώθηκε και έπειτα απελευθερώθηκε CO_2 μέσω των συστημάτων κατάσβεσης για την καταπολέμηση της πυρκαγιάς. Επιπλέον, ανατέθηκε σε μέρος του πληρώματος η ρίψη νερού στην περιοχή γύρω από το κάλυμμα του κύτους φορτίου και πάνω σε αυτό στο αμπάρι φορτίου 4. Κατά την εφαρμογή νερού στην περιοχή σημειώθηκε έκρηξη, η οποία απέκοψε το πλήρωμα στο μπροστινό μέρος του πλοίου από τις σωσίβιες λέμβους και το υπόλοιπο πλήρωμα. Μετά την έκρηξη, ο καπετάνιος αποφάσισε να εγκαταλείψει το πλοίο. Κατά τη διάρκεια της εκκένωσης το πλήρωμα που είχε παγιδευτεί στο μπροστινό μέρος του πλοίου παρελήφθη και απομακρύνθηκε. Το πλοίο αφέθηκε να καεί και η επιχείρηση διάσωσης ολοκληρώθηκε στις 9 Σεπτεμβρίου.

Πίνακας 10 Κατάλογος πλοίων που είχαν μεγάλες πυρκαγιές λόγω υποχλωριώδους ασβεστίου. [28]

CONTSHIP FRANCE-YEAR 1997	SEA ELEGANCE-YEAR 2003
ACONCAGUA-YEAR 1998	AMSTERDAM BRIDGE-YEAR 2012
DG HARMONY-YEAR 1998	HANSA BRANDENBURG-YEAR 2013
CMA DJAKARTA-YEAR 1999	HANJIN GREEN EARTH-YEAR 2015
HANJIN PENSYLVANIA-YEAR 1999	MAERSK SEOUL-YEAR 2015

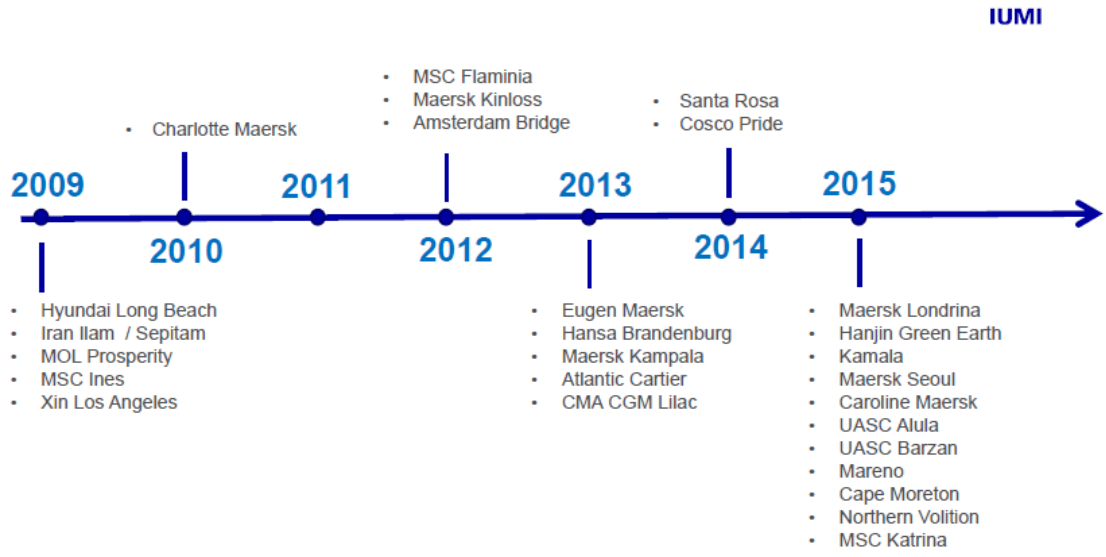
Με βάση τα προαναφερθέντα προκύπτει ότι ως κυριότεροι κίνδυνοι αναγνωρίζονται η αποστολή σε εμπορευματοκιβώτια υποχλωριώδους ασβεστίου και προϊόντων μπρικέτας συμπιεσμένου άνθρακα. Το συμπέρασμα αυτό προέκυψε με βάση το μεγάλο αριθμό των περιστατικών πυρκαγιάς, που προκλήθηκαν από την αποστολή αυτών των δύο τύπων

φορτίου. Το υποχλωριώδες ασβέστιο (calcium hypochlorite) και τα προϊόντα μπρικέτας συμπιεσμένου άνθρακα (compressed charcoal briquette products) σε συνδυασμό αποτέλεσαν την αιτία σχεδόν του 50% όλων των διερευνημένων ατυχημάτων πυρκαγιάς.

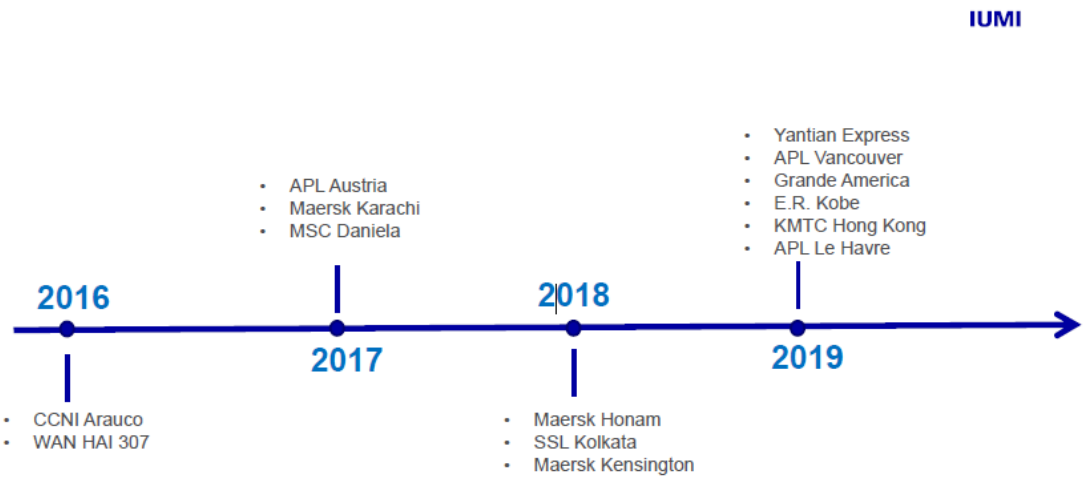
Η μεταφορά με εμπορευματοκιβώτια και η αποθήκευση επαναφορτιζόμενων μπαταριών και διβινυλοβενζολίου αποτελούν επίσης κινδύνους υψηλών συνεπειών κρίνοντας από τη σοβαρότητα των πυρκαγιών και την εκτεταμένη ζημιά που προκάλεσαν αυτοί οι δύο τύποι πυρκαγιών φορτίου τόσο στα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων όσο και στο πλήρωμά τους.

Ακολούθως, παρουσιάζεται μια χρονική ιστορία των ατυχημάτων λόγω πυρκαγιάς που έχουν εκδηλωθεί σε πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων στο χρονικό διάστημα 2000 έως και 2019:

Εικόνα 21 Χρονική ιστορία ατυχημάτων λόγω πυρκαγιάς σε containerships χρονικής περιόδου 2000-2008. [26]



Εικόνα 22 Χρονική ιστορία ατυχημάτων λόγω πυρκαγιάς σε containerships χρονικής περιόδου 2009-2015. [26]



Εικόνα 23 Χρονική ιστορία ατυχημάτων λόγω πυρκαγιάς σε containerships χρονικής περιόδου 2016-2019. [26]

Από την χρονική αυτή ιστορία καταδεικνύεται η υψηλή συχνότητα και ο υψηλός αριθμός ατυχημάτων που έχουν λάβει χώρα κατά το εν λόγω διάστημα 2000 έως και 2019.

4.4 Η περίπτωση του YANTIAN EXPRESS

Το YANTIAN EXPRESS ήταν ένα πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων γερμανικής σημαίας. Το εν λόγω πλοίο στις 19 Ιανουαρίου του 2019 βρισκόταν σε υπηρεσία με πορεία προς το λιμάνι Χάλιφαξ του Καναδά. Το πλοίο ξεκίνησε το ταξίδι του από το Βιετνάμ, σταματώντας ενδιάμεσα σε λιμάνια της Σιγκαπούρης και της Σρι Λάνκα κατά τη διάρκεια του ταξιδιού. Το πλοίο ήταν προγραμματισμένο να ελλιμενισθεί σε διάφορα λιμάνια της ανατολικής ακτής της Αμερικής μετά το λιμάνι του Χάλιφαξ. Στους ακόλουθους πίνακες παρουσιάζονται τα στοιχεία των κύριων διαστάσεων του πλοίου καθώς επίσης και λεπτομέρειες του ταξιδιού και του ατυχήματος λόγω πυρκαγιάς που έλαβε χώρα στο πλοίο. [8]

Εικόνα 24 Φωτογραφία του πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων YANTIAN EXPRESS. [8]

Πίνακας 11 Βασικές πληροφορίες του πλοίου YANTIAN EXPRESS. [8]

Ship Particulars	
Name of ship:	YANTIAN EXPRESS
Type of ship:	Full-container carrier
Flag:	Germany
Port of registry:	Hamburg
IMO Number	9229831
Call Sign	DPCK
Owner	Hapag-Llody AG
Shipping Company	Hapag-Llody AG
Year built	2002
Shipyard	Hyundai Heavy Industries Co. Ltd. -Ulsan yard
Classification Society	DNV GL
Length Overall	320.38
Breadth Overall	42.88
Draught (max.):	14.52
Gross Tonnage	88,493
Deadweight:	100,003t
Engine rating	49,300 kW
Main Engine	MAN B&W 12K98MC
(Service) Speed:	22.5 kts
Hull Material:	Steel
Hull design:	Double bottom
Minimum safe manning:	17

Πίνακας 12 Λεπτομέρειες του ταξιδιού του πλοίου YANTIAN EXPRESS. [8]

Voyage particulars	
Port of departure	Colombo, Sri Lanka
Port of call	Halifax, Canada
Type of voyage	Merchant shipping/international
Cargo information	Containers
Manning	22
Draught at time of accident	Df=12.9m , Da=12.9m
Pilot on board	No
Number of passengers	0

Πίνακας 13 Λεπτομέρειες του περιστατικού του ατυχήματος στο YANTIAN EXPRESS. [8]

Marine casualty or incident information	
Type of marine casualty:	Serious marine casualty,cargo fire
Date,time:	03/01/2019, 0000 ship's time
Location:	North Atlantic
Lalitude/Longitude:	φ 37o 37.0'N λ 051o 14.0'W
Voyage segment:	High seas
Place on board:	Hatch cover of cargo hold 2 , bay 12
Human factors:	No
Consequences:	Fire and water damage to cargo and ship

Εικόνα 25 Γεωγραφική θέση του σημείου του ατυχήματος. [8]

4.4.1 Γενικά

Σύμφωνα με εκτενές άρθρο [33], τις πρώτες πρωινές ώρες της 3ης Ιανουαρίου 2019, ξέσπασε φωτιά σε ένα κοντέινερ στοιβαγμένο στο κατάστρωμα του πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων Yantian Express πάνω από το κύτος (Hold) 2 ενώ βρισκόταν σε υπηρεσία στον Βόρειο Ατλαντικό. Το ταξίδι του πλοίου μέχρι και εκείνη την ημέρα ήταν χωρίς προβλήματα, εντούτοις η κατάσταση της θάλασσας άρχισε να επιδεινώνεται. Κατά τη χρονική εκείνη στιγμή επικράτησε άνεμος έντασης 7-8 Beaufort δημιουργώντας δύσκολες συνθήκες για την ομάδα πυρόσβεσης.

Εικόνα 26 Πυρκαγιά πάνω από το κύτος (Hold) 2 του πλοίου Yantian Express. [8]

Το βράδυ της ίδια ημέρας, ο εφοδιασμός του πληρώματος σε μπουκάλες αέρα SCBA είχε εξαντληθεί και έπρεπε να σταματήσουν τις ενεργές προσπάθειες πυρόσβεσης. Παρά αυτόν τον περιορισμό, έστησαν πυροσβεστικούς σωλήνες για να ψύξουν την περίμετρο σε μια προσπάθεια να επιβραδύνουν την εξάπλωση της πυρκαγιάς.

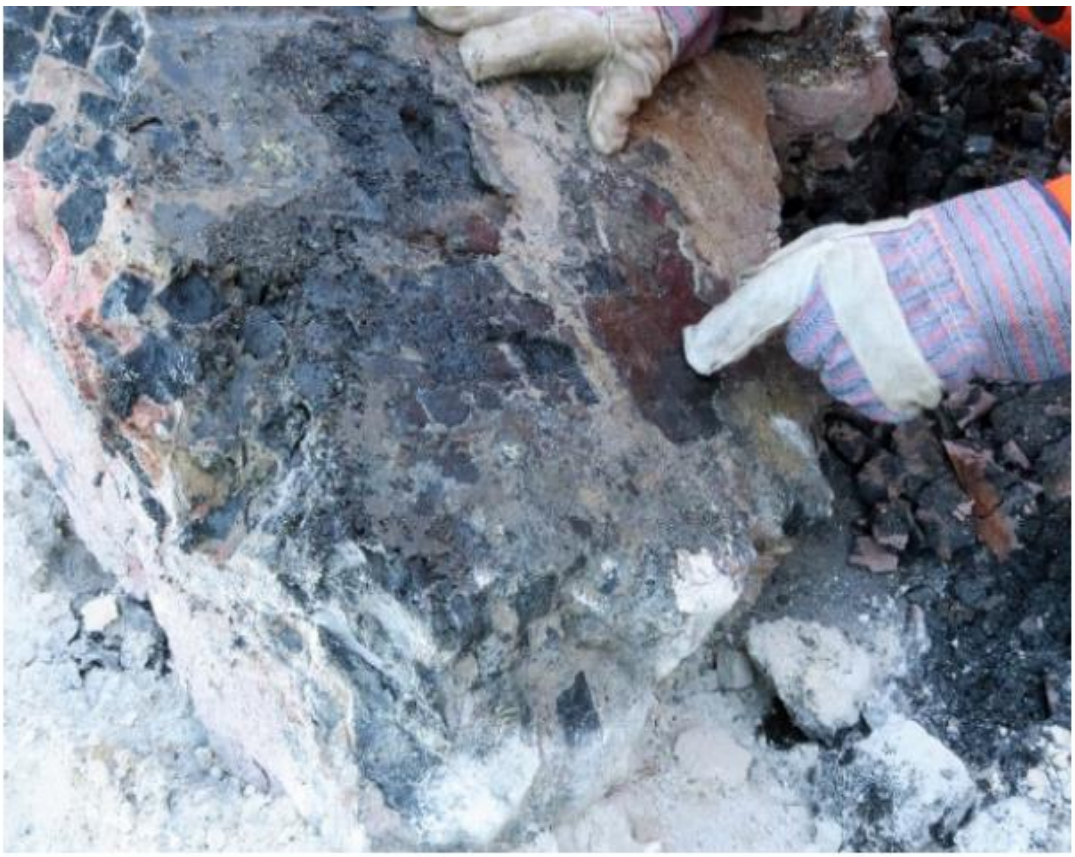
Κατόπιν αιτήματος του πλοιοκτήτη, το ρυμουλκό ανοικτής θάλασσας Smit Nicobar πήγε στο σημείο και παρείχε βοήθεια με τα πυροσβεστικά μόνιτορ του το απόγευμα στις 4 Ιανουαρίου. Ωστόσο, η φωτιά συνέχισε να εξαπλώνεται. 11 μέλη του πληρώματος μεταφέρθηκαν στο πλοίο Smit Nicobar και τα υπόλοιπα 11 ακολούθησαν το παράδειγμά τους το απόγευμα της 6ης Ιανουαρίου. Μια μικρή ομάδα επέστρεψε στο πλοίο στις 7 Ιανουαρίου για να δημιουργήσει μια σύνδεση ρυμούλκησης με το μεγάλο υπεράκτιο ρυμουλκό Maersk Mobilizer, το οποίο είχε επίσης προσέλθει στον τόπο του ατυχήματος.

Στις 15 Ιανουαρίου, μια ομάδα επαγγελματιών πυροσβεστών και διασωστών έφτασε με το πλοίο Boskalis AHTS Sovereign και κατάφεραν να σβήσουν όλα τα φλεγόμενα κοντέινερ στο κατάστρωμα μέχρι τις 21 Ιανουαρίου. Η προσπάθεια να σβήσουν τα τελευταία φλεγόμενα κοντέινερ κάτω από το κατάστρωμα στο κύτος φορτίου (Hold 1) συνεχίστηκε μέχρι τις 26 Ιανουαρίου.

Το Maersk Mobilizer ρυμούλκησε το Yantian Express στο Freeport στις Μπαχάμες, όπου ξεφορτώθηκαν τα κατεστραμμένα κοντέινερ και οι επιθεωρητές επιβιβάστηκαν στο πλοίο. Όταν οι υπάλληλοι της BSU[4] μπήκαν στα εμπορευματοκιβώτια που ήταν στοιβαγμένα κοντά στην τοποθεσία όπου ξέσπασε η φωτιά, διαπίστωσαν ότι ένα κουτί με δηλωμένο φορτίο σφαιριδίων καρύδας (coconut pellets) (συμπιεσμένες ίνες που χρησιμοποιούνται για ζωοτροφές ή λίπασμα) ήταν στην πραγματικότητα ένα φορτίο άνθρακα καρύδας (coconut charcoal), γνωστό και ως pyrochar.

[4] Bundesstelle für Seeunfalluntersuchung – BSU (Federal Bureau of Maritime Casualty Investigation)

Εικόνα 27 Καμένα εμπορευματοκιβώτια κατά την αποφόρτωση του πλοίου Yantian Express στο λιμάνι Freeport στις Μπαχάμες. [8]



Εικόνα 28 Πακεταρισμένοι κύβοι του υλικού pyrochar ευρισκόμενοι ανάμεσα στα συντρίμμια της πυρκαγιάς. [8]

Εικόνα 29 Φωτογραφία του εσωτερικού του ύποπτου για την πυρκαγιά εμπορευματοκιβωτίου. [8]

Οι εργαστηριακές δοκιμές μερικών από τους κύβους ξυλάνθρακα που σώθηκαν από αυτό το εμπορευματοκιβώτιο έδειξε ότι είχαν δυνατότητα αυτανάφλεξης κάτω από μια θερμοκρασία περίπου 50 βαθμών Κελσίου (122 Φαρενάιτ). Δεδομένου ότι δεν υπήρχαν άλλες πηγές υποψήφιες για πηγές ανάφλεξης στην περιοχή όπου ξέσπασε η φωτιά, η BSU υπέθεσε ότι αυτό το φορτίο ήταν η πιθανή πηγή της πυρκαγιάς. Η έντονη θερμότητα που παράγεται από την καύση του υλικού pyrochar μέσα στο εμπορευματοκιβώτιο είναι πιθανό να οδήγησε στην ανάφλεξη ενός παρακείμενου κιβώτιου σακουλών πολυπροπυλενίου, επιτρέποντας στη φωτιά να εξαπλωθεί.

Τα εύφλεκτα εμπορεύματα με πιθανότητα αυτανάφλεξης απαιτούν συνήθως δοκιμές και πιστοποιήσεις για τη μεταφορά στην ναυτιλία και οι ερευνητές της BSU δεν μπόρεσαν να αποκλείσουν την πιθανότητα ο αποστολέας να δήλωσε εσφαλμένα το φορτίο προκειμένου να αποφύγει τις απαιτήσεις συμμόρφωσης.

Η BSU σημείωσε επίσης αρκετές δυσκολίες που αντιμετώπισε το πλήρωμα κατά τη διάρκεια της πυρόσβεσης.

- Πρώτον, το σύστημα κατάσβεσης CO_2 για το κύτος φορτίου (Hold) 1 δεν εκκενώθηκε πλήρως λόγω δυσλειτουργίας του συστήματος χρονικής καθυστέρησης. Αυτό δεν επηρέασε την πορεία της πυρκαγιάς, αλλά υπό διαφορετικές συνθήκες θα μπορούσε να έχει δημιουργήσει προβλήματα
- Δεύτερον, το πλήρωμα ανέφερε ότι η πυρόσβεση και η ψύξη κάτω από τα εμπορευματοκιβώτια στο κατάστρωμα ήταν δύσκολη λόγω των εγκάρσιων ράβδων που ήταν συγκολλημένες μεταξύ των στηρίξεων του εμπορευματοκιβωτίου, γεγονός

που κατέστησε δύσκολο τον ψεκασμό νερού κάτω από τα εμπορευματοκιβώτια στη μέση της στοίβας (stack). Αυτό είναι ένα χαρακτηριστικό δομικού σχεδιασμού, αλλά δημιούργησε προβλήματα κατά την πυρόσβεση.

- Τρίτον, το συσσωρευμένο νερό από τις προσπάθειες πυρόσβεσης έθεσε εκτός λειτουργίας τα χειριστήρια της ηλεκτρικής βαλβίδας του φρεατίου αποστράγγισης στο κύτος 2, καθιστώντας αδύνατη την αποστράγγιση του διαμερίσματος μέχρι να αναπτυχθεί επαρκής παροχή της φορητής αντλίας αποστράγγισης. Η άντληση των αντλιών αποστράγγισης για το κύτος 1 απέτυχε επίσης, πιθανώς λόγω συντριμμιών και απόφραξης.

4.5 Η περίπτωση του MAERSK HONAM

Εικόνα 30 Φωτογραφία του πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων MAERSK HONAM. [42]

Στους ακόλουθους τρεις πίνακες παρουσιάζονται λεπτομέρειες για το πλοίο και για τα συστήματα κατάσβεσης και καταπολέμησης της πυρκαγιάς καθώς επίσης και του εξοπλισμού πυρασφαλείας που φέρει για το πλήρωμα σε περίπτωση πυρκαγιάς:

Πίνακας 14 Λεπτομέρειες και διαστάσεις του πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων MAERSK HONAM. [42]

DETAILS OF SHIP	
Name	Maersk Honam
IMO Number	9784271
Flag	Singapore
Ship type	Container Carrier - Twin Island type
Year Built	31 August 2017
Owner	A.P Moller Singapore Pte. Ltd.
Company	Maersk Line A/S
Classification Society	American Bureau of Shipping (ABS)
ISM RO - Document of Compliance (DOC)	Lloyds Register of Shipping (LR)
ISM RO - Safety Management Certification (SMC)	ABS
Gross Tonnage	153,153
Length overall	353.02m (Distance from mid-accommodation to mid-engine room casing about 172 m)
Breadth	53.56m
Depth	29.90m
Summer draft	16.02m
Displacement	193,377.16 tonnes / 207,748 (Summer)
Height	72.85m
Main Engine(s)	Huyndai-MAN B&W 8G95ME-C9.5 MCR: 54,960kW NCR:49,464kW
Diesel Generators	Four nos. Hyundai Himsen @ 6H32/40 2850 kW
Shaft Generator	One no. Siemens@3200kW
Speed	21.90kts @ N.C.R 49,464kW x 77.2 rpm
Propeller	One five-blade fixed right handed propeller
Thruster	Two (Bow) + two (Stern) @ 25 tons/each
Nominal TEU In Hold On deck/Hatch	15,282 TEUs (Total : 1000 reefer plugs) 8'6" (normal) x 10 tiers + 9'6" (high cube) x 1 tier 8'6" x 11 tiers

Πίνακας 15 Συστήματα πυρόσβεσης και εξοπλισμός πυρασφάλειας του πλοίου MAERSK HONAM. [42]

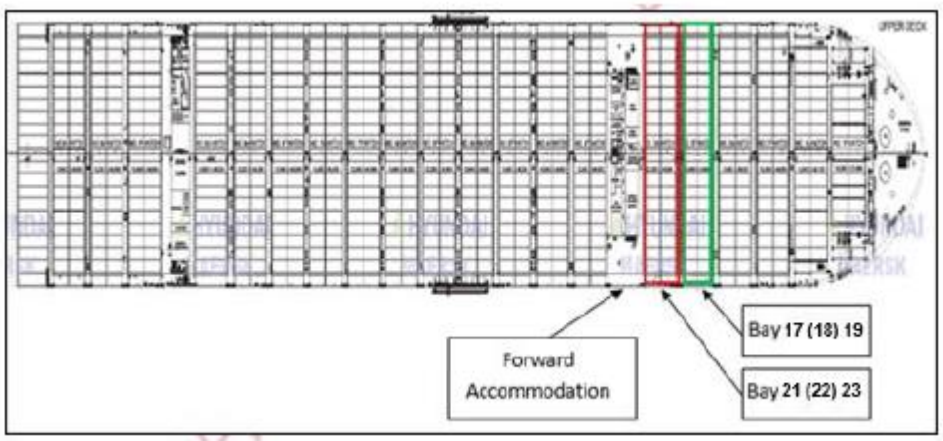
Fire Fighting Equipment and systems	
Two pumps as combined Fire and General Service (G/S) pump	Fire mode: 310m^3/h@11bar G/S mode: 555 m^3/h@3 bar
Emergency Fire Pump (One set)	Capacity 72m^3/h
Self-Contained Compressed Air Breathing Apparatus with two spare air cylinders	Two sets at the A-deck (Fire Control Station). (See figure 3 showing MH accommodation block and its deck levels) Two sets at Funnel deck (engine casing) One set at bosun store (forward) c/w chemical suit
Heat Resistance protective suit	Two sets at A-deck (Fire Control Station)
(Complete Fireman's suit)	Two sets at Funnel deck (engine casing)
Emergency Escape Breathing Device (EEBD)	Five sets at A-deck (Fire Control Station) 10 sets located strategically inside Engine Room
Fixed Fire extingushing System for Cargo Hold	Carbon Dioxide (C02) gas used as a medium for fire extinguishing system for engine room and cargo holds. A C02 tank capacity of 29,722kg is located inside C02 room at the Under-deck space below the accommodation. The tank was having a C02 quantity of about 28,500kg (minimum required was 23,931kg for the largest space)

Πίνακας 16 Συστήματα διάσωσης πλοίου MAERSK HONAM. [42]

Life-Saving Appliances	
Lifeboat (Gravity type-fully enclosed)	34-person capacity - total two, located at Accommodation A-deck (port and starboard side).
Life rafts (with embarkation rope ladder)	20 -person capacity - total four, with hydrostatic release unit located at Accommodation A-deck(Two port and Two starboard). 6-person capacity - total four, manual launching. Two each located at the main deck forward engine casing , with one on each side of the ship.

Πίνακας 17 Κατάσταση του πλοίου MAERSK HONAM κατά την αναχώρηση από τη Σιγκαπούρη και κατά τη στιγμή του ατυχήματος. [42]

Departure condition (from Singapore and at the time of the occurrence)	
Draft at Forward / Aft / Midship	15.09m / 15.16m / 15.12m
Metacentric height (GM)	3,50m



Εικόνα 31 Maersk Honam upper deck plan indicating no.3 cargo hold consisting of bays 17-23.

Bay 17 (18) 19 in-way of no.3 cargo hold forward section (green box).

Bay 21 (22) 23 in-way of no.3 cargo hold aft section (red box). [42]

4.5.1 Γενικά

Σύμφωνα με εκτενές δημοσίευμα [29] στις 6 Μαρτίου 2018, το πλοίο Maersk Honam, ένα από τα εξαιρετικά μεγάλα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων της Maersk, έπιασε φωτιά στην Αραβική Θάλασσα ενώ εκτελούσε το δρομολόγιο από τη Σιγκαπούρη στην Αίγυπτο.

Το πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων υπό τη σημαία της Σιγκαπούρης, το οποίο μετέφερε 7860 κοντέινερ, αντιμετώπισε μια σφοδρή πυρκαγιά που ξεκίνησε από το κύτος φορτίου 3 (cargo hold no.3) περίπου 900 ναυτικά μίλια δυτικά της ακτής της Ινδίας.

Το πλήρωμα προσπάθησε να καταπολεμήσει τη φωτιά ξεκινώντας με την ψύξη των ορίων του χώρου φορτίου και την επακόλουθη απελευθέρωση διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) στο αμπάρι, αλλά δεν κατάφερε να σβήσει τη φωτιά. Πέντε μέλη του πληρώματος χάθηκαν τελικά σε αυτό το περιστατικό.

Εικόνα 32 Φωτογραφία της πυρκαγιάς στο κύτος φορτίου (cargo hold) 3 του πλοίου MAERSK HONAM (1). [29]

Εικόνα 33 Φωτογραφία της πυρκαγιάς στο κύτος φορτίου (cargo hold) 3 του πλοίου MAERSK HONAM (2). [29]

Το Γραφείο Έρευνας Ασφάλειας Μεταφορών της Σιγκαπούρης (TSIB), που είναι η αρχή διερεύνησης αεροπορικών, θαλάσσιων και σιδηροδρομικών ατυχημάτων και συμβάντων στη Σιγκαπούρη, ανέλαβε να διεξαγάγει την έρευνα για τη φωτιά στο Maersk Honam και πρόσφατα δημοσίευσαν την τελική τους έκθεση [40] για το περιστατικό. [29]

4.5.2 Ευρήματα

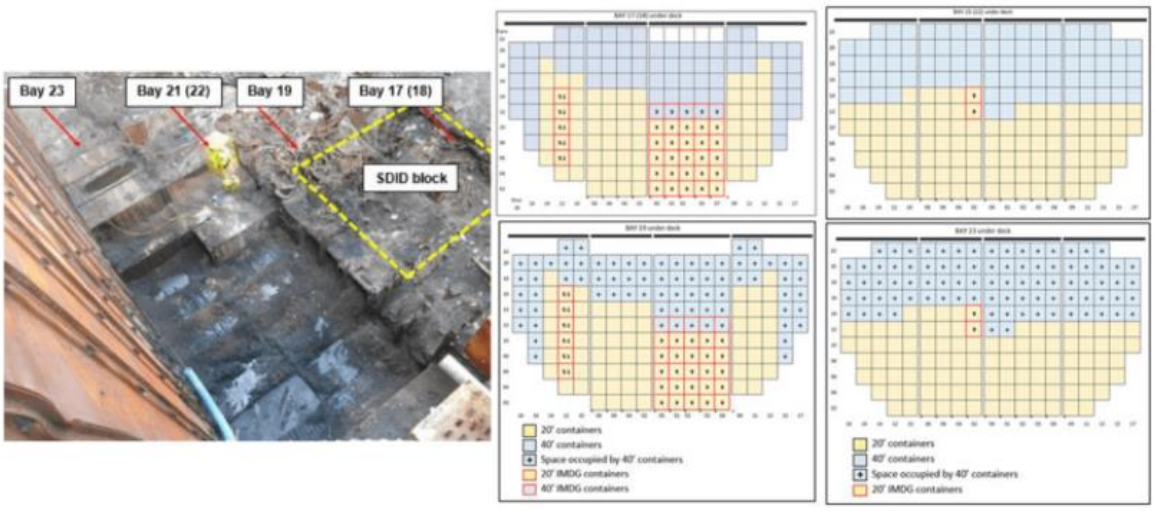
Το δημοσίευμα [29] αναφέρει ότι σύμφωνα με την προαναφερθείσα έκθεση, δεδομένου ότι τα περισσότερα στοιχεία καταστράφηκαν από την πυρκαγιά, δεν κατέστη δυνατό να προσδιοριστεί με ακρίβεια η αιτία της πυρκαγιάς.

Ωστόσο, η παρουσία καπνού με οσμή χλωρίου που παρατηρήθηκε κατά την έναρξη της έρευνας υποδηλώνει την πιθανότητα ένα ή περισσότερα εμπορευματοκιβώτια στο κύτος φορτίου 3 (cargo hold 3) να περιείχαν το υλικό Sodium Dichloroisocyanurate Dihydrate - SDID.

Το SDID που ταξινομείται στην Κλάση 9 του Κώδικα IMDG είναι ένα δραστικό συστατικό σε ξηρά λευκαντικά, ενώσεις προϊόντων πλυσίματος πιάτων, απολυμαντικά απορρυπαντικών σε σκόνη καθαρισμού, απολυμαντικά πισίνας, επεξεργασίας νερού και λυμάτων.

Το SDID έχει περιεκτικότητα σε χλώριο 56% σε σύγκριση με το διχλωροϊσοκυανουρικό οξύ στο οποίο η περιεκτικότητα σε χλώριο είναι 62%.

Το πλοίο μετέφερε περίπου 1.000 τόνους SDID, το οποίο ήταν στοιβαγμένο σε μια στοίβα (stack) 54 εμπορευματοκιβωτίων στο κύτος φορτίου (cargo hold) 3. Σύμφωνα με το πρόγραμμα σχεδιασμού στοιβασίας (stowage planning system) του μεταφορέα, δεν υπήρχαν προβλήματα με τη στοιβασία των εμπορευματοκιβωτίων στο πλοίο.



Εικόνα 34 Θέση που ήταν τοποθετημένα σε μπλοκ (το ένα παρακείμενα του άλλου) τα εμπορευματοκιβώτια με το υλικό SDID. [42]

Η έκθεση αναφέρει ότι υπάρχει πιθανότητα τα εμπορευματοκιβώτια που περιείχαν SDID να αποδομήθηκαν από την αυτοδιάσπαση του SDID και ότι η αποθήκευση σε μπλοκ, όπως φαίνεται στην εικόνα 34 του SDID, επιδείνωσε περαιτέρω τον ρυθμό αντίδρασης και παραγωγής θερμότητας που είχε ως αποτέλεσμα την ανεξέλεγκτη εξάπλωση της πυρκαγιάς.

Η έκθεση αναφέρει ότι:

Δεδομένης της ευαισθησίας του SDID σε εξώθερμη αποσύνθεση παρουσία νερού ή ακαθαρσιών, πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη η προοπτική ότι η αποσύνθεση θα μπορούσε να ξεκινήσει ως άμεσο αποτέλεσμα των εγγενών ιδιοτήτων του ίδιου του φορτίου.

Οι ειδικές διατάξεις (SP135) στον Κώδικα IMDG επιτρέπουν την ταξινόμηση και τη μεταφορά του SDID στην Κλάση 9 (UN αρ. 3077), επομένως δεν αναγνωρίζεται η πιθανή θερμική αστάθεια αυτού του υλικού, πιθανώς ως αποτέλεσμα των απαιτήσεων μεταφοράς παλαιού τύπου που υιοθετήθηκαν σχεδόν 40 χρόνια πριν.

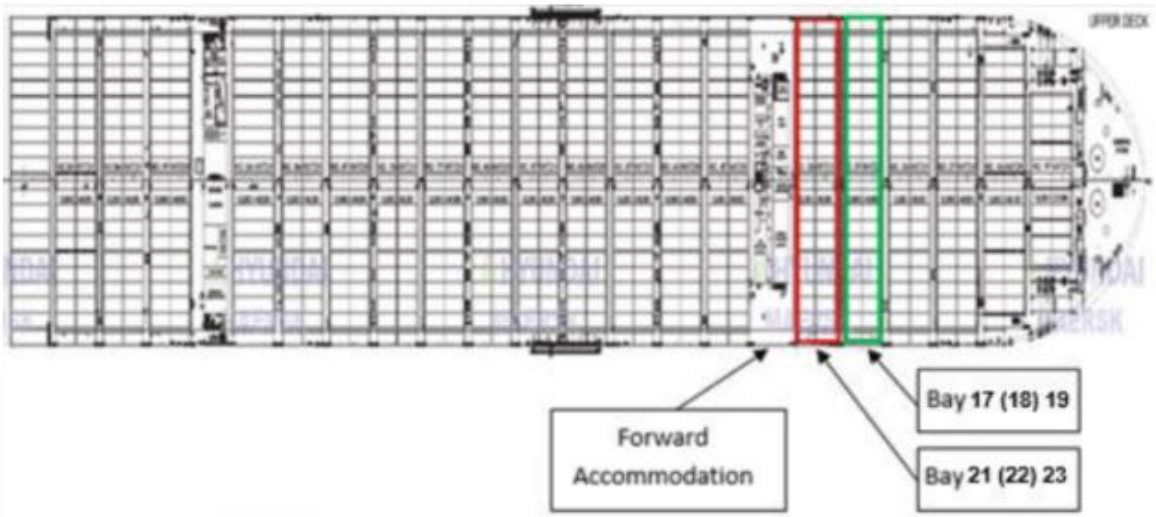
Ως αποτέλεσμα, παρά αυτούς τους κινδύνους, το SDID τοποθετήθηκε κάτω από το κατάστρωμα όπου το κύριο σταθερό μέσο πυρόσβεσης σε αυτήν την περιοχή ήταν το CO2, το οποίο είναι αναποτελεσματικό για την αντιμετώπιση πυρκαγιών που σχετίζονται με τέτοια υλικά.

Η έκθεση διαπίστωσε ότι οι διατάξεις του κώδικα IMDG θα πρέπει να επανεξεταστούν επειδή οι δευτερεύοντες κίνδυνοι που παρουσιάζονται από το SDID δεν αποτυπώνονται στις τρέχουσες διατάξεις του κώδικα IMDG και ότι τα κατάλληλα μέτρα, παρόμοια με αυτά που υιοθετήθηκαν για το υποχλωριώδες ασβέστιο, όπως προσδιορίζονται από το CINS θα πρέπει να εξεταστεί αν θα πρέπει να υιοθετηθούν από τον κώδικα IMDG.

Μαζί με τα παραπάνω, η έκθεση διαπίστωσε και κάποιες ελλείψεις στον τρόπο με τον οποίο ο πλοίαρχος του πλοίου και το πλήρωμα χειρίστηκαν την κατάσταση. Το πλήρωμα λέγεται ότι σήμανε τον γενικό συναγερμό αντί του συναγερμού πυρκαγιάς που θα μπορούσε να είχε ως αποτέλεσμα την καθυστέρηση στο κλείσιμο των μαγνητικών θυρών πυρκαγιάς.

Επειδή οι μαγνητικές πόρτες πυρκαγιάς δεν έκλεισαν εγκαίρως, το πλήρωμα δεν μπόρεσε να κλείσει τα ανοίγματα του φυσικού εξαερισμού στο αμπάρι φορτίου 3, εν μέρει λόγω του έντονου καπνού και της θερμότητας και επειδή δεν τους δόθηκε συγκεκριμένη θέση των ανοιγμάτων φυσικού εξαερισμού. Το μη κλείσιμο αυτών των ανοιγμάτων είχε ως αποτέλεσμα να μην σφραγιστεί το κύτος φορτίου (cargo hold) 3 πριν από την απελευθέρωση του συστήματος κατάσβεσης CO_2.

Κοιτώντας την παρακάτω εικόνα αντιλαμβάνεται κανείς πόσο κοντά ήταν η ζημιά σε σχέση με το χώρο ενδιαιτήσεων καθώς επίσης και το μέγεθος του κινδύνου για το πλήρωμα.



Εικόνα 35 Τοποθεσία της πυρκαγιάς σε σχέση με την υπερκατασκευή ενδιαιτήσεων του πλοίου MAERSK HONAM. [29]

4.6 Η περίπτωση του X-PRESS PEARL

Εικόνα 36 Φωτογραφία του βυθισμένου πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων X-Press Pearl. [32]

4.6.1 Περίληψη των κυριότερων σημείων

Το περιστατικό του X-Press Pearl είναι η χειρότερη θαλάσσια καταστροφή που έπληξε τη Σρι Λάνκα. Είχε σημαντικό αντίκτυπο στο ευαίσθητο παράκτιο περιβάλλον της Σρι Λάνκα, στις τοπικές κοινότητες και στην οικονομία. Επιπλέον, το συμβάν συνεχίζει να εκτυλίσσεται

και η φάση παραγωγής ενεργού ρύπανσης θα κλείσει μόνο με την εξάλειψη των κινδύνων από το ναυάγιο και τα εμπορευματοκιβώτια που χάθηκαν στη θάλασσα. Μαζί με τις αβεβαιότητες της υπέρμετρης περιβαλλοντικής ζημίας, η πολυπλοκότητα του συμβάντος πηγάζει από το εύρος των εμπλεκόμενων ρύπων πετρελαίου, τα επικίνδυνα χημικά και πλαστικά και την έλλειψη σαφήνειας σχετικά με τη φύση και την κατάσταση σημαντικού μέρους του φορτίου του πλοίου. Επιπλέον, η αυξανόμενη γεωγραφική έκταση της πλαστικής ρύπανσης που αποτελεί τη μεγαλύτερη που έχει καταγραφεί αναμένεται να έχει διεθνείς επιπτώσεις που επιδεινώνουν περαιτέρω το πρόβλημα. [32]

4.6.2 Αιτία του ατυχήματος

Πιστεύεται ότι η διαρροή του σωστά δηλωμένου, αλλά ακατάλληλα ή εσφαλμένα συσκευασμένου ή στοιβαγμένου νιτρικού οξέος (nitric acid) προκάλεσε την πυρκαγιά του X-Press Pearl. Το νιτρικό οξύ είναι ένα διαβρωτικό, τοξικό και εύφλεκτο υγρό και το X-Press Pearl μετέφερε 25 τόνους από αυτό. [32]

4.6.3 Ιστορικό και Πεδίο Αποστολής

Στις 20 Μαΐου 2021, εκπομπές χημικών αναθυμιάσεων ξέσπασαν στο πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων MV X-Press Pearl με σημαία Σιγκαπούρης καθώς αγκυροβόλησε περίπου 9 ναυτικά μίλια (17 χιλιόμετρα) βορειοδυτικά του λιμανιού του Κολόμπο στα εθνικά ύδατα της Σρι Λάνκα. Ένας άγνωστος αριθμός εμπορευματοκιβωτίων, μερικά από τα οποία μετέφεραν επικίνδυνα χημικά και πλαστικά σφαιρίδια, έπεσαν στη θάλασσα καθώς ξέσπασε έντονη φωτιά και σημειώθηκαν εκρήξεις στις 25 Μαΐου. Μόλις η φωτιά τέθηκε υπό έλεγχο περίπου μια εβδομάδα αργότερα, μια προσπάθεια ρυμούλκησης του πλοίου στις 2 Ιουνίου_σε βαθύτερα νερά απέτυχε και είχε ως αποτέλεσμα τη μερική βύθιση του πλοίου. Μια πετρελαιοκηλίδα που προερχόταν από το πλοίο ήταν ορατή μέσω δορυφόρου από τις 8 Ιουνίου και στις 17 Ιουνίου ολόκληρο το πλοίο είχε προσαράξει στον βυθό της θάλασσας σε βάθος περίπου 21 μέτρων, με μόνο το κατάστρωμα forecastle του και μερικούς από τους γερανούς του να είναι ορατά. Το πλήρωμα απομακρύνθηκε με ασφάλεια από το πλοίο και δεν προκλήθηκαν ανθρώπινες απώλειες από το συμβάν. [12]

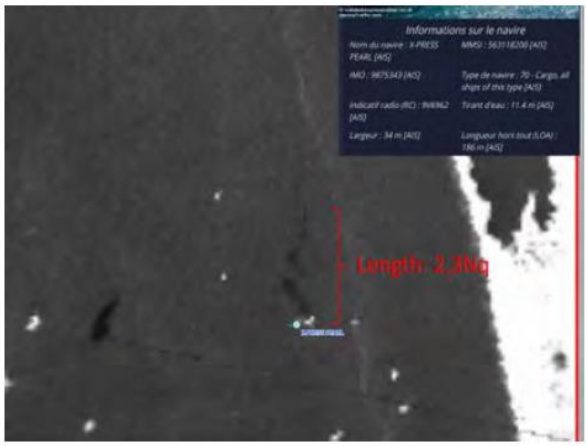


Figure 2.2: Sentinel 1 satellite image (2021-06-14 / 00H24 UTC) processed by CLS and highlighting extent of spill.

Figure 2.3: The slick originating from the wreck observed by helicopter (2021-06-20).

Εικόνα 37 Φωτογραφίες της ορατής πετρελαιοκηλίδας από το πλοίο X-PRESS PEARL. [12]

4.6.4 Πλαίσιο

Σύμφωνα με έκθεση των αρχών των Ηνωμένων Εθνών [12], αν και ιστορικά η Σρι Λάνκα έχει βιώσει σχετικά περιορισμένες θαλάσσιες καταστροφές, σε διάστημα εννέα μηνών η χώρα υπέστη δύο μεγάλα περιστατικά, συγκεκριμένα αυτό του:

i) MT New Diamond crude oil carrier τον Σεπτέμβριο του 2020.
ii) MV X-Press Pearl φορτηγού πλοίου τον Μάιο του 2021.

Και τα δύο περιστατικά προκλήθηκαν από πυρκαγιά στα πλοία. Έχοντας τοποθεσία σε μια σημαντική ναυτιλιακή διαδρομή Ανατολής-Δύσης και με σημαντικές επενδύσεις σε εξέλιξη για την κατασκευή ενός περιφερειακού θαλάσσιου και υλικοτεχνικού κόμβου, η πιθανότητα παρόμοιων ατυχημάτων αναμένεται να αυξηθεί στο μέλλον.

Στην έκθεση αυτή [12] περιγράφουν το MV X-Press Pearl ως τη «χειρότερη καταστροφή στη ναυτική ιστορία της». Είναι προφανές ότι πρόκειται για ένα σύνθετο και πολυδιάστατο περιστατικό που περιλαμβάνει ένα φάσμα περιβαλλοντικών ζητημάτων με δυνητικά σοβαρές συνέπειες τόσο βραχυπρόθεσμα όσο και μακροπρόθεσμα. Οι βασικοί κίνδυνοι προκύπτουν από:

1. Διαρροή μαζούτ (348 τόνοι).

2. Επικίνδυνες και επιβλαβείς ουσίες (από τα 1.486 εμπορευματοκιβώτια του πλοίου τα 81 μετέφεραν επικίνδυνα εμπορεύματα, συμπεριλαμβανομένων 25 τόνων νιτρικού οξέος, καυστικού νατρίου και μεθανόλης. Επιπλέον, υπήρχαν 9.700 τόνοι δυνητικά τοξικών εποξειδικών ρητινών στο πλοίο).

3. Ανάκτηση και απόσυρση του ναυαγίου και των χαμένων εμπορευματοκιβωτίων.

4. Μικροπλαστικά (nurdles ή πλαστικά pellets < 5mm). Συνολικά, στο πλοίο υπήρχαν 87 κοντέινερ που μετέφεραν διάφορους τύπους πλαστικών σφαιριδίων. Η συνολική ποσότητα πλαστικών pellets υπολογίζεται σε περίπου 1.680 τόνους.

5. Μακροπλαστικά (5-50 mm).

6. Υπολείμματα πυρκαγιάς.

7. Διάφορα χύδην συντρίμμια (φορτίο, κομμάτια κατεστραμμένων εμπορευματοκιβωτίων).

8. Ατμοσφαιρική ρύπανση.

4.6.5 Πρωτοφανής διαρροή πλαστικού

Ο πιο άμεσος και σημαντικός αντίκτυπος του περιστατικού μέχρι στιγμής είναι τα κύματα βιομηχανικών nurdles (πρώτες ύλες πλαστικών σφαιριδίων) και άλλων συντριμμιών που ξεβράζονται στην ξηρά αρκετές ημέρες μετά το ξέσπασμα της μεγάλης πυρκαγιάς στις 25 Μαΐου. Η φωτιά και οι εκρήξεις είχαν ως αποτέλεσμα την πτώση φορτίου, συμπεριλαμβανομένων των κοντέινερ με nurdles. Μια μαζική συσσώρευση πλαστικών σφαιριδίων, που φέρεται να φτάνει έως και τα δύο μέτρα βάθος σε ορισμένες τοποθεσίες στις παραλίες του Νεγκόμπο, είναι το χαρακτηριστικό γνώρισμα του περιστατικού που μαγνήτισε την προσοχή του κοινού τόσο στη Σρι Λάνκα όσο και διεθνώς. Πράγματι, το περιστατικό φέρεται να είναι η μεγαλύτερη πλαστική διαρροή που έχει καταγραφεί. Το περιστατικό είναι επίσης ξεχωριστό, καθώς ένα σημαντικό ποσοστό των πλαστικών στην ακτογραμμή είναι καμένα θραύσματα διαφόρων μεγεθών και αναμεμειγμένα με διάφορους τύπους συντριμμιών από το πλοίο και το φορτίο του. Τόσο η καύση των πλαστικών όσο και η παρουσία επικίνδυνων χημικών ουσιών εγείρουν σημαντικά ερωτήματα σχετικά με την πιθανή μόλυνση. [12]

4.6.6 Χρονοδιάγραμμα του Συμβάντος

Σύμφωνα με την εκτενή αναφορά της έκθεσης [12] το πλοίο MV X-Press Pearl αναχώρησε από το λιμάνι της Χαζίρα στην Ινδία στις 15 Μαΐου. Έπειτα από 16 ώρες την ίδια ημέρα άρχισαν να εμφανίζονται εκπομπές κίτρινων και καφέ αναθυμιάσεων από το πλοίο. Στις 20 Μαΐου πραγματοποίησε την πρώτη της συνάντηση η Ομάδα Διαχείρισης Συμβάντων (IMT). Στις 21 Μαΐου πραγματοποιήθηκε επίσκεψη επιθεώρησης από την ομάδα IMT στο πλοίο X-PRESS Pearl οπότε και αναφέρθηκαν πυρκαγιές στο κατάστρωμα. Εν συνεχεία στις 22 Μαΐου ακούστηκαν εκρήξεις στο αμπάρι και εκδηλώθηκε πυρκαγιά στο πλοίο. Στις 25 Μαΐου εκδηλώθηκαν δυνατές εκρήξεις και η φωτιά τύλιξε όλο το πλοίο. Σύμφωνα με πληροφορίες πολλά container έπεσαν στην θάλασσα ενώ όλο το προσωπικό απομακρύνθηκε. Στο πλαίσιο των προσπαθειών κατάσβεσης αρκετά πυροσβεστικά σκάφη από τη Σρι Λάνκα και την ινδική ακτοφυλακή αναπτύχθηκαν στο σημείο για την καταπολέμηση της πυρκαγιάς.

Μέχρι και τις 31 Μαΐου η κατάσταση της πυρκαγιάς βρισκόταν υπό έλεγχο οπότε και λήφθηκε η απόφαση να ρυμουλκηθεί το σκάφος σε καταφύγιο 50 ναυτικά μίλια δυτικά της ακτογραμμής. Στις 2 Ιουνίου, μετά τη ρυμούλκηση του πλοίου για σχεδόν 1 ναυτικό μίλι, το πίσω μέρος του βυθίστηκε περίπου 9 ναυτικά μίλια από το λιμάνι του Colombo και 4.5 ναυτικά μίλια ενώ στις 17 Ιουνίου το πλοίο βυθίστηκε πλήρως σε βάθος περίπου 21 μέτρων. Η έκταση περίπου 100 χιλιομέτρων μεταξύ των Negombo και Kalutera είναι η πιο επηρεασμένη από την πλαστική διαρροή από το πλοίο. Πλαστικά σφαιρίδια και άλλα συντρίμμια συνεχίζουν να προσκολλώνται στην ακτογραμμή. Εκτιμάται ότι το ένα τέταρτο

των εμπορευματοκιβωτίων μπορεί να βρίσκεται ακόμη στο πλοίο ενώ τα υπόλοιπα είτε κάηκαν είτε βρίσκονται στον πυθμένα της θάλασσας.

5 Αριθμητικές προσομοιώσεις πυρκαγιάς

Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι η εξέταση της υπόθεσης που αφορά το εάν μια πυρκαγιά η οποία ξεκινά από την καύση ενός επικίνδυνου φορτίου εντός ενός εμπορευματοκιβωτίου δύναται να εξαπλωθεί διαμέσω της οροφής του εν λόγω εμπορευματοκιβωτίου σε ένα εμπορευματοκιβώτιο στοιβαγμένο αμέσως από πάνω από αυτό. Αναλυτικότερα στην υπόθεση αυτή εξετάζονται δύο εμπορευματοκιβώτια TEU στοιβαγμένα επί του καταστρώματος καιρού, το ένα πάνω στο άλλο όπως στον χώρο φορτίου ενός πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. Η εξέταση της υπόθεσης υλοποιήθηκε με τη σχεδίαση των δύο αυτών εμπορευματοκιβωτίων στο πρόγραμμα Pyrosim και την πραγματοποίηση μέσω του λογισμικού, προσομοίωσης πυρκαγιάς θεωρώντας πιλοτική ανάφλεξη ξυλάνθρακα (charcoal) εντός του κάτωθεν εμπορευματοκιβωτίου.

Στο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι αριθμητικές προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο του προγράμματος PyroSim [41] το οποίο αποτελεί λογισμικό της Thunderhead Engineering. Εν συνεχεία, πραγματοποιήθηκε σχολιασμός των αποτελεσμάτων από τον οποίο και προέκυψαν κάποια χρήσιμα για τη μελέτη συμπεράσματα.

Αρχικά στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια παρουσίαση ορισμένων πληροφοριών σχετικά με το λογισμικό FDS και το πρόγραμμα PyroSim με στόχο την βέλτιστη κατανόηση των συνεπακόλουθων πειραμάτων που απορρέουν από αυτά.

Εν συνεχεία γίνεται μια παρουσίαση του μοντέλου της προσομοίωσης στο πρόγραμμα συνοδευόμενη από τις διαστάσεις του χώρου και των αντικειμένων καθώς και των ανοιγμάτων εξαερισμού τους. Αμέσως μετά παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο μοντελοποιήθηκαν τα εμπορευματοκιβώτια που περιλαμβάνονται στον χώρο αυτό φορτίου καθώς και η μέθοδος προσδιορισμού της παραμέτρου του ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας και των λοιπών ιδιοτήτων για τα εμπορευματοκιβώτια και τις ποικίλες επιφάνειες που ορίστηκαν και τέλος το υπολογιστικό πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση των υπολογισμών.

Στο τέλος του κεφαλαίου παρατίθενται οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν. Στις συνημμένες εικόνες γίνεται παρουσίαση της διαμόρφωσης των χώρου φορτίου στο πρόγραμμα ενώ παρατίθενται επίσης τα αποτελέσματα των υπολογισμών και συγκριτικός σχολιασμός των διαγραμμάτων όπως για παράδειγμα του ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας, όπως αυτός προέκυψε στο πλαίσιο των υπολογισμών που έγιναν.

5.1 Fire Dynamics Simulator (FDS)

Το λογισμικό Fire Dynamics Simulator (FDS) είναι ένα μοντέλο υπολογιστικής ρευστομηχανικής (CFD – Computational Fluid Dynamics) που προσομοιώνει την ροή ρευστών που δημιουργούνται στα πλαίσια πυρκαγιών. Το FDS πραγματοποιεί αριθμητική επίλυση μιας μορφής των εξισώσεων Navier-Stokes κατάλληλη για χαμηλές ταχύτητες (Αριθμού Mach - MA <0.3) αναφορικά με μια θερμικά καθοδηγούμενη ροή με σημείο έμφασης τη μεταφορά καπνού και θερμότητας από πυρκαγιές. Η διατύπωση των εξισώσεων

και ο αριθμητικός αλγόριθμος περιέχονται στον Τεχνικό Οδηγό Αναφοράς του λογισμικού. Οι πιο κοινές εφαρμογές του μοντέλου πραγματοποιούνται στο πλαίσιο του σχεδιασμού συστημάτων διαχείρισης καπνού και σε μελέτες ενεργοποίησης καταιωνιστήρων και ανιχνευτών. Άλλες εφαρμογές συναντώνται κυρίως σε προσομοιώσεις πυρκαγιών σε χώρους κατοικιών και βιομηχανιών. Κριτήριο καθ' όλη τη διάρκεια ανάπτυξης του λογισμικού αυτού, αποτελεί η επίλυση πρακτικών προβλημάτων πυρκαγιάς στον κλάδο του Fire Protection Engineering ενώ συνάμα παρέχει και ένα πρακτικό εργαλείο μελέτης του φαινομένου των θεμελιωδών αρχών της καύσης και της δυναμικής μιας πυρκαγιάς. [41]

5.2 PyroSim

Το PyroSim είναι ένα γραφικό υπολογιστικό περιβάλλον επαφής του χρήστη με το Fire Dynamics Simulator (FDS). Το FDS είναι στενά συνδεδεμένο με το PyroSim. Τα μοντέλα FDS μπορούν να προβλέψουν τον καπνό, τη θερμοκρασία, το μονοξείδιο του άνθρακα και άλλες ουσίες κατά τη διάρκεια πυρκαγιών. Το FDS είναι ένας ισχυρός προσομοιωτής πυρκαγιάς που αναπτύχθηκε στο Εθνικό Ινστιτούτο Προτύπων και Τεχνολογίας (National Institute of Standards and Technology - NIST). Το FDS προσομοιώνει σενάρια πυρκαγιάς χρησιμοποιώντας υπολογιστική μηχανική ρευστών (CFD) βελτιστοποιημένη για χαμηλής ταχύτητας, θερμικά καθοδηγούμενη ροή. Αυτή η προσέγγιση είναι πολύ ευέλικτη και μπορεί να εφαρμοστεί σε πυρκαγιές που κυμαίνονται από μικρές εστίες μέχρι δεξαμενές αποθήκευσης λαδιού. Μπορεί επίσης να μοντελοποιήσει καταστάσεις που δεν περιλαμβάνουν πυρκαγιά, όπως εξαερισμό κτιρίων. [41]

Το γραφικό περιβάλλον του PyroSim παρέχει άμεση ανατροφοδότηση εισόδου και διασφαλίζει τη σωστή μορφή για το αρχείο εισόδου FDS.

Σύμφωνα με τον οδηγό του λογισμικού [41] μερικά από τα κυριότερα σημεία περιλαμβάνουν:

• Εισαγωγή αρχείων CAD για τη δημιουργία και διαχείριση σύνθετων μοντέλων.

• Εργαλεία σχεδίασης 2D και 3D γεωμετρίας υψηλού επιπέδου.

• Ολοκληρωμένη παράλληλη επεξεργασία.

• Ευέλικτο σύστημα μονάδων που υποστηρίζει εργασία είτε σε μετρικό είτε σε αγγλικό σύστημα μονάδων.

• Εργαλεία για τη διαχείριση πολλαπλών πλεγμάτων.

•Συστήματα HVAC (Θέρμανση, Αερισμός και Κλιματισμός) ενσωματωμένα στην προσομοίωση CFD.

• Εισαγωγή υφιστάμενων μοντέλων FDS.

• Ολοκληρωμένη μετέπειτα επεξεργασία.

Συνοπτικά, το PyroSim αποτελεί εφαλτήριο για την γρήγορη και αξιόπιστη δημιουργία πολύπλοκων μοντέλων πυρκαγιάς.

Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με το πρόγραμμα παρέρχονται στο Παράρτημα Β της παρούσας μελέτης.

5.3 Το μοντέλο

5.3.1 Εισαγωγή

Στην ενότητα αυτή διερευνάται ο τρόπος με τον οποίο μια πυρκαγιά μπορεί να εξαπλωθεί, έχοντας ως αρχικό σημείο εκδήλωσης το εσωτερικό ενός εμπορευματοκιβωτίου. Σκοπός της της συγκεκριμένης υπόθεσης είναι η κατανόηση των μηχανισμών που είναι ικανοί να διαμορφώσουν συνθήκες που θα οδηγήσουν σε ένα σοβαρό περιστατικό πυρκαγιάς.

Η προσέγγιση αυτή πραγματοποιήθηκε, καθώς μέσω της βιβλιογραφικής έρευνας διαπιστώθηκε ότι το ερώτημα αυτό παραμένει ανοιχτό και δεν έχει διερευνηθεί εκτενώς ώστε να μπορούν να εξαχθούν κάποια χρήσιμα και ασφαλή συμπεράσματα. Πρόκειται για μια σημαντική περιοχή έρευνας, καθώς η πλειοψηφία των πυρκαγιών σε χώρους φορτίου πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, όπως μελετήθηκε και σε προηγούμενα κεφάλαια έχει ως σημείο εκκίνησης το φορτίο εντός των εμπορευματοκιβωτίων με άμεση συνέπεια την μετέπειτα εξάπλωση της πυρκαγιάς στα παρακείμενα εμπορευματοκιβώτια. Ως εκ τούτου, θα πρέπει να δοθεί μεγαλύτερη έμφαση στην κατανόηση των μηχανισμών που είναι ικανοί να διαμορφώσουν τις συνθήκες εκδήλωσης ενός σοβαρού περιστατικού πυρκαγιάς πριν την παράθεση πιθανών λύσεων.

Η χρήση εργαλείων προσομοίωσης όπως εν προκειμένω του Pyrosim επιτρέπει την διερεύνηση ρεαλιστικών σεναρίων χωρίς να απαιτείται η δοκιμή σε πραγματική κλίμακα δηλαδή σε ένα πραγματικό πλοίο. Η σωστή προσομοίωση ενός μοντέλου πυρκαγιάς επιτρέπει την εξέταση ενός πλήθους διαφορετικών σεναρίων γεγονός που ενδεχομένως να μην ήταν δυνατό με άλλα μέσα.

5.3.2 Υπόθεση που εξετάστηκε

Στην παρούσα ενότητα εξετάστηκε μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων πυρκαγιάς στο περιβάλλον του προγράμματος Pyrosim, η πιθανότητα εξάπλωσης μια πυρκαγιάς με αφετηρία εκδήλωσης το εσωτερικό ενός εμπορευματοκιβωτίου TEU (Twenty Foot Equivalent Unit) χρησιμοποιούμενο για το θαλάσσιο εμπόριο, στο αμέσως από πάνω. Αναλυτικότερα διερευνήθηκε αν το κόντρα πλακέ πάτωμα ενός εμπορευματοκιβωτίου ευρισκόμενο αμέσως από πάνω από το εμπορευματοκιβώτιο εντός του οποίου έχει εκδηλωθεί η πυρκαγιά, δύναται να αποτελέσει ένα μέσο για την εξάπλωση μιας πυρκαγιάς. Στο πλαίσιο της προσομοίωσης θεωρήθηκε ότι τα δύο αυτά εμπορευματοκιβώτια βρίσκονται επί του καταστρώματος καιρού ενός πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. Δεδομένης αυτής της παραδοχής θεωρήθηκαν συνθήκες καλού εξαερισμού για το μοντέλο.

5.3.3 Γεωμετρία εμπορευματοκιβωτίου

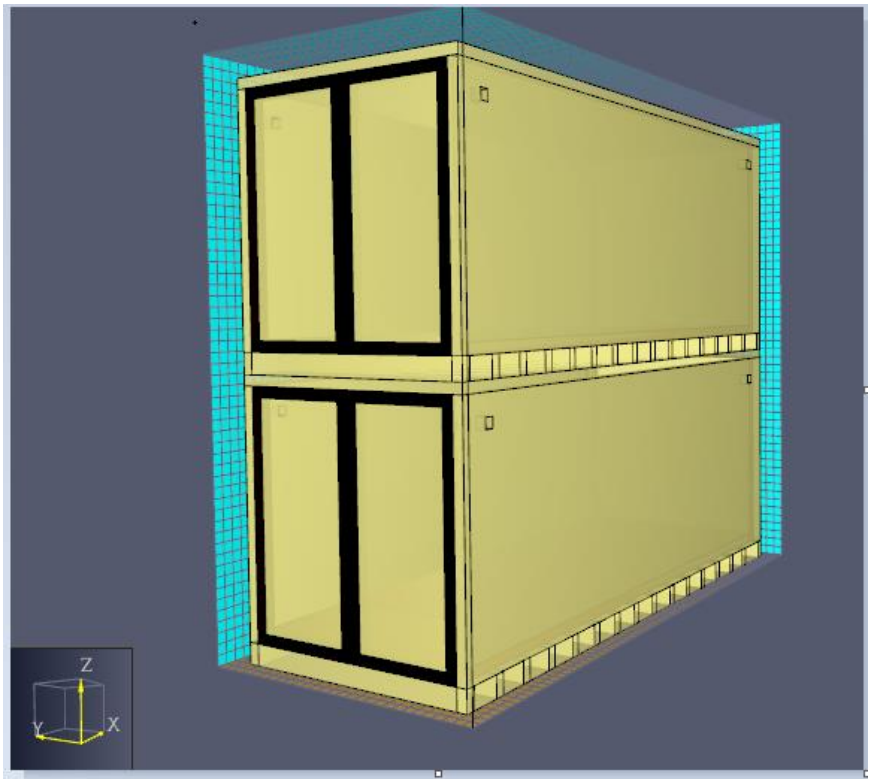
Με σκοπό την προσέγγιση της παραπάνω υπόθεσης σχεδιάστηκε το μοντέλο ενός εμπορευματοκιβωτίου στο υπολογιστικό περιβάλλον του Pyrosim. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν τα σχέδια ενός πραγματικού εμπορευματοκιβωτίου TEU με στόχο την βέλτιστη προσέγγιση της γεωμετρίας του.

Για λόγους συμβατότητας με το μέγεθος του πλέγματος και των κελιών οι εξωτερικές διαστάσεις του εμπορευματοκιβωτίου που σχεδιάστηκε επιλέχθηκαν όπως φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα :

Πίνακας 18 Εξωτερικές διαστάσεις εμπορευματοκιβωτίου TEU που σχεδιάστηκε.

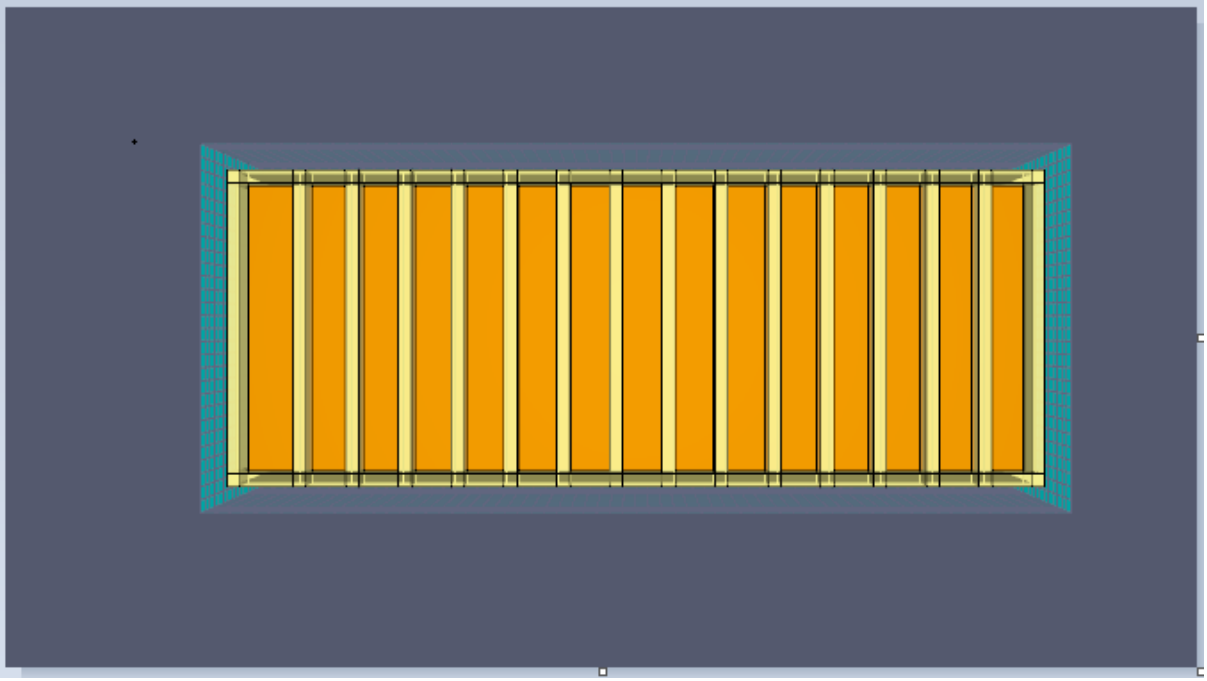
Εξωτερικές διαστάσεις μοντέλου εμπορευματοκιβωτίου		
Μήκος	6,2	[m]
Πλάτος	2,4	[m]
Ύψος	2,6	[m]

Στην ακόλουθη εικόνα παρουσιάζεται η εμπρόσθια όψη του εμπορευματοκιβωτίου στην οποία φαίνονται οι πόρτες του καθώς επίσης και η φλάντζα γύρω από αυτές που χρησιμοποιείται ως μονωτικό υλικό. Σε κάθε εμπορευματοκιβώτιο τοποθετήθηκαν δύο ανοίγματα εξαερισμού αντικριστά στην κάθε διαμήκη πλευρά, διαστάσεων 0.1 x 0.1 m. Στο Παράρτημα Γ αυτής της μελέτης εξετάζεται και η επίδραση της διάταξης των ανοιγμάτων εξαερισμού στην εξέλιξη της πυρκαγιάς.



Εικόνα 38 Εμπρόσθια όψη των εμπορευματοκιβωτίων και των χαρακτηριστικών τους.

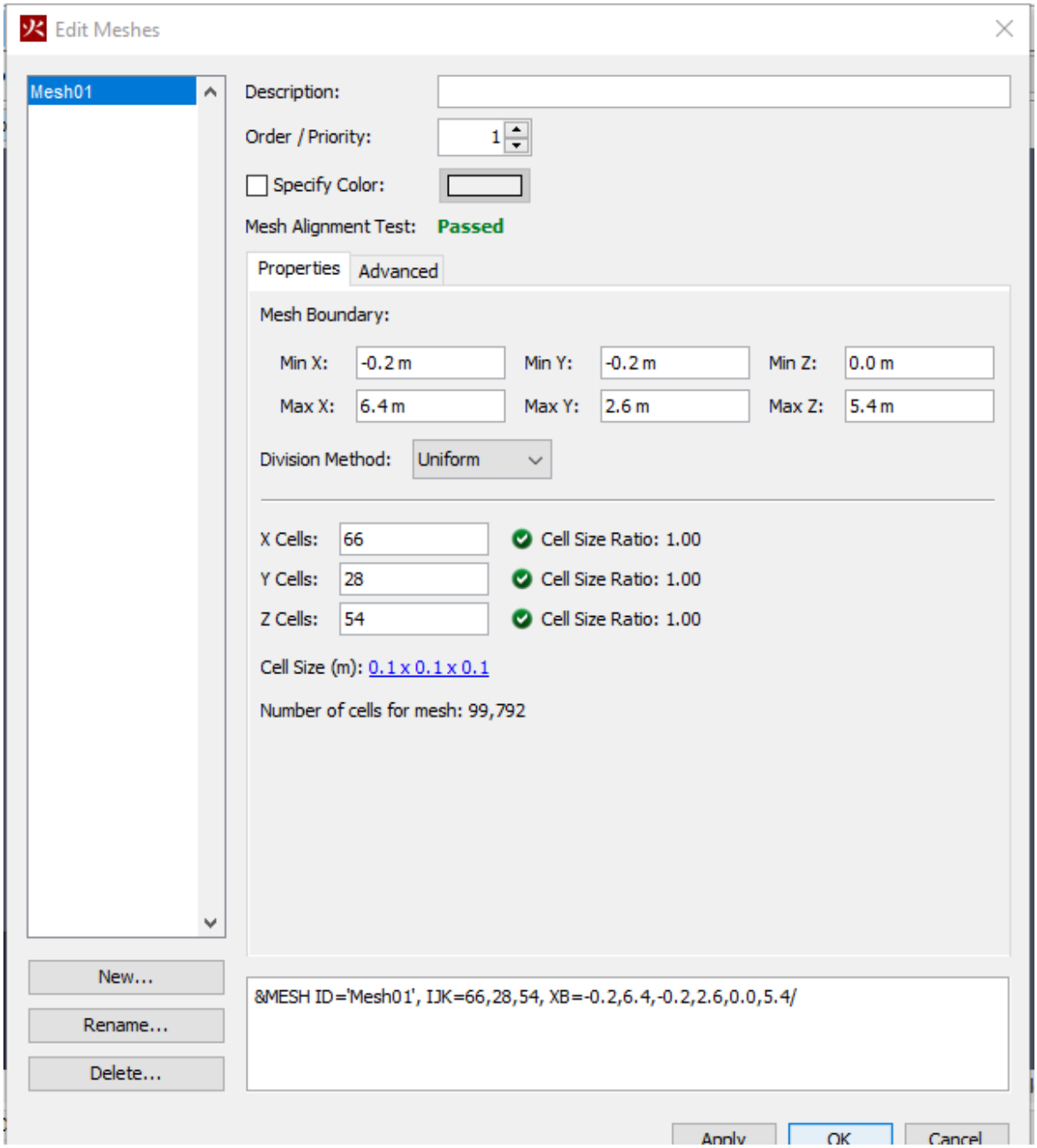
Ακολούθως παρουσιάζεται η δομή του πατώματος του εμπορευματοκιβωτίου βλέποντας το εξωτερικά από κάτω. Οι εγκάρσιες δοκοί που βρίσκονται στο κάτω μέρος του εμπορευματοκιβωτίου κατανεμήθηκαν σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους με γνώμονα το μέγεθος των κελιών του πλέγματος.



Εικόνα 39 Δομή της εξωτερικής κατασκευής του πατώματος του εμπορευματοκιβωτίου

5.3.4 Επιλογή πλέγματος

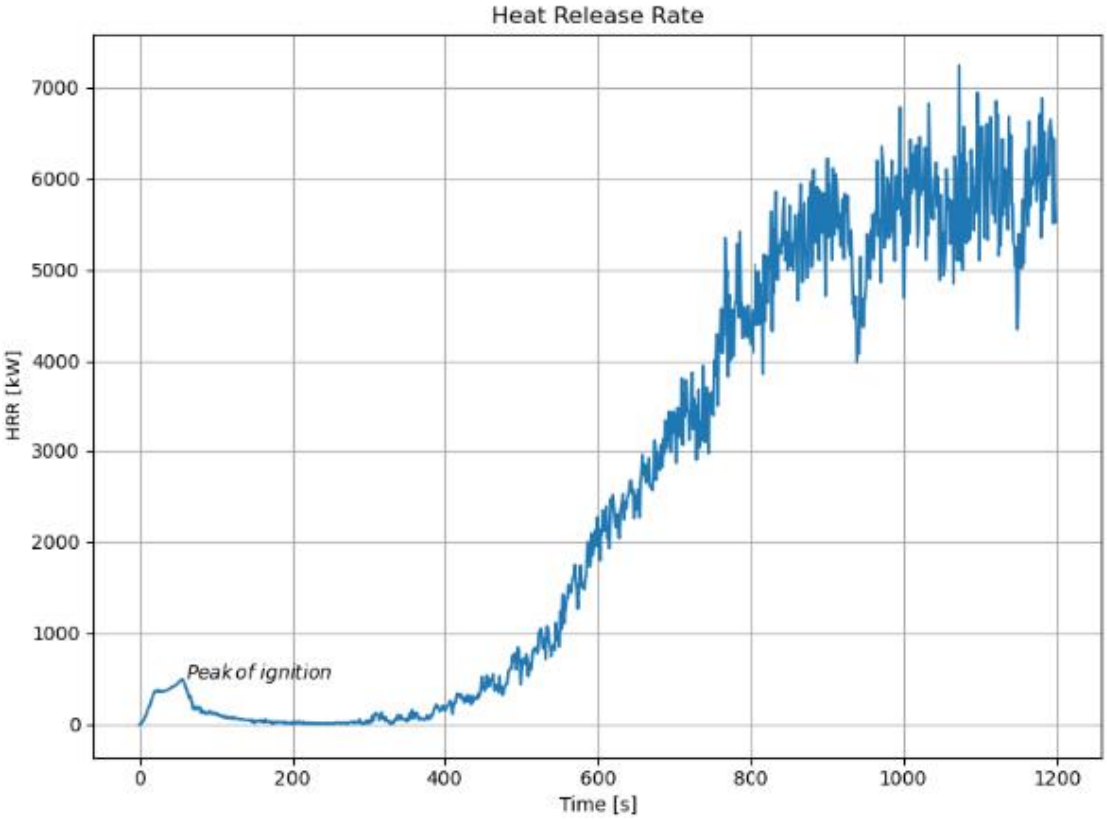
Για την εν λόγω προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε για τους υπολογισμούς ένα πλέγμα με κελιά διαστάσεων 0.1m και στις τρεις διευθύνσεις. Στην ακόλουθη εικόνα φαίνονται τα χαρακτηριστικά του υπολογιστικού πλέγματος που σχεδιάστηκε γύρω από τα δύο εμπορευματοκιβώτια :



Εικόνα 40 Χαρακτηριστικά του υπολογιστικού πλέγματος.

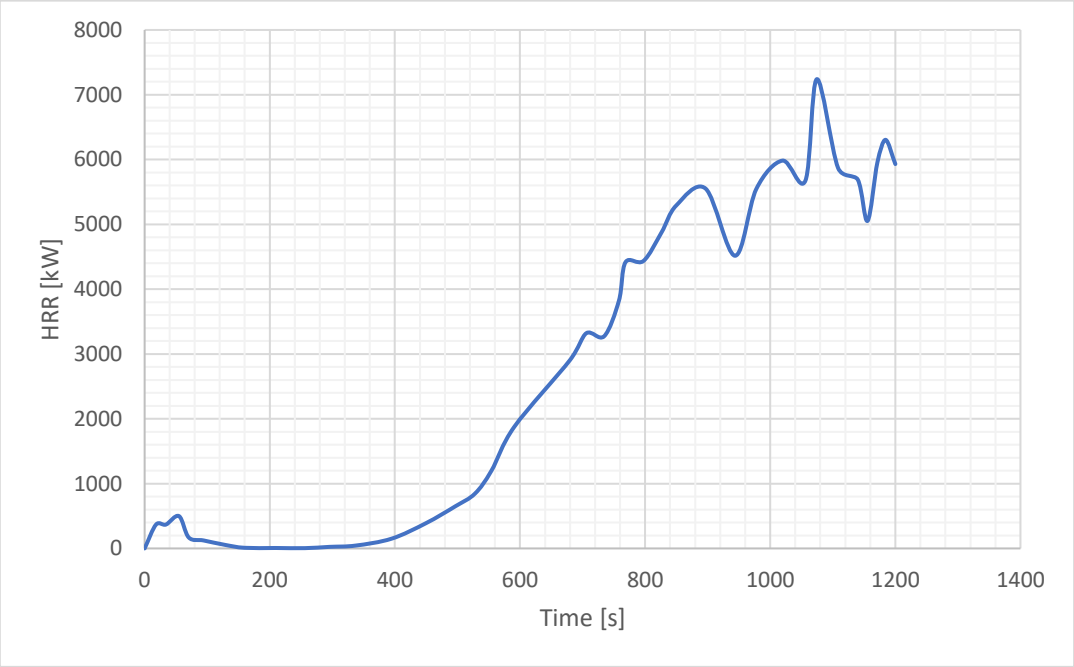
5.3.5 Ιδιότητες των υλικών και HRR

Σε υπολογιστικό πείραμα που πραγματοποιήθηκε από ερευνητικό οργανισμό στη Δανία [14] σχετικά με την εκδήλωση πυρκαγιάς σε ένα μεμονωμένο εμπορευματοκιβώτιο TEU εξαιτίας της ανάφλεξης του μεταφερόμενου φορτίου εντός αυτού μέσω πιλοτικής ανάφλεξης (pilot ignition), καταγράφηκε ο συνολικός ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας συναρτήσει του χρόνου. Ως μεταφερόμενο φορτίο θεωρήθηκε ο ξυλάνθρακας (charcoal) και ως διάστημα προσομοίωσης τα 23 λεπτά (1200 δευτερόλεπτα). Στο ακόλουθο διάγραμμα παρουσιάζεται η χρονική ιστορία του ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας συναρτήσει του χρόνου που προέκυψε από το εν λόγω πείραμα.

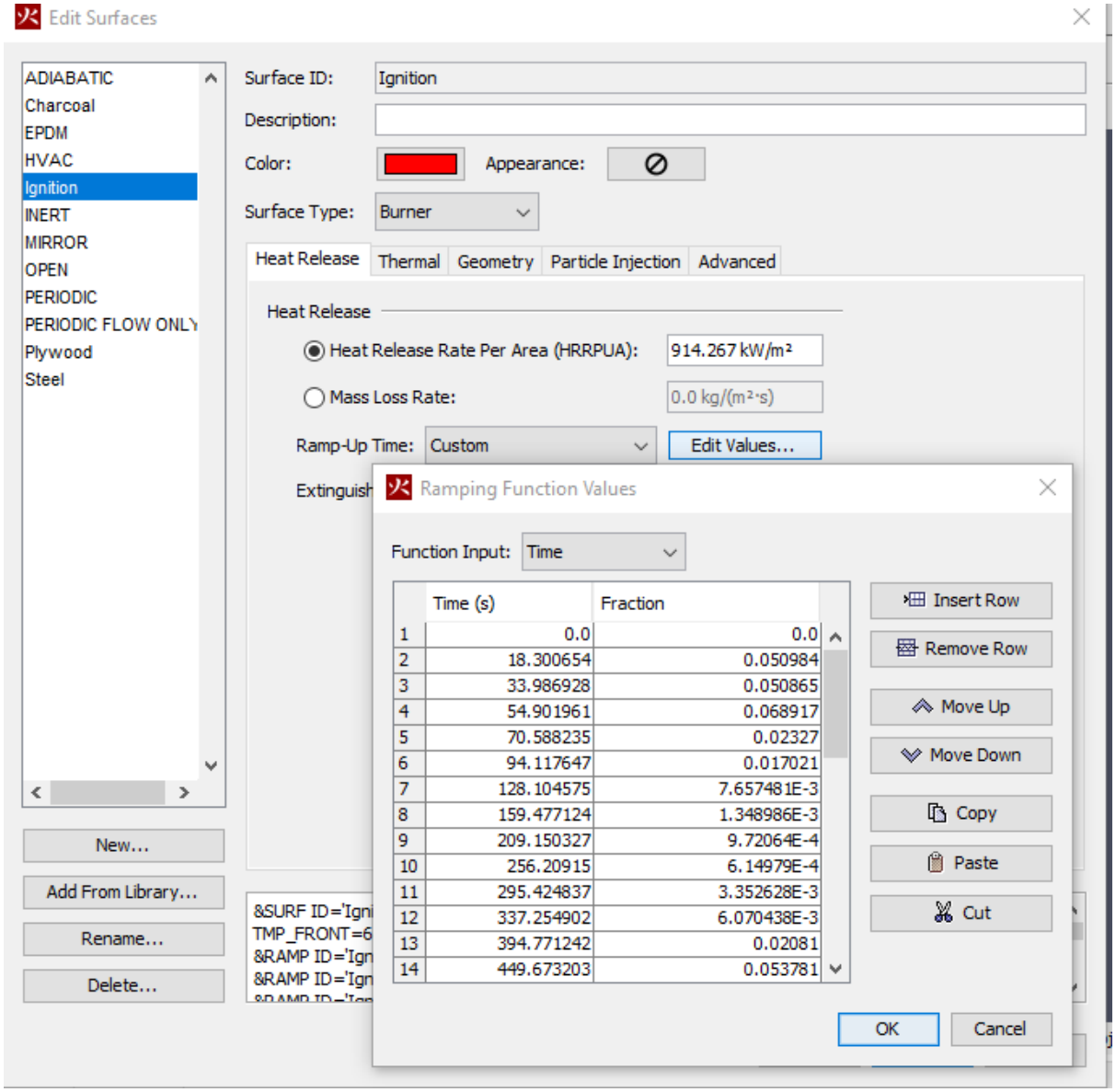


Εικόνα 41 Συνολικός ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας κατά την διάρκεια της υπολογιστικής προσομοίωσης. [14]

Από την μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκε το εν λόγω διάγραμμα και λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές του ορίστηκε μια επιφάνεια burner επί του κόντρα πλακέ πατώματος του κάτω εμπορευματοκιβωτίου με απώτερο σκοπό την αποτύπωση αυτής της χρονικής ιστορίας. Οι τιμές που λήφθηκαν για το HRR κανονικοποιήθηκαν με βάση την μέγιστη τιμή του HRR σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα που ανέρχεται στα 7241 kW. Στις ακόλουθες εικόνες φαίνονται ο προγεγραμμένος ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας συναρτήσει του χρόνου και οι ιδιότητες της επιφάνειας burner που ορίστηκε:

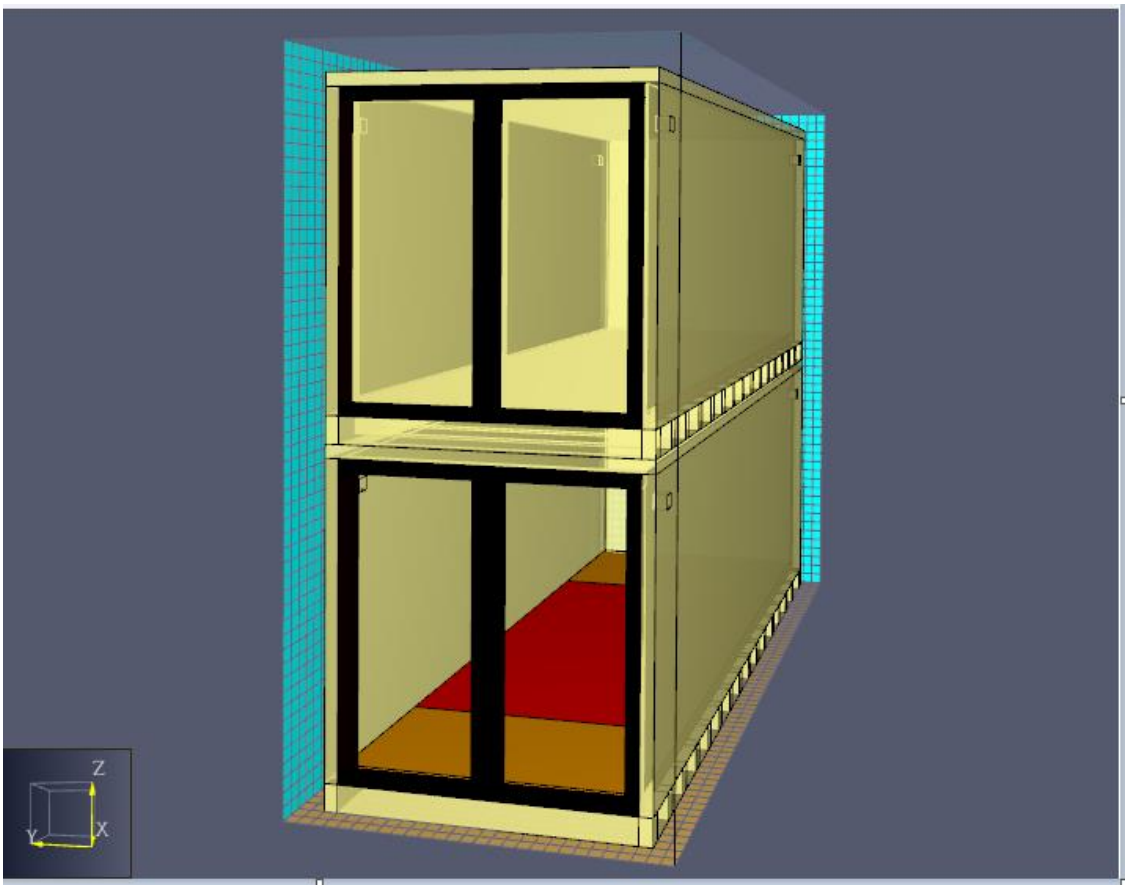


Εικόνα 42 Καμπύλη προγεγραμμένου ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας (Heat Release Rate) συναρτήσει του χρόνου.



Εικόνα 43 Ιδιότητες επιφάνειας burner.

Στην επιφάνεια του κόντρα πλακέ πατώματος του κάτω εμπορευματοκιβωτίου τοποθετήθηκε μια επιφάνεια vent καλύπτοντας το 60% του κόντρα πλακέ στην οποία προσδόθηκαν οι ιδιότητες της επιφάνειας burner με σκοπό την αποτύπωση της καύσης. Στην ακόλουθη εικόνα φαίνεται η εν λόγω επιφάνεια με κόκκινο χρώμα :



Εικόνα 44 Επιφάνεια vent (κόκκινο χρώμα) επί του πατώματος του κάτωθεν εμπορευματοκιβωτίου.

Η πυρκαγιά θεωρήθηκε ότι προκύπτει από καύση ξυλάνθρακα. Συνεπώς οι ιδιότητες της αντίδρασης καύσης βασίστηκαν στην καύση αυτού του υλικού. Οι παράμετροι της αντίδρασης καύσης που χρησιμοποιήθηκαν βάσει της μελέτης CONTAIN [14] παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 19 Παράμετροι αντίδρασης καύσης.

Reaction Properties	Charcoal	Units
Carbon atoms	25	-
Hydrogen atoms	1	-
Oxygen atoms	1	-
Nitrogen atoms	0,006	-
CO Yield Yco	0,005	-
Soot Yield Ys	0,1	-
Hydrogen fraction	0,1	-
Specific Heat of Combustion kJ/kg	38.000	[kJ/kg]
Critical flame temperature	1457	^{O}C

Το υλικό όλων των επιφανειών του εμπορευματοκιβωτίου ορίστηκε ως χάλυβας με εξαίρεση το κόντρα πλακέ πάτωμα και το μονωτικό υλικό στις πόρτες του. Ως μονωτικό υλικό θεωρήθηκε το υλικό EPDM (Ethylene Propylene Diene Monomer). Στον ακόλουθο πίνακα

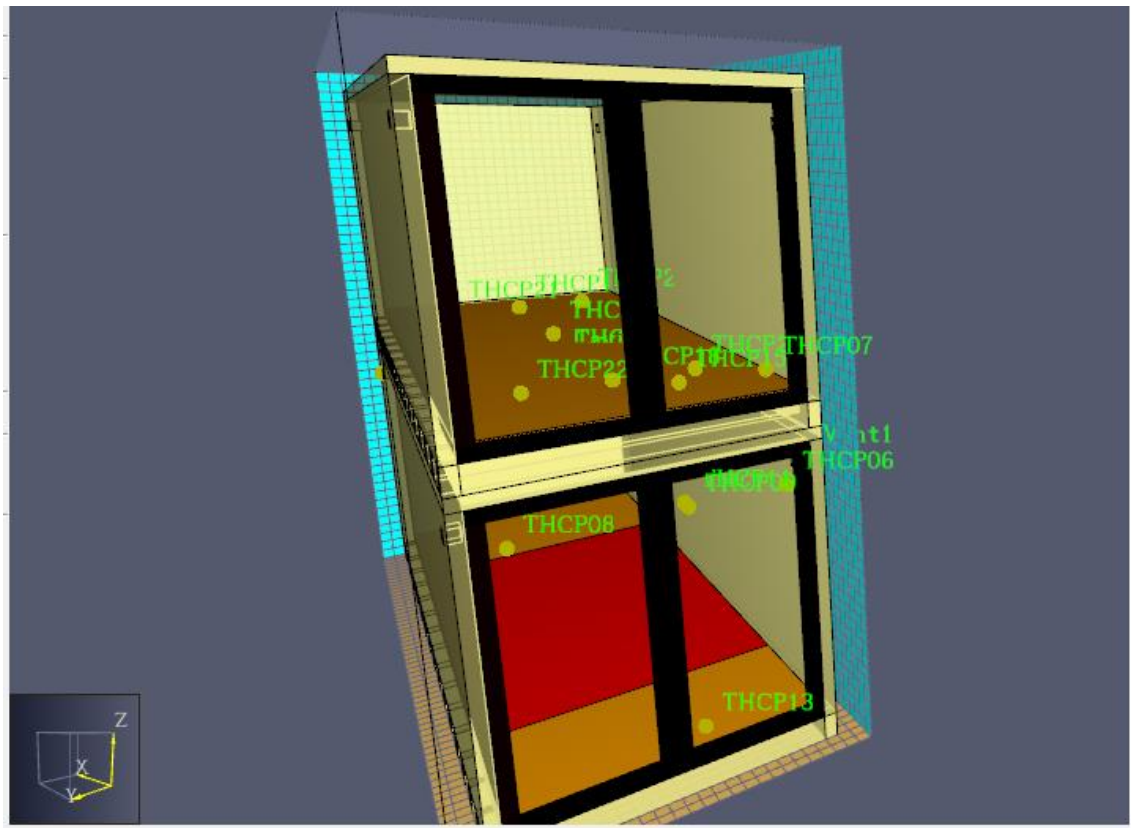
φαίνονται οι ιδιότητες των υλικών αυτών όπως ορίστηκαν βάσει στοιχείων της μελέτης CONTAIN [14] στο πρόγραμμα:

Πίνακας 20 Ιδιότητες των υλικών της προσομοίωσης.

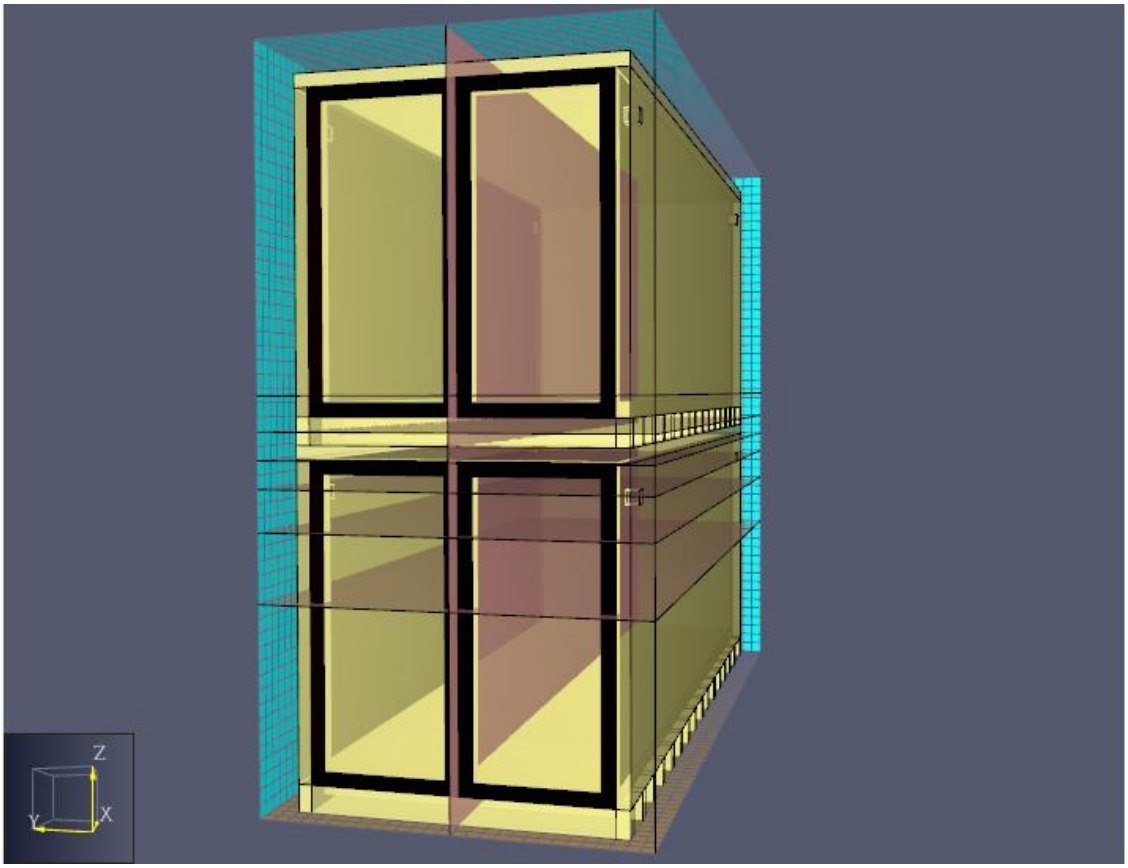
Material Properties	Units	Plywood	EPDM
Specific heat	[kJ/(kg·k)]	1,2	1,8
Conductivity	[W/(m·K)]	0,12	0,15
Density	[kg/m^3]	400	80
Emmisivity	-	1	0,9
HRRPUA	[kW/m^2]	250	500
Ignition temperature	[^{O}C]	350	300

5.3.6 Χρόνος προσομοίωσης και συσκευές καταγραφής

Ως χρόνος προσομοίωσης ορίστηκαν τα 1800 δευτερόλεπτα, δηλαδή 30 λεπτά. Επιπλέον χρησιμοποιήθηκαν συσκευές καταγραφής της θερμοκρασίας όπως δισδιάστατα επίπεδα (2-D Slice profiles) και θερμοζεύγη (thermocouples) σε σημεία ενδιαφέροντος όπως οι πόρτες των εμπορευματοκιβωτίων, η οροφή του κάτω εμπορευματοκιβωτίου, το πάτωμα του άνω εμπορευματοκιβωτίου κ.λπ. Αυτά φαίνονται ενδεικτικά και στις ακόλουθες εικόνες :



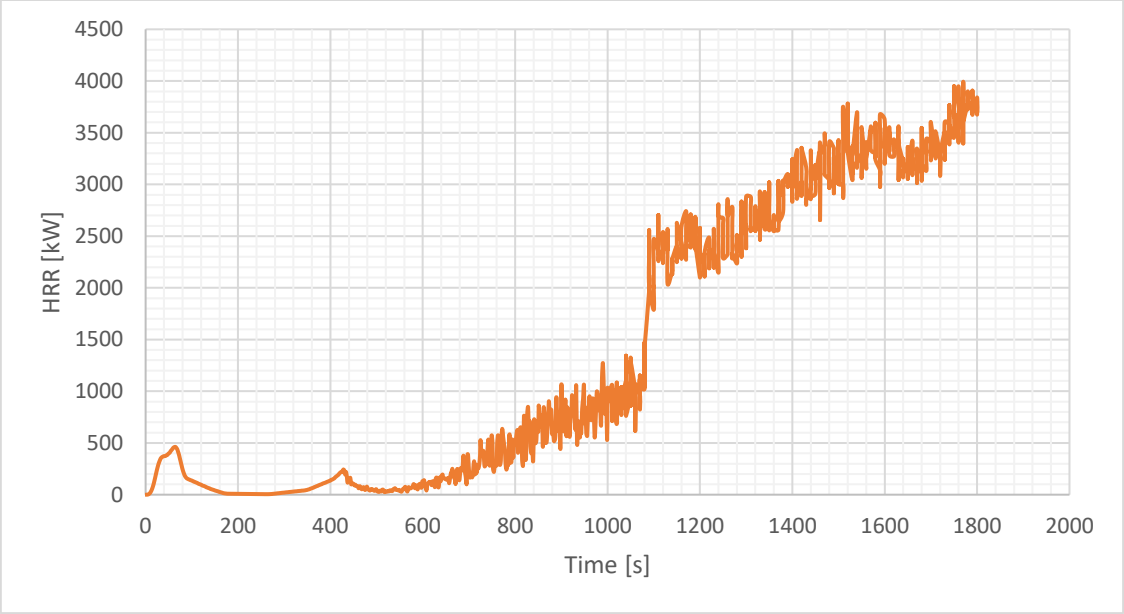
Εικόνα 45 Θερμοζεύγη καταγραφής θερμοκρασίας.



Εικόνα 46 Διδιάστατα επίπεδα καταγραφής θερμοκρασίας.

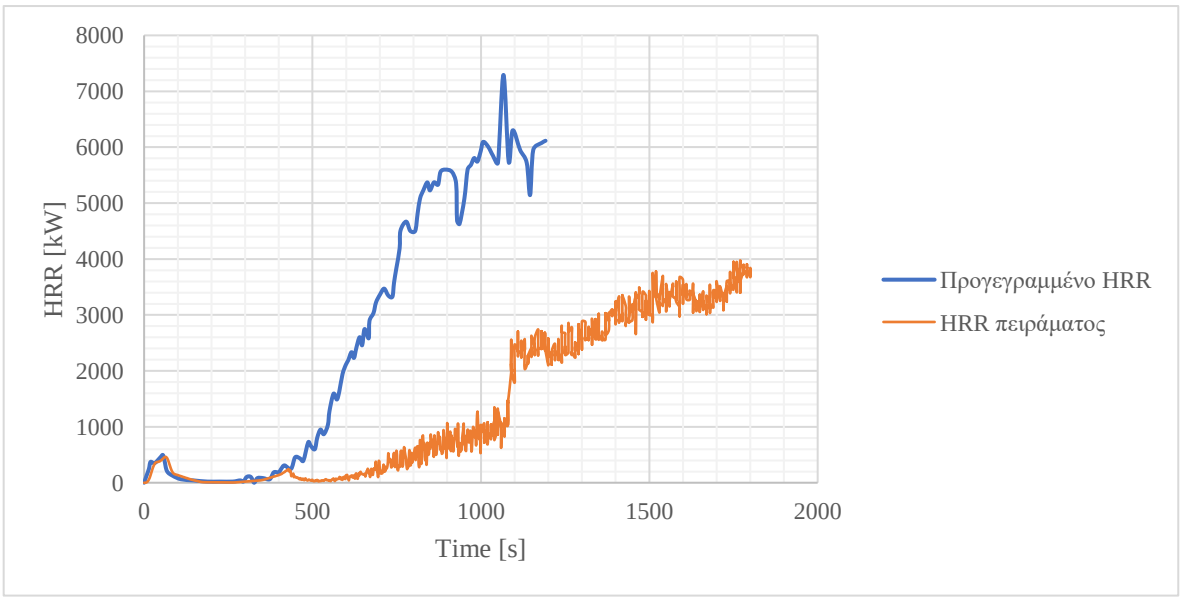
5.3.7 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται ο συνολικός ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας κατά τον χρόνο προσομοίωσης που ορίστηκε:



Εικόνα 47 Ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας στη χρονική διάρκεια της προσομοίωσης.

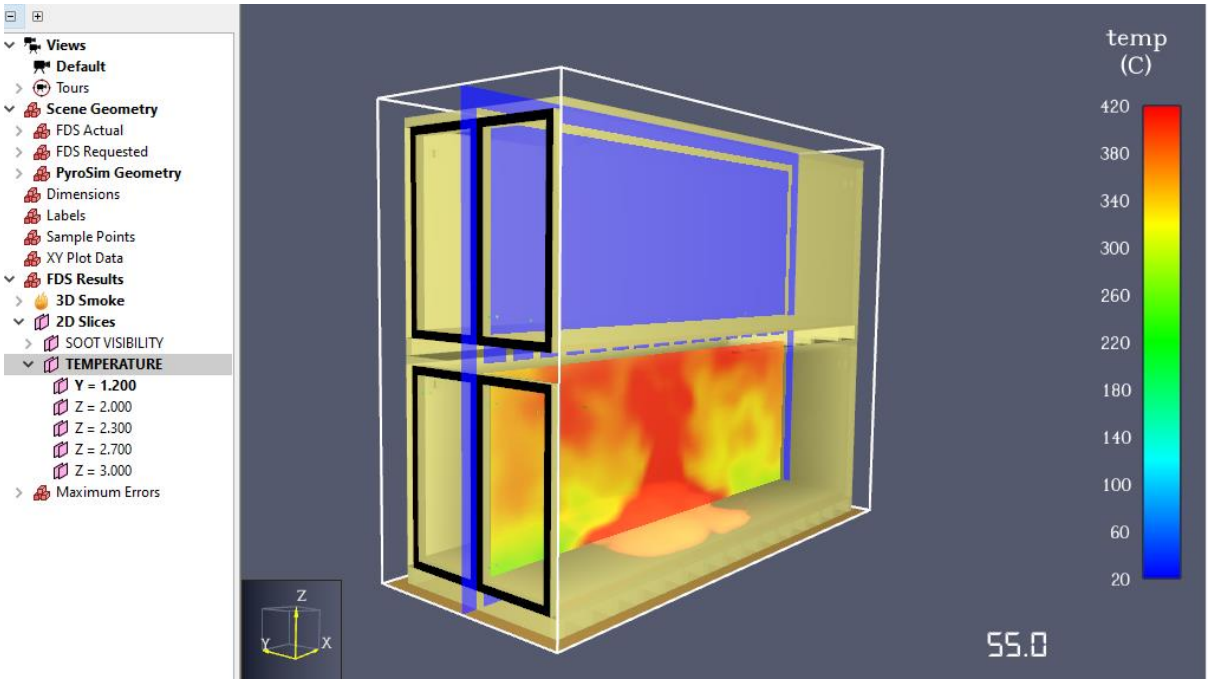
Ακολούθως στην επόμενη εικόνα παρουσιάζεται ένα συγκριτικό διάγραμμα όπου φαίνονται τόσο ο προγεγραμμένος ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας όσο και ο ρυθμός απελευθέρωσης που καταγράφηκε κατά την εκτέλεση του πειράματος.



Εικόνα 48 Ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας (HRR) συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης και προγεγραμμένος ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας.

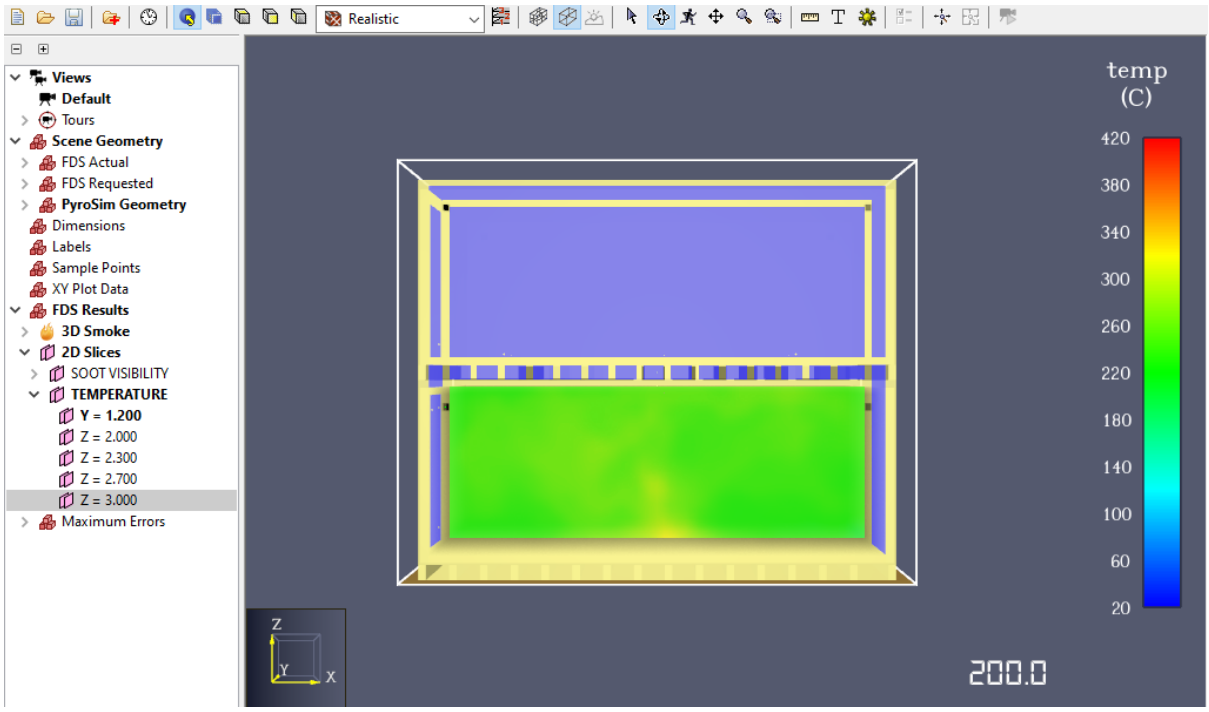
Με βάση τα διαγράμματα αυτά προκύπτει ότι η μέγιστη τιμή του HRR κατά το πείραμα αναφορικά με την έναρξη της καύσης προέκυψε στα 55 δευτερόλεπτα και μετέπειτα παρατηρείται μία πτώση του HRR με την πυρκαγιά να ακολουθεί μια φθίνουσα πορεία. Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στον ανεπαρκή εξαερισμό εντός του κλειστού χώρου του εμπορευματοκιβωτίου μέσω των μικρών ανοιγμάτων εξαερισμού. Η μέγιστη τιμή του HRR ανήλθε στην τιμή των 3997 kW. Οι απότομες αυξήσεις και μειώσεις της τιμής του HRR μπορούν να αποδοθούν στη διαθεσιμότητα του οξυγόνου που υπάρχει στον κλειστό χώρο. Παρατηρούμε ότι κατά την εκκίνηση της πυρκαγιάς όπου υπάρχει διαθέσιμο καύσιμο ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας λαμβάνει υψηλές τιμές. Μετέπειτα ωστόσο, κατά την εξάντληση του οξυγόνου και λόγω της παραγωγής καπνού ο οποίος κατευθύνεται προς τα ανοίγματα που υπάρχουν για εξαερισμό δεν επιτρέπεται η εισαγωγή αέρα και οξυγόνου με αποτέλεσμα την μείωση του ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας. Μέχρι και τα 1100 δευτερόλεπτα ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας φτάνει σχεδόν σε μια σταθερή τιμή η οποία περιορίζεται από την ποσότητα του οξυγόνου στο εμπορευματοκιβώτιο. Η απότομη αύξηση του ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας στα 1100 δευτερόλεπτα αποδίδεται στην αύξηση του διαθέσιμου οξυγόνου λόγω της καύσης του μονωτικού υλικού της πόρτας του κάτω εμπορευματοκιβωτίου μετατρέποντας το χώρο σε καλά εξαεριζόμενο. Συνεπώς, ο μέγιστος ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας καθορίστηκε μετά από αυτό το σημείο από την ποσότητα του καυσίμου. Παρατηρείται επίσης διαφορά στις χρονικές στιγμές που οι 2 πυρκαγιές μεταβαίνουν στο πλήρως ανεπτυγμένο στάδιο. Η πυρκαγιά της προγεγραμμένης HRR φτάνει στο πλήρως ανεπτυγμένο στάδιο περίπου στα 900 δευτερόλεπτα ενώ η πυρκαγιά του πειράματος περίπου στα 1400 δευτερόλεπτα. Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στην διαφορά της ποσότητας καυσίμου των δύο πειραμάτων και το είδος της ανάφλεξης που έχει εν τέλει ως συνέπεια την διαφορά της χρονικής στιγμής εισαγωγής φρέσκου αέρα και άρα διαθέσιμου οξυγόνου στον κλειστό χώρο του εμπορευματοκιβωτίου όπως θα εξηγηθεί και στη συνέχεια. Στο πείραμα της μελέτης Contain [14] πραγματοποιήθηκε καύση ξυλάνθρακα με το φορτίο να καλύπτει το 60% του όγκου του εμπορευματοκιβωτίου. Επιπλέον, η εκκίνηση της πυρκαγιάς πραγματοποιήθηκε με πιλοτική ανάφλεξη του ξυλάνθρακα. Οι δύο αυτοί παράγοντες οδήγησαν στο να αναπτυχθούν υψηλότερες θερμοκρασίες, η πυρκαγιά να μεταβεί ταχύτερα στο πλήρως αναπτυγμένο στάδιο και να καταγραφούν υψηλότερες τιμές του ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας. Τέλος στην μελέτη Contain [14] στα 520 δευτερόλεπτα το 50% του μονωτικού υλικού της πόρτας είχε καεί με αποτέλεσμα την απότομη αύξηση της καμπύλης HRR τη χρονική αυτή στιγμή και μετά, λόγω της πολύ μεγαλύτερης παροχής οξυγόνου για την καύση. Για τον λόγο αυτό όπως φαίνεται και στο διάγραμμα υφίσταται μια απότομη διαφοροποίηση της καμπύλης στα 520 δευτερόλεπτα λόγω της διαφοροποίησης των συνθηκών εξαερισμού. Μέχρι και τα 520 δευτερόλεπτα τα πρόσθετα δύο ανοίγματα εξαερισμού στην αριθμητική προσομοίωση αυτής της μελέτης δεν φαίνεται να διαφοροποιούν τα αποτελέσματα για τον ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας.

Στην ακόλουθη εικόνα στο σχήμα του μοντέλου της προσομοίωσης παρουσιάζεται η θερμοκρασιακή κατανομή σε ένα δισδιάστατο επίπεδο στο μέσο κατά το πλάτος των δύο εμπορευματοκιβωτίων. Από το σχήμα είναι εμφανές ότι σύντομα αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες πλησίον του χώρου της καύσης και κάτω από την οροφή του κάτω εμπορευματοκιβωτίου.



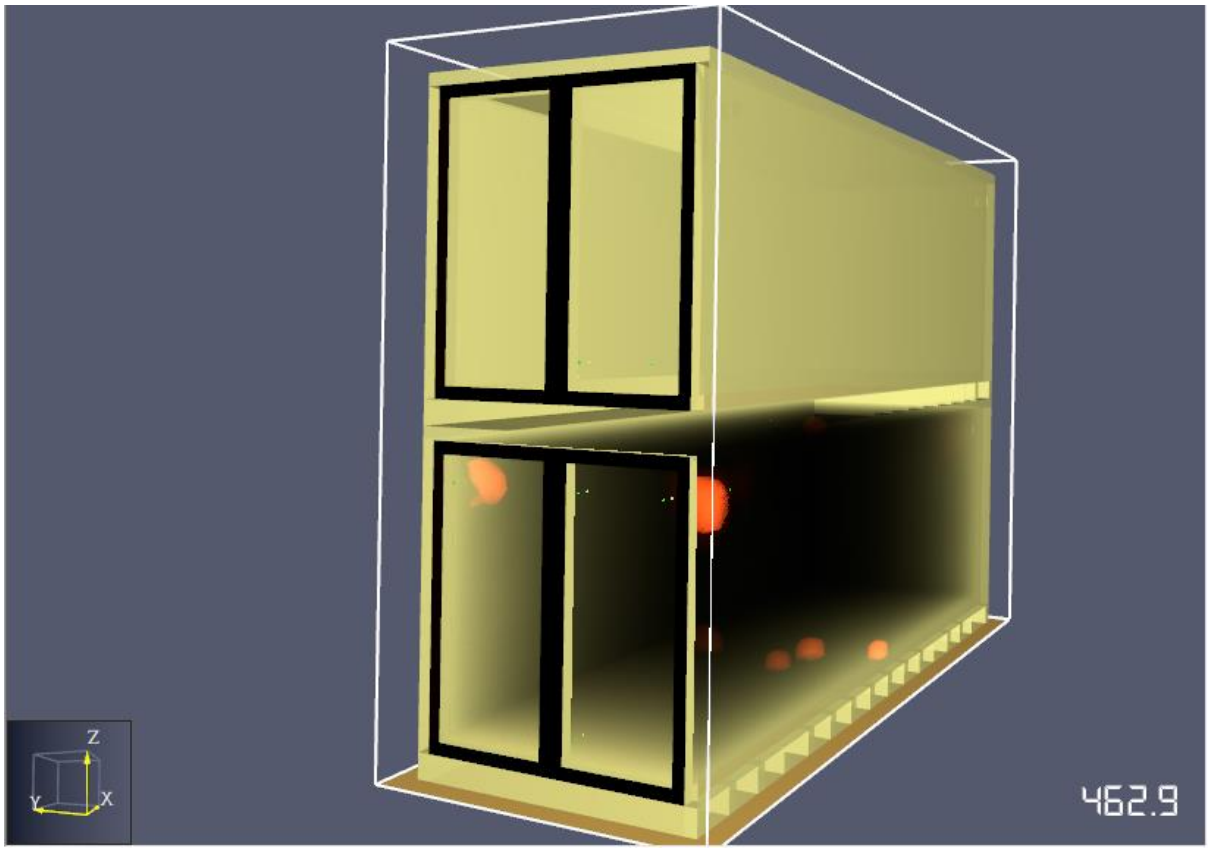
Εικόνα 49 Θερμοκρασιακή κατανομή σε δισδιάστατο επίπεδο στα 55 δευτερόλεπτα προσομοίωσης.

Εν συνεχεία, η εικόνα που ακολουθεί αποτελεί ένα στιγμιότυπο της προσομοίωσης στα 200 δευτερόλεπτα. Αυτό που εύκολα διακρίνεται στο δισδιάστατο επίπεδο τομής που αναφέρθηκε και προηγουμένως είναι ότι η θερμοκρασία έχει μειωθεί σημαντικά ενώ δεν διακρίνεται κάποιο ίχνος φλόγας αλλά μόνο καπνός. Επιπλέον στο άνω εμπορευματοκιβώτιο η θερμοκρασία φαίνεται να παραμένει στη θερμοκρασία περιβάλλοντος χωρίς να παρατηρείται κάποια αλλαγή.

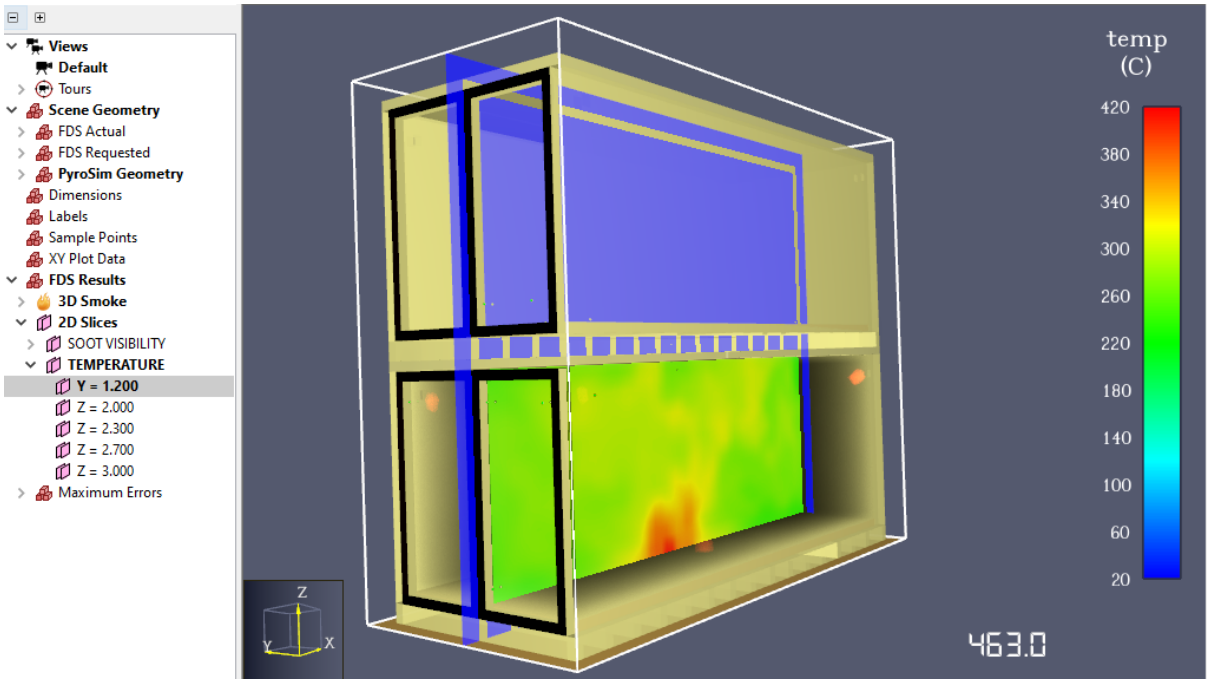


Εικόνα 50 Θερμοκρασιακή κατανομή σε δισδιάστατο επίπεδο στα 200 δευτερόλεπτα προσομοίωσης.

Στα 460 δευτερόλεπτα προσομοίωσης παρατηρήθηκε φλόγα στα σημεία εξαερισμού του κάτω container, ενώ παράλληλα διαπιστώθηκε μια σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας. Αυτά φαίνονται και στις δύο εικόνες που ακολουθούν :



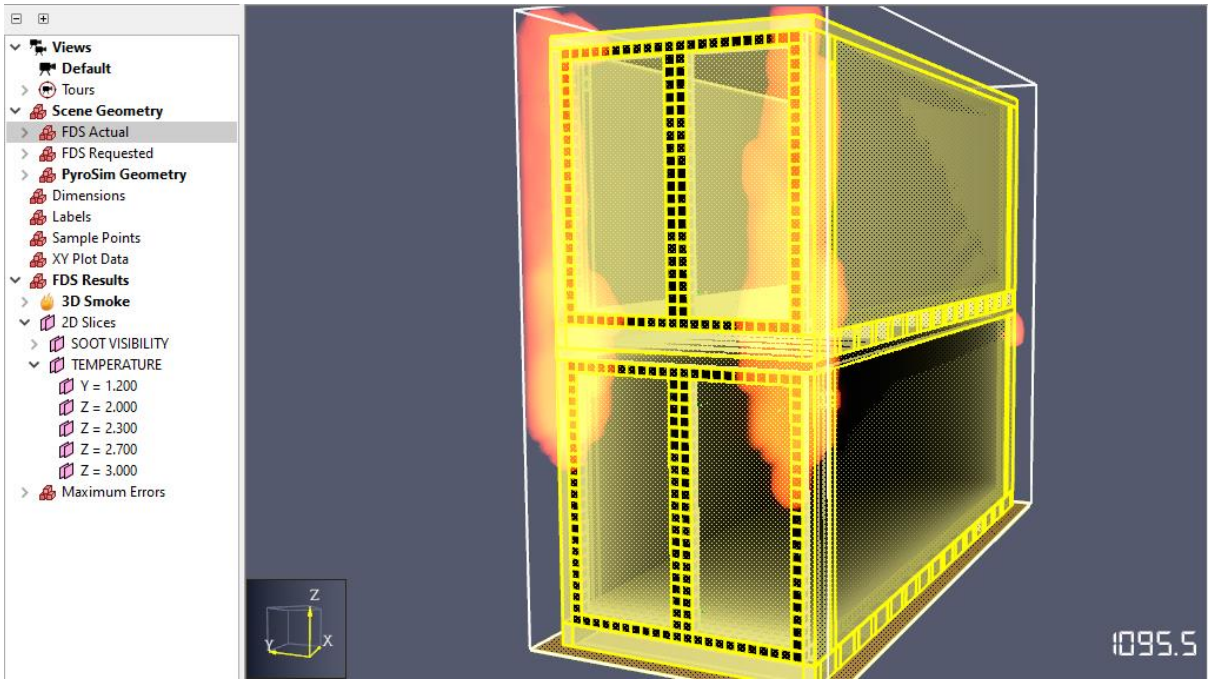
Εικόνα 51 Φλόγες στα ανοίγματα εξαερισμού του κάτω εμπορευματοκιβωτίου.



Εικόνα 52 Θερμοκρασιακή κατανομή σε δισδιάστατο επίπεδο στα 460 δευτερόλεπτα προσομοίωσης.

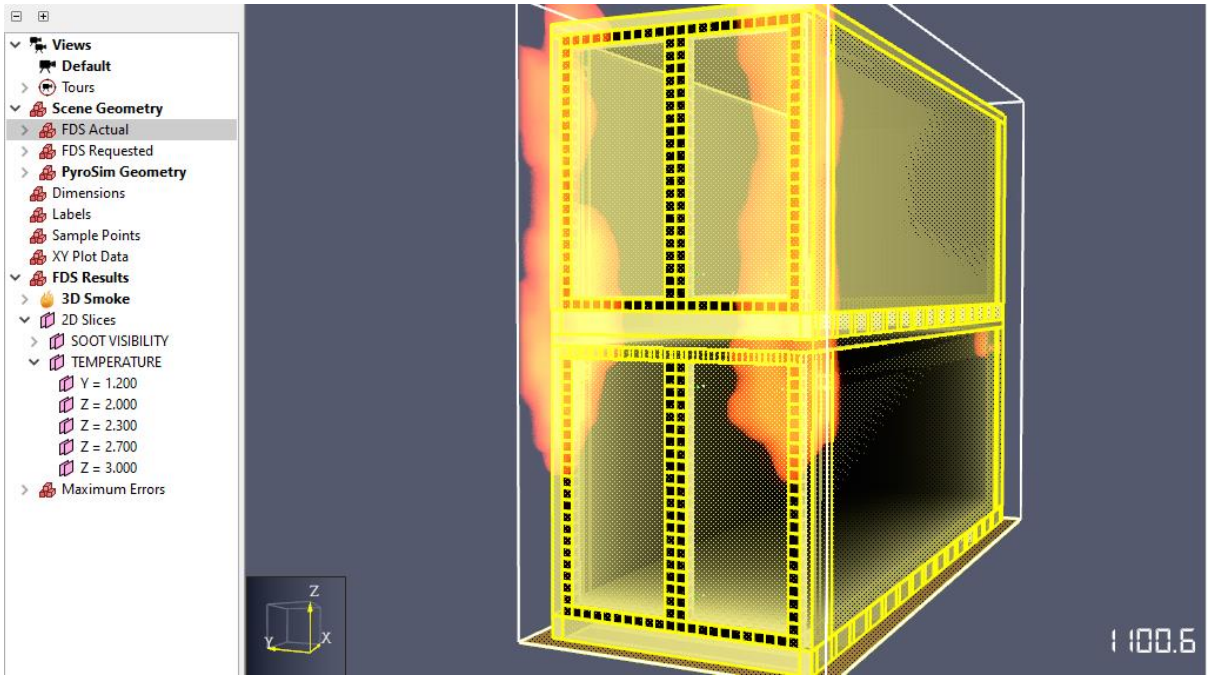
Εξαιτίας της ύπαρξης φλόγας στα ανοίγματα εξαερισμού και σε συνδυασμό με την αύξηση του ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας παρατηρήθηκε αύξηση του ύψους της φλόγας στα ανοίγματα εξαερισμού, ενώ στα 1100 δευτερόλεπτα προσομοίωσης φαίνεται να καίγεται το μονωτικό υλικό EPDM στις πόρτες του εμπορευματοκιβωτίου καθώς ικανοποιήθηκε το κριτήριο του 'burn away'. Η λειτουργία του 'burn away' στο FDS επιτρέπει στο πρόγραμμα να αφαιρεί κάποια κελιά (cells) αφότου έχουν ικανοποιηθεί κάποια κριτήρια όπως μια συγκεκριμένη θερμοκρασία ανάφλεξης ή κάποιο δεδομένο HRRPUA (Heat Release Rate Per Unit Area). Αναλυτικότερα οι επιφάνειες στις οποίες έχει οριστεί αυτή η ιδιότητα αφαιρούνται από την προσομοίωση μετά την εξάντληση όλου του διαθέσιμου καυσίμου, δηλαδή μετά την πλήρη καύση τους. Συνέπεια της καύσης του μονωτικού υλικού ήταν μετέπειτα και η καύση των υπόλοιπων κελιών που αναπαριστούν το μονωτικό υλικό και η αύξηση της παροχής αέρα και επομένως οξυγόνου για την καύση.

Στην προσομοίωση αυτή δεν προσδιορίστηκε η παράμετρος bulk density για τα αντικείμενα που σχεδιάστηκαν. Με τον προσδιορισμό της παραμέτρου αυτής στο FDS η ποσότητα του διαθέσιμου 'καυσίμου' προσδιορίζεται με βάση τον όγκο ενός αντικειμένου και το bulk density και όχι το πάχος της επιφάνειας. Στην προσομοίωση αυτή η ποσότητα της καύσιμης ύλης (fuel mass) δεδομένου ότι δεν χρησιμοποιήθηκε αυτή η παράμετρος, υπολογίστηκε από το FDS βάσει του πάχους των δομικών στοιχείων του εμπορευματοκιβωτίου.



Εικόνα 53 Ύψος φλόγας και μονωτικό υλικό EPDM πριν την ικανοποίηση της συνθήκης 'burn away'.

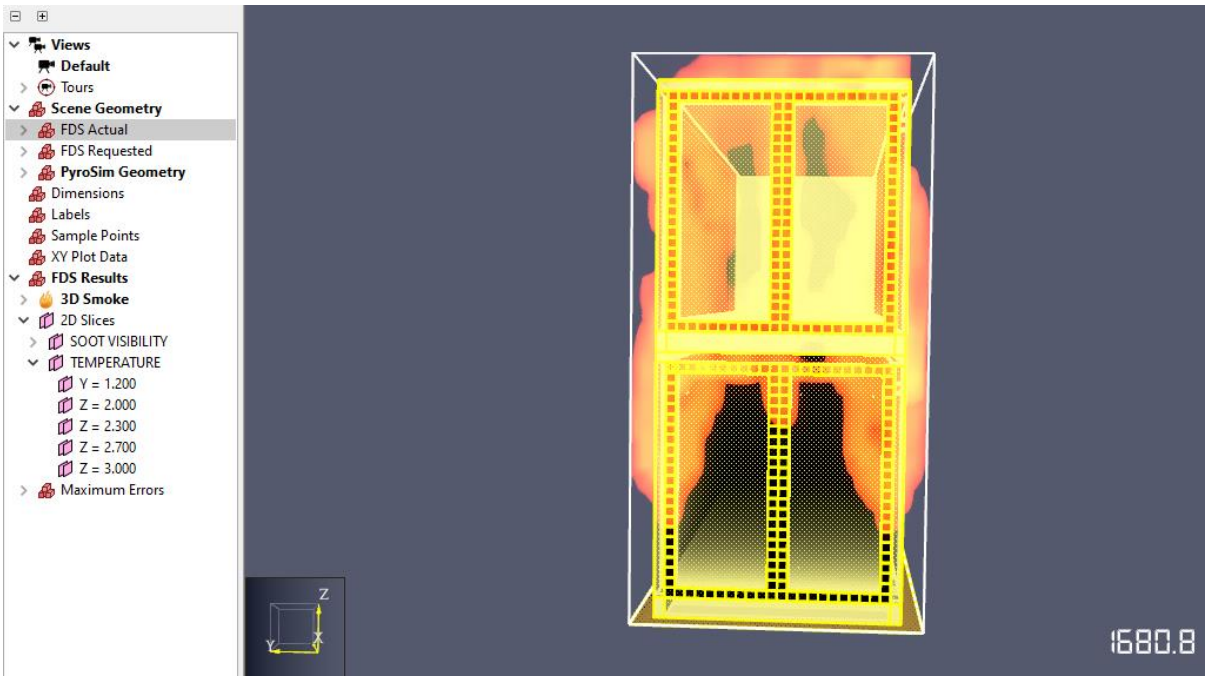
/



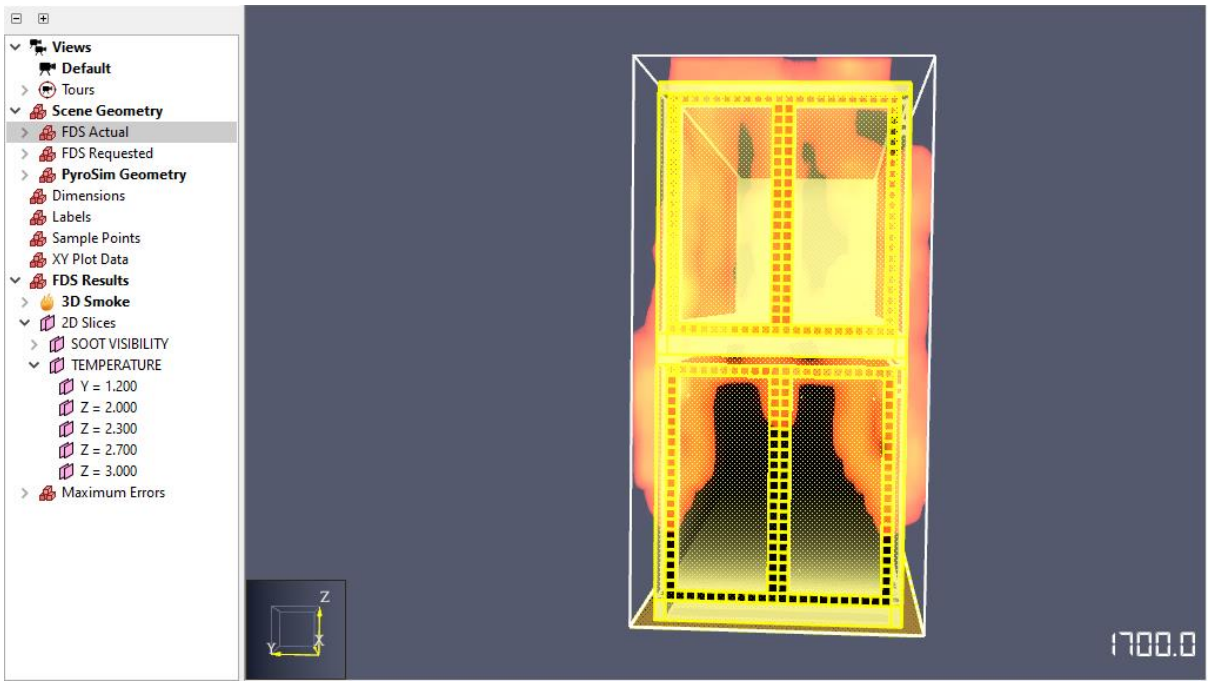
Εικόνα 54 Αφαίρεση από το FDS κελιών που αναπαριστούν το μονωτικό υλικό EPDM λόγω ικανοποίησης συνθήκης 'burn away'.

Εξαιτίας της καύσης του μονωτικού υλικού στο άνω μέρος της πόρτας του κάτω εμπορευματοκιβωτίου έγινε δυνατή η αυξημένη ροή αέρα στο εμπορευματοκιβώτιο και παρατηρήθηκε απότομη αύξηση του ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας με την τιμή του να φτάνει τα 2500 kW στα 1100 δευτερόλεπτα. Επιπλέον, παρατηρήθηκαν φλόγες στα ανοίγματα στην πόρτα του κάτω εμπορευματοκιβωτίου όπως φαίνεται και στην εικόνα.

Στα 1700 δευτερόλεπτα προσομοίωσης ικανοποιήθηκε το κριτήριο του ‘burn away’ και για το μονωτικό υλικό της πόρτας του άνω εμπορευματοκιβωτίου με αποτέλεσμα την καύση μέρος του υλικού αυτού. Αυτό φαίνεται και στα ακόλουθα σχήματα :



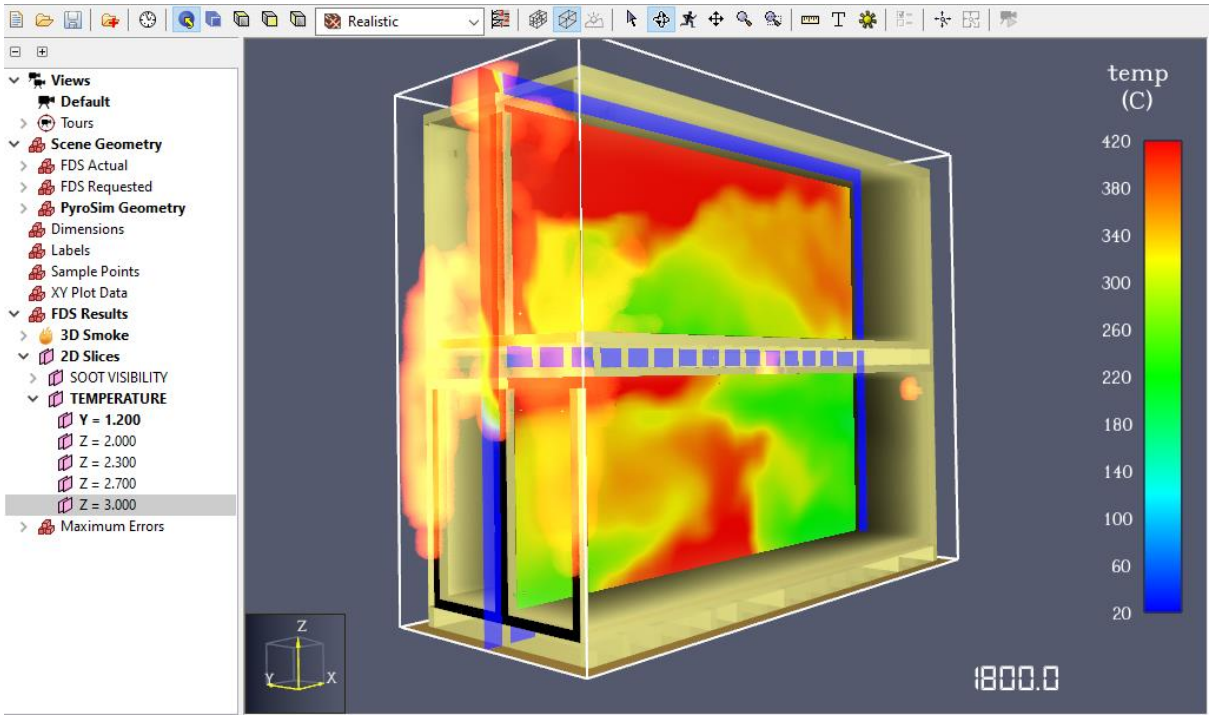
Εικόνα 55 Μονωτικό υλικό EPDM του άνω εμπορευματοκιβωτίου πριν την καύση του.



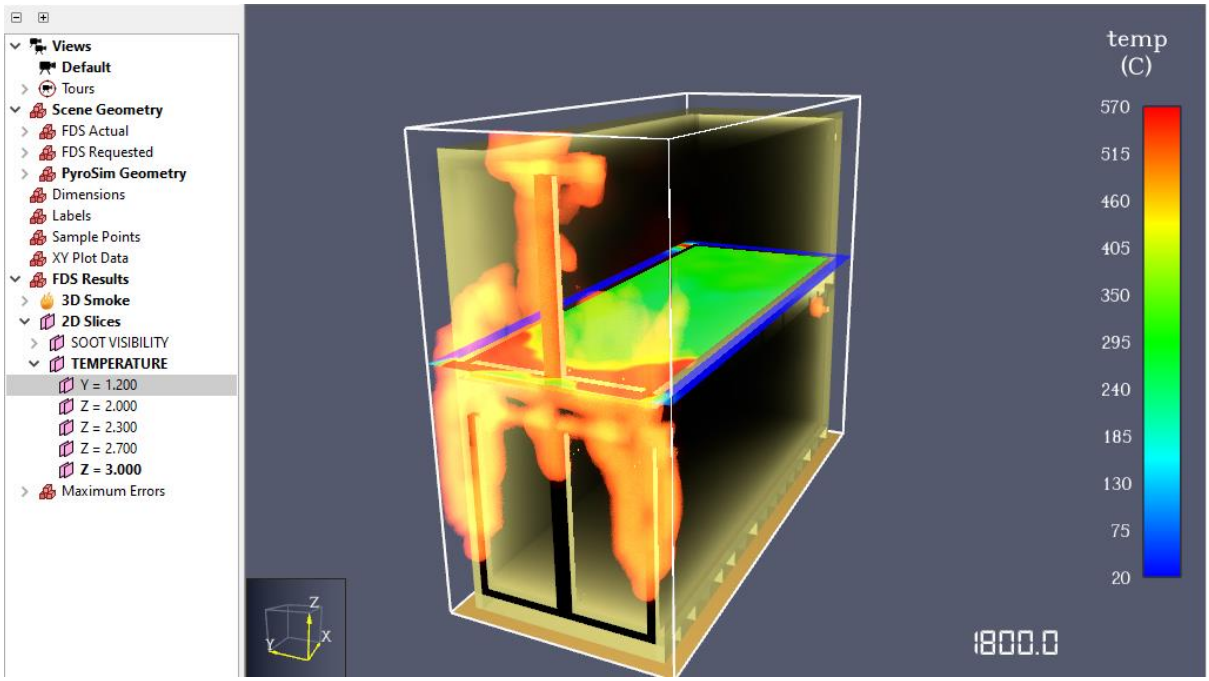
Εικόνα 56 Αφαίρεση κελιών του μονωτικού υλικού του άνω εμπορευματοκιβωτίου εξαιτίας της καύσης του μέσω της ικανοποίησης της συνθήκης ‘burn away’.

Μετά από την καύση του μονωτικού υλικού των πορτών του άνω εμπορευματοκιβωτίου ακολούθησε η αύξηση της θερμοκρασίας στο άνω εμπορευματοκιβώτιο και στο κόντρα πλακέ πάτωμα του κοντά στις πόρτες με αποτέλεσμα την ανάφλεξη του κόντρα πλακέ πατώματος και τη μετάδοση της πυρκαγιάς σε αυτό.

Στις ακόλουθες εικόνες φαίνονται οι τιμές των θερμοκρασιών που αναπτύχθηκαν στα 1800 δευτερόλεπτα προσομοίωσης στο πάτωμα του άνω εμπορευματοκιβωτίου σε κάθετο επίπεδο στο μέσο των εμπορευματοκιβωτίων σε απόσταση 1.2 m κατά το πλάτος όπως και προηγουμένως, καθώς και σε δισδιάστατο οριζόντιο επίπεδο σε ύψος 3 μέτρα. Οι μέγιστες θερμοκρασίες που αναπτύχθηκαν είναι 420 °C και 570 °C αντίστοιχα.



Εικόνα 57 Θερμοκρασιακή κατανομή σε δισδιάστατο κάθετο επίπεδο στα 1800 δευτερόλεπτα προσομοίωσης.

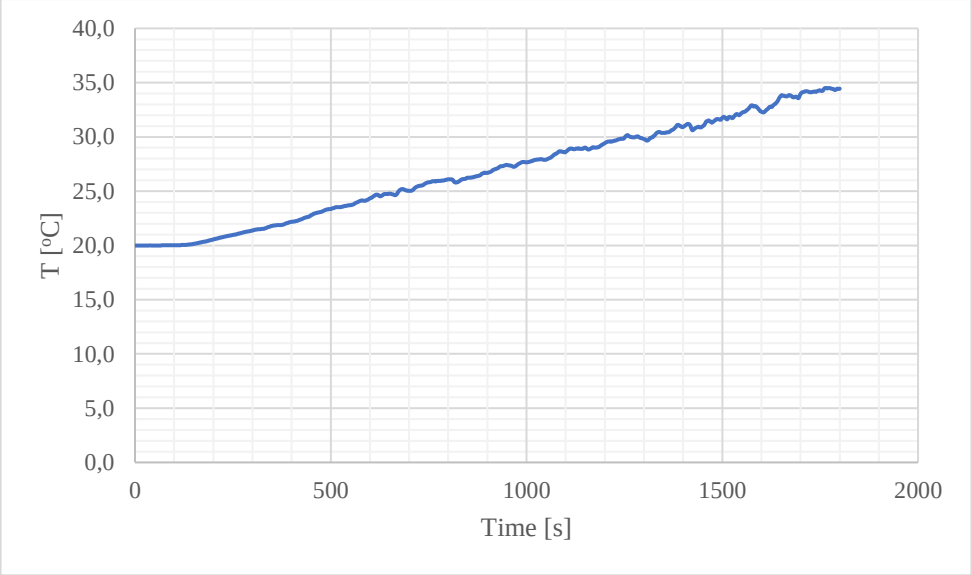


Εικόνα 58 Θερμοκρασιακή κατανομή σε δισδιάστατο οριζόντιο επίπεδο στα 1800 δευτερόλεπτα προσομοίωσης.

Είναι εμφανές ότι αναπτύχθηκαν θερμοκρασίες στο επίπεδο του κόντρα πλακέ πατώματος αρκετά υψηλότερες από αυτή που απαιτείται (350 ^{o}C) για την ανάφλεξη του με αποτέλεσμα την ταχεία εξάπλωση της πυρκαγιάς.

Τέλος, βάσει των συσκευών μέτρησης θερμοκρασίας που τοποθετήθηκαν σε ενδεικτικά σημεία για την προσομοίωση παρουσιάζεται στις ακόλουθες εικόνες η καταγραφή της θερμοκρασίας συναρτήσει του χρόνου.

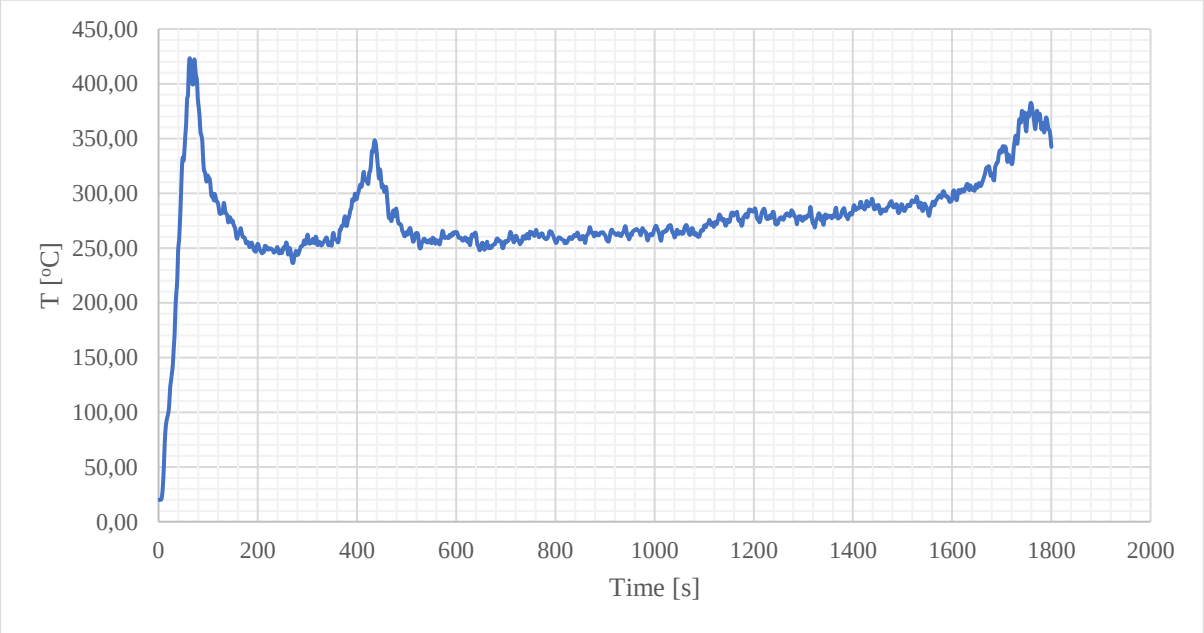
Αρχικά, στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται η θερμοκρασία που αναπτύχθηκε στο διάκενο μεταξύ των εμπορευματοκιβωτίων δηλαδή μεταξύ της οροφής του κάτω εμπορευματοκιβωτίου και του πατώματος του άνω εμπορευματοκιβωτίου.



Εικόνα 59 Θερμοκρασία συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης στο καθ' ύψος διάκενο μεταξύ των δύο εμπορευματοκιβωτίων.

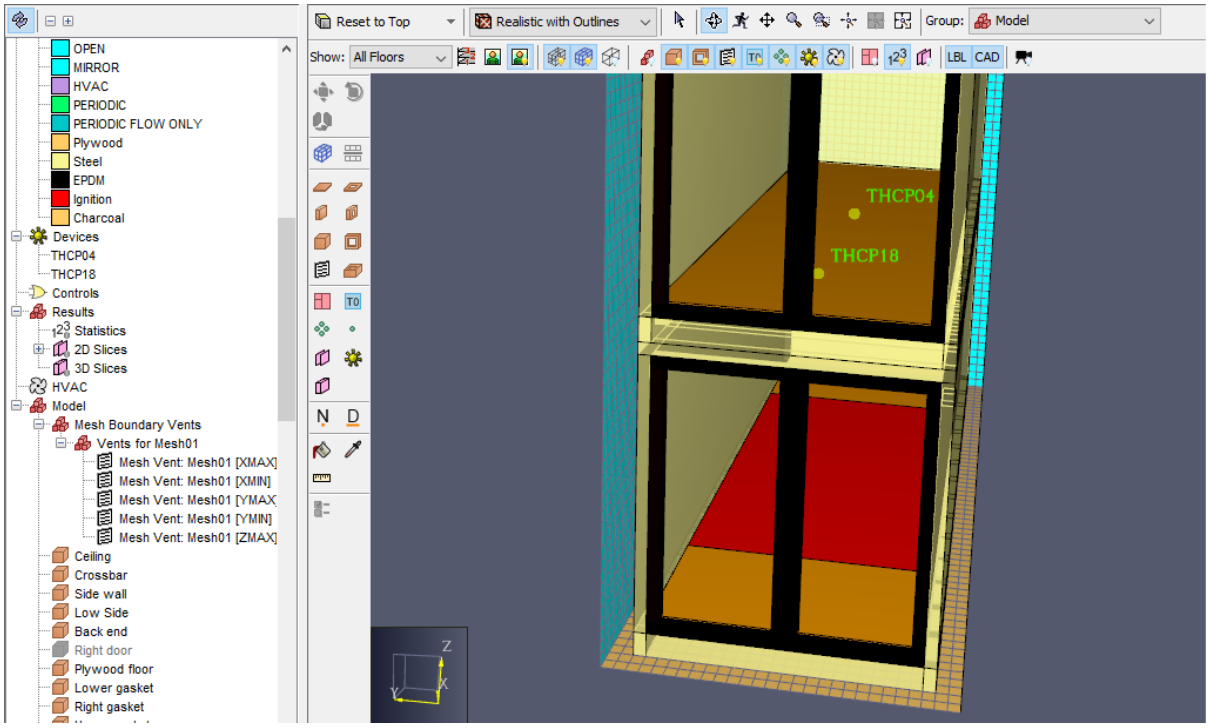
Από το διάγραμμα προκύπτει ότι στο διάκενο μεταξύ των εμπορευματοκιβωτίων δεν αναπτύχθηκε υψηλή θερμοκρασία, με αυτή να παραμένει κοντά στη θερμοκρασία περιβάλλοντος καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Ως μέγιστη θερμοκρασία καταγράφηκε η τιμή των 35 ºC.

Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζεται η θερμοκρασία που αναπτύχθηκε εσωτερικά του κάτω εμπορευματοκιβωτίου στο επίπεδο της οροφής του και στο μέσο του μήκους του. Η μέγιστη θερμοκρασία που καταγράφηκε ανέρχεται στους 425 ºC.

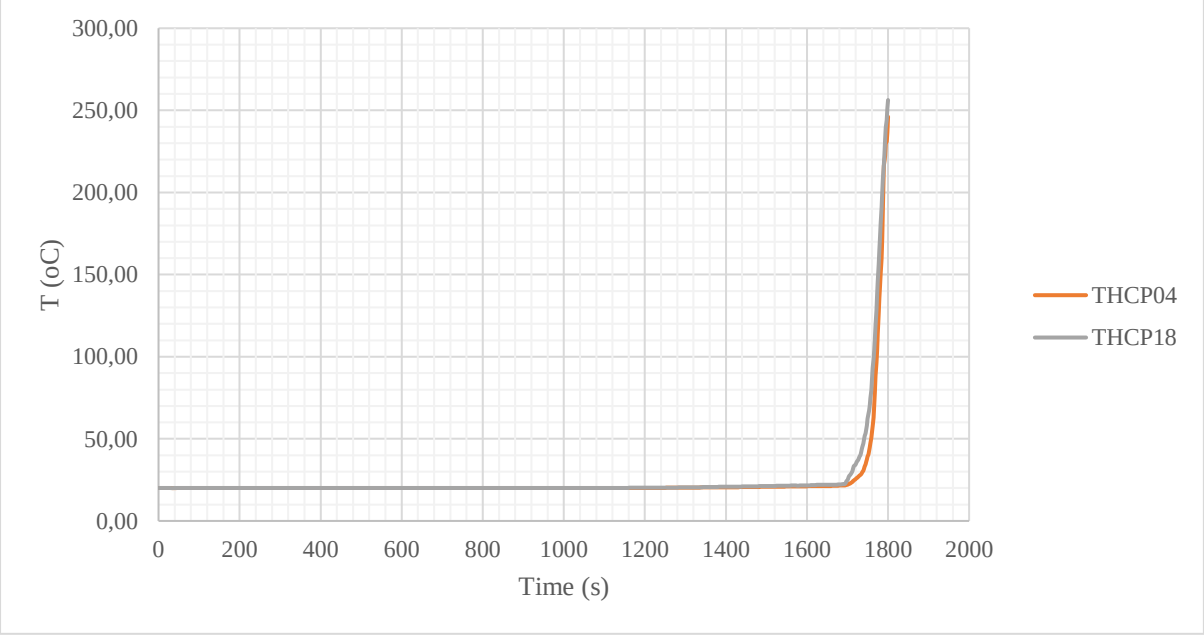


Εικόνα 60 Καταγεγραμμένη θερμοκρασία οροφής εσωτερικά του κάτω εμπορευματοκιβωτίου σε ύψος z=2.3 m.

Τέλος παρουσιάζεται η χρονική ιστορία της θερμοκρασίας που αναπτύχθηκε εσωτερικά του άνω εμπορευματοκιβωτίου, στο επίπεδο του κόντρα πλακέ πατώματος βάσει της καταγραφής δύο εκ των ανιχνευτών που φαίνονται στην εικόνα που ακολουθεί. Οι μέγιστες θερμοκρασίες που αναπτύχθηκαν ανέρχονται στους 250 και 260 ^{o}C αντίστοιχα.



Εικόνα 61 Θέση των δύο ανιχνευτών επί του κόντρα πλακέ πατώματος του άνω εμπορευματοκιβωτίου.



Εικόνα 62 Καταγεγραμμένη θερμοκρασία συναρτήσει του χρόνου από τους δύο ανιχνευτές επί του κόντρα πλακέ πατώματος του άνω εμπορευματοκιβωτίου σε ύψος z=2.7 m.

Με βάση τα διαγράμματα προκύπτει ότι οι θερμοκρασίες στο επίπεδο του κόντρα πλακέ πατώματος διατηρήθηκαν σε επίπεδα θερμοκρασίας περιβάλλοντος μέχρι και το κομβικό σημείο όπου ικανοποιήθηκε η συνθήκη του 'burn away' για το μονωτικό υλικό των πορτών του και διαδόθηκε η πυρκαγιά στο εσωτερικό του εμπορευματοκιβωτίου με αποτέλεσμα την εξάπλωση της πυρκαγιάς και την ταχεία αύξηση των καταγραφόντων θερμοκρασιών από τα 1700 δευτερόλεπτα και μετά.

5.3.8 Συμπεράσματα από τις αριθμητικές προσομοιώσεις

Κατά την έναρξη της καύσης ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας αυξήθηκε μέχρι τα 500 kW και μετά η πυρκαγιά ακολούθησε στάδιο επώασης ακολουθώντας πτωτική πορεία, κάτι το οποίο αποδίδεται στον κλειστό χώρο του εμπορευματοκιβωτίου και συνεπώς την ύπαρξη περιορισμένου οξυγόνου για την καύση. Κατά το πτωτικό αυτό στάδιο οι θερμοκρασίες εντός του εμπορευματοκιβωτίου μειώθηκαν σημαντικά. Εντούτοις η ύπαρξη φλόγας στα ανοίγματα εξαερισμού και η σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας οδήγησε στην ανάφλεξη του μονωτικού υλικού των πορτών του κάτω εμπορευματοκιβωτίου. Βάσει των αποτελεσμάτων η ανάφλεξη του μονωτικού αυτού υλικού αποτελεί τον κύριο παράγοντα μετάβασης της πυρκαγιάς στο στάδιο πλήρους ανάπτυξης. Με την καύση του μονωτικού υλικού των πορτών του κάτω εμπορευματοκιβωτίου επετράπη η ροή επιπλέον αέρα στο εμπορευματοκιβώτιο. Ως αποτέλεσμα, οι φλόγες της πυρκαγιάς στο άνοιγμα που δημιουργήθηκε λόγω της καύσης του μονωτικού υλικού απέκτησαν σημαντικό ύψος με αποτέλεσμα την καύση του μονωτικού υλικού των πορτών του από πάνω εμπορευματοκιβωτίου και την ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών στο επίπεδο του κόντρα πλακέ πατώματος του. Τελικώς, προέκυψε ανάφλεξη του κόντρα πλακέ πατώματος και διάδοση της πυρκαγιάς στο άνω εμπορευματοκιβώτιο.

Επιπλέον δεδομένων των θερμοκρασιών που καταγράφηκαν στο διάκενο μεταξύ των εμπορευματοκιβωτίων που παρέμειναν σε επίπεδα θερμοκρασίας περιβάλλοντος δεν κατέστη δυνατή η εξάπλωση της πυρκαγιάς στο κόντρα πλακέ πάτωμα του άνω εμπορευματοκιβώτιο διαμέσω ακτινοβολούμενης θερμότητας από τη χαλύβδινης οροφή του κάτω εμπορευματοκιβωτίου στο κόντρα πλακέ πάτωμα του άνω εμπορευματοκιβωτίου. Με βάση τη μελέτη Contain [14] για να αναφλεγεί το κόντρα πλακέ πάτωμα του άνω εμπορευματοκιβωτίου, δεδομένων των πειραματικών στοιχείων της, απαιτείται η χαλύβδινη οροφή του κάτω εμπορευματοκιβωτίου να ακτινοβολεί θερμότητα κατ' ελάχιστον 10-12 kW/m^2, κάτι το οποίο σύμφωνα με τη μελέτη αντιστοιχεί σε μια θερμοκρασία του άνω μέρους της οροφής της τάξεως των 500^oC. Με βάσει τις καταγραφές των ανιχνευτών που παρουσιάστηκαν η μέγιστη θερμοκρασία εσωτερικά και στο επίπεδο της οροφής του κάτω εμπορευματοκιβωτίου ήταν 425^oC ενώ στο διάκενο μεταξύ των εμπορευματοκιβωτίων στο επίπεδο του άνω τμήματος της οροφής του κάτω εμπορευματοκιβωτίου, η μέγιστη θερμοκρασία που καταγράφηκε ήταν 35^oC. Η πυρκαγιά εξαπλώθηκε διαμέσω της καύσης των μονωτικών υλικών των πορτών των 2 εμπορευματοκιβωτίων. Η μέγιστη τιμή του ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας ανήλθε στα 4000 kW περίπου, ενώ η μέγιστη θερμοκρασία που καταγράφηκε ήταν οι 570 ^oC στο επίπεδο του κόντρα πλακέ πατώματος του άνω εμπορευματοκιβωτίου.

Συμπερασματικά το μονωτικό υλικό των πορτών των εμπορευματοκιβωτίων αποτέλεσε το μέσο για την εξάπλωση της πυρκαγιάς μεταξύ των δύο εμπορευματοκιβωτίων. Αρωγός στην εξάπλωση της πυρκαγιάς αποτέλεσε μετά την καύση του μονωτικού υλικού το κόντρα πλακέ πάτωμα του άνω εμπορευματοκιβωτίου, μέσω της ανάφλεξης του οποίου κατέστη δυνατή η περαιτέρω διάδοση της πυρκαγιάς στο εσωτερικό του.

6 Συμπεράσματα και παρατηρήσεις

Στην μελέτη αυτή αρχικά μελετήθηκαν ορισμένα στατιστικά στοιχεία σχετικά με πρόσφατα ατυχήματα πυρκαγιών σε χώρους φορτίου πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. Από τη στατιστική αυτή ανάλυση των ατυχημάτων προέκυψαν τα ακόλουθα :

- Διαπιστώθηκε υψηλή συχνότητα πυρκαγιών κατά την περίοδο 2010 έως 2019 ειδικά για πλοία μικτής χωρητικότητας άνω των 50.000 τόνων. Το γεγονός ότι η συχνότητα πυρκαγιάς αυξάνεται με το μέγεθος του πλοίου μπορεί να εξηγηθεί από το φορτίο. Η πιθανότητα εκκίνησης μιας πυρκαγιάς αυξάνεται σχεδόν σε άμεση αναλογία με τον αριθμό των εμπορευματοκιβωτίων.
- Το 2019 διαπιστώθηκε ασυνήθιστα μεγάλος αριθμός πυρκαγιών. Μέχρι και το 2021 ο αριθμός αυτός παρουσιάζει αύξηση και παραμένει μεγαλύτερος από τον μέσο όρο των ετών πριν το 2019.
- Η συχνότητα πυρκαγιών στα πλοία μικτής χωρητικότητας άνω των 50.000 τόνων αυξήθηκε σημαντικά το 2019 σε σύγκριση με τα προηγούμενα χρόνια. Το έτος 2021 δεν παρουσιάζει καμία αλλαγή τάσης στη συχνότητα των πυρκαγιών και παραμένει στα ίδια επίπεδα με το 2019.
- Από το 2013 και έπειτα παρατηρείται αυξανόμενος αριθμός και συχνότητα πυρκαγιών σε πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων μικτής χωρητικότητας άνω των 100.000 τόνων. Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί εν μέρει στην αύξηση του αριθμού των πλοίων αυτών στον παγκόσμιο στόλο όσο και στην αύξηση του μεταφερόμενου φορτίου λόγω της αύξησης του μεγέθους τους.
- Την περίοδο από το 2005 έως και το 2021 η συχνότητα των πυρκαγιών σε πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων μικτής χωρητικότητας άνω των 50.000 τόνων έχει αυξηθεί κατά έναν πολλαπλασιαστή 2.6.

Παρατηρείται μια συνεχώς ανοδική τάση του αριθμού και της συχνότητας των πυρκαγιών στα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων γεγονός που καθιστά απαραίτητη την άμεση λήψη πρωτοβουλιών για την αντιμετώπιση του ζητήματος και της μείωσης της εμφάνισης τέτοιων ατυχημάτων, καθώς και την θεσμοθέτηση νέων απαιτήσεων και κανονισμών από τους διεθνείς οργανισμούς όπως ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός, οι Σημαίες και οι Νηογνώμονες.

Από την ανάλυση των πρόσφατων ατυχημάτων και των σχετικών μελετών προέκυψαν επιπλέον ορισμένα σημαντικά συμπεράσματα. Από τη συλλογή δεδομένων μελετών, τα συνηθέστερα φορτία που κατά την μεταφορά τους σε εμπορευματοκιβώτια οδηγούν σε εκδήλωση πυρκαγιάς είναι ο ξυλάνθρακας, το υποχλωριώδες ασβέστιο και οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες. Τα φορτία που βρέθηκαν βάσει ανάλυσης των σοβαρότερων

περιστατικών πυρκαγιάς ως επικινδυνότερα είναι το υποχλωριώδες ασβέστιο και τα προϊόντα μπρικέτας συμπιεσμένου άνθρακα. Τα δύο αυτά φορτία αποτέλεσαν την αιτία σχεδόν του 50% των διερευνημένων ατυχημάτων πυρκαγιάς.

Εν συνεχεία από την ανάλυση των μελετών σχετικά με τρία πρόσφατα σοβαρά περιστατικά πυρκαγιών προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Οι διατάξεις του κώδικα IMDG θα πρέπει να επανεξεταστούν καθώς στην ταξινόμηση και μεταφορά συγκεκριμένων υλικών δεν λαμβάνονται υπόψη δευτερεύοντες κίνδυνοι, όπως για παράδειγμα ο παράγοντας της αυτοθέρμανσης υλικών, ως αποτέλεσμα του παλαιού τύπου απαιτήσεων που υιοθετήθηκαν 40 χρόνια πριν. Το κύριο σύστημα πυρόσβεσης CO_2 κάτω από το κατάστρωμα καιρού είναι αναποτελεσματικό για κατάσβεση πυρκαγιών που προκύπτουν από ορισμένα επικίνδυνα φορτία. Η λανθασμένη ταξινόμηση τους μπορεί να οδηγήσει στην τοποθέτηση των εμπορευματοκιβωτίων που φέρουν αυτά τα φορτία κάτω από το κατάστρωμα καιρού και να καταστήσει την κατάσβεση αδύνατη όπως συνέβη στην περίπτωση του Yantian Express.
- Καθοριστικό ρόλο στην εκδήλωση και εξέλιξη των πυρκαγιών αποτέλεσε η εσφαλμένη δήλωση και η εσφαλμένη στοιβασία των εμπορευματοκιβωτίων που περιείχαν επικίνδυνα φορτία.
- Στα δύο από τα τρία ατυχήματα η πυρκαγιά προέκυψε λόγω αυτοθέρμανσης των μεταφερόμενων επικίνδυνων υλικών.
- Τα συστήματα πυρανίχνευσης και πυρόσβεσης δεν κρίθηκαν επαρκή για την καταπολέμηση των πυρκαγιών και απαιτήθηκε συνδρομή ναυαγοσωστικών πλοίων κάτι το οποίο αναδεικνύει την ανάγκη λήψης πρωτοβουλιών για την ενίσχυση των κανονισμών και των απαιτούμενων συστημάτων πυρασφάλειας στα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων.

Τέλος, βάσει των αποτελεσμάτων από την υπολογιστική προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε δεν κατέστη δυνατή η εξάπλωση της πυρκαγιάς μεταξύ δύο εμπορευματοκιβωτίων TEU στοιβαγμένα το ένα επάνω στο άλλο μέσω της χαλύβδινης οροφής του κάτω εμπορευματοκιβωτίου. Εντούτοις, όπως προέκυψε από το πείραμα η πυρκαγιά εξαπλώθηκε μέσω της καύσης του μονωτικού υλικού των πορτών των εμπορευματοκιβωτίων γεγονός που τροφοδότησε την πυρκαγιά με περισσότερο οξυγόνο και οδήγησε στην πλήρη ανάπτυξη της και την εξάπλωση και στο άνω εμπορευματοκιβώτιο. Η βελτίωση της σχεδίασης της μόνωσης του εμπορευματοκιβωτίου ή ακόμη και η επανεξέταση του χρησιμοποιούμενου υλικού μόνωσης των θυρών του θα μπορούσε να συντελέσει στην βελτίωση της πυρασφάλειας του και ενδεχομένως την πρόληψη εξάπλωσης μελλοντικών πυρκαγιών. Οι πληροφορίες που συλλέχτηκαν καθώς και τα δεδομένα που προέκυψαν από το υπολογιστικό πείραμα έδωσαν ορισμένες πληροφορίες σχετικά με τις ελάχιστες απαιτήσεις για την καθ' ύψος εξάπλωση της πυρκαγιάς μεταξύ δύο εμπορευματοκιβωτίων και την ανάδειξη και αξιολόγηση των σημαντικότερων κινδύνων. Τα δεδομένα αυτά δύνανται να λειτουργήσουν ως αρωγός σε μελλοντικές παρεμφερείς ερευνητικές προσπάθειες προσομοίωσης. Στο πλαίσιο τέτοιων προσομοιώσεων καθίσταται επίσης δυνατή η αξιολόγηση της απόδοσης των τρεχόντων συστημάτων πυρανίχνευσης και καταπολέμησης της πυρκαγιάς. Το πλεονέκτημα της χρήσης αυτών των εργαλείων προσομοίωσης είναι ότι επιτρέπει την διερεύνηση μεγάλων και αληθινών σεναρίων πυρκαγιάς χωρίς να απαιτείται η δοκιμή να γίνει σε πραγματικό πλοίο.

Αναλυτικότερα στο πλαίσιο των αριθμητικών προσομοιώσεων πυρκαγιάς θα μπορούσαν να εξεταστούν περαιτέρω τα ακόλουθα:

- Η προσθήκη περισσότερων εμπορευματοκιβωτίων στην προσομοίωση με σκοπό την βέλτιστη προσέγγιση ενός πραγματικού χώρου φορτίου. Αυτό δύναται να επιτρέψει την ανάλυση της επίδρασης μίας τέτοιας πυρκαγιάς σε γειτονικά εμπορευματοκιβώτια καθώς και να αποτελέσει εφαλτήριο στην κατανόηση των διαφόρων μηχανισμών εξάπλωσης της πυρκαγιάς σε τέτοιες περιστάσεις.

- Η επίδραση που θα είχε σε τέτοιες πυρκαγιές η καύση διαφορετικών ειδών φορτίων. Στην εν λόγω προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε ο ξυλάνθρακας με σκοπό την αναπαράσταση μίας εκ των περιπτώσεων εκδήλωσης πυρκαγιάς που συναντάται σε εμπορευματοκιβώτια πλοίων container. Η εξέταση ποικίλων ειδών καυσίμων μπορεί να δώσει πληροφορίες ως προς το ποιο υλικό από αυτά που έχουν αναγνωριστεί ότι αποτελούν συχνό παράγοντα εκδήλωσης πυρκαγιάς είναι το πιο επικίνδυνο και έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στην εξάπλωση μίας τέτοιας πυρκαγιάς.

Βιβλιογραφία

[1] Στέγγου Α., Σαγιά Ζ. (2015). *Μετάδοση Θερμότητας , Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου*.

[2] American Bureau of Shipping. (2021). *Guide for fire-fighting systems for cargo areas of container carriers*.

[3] American Bureau of Shipping. (2022*). Rules for Building and Classing Marine Vessels – Part 4 Vessel Systems and Machinery*.

[4] American Bureau of Shipping. (2022). *Rules for Building and Classing Marine Vessels – Part 5C Specific Vessel Types (Chapters 1-6)*.

[5] Allianz. (2021). *Safety and Shipping Review 2021*. Allianz Global Corporate & Specialty.

[6] Allianz. (2021). *Safety and Shipping Review 2021*. Allianz Global Corporate & Specialty.

[8] Bundesstelle für Seeunfalluntersuchung Federal Bureau of Maritime Casualty Investigation (2020*). Investigation report 15/19: Fire in the area of the deck cargo on board the container ship YANTIAN EXPRESS in the Atlantic ocean on 3 January 2019*.

[9] Callesen, F. G., Blinkenberg-Thrane, M., Taylor, J. R., & Kozine, I. (2021). *Container ships: fire-related risks*. Journal of Marine Engineering & Technology, 20(4), 262-277.

[10] Drysdale, D. (2011). *An Introduction to Fire Dynamics: Third Edition*.

[11] Hartin, E. (2008*). Fire development and fire behavior indicators. FireHouse. Accessed August, 10*.

[12] Hassan, P., Camille, L., Stephane, L. F., & Luigi, A. (2021*). X-Press Pearl maritime disaster Sri Lanka-report of the UN environmental advisory mission JULY 2021, UN environmental advisory mission, UN*.

[13] Helge, R. (2016). *Analysis of fires and firefighting operations on fully cellular container vessels over the period 2000-2015*. Diploma dissertation for the award of the academic degree «Diplom-Wirtschaftsingenieur für Seeverkehr (FH)» (BSc equivalent in marine industrial engineering).

[14] Hulin, T., Wilkens, K., Ruge, A., Møller, C., Perovic, D., Koch, N.S., Eiriksson, A., Kleiman, A.B. (2020). *Pilot Project CONTAIN, Exploring the challenges of containership fires.*

[15] Hurley, M. J., Gottuk, D. T., Hall Jr, J. R., Harada, K., Kuligowski, E. D., Puchovsky, M., & WIECZOREK, C. J. (Eds.). (2015). *SFPE handbook of fire protection engineering*.

[16] IACS. (2005). (Rev.1 Nov 2017). *Guidelines for Surveys, Assessment and Repair of Hull Structures*.

[17] IMO. (2007). *FSS code*. International Maritime Organization (IMO). Fire Safety System (FSS) Code.

[18] IMO. (2007) MSC 83/INF.8. *Formal Safety Assessment*.

[19] IMO. (2014) MSC 1/Circ. 1472. *Guidelines for the design, performance, testing and approval of mobile water monitors used for the protection of on-deck cargo areas of ships designed and constructed to carry five or more tiers of containers on or above the weather deck.*

[20] IMO. (2018) MSC.1/Circ 1430/Rev.1. *Revised guidelines for the design and approval of fixed water-bases fire- fighting systems for ro-ro spaces and special category spaces. Maritime Safety Committee.*

[21] IMO. (2020) MSC 102/21/3. *Proposal for a new output to evaluate the adequacy of fire protection, detection and extinction arrangements on board containerships to fight container fires: Submitted by Marshall Islands, Singapore, IACS and WSC.*

[22] IMO. (2020) MSC 102/21/7. *Proposal for a new output for the fire protection on containerships regarding the review of relevant parts of SOLAS chapter II-2 with regard to fire protection in the cargo area on and under deck: Submitted by the Bahamas, Germany, IUMI, BIMCO and CESA.*

[23] IMO. (2020) MSC 102/INF.2. *Information on insurance related economic aspects associated with containership fires: Submitted by IUMI.*

[24] IMO. (2020) MSC 102/INF.3. *Analysis of current safety regulations concerning fire-fighting on board containerships: Submitted by IUMI.*

[25] IMO. (2021) MSC 103. Maritime Safety Committee, 103rd session (MSC 103).

[26] Lange, L. (2019). *Fires on Container Vessels – avoidable?* INTERCARGO. Available at: https://www.intercargo.org/wp-content/uploads/2019/10/fire-fighting-on-container-vessels-by-IUMI.pdf.

[27] MAN Energy Solutions (2019). *Propulsion trends in container vessels*.

[28] Moctar, O. E., Povel, D., Shigunov, V., & Tide, A. (2010). *Fire Investigation in a Container*. Ship Technology Research, 57(1), 40-55.

[29] Manaadiar, H. (2020). *Findings of the Maersk Honam fire by TSIB – what really happened.* Shipping and Freight Resource.
Available at: https://www.shippingandfreightresource.com/findings-of-the-maersk-honam-fire-by-tsib-what-really-happened/.

[30] Papoutsis, I., Koromila, I. A., Themelis, N., & Spyrou, K. J. (2022). *Steps towards a systematic analysis and prevention of fires onboard containerships*. In Sustainable Development and Innovations in Marine Technologies (pp. 251-258). CRC Press.

[31] Povel, D. (2006). *Cargo Safety–Qualitative Design Review (QDR)*. SAFEDOR-D-02.05.03-2006-05-05-GL-Cargo Safety-QDR & Annex 1–rev-1.2, SAFEDOR.

[32] Sirilal, R., & Illmer, A. (2021). X-Press pearl: *The 'toxic ship' that caused an environmental disaster*. *BBC News*. Available at: https://www.bbc.com/news/world-asia-57395693.

[33] SOLAS, IMO (2009). Chapter II-2 – *Construction – Fire protection, fire detection and fire extinction. International Convention for the Safety Of Life At Sea*.

[34] The Maritime Executive (2020). *Report: Misdeclared Charcoal Likely Caused Yantian Express Fire*. The Maritime Executive. https://maritime-executive.com/article/report-misdeclared-charcoal-likely-caused-yantian-express-fire.

[35] Themelis, N., & Pagonis, N., (2021). *An analysis of the parameters affecting the propagation of fire on the vehicle deck of a RoPax ship*. Proceedings, 1st International Conference on the Stability and Safety of Ships and Ocean Vehicles. June 2021, Glasgow.

[36] Themelis, N., & Spyrou, K. J. (2010). *An efficient methodology for defining probabilistic design fires*. Proceedings, 4th International Maritime Conference on Design for Safety. October 2010, Trieste.

[37] The Nordic Association of Marine Insurers (Cefor) (2019). *Annual report 2019*.

[38] The Nordic Association of Marine Insurers (Cefor) (2020). *Annual report 2020*.

[39] The Nordic Association of Marine Insurers (Cefor) (2021). *Annual report 2021*.

[40] Thunderhead Engineering. (2012). *PyroSim Example Guide.*

[41] Thunderhead Engineering. (2020). *PyroSim User Manual.*

[42] Transport Safety Investigation Bureau Ministry of Transport Singapore (2020). *Final Report: Fire on board Maersk Honam at Arabian sea on 6 March 2018.*

[43] Wilkens, K., Eiriksson, A., & Andres, B. (2021). *Experimental investigation on fire spread mechanisms between shipping containers*. In Book of Abstracts (p. 32).

Παραρτήματα

Παράρτημα Α – Ορισμοί

Με σκοπό την βέλτιστη κατανόηση του πλαισίου των κανονισμών και απαιτήσεων, σε πρώτο στάδιο παρατίθενται κάποιοι ορισμοί οι οποίοι πηγάζουν από τους κανονισμούς του έγγραφου SOLAS CHAPTER II-2/3:

-"A" class divisions are those divisions formed by bulkheads and decks which comply with the following criteria:

- They are constructed of steel or other equivalent material.
- They are suitably stiffened.
- They are insulated with approved non-combustible materials such that the average temperature of the unexposed side will not rise more than 140°C above the original temperature, nor will the temperature, at any one point, including any joint, rise more than 180°C above the original temperature, within the time listed below:

class "A-60"	60 min
class "A-30"	30 min
class "A-15"	15 min
class "A-0"	0 min

- They are constructed as to be capable of preventing the passage of smoke and flame to the end of the one-hour standard fire test.

-"B" class divisions are those divisions formed by bulkheads, decks, ceilings or linings which comply with the following criteria:

- They are constructed of approved non-combustible materials and all materials used in the construction and erection of "B" class divisions are non-combustible, with the exception that combustible veneers may be permitted provided they meet other appropriate requirements of this chapter.
- They have an insulation value such that the average temperature of the unexposed side will not rise more than 140°C above the original temperature, nor will the temperature at any one point, including any joint, rise more than 225°C above the original temperature, within the time listed below:

class "B-15"	15 min
class "B-0"	0 min

- They are so constructed as to be capable of preventing the passage of flame to the end of the first half hour of the standard fire test;

-"C" class divisions are divisions constructed of approved non-combustible materials. They need meet neither requirements relative to the passage of smoke and flame nor limitations relative to the temperature rise. Combustible veneers are permitted provided they meet the requirements of this chapter.

- Combustible material is any material other than a non-combustible material.

- Dangerous goods are those goods referred to in regulation VII/2.

- Fire Safety Systems Code means the International Code for Fire Safety Systems as adopted by the Maritime Safety Committee of the Organization by resolution MSC.98(73), as may be amended by the Organization, provided that such amendments are adopted, brought into force and take effect in accordance with the provisions of article VIII of the present Convention concerning the amendment procedures applicable to the annex other than chapter I thereof.

- Flashpoint is the temperature in degrees Celsius (closed cup test) at which a product will give off enough flammable vapor to be ignited, as determined by an approved flashpoint apparatus.

- Main vertical zones are those sections into which the hull, superstructure and deckhouses are divided by "A" class divisions, the mean length and width of which on any deck does not in general exceed 40 m.

- Non-combustible material is a material which neither burns nor gives off flammable vapors in sufficient quantity for self-ignition when heated to approximately 750°C, this being determined in accordance with the Fire Test Procedures Code.

Επιπλέον στο πλαίσιο του MSC.1/1430 [20] παρατίθενται οι ακόλουθοι χρήσιμοι για την κατανόηση του κανονιστικού πλαισίου ορισμοί:

-Deluge system, automatic and manual release is a system employing open nozzles attached to a piping system connected to a water supply through a valve that can be opened by signals from a fire detection system and by manual operation. When this valve is opened, water flows into the piping system and discharges from all nozzles attached thereto.

-Deluge system, manual release *is* a system employing open nozzles attached to a piping system connected to a water supply through a valve that is opened by manual operation. When this valve is opened, water flows into the piping system and discharges from all nozzles attached thereto.

-Dry pipe system is a system employing automatic sprinklers or nozzles attached to a piping system containing air or nitrogen under pressure, the release of which (as from the activation of a sprinkler or nozzle by heat from a fire) permits the water pressure to open a valve known as a dry pipe valve. The water then flows into the piping and discharges from the open nozzles or sprinklers.

-Wet pipe system is a system employing automatic sprinklers or nozzles attached to a piping system containing water and connected to a water supply so that water discharges immediately from sprinklers or nozzles opened by heat from a fire.

-Pre-action system is a system employing automatic sprinklers or nozzles attached to a piping system containing air that may or may not be under pressure, with a supplemental fire detection system installed in the same area as the sprinklers or nozzles. Activation of the fire detection system opens a valve that permits water to flow into the system piping and to be discharged from any sprinkler or nozzle that has operated.

-Water discharge density is the unit rate of water application to an area or surface expressed in mm/min (equal to (l/min)/m^2).

-Automatic sprinkler or nozzle is a single or multiple orifice water discharge device that activates automatically when its heat-activated element is heated to its thermal rating or above, allowing water under pressure to discharge in a specific, directional discharge pattern.

-Open sprinkler or nozzle is an open single or multiple orifice water discharge device that, when discharging water under pressure, will distribute the water in a specific, directional discharge pattern.

Τέλος παρατίθενται και κάποιοι χρήσιμοι ορισμοί στο πλαίσιο του κώδικα FSS και συγκεκριμένα από το Ch.9 §1.2 :

-Section means a group of fire detectors and manually operated call points as reported in the indicating unit(s).

-Section identification capability means a system with the capability of identifying the section in which a detector or manually operated call point has activated.

-Individually identifiable means a system with the capability to identify the exact location and type of detector or manually activated call point which has activated, and which can differentiate the signal of that device from all others.

Παράρτημα Β – Λεπτομέρειες χρήσης προγράμματος Pyrosim

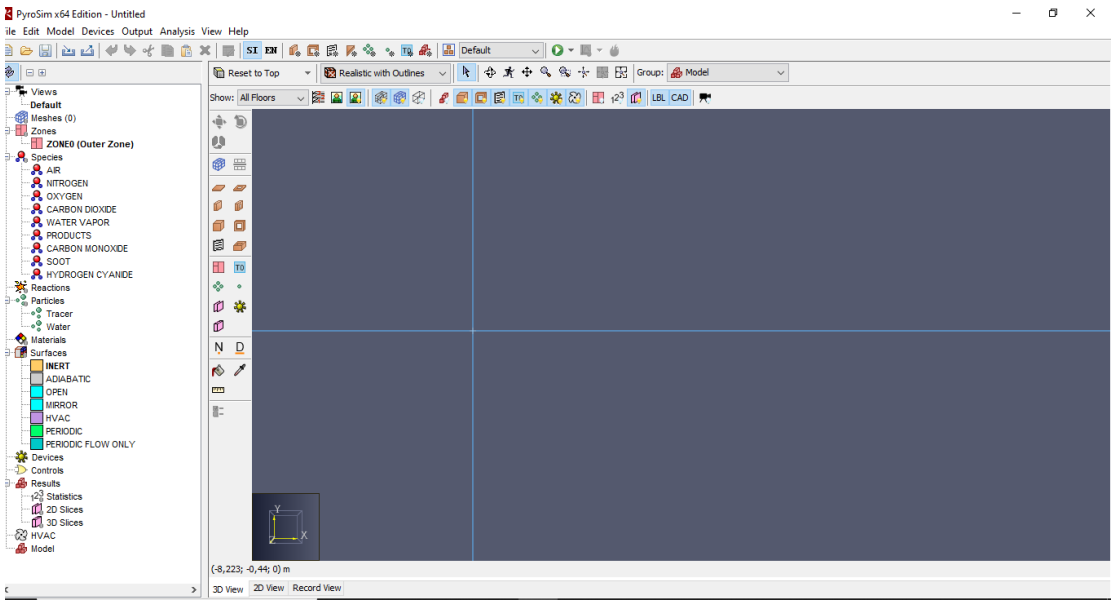
Γραφικό Περιβάλλον Pyrosim (PyroSim Interface)

Το PyroSim παρέχει τέσσερις επεξεργαστές για το μοντέλο πυρκαγιάς : την προβολή 3D, την προβολή 2D, την προβολή πλοήγησης (Navigation view) και την προβολή εγγραφής (Record View). Όλα αυτά αντιπροσωπεύουν το τρέχον μοντέλο . Εάν ένα αντικείμενο προστεθεί, αφαιρεθεί ή επιλεγεί σε μία προβολή, οι άλλες προβολές θα αντικατοπτρίζουν ταυτόχρονα την αλλαγή. [41]

Προβολή 3D (3D View)

Χρησιμοποιώντας την τρισδιάστατη προβολή αποκτάται γρήγορα μια οπτική εικόνα του μοντέλου και είναι εύκολο να εκτελεστεί γρήγορα κάποια σχεδίαση. Στην προβολή αυτή, ο χρήστης μπορεί να πλοηγηθεί στο μοντέλο σε 3D και να επιλέξει αντικείμενα. [41]

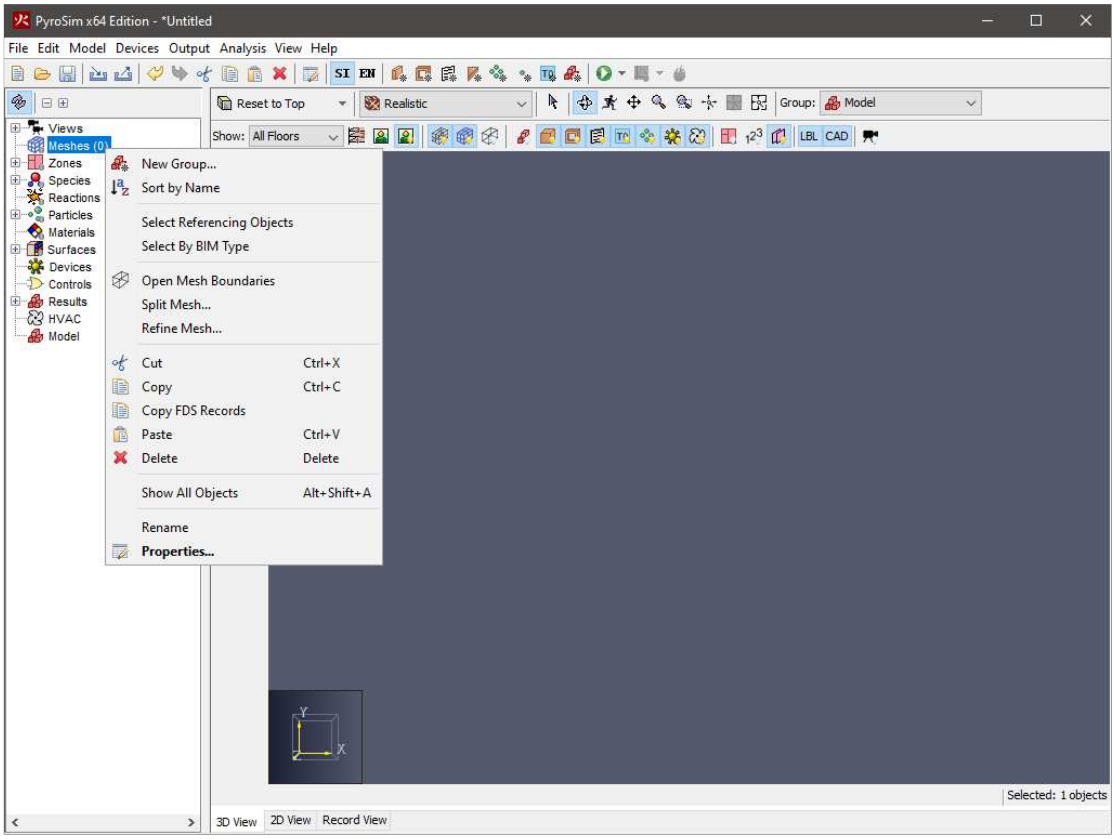
Στην ακόλουθη εικόνα παρουσιάζεται το διαδραστικό υπολογιστικό περιβάλλον της τρέχουσας έκδοσης του Pyrosim στην 3D VIEW λειτουργία.



Εικόνα 63 Γραφικό περιβάλλον του Pyrosim στην 3D προβολή.

Προβολή Πλοήγησης (Navigation View)

Η προβολή πλοήγησης είναι μια προβολή που μοιάζει με δέντρο στην αριστερή πλευρά του κύριου παραθύρου του PyroSim. Ένα παράδειγμα αυτής της προβολής κατά τη χρήση φαίνεται στην Εικόνα 39. Κάνοντας δεξί κλικ σε ένα στοιχείο σε αυτήν την προβολή, εμφανίζεται μια λίστα με τις λειτουργίες που μπορεί να εκτελέσει το PyroSim σε αυτό το στοιχείο. [41]



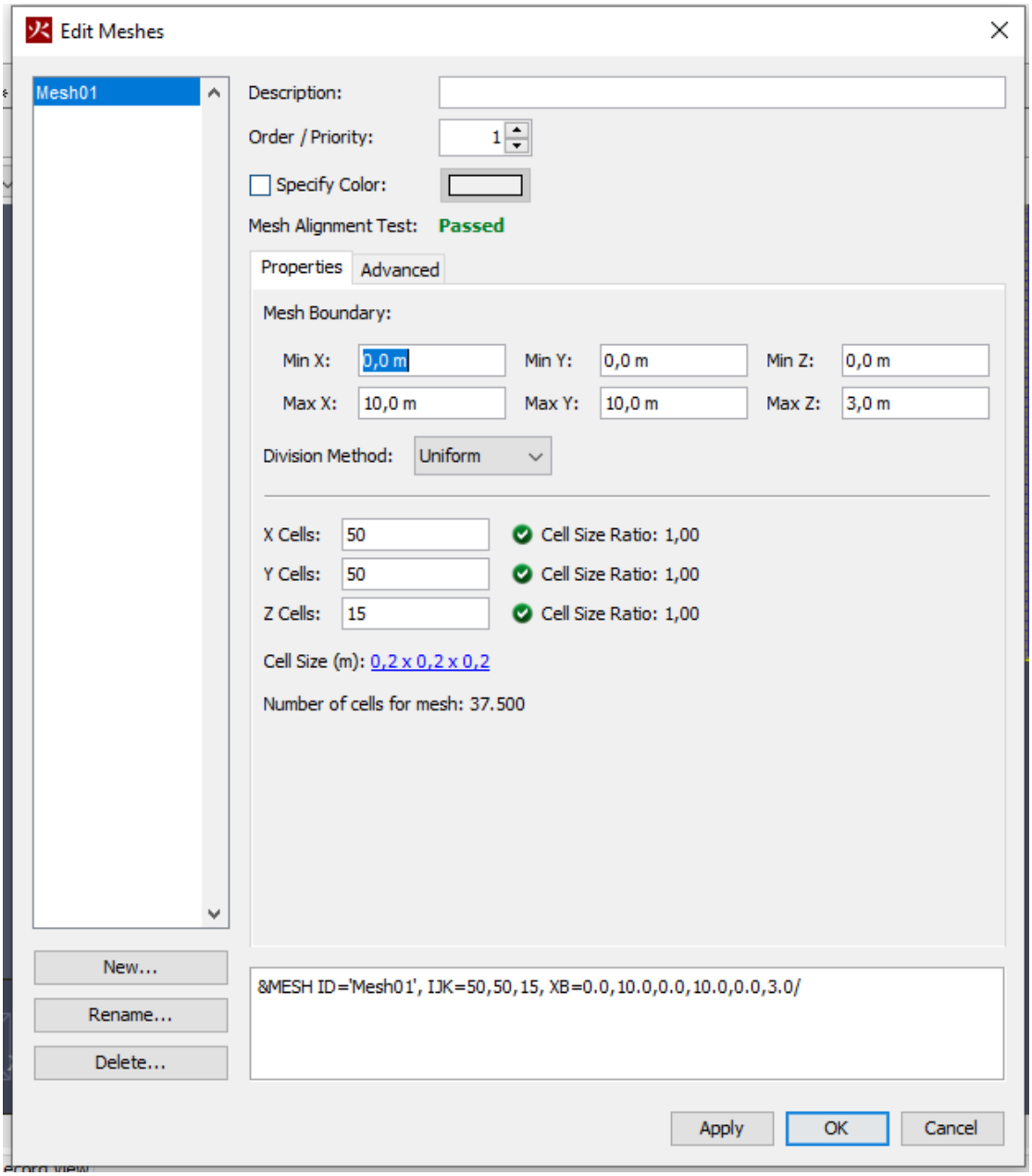
Εικόνα 64 Χρησιμοποιώντας την λίστα λειτουργιών στην προβολή πλοήγησης.

Υπολογιστικά πλέγματα (Computational Meshes)

Όλοι οι υπολογισμοί FDS εκτελούνται εντός υπολογιστικών πλεγμάτων. Δύο κριτήρια ελέγχουν το απαιτούμενο μέγεθος πλεγμάτων:

- Η Επίλυση του πεδίου ροής.
- Η Επίλυση της γεωμετρίας.

Κάθε αντικείμενο στην προσομοίωση (π.χ. εμπόδια και αεραγωγοί) πρέπει να συμμορφώνονται με το πλέγμα. Όταν η θέση ενός αντικειμένου δεν είναι ακριβώς σύμφωνη με ένα πλέγμα, το αντικείμενο επανατοποθετείται αυτόματα κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Οποιοδήποτε αντικείμενο που εκτείνεται πέρα από το όριο του υπολογιστικού πλέγματος αποκόπτεται στο όριο. Δεν υπάρχει περιορισμός στην περίπτωση ορισμού αντικειμένων εκτός του υπολογιστικού πλέγματος, ωστόσο αυτά τα αντικείμενα δεν θα εμφανίζονται στα αποτελέσματα. Για να επιτευχθεί η βέλτιστη ακρίβεια προσομοίωσης, είναι σημαντικό να χρησιμοποιηθούν κελιά πλέγματος που είναι περίπου το ίδιο μέγεθος και στις τρεις κατευθύνσεις του χώρου. [41]



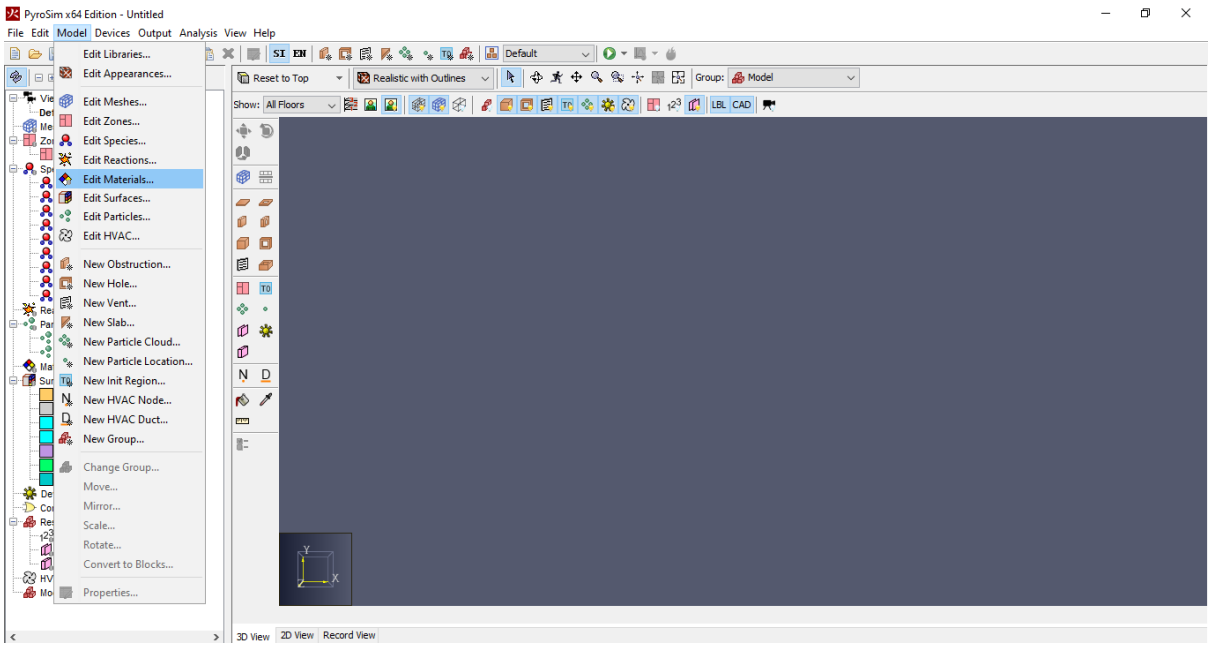
Εικόνα 65 Δημιουργώντας ένα υπολογιστικό πλέγμα στο Pyrosim.

Υλικά (Materials)

Για την προσομοίωση μιας επιφάνειας κατασκευασμένη από θερμικά αγώγιμα στερεά ή ένα καύσιμο απαιτείται ο καθορισμός ενός υλικού που περιγράφει ορισμένες θερμικές ιδιότητες και τη συμπεριφορά πυρόλυσης. Το PyroSim προσφέρει δύο κατηγορίες υλικών:

- στερεά υλικά
- υγρά καύσιμα.

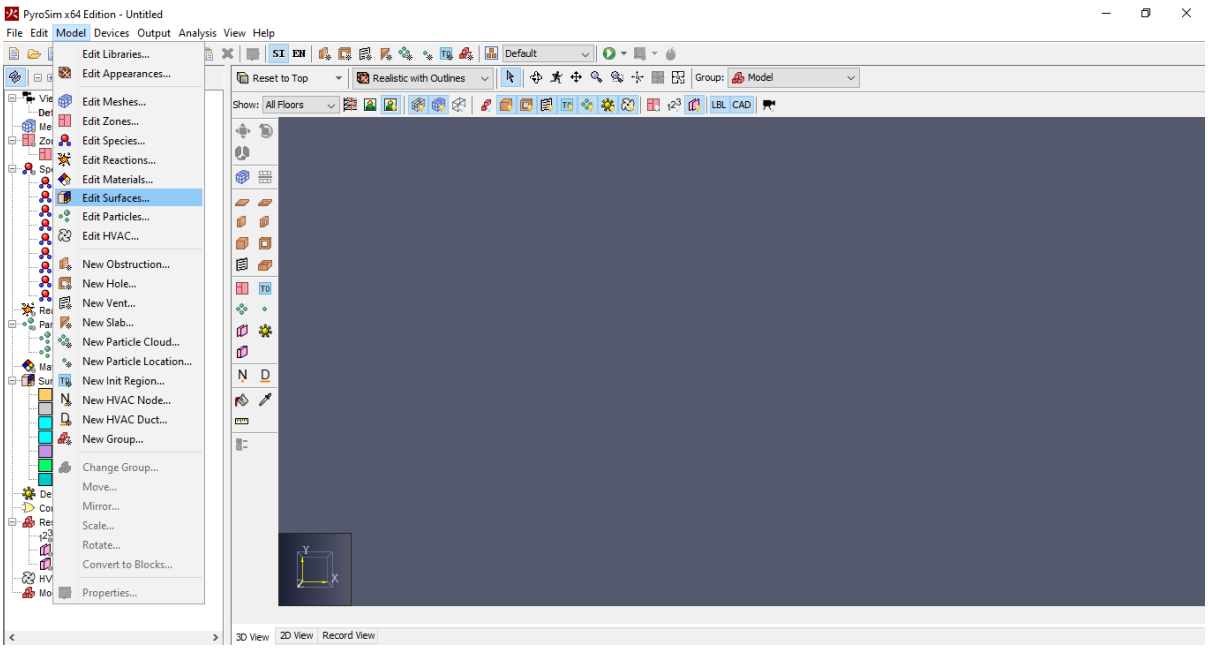
Για την δημιουργία ενός νέου υλικού, ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει το παράθυρο επεξεργασίας υλικών. Αυτό μπορεί να γίνει μέσω του μενού Model και εν συνεχεία επιλέγοντας Edit Materials όπως φαίνεται στην εικόνα: [41]



Εικόνα 66 Δημιουργία και επεξεργασία υλικών στο Pyrosim.

Επιφάνειες (Surfaces)

Οι επιφάνειες χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των ιδιοτήτων στερεών αντικειμένων και αεραγωγών στο μοντέλο FDS. Η επιφάνεια μπορεί να χρησιμοποιήσει προηγουμένως καθορισμένα υλικά σε μείγματα ή στρώσεις. Η προεπιλεγμένη επιφάνεια όλων των στερεών αντικείμενων και των αεραγωγών η οποία είναι η INERT που ορίζεται από την προεπιλεγμένη ιδιότητα επιφάνειας στις παραμέτρους προσομοίωσης (Simulation Parameters). Η προεπιλεγμένη θερμοκρασία καθορίζεται επίσης στη θερμοκρασία περιβάλλοντος και ορίζεται επίσης στο παράθυρο επιλογών των παραμέτρων προσομοίωσης. Εκτός από τον ορισμό της θερμικής αγωγιμότητας ενός στερεού, οι επιφάνειες μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τον καθορισμό επιφανειών burner με προδιαγεγραμμένο ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας, τον ορισμό της θερμοκρασίας ανάφλεξης για ένα αντικείμενο, να δώσουν την ταχύτητα παροχής αέρα σε έναν αεραγωγό και τον ορισμό πολλών άλλων ιδιοτήτων που υποστηρίζονται από το FDS. Για τη δημιουργία, τροποποίηση και διαγραφή επιφανειών, ο χρήστης δύναται να χρησιμοποιήσει το παράθυρο διαλόγου Επεξεργασία επιφανειών (Edit surfaces dialog) όπως φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα. [41]



Εικόνα 67 Επιλογή επεξεργασίας επιφανειών στο PyroSim.

Προϋπάρχουσες – <<δεσμευμένες>> επιφάνειες (Reserved Surfaces)

Υπάρχουν έξι θεμελιώδεις ή «δεσμευμένοι» τύποι επιφανειών: ADIABATIC, INERT, MIRROR, OPEN, HVAC,and PERIODIC. Αυτές οι επιφάνειες δεν μπορούν να αλλάξουν και υπάρχουν σε κάθε ανάλυση.

Είδη επιφανειών (Surface types)

Το PyroSim όπως αναφέρεται στον οδηγό του προγράμματος [39], βοηθά τον χρήστη οργανώνοντας τις επιλογές επιφάνειας σε λογικούς τύπους, όπως μίας επιφάνεια καύσης (burner) που ορίζει μια απλή φωτιά ή μια επιφάνεια πολλαπλών στρώσεων (Layered) για την αναπαράσταση ενός στερεού, θερμικά αγώγιμου τοίχου. Υπάρχουν οκτώ τύποι επιφανειών με αλφαβητική σειρά που ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει στο PyroSim. Αυτές είναι :

• Air Leak

• Basic

• Burner

• Exhaust

• General Surface

• Heater/Cooler

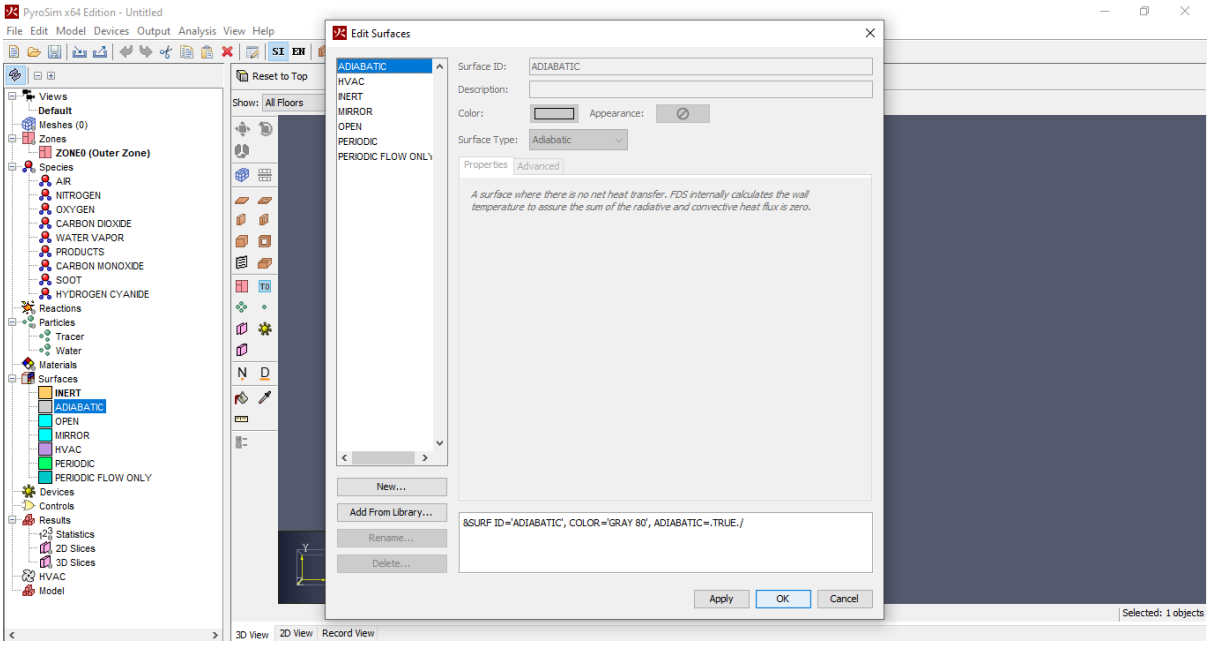
• Layered

• Supply

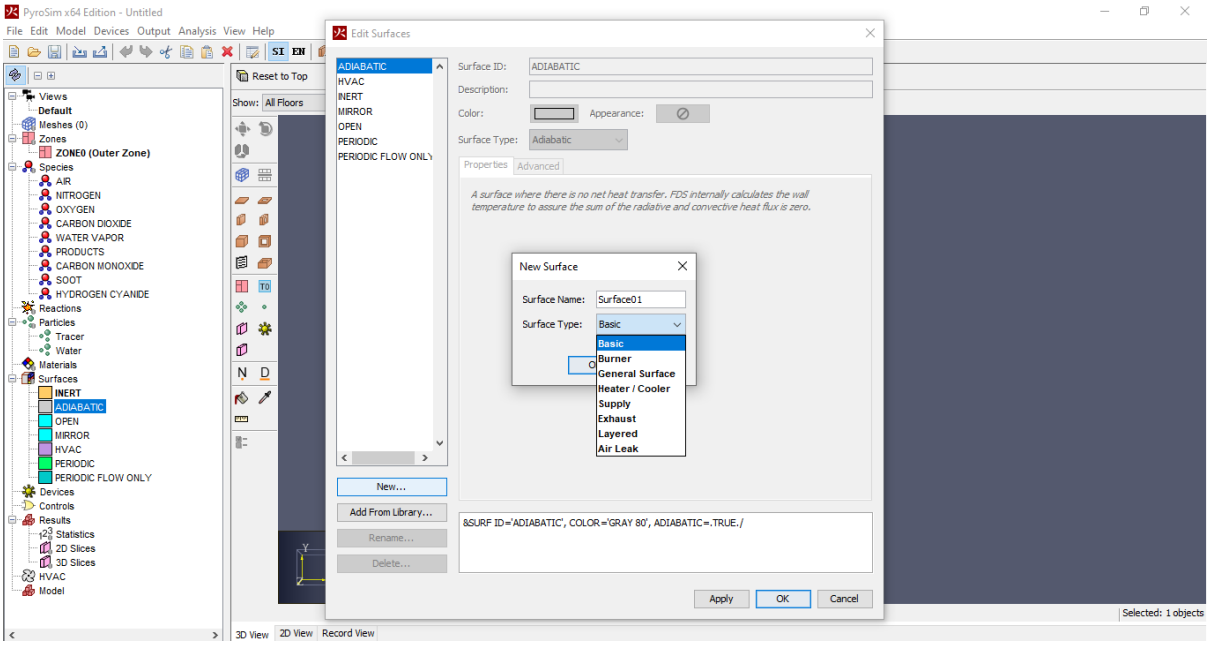
Το παράθυρο διαλόγου Επεξεργασία επιφανειών (Edit Surfaces dialog) βοηθά στον καθορισμό ενός νέου τύπου επιφάνειας με ένα σύνολο καρτελών. Κάθε καρτέλα παρέχει μια

συλλογή πεδίων εισόδου και ρυθμίσεων για να προσαρμόσει ο χρήστης αυτόν τον τύπο επιφάνειας.

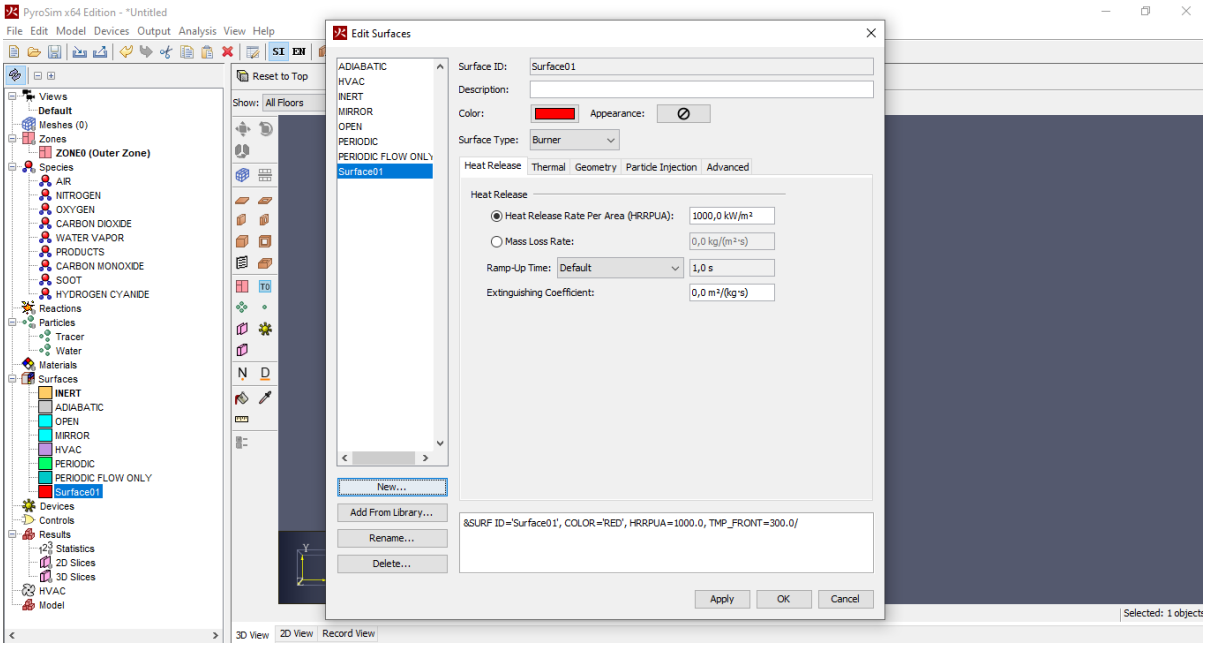
Τα προαναφερόμενα φαίνονται και στις ακόλουθες εικόνες.



Εικόνα 68 Δεσμευμένες - προϋπάρχουσες επιφάνειες προς επιλογή στο PyroSim.



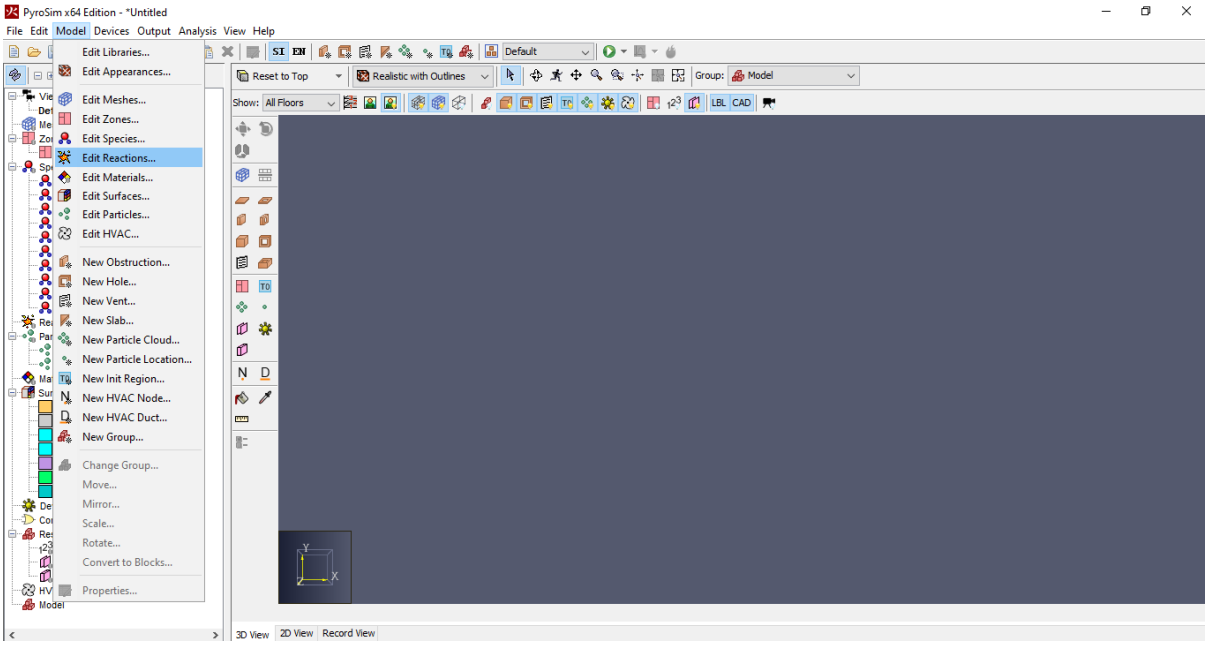
Εικόνα 69 Λίστα επιλογής με τις 8 επιφάνειες που ο χρήστης δύναται να δημιουργήσει στο Pyrosim.



Εικόνα 70 Καρτέλες προσδιορισμού ιδιοτήτων κατά τη δημιουργία νέας επιφάνειας στο Pyrosim.

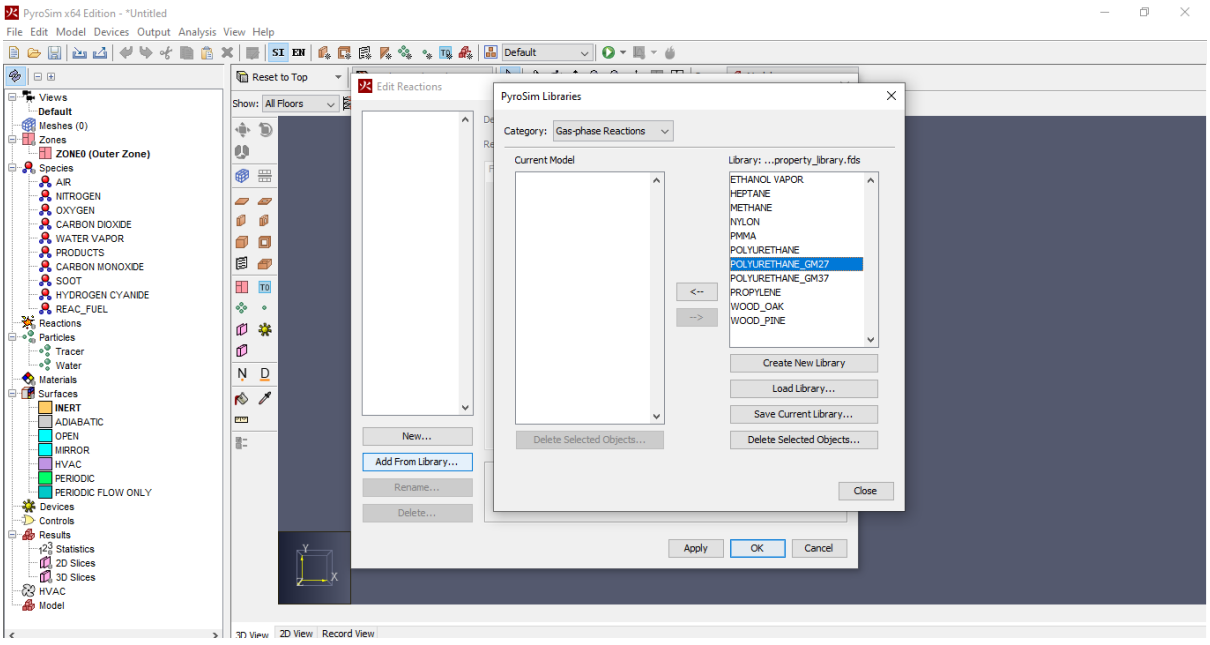
Αντίδραση (Reaction)

Όλα τα μοντέλα PyroSim (FDS) που περιλαμβάνουν καύση πρέπει να ορίζουν μια αντίδραση αέριας φάσης που μετατρέπει το καύσιμο σε προϊόντα καύσης. Από προεπιλογή δεν καθορίζεται καμία αντίδραση, ενώ απαιτείται αντίδραση μόνο εάν υπάρχει φωτιά στην προσομοίωση. Στο FDS, μια αντίδραση ορίζει όχι μόνο το καύσιμο και τα προϊόντα αλλά και τη Θερμότητα της Καύσης (Heat of Combustion). Μόλις γίνει γνωστή η θερμότητα της καύσης και το επιθυμητό HRR, το FDS υπολογίζει το ρυθμό ροής μάζας καυσίμου (fuel mass flow rate) από την επιφάνεια. Όταν καθορίζεται ένα HRR (Heat Release Rate) στην πραγματικότητα προσδιορίζεται ο ρυθμός με τον οποίο απελευθερώνεται καύσιμο στην προσομοίωση πυρκαγιάς. Ο ρυθμός ροής μάζας καυσίμου υπολογίζεται έτσι ώστε η καύση να απελευθερώνει θερμότητα με τον επιθυμητό ρυθμό. [41]



Εικόνα 71 Ορισμός αντίδρασης καύσης στο PyroSim.

Ένας περιορισμένος αριθμός αντιδράσεων περιλαμβάνεται στο FDS και μπορεί να προστεθεί από τη βιβλιοθήκη όπως φαίνεται και στη φωτογραφία που ακολουθεί:



Εικόνα 72 Προσθήκη αντίδρασης καύσης από την βιβλιοθήκη του Pyrosim.

Γεωμετρία (Geometry)

Σύμφωνα με τον οδηγό του προγράμματος [41], το PyroSim παρέχει εργαλεία που βοηθούν τον χρήστη να δημιουργήσει και να οργανώσει γρήγορα τη γεωμετρία του μοντέλου. Η γεωμετρία μπορεί να δημιουργηθεί είτε μέσω διαλόγων είτε χρησιμοποιώντας τα εργαλεία

σχεδιασμού σε 2D ή 3D προβολές όπως αναλύθηκε και προηγουμένως. Υπάρχουν συνήθως τρεις τύποι γεωμετρίας που μπορούν να δημιουργηθούν στο PyroSim:

- Obstructions
- Holes
- Vents

Στερεά αντικείμενα (Obstructions)

Τα obstructions είναι η θεμελιώδης γεωμετρική αναπαράσταση στο Fire Dynamics Simulator (FDS). Τα obstructions είναι ορθογώνια στερεά που ορίζονται από δύο σημεία στον τρισδιάστατο χώρο. Οι ιδιότητες της επιφάνειας εκχωρούνται σε κάθε επιφάνεια του obstruction Κατά τη δημιουργία ενός μοντέλου, η γεωμετρία ενός obstruction δεν χρειάζεται να ταιριάζει με τη γεωμετρία του πλέγματος που χρησιμοποιείται για τη λύση. Ωστόσο, το FDS θα ευθυγραμμίσει όλη τη γεωμετρία με το πλέγμα επίλυσης. Στην ανάλυση FDS όλες οι όψεις ενός obstruction μετατοπίζονται για να αντιστοιχούν στο πλησιέστερο πλέγμα. Έτσι, ορισμένα αντικείμενα μπορεί να γίνουν παχύτερα στην ανάλυση ενώ άλλα μπορεί να γίνουν λεπτά. [40]

Επιφάνειες Vent

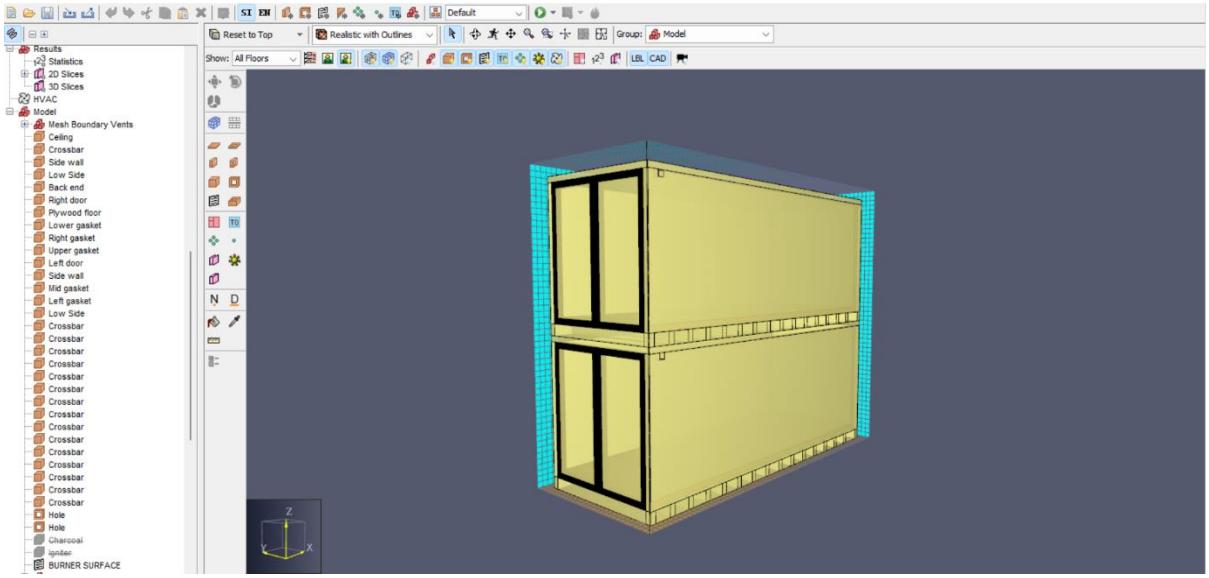
Οι επιφάνειες vent έχουν γενική χρήση στο FDS για την περιγραφή δισδιάστατων 2D επίπεδων αντικειμένων. Στην κυριολεξία, μια επιφάνεια vent μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μοντελοποίηση εξαρτημάτων του συστήματος εξαερισμού σε ένα κτίριο, όπως ένας διαχύτης ή μια επιστροφή. Σε αυτές τις περιπτώσεις, οι συντεταγμένες της επιφάνειας vent ορίζουν ένα επίπεδο που σχηματίζει το όριο του αγωγού. Δεν χρειάζεται να δημιουργηθούν τρύπες καθώς ο αέρας τροφοδοτείται ή απομακρύνεται από την επιφάνεια vent. Οι επιφάνειες vent μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως μέσο εφαρμογής μιας συγκεκριμένης οριακής συνθήκης σε ένα όριο του πλέγματος ή σε μια επιφάνεια. Μια πυρκαγιά, για παράδειγμα, μπορεί να δημιουργηθεί καθορίζοντας μία επιφάνεια vent είτε σε όριο πλέγματος είτε σε συμπαγή επιφάνεια. Η επιφάνεια vent καθορίζει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά της φωτιάς. [40]

Συσκευές (Devices)

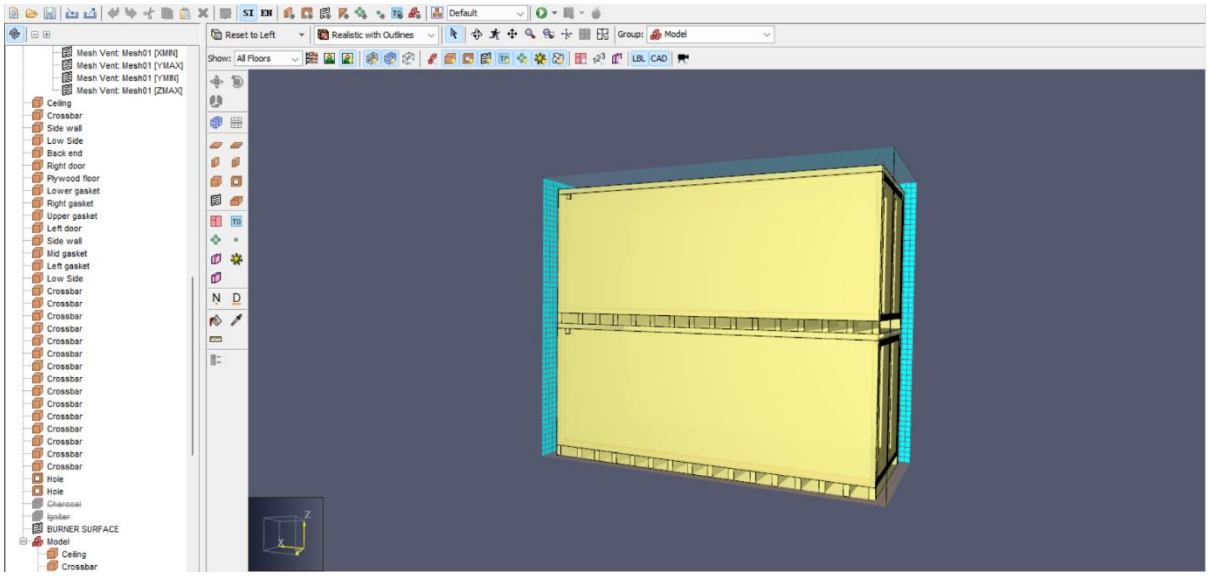
Οι συσκευές χρησιμοποιούνται για την καταγραφή ποσοτήτων στο μοντέλο ή για την αναπαράσταση πιο περίπλοκων αισθητήρων, όπως π.χ. ανιχνευτές καπνού, ψεκαστήρες και θερμοστοιχεία. [40]

Παράρτημα Γ – Εξέταση της επίδρασης της διάταξης ανοιγμάτων εξαερισμού στην εξέλιξη της πυρκαγιάς

Στο παράρτημα αυτό παρουσιάζονται κάποιες πρωταρχικές αριθμητικές προσομοιώσεις πυρκαγιάς με σκοπό την μελέτη της επίδρασης του αριθμού των ανοιγμάτων εξαερισμού στην ανάπτυξη της πυρκαγιάς που προκύπτει λόγω πιλοτικής ανάφλεξης κάρβουνου εντός ενός εμπορευματοκιβωτίου TEU. Οι παράμετροι και οι συνθήκες προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ίδιες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα που υλοποιήθηκε στο κυρίως μέρος αυτής της εργασίας. Η μοναδική παράμετρος που άλλαξε ήταν ο αριθμός των ανοιγμάτων εξαερισμού. Εν προκειμένω, στην πρωταρχική αυτή προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε ένα μόνο άνοιγμα εξαερισμού σε κάθε πλευρά καθενός εκ των δύο εμπορευματοκιβωτίων (δηλαδή δύο ανοίγματα εξαερισμού ανά εμπορευματοκιβώτιο) διαστάσεων 0.1 x 0.1 m όπως φαίνεται και στις 2 ακόλουθες εικόνες:

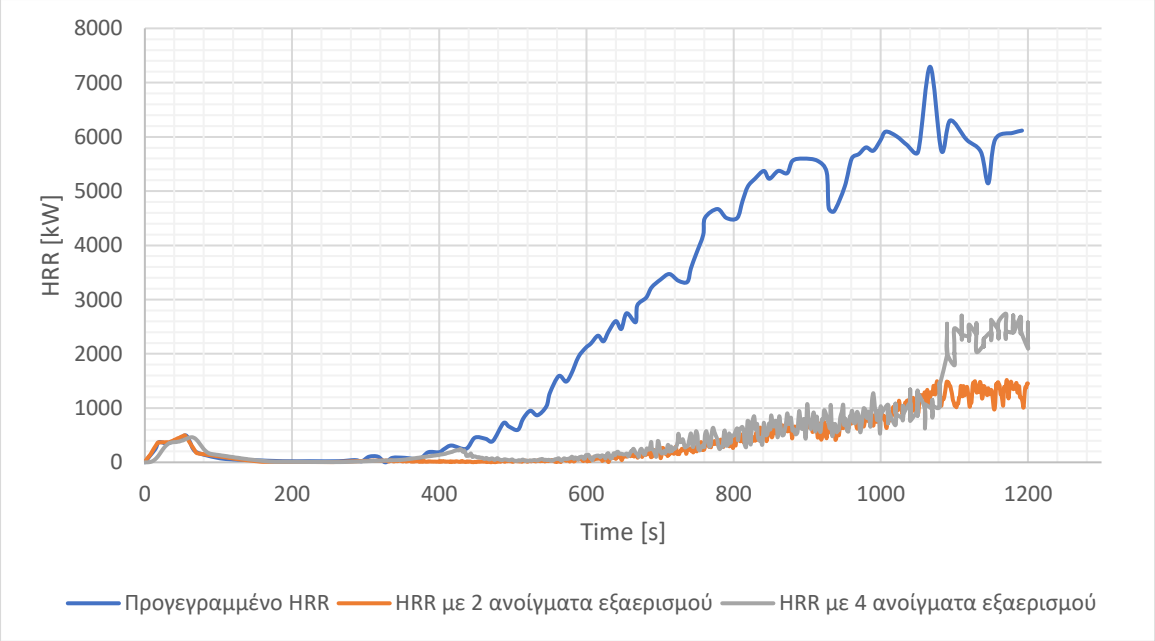


Εικόνα 73 Διάταξη ανοιγμάτων εξαερισμού στα δύο εμπορευματοκιβώτια (δεξιά πλευρά).



Εικόνα 74 Διάταξη ανοιγμάτων εξαερισμού στα δύο εμπορευματοκιβώτια (αριστερή πλευρά).

Ως χρόνος προσομοίωσης ορίστηκαν τα 1200 δευτερόλεπτα. Ακολούθως, παρουσιάζεται ο συνολικός ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας που προέκυψε από το πείραμα αυτό. Στο ίδιο διάγραμμα παρουσιάζεται και η καμπύλη του προγεγραμμένου ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας που χρησιμοποιήθηκε βάσει πάλι της μελέτης CONTAIN [14] καθώς επίσης και η καμπύλη του ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας που προέκυψε από το πείραμα του κύριου μέρους της εργασίας το οποίο περιλάμβανε 4 ανοίγματα εξαερισμού σε κάθε εμπορευματοκιβώτιο.

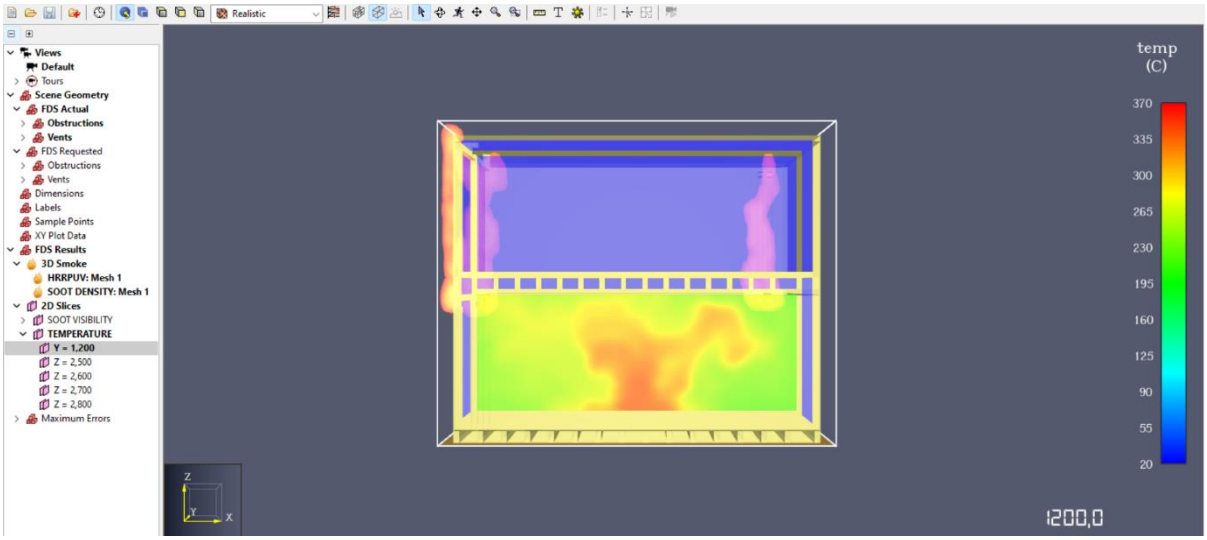


Εικόνα 75 Σύγκριση ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας των δύο πειραμάτων.

Με βάση το διάγραμμα αυτό επιβεβαιώνεται ότι όσο περισσότερα είναι τα ανοίγματα εξαερισμού τόσο μεγαλύτερες είναι και οι τιμές της καμπύλης του ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας HRR , κάτι το οποίο γίνεται εμφανές από τα 1100 δευτερόλεπτα της

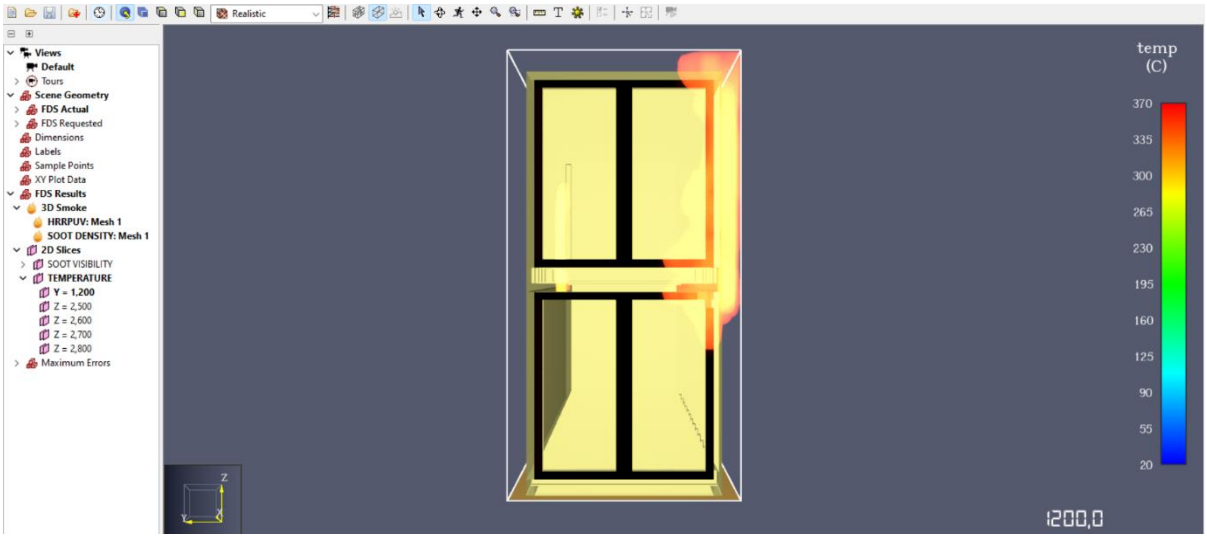
προσομοίωσης και μετά. Ο αυξημένος εξαερισμός συνεπάγεται αυξημένη ποσότητα διαθέσιμου οξυγόνου γεγονός που ευνοεί την καύση και την αύξηση της θερμοκρασίας. Η τιμή του HRR παρέμεινε σε χαμηλά επίπεδα στην περίπτωση των δύο ανοιγμάτων εξαερισμού συγκριτικά με την προγεγραμμένη καμπύλη για τον χρόνο προσομοίωσης που ορίστηκε.

Ακολούθως παρουσιάζεται και η κατανομή της θερμοκρασίας σε ένα δισδιάστατο επίπεδο στο μέσο κατά το πλάτος των 2 εμπορευματοκιβωτίων. Παρατηρείται ότι η μέγιστη θερμοκρασία που αναπτύχθηκε ανέρχεται στους 370^{o}C ενώ στο άνω εμπορευματοκιβώτιο η τιμή της παρέμεινε σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, καθώς κατά τον χρόνο της προσομοίωσης η πυρκαγιά δεν εξαπλώθηκε στο άνω εμπορευματοκιβώτιο.



Εικόνα 76 Θερμοκρασιακή κατανομή σε δισδιάστατο επίπεδο σε απόσταση Y=1.2 m.

Στα 1100 δευτερόλεπτα προσομοίωσης επετεύχθη η συνθήκη του 'burn away' για το μονωτικό υλικό του κάτω εμπορευματοκιβωτίου σε ένα μικρό του τμήμα πλησίον του ανοίγματος εξαερισμού και παρέμεινε έτσι έως και το πέρας της προσομοίωσης όπως φαίνεται και στην ακόλουθη εικόνα:



Εικόνα 77 Ικανοποίηση συνθήκης burn away για το μονωτικό υλικό EPDM και αφαίρεση από το πρόγραμμα τμήματος αυτού.