



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΛΟΙΟΥ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Μελέτη της επίδρασης πυρκαγιάς σε κατάστρωμα οχημάτων  
επιβατηγού/οχηματαγωγού πλοίου.»**

Παγώνης Νικόλαος-Αντώνιος

nm14051

Επιβλέπων: Νικόλαος Θεμελής

Αθήνα, Οκτώβριος 2020

## Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία έρχεται να επισφραγίσει ένα σπουδαίο κύκλο σπουδών στην Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π.. Με την ολοκλήρωσή της, θα ήθελα να ευχαριστήσω ολόψυχα τον καθηγητή μου Νικόλαο Θεμελή, ο οποίος με την καθοδήγηση του και με τις συμβουλές του με βοήθησε να φέρω εις πέρας αυτήν την εργασία. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον φίλο και συνάδελφο Δημήτρη Φαλάρη για τη συνεργασία και την στήριξή του καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών.

## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η επίδραση πυρκαγιάς σε κατάστρωμα οχημάτων επιβατηγού/οχηματαγωγού πλοίου, με την πραγματοποίηση ενός αριθμού υπολογιστικών προσομοιώσεων εξετάζοντας διαφορετικές παραμέτρους και συγκεκριμένα την διαρρύθμιση των οχημάτων στο χώρο, την διαρρύθμιση του ίδιου του χώρου και την επίδραση του ανέμου. Αρχικά, δίνονται οι βασικές αρχές μετάδοσης θερμότητας για την κατανόηση της διάδοσης μιας πυρκαγιάς και τονίζεται η σημασία του οξυγόνου ως απαραίτητης προϋπόθεσης για την εξέλιξή της. Εν συνεχεία, παρουσιάζονται οι ισχύοντες κανονισμοί και οι τροποποιήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί τα τελευταία χρόνια λόγω των πρόσφατων ατυχημάτων. Ακολουθεί η στατιστική καταγραφή αυτών των ατυχημάτων σχετικά με τις πηγές ανάφλεξης, τον τύπο των πλοίων και των χώρων τους και τα συστήματα ανίχνευσης και κατάσβεσης. Περιγράφονται αναλυτικότερα δύο περιπτώσεις των τελευταίων χρόνων (Norman Atlantic και Sorrento), ώστε να μπορεί να αποτιμηθεί καλύτερα η κατάσταση που επικράτησε (προέλευση και εξάπλωση πυρκαγιάς, ταχύτητες ενεργοποίησης συστημάτων και ανθρώπινα λάθη). Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις, σχολιάζονται και συγκρίνονται, οδηγώντας, έτσι, στα εξής βασικά συμπεράσματα:

- Οι αποστάσεις μεταξύ των οχημάτων είναι σημαντική παράμετρος για την διάδοση.
- Η στρατηγική τοποθέτηση των οχημάτων (κοντά σε ανοίγματα) μπορεί να αποτρέψει μια πυρκαγιά μεγάλης κλίμακας.
- Οι χώροι με ανοίγματα παρουσιάζουν μεγαλύτερη επικινδυνότητα όσον αφορά την τελική κατάληξη της φωτιάς, σε σχέση με τους κλειστούς χώρους.
- Ο άνεμος και η κατεύθυνση του, σε συνδυασμό με τον προσανατολισμό των ανοιγμάτων, μπορούν να καταστήσουν μια πυρκαγιά ανεξέλεγκτη.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η κατανόηση των παραμέτρων που επηρεάζουν και οδηγούν σε πυρκαγιές σε καταστρώματα οχημάτων και συνολικά η εδραίωση μιας συνείδησης πυρασφάλειας, ώστε μελλοντικά να αποτραπούν ανθρώπινες απώλειες, οικονομικές και οικολογικές καταστροφές.

## Abstract

In the present thesis, the effect of fire on a vehicle deck of a Ro-Ro ship is studied, by performing a number of computational simulations examining different parameters, namely the layout of the vehicles on the deck, the layout of the space itself and the effect of the wind. Initially, the basic principles of heat transfer are presented, in order to understand the spread of a fire and the importance of oxygen is emphasized, as a prerequisite for its development. Next, an overview of current regulations and the changes that have been made, in the past years due to recent accidents, is listed. Following, a statistical record, of these accidents, related to the sources of ignition, the type of ships and their spaces and the detection and extinguishing systems is presented. Two cases from recent years (Norman Atlantic and Sorrento) are described in more detail so that the prevailing situation can be better assessed (origin and spread of fire, system activation speeds and human error). Finally, the results obtained from the simulations are presented, commented on and compared, thus leading to the following main conclusions:

- Distances between vehicles are an important parameter for propagation.
- Strategic placement of vehicles (near openings) can prevent a large-scale fire.
- Areas with openings are more dangerous in terms of the final result of the fire, compared to closed spaces.
- The wind and its direction, combined with the orientation of the openings, can make a fire uncontrollable.

The aim of this thesis is the understanding of the parameters that affect and lead to fires on vehicle decks and overall the consolidation of a fire safety awareness, in order to prevent human losses, economic and ecological disasters in the future.

## Περιεχόμενα

Λίστα με Διαγράμματα .....	7
Λίστα με Πίνακες .....	8
1 Εισαγωγή.....	9
1.1 Άλλα άρθρα και μελέτες .....	9
1.2 Στόχοι μελέτης και κεφάλαια.....	11
1.3 Τύποι πλοίου που θα εξεταστούν.....	12
2 Χαρακτηριστικά πυρκαγιών .....	13
2.1 Μετάδοση θερμότητας και στάδια πυρκαγιάς .....	13
2.2 Ρυθμός ανάπτυξης πυρκαγιάς.....	17
2.3 Επίδραση του εξαερισμού στην εξέλιξη πυρκαγιάς.....	19
2.4 Φορτίο πυρκαγιάς.....	21
3 Κανονισμοί και απαιτήσεις.....	22
3.1 Πηγές.....	22
3.2 Ορισμοί.....	23
3.3 Απαιτήσεις συστημάτων ανίχνευσης και συναγερμού .....	26
3.3.1 Είδη συστημάτων.....	26
3.3.2 Απόδοση .....	27
3.3.3 Διαρρύθμιση συστήματος .....	28
3.3.4 Ανιχνευτές πυρκαγιάς.....	31
3.3.5 Ηλεκτρική διάταξη .....	32
3.3.6 Πηγές τροφοδοτήσεως.....	33
3.4 Περιορισμός πυρκαγιάς.....	34
3.4.1 Έννοια της οριζόντιας ζώνης.....	34
3.4.2 Μόνωση έναντι πυρκαγιάς.....	35
3.4.3 Απαιτήσεις θυρών .....	36
3.4.4 Σύστημα εξαερισμού .....	36
3.5 Συστήματα κατάσβεσης.....	37
3.6 Εκκένωση.....	40
4 Μελέτη πρόσφατων ατυχημάτων .....	42

4.1	Στατιστικά.....	42
4.1.1	Γενικά .....	42
4.1.2	RoPax vessels .....	43
4.1.3	Cargo Ro-Ro vessels .....	45
4.1.4	Vehicle carriers .....	46
4.1.5	Πηγές ανάφλεξης και χώροι εκκίνησης πυρκαγιάς.....	47
4.1.6	Απόδοση συστημάτων ανίχνευσης και κατάσβεσης .....	49
4.2	Η περίπτωση του Norman Atlantic .....	53
4.2.1	Γενικά .....	53
4.2.2	Συμβάντα .....	53
4.2.3	Η Πυρκαγιά (Λάθη - Έναρξη – Εξάπλωση – Αντιμετώπιση) .....	56
4.3	Η περίπτωση του Sorrento.....	62
4.3.1	Γενικά .....	62
4.3.2	Συμβάντα .....	62
4.3.3	Η Πυρκαγιά (Λάθη - Έναρξη – Εξάπλωση – Αντιμετώπιση) .....	64
5	Αριθμητικές προσομοιώσεις πυρκαγιάς .....	67
5.1	FDS.....	67
5.2	PyroSim.....	68
5.3	Το Μοντέλο .....	73
5.3.1	Γεωμετρία καταστρώματος .....	73
5.3.2	Φορτηγά (γεωμετρία και HRR) .....	74
5.3.3	Επιλογή πλέγματος .....	77
5.4	Υπολογιστικά Πειράματα .....	78
5.4.1	1ο Πείραμα .....	79
5.4.2	2ο Πείραμα .....	80
5.4.3	3ο Πείραμα .....	82
5.4.4	4ο Πείραμα .....	84
5.4.5	5ο Πείραμα .....	86
5.4.6	6ο Πείραμα .....	88

5.4.7	7ο Πείραμα .....	91
5.4.8	8ο Πείραμα .....	94
5.4.9	9ο Πείραμα .....	97
5.4.10	10ο Πείραμα .....	101
6	Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις .....	103
6.1	Διαρρύθμιση οχημάτων στο χώρο.....	104
6.2	Διαρρύθμιση χώρου.....	104
6.3	Άνεμος.....	105
6.4	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	106
	Βιβλιογραφία .....	107

## Λίστα με Διαγράμματα

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 1: Η ΠΟΡΕΙΑ ΜΙΑΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ ΠΟΥ ΕΚΦΡΑΖΕΤΑΙ ΩΣ ΡΥΘΜΟΣ ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΟΝ ΧΡΟΝΟ [DRYSDALE, 2011] .....	16
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 2: ΜΟΡΦΗ ΤΥΠΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΡΥΘΜΟΥ ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ [MINISTRY OF INFRASTRUCTURE AND TRANSPORT ON NORMAN ATLANTIC] .....	17
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3: ΑΡΓΗ , ΜΕΣΗ, ΓΡΗΓΟΡΗ ΚΑΙ ΠΟΛΥ ΓΡΗΓΟΡΗ T-SQUARED ΠΥΡΚΑΓΙΑ ΣΥΓΚΡΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕ ΕΝΑΝ ΑΡΙΘΜΟ ΑΠΟ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΥ ΚΑΙ ΜΙΑ ΚΑΜΠΥΛΗ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ [YUGUANG LI, 2004] .....	18
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4: ΡΥΘΜΟΣ ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΩΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΕΞΑΕΡΙΣΜΟΥ [EMSA, 2016] .....	20
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5: ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΑΝΕΞΕΛΕΓΚΤΗΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΩΝ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΕΞΑΕΡΙΣΜΟΥ [EMSA, 2016] .....	21
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6: ΔΙΑΡΡΥΘΜΙΣΗ ΑΠΟΣΤΑΣΕΩΝ ΑΝΙΧΝΕΥΤΩΝ [EMSA, 2018] .....	29
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7: ΡΥΘΜΟΣ ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΦΟΡΤΗΓΟ [BREUILLARD, A. ET AL., 2012] .....	75
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 8: ΧΡΟΝΙΚΗ ΙΣΤΟΡΙΑ HRR ΓΙΑ ΤΟ 1Ο ΠΕΙΡΑΜΑ ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΕ .....	79
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9: ΧΡΟΝΙΚΗ ΙΣΤΟΡΙΑ HRR ΓΙΑ ΤΟ 2 <sup>ο</sup> ΠΕΙΡΑΜΑ .....	80
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 10: ΧΡΟΝΙΚΗ ΙΣΤΟΡΙΑ HRR ΓΙΑ ΤΟ 3 <sup>ο</sup> ΠΕΙΡΑΜΑ .....	82
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 11: ΧΡΟΝΙΚΗ ΙΣΤΟΡΙΑ HRR ΓΙΑ ΤΟ 4 <sup>ο</sup> ΠΕΙΡΑΜΑ .....	84
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 12: ΧΡΟΝΙΚΗ ΙΣΤΟΡΙΑ HRR ΓΙΑ ΤΟ 5 <sup>ο</sup> ΠΕΙΡΑΜΑ .....	86
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 13: ΧΡΟΝΙΚΗ ΙΣΤΟΡΙΑ HRR ΓΙΑ ΤΟ 6 <sup>ο</sup> ΠΕΙΡΑΜΑ .....	88
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 14: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΙΣΤΟΡΙΑΣ HRR ΓΙΑ ΤΟ 4 <sup>ο</sup> , 5 <sup>ο</sup> ΚΑΙ 6 <sup>ο</sup> ΠΕΙΡΑΜΑ .....	90
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 15: ΧΡΟΝΙΚΗ ΙΣΤΟΡΙΑ HRR ΓΙΑ ΤΟ 7 <sup>ο</sup> ΠΕΙΡΑΜΑ .....	91
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 16: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΙΣΤΟΡΙΑΣ HRR ΓΙΑ ΤΟ 5 <sup>ο</sup> ΚΑΙ 7 <sup>ο</sup> ΠΕΙΡΑΜΑ .....	93
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 17: ΧΡΟΝΙΚΗ ΙΣΤΟΡΙΑ HRR ΓΙΑ ΤΟ 8 <sup>ο</sup> ΠΕΙΡΑΜΑ .....	94
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 18: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΙΣΤΟΡΙΑΣ HRR ΓΙΑ ΤΟ 7Ο ΚΑΙ 8Ο ΠΕΙΡΑΜΑ .....	95
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 19: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΙΣΤΟΡΙΑΣ HRR ΓΙΑ ΤΟ 6Ο ΚΑΙ 8Ο ΠΕΙΡΑΜΑ .....	96
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 20: ΧΡΟΝΙΚΗ ΙΣΤΟΡΙΑ HRR ΓΙΑ ΤΟ 9 <sup>ο</sup> ΠΕΙΡΑΜΑ .....	97
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 21: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΙΣΤΟΡΙΑΣ HRR ΓΙΑ ΤΟ 6 <sup>ο</sup> , 8 <sup>ο</sup> ΚΑΙ 9 <sup>ο</sup> ΠΕΙΡΑΜΑ .....	100
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 22: ΧΡΟΝΙΚΗ ΙΣΤΟΡΙΑ HRR ΓΙΑ ΤΟ 10 <sup>ο</sup> ΠΕΙΡΑΜΑ .....	101
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 23: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΙΣΤΟΡΙΑΣ HRR ΓΙΑ ΤΟ 6 <sup>ο</sup> , 8 <sup>ο</sup> ΚΑΙ 10 <sup>ο</sup> ΠΕΙΡΑΜΑ .....	102



## Λίστα με Πίνακες

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: ΤΙΜΕΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ (kW/M <sup>2</sup> ) [DRYSDALE, 2011] .....	13
ΠΙΝΑΚΑΣ 2: ΤΙΜΕΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΓΙΑ ΤΑ ΣΤΑΔΙΑ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ [DRYSDALE, 2011].....	14
ΠΙΝΑΚΑΣ 3: ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΑΛΛΑΓΩΝ ΣΤΟΥΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΥΣ .....	22
ΠΙΝΑΚΑΣ 4: ΑΠΟΣΤΑΣΕΙΣ ΑΝΙΧΝΕΥΤΩΝ [FSS Ch. 9 TABLE 9.1] .....	28
ΠΙΝΑΚΑΣ 5: ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ [EMSA, 2018].....	30
ΠΙΝΑΚΑΣ 6: ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΝΕΡΟΥ ΠΑΡΟΧΗΣ ΚΑΙ ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΚΑΛΥΨΗΣ ΓΙΑ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑ ΥΨΟΥΣ 2,5Μ ΚΑΙ ΚΑΤΩ [MSC.1/CIRC.1430, 2018] .....	38
ΠΙΝΑΚΑΣ 7: ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΝΕΡΟΥ ΠΑΡΟΧΗΣ ΚΑΙ ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΚΑΛΥΨΗΣ ΓΙΑ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑ ΥΨΟΥΣ ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΟΥ ΑΠΟ 2,5Μ ΚΑΙ ΜΙΚΡΟΤΕΡΟΥ ΑΠΟ 6,5Μ [MSC.1/CIRC.1430, 2018] .....	38
ΠΙΝΑΚΑΣ 8: ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΝΕΡΟΥ ΠΑΡΟΧΗΣ ΚΑΙ ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΚΑΛΥΨΗΣ ΓΙΑ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑ ΥΨΟΥΣ ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΟΥ ΑΠΟ 6,5Μ ΚΑΙ ΜΙΚΡΟΤΕΡΟΥ ΑΠΟ 9Μ [MSC.1/CIRC.1430, 2018] .	38
ΠΙΝΑΚΑΣ 9: ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΣΕ ROΡΑΧ [DNV GL, 2016].....	44
ΠΙΝΑΚΑΣ 10: ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΣΕ ΠΛΟΙΑ ΓΕΝΙΚΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ RO-RO [DNV GL, 2016].....	46
ΠΙΝΑΚΑΣ 11: ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΣΕ VESSEL CARRIERS [DNV GL, 2016].....	47
ΠΙΝΑΚΑΣ 12: ΠΗΓΕΣ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ DNV GL [DNV GL, 2016] .....	48
ΠΙΝΑΚΑΣ 13: ΧΡΟΝΟΣ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ [DNV GL, 2016].....	50
ΠΙΝΑΚΑΣ 14: ΧΡΟΝΟΣ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ DELUGE ΚΑΙ ΑΝΑΛΟΓΕΣ ΖΗΜΙΕΣ [DNV GL, 2016] .....	51
ΠΙΝΑΚΑΣ 15: ΧΡΟΝΟΣ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ CO <sub>2</sub> ΚΑΙ ΑΝΑΛΟΓΕΣ ΖΗΜΙΕΣ [DNV GL, 2016] .....	52
ΠΙΝΑΚΑΣ 16: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ .....	78
ΠΙΝΑΚΑΣ 17: ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΒΑΣΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ .....	103

## 1 Εισαγωγή

Παρά τις σημαντικές τεχνολογικές εξελίξεις που έχουν επηρεάσει την βιομηχανία της ναυτιλίας, υπάρχουν ακόμα πολυάριθμα προβλήματα και αδυναμίες που χρήζουν αντιμετώπισης, στην προσπάθεια για ποιοτικότερη και ασφαλέστερη μετακίνηση. Ανάμεσα σε αυτά, οι πυρκαγιές παραμένουν ως ένας από τους κυριότερους κινδύνους για την ασφάλεια των πλοίων.

Τις τελευταίες δεκαετίες, ανθρώπινες ζωές χάνονται κάθε χρόνο και προκαλούνται ζημιές εκατομμυρίων ευρώ, λόγω πυρκαγιών σε επιβατηγά/οχηματαγωγά πλοία. Αυτοκίνητα, τροχόσπιτα, φορτηγά και τρέιλερ τοποθετούνται σε πολύ κοντινές αποστάσεις για οικονομία χώρου και μεταφέρουν ένα ευρύ φάσμα φορτίων που, μόνα τους ή συγκεντρωτικά, μπορούν να αναφλεγούν με καταστροφικές συνέπειες, όχι μόνο για το πλοίο και το φορτίο του, αλλά και για το περιβάλλον.

Επομένως, ακολουθώντας την τάση για μεγαλύτερα και ασφαλέστερα πλοία, η πυρασφάλεια αποτελεί μία από τις κύριες προτεραιότητες στην σχεδίαση και στην λειτουργία των πλοίων, ιδιαίτερα των επιβατηγών. Σημειώνεται, παρά το γεγονός ότι πυρκαγιές σε χώρους μηχανοστασίου αποτελούν εξίσου σημαντικό κίνδυνο, στην εργασία αυτή αναφερόμαστε αποκλειστικά σε πυρκαγιές σε καταστρώματα οχημάτων (θα αναφέρονται ως χώροι ro-ro).

### 1.1 Άλλα άρθρα και μελέτες

Λόγω της εκτεταμένης συζήτησης για το θέμα των πυρκαγιών σε χώρους ro-ro υπάρχει μια εκτενής λίστα αναφορών και μελετών που έχουν δημοσιευθεί. Αυτή η λίστα καλύπτει θέματα, όπως ανάλυση και αναγνώριση πηγών ανάφλεξης, μελέτη των ισχυόντων κανονισμών, ανάλυση των συστημάτων κατάσβεσης, στατιστικές μελέτες των πρόσφατων ατυχημάτων, προτάσεις και ιδέες για την μείωση της εμφάνισης πυρκαγιών και για την καλύτερη αντιμετώπισή τους αλλά και προσομοιώσεις σε υπολογιστικό κώδικα ρευστομηχανικής (Fire Dynamic Simulator – FDS) για την μελέτη των παραμέτρων που επηρεάζουν την διάδοση της φωτιάς. Παρακάτω παρατίθενται ορισμένα συμπεράσματα και παρατηρήσεις από τέτοιες μελέτες.

Το IMO Correspondence Group on Casualty Analysis [Flag State Implementation 21/5, 2012] πραγματοποίησε μια μελέτη για τον αριθμό των πυρκαγιών σε καταστρώματα οχημάτων είτε σε ro-ro επιβατηγά (RoPax) είτε σε ro-ro γενικού φορτίου που έλαβαν χώρα την περίοδο 1994-2011. Η αναφορά που δημοσιεύθηκε το 2013 σημειώνει:

- «Παρατηρείται αριθμός σημαντικών περιστατικών που σχετίζονται με πυρκαγιά σε καταστρώματα οχημάτων από το 1994 και δεν υπάρχουν σημάδια μείωσης

αυτών. Από το 2002 και έπειτα παρατηρείται ένα πολύ σοβαρό περιστατικό κάθε δεύτερο χρόνο, καταλήγοντας έτσι σε 6 συνολικές απώλειες»

- «Ένας σημαντικός αριθμός ατυχημάτων προέκυψε ως αποτέλεσμα πυρκαγιών εξαιτίας ηλεκτρικού σφάλματος, ιδιαίτερα σχετιζόμενος με ψυγεία-τρέιλερ, αλλά σε περιπτώσεις αποδίδεται και στον ίδιο εξοπλισμό του πλοίου»
- «Πολλά από τα ευρήματα των ερευνών που πραγματοποιήθηκαν για τις απώλειες καταγράφουν επανειλημμένα γνωστά προβλήματα, επί παραδείγματι την ανάγκη χρήσης συστημάτων κατάσβεσης στην αρχική φάση της φωτιάς, προβλήματα σχετιζόμενα με τη συσσώρευση νερού σε καταστρώματα οχημάτων, δομική ακεραιότητα κατασκευής σε περίπτωση πυρκαγιάς και περιορισμό πυρκαγιάς»

Στη μελέτη για τη διερεύνηση αποτελεσματικών μέτρων για τη μείωση του κινδύνου πυρκαγιών (FIRESAFE) [EMSA, 2016], τα ηλεκτρικά σφάλματα και τα προβλήματα στα συστήματα κατάσβεσης αναγνωρίζονται ως οι δυο κυριότεροι παράγοντες για την εμφάνισή τους. Ο στόλος που εξετάζεται αποτελείται από 490 πλοία, που πληρούν συγκεκριμένα κριτήρια όσον αφορά τον τύπο του πλοίου, την περιοχή δράσης του, το μέγεθός του και την ημερομηνία κτίσης του. Μετά από στατιστική μελέτη, τα κυριότερα συμπεράσματα που εξάγονται είναι:

- Περίπου το 30% των πυρκαγιών σε RoPax πλοία ξεκινά από καταστρώματα οχημάτων και το 60% αυτών οφείλεται σε ηλεκτρικά σφάλματα
- Η εκπαίδευση του πληρώματος αποτελεί την πιο οικονομικά αποδοτική επιλογή ελέγχου κινδύνου
- Τα ανθεκτικά κουτιά για τις διασυνδέσεις καλωδίων παρουσιάζουν την μεγαλύτερη μείωση επικινδυνότητας όσον αφορά τα ηλεκτρικά σφάλματα
- Η γρήγορη αντίδραση στην φωτιά αποτελεί τον πιο σημαντικό τρόπο προφύλαξης
- Το τελικό αποτέλεσμα εξαρτάται και από άλλους παράγοντες, όπως η ανίχνευση

Σε μελέτη που πραγματοποιήθηκε για την ασφάλεια έναντι πυρκαγιάς (FIREPROOF) [Breuillard, A. et al., 2012], διεξήχθησαν υπολογιστικές προσομοιώσεις πυρκαγιάς που ξεκινά σε κατάστρωμα οχημάτων και μελετά την εξέλιξη της αλλά και την ταχύτητα εκκένωσης του πλοίου. Εξετάζεται φωτιά που προέρχεται από αυτοκίνητο με το μέγιστο φορτίο πυρκαγιάς να φτάνει τα 3.5MW και φωτιά που προέρχεται από φορτηγό με το μέγιστο φορτίο πυρκαγιάς να φτάνει τα 35MW. Τα κύρια συμπεράσματα συνοψίζονται παρακάτω:

- Η πυρκαγιά που ξεκινά από φορτηγό οδηγεί σε περισσότερες απώλειες από ότι η αντίστοιχη που ξεκινά από αυτοκίνητο. Αυτό αποδίδεται στην μεγαλύτερη έκθεση των ανθρώπων σε καπνό και σε υψηλές θερμοκρασίες, καθώς ο χρόνος συνειδητοποίησης της φωτιάς διαφέρει ανάμεσα στις δυο περιπτώσεις.
- Η πυρκαγιά που ξεκινά από αυτοκίνητο δεν θεωρείται καταστροφική όταν ο χρόνος ανίχνευσης είναι κάτω από 9 λεπτά. Για την περίπτωση του φορτηγού ο χρόνος αυτός μειώνεται πολύ και η ανίχνευση θα πρέπει να γίνει σε 1-2 λεπτά για να αποφευχθούν οι απώλειες.
- Η γρήγορη παρουσία υψηλών θερμοκρασιών είναι ο κύριος λόγος που επιφέρει ανθρώπινες απώλειες για την περίπτωση του φορτηγού.

## 1.2 Στόχοι μελέτης και κεφάλαια

Κρίνεται αναγκαία η αναγνώριση του προβλήματος των πυρκαγιών σε χώρους ro-ro και η μελέτη για την αντιμετώπισή του. Αντικείμενο, λοιπόν, της παρούσας εργασίας αποτελεί η εξέταση των αιτιών που οδηγούν σε αυτές τις καταστροφές και η ανάλυση του προβλήματος, η συνοπτική παρουσίαση των κανονισμών καθώς και των αλλαγών που προέκυψαν σε αυτούς τα τελευταία χρόνια και η μελέτη των στατιστικών των πρόσφατων ατυχημάτων που οδηγεί σε χρήσιμα συμπεράσματα.

Για την παραπάνω ανάλυση και για την πρακτική κατανόηση των παραμέτρων που επηρεάζουν την εξέλιξη της πυρκαγιάς, θα πραγματοποιηθούν υπολογιστικές προσομοιώσεις με το πρόγραμμα FDS, από τις οποίες προκύπτουν σημαντικές παρατηρήσεις. Στο σύνολο η μελέτη, μέσω της κατανόησης των κύριων πλευρών του προβλήματος, αποσκοπεί στην εγκαθίδρυση μια συνείδησης πυρασφάλειας, που μπορεί να οδηγήσει στη μείωση της εμφάνισης τέτοιων ατυχημάτων και στην υιοθέτηση καινούριων απαιτήσεων και κανονισμών από διεθνείς οργανισμούς (ΙΜΟ, Νηογνώμονες, Σημαίες).

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές αρχές της μετάδοσης θερμότητας και τα μεγέθη που μας βοηθούν να ποσοτικοποιήσουμε την ένταση μιας πυρκαγιάς. Ορίζεται ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας (Heat Release Rate – HRR), μέγεθος το οποίο χρησιμοποιείται στις προσομοιώσεις για την σύγκριση των διαφόρων περιπτώσεων. Μελετάται η επίδραση του μηχανικού ή φυσικού εξαερισμού, ανάλογα με τον τύπο του καταστρώματος, στην εξάπλωση της φωτιάς και, τέλος, γίνεται αναφορά στο φορτίο της πυρκαγιάς. Παράλληλα, παρατίθενται διαγράμματα από άλλες μελέτες για την καλύτερη κατανόηση των παραπάνω.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι ισχύοντες κανονισμοί που αφορούν την πυρασφάλεια στα επιβατηγά/οχηματαγωγά πλοία. Το μεγαλύτερο μέρος των

απαιτήσεων προκύπτει από το Safety of Life at Sea (SOLAS) Chapter II-2 Construction - Fire protection, fire detection and fire extinction και Fire Safety System (FSS) Code. Δίνεται βάση κυρίως στις απαιτήσεις για συστήματα ανίχνευσης και συναγερμού, στον περιορισμό της πυρκαγιάς, στα συστήματα κατάσβεσης και στην εκκένωση.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται η μελέτη των πρόσφατων ατυχημάτων. Παρουσιάζονται τα στατιστικά για τις περιπτώσεις πυρκαγιών που έχουν καταγραφεί τα τελευταία χρόνια, σε ό,τι αφορά τους τύπους πλοίων, τις πηγές ανάφλεξης, τους χώρους εκκίνησης της πυρκαγιάς και τα συστήματα ανίχνευσης και κατάσβεσης. Στο τέλος του κεφαλαίου, αναλύονται με περισσότερη λεπτομέρεια δύο από τα πιο πρόσφατα και εκτενώς καταγεγραμμένα ατυχήματα, οι περιπτώσεις του Norman Atlantic και του Sorrento.

Το πέμπτο κεφάλαιο εμπεριέχει τις υπολογιστικές προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν για τη μελέτη των παραμέτρων που επιδρούν στην διάδοση και την τελική έκταση μιας φωτιάς σε χώρο ro-ro. Παρουσιάζεται συνοπτικά το πρόγραμμα και το γραφικό του περιβάλλον (PyroSim), μέσω του οποίου υλοποιείται ο κώδικας του FDS. Στη συνέχεια, παρατίθενται μία-μία οι περιπτώσεις, όπου ταυτόχρονα σχολιάζονται και γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων. Τέλος, μέσω αυτής της σύγκρισης, οδηγούμαστε σε παρατηρήσεις και συμπεράσματα για τις παραμέτρους που εξετάστηκαν.

### **1.3 Τύποι πλοίου που θα εξεταστούν**

Η εργασία αναφέρεται σε πλοία τύπου ro-ro, οπότε θεωρήθηκε αναγκαίο να περιγραφούν συνοπτικά. Ro-Ro (Roll on/Roll off) είναι τα πλοία που χρησιμοποιούνται για να μεταφέρουν φορτίο που κινείται με τροχούς. Τα ro-ro πλοία ορίστηκαν το Νοέμβριο του 1995 κατά τις τροποποιήσεις του Chapter II-1 of the International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS), 1974, ως «επιβατηγά πλοία με χώρους φορτίου ro-ro ή ειδικής κατηγορίας χώρους». Χαρακτηριστικό τους είναι ότι τα οχήματα εισέρχονται και εξέρχονται από ενσωματωμένες ράμπες, οι οποίες συνηθίζεται να βρίσκονται είτε στο πίσω μέρος είτε στην πλευρά, αλλά μπορεί να είναι και στο μπροστινό μέρος του πλοίου. Η παραγωγή τους ξεκίνησε κατά τον 19<sup>ο</sup> αιώνα για την μεταφορά τρένων. Υπάρχουν διάφορες υποκατηγορίες, όπως τα ferries, τα κρουαζιερόπλοια, τα πλοία φορτίου και οι φορτηγίδες. Τα πλοία που χρησιμοποιούνται για την αποκλειστική μεταφορά αυτοκινήτων και φορτηγών είναι γνωστά ως Pure Car Carriers (PCC) και Pure Car & Truck Carriers (PCTC). Τα Ro-Pax (roll on/roll off a passenger) είναι ro-ro πλοία που μεταφέρουν οχήματα, αλλά έχουν και χώρους διαμονής και εστίασης για επιβάτες. Αυτά που έχουν εγκαταστάσεις που προορίζονται για περισσότερους από 500 επιβάτες συνήθως αναφέρονται ως κρουαζιερόπλοια.

## 2 Χαρακτηριστικά πυρκαγιών

### 2.1 Μετάδοση θερμότητας και στάδια πυρκαγιάς

Θεωρείται χρήσιμο να παρουσιαστούν οι βασικές αρχές της μετάδοσης θερμότητας για την καλύτερη κατανόηση της εξάπλωσης πυρκαγιάς σε καταστώματα και ίσως σε ολόκληρο το πλοίο. Με αυτόν τον τρόπο η φωτιά μεταφέρεται από τον χώρο προέλευσης της σε χώρους με διαθέσιμο καύσιμο.

Η μεταφορά θερμότητας γίνεται με τρεις τρόπους:

- αγωγιμότητα, που συμβαίνει μέσω της μετάδοσης μοριακών δονήσεων, κυρίως μεταξύ στερεών αντικειμένων με άμεση επαφή. Ο ρυθμός μεταφοράς εξαρτάται από παράγοντες όπως η θερμική αγωγιμότητα του υλικού και η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των γειτονικών αντικειμένων
- μεταφορά, όπου η θερμότητα μεταφέρεται από την κίνηση ρευστών. Τα θερμά αέρια τείνουν να ανέβουν και μεταφέρουν θερμότητα προς τους τοίχους και την οροφή. Είναι ένας από τους πρωταρχικούς τρόπους εξάπλωσης πυρκαγιάς
- ακτινοβολία, όπου είναι η μεταφορά θερμότητας μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από ένα αντικείμενο σε ένα άλλο. Κάθε αντικείμενο που είναι θερμότερο από το απόλυτο μηδέν εκπέμπει ακτινοβολία θερμότητας. Η ακτινοβολία διατηρεί την καύση, καθώς μέρος της ενέργειας που απελευθερώνεται από την ακτινοβολία «βλέπει» το καύσιμο και συμβάλλει στην πυρόλυσή του

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της θερμικής ακτινοβολίας με κάποιες τιμές αναφοράς.

<b>Radiant heat flux (kW/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Observed effect</b>
<b>0.67</b>	Summer sunshine in UK
<b>1</b>	Maximum for indefinite skin exposure
<b>6.4</b>	Pain after 8 s skin exposure
<b>10.4</b>	Pain after 3 s exposure
<b>12.5</b>	Volatiles from wood may be ignited by pilot after prolonged exposure
<b>16</b>	Blistering of skin after 5 s
<b>29</b>	Wood ignites spontaneously after prolonged exposure
<b>52</b>	Fibreboard ignites spontaneously in 5 s

Πίνακας 1: Τιμές αναφοράς θερμικής ακτινοβολίας (kW/m<sup>2</sup>) [Drysdale, 2011]

Το επίπεδο ακτινοβολίας που συνήθως απαιτείται για την ανάφλεξη στερεών είναι  $10 \text{ kW/m}^2$  που αντιστοιχεί σε ένα στρώμα θερμών καπνών σε θερμοκρασία περίπου  $400^\circ\text{C}$ . Το σημείο flashover, δηλαδή η έναρξη της γενικευμένης πυρκαγιάς, συμβαίνει όταν το στρώμα των θερμών αερίων ακτινοβολεί περίπου  $20 \text{ kW/m}^2$  ( $\sim 600^\circ\text{C}$ ).

Οι τιμές της θερμικής ακτινοβολίας, κατά την διάρκεια των βημάτων της ανάπτυξης πυρκαγιάς παρουσιάζονται στον.

Fire step	Thermal radiation ( $\text{kW/m}^2$ )
Ignition	10
Flashover	20-40
Fully developed fire	50
Serious fire	100

Πίνακας 2: Τιμές θερμικής ακτινοβολίας για τα στάδια πυρκαγιάς [Drysedale, 2011]

Στο πλαίσιο μιας πυρκαγιάς σε περιορισμένο χώρο, ακόμα και όταν δεν υπάρχουν φλόγες, το στρώμα θερμών αερίων ακτινοβολεί θερμότητα στον όγκο του διαμερίσματος. Αυτό οδηγεί σε προοδευτική αύξηση της θερμοκρασίας των αντικειμένων στο διαμέρισμα και όταν το στρώμα φτάσει τη θερμοκρασία περίπου  $600^\circ\text{C}$ , παράγει ακτινοβολία με ισχύ περίπου  $20 \text{ kW/m}^2$ . Με αυτές τις θερμοκρασίες, εμφανίζεται ένα ταυτόχρονο φαινόμενο ανάφλεξης, δηλαδή το flashover (ή γενικευμένη φωτιά). Αυτή είναι η φάση μετάβασης από μια φωτιά που περιλαμβάνει μερικά μεμονωμένα εύφλεκτα αντικείμενα σε μια φωτιά που περιλαμβάνει όλα τα πιθανά εύφλεκτα υλικά σε ένα συγκεκριμένο διαμέρισμα. Το σημείο flashover αναπαριστά επίσης τη μετάβαση από φωτιά ελεγχόμενη από καύσιμα σε φωτιά ελεγχόμενη από εξαερισμό.

Πράγματι, η ποσότητα των υλικών που καίγονται αυξάνεται έντονα, με συνέπεια να αυξάνεται και η παραγωγή καπνού και θερμών αερίων. Καθώς ο εξαερισμός των χώρων διασφαλίζεται από τα ανοίγματα, αν πρόκειται για ανοιχτό χώρο ή κλειστό με μικρά ανοίγματα, η διαθέσιμη περιοχή για την είσοδο αέρα μειώνεται, επειδή τα ανοίγματα εμποδίζονται περισσότερο από τον καπνό που τείνει να βγει προς τα έξω. Με αυτόν τον τρόπο, η διαθέσιμη ποσότητα καθαρού αέρα για την καύση μειώνεται και τα άκαυτα αέρια πυρόλυσης εξέρχονται από το διαμέρισμα μαζί με καπνούς. Όταν είναι κοντά στα ανοίγματα, βρίσκουν αρκετό οξυγόνο για να καούν και να προκαλέσουν τις συνήθεις φλόγες που βγαίνουν από τα παράθυρα, όπως συμβαίνει όταν η πυρκαγιά βρίσκεται στο γενικευμένο της στάδιο.

Η διάδοση της φωτιάς είναι δυνατή εάν η θερμική ροή ενός αντικειμένου αναφλέξει άλλα υλικά και συνεπώς διατηρήσει τη φυσική εξέλιξη της πυρκαγιάς. Η θερμοκρασία

ενός υλικού που βρίσκεται εντός μιας θερμική ροής αυξάνεται και μόλις επιτευχθεί η θερμοκρασία αυτανάφλεξης, ενεργοποιείται η αντίδραση οξείδωσης και απελευθερώνεται θερμότητα. Η ενέργεια που απαιτείται για την ανάφλεξη ποικίλλει ανάλογα με διάφορες παραμέτρους, ανάλογα με το είδος του καυσίμου και συγκεκριμένα:

- για στερεά καύσιμα, μέγεθος και υγρασία
- για υγρά καύσιμα, επιφάνεια και πτητικότητα
- για αέρια καύσιμα, συγκέντρωση

Ο χρόνος που χρειάζεται για την ανάφλεξη ενός υλικού υποκειμένου σε θερμική ροή εξαρτάται από την κρίσιμη ροή θερμότητας (critical heat flux – CHF), η οποία είναι συγκεκριμένη για κάθε υλικό. Με βάση αυτήν τα υλικά διαχωρίζονται σε:

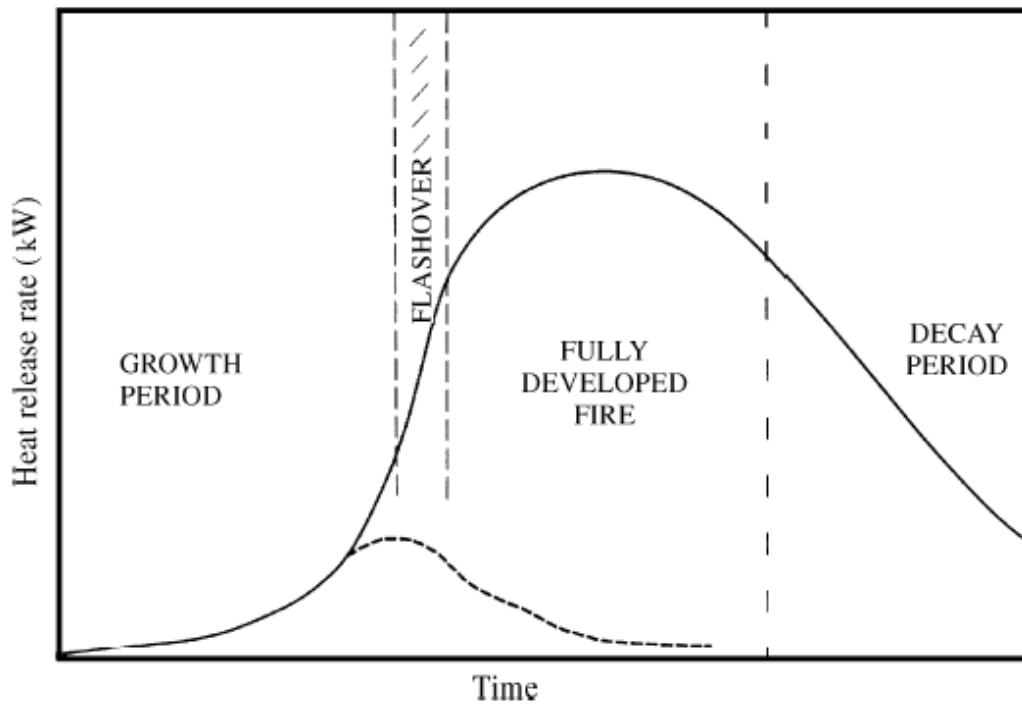
- εύφλεκτα υλικά, σε αυτή την κατηγορία ανήκουν οι κουρτίνες, τα χαλιά, οι εφημερίδες και μπορούν να καούν από θερμικές ροές των  $10 \text{ kW/m}^2$
- συμβατικά υλικά, σε αυτή την κατηγορία ανήκουν υλικά με χαμηλή θερμική αδράνεια όπου μπορούν να καούν από θερμικές ροές των  $20 \text{ kW/m}^2$
- όχι εύφλεκτα υλικά, σε αυτή την κατηγορία ανήκουν το ξύλο και τα θερμοσκληραινόμενα πλαστικά με πάχος μεγαλύτερο από  $1.2 \text{ cm}$  όπου μπορούν να καούν από θερμικές ροές των  $40 \text{ kW/m}^2$  και πάνω.

Συγκεντρωτικά η εξέλιξη μια πυρκαγιάς μπορεί να χωριστεί σε 3 στάδια:

- Το στάδιο ανάπτυξης ή pre-flashover stage, στο οποίο η μέση θερμοκρασία του διαμερίσματος είναι σχετικά χαμηλή και η φωτιά εντοπίζεται κοντά στον χώρο προέλευσής της.
- Η πλήρως ανεπτυγμένη πυρκαγιά ή post-flashover stage, κατά τη διάρκεια της οποίας όλα τα εύφλεκτα αντικείμενα στο διαμέρισμα εμπλέκονται και οι φλόγες φαίνεται να γεμίζουν ολόκληρο τον όγκο.
- Η πτωτική περίοδος ή decay period, που συχνά προσδιορίζεται ως το στάδιο της πυρκαγιάς όπου η μέση θερμοκρασία έχει μειωθεί στο 80% της μέγιστης αξίας της.

Στο Διάγραμμα 1 παρουσιάζεται μια ποιοτική απεικόνιση αυτών των σταδίων σε σχέση με το HRR.





Διάγραμμα 1: Η πορεία μιας πυρκαγιάς που εκφράζεται ως ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο [Drysdale, 2011]

Ενώ η μέση θερμοκρασία στο πρώτο στάδιο διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα, παρατηρούνται υψηλές τοπικές θερμοκρασίες γύρω από την ζώνη καύσης και η θερμοκρασία κάτω από το ταβάνι του διαμερίσματος αρχίζει να αυξάνεται. Κατά την περίοδο ανάπτυξης (growth period), η πυρκαγιά αυξάνεται σε μέγεθος, προς και πέρα από το σημείο στο οποίο η αλληλεπίδραση με τα όρια του διαμερίσματος καθίσταται σημαντική. Η μετάβαση στην πλήρως ανεπτυγμένη πυρκαγιά (fully developed fire) αναφέρεται ως flashover και περιλαμβάνει ταχεία εξάπλωση από την περιοχή της τοπικής καύσης σε όλες τις εύφλεκτες επιφάνειες εντός του δωματίου. Η μετάβαση είναι συνήθως μικρή σε σύγκριση με τη διάρκεια των κυρίων σταδίων της φωτιάς και μερικές φορές θεωρείται ότι είναι ένα καλά καθορισμένο φυσικό γεγονός, με τον ίδιο τρόπο που η ανάφλεξη θεωρείται ως ένα συγκεκριμένο γεγονός.

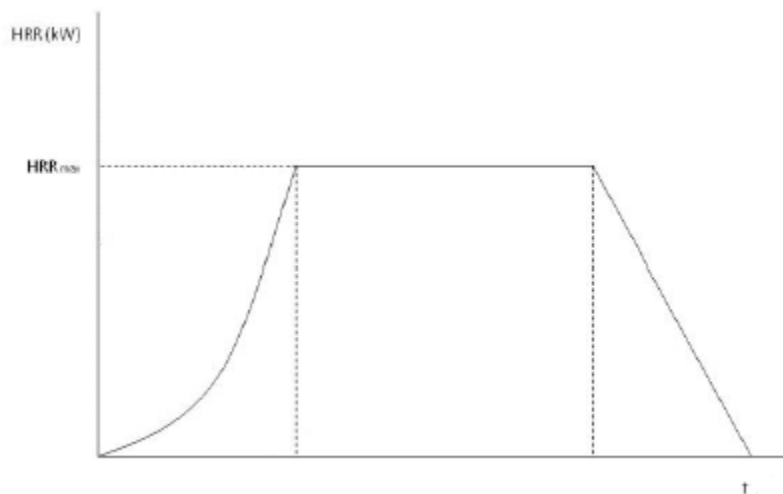
Κατά την περίοδο της πλήρους ανεπτυγμένης πυρκαγιάς, ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας φτάνει στο μέγιστο σημείο, οπότε και η απειλή για μετάδοση της πυρκαγιάς είναι σοβαρή. Φλόγες μπορεί να προκύψουν από οποιοδήποτε άνοιγμα του συστήματος εξαερισμού εξαπλώνοντας τη φωτιά στους υπόλοιπους χώρους. Εκτός από την προφανή απειλή για τους ανθρώπους και τα οχήματα που βρίσκονται εντός του συγκεκριμένου διαμερίσματος, κατά τη διάρκεια αυτού του σταδίου μπορεί να προκληθεί δομική βλάβη, που με τη σειρά της μπορεί να οδηγήσει σε ολική απώλεια.

Κατά τη διάρκεια της περιόδου ψύξης, ο ρυθμός καύσης μειώνεται καθώς το καύσιμο εξαντλείται από τα πτητικά του. Η πυρκαγιά τελικά θα σταματήσει, αφήνοντας πίσω της έναν αριθμό μικρών εστιών που θα συνεχίσουν να καίνε, αν και αργά, για κάποιο χρονικό διάστημα, διατηρώντας υψηλές τοπικές θερμοκρασίες.

## 2.2 Ρυθμός ανάπτυξης πυρκαγιάς

Ο αποτελεσματικότερος τρόπος για να αναπαρασταθεί μια πυρκαγιά είναι αυτός που βασίζεται στο ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας (Heat Release Rate), ο οποίος μετράει την ενέργεια που παρέχεται σε μια ροή θερμότητας από ένα συγκεκριμένο καύσιμο. Ο ρυθμός αυτός αναπαριστά την ενέργεια ανά μονάδα χρόνου και μετριέται σε Joule ανά second, δηλαδή Watt, ή πιο συχνά σε kW.

Το μέγεθος HRR, σε αντίθεση με την παραδοσιακή έννοια του φορτίου πυρκαγιάς (fire load), επιτρέπει την καλύτερη αναγνώριση της επικινδυνότητας ενός υλικού. Πράγματι, ενώ το φορτίο πυρκαγιάς αντιπροσωπεύει την πιθανή ενέργεια που μπορεί να απελευθερωθεί από το υλικό, το HRR αντιπροσωπεύει την ενέργεια που παράγεται πραγματικά (την περιοχή κάτω από την καμπύλη πυρκαγιάς) και την ταχύτητα με την οποία παράγεται με την πάροδο του χρόνου και παρέχει επίσης σημαντικές πληροφορίες για την μέγιστη ισχύ που μπορεί να παράγει το υλικό. Έτσι, εάν δύο υλικά αναπτύξουν την ίδια ποσότητα ενέργειας (ίδια περιοχή κάτω από την καμπύλη πυρκαγιάς) αλλά παρουσιάζουν την κορυφή ισχύος σε διαφορετικούς χρόνους, το υλικό που παρουσιάζει την κορυφή νωρίτερα είναι το πιο επικίνδυνο.



Διάγραμμα 2: Μορφή τυπικής καμπύλης ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας [Ministry of Infrastructure and Transport on Norman Atlantic]

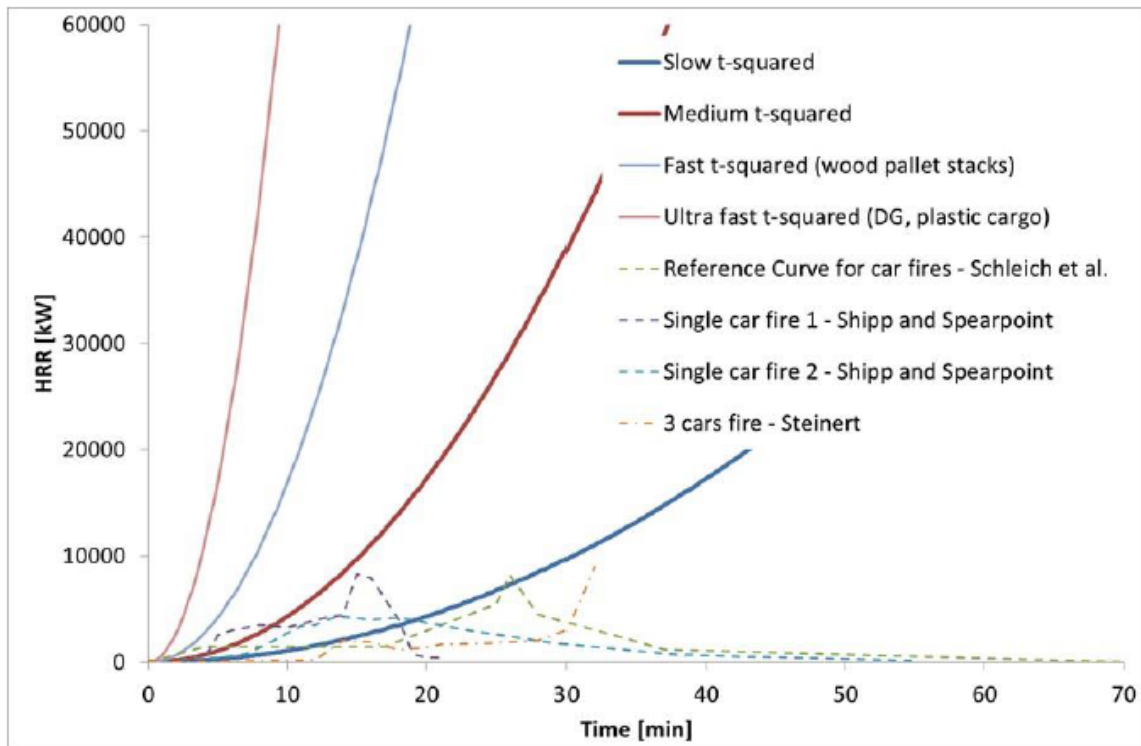
Η ταχύτητα ανάπτυξης της πυρκαγιάς εξαρτάται από τη διαδικασία ανάφλεξης, από τη διάδοση των φλογών που καθορίζουν την περίμετρο και τον ρυθμό καύσης. Σε

περίπτωση πυρκαγιών που περιλαμβάνουν έπιπλα, αντικείμενα ή διαφορετικά είδη, το φαινόμενο δεν μπορεί να περιγραφεί με απλούς τύπους. Οποιοδήποτε αντικείμενο εμπλέκεται στην καύση έχει το δικό του ρυθμό ανάπτυξης. Συνήθως, ένας τέτοιος χρόνος έχει αναγνωριστεί ως αυτός που απαιτείται για να επιτευχθεί μια κορυφή στο ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας ίσο με 1MW. Διάφορες δοκιμές, σε διαφορετικές κλίμακες έχουν επιτρέψει τη συλλογή πινάκων με υλικά και αντικείμενα με αυτήν την τιμή.

Στον τομέα της πυρασφάλειας η ανάπτυξη της πυρκαγιάς συχνά απλοποιείται και περιγράφεται ως 'T-squared' πυρκαγιά. Αυτό σημαίνει ότι ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας αυξάνεται αναλογικά με το τετράγωνο του χρόνου. Χρησιμοποιώντας διαφορετικές αναλογικές σταθερές,  $a$ , ποικίλες ταχύτητες ανάπτυξης πυρκαγιάς περιγράφονται. Ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας περιγράφεται ως:

$$\dot{Q} = at^2$$

Όπου  $\dot{Q}$  είναι ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας (kW),  $a$  είναι ο ρυθμός ανάπτυξης πυρκαγιάς (kW/s<sup>2</sup>) και  $t$  είναι ο χρόνος από την ανάφλεξη σε δευτερόλεπτα.



Διάγραμμα 3: Αργή , μέση, γρήγορη και πολύ γρήγορη t-squared πυρκαγιά συγκρινόμενη με έναν αριθμό από πραγματικές δοκιμές πυρκαγιάς αυτοκινήτου και μια καμπύλη πυρκαγιάς αναφοράς [Yuguang Li, 2004]

Η ανάπτυξη της πυρκαγιάς σε περιπτώσεις οχημάτων έχει μελετηθεί σε έναν μεγάλο αριθμό ερευνητικών εργασιών. Μερικές από αυτές ενοποιήθηκαν από τον Yuguang Li [Li Y, 2004] και προέκυψε ότι ο ρυθμός ανάπτυξης πυρκαγιάς σε σταθμευμένα οχήματα βρίσκεται σε ένα εύρος μεταξύ  $0.003 \text{ kW/s}^2$  («χαμηλός» ρυθμός ανάπτυξης) και  $0.012 \text{ kW/s}^2$  («μέσος» ρυθμός ανάπτυξης). Ένας αριθμός σχετικών σεναρίων πυρκαγιάς παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 3.

Σε πυρκαγιές σε καταστρώματα go-go αναμένεται ένας μέσος ρυθμός ανάπτυξης, αν και στα περισσότερα σενάρια πραγματικών περιπτώσεων αυτό θεωρείται συντηρητικό. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε καταστρώματα go-go υπάρχει ενδεχόμενο για πυρκαγιές με πιο ταχύ ρυθμό ανάπτυξης, για παράδειγμα στην περίπτωση διαρροής καυσίμου, επικίνδυνων υλικών ή άλλου είδους εύφλεκτου φορτίου.

### 2.3 Επίδραση του εξαερισμού στην εξέλιξη πυρκαγιάς

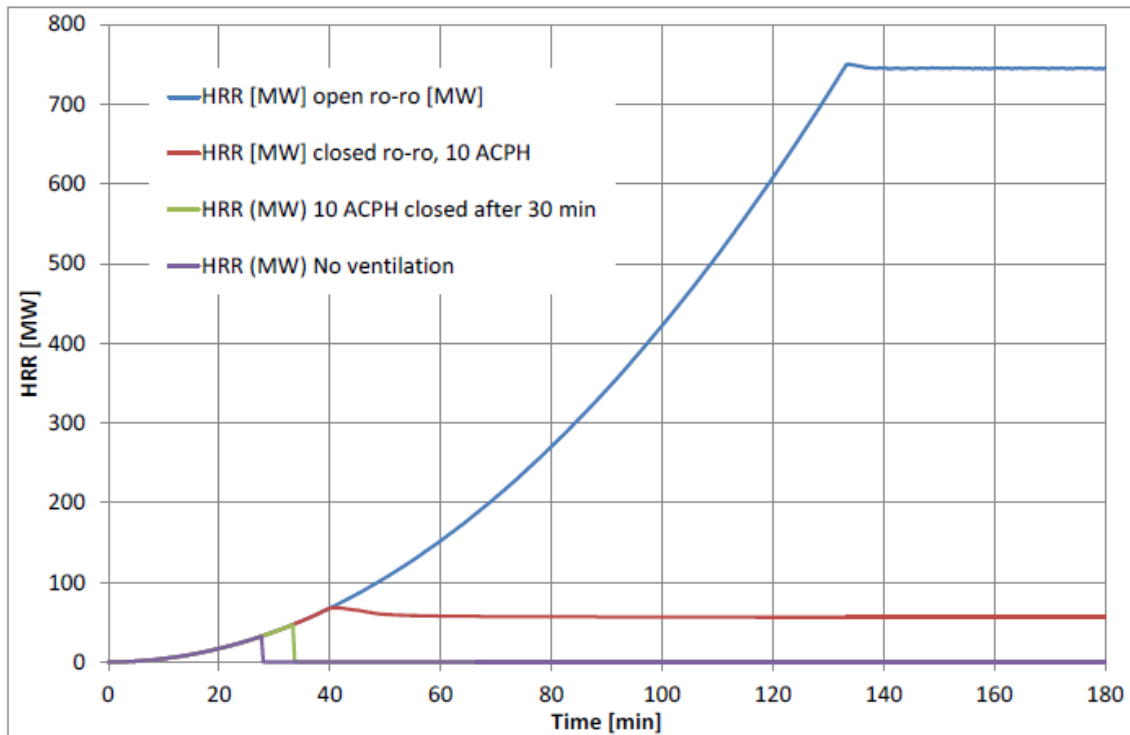
Με βάση τους κανονισμούς και την κατάσταση του φορτίου το σύστημα εξαερισμού σε ένα κλειστό χώρο go-go υποχρεούται να μπορεί να πραγματοποιήσει είτε 6 αλλαγές αέρα ανά ώρα (Air Changes Per Hour – ACPH) όταν πρόκειται για επιβατηγό με λιγότερους από 36 επιβάτες ή φορτηγό, είτε 10 αλλαγές αέρα ανά ώρα όταν πρόκειται για επιβατηγό με περισσότερους από 36 επιβάτες. Τα ανοίγματα για φυσικό εξαερισμό, όταν το πλοίο βρίσκεται εν πλω, συνήθως διατηρούνται στο ελάχιστο, οι πόρτες παραμένουν κλειστές και το διαμέρισμα αυτό του πλοίου περιβάλλεται από A-κατηγορίας, ως προς την πυρασφάλεια, διαχωριστικά.

Υπό κανονικές συνθήκες στη θάλασσα όλες οι πόρτες στους χώρους go-go είναι κλειστές και οι χώροι αερίζονται με ρυθμό από 6 έως 10 αλλαγών αέρα ανά ώρα. Ως εκ τούτου, μπορεί να υποθεθεί ότι μια ταχέως αναπτυσσόμενη πυρκαγιά σε έναν κλειστό go-go χώρο θα ελέγχεται από τον εξαερισμό μέχρι ενός σημείου και όταν σταματήσει η λειτουργία του, σύμφωνα με τις διαδικασίες που ακολουθούνται σε τέτοιες περιπτώσεις, η πυρκαγιά θα μειωθεί σε ένταση και τελικά θα σβήσει λόγω εξάντλησης οξυγόνου.

Στην αναφορά της European Maritime Safety Agency [EMSA, 2016] πραγματοποιήθηκε μια σειρά προσομοιώσεων στο πρόγραμμα Branzfire [Wade, C. A., 2004] για την ανάδειξη της επιρροής του εξαερισμού κατά την διάρκεια ανάπτυξης της πυρκαγιάς. Χρησιμοποιήθηκε, αρχικά, ένας ανοιχτός χώρος go-go διαστάσεων  $140 \text{ m} \times 25 \times 5.8 \text{ m}$  (Μήκος x Πλάτος x Ύψος), ο οποίος καταλαμβάνόταν κατά 30 % από φορτίο. Προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν και σε κλειστό χώρο go-go, για τρεις διαφορετικές καταστάσεις μηχανικού εξαερισμού, διαστάσεων  $122 \text{ m} \times 25 \times 5.8 \text{ m}$  (Μήκος x Πλάτος

x Ύψος), ο οποίος επίσης καταλαμβάνεται κατά 30 % από φορτίο. Οι τρεις διαφορετικές καταστάσεις για τον κλειστό χώρο ήταν οι εξής:

1. 10 acph (αλλαγές αέρα ανά ώρα) σε συνεχή λειτουργία
2. 10 acph με τον εξαερισμό να κλείνει 30 λεπτά μετά την έναρξη της πυρκαγιάς
3. Χωρίς εξαερισμό, υποθέτοντας ότι ο εξαερισμός έκλεισε πολύ γρήγορα μετά την έναρξη της πυρκαγιάς

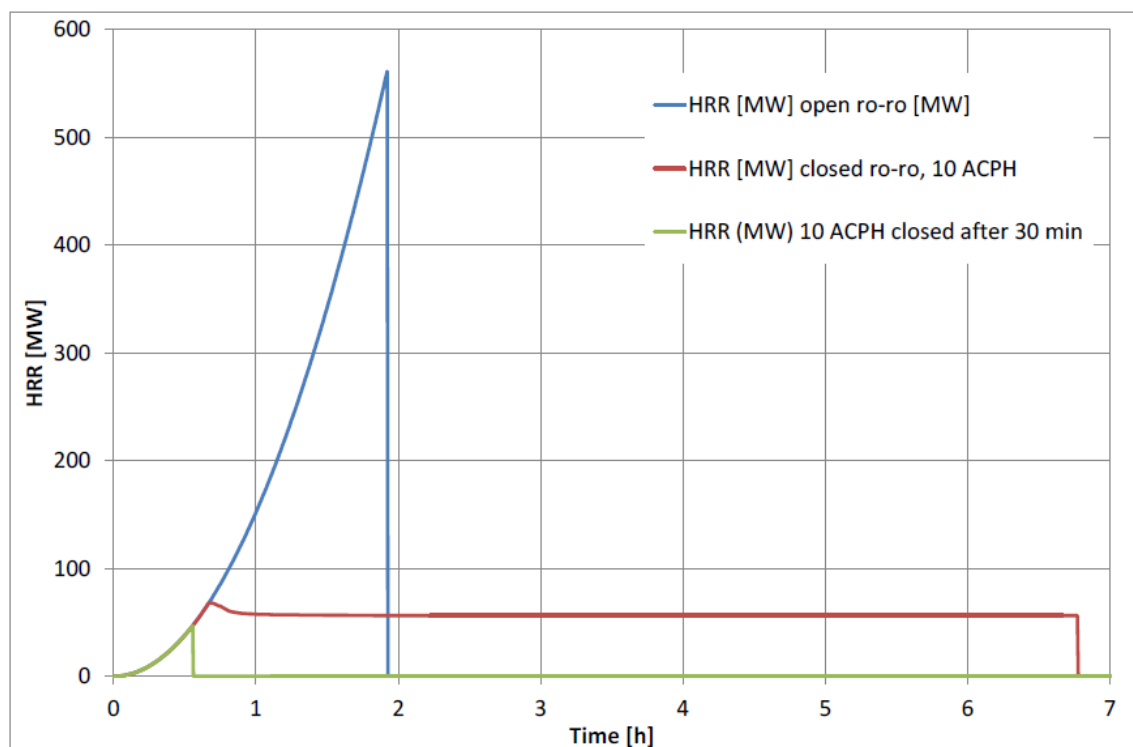


Διάγραμμα 4: Ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας ως συνάρτηση του χρόνου για διαφορετικές καταστάσεις εξαερισμού [EMSA, 2016]

Για όλες τις προσομοιώσεις θεωρήθηκε ένας μέσος ρυθμός εξάπλωσης για την πυρκαγιά και ο εξαερισμός ήταν ο μόνος παράγοντας που επηρέαζε την πυρκαγιά. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 4. Διακρίνεται, καθαρά, ότι ο φυσικός εξαερισμός στο ανοιχτό κατάστρωμα ro-ro δεν αποτελεί περιοριστικό παράγοντα για την εξάπλωση της πυρκαγιάς, που μπορεί να πάρει καταστροφικές διαστάσεις. Ακόμα, φαίνεται πως αν ο μηχανικός εξαερισμός δεν διακοπεί, στην περίπτωση του κλειστού χώρου, έχουμε την περίπτωση μια φωτιάς ελεγχόμενης από τον ίδιο τον εξαερισμό με ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας γύρω στα 60 MW. Στην περίπτωση που ο εξαερισμός διακόπτεται στα 30 λεπτά, ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας φτάνει στα 45 MW και μετά η πυρκαγιά σβήνει λόγω έλλειψης οξυγόνου. Στην τελευταία περίπτωση, ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας φτάνει στα 30 MW, μέχρι την εξουδετέρωση λόγω έλλειψης οξυγόνου.

## 2.4 Φορτίο πυρκαγιάς

Αν μια πυρκαγιά, στην φάση που ελέγχεται από τον εξαερισμό, δεν σβηστεί από χειροκίνητα μέσα ή από σταθερά μέσα πυρόσβεσης, τότε θα συνεχίσει μέχρι την κατανάλωση όλου του καυσίμου. Λαμβάνοντας υπόψη τους ίδιους χώρους (καταστρώματα) που χρησιμοποιήθηκαν παραπάνω, υπάρχει αρκετός χώρος για περίπου 200 αυτοκίνητα. Κάθε όχημα έχει φορτίο πυρκαγιάς γύρω στα 5-8 GJ [Li Y,2004], οπότε ένα συνολικό φορτίο 1300 GJ αναμένεται για ένα γεμάτο κατάστρωμα αυτοκινήτων. Με βάση τα παραπάνω, η διάρκεια μια ανεξέλεγκτης πυρκαγιάς οχημάτων μπορεί να υπολογισθεί για τα διαφορετικά σενάρια εξαερισμού. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 5.



Διάγραμμα 5: Διάρκεια ανεξέλεγκτης πυρκαγιάς αυτοκινήτων για διαφορετικές καταστάσεις εξαερισμού [EMSA, 2016]

Φαίνεται πως στην περίπτωση όπου η λειτουργία του εξαερισμού σταματά μετά από 30 λεπτά, η πυρκαγιά σβήνει μόνη της λίγο μετά και φτάνει σε ένα μέγιστο ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας γύρω στα 45 MW. Στα άλλα δύο σενάρια όπου η λειτουργία του εξαερισμού δεν διακόπτεται (κλειστό κατάστρωμα ro-ro) ή υπάρχει συνεχής φυσικός εξαερισμός (ανοιχτό κατάστρωμα ro-ro), παρατηρούνται μεγάλης διάρκειας πυρκαγιές (2-7 ώρες) με μεγάλη απελευθέρωση ενέργειας. Τέτοιες πυρκαγιές συνήθως αδυνατούν να περιοριστούν στον χώρο προέλευσης τους και είναι πιθανό να χρειάζεται εγκατάλειψη του πλοίου σε αυτές τις περιπτώσεις.

### 3 Κανονισμοί και απαιτήσεις

Το κεφάλαιο αυτό αποσκοπεί στο να δώσει μια επισκόπηση των κανονισμών και απαιτήσεων που ισχύουν σε χώρους οχημάτων, σε χώρους ro-ro και σε ειδικής κατηγορίας χώρους επιβατηγών/οχηματαγωγών πλοίων.

#### 3.1 Πηγές

Οι κύριες πηγές που χρησιμοποιήθηκαν είναι:

- Safety of Life at Sea (SOLAS) Chapter II-2 Construction - Fire protection, fire detection and fire extinction
- Fire Safety System (FSS) Code

που περιέχουν τις γενικότερες πληροφορίες και είναι έγγραφα του IMO. Ακόμα δόθηκε βάση σε δημοσιεύσεις της Maritime Safety Committee (MSC), του IMO, σε σχετικά έγγραφα του IACS, σε σχετικούς κανονισμούς που έχουν οριστεί από Κλάσεις και σε κανονισμούς ορισμένους από Σημαίες.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η παρούσα επισκόπηση βασίζεται στους ισχύοντες κανονισμούς. Επομένως ορισμένες απαιτήσεις που αναφέρονται παρακάτω ενδέχεται να μην ισχύουν για παλαιότερα πλοία. Ωστόσο εντοπίστηκαν λίγες μόνο σημαντικές αλλαγές στους κανονισμούς τα τελευταία 40 χρόνια. Μια σύντομη περίληψη των αλλαγών των κύριων κανονισμών που σχετίζονται με την πυρασφάλεια στους χώρους ro-ro των επιβατηγών πλοίων παρέχεται στον Πίνακα 3 .

Adoption date	Application date	Regulation change	Summary
1974	1980	SOLAS 74	Introduces the principle of horizontal fire zone for ro-ro spaces / special category spaces with: <ul style="list-style-type: none"><li>• Structural fire protection</li><li>• Fixed fire extinguishing system (“drencher” type)</li><li>• Fixed fire detection system</li></ul>
2008	2008	MSC.1/Circ. 1272	Allows water-mist fixed fire-extinguishing systems Allows automatic release
2006	2010	MSC.217(82)	Requires addressable fixed fire detection and fire alarm systems on passenger ships
2010	2012	MSC.311(88)	Revision of FSS Code Ch.9
2018	2021	MSC.1/Circ. 1430	Revised guidelines for the design and approval of fixed water-based fire-fighting systems

Πίνακας 3: Περίληψη αλλαγών στους κανονισμούς

## 3.2 Ορισμοί

Για την καλύτερη κατανόηση του αντικειμένου και των κανονισμών, θεωρήθηκε χρήσιμο να δοθούν μερικοί βασικοί ορισμοί, όπως αυτοί παρατίθενται κατά τον SOLAS II-2/3:

- “Vehicle spaces are cargo spaces intended for carriage of motor vehicles with fuel in their tanks for their own propulsion.”
- “Ro-ro spaces are spaces not normally subdivided in any way and normally extending to either a substantial length or the entire length of the ship in which motor vehicles with fuel in their tanks for their own propulsion and/or goods (packaged or in bulk, in or on rail or road cars, vehicles (including road or rail tankers), trailers, containers, pallets, demountable tanks or in or on similar stowage units or other receptacles) can be loaded and unloaded normally in a horizontal direction.”
- “Special category spaces are those enclosed vehicle spaces above and below the bulkhead deck, into and from which vehicles can be driven and to which passengers have access. Special category spaces may be accommodated on more than one deck provided that the total overall clear height for vehicles does not exceed 10 m.”  
Οι χώροι ειδικής κατηγορίας, με άλλα λόγια είναι χώροι ro-ro στους οποίους οι επιβάτες έχουν πρόσβαση, πιθανόν και κατά την διάρκεια του ταξιδιού. Αυτοί οι χώροι αποτελούν τον πιο συχνό τύπο κλειστού ro-ro χώρου σε ro-ro επιβατηγά πλοία. Σημειώνεται ότι οι ανοιχτοί ro-ro χώροι δεν θεωρούνται χώροι ειδικής κατηγορίας.
- “Weather deck is a deck which is completely exposed to the weather from above and from at least two sides.”
- An open vehicle or ro-ro space is “either open at both ends or [has] an opening at one end and [is] provided with adequate natural ventilation effective over [its] entire length through permanent openings distributed in the side plating or deckhead or from above, having a total area of at least 10% of the total area of the space sides.”
- “A closed vehicle or ro-ro space is any vehicle or ro-ro space which is neither open nor a weather deck.”
- ““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; and
- the Administration required a test of a prototype bulkhead or deck in accordance with the Fire Test Procedures Code to ensure that it meets the above requirements for integrity and temperature rise. ”
- “"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 constructed as to be capable of preventing the passage of flame to the end of the first half hour of the standard fire test; and
  - the Administration required a test of a prototype division in accordance with the Fire Test Procedures Code to ensure that it meets the above requirements for integrity and temperature rise. ”
- “"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. ”

Δίνονται ακόμα κάποιοι ορισμοί, σύμφωνα με τον MSC.1/Circ.1430, που θεωρήθηκαν χρήσιμοι και είναι σχετικοί με τα συστήματα κατάσβεσης:

- “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.”

## 3.3 Απαιτήσεις συστημάτων ανίχνευσης και συναγερμού

### 3.3.1 Είδη συστημάτων

#### Γενικές απαιτήσεις

Με βάση τον κανονισμό SOLAS II-2/20.4.1, απαιτείται ένα σταθερό σύστημα ανίχνευσης πυρκαγιάς και συναγερμού πυρκαγιάς να τοποθετηθεί σε όλους τους ro-ro χώρους. Ωστόσο είναι ευρέως αποδεκτό ότι δεν απαιτείται σταθερό σύστημα ανίχνευσης πυρκαγιάς και συναγερμού πυρκαγιάς σε καταστρώματα καιρού (weather decks) που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά οχημάτων με καύσιμο στις δεξαμενές τους σύμφωνα με τον IACS UI SC73. Πρέπει να σημειωθεί ότι ανίχνευση πυρκαγιάς απαιτείται ακόμα και σε ανοιχτούς χώρους ro-ro.

#### Χώροι ειδικής κατηγορίας

Στους χώρους ειδικής κατηγορίας, ο κανονισμός SOLAS II-2/20.4.3.1 αναφέρει ότι εάν ένα αποτελεσματικό σύστημα περιπολίας διατηρείται από συνεχείς βάρδιες σε όλη την διάρκεια του ταξιδιού, τότε δεν απαιτείται σύστημα ανίχνευσης πυρκαγιάς και συναγερμού πυρκαγιάς. Σημειώνεται όμως ότι κάποιες Σημαίες (π.χ. Γαλλική Σημαία) απαιτούν αυτά τα συστήματα, ανεξαρτήτως της συνεχής περιπολίας.

#### Είδη σταθερών συστημάτων ανίχνευσης πυρκαγιάς

Ο κανονισμός SOLAS II-2/20.4.1 απαιτεί ένα σταθερό σύστημα ανίχνευσης πυρκαγιάς και συναγερμού πυρκαγιάς σύμφωνα με τις απαιτήσεις του FSS Code. Σημειώνεται ότι συστήματα ανίχνευσης καπνού εξαγωγής δείγματος (sample extraction smoke detection system), με βάση τον SOLAS II-2/20.4.2, δεν επιτρέπονται σε ανοιχτούς χώρους ro-ro, ανοιχτούς χώρους οχημάτων και χώρους ειδικής κατηγορίας. Ακόμα, για επιβατηγά πλοία κατασκευασμένα το ή μετά το 2010, το σύστημα θα πρέπει να είναι ικανό να αναγνωρίσει μεμονωμένα κάθε ανιχνευτή και χειροκίνητο σημείο κλήσης [FSS Code Ch. 9 §2.1.7]. Πριν το 2010, το σύστημα υποχρεούταν να διαχωρίζεται σε τομείς και να είναι ικανό να υποδείξει σε ποιον τομέα άνηκε ο ανιχνευτής που είχε ενεργοποιηθεί.

#### Περιπολίες

Αποτελεσματικές περιπολίες έναντι πυρκαγιάς απαιτούνται από SOLAS II-2/7.8 και SOLAS II-2/20.4.3.1. Σε επιβατηγά πλοία που μεταφέρουν περισσότερους από 36 επιβάτες, κάθε μέλος της περιπολίας θα πρέπει να έχει στην κατοχή του μία αμφίδρομη φορητή συσκευή ραδιοτηλεφώνου, να είναι καταλλήλως εκπαιδευμένο και να γνωρίζει τους χώρους του πλοίου.

### 3.3.2 Απόδοση

#### Γενικά

Με βάση τον κανονισμό SOLAS II-2/20.4.1 ορίζονται οι ακόλουθες γενικές απαιτήσεις απόδοσης για τα συστήματα:

- Το σταθερό σύστημα ανίχνευσης πυρκαγιάς θα πρέπει να είναι ικανό να ανιχνεύει γρήγορα την έναρξη της πυρκαγιάς
- Μετά την εγκατάσταση, το σύστημα θα πρέπει να δοκιμαστεί υπό κανονικές συνθήκες εξαερισμού και να δώσει συνολικό χρόνο απόκρισης που να θεωρείται ικανοποιητικός από την Σημαία

Μια συνήθης πρακτική του νηογνώμονα BV (Bureau Veritas) είναι να εκτελεί αυτό το τεστ χρησιμοποιώντας ένα σύστημα παραγωγής καπνού, με ικανοποιητικό χρόνο ενεργοποίησης του συστήματος να θεωρούνται τα 3 λεπτά.

Ο FSS Code στο Ch. 9 §2.1.2 θέτει τις ακόλουθες κύριες λειτουργίες για το σύστημα ανίχνευσης:

- έλεγχος και παρακολούθηση των σημάτων εισόδου από όλους τους συνδεδεμένους ανιχνευτές πυρκαγιάς και καπνού και από τα χειροκίνητα σημεία κλήσης
- παροχή σημάτων εξόδου στην γέφυρα του πλοίου, στον κεντρικό σταθμό ελέγχου συνεχούς επάνδρωσης ή στο κέντρο ασφαλείας του πλοίου για να ειδοποιεί το πλήρωμα σχετικά με τις συνθήκες πυρκαγιάς και βλάβης
- παρακολούθηση της τροφοδοσίας ρεύματος και των κυκλωμάτων, που είναι αναγκαία για την λειτουργία του συστήματος, για περιπτώσεις διακοπής ισχύος και βλαβών
- το σύστημα μπορεί να σχεδιαστεί έτσι ώστε να δίνει σήματα εξόδου σε άλλα συστήματα πυρασφάλειας

#### Συντήρηση

Δοκιμές και κατάλληλη συντήρηση των εν λειτουργία συστημάτων απαιτείται, όπως αναφέρεται στα FSS Ch. 9 §2.5.2, SOLAS II-2/7.3 και SOLAS II-2/14.2.2.

#### Συναγερμός

Η ενεργοποίηση οποιουδήποτε ανιχνευτή ή χειροκίνητου σημείου κλήσης θα πρέπει να ενεργοποιεί έναν οπτικό και ακουστικό συναγερμό σε κάθε μονάδα ένδειξης, ή τουλάχιστον στο κέντρο ασφαλείας και στη γέφυρα του πλοίου.

Μετά από 2 λεπτά, εάν δεν έχει αναγνωρισθεί από κάποιον ο συναγερμός, θα πρέπει να ακούγεται αυτόματα ένας ηχητικός συναγερμός πυρκαγιάς σε όλους τους χώρους διαμονής και υπηρεσίας του πληρώματος, τους σταθμούς ελέγχου και τους μηχανολογικούς χώρους κατηγορίας Α [FSS Ch. 9 §2.5.1].

Επιπλέον, απαιτείται ειδικός συναγερμός από τον SOLAS II-2/7.9.4, προκειμένου να επιτρέπεται η κλήση του πληρώματος από τη γέφυρα πλοήγησης ή το κέντρο ασφαλείας.

Τα επίπεδα ηχητικής πίεσης δίνονται στο FSS Ch. 9 §2.5.1.9.

### 3.3.3 Διαρρύθμιση συστήματος

#### Τοποθεσία ανιχνευτών

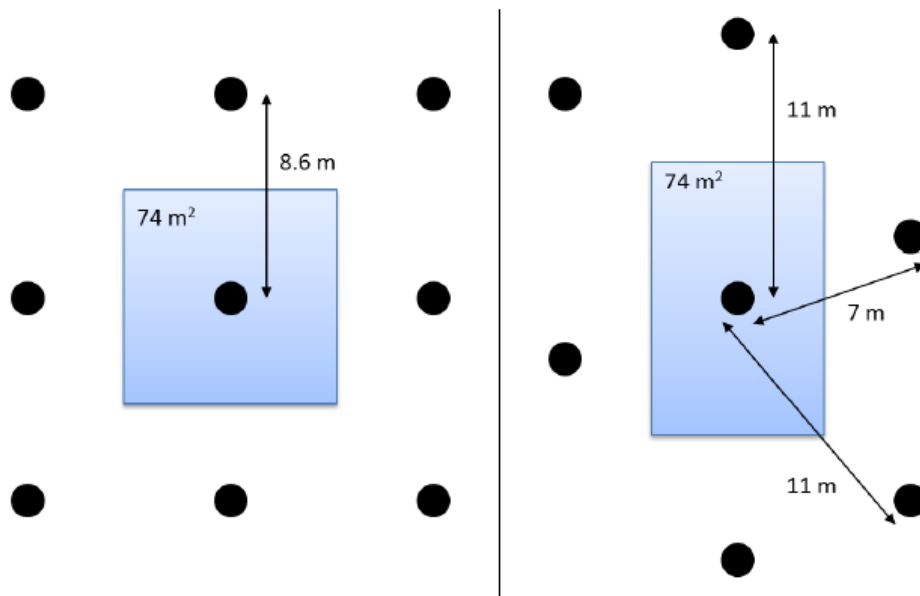
Σύμφωνα με τον SOLAS II-2/20.4.1 οι αποστάσεις και οι θέσεις των ανιχνευτών θα πρέπει να αποφασίζονται αφού ληφθούν υπόψη οι επιπτώσεις του εξαερισμού και άλλοι σχετικοί παράγοντες. Περισσότερες λεπτομέρειες παρέχονται στον FSS Ch. 9 §2.4.2, μαζί με έναν πίνακα που συνοψίζει τη μέγιστη απόσταση μεταξύ ανιχνευτών. Συγκεκριμένα αναφέρεται ότι οι ανιχνευτές θα πρέπει να τοποθετούνται με στόχο την βέλτιστη απόδοση. Θέσεις κοντά σε δοκούς και αγωγούς εξαερισμού ή άλλες θέσεις, όπου τα μοτίβα της ροής του αέρα θα μπορούσαν να επηρεάσουν αρνητικά την απόδοση και θέσεις όπου είναι πιθανή η κρούση ή η φυσική ζημιά, θα πρέπει να αποφεύγονται. Θα πρέπει να βρίσκονται σχετικά ψηλά και να απέχουν τουλάχιστον 0.5 m από φρακτές, εκτός από διαδρόμους και κλιμακοστάσια.

Type of detector	Maximum floor area per detector (m <sup>2</sup> )	Maximum distance apart between centers (m)	Maximum distance away from bulkheads (m)
Heat	37	9	4.5
Smoke	74	11	5.5

Πίνακας 4: Αποστάσεις ανιχνευτών [FSS Ch. 9 Table 9.1]

Η μέγιστη επιτρεπόμενη απόσταση μεταξύ ανιχνευτών περιορίζεται κυρίως από τη μέγιστη κάλυψη εμβαδού ανά ανιχνευτή. Για ομοιόμορφα κατανεμημένους ανιχνευτές καπνού, η μέγιστη απόσταση είναι 8.6 m αντί για 11 m, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4. Ωστόσο, για άνισους κατανεμημένους ανιχνευτές, η μέγιστη απόσταση 11 m πρέπει να λαμβάνεται υπόψη. Ένας έλεγχος που έγινε σε επιβατηγό πλοίο ro-ro στο Γκέτεμποργκ έδειξε μια εκτιμώμενη απόσταση περίπου 7 μέτρων μεταξύ των περισσότερων ανιχνευτών και στο report “Fire safety approach on the DESSO ROPAX” [Arvidson et al., 2006], συνιστάται μέγιστη περιοχή κάλυψης 25 m<sup>2</sup> για συνδυασμένους ανιχνευτές καπνού και θερμότητας, δηλαδή σημαντικά μικρότερη από τις προδιαγραφόμενες

αποστάσεις των 37 m<sup>2</sup> (ανιχνευτές θερμότητας) και 74 m<sup>2</sup> (ανιχνευτές καπνού). Φαίνεται ότι χρησιμοποιείται κάποιο περιθώριο ασφαλείας στις καθορισμένες τιμές, το οποίο φυσικά θα μπορούσε να είναι μια συνειδητή απόφαση για την επίτευξη υψηλότερου επιπέδου ασφαλείας. Στην εργασία των Themelis & Spyrou [2012] μελετήθηκε η επίδραση της διάταξης και την ευαισθησίας των ανιχνευτών καπνού στον χρόνο ανίχνευσης πυρκαγιάς για μεγάλους δημόσιους χώρους σε επιβατηγό πλοίο.



Διάγραμμα 6: Διαρρύθμιση αποστάσεων ανιχνευτών [EMSA, 2018]

### Διαρρύθμιση τομέων

Οι τομείς ανίχνευσης πυρκαγιάς δεν επιτρέπεται να καλύπτουν παραπάνω από μία κεντρική κάθετη ζώνη [FSS Ch. 9 §2.4.1.4]. Επιπροσθέτως, ένας τομέας ανίχνευσης πυρκαγιάς που καλύπτει έναν χώρο ro-ro θα πρέπει, σύμφωνα με τον FSS Ch. 9 §2.4.1.2, να διαχωρίζεται από τομείς ανίχνευσης που καλύπτουν:

- σταθμούς ελέγχου (control stations)
- χώρους υπηρεσίας (service spaces)
- χώρους ενδιαιτήσεως (accommodation spaces)

Αυτό σημαίνει ότι οι χώροι ro-ro πρέπει να διαθέτουν ειδικά τμήματα ανίχνευσης πυρκαγιάς, καθώς γενικά βρίσκονται σε μια ειδική κύρια οριζόντια ζώνη. Μόνο μηχανολογικοί χώροι εκτός της κατηγορίας A που βρίσκονται στην ίδια οριζόντια ζώνη θα μπορούσαν να καλυφθούν από τον ίδιο τομέα ανίχνευσης.

## Παρακολούθηση και έλεγχος

Η παρακολούθηση και ο έλεγχος θα πρέπει να είναι τουλάχιστον διαθέσιμος στις παρακάτω τοποθεσίες:

- κέντρο ελέγχου (safety center) με ένα control panel
- γέφυρα πλοίου (navigation bridge) με ένα panel υποδείξεως ικανό να αναγνωρίζει ποιος ανιχνευτής ενεργοποιήθηκε

Οι απαιτήσεις για παρακολούθηση και έλεγχο συνοψίζονται στον Πίνακα 5, σε συμφωνία με τον FSS Ch. 9 §2.5.1 και τον SOLAS II-2/7.9.2 & 7.9.3.

Monitoring and control		Control panel (Safety centre)	Indicating unit (Navigating bridge)	Other indicating unit
Fire detection	Fire alarm (See [7.2.2.2.3])	Visual and audible	Visual and audible	Visual and audible
	Means to acknowledge fire alarm	X (sounders may be manually silenced)		
	Monitoring and Control for: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fire doors</li> <li>• Ventilation</li> </ul>	X		
	Location of sections and spaces covered	X	X	X
Power supplies and electrical circuits necessary for detection system	Electrical fault alarm (distinct from fire alarm): <ul style="list-style-type: none"> <li>• Single open or power break</li> <li>• Single ground fault</li> <li>• Single wire-to-wire fault</li> </ul>	Visual and audible		
	Means to acknowledge electrical fault alarm	X		

Πίνακας 5: Απαιτήσεις παρακολούθησης και ελέγχου [EMSA, 2018]

Το σύστημα θα πρέπει να έχει τις εξής συνθήκες λειτουργίας, οι οποίες θα πρέπει να είναι καθαρά διακριτές:

- κανονική λειτουργία
- κατάσταση συναγερμού
- αναγνωρισμένη κατάσταση συναγερμού

- κατάσταση ηλεκτρικού σφάλματος
- αθόρυβη κατάσταση συναγερμού
- το σύστημα πρέπει να επανέρχεται αυτόματα σε κανονικές συνθήκες όταν όλοι οι συναγερμοί και οι συνθήκες σφάλματος αντιμετωπιστούν

### 3.3.4 Ανιχνευτές πυρκαγιάς

#### Γενικά

Το σύστημα ανίχνευσης πυρκαγιάς θα πρέπει να περιλαμβάνει ανιχνευτές πυρκαγιάς και χειροκίνητα σημεία κλήσης. Σύμφωνα με τον FSS Code Ch. 9 §2.1.5, όλα τα εξαρτήματα πρέπει να είναι κατάλληλα για λειτουργία σε θαλάσσιο περιβάλλον (τυπικές απαιτήσεις για ηλεκτρικό εξοπλισμό επί των πλοίων). Επιπλέον, οι ανιχνευτές πυρκαγιάς που βρίσκονται σε επικίνδυνες περιοχές πρέπει να είναι επαρκείς για τέτοια χρήση [FSS Ch. 9 §2.3.1.8].

#### Είδη ανιχνευτών

Ο FSS Code επιτρέπει την χρήση ανιχνευτών που λειτουργούν με θερμότητα, καπνό ή άλλα προϊόντα καύσης, φλόγα, ή οποιοδήποτε συνδυασμό αυτών των παραγόντων [FSS Ch. 9 §2.3.1.1].

Ακόμα, σε περίπτωση που το σταθερό σύστημα κατάσβεσης είναι τύπου manual deluge, automatic deluge ή pre-action, η δημοσίευση MSC.1/Circ.1430 απαιτεί τον συνδυασμό 2 διαφορετικών ειδών ανιχνευτών πυρκαγιάς.

Επιπροσθέτως, αρκετές Σημαίες και νηογνώμονες απαιτούν ανιχνευτές καπνού αποκλειστικά ή σε συνδυασμό με άλλους ανιχνευτές σε χώρους ro-ro. Ο νηογνώμονας BV απαιτεί την εγκατάσταση ανιχνευτών καπνού σε όλους τους ro-ro χώρους [NR467 Pt C, Ch. 4, Sec. 12 [3.1.1]]. Παρόμοιες απαιτήσεις υπάρχουν και από την US Coast Guard και από την Σουηδική Σημαία. Η σημαία του Ηνωμένου Βασιλείου απαιτεί ανιχνευτές καπνού αποκλειστικά ή έναν συνδυασμό ανιχνευτών καπνού και φλόγας.

Η απαίτηση για την ύπαρξη τουλάχιστον ανιχνευτών καπνού στους χώρους ro-ro υπάρχει, γιατί θεωρούνται πιο αξιόπιστοι από τους ανιχνευτές φλόγας ή θερμότητας. Οι λόγοι είναι:

- Οι ανιχνευτές θερμότητας που είναι τοποθετημένοι στις οροφές των γκαράζ αναμένεται να έχουν ένα σχετικά μεγάλο χρόνο ενεργοποίησης, λόγω του ύψους των καταστροφμάτων
- Οι ανιχνευτές φλόγας αναμένεται, λόγω της χρήσης τους, να οδηγήσουν σε έναν αριθμό εσφαλμένων συναγερμών



## Πρότυπα πιστοποίησης και απόδοσης

Οι ανιχνευτές πυρκαγιάς πιστοποιούνται με βάση τα στάνταρ EN 54:2001 και IEC 60092:504 [FSS Ch. 9 §2.3.1 και MSC/Circ.1035]. Συνηθισμένες απαιτήσεις απόδοσης αποτελούν:

- Ανιχνευτές καπνού: Ενεργοποίηση για 2% επισκότιση ανά μέτρο  $\leq$  πυκνότητα καπνού  $\leq$  12.5% επισκότιση ανά μέτρο
- Ανιχνευτές θερμότητας: Ενεργοποίηση για  $54^{\circ}\text{C} \leq$  θερμοκρασία  $\leq 78^{\circ}\text{C}$  (ρυθμός αύξησης θερμοκρασίας  $\leq 1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ )
- Ανιχνευτές μονοξειδίου του άνθρακα: Το όριο συναγερμού ορίζεται στα 40 ppm, οι ρυθμίσεις ευαισθησίας προσαρμόζονται λαμβάνοντας υπόψη τον κίνδυνο πυρκαγιάς, την πιθανή πηγή και τον κίνδυνο εσφαλμένου συναγερμού

Επιπλέον, προβλέπονται διατάξεις για τη δοκιμή λειτουργίας υπηρεσίας [FSS Ch. 9 §2.3.1.6].

### 3.3.5 Ηλεκτρική διάταξη

#### Αρχιτεκτονική συστήματος

Το σύστημα θα πρέπει να οργανωθεί σε τομείς όπως προβλέπεται στον FSS Code Ch. 9 §2.1.4 και 2.4.1.1. Η ενεργοποίηση του πρώτου συναγερμού δεν θα πρέπει να εμποδίζει τους άλλους ανιχνευτές από την ενεργοποίηση περαιτέρω συναγερμών [FSS Ch. 9 §2.1.6.3], για addressable συστήματα (ικανό να αναγνωρίσει μεμονωμένα κάθε ανιχνευτή και χειροκίνητο σημείο κλήσης).

#### Εξαρτήματα

- Ο πίνακας ελέγχου θα πρέπει να δοκιμαστεί σύμφωνα με τα πρότυπα EN 54-2:1997, EN 54-4:1997 και IEC 60092-504:2001 [FSS Ch. 9 §2.3.2]
- Τα καλώδια θα πρέπει να είναι κατασκευασμένα από υλικά που λειτουργούν ως επιβραδυντές καύσης, σύμφωνα με IEC 60332-1 [FSS Ch. 9 §2.3.3]
- Τα καλώδια που περνούν από κύριες κατακόρυφες ζώνες, τις οποίες δεν εξυπηρετούν και τα καλώδια που συνδέονται σε πίνακες ελέγχου στον σταθμό παρακολούθησης πυρκαγιάς πρέπει να είναι πυρίμαχα σύμφωνα με IEC 60331 [FSS Ch. 9 §2.3.3]

### 3.3.6 Πηγές τροφοδοτήσεως

#### Συνεχής δυνατότητα ανίχνευσης πυρκαγιάς

Το σταθερό σύστημα ανίχνευσης και συναγερμού θα πρέπει να τροφοδοτείται από δυο πηγές ισχύος με διαφορετικούς τροφοδότες, συμπεριλαμβανομένης μιας πηγής ενέργειας έκτακτης ανάγκης [FSS Code Ch. 9 §2.2.1]. Μια πηγή ενέργειας έκτακτης ανάγκης πρέπει να συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις του SOLAS II-1/42 και 42-1 σχετικά με την τοποθεσία και την αυτονομία. Ειδικά, πρέπει να είναι σε θέση να τροφοδοτεί το σύστημα ανίχνευσης πυρκαγιάς για 36 ώρες, και μετά από αυτό πρέπει να είναι σε θέση να λειτουργεί ο συναγερμός πυρκαγιάς για 30 λεπτά [FSS Ch. 9 §2.2.4]. Είναι είτε η γεννήτρια έκτακτης ανάγκης του πλοίου (+ μεταβατική πηγή ισχύος έκτακτης ανάγκης) είτε οι ειδικές μπαταρίες συσσωρευτών [FSS Ch. 9 §2.2.4 & 2.2.5].

Πρέπει να παρέχεται ένας αυτόματος διακόπτης εναλλαγής για τη διαχείριση της μετάβασης μεταξύ της κύριας και της πηγής έκτακτης ανάγκης, και ένα σφάλμα δεν πρέπει να μπορεί να οδηγήσει στην απώλεια και των δύο τροφοδοτικών.

Δεν γίνεται αποδεκτή προσωρινή απώλεια της ικανότητας ανίχνευσης πυρκαγιάς λόγω αυτού του διακόπτη εναλλαγής. Επιπλέον, μπορεί να απαιτείται μια μεταβατική μπαταρία εάν η προσωρινή απώλεια ισχύος μπορεί να βλάψει το σύστημα ανίχνευσης πυρκαγιάς σύμφωνα με τον FSS Ch. 9. §2.2.2.

Παρόλο που η ηχητική ειδοποίηση δεν απαιτείται επίσημα να είναι μέρος του συστήματος ανίχνευσης πυρκαγιάς, το IACS UI SC35 καθιστά σαφές ότι πρέπει να τροφοδοτείται από μια κύρια και έκτακτη πηγή ενέργειας και από τη μεταβατική πηγή έκτακτης ανάγκης όπου απαιτείται.

#### Μέγεθος της πηγής ισχύος

Η τροφοδοσία θα πρέπει να είναι επαρκής για λειτουργία με ενεργοποιημένους 100 ανιχνευτές ή όλους τους ανιχνευτές που παρέχονται επί του σκάφους εάν αυτός ο αριθμός είναι χαμηλότερος από 100 [FSS Ch. 9 §2.2.3].

#### Συνέπειες σφάλματος

Μετά από κάποιο ηλεκτρικό σφάλμα ή βλάβη:

- Η ικανότητα αναγνώρισης πρέπει να διατηρείται σε ολόκληρο τον τομέα, εκτός από τον ελαττωματικό ανιχνευτή (FSS Ch. 9 §2.1.6.1, που ισχύει για addressable συστήματα)

- Η αρχική διαμόρφωση θα πρέπει να αποκατασταθεί [FSS Ch. 9 §2.1.6.2, ισχύει για addressable συστήματα)

### **Προσωρινή αποσύνδεση**

Σύμφωνα με τον FSS Ch. 9 §2.1.1, επιτρέπεται η προσωρινή αποσύνδεση των ανιχνευτών πυρκαγιάς σε χώρους ro-ro κατά τη φόρτωση και την εκφόρτωση, υπό την προϋπόθεση:

- Οι ανιχνευτές σε άλλους χώρους παραμένουν λειτουργικοί
- Η περιπολία πυρκαγιάς διατηρείται στο χώρο ro-ro ενώ οι ανιχνευτές αποσυνδέονται
- Οι ανιχνευτές επανασυνδέονται αυτόματα μετά από μια προκαθορισμένη διάρκεια

Η MCA [UK Flag Administration] διευκρινίζει στις οδηγίες της ότι:

- Τα χειροκίνητα σημεία κλήσης και οι μηχανισμοί χειροκίνητης απελευθέρωσης δεν θα πρέπει να αποσυνδεθούν
- Η διάρκεια του χρονοδιακόπτη πρέπει να προσαρμόζεται στον χρόνο φόρτωσης/εκφόρτωσης
- Η κεντρική μονάδα πρέπει να υποδεικνύει εάν οι τομείς των ανιχνευτών είναι αποσυνδεδεμένοι ή όχι

## **3.4 Περιορισμός πυρκαγιάς**

### **3.4.1 Έννοια της οριζόντιας ζώνης**

Οι χώροι ro-ro περιλαμβάνονται σε ειδικές οριζόντιες ζώνες όπως ορίζονται από τον SOLAS II-2/20.2.2.1. Μια οριζόντια ζώνη μπορεί:

- Να επεκτείνεται σε όλο το μήκος του πλοίου
- Να συμπεριλαμβάνει χώρους ro-ro σε περισσότερα από ένα καταστρώματα, υπό την προϋπόθεση ότι το συνολικό καθαρό ύψος δεν υπερβαίνει τα 10m

Η έννοια της οριζόντιας ζώνης είναι παρόμοια με αυτήν της κύριας κατακόρυφης ζώνης, δηλαδή:

- Τα περισσότερα συστήματα ασφαλείας πρέπει να διαχωρίζονται / παρέχονται με τμήματα που δεν καλύπτουν περισσότερες από μία κατακόρυφη ή οριζόντια ζώνη
- Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στην ακεραιότητα έναντι πυρκαγιάς των ορίων της κατακόρυφης ή της οριζόντιας ζώνης, όπως περιγράφεται παρακάτω

### 3.4.2 Μόνωση έναντι πυρκαγιάς

Κατά γενικό κανόνα, τα όρια των χώρων ro-ro συμπίπτουν με εκείνα της οριζόντιας ζώνης πυρκαγιάς, ενώ καμιά φορά συμπεριλαμβάνονται κάποιοι μικροί χώροι που σχετίζονται άμεσα με το χώρο ro-ro και είναι γειτονικοί (π.χ. δωμάτιο εξαερισμού για τον εξαερισμό του χώρου ro-ro).

Σύμφωνα με τον SOLAS II-2/9.2.2.1, τα όρια της οριζόντιας ζώνης πρέπει να έχουν:

- Ακεραιότητα πυρκαγιάς A-60 σε επιβατηγά πλοία που μεταφέρουν περισσότερους από 36 επιβάτες (το A-0 είναι αποδεκτό όταν ο παρακείμενος / κάτω / πάνω χώρος είναι ανοιχτός χώρος καταστρώματος, χώροι υγιεινής, κενοί χώροι, δεξαμενές νερού, χώροι μηχανημάτων με μικρό ή καθόλου κίνδυνο πυρκαγιάς)
- Ακεραιότητα κατηγορίας A σε επιβατηγά πλοία που δεν μεταφέρουν περισσότερους από 36 επιβάτες

Σύμφωνα με τους κανονισμούς SOLAS II-2/20.5 και SOLAS II-2/9.2.2.4, τα όρια των χώρων ro-ro και χώρων ειδικής κατηγορίας έχουν:

- Ακεραιότητα πυρκαγιάς A-60 σε επιβατηγά πλοία που μεταφέρουν περισσότερους από 36 επιβάτες (το A-0 είναι αποδεκτό όταν ο παρακείμενος / κάτω / πάνω χώρος είναι ανοιχτός χώρος καταστρώματος, χώροι υγιεινής, κενοί χώροι, δεξαμενές νερού, χώροι μηχανημάτων με μικρό ή καθόλου κίνδυνο πυρκαγιάς, ή όταν ο παρακάτω χώρος είναι δεξαμενή καυσίμου, καθώς η μόνωση θα καταστεί άχρηστη λόγω του καυσίμου αν μπει στο χώρο της δεξαμενής και επίσης δεν είναι πρακτικό να χρησιμοποιηθεί μόνωση πάνω στο κατάστρωμα ro-ro)
- Ακεραιότητα πυρκαγιάς A-30 σε επιβατηγά πλοία που δεν μεταφέρουν περισσότερους από 36 επιβάτες (απαιτείται A-60 όταν είναι γειτονικοί με χώρους με πολύ υψηλό κίνδυνο πυρκαγιάς, το A-0 γίνεται αποδεκτό σε σχέση με χώρους με χαμηλό κίνδυνο πυρκαγιάς, περισσότερες λεπτομέρειες υπάρχουν στους πίνακες 9.3 και 9.4 του SOLAS II-2/9)

Σημειώνεται ότι αυτές οι απαιτήσεις μόνωσης προσαρμόζονται σε κλειστούς χώρους ro-ro. Για ανοιχτούς χώρους ro-ro, και σύμφωνα με τον SOLAS II-2/20.3.1.5, τα μόνιμα ανοίγματα στις πλευρές, το πίσω ή το μπροστινό μέρος του χώρου, πρέπει να είναι τοποθετημένα έτσι ώστε στην περίπτωση πυρκαγιάς στον χώρο φορτίου να μην τίθενται σε κίνδυνο οι χώροι ενδιαίτησης, υπηρεσίας και οι σταθμοί ελέγχου που βρίσκονται σε υπερκατασκευές και υπερκατασκευάσματα.

Υπενθυμίζεται ότι η ακεραιότητα πυρκαγιάς «A-30 ή A-60» σημαίνει:

- Τα μονωμένα καταστρώματα και οι φρακτές είναι κατάλληλα για να αντέχουν στις δοκιμές που καθορίζονται από τον FTP Code (έκθεση 30 λεπτών για A-30, έκθεση 60 λεπτών για A-60)
- Η μόνωση συνήθως χρειάζεται να επεκταθεί σε λεπτομέρειες, εσοχές, συγκεκριμένα σχήματα κ.λπ.
- Οι διεισδύσεις σωλήνων και αγωγών πρέπει επίσης να πληρούν τις σχετικές δοκιμές πυρκαγιάς
- Η εγκατάσταση επί του πλοίου πρέπει να συμβαδίζει με την ελεγμένη διάταξη

### 3.4.3 Απαιτήσεις θυρών

Οι πόρτες στα όρια των χώρων ro-ro πρέπει να έχουν την ίδια ακεραιότητα πυρκαγιάς με το διαχωριστικό στο οποίο είναι τοποθετημένες, να είναι εφοδιασμένες με μόνιμα συνδεδεμένα μέσα κλεισίματος [SOLAS II-2/9.4.1.1.1] και πρέπει να είναι δυνατό για ένα άτομο να ανοίξει και να κλείσει την πόρτα σε όποιον χώρο από τους 2 και αν βρίσκεται [SOLAS II-2/9.4.1.1.4].

Ο κανονισμός SOLAS II-2/9.6 απαιτεί ένδειξη θέσης (ανοιχτό / κλειστό) στη γέφυρα του πλοίου για κάθε πόρτα σε όρια χώρων ειδικής κατηγορίας.

### 3.4.4 Σύστημα εξαερισμού

Γενικά το σύστημα εξαερισμού που εξυπηρετεί χώρους ro-ro θα πρέπει να χρησιμοποιείται αποκλειστικά για αυτό τον χώρο και δεν θα πρέπει να εξυπηρετεί άλλους χώρους, σύμφωνα με τον SOLAS II-2/9.7.2.1.

Σύμφωνα με τον SOLAS II-2/9.7.2.2, οι αγωγοί εξαερισμού που εξυπηρετούν χώρους ro-ro και διασχίζουν χώρους διαμονής, χώρους υπηρεσίας ή σταθμούς ελέγχου πρέπει:

- Να είναι κατασκευασμένοι από χάλυβα με ενισχυμένο πάχος
- Να είναι είτε εφοδιασμένοι με αυτόματο αποσβεστήρα πυρκαγιάς και να έχουν μόνωση A-60 για τουλάχιστον 5 μέτρα πέρα από τον αποσβεστήρα είτε να

έχουν μόνωση A-60 σε όλους τους χώρους διαμονής, υπηρεσιών ή σταθμούς ελέγχου

Το ίδιο ισχύει για τους αγωγούς εξαερισμού που εξυπηρετούν χώρους διαμονής, χώρους υπηρεσίας ή σταθμούς ελέγχου εάν διέρχονται από χώρους ro-ro σύμφωνα με το SOLAS II-2/9.7.2.3.

### 3.5 Συστήματα κατάσβεσης

#### Γενικά

Κατά τον SOLAS II-2/20.6.1.1, απαιτείται, για τους χώρους ro-ro που δεν είναι χώροι ειδικής κατηγορίας και μπορούν να σφραγιστούν από μια θέση εκτός των χώρων φορτίου, να είναι εφοδιασμένοι με ένα από τα ακόλουθα συστήματα πυρόσβεσης:

- ένα σταθερό σύστημα πυρόσβεσης αερίου
- ένα σταθερό σύστημα πυρόσβεσης αφρού υψηλής διαστολής
- ένα σταθερό σύστημα πυρόσβεσης με βάση το νερό

Κατά τον SOLAS II-2/20.6.1.2, απαιτείται, για τους χώρους ro-ro που δεν μπορούν να σφραγιστούν και για τους χώρους ειδικής κατηγορίας, να είναι εφοδιασμένοι με ένα σταθερό σύστημα πυρόσβεσης με βάση το νερό, το οποίο προστατεύει όλα τα μέρη οποιουδήποτε καταστρώματος και πλατφόρμας οχημάτων σε αυτούς τους χώρους. Ένα τέτοιο σύστημα κατάσβεσης θα πρέπει να έχει:

- ένα μανόμετρο στην βαλβίδα πολλαπλής εισαγωγής
- καθαρή σήμανση σε κάθε βαλβίδα πολλαπλής εισαγωγής που δείχνει τους χώρους που εξυπηρετούνται
- οδηγίες συντήρησης και λειτουργίας
- επαρκή αριθμό βαλβίδων για την εξασφάλιση πλήρους αποστράγγισης του συστήματος

Επιπλέον, στον SOLAS II-2/20.6.1.3, αναφέρεται ότι η Σημαία μπορεί να επιτρέψει τη χρήση οποιουδήποτε άλλου σταθερού συστήματος πυρόσβεσης που έχει αποδειχθεί, από δοκιμή πλήρους κλίμακας, να μην είναι λιγότερο αποτελεσματική στον έλεγχο πυρκαγιάς, που ενδέχεται να συμβεί σε τέτοιο χώρο.

Σύμφωνα με τον FSS Ch. 1 §4, δεν επιτρέπεται η χρήση πυροσβεστικού μέσου το οποίο, κατά τη γνώμη της Σημαίας, είτε από μόνο του είτε υπό αναμενόμενες συνθήκες

χρήσης εκπέμπει τοξικά αέρια, υγρά και άλλες ουσίες σε ποσότητες που θέτουν σε κίνδυνο ανθρώπους.

### Πρόσθετες απαιτήσεις σχεδίασης

Σύμφωνα με τη δημοσίευση MSC.1/Circ.1430 που έγινε το 2018 ορίστηκαν αναθεωρημένες οδηγίες για την σχεδίαση και την έγκριση των συστημάτων κατάσβεσης με βάση το νερό που απευθύνονται σε χώρους ro-ro και χώρους ειδικής κατηγορίας. Αυτές οι οδηγίες θα τεθούν σε εφαρμογή κατά την έγκριση των συστημάτων κατάσβεσης από την αρχή του 2021.

Στους παρακάτω πίνακες δίνεται η ελάχιστη απαιτούμενη πυκνότητα νερού παροχής (water discharge density) και η ελάχιστη περιοχή κάλυψης (coverage area) των συστημάτων για καταστρώματα ανάλογα με το ύψος τους.

Type of system	Minimum water discharge density (mm/min)	Minimum coverage area
Wet pipe system	6.5	280 m <sup>2</sup>
Dry pipe or pre-action system	6.5	280 m <sup>2</sup>
Deluge system	5	2 x 20m x το ολικό πλάτος του χώρου προς προστασία

Πίνακας 6: Ελάχιστη απαιτούμενη πυκνότητα νερού παροχής και ελάχιστη περιοχή κάλυψης για κατάστρωμα ύψους 2,5m και κάτω [MSC.1/Circ.1430, 2018]

Type of system	Minimum water discharge density (mm/min)	Minimum coverage area
Wet pipe system	15	280 m <sup>2</sup>
Dry pipe or pre-action system	15	365 m <sup>2</sup>
Deluge system	10	2 x 20m x το ολικό πλάτος του χώρου προς προστασία

Πίνακας 7: Ελάχιστη απαιτούμενη πυκνότητα νερού παροχής και ελάχιστη περιοχή κάλυψης για κατάστρωμα ύψους μεγαλύτερου από 2,5m και μικρότερου από 6,5m [MSC.1/Circ.1430, 2018]

Type of system	Minimum water discharge density (mm/min)	Minimum coverage area
Wet pipe system	20	280 m <sup>2</sup>
Dry pipe or pre-action system	20	365 m <sup>2</sup>
Deluge system	15	2 x 20m x το ολικό πλάτος του χώρου προς προστασία

Πίνακας 8: Ελάχιστη απαιτούμενη πυκνότητα νερού παροχής και ελάχιστη περιοχή κάλυψης για κατάστρωμα ύψους μεγαλύτερου από 6,5m και μικρότερου από 9m [MSC.1/Circ.1430, 2018]

Ακόμα διευκρινίζεται ότι οι αυτόματοι ψεκαστήρες ή ακροφύσια που προορίζονται για καταστρώματα με ελεύθερο ύψος ίσο ή μικρότερο από 2,5 m πρέπει να έχουν ονομαστικό εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας μεταξύ 57 °C και 79 °C και τυπικά χαρακτηριστικά απόκρισης. Εάν απαιτείται από τις συνθήκες περιβάλλοντος, μπορεί να είναι αποδεκτές υψηλότερες βαθμολογίες θερμοκρασίας. Αντίστοιχα για καταστρώματα με ελεύθερο ύψος μεγαλύτερο από 2,5 m πρέπει να έχουν ονομαστικό εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας μεταξύ 121 °C και 149 °C και τυπικά χαρακτηριστικά απόκρισης.

### **Διάταξη αποστράγγισης και άντλησης**

Σύμφωνα με τον SOLAS II-2/20.6.1.4, στην περίπτωση συστημάτων πυρόσβεσης ψεκασμού νερού σταθερής πίεσης, ενόψει της σοβαρής απώλειας ευστάθειας που μπορεί να προκύψει λόγω της συσσώρευσης μεγάλων ποσοτήτων νερού στα καταστρώματα κατά τη λειτουργία του συστήματος, οι ακόλουθες διατάξεις απαιτούνται:

1. Στους χώρους πάνω από το κατάστρωμα στεγανών, πρέπει να τοποθετούνται ευδιαίοι έτσι ώστε να διασφαλίζεται ότι το νερό αυτό απορρίπτεται ταχέως απευθείας στη θάλασσα [MSC.1/Circ.1320]
2. Στους χώρους κάτω από το κατάστρωμα στεγανών, η Σημαία μπορεί να απαιτήσει την παροχή επιπλέον από τις υπάρχοντες εγκαταστάσεις άντλησης. Σε αυτήν την περίπτωση, το μέγεθος του συστήματος αποστράγγισης θα είναι τέτοιο ώστε να απομακρύνει τουλάχιστον το 125 % της συνδυασμένης δυναμικότητας και των δύο αντλιών του συστήματος ψεκασμού ύδατος καθώς και του απαιτούμενου αριθμού ακροφυσίων εύκαμπτων σωλήνων πυρός. Η λειτουργία των βαλβίδων του συστήματος αποστράγγισης θα πραγματοποιείται εξωτερικά του προστατευμένου χώρου σε μια θέση κοντά στα όργανα ελέγχου του συστήματος πυρόσβεσης. Τα φρεάτια των υδροσυλλεκτών θα έχουν επαρκή δυναμικότητα και θα τοποθετούνται στο πλευρικό περίβλημα του πλοίου και σε απόσταση μεταξύ τους όχι μεγαλύτερη από 40 μέτρα σε κάθε στεγανό διαμέρισμα.

### **Μεταφορά επικίνδυνων υλικών – συστήματα ψεκασμού νερού**

Σύμφωνα με τον SOLAS II-2/19.3.9, κάθε ανοιχτός χώρος ro-ro με κατάστρωμα πάνω από αυτόν και κάθε χώρος που θεωρείται κλειστός χώρος ro-ro που δεν είναι ικανός να σφραγιστεί, πρέπει να είναι εφοδιασμένος με εγκεκριμένο σύστημα ψεκασμού νερού σταθερής πίεσης για χειροκίνητη λειτουργία, το οποίο προστατεύει όλα τα μέρη του καταστρώματος και την πλατφόρμα οχημάτων στο χώρο, εκτός αν η Σημαία επιτρέπει



τη χρήση οποιουδήποτε άλλου σταθερού συστήματος πυρόσβεσης που έχει αποδειχθεί με δοκιμή πλήρους κλίμακας να είναι το ίδιο αποτελεσματική.

Ωστόσο, οι ρυθμίσεις αποστράγγισης και άντλησης πρέπει να είναι τέτοιες ώστε να αποτρέπεται η δημιουργία ελεύθερων επιφανειών. Το μέγεθος του συστήματος αποστράγγισης θα είναι τέτοιο ώστε να απομακρύνει τουλάχιστον το 125 % της συνδυασμένης δυναμικότητας και των δύο αντλιών του συστήματος ψεκασμού ύδατος καθώς και του απαιτούμενου αριθμού ακροφυσίων εύκαμπτων σωλήνων πυρός. Η λειτουργία των βαλβίδων του συστήματος αποστράγγισης θα πραγματοποιείται εξωτερικά του προστατευμένου χώρου σε μια θέση κοντά στα όργανα ελέγχου του συστήματος πυρόσβεσης.

Τα φρεάτια των υδροσυλλεκτών θα έχουν επαρκή δυναμικότητα και θα τοποθετούνται στο πλευρικό περίβλημα του πλοίου και σε απόσταση μεταξύ τους όχι μεγαλύτερη από 40 μέτρα σε κάθε στεγανό διαμέρισμα. Εάν αυτό δεν είναι εφικτό, η δυσμενής επίδραση στην ευστάθεια του προστιθέμενου βάρους και στην ελεύθερη επιφάνεια του νερού λαμβάνεται υπόψη στον βαθμό που κρίνει απαραίτητο η Σημαία για την έγκριση των στοιχείων σχετικά με την ευστάθεια.

### 3.6 Εκκένωση

#### Γενικά

Λαμβάνονται ορισμένες προφυλάξεις, έτσι ώστε σε περίπτωση πυρκαγιάς στους χώρους ro-ro, να μην υπάρξει κίνδυνος διαφυγής από άλλους χώρους και μέχρι και για την εκκένωση πλοίων. Κατά γενικό κανόνα, οι κατακόρυφοι τρόποι διαφυγής κατηγοριοποιούνται ως «κλιμακοστάσια» (stairways) (κατηγορία (2) σε επιβατηγά πλοία που μεταφέρουν περισσότερους από 36 επιβάτες και κατηγορία (4) σε επιβατηγά πλοία που μεταφέρουν όχι περισσότερους από 36 επιβάτες), γεγονός που διασφαλίζει ότι είναι κατάλληλα μονωμένα σε σχέση με τους χώρους ro-ro.

Επιπλέον, σε επιβατηγά πλοία που μεταφέρουν περισσότερους από 36 επιβάτες, μια συγκεκριμένη κατηγορία (κατηγορία (4)) ορίζεται για την κάλυψη των χώρων «Σταθμοί εκκένωσης και εξωτερικές διαδρομές διαφυγής», έτσι ώστε να απαιτείται μόνωση A-60 μεταξύ των χώρων ro-ro και των σταθμών συγκέντρωσης και των περιοχών αποθήκευσης των σωστικών μέσων.

## **Προστασία των διαδρομών διαφυγής**

Ο SOLAS περιλαμβάνει διατάξεις για την προστασία των μέσων διαφυγής από χώρους κάτω από τους χώρους ro-ro, με σκοπό να μην αποκοπούν σε περίπτωση πυρκαγιάς:

- Οι χώροι διαμονής, οι χώροι υπηρεσίας και οι σταθμοί ελέγχου πρέπει να διαθέτουν δύο μέσα διαφυγής, ένα από τα οποία είναι μια κλειστή σκάλα που παρέχει συνεχές καταφύγιο από την πυρκαγιά μέχρι το κατάστρωμα επιβίβασης στα σωστικά μέσα. Η διαδρομή αυτή πρέπει να είναι μονωμένη ως κλιμακοστάσιο, σύμφωνα με τον SOLAS II-2/13.3.2.
- Οι μηχανολογικοί χώροι πρέπει να διαθέτουν δύο μέσα διαφυγής. Επιπλέον, ο SOLAS II-2/13.5.2 καθιστά σαφές ότι, για χώρους στο μηχανοστάσιο όπου το πλήρωμα κάνει υπηρεσίες, μία από τις δύο οδούς διαφυγής δεν πρέπει να διέρχεται από χώρους ro-ro.

Επιπλέον, ο SOLAS II-2/13.7 περιλαμβάνει μια σειρά διατάξεων που αποσκοπούν στο να καταστούν τις διαδρομές διαφυγής σε επιβατηγά/οχηματαγωγά πλοία ro-ro όσο το δυνατόν πιο εύκολη και άμεση, με σκοπό την επιτάχυνση της εκκένωσης, εάν χρειαστεί. Συγκεκριμένα:

- Ελάχιστος αριθμός αλλαγών στην κατεύθυνση κατά μήκος μιας διαδρομής
- Δεν πρέπει να χρειάζεται το πέρασμα από τη μία πλευρά του πλοίου στην άλλη κατά τη διαφυγή
- Οι επιβάτες δεν πρέπει να χρειάζεται να ανέβουν ή να κατέβουν πάνω από 2 καταστρώματα για να φτάσουν σε σταθμό συγκέντρωσης
- Απαιτούνται εξωτερικές οδοί διαφυγής από ανοιχτά καταστρώματα

## **Συστήματα που θα πρέπει να διατηρηθούν λειτουργικά σε περίπτωση ατυχήματος**

Σύμφωνα με τον SOLAS II-2/22, που ισχύει για επιβατηγά πλοία μήκους άνω των 120 m ή άνω των 3 κύριων κάθετων ζωνών, απαιτείται τα ακόλουθα συστήματα να παραμείνουν σε λειτουργία στις υπόλοιπες ζώνες σε περίπτωση πυρκαγιάς σε οποιαδήποτε κάθετη ή οριζόντια ζώνη:

- Fire main
- Εσωτερικά και εξωτερικά συστήματα επικοινωνίας
- Bilge systems
- Φωτισμός κατά μήκος διαδρομών διαφυγής, σε σταθμούς συγκέντρωσης και σε σταθμούς επιβίβασης σε σωστικά μέσα
- Συστήματα καθοδήγησης για εκκένωση

## 4 Μελέτη πρόσφατων ατυχημάτων

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται, αρχικά, τα στατιστικά των ατυχημάτων που έχουν συμβεί τα τελευταία χρόνια που αφορούν τους χώρους go-go στα επιβατηγά-οχηματαγωγά πλοία. Θεωρείται σημαντικό, πριν και από την εκπόνηση των πειραμάτων για το υπολογιστικό κομμάτι, να βγουν κάποια συμπεράσματα από τις έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί. Οι συχνότερες πηγές ανάφλεξης, η ταχύτητα ανίχνευσης πυρκαγιάς από τα συστήματα επί του πλοίου, η αντίδραση του πληρώματος και οι διαδικασίες που ακολουθούνται σε κάθε περίπτωση, η αποτελεσματικότητα των συστημάτων κατάσβεσης και το μέσο που χρησιμοποιείται αποτελούν τους πιο σημαντικούς παράγοντες για την τελική κατάληξη του ατυχήματος.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου καταγράφονται τα 2 πιο πρόσφατα ατυχήματα, για τα οποία υπάρχουν αξιόπιστες πληροφορίες. Η μεμονωμένη μελέτη ενός ατυχήματος μπορεί να προσφέρει πιο ακριβείς πληροφορίες για τα συγκεκριμένα προβλήματα που εμφανίζονται και την εξέλιξη της κατάστασης επάνω στο πλοίο. Τα 2 περιστατικά που μελετώνται είναι το Norman Atlantic που συνέβη τον Δεκέμβριο του 2014 και το Sorrento που συνέβη τον Απρίλιο του 2015.

### 4.1 Στατιστικά

#### 4.1.1 Γενικά

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός παραγόντων που μπορούν να επηρεάσουν την εξέλιξη και την έκβαση μιας πυρκαγιάς σε ένα πλοίο. Η καταγραφή των συμβάντων και η μελέτη τους μπορεί να μας δώσει πολύ σημαντικά αποτελέσματα, τα οποία μπορούν να βοηθήσουν είτε στην ελάττωση εμφάνισης πυρκαγιών είτε στην καλύτερη αντιμετώπιση τους. Μια σημαντική και συγκεντρωτική τέτοια μελέτη πραγματοποιήθηκε από τον DNV GL τον Απρίλιο του 2016 [DNV GL, 2016], της οποίας τα ευρήματα παρουσιάζονται παρακάτω.

Το 2005 ο νηογνώμονας DNV GL είχε δημοσιεύσει μια αναφορά (αναγνωρίζοντας και μελετώντας 25 περιστατικά) και λόγω των πιο πρόσφατων ατυχημάτων και γενικότερα της εκτεταμένης κουβέντας πάνω στο θέμα θεωρήθηκε χρήσιμο να ξαναγίνει μια τέτοια έρευνα για τα τελευταία χρόνια (2005-2016), μελετώντας ταυτόχρονα τους καινούριους κανόνες και τα νέα φορτία.

Ένας μεγάλος αριθμός καταγραφών δεν έχει επιβεβαιωθεί με σιγουριά, οπότε οι πληροφορίες εξάγονται μόνο από τα σίγουρα γεγονότα. Συγκεκριμένα, ο χρόνος των γεγονότων μπορεί να είναι μια εκτίμηση, αλλά τα συνολικά συμπεράσματα πρέπει, λαμβάνοντας και τις 35 πυρκαγιές υπόψη, να είναι αρκετά ισχυρά. Ακόμα, αξίζει να

σημειωθεί ότι μια θετική τάση για τα τελευταία 11 χρόνια δεν εγγυάται απαραίτητα την επιτυχή λειτουργία για το μέλλον. Θα πρέπει να γίνεται η ανάλογη προσαρμογή στις ανάλογες συνθήκες που μόνιμα μεταβάλλονται.

Σημειώνεται ότι για τα ονόματα των πλοίων, κάποιες καταχωρίσεις δεν έχουν δημοσιευτεί στην αναφορά του DNV GL, έτσι όπου αναφέρεται όνομα 20xx.Yz (xx = χρόνος ατυχήματος, Y = τύπος πλοίου, με R για RoPax, C για cargo ro-ro, V για vehicle carrier, z = πυρκαγιά νούμερο z για τον συγκεκριμένο χρόνο)

Στην μελέτη του DNV GL συμπεριλήφθηκαν μόνο πλοία που συμμορφώνονται με τους κανονισμούς του SOLAS και τοπικά ferries που θεωρείται ότι κατά βάση ακολουθούν αυτά τα πρότυπα. Στην ανάλυση έγινε διαχωρισμός, ανάλογα με τον τύπο του πλοίου που υπήρξε περιστατικό πυρκαγιάς, σε RoPax vessels, Vehicle carriers και General Ro-Ro cargo vessels. Η κατηγοριοποίηση αυτή έγινε λόγω της διαφοροποίησης στους κανονισμούς, στο προοριζόμενο φορτίο, στη διαρρύθμιση των χώρων και στον τύπο των μέσων κατάσβεσης που αφορούν τους χώρους ro-ro.

Εντοπίστηκαν και μελετώνται 35 πυρκαγιές μέσα σε χώρους ro-ro στο διάστημα 2005-2016. Συγκριτικά, την περίοδο 1990-2003, στην οποία αναφερόταν η προηγούμενη μελέτη, είχαν αναγνωριστεί 25 πυρκαγιές. Η διαφορά μπορεί να δικαιολογηθεί από την αύξηση του στόλου και από την καλύτερη καταγραφή, αλλά παρατηρείται ότι κατά την περίοδο 1990-2003 τέτοια περιστατικά σημειώνονταν κατά κόρον σε εμπορικά πλοία, ενώ πλέον (2005-2016) η συχνότητα είναι αυξημένη στα RoPax πλοία.

#### 4.1.2 RoPax vessels



Εικόνα 1: Victoria Seaways, RoPax vessel [MarineTraffic]

Στα RoPax πλοία για το διάστημα 2005-2016 αναγνωρίστηκαν 18 περιστατικά σχετιζόμενα με πυρκαγιά. Υποθέτοντας ότι ο στόλος του συγκεκριμένου τύπου αποτελείται από 750 πλοία μεγέθους άνω των 4000 GRT, η συχνότητα ανέρχεται στις  $2.0 \times 10^{-3}$  πυρκαγιές ανά έτος πλοίου (ship-year). Οι 5 από αυτές τις πυρκαγιές προκάλεσαν σημαντικές ζημιές, εγκατάλειψη σκάφους και ακόμα και τραυματισμούς ή θανάτους, οδηγώντας σε  $0.56 \times 10^{-3}$  υποθέσεις ανά έτος πλοίου. Μια τέτοια συχνότητα θεωρείται αρκετά υψηλή, οπότε αποτελεί ένα κίνδυνο που πρέπει να διευθετηθεί.

Date	Ship	Built	GRT	Cause	Comments
2015 October	2015.R1	2001	44,437	Car (charging caravan?)	Quick reaction, close to igniting caravan
2015 August	Sunflower Daisetsu	2001	11,401	Reefer trailer	1 fatality/domestic?
2015 April	Sorrento	2003	25,984	(-)	4 crew injured
2014 December	Norman Atlantic	2009	26,904	(Reefer unit?)	9 fatalities, 19 missing
2014 April	2014.R1	2006	12,895	Started in truck	
2013 June	2013.R2	2000	33,724	(-)	(minor fire)
2013 April	Victoria Seaways	2009	25,675	Electrical fault in a second-hand car	
2013 January	2013.R1	1986	19,504	Trailer on car deck	
2012 November	2012.R1	1979	27,239	(-)	
2010 November	Pearl of Scandinavia	1989	40,231	Un-authorized charging of electric car	
2010 November	Mecklenburg-Vorpommern	1996	37,987	Battery of minibus	
2010 October	Lisco Gloria	2002	20,140	Presumably power supply to reefer unit	Total loss
2010 June	Commodore	1999	14,000	Power supply to reefer unit	Major damages
2009 May	2009.R2	1999	31,041	(-)	
2009 January	2009.R1	2003	35,736	(Undeclared) items inside truck	Extinguished by deluge
2008 April	2008.R1	1980	12,175	Originated presumably in lorry	
2007 August	2007.R1	2001	36,468	Truck loaded with aluminium powder	
2005 May	2005.R1	1988	34,384	Started in car	(minor fire)

Πίνακας 9: Πυρκαγιές σε RoPax [DNV GL, 2016]

Τα πλοία που συμπεριλήφθηκαν στην μελέτη θεωρούνται σχετικά καινούρια. Μόνο 2 πλοία είναι κατασκευασμένα πριν από την εφαρμογή του SOLAS '74 (το 1979 και το 1980), ενώ 3 κατασκευάστηκαν την δεκαετία του '80 (1986, 1988 και 1989). Σε κανένα από αυτά δεν παρατηρήθηκε κάποιο σοβαρό περιστατικό.

Οι βλάβες σε μονάδες ψύξης ή σε παροχή ρεύματος για αυτές τις μονάδες είναι η πιο συχνή αιτία και αποτελεί την πιο πιθανή αιτία για τις 4 από τις 5 μεγάλες πυρκαγιές που σημειώθηκαν. Άλλες αιτίες είναι τα ηλεκτρικά συστήματα στα αυτοκίνητα, τα

λεωφορεία και τα φορτηγά, καθώς και τα φορτία που μπορεί να μεταφέρουν τα φορτηγά. Τρία από τα ατυχήματα οδήγησαν σε ολική απώλεια του πλοίου, ενώ και στις 3 περιπτώσεις η φωτιά εξελίχθηκε σε ανοιχτό χώρο ro-ro. Οι άλλες δυο περιπτώσεις που επισημάνθηκαν ως σοβαρές, εκτυλίχθηκαν σε κλειστό ro-ro χώρο.

Η χρήση των κατασβεστικών συστημάτων έπαιξε σημαντικό ρόλο στις πυρκαγιές που προκάλεσαν σοβαρές ζημιές. Στις δυο περιπτώσεις, το σύστημα δεν ενεργοποιήθηκε για το κατάστρωμα που είχε ξεκινήσει η φωτιά (Norman Atlantic και Lisco Gloria), ενώ σε μια άλλη περίπτωση η ενεργοποίηση πραγματοποιήθηκε με καθυστέρηση 25 λεπτών (Commodore). Οι επιτυχημένες αποστολές πυρόσβεσης οφείλονται στην άμεση αντίδραση (ενεργοποίηση συστήματος κατάσβεσης ή γρήγορη προσέγγιση από την ομάδα πυρόσβεσης επί του πλοίου).

### 4.1.3 Cargo Ro-Ro vessels



Εικόνα 2: Repubblica Di Roma, cargo ro-ro vessel [MarineTraffic]

Στα Cargo Ro-Ro πλοία για το διάστημα 2005-2016 αναγνωρίστηκαν 8 περιστατικά σχετιζόμενα με πυρκαγιά. Υποθέτοντας ότι ο στόλος του συγκεκριμένου τύπου αποτελείται από 560 πλοία μεγέθους άνω των 4000 GRT, η συχνότητα ανέρχεται στις  $1.19 \times 10^{-3}$  πυρκαγιές ανά έτος πλοίου (ship-year). Μία από αυτές τις περιπτώσεις κατέληξε σε ολική απώλεια, ενώ ένα ακόμα πλοίο δεν επέστρεψε σε λειτουργία, λόγω ηλικίας και κατάστασης αγοράς. Έτσι η συχνότητα ανέρχεται στις  $0.30 \times 10^{-3}$  σοβαρές πυρκαγιές ανά έτος πλοίου.

Date	Ship	Built	GRT	Cause	Comments
2015 March	2015.C2	1980	4,688	(-)	
2015 February	2015.C1	1991	7,578	Started in items (cars?) stored on a closed Ro-Ro deck	
2014 April	Repubblica Di Roma	1992	42,001	(-)	Did not return to service
2013 December	Corona Seaways	2008	25,609	Electrical defect in one of the vehicles' engine starting systems	Some cars/trucks damaged. Limited damage to structure. CO <sub>2</sub> used after 15 minutes
2013 November	2013.C1	2000	24,196	Shifting of cargo on open deck	On fire for hours (weather deck fire). Some structural damage
2013 May	Atlantic Cartier (ConRo)	1985	58,358	(-)	
2008 February	UND Adriyatik	2001	26,469	(-)	Total loss. Deluge did not operate. Loss of power
2005 January	2005.C1	2000	21,005	Shifting of cargo on weather deck	On fire for several hours (weather deck fire). Some structural damage

Πίνακας 10: Πυρκαγιές σε πλοία γενικού φορτίου ro-ro [DNV GL, 2016]

Τα αίτια αναγνωρίστηκαν μόνο για τις 3 από τις περιπτώσεις, με δυο από αυτές να αποδίδονται σε μετακίνηση φορτίου λόγω καιρικών συνθηκών ενώ η τρίτη προήλθε από αποθηκευμένο φορτίο σε χώρο ro-ro. Για την προστασία των χώρων φορτίου τα συγκεκριμένα πλοία μπορούν να διαθέτουν είτε deluge σύστημα είτε σύστημα με βάση το CO<sub>2</sub>. Η ολική απώλεια αποδίδεται στην αδυναμία χρήσης του συστήματος κατάσβεσης (deluge system), ενώ δεν υπάρχουν αρκετά δεδομένα για το πλοίο που δεν επέστρεψε σε υπηρεσία. Υπήρξαν δύο σημαντικές φωτιές σε weather deck, οι οποίες διήρκεσαν για αρκετές ώρες. Όμως τα πλοία δεν καταστράφηκαν εντελώς (το ένα υπέστη μέτριες δομικές ζημιές), καθώς ο καπνός και η θερμότητα διασκορπίζονταν από τον αέρα.

#### 4.1.4 Vehicle carriers



Εικόνα 3: Asian Empire, vehicle carrier [MarineTraffic]

Στα Vehicle carriers για το διάστημα 2005-2016 αναγνωρίστηκαν 9 περιστατικά σχετιζόμενα με πυρκαγιά. Υποθέτοντας ότι ο στόλος του συγκεκριμένου τύπου αποτελείται από 825 πλοία μεγέθους άνω των 4000 GRT, η συχνότητα ανέρχεται στις  $0.91 \times 10^{-3}$  πυρκαγιές ανά έτος πλοίου (ship-year). Τρεις από αυτές τις περιπτώσεις οδήγησαν σε σοβαρές δομικές παραμορφώσεις και υπήρξε και ένας θάνατος κατά την απελευθέρωση CO<sub>2</sub>. Έτσι η συχνότητα ανέρχεται στις  $0.40 \times 10^{-3}$  σοβαρές πυρκαγιές ανά έτος πλοίου.

Date	Ship	Built	GRT	Cause	Comments
2015 June	2015.V1	1991	52,288	ABS brakes/electric system in a used car	
2014 April	Asian Empire	1998	71,383	(-)	Crew abandoned vessel
2013 October	2013.V1	2007	38,651	(-)	
2012 December	2012.V3	2010	60,396	(-)	
2012 August	2012.V2	2007	55,775	(-)	
2012 March	2012.V1	2007	57,280	Shifting of cargo	CO <sub>2</sub> released after 20 minutes
2009 January	2019.V1	1981	45,365	(-)	Scrapped
2008 October	Pyxis	1986	43,425	(New) car, electric system?	1 fatality (CO <sub>2</sub> )
2007 July	2007.V1	2006	41,662	(-)	On fire for 6 hours/Extinguished by foam

Πίνακας 11: Πυρκαγιές σε vessel carriers [DNV GL, 2016]

Τα αίτια αναγνωρίστηκαν μόνο για τις 2 από τις περιπτώσεις, με μία από αυτές να αποδίδεται σε ένα καινούριο αυτοκίνητο (πιθανόν κάποια βλάβη στο ηλεκτρικό σύστημα) και η άλλη αποδίδεται σε μετακίνηση φορτίου λόγω καιρικών συνθηκών. Όλα τα πλοία είναι μεγάλα, από 38000 μέχρι 71000 GRT, καθένα από αυτά με χωρητικότητα μερικές χιλιάδες αυτοκίνητα. Το ρίσκο ανάφλεξης για κάθε όχημα είναι σχετικά μικρό, καθώς πρόκειται κυρίως για καινούρια αυτοκίνητα.

Ο χρόνος μέχρι την ενεργοποίηση του συστήματος κατάσβεσης (απελευθέρωση CO<sub>2</sub> σε όλες τις περιπτώσεις) ήταν περίπου 20 λεπτά, που δεν είναι περισσότερο από το χρόνο ενεργοποίησης συστημάτων deluge σε RoPax πλοία. Σε αρκετές περιπτώσεις, οι δομικές ζημιές δεν ήταν σοβαρές, ίσως λόγω του ελεγχόμενου εξαερισμού σε αυτούς του χώρους.

#### 4.1.5 Πηγές ανάφλεξης και χώροι εκκίνησης πυρκαγιάς

Οι πηγές ανάφλεξης δεν έχουν αναγνωριστεί για όλες τις περιπτώσεις. Ακόμα και οι αναφορές που υπάρχουν δεν επιβεβαιώνουν πάντα την πηγή, οπότε χρησιμοποιείται η πιο πιθανή πηγή ή η καλύτερη εκτίμηση. Στην περίπτωση ανακριβούς εκτίμησης, η πηγή θεωρείται άγνωστη. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 12



Cause	RoPax	Cargo Ro-Ro	Vehicle carriers	Total
Buses, trucks (not their cargo)	2	0	0	2
Cars (other than new)	2	1	2	5
New cars	-	0	1	1
Other vehicles (type not identified)	0	1	0	1
Cargo on trucks (incl. transported vehicles)	5	0	0	5
Reefer unit	4	0	0	4
Un-authorized charging of electric car	1	0	0	1
Shifting of cargo due to adverse weather	0	2	1	3
Unknown	4	4	6	14
<b>Total, all entries</b>	<b>18</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>35</b>

Πίνακας 12: Πηγές ανάφλεξης σύμφωνα με την μελέτη του DNV GL [DNV GL, 2016]

Υπολογίζοντας ανά όχημα, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι ο κίνδυνος η πυρκαγιά να ξεκινήσει σε όχημα, και ιδίως σε νέο όχημα, είναι σχετικά χαμηλός αν σκεφτεί κανείς ότι αυτό είναι το κύριο φορτίο (υπάρχουν μόνο εννέα επιβεβαιωμένες περιπτώσεις για την εξεταζόμενη περίοδο). Ωστόσο λαμβάνοντας υπόψη τον αριθμό των οχημάτων που μεταφέρονται σε πλοίο Ro-Ro, πρέπει ακόμη να θεωρείται και να αντιμετωπίζεται ως κίνδυνος.

Οι reefer μονάδες (ηλεκτροκίνητες ή ντιζελοκίνητες) δεν μεταφέρονται σε όλα τα πλοία ro-ro. Ακόμα και σε αυτά που μεταφέρονται, αντιπροσωπεύουν μικρό αριθμό σε σύγκριση με τα υπόλοιπα οχήματα επί του σκάφους. Χρησιμοποιώντας το RoPax ως παράδειγμα, έχουν καταγραφεί τόσες πυρκαγιές από φορτία-ψυγεία όσες και από οχήματα. Ο συχνότητα ανάφλεξης είναι συνεπώς σημαντικά υψηλότερη για αυτές τις μονάδες από ότι για τα οχήματα. Περαιτέρω, παρατηρείται ότι πολλές από αυτές τις πυρκαγιές ήταν σοβαρές, οπότε συνολικά συμπεραίνουμε ότι το συγκεκριμένο φορτίο χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή.

Η μετακίνηση του φορτίου (η ανάφλεξη γίνεται με τη ρήξη και διαρροή κάποιας δεξαμενής βενζίνης, με τη φθορά ηλεκτρικών καλωδίων ή με την τριβή που αναπτύσσεται), τουλάχιστον για τα cargo ro-ro πλοία και για τα vehicle carriers, αποτελεί μια αξιοσημείωτη πηγή ανάφλεξης (10-20%). Η βελτίωση της ασφάλειας του φορτίου ως προς τη μετακίνηση, η μελέτη των καιρικών συνθηκών και η κατάλληλη προσαρμογή θα μπορούσαν να είχαν αποτρέψει μερικές από αυτές τις πυρκαγιές.

Από μεμονωμένες περιπτώσεις (φόρτιση ηλεκτρικού οχήματος χωρίς την άδεια του πληρώματος) καθώς και από εικασίες (παραμονή επιβατών/λαθρεπιβατών στους χώρους ro-ro και χρήση εστιών για μαγείρεμα ή ακόμα και για την καταπολέμηση του κρύου) δεν αντλείται κάποιο συμπέρασμα, μέχρι να έχουμε επιβεβαιωμένες περιπτώσεις.

Η συσσώρευση αερίων που διαρρέουν από δεξαμενές καυσίμων οχημάτων και η πιθανή ανάφλεξή τους από τους ανεμιστήρες εξαερισμού ή από μη προστατευμένο

ηλεκτρικό εξοπλισμό έχει συμπεριληφθεί στους πιθανούς κινδύνους. Αυτό αναγνωρίζεται επίσης από τον SOLAS με εδραιωμένες απαιτήσεις για τους ρυθμούς εξαερισμού, την καθιέρωση προτύπων για τους ανεμιστήρες που εξυπηρετούν επικίνδυνες περιοχές και την προστασία του ηλεκτρικού εξοπλισμού.

Όσον αφορά τους χώρους από τους οποίους ξεκίνησε η πυρκαγιά παρατηρείται ότι και για τις 4 καταγεγραμμένες ολικές απώλειες (Norman Atlantic, Sorrento, Lisco Gloria, UND Adriyatik) ο τύπος του χώρου ήταν ανοιχτός χώρος ro-ro. Οι ανοιχτοί ro-ro χώροι παρουσιάζουν αρκετές δυσκολίες σε περίπτωση πυρκαγιάς, καθώς πρόκειται για πυρκαγιές με διαρκή εξαερισμό σε διαμέρισμα κάτω από χαλύβδινο κατάστρωμα, το οποίο αντανακλά θερμότητα και συσσωρεύει τα παραγόμενα αέρια. Μπορεί, πάντως, με σιγουριά να θεωρηθεί ότι η κατάσταση για τις ολικές απώλειες θα μπορούσε να είναι αρκετά καλύτερη αν το σταθερό σύστημα πυρόσβεσης, που και στις 4 περιπτώσεις ήταν deluge σύστημα, λειτουργούσε σωστά (μόνο στο Sorrento λειτούργησε κανονικά αλλά η πυρκαγιά είχε πάρει ήδη μεγάλες διαστάσεις).

Υπάρχουν 3 περιπτώσεις πλοίων που δεν επέστρεψαν σε λειτουργία από συνδυασμό παραγόντων (ζημιές, ηλικία πλοίου, κατάσταση αγοράς). Για τουλάχιστον τις 2 από αυτές η πυρκαγιά αναπτύχθηκε σε κλειστό χώρο ro-ro. Οι ζημιές που προκλήθηκαν θεωρούνται σημαντικά μικρότερες από εκείνες που υπήρχαν στις ολικές απώλειες

Έχουν αναγνωριστεί 2 φωτιές σε καταστρώματα καιρού (στα cargo ro-ro πλοία 2013.C1 και 2005.C1). Και οι 2 πυρκαγιές εξελίχθηκαν αρκετά, προκάλεσαν ζημιές στην κατασκευή του πλοίου, αλλά τελικά τέθηκαν υπό έλεγχο. Μπορεί να υποθεθεί ότι σε περίπτωση παρόμοιας έκτασης φωτιάς σε ανοιχτό κατάστρωμα η κατάσταση θα ήταν πιο δύσκολα διαχειρίσιμη.

Το μεγαλύτερο μέρος των υπόλοιπων ατυχημάτων σημειώθηκε σε κλειστό κατάστρωμα ro-ro και οι πυρκαγιές σβήστηκαν γρήγορα από το σύστημα κατάσβεσης (CO<sub>2</sub> ή deluge), σε συνδυασμό με την δράση των ομάδων πυρόσβεσης.

#### **4.1.6 Απόδοση συστημάτων ανίχνευσης και κατάσβεσης**

Τα πλοία RoPax είναι υποχρεωμένα να έχουν ανιχνευτές καπνού στους κλειστούς τους χώρους. Μέσο ανίχνευσης θα πρέπει να υπάρχει και για τους ανοιχτούς χώρους ro-ro, αλλά για τους συγκεκριμένους χώρους οι ανιχνευτές καπνού θεωρούνται αναξιόπιστοι και έτσι προτείνεται ο συνδυασμός με ανιχνευτές θερμότητας ή φλόγας. Δεν υπάρχουν απαιτήσεις ανίχνευσης για weather decks. Τα αποτελέσματα για τους χρόνους ανίχνευσης, όπου υπήρχαν αρκετά δεδομένα, φαίνονται στον Πίνακα 13.

Vessel	Time to detect	Means of detection, other findings
<b>RoPax vessels</b>		
Victoria Seaways	Quickly	Detected by fire-detection system and quickly confirmed by CCTV
Pearl of Scandinavia	Quickly	Detected by fire-detection and quickly confirmed by safety patrol and CCTV, but origin of fire was mistaken (subsequently incorrect deluge section was released – this was corrected after 15 to 20 minutes)
Mecklenburg-Vorpommern	Quickly	Detected by crew, which happened to be passing through the area. Alarm from fire detection system 2 minutes later on
Lisco Gloria	Quickly	Detected by fire patrol and almost simultaneously by the crew due to the fire-detection system. Fire confirmed by patrol and CCTV
Commodore Clipper	Quickly	Detected by fire-detection system (after 4 to 5 minutes). Alarm assumed to be a problem with the detection system; fire was therefore confirmed after a delay of 10 to 15 minutes
<b>Cargo Ro-Ro vessels</b>		
Corona Seaways	Quickly	Detected by fire-detection system and quickly confirmed by CCTV
2013.C1	Immediately	Visual detection (and confirmation) from bridge, as they could see the events on the forward weather deck
UND Adriyatik	Not known	Smoke detection on main deck. Fire quickly confirmed by crew member when entering the space (by then a large fire)
<b>Vehicle carriers</b>		
2012.V3	Quickly	Detected by fire-detection system and confirmed by safety team
Pyxis	Assumed to be quickly	Detected by sampling extraction smoke-detection system and confirmed by crew when entering the space

Πίνακας 13: Χρόνος και τρόπος ανίχνευσης [DNV GL, 2016]

Από τις 10 περιπτώσεις ο χρόνος ανίχνευσης ήταν σύντομος για τουλάχιστον τις 8 από αυτές, ενώ και στις άλλες δύο περιπτώσεις δεν υπάρχουν ενδείξεις για σημαντικές καθυστερήσεις. Η φωτιά αναγνωρίστηκε από το σύστημα ανίχνευσης σε 7 περιπτώσεις, από περιπολίες του πληρώματος σε 2 περιπτώσεις και ταυτόχρονα και από τα δύο σε 1 περίπτωση.

Ο χρόνος που χρειάζεται για να επιβεβαιωθεί η πυρκαγιά και η ακριβής τοποθεσία μπορεί να είναι το κομμάτι που χάνεται πολύτιμος χρόνος. Σε 5 περιπτώσεις έγινε γρήγορη επιβεβαίωση με τη χρήση συστήματος CCTV ή με κάποιο άτομο του πληρώματος που στάλθηκε στο χώρο, ενώ σε 1 περίπτωση η επιβεβαίωση έγινε απευθείας από την γέφυρα του πλοίου (πυρκαγιά σε weather deck). Σε 2 περιπτώσεις, υπήρξαν καθυστερήσεις (στην μία το πλήρωμα υπέθεσε πρόβλημα στο σύστημα ανίχνευσης και στην άλλη η εκτιμώμενη τοποθεσία της πυρκαγιάς ήταν εσφαλμένη στην αρχή αλλά γρήγορα διορθώθηκε).

Τα συστήματα απελευθέρωσης νερού (αναφέρονται ως deluge συστήματα) αφορούν του κλειστούς και ανοιχτούς ro-ro χώρους των RoPax πλοίων, καθώς τα συστήματα που χρησιμοποιούν CO<sub>2</sub> δεν αποτελούν επιλογή για αυτού του τύπου τα πλοία. Για τα cargo ro-ro και τα vehicle carriers χρησιμοποιούνται deluge συστήματα για τους χώρους που δεν μπορούν να σφραγιστούν, ενώ στους υπόλοιπους χώρους έχουν και την επιλογή του CO<sub>2</sub>. Στον Πίνακα 14 παρουσιάζονται κάποια δεδομένα, από τις περιπτώσεις που έχουν μελετηθεί και κατέγραψαν το χρόνο ενεργοποίησης του συστήματος από την εκκίνηση της πυρκαγιάς σε συνδυασμό με τις ζημιές που προκλήθηκαν.

Vessel	Time to release	Damages, other findings
<b>RoPax vessels</b>		
Victoria Seaways	3 minutes	Limited damages
2009.R1	“immediately”	Damages to some lorries
2015.R1	8 minutes	Limited to one car
Mecklenburg-Vorpommern	8 minutes	One trailer damaged as well as some steel structures above this one. Deluge valve hard to operate (release delayed 3 to 5 minutes as a result)
Commodore Clipper	25 minutes	Several lorries and some structures damaged
Pearl of Scandinavia	35 minutes	Incorrect section released after 17 minutes, but corrected after 35 minutes. Car burnt out, and some damages to the adjacent trailer plus some structures (a few days off-hire)
Lisco Gloria	Did not operate	Total loss of vessel
Norman Atlantic	Did not operate	Total loss of vessel
<b>Cargo Ro-Ro vessels</b>		
UND Adriyatik	Did not operate	Total loss of vessel

Πίνακας 14: Χρόνος ενεργοποίησης συστήματος deluge και ανάλογες ζημιές [DNV GL, 2016]

Υπάρχουν 3 περιπτώσεις όπου το σύστημα δεν ενεργοποιήθηκε και κατέληξαν σε ολική απώλεια. Οι αστοχίες λειτουργίας του συστήματος περιλαμβάνουν ένα συνδυασμό λόγων (λάθος χειρισμός, αστοχία στην έναρξη της αντλίας και διακοπή παροχής ρεύματος). Η σχέση μεταξύ γρήγορης χρήσης του συστήματος με τις προκληθέντες ζημιές είναι εμφανής.

Οι μόνες περιπτώσεις που δεν ακολουθούν αυτό το πρότυπο είναι εκείνη του Pearl of Scandinavia, στο οποίο η ενεργοποίηση στο σωστό κατάστρωμα άργησε 35 λεπτά αλλά οι καταστροφές ήταν περιορισμένες και του Sorrento που η ενεργοποίηση του συστήματος δεν άργησε πολύ (10-15 λεπτά) αλλά τελικώς καταγράφηκε ολική απώλεια. Τα περιστατικά αυτά μπορούν να εξηγηθούν, λόγω της διαφορετικής διαρρύθμισης των χώρων ro-ro και της πληρότητάς τους, του είδους και της ευκολίας ανάφλεξης του γύρω φορτίου, καθώς και λόγω της θέσης του πρώτου αναφλεγόμενου αντικειμένου.

Αξίζει, πάντως, να σημειωθεί ότι η ενεργοποίηση πραγματοποιήθηκε σε λιγότερο από 10 λεπτά για 4 περιπτώσεις. Αυτό αποδεικνύει ότι η γρήγορη αντιμετώπιση είναι εφικτή όταν παρέχονται σταθερά συστήματα κατάσβεσης με βάση το νερό.

Τα πλοία γενικού φορτίου ro-ro και τα vehicle carriers τυπικά προστατεύονται από συστήματα CO<sub>2</sub> χαμηλής ή υψηλής πίεσης. Το αέριο αυτό είναι θανατηφόρο στις ποσότητες που χρειάζονται για να εξουδετερωθεί μια πυρκαγιά, οπότε δίνεται μεγάλη σημασία στην τήρηση όλων των μέτρων ασφαλείας πριν την απελευθέρωσή του. Επιπροσθέτως, σε αντίθεση με τα deluge συστήματα, θα πρέπει να έχουν κλείσει όλοι οι αεραγωγοί πριν την απελευθέρωση του CO<sub>2</sub>. Έτσι, ανάλογα με το μέγεθος και τη γεωμετρία του χώρου φορτίου, η ενεργοποίηση του συγκεκριμένου συστήματος μπορεί να χρειαστεί περισσότερο από 10 με 15 λεπτά.

Vessel	Time to release	Damages, other findings
<b>Cargo Ro-Ro vessels / Vehicle carriers</b>		
Corona Seaways	15 minutes	Some cars/trucks damaged, limited damage to structure
2012.V3	20 minutes	Damage to several vehicles, some damage to structure
Pyxis	22 minutes	Damage to many vehicles, damages to structure. Chief engineer did not return from his search, later found dead

Πίνακας 15: Χρόνος ενεργοποίησης συστήματος CO<sub>2</sub> και ανάλογες ζημιές [DNV GL, 2016]

Για τις 3 περιπτώσεις, για τις οποίες υπάρχουν δεδομένα, παρατηρείται ότι οι ζημιές είναι αρκετά ελαφριές σε σχέση με τον χρόνο ενεργοποίησης του συστήματος. Η περιορισμένη παροχή αέρα, λόγω της απαίτησης για κλειστούς αεραγωγούς, μπορεί να δικαιολογήσει αυτά τα αποτελέσματα. Σαν συμπέρασμα μπορεί να εξαχθεί ότι ο απαιτούμενος χρόνος ενεργοποίησης θα πρέπει να είναι περίπου τα 10 λεπτά έτσι ώστε να περιοριστούν οι καταστροφές, σε αντίθετη περίπτωση πιθανότατα θα παρατηρηθούν σοβαρές ζημιές και η ασφάλεια του πλοίου θα τεθεί σε κίνδυνο.

## 4.2 Η περίπτωση του Norman Atlantic

### 4.2.1 Γενικά

Ένα από τα πιο πρόσφατα και σοβαρά ατυχήματα συνέβη στις 28 Δεκεμβρίου του 2014 στο πλοίο Norman Atlantic. Το MS Norman Atlantic είναι ένα roll-on/roll-off passenger ferry (ROPAX) που ανήκε στην εταιρία Visemar di Navigazione, ενώ ναυλωνόταν από τις ANEK Lines από το Δεκέμβριο του 2014. Το πλοίο είχε ξεκινήσει το νέο δρομολόγιο Πάτρα-Αγκώνα λίγες μέρες νωρίτερα και συγκεκριμένα στις 20 Δεκεμβρίου του 2014.



Εικόνα 4: Norman Atlantic [MarineTraffic]

Το πλοίο είναι κατασκευής του 2009, έχοντας 186.45 μέτρα μήκος, 25.6 μέτρα πλάτος και 6.79 μέτρα βύθισμα. Είναι εφοδιασμένο με δύο ντιζελοκίνητες μηχανές MAN B&W 9L48 / 60B που δίνουν τη δυνατότητα επίτευξης ταχύτητας 23.5 κόμβων. Η χωρητικότητα του πλοίου ανέρχεται στους 852 επιβάτες και περί τις 2286 μέτρα λωρίδες για οχήματα. Οι πληροφορίες που παρατίθενται, βασίζονται στην αναφορά “Fire on board of the ro-ro pax NORMAN ATLANTIC” του Ministry of Infrastructure and Transport.

### 4.2.2 Συμβάντα

Στις 28 Δεκεμβρίου του 2014, το πλοίο έπλεε στο στενό του Οτράντο στην Αδριατική Θάλασσα. Το σημείο εκκίνησης της διαδρομής ήταν το λιμάνι της Πάτρας και ο τελικός

προορισμός το λιμάνι της Ανκόνα, έχοντας μια ενδιάμεση στάση στην Ηγουμενίτσα. Στο συγκεκριμένο ταξίδι στο πλοίο ήταν επιβιβασμένοι 417 επιβάτες, το πλήρωμα αποτελούταν από 55 μέλη και συνολικά μεταφέρονταν 222 οχήματα.



Εικόνα 5: Διαδρομή και σημείο έναρξης πυρκαγιάς [Ministry of Infrastructure and Transport on Norman Atlantic]

Περίπου στις 04:15 ενεργοποιείται ο πρώτος συναγερμός πυρκαγιάς. Την στιγμή εκείνη το πλοίο βρισκόταν ακόμα στην Ελληνική Περιοχή Εύρεσης και Διάσωσης (Greek Search and Rescue Region – SRR) και απείχε 15 ναυτικά μίλια από τις Αλβανικές Ακτές, 25 μίλια από τις Ιταλικές Ακτές και 30 μίλια από τις Ελληνικές Ακτές. Πιο συγκεκριμένα η θέση παρουσιάζεται παρακάτω με την πρώτη κουκίδα να δείχνει το σημείο που γνωστοποιήθηκε η πυρκαγιά και την δεύτερη κουκίδα να δείχνει το σημείο εγκατάλειψης του πλοίου.

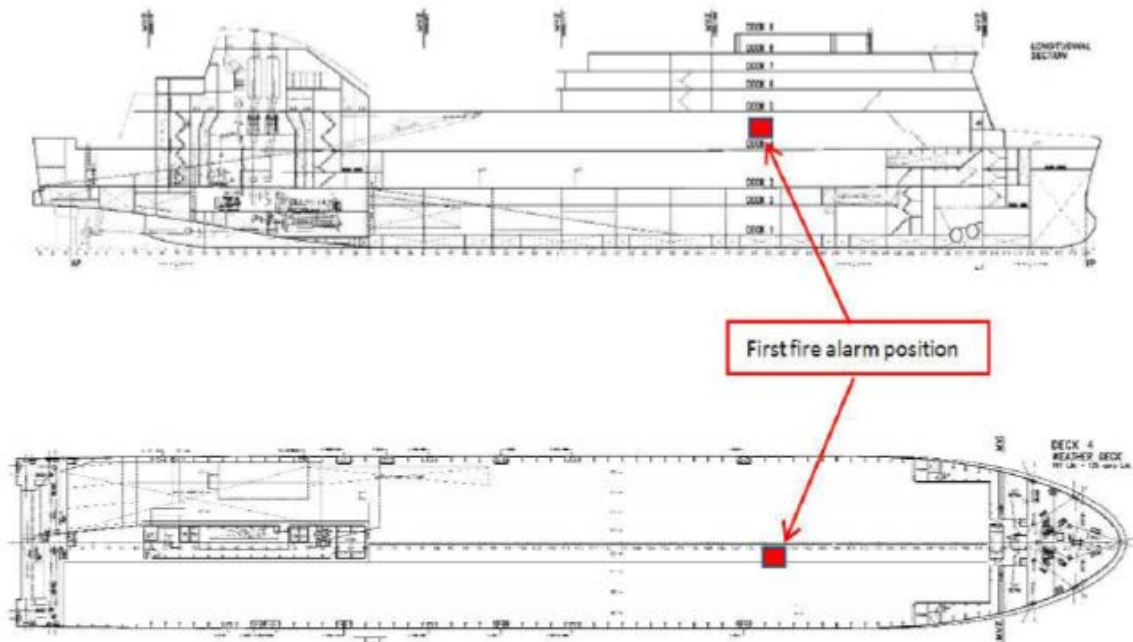


Εικόνα 6: Θέση γνωστοποίησης κινδύνου και θέση εγκατάλειψης πλοίου [Ministry of Infrastructure and Transport on Norman Atlantic]

Άτομο του πληρώματος εστάλη στο σημείο που ενεργοποιήθηκε ο ανιχνευτής για να ελέγξει την κατάσταση. Σύμφωνα με την έρευνα του Ministry of Infrastructure and Transport, ο ναύτης ανέφερε ότι στη συγκεκριμένη θέση υπήρχε μόνο ένα φορητό-ψυγείο, του οποίου η γεννήτρια λειτουργούσε κανονικά και δεν υπήρχαν ενδείξεις πυρκαγιάς. Μετά από 15 λεπτά ακούστηκε ο επόμενος συναγερμός.

Εν συνεχεία, ο Καπετάνιος, που βρισκόταν ήδη στην γέφυρα του πλοίου, αφού είδε φλόγες να μαίνονται στην δεξιά πλευρά του πλοίου και να εξέρχονται από τα πλαϊνά ανοίγματα του Deck 4, επιβεβαίωσε την ύπαρξη της φωτιάς και ενεργοποίησε τον γενικό συναγερμό. Διέταξε δεύτερο άτομο να πάει στο εν λόγω σημείο (Deck 4 Frame 156) για να ελέγξει την κατάσταση και την άμεση ενεργοποίηση του συστήματος κατάσβεσης. Σύμφωνα με τα στοιχεία που συγκεντρώθηκαν αργότερα, στο Drencher room ήταν ανοιχτές οι βάνες για το Deck 3 αντί για το Deck 4, στο οποίο εξελισσόταν αρχικά η πυρκαγιά.





Εικόνα 7: Θέση ενεργοποίησης του πρώτου συναγερμού [Ministry of Infrastructure and Transport on Norman Atlantic]

Το σκάφος διάσωσης που υπήρχε στην δεξιά πλευρά του πλοίου καταστράφηκε σύντομα από τις φλόγες, μαζί με μερικά ακόμα διασωστικά μέσα. Μετά από εντολή του Καπετάνιου το πλήρωμα κατέβασε το σκάφος διάσωσης, που υπήρχε στην αριστερή πλευρά, στο κατάστρωμα επιβίβασης. Στη συνέχεια, χωρίς κάποια καταγεγραμμένη εντολή 88 άτομα επιβιβάστηκαν και το σκάφος εισήλθε στο νερό. Η ίδια διαδικασία, χωρίς την έγκριση δηλαδή του Καπετάνιου, πραγματοποιήθηκε και για τις σωσίβιες λέμβους που βρίσκονταν στην αριστερή πλευρά του πλοίου.

Στο σημείο, αργότερα, άρχισαν να φτάνουν ελικόπτερα και πλοία που βρίσκονταν κοντά για να βοηθήσουν στην κατάσταση. Οι καιρικές συνθήκες, με ανέμους 45 κόμβων, δυσκόλεψαν το έργο των διασωστών από θαλάσσης, έτσι το μεγαλύτερο ποσοστό διασωθέντων (επιβατών και πληρώματος) προήλθε από αέρος. Συνολικά 452 άτομα διασώθηκαν, ανασύρθηκαν 11 πτώματα και υπάρχουν ακόμα 16 αγνοούμενοι.

#### 4.2.3 Η Πυρκαγιά (Λάθη - Έναρξη - Εξάπλωση - Αντιμετώπιση)

##### Φορτίο και Επιβίβαση

Παρά τις διαδικασίες της εταιρείας, από τις συνεντεύξεις και τα αποδεικτικά στοιχεία που συγκεντρώθηκαν έγινε κατανοητό ότι οι εργασίες φόρτωσης θα γίνονταν σύμφωνα με «εμπειρικές» μεθόδους και ότι το υπεύθυνο προσωπικό δεν ενημερώθηκε σωστά για τις προδιαγραφές / προβλήματα των οχημάτων που επρόκειτο να εισέλθουν στο πλοίο.

Επιπλέον, όπως αποδείχθηκε κατά τη διάρκεια των επιχειρήσεων διάσωσης, ο κατάλογος των επιβατών που παρέχονται από τα ελληνικά λιμάνια δεν αντιστοιχούσε πλήρως στους επιβάτες που πραγματικά επιβιβάστηκαν.

Ο Καπετάνιος, ως κύρια αρχή επί του πλοίου, αναμενόταν να διατάξει τον υποπλοίαρχο να συντάξει έναν κατάλογο των εμπορευμάτων που θα φορτωθούν και να προετοιμάσει ένα σχέδιο φόρτωσης πλοίου για τη μεταφορά οχημάτων που μεταφέρουν επικίνδυνα εμπορεύματα (Char. 7.2 part A-1 SOLAS 74).

Για το σκοπό αυτό, ο καπετάνιος του πλοίου ή / και ο υποπλοίαρχος θα ζητήσει και θα απαιτήσει το πλήρωμα εδάφους, αρκετά νωρίτερα από την έναρξη των εργασιών φόρτωσης των οχημάτων, τον τύπο των εμπορευμάτων που μεταφέρονται ώστε να τοποθετούνται τα οχήματα στην πιο κατάλληλη θέση επί του σκάφους και να προετοιμαστεί ένα κατάλληλο σχέδιο φόρτωσης, λαμβάνοντας επίσης υπόψη τις πιθανές δυσμενείς συνθήκες θάλασσας και καιρού.

Επίσης, η ομάδα που ήταν υπεύθυνη για τη σύνδεση των φορτηγών-ψυγείων στο κεντρικό σύστημα του πλοίου αποτελούταν από δύο άτομα, ο ένας παρεχόταν από τον ιδιοκτήτη του πλοίου και ο άλλος από τον ναυλωτή. Ωστόσο, το ένα από τα δύο άτομα φαίνεται να ενεργούσε αυτόνομα και όχι σε συγχρονισμό με τον άλλο.

Τα προβλήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω, σε συνδυασμό με τη διαφορετική εθνικότητα και τα προβλήματα κατανόησης σχετικά με την αγγλική γλώσσα, για την οποία το επίπεδο γνώσης / κατανόησης μεταξύ του προσωπικού πρόσδεσης σε ορισμένες περιπτώσεις ήταν χαμηλό, όπως εκτιμήθηκε κατά τη διάρκεια των συνεντεύξεων, πιθανώς προκάλεσε κάποιες δυσκολίες / παρεξηγήσεις, οι οποίες θα μπορούσαν να είχαν αρνητικό αποτέλεσμα στη σωστή εκτέλεση αυτών των εργασιών.

### **Εκκίνηση ανάφλεξης / Ανίχνευση πυρκαγιάς**

Σύμφωνα με το report “Fire on board of the ro-ro pax NORMAN ATLANTIC” του Ministry of Infrastructure and Transport, η πηγή της πυρκαγιάς λέγεται πως είναι ένα φορτηγό-ψυγείο που υπήρχε στο Deck 4. Τα φορτηγά-ψυγεία είναι αναγκασμένα να έχουν πάντα κάποια πηγή ενέργειας για την προστασία του φορτίου τους. Για λόγους ασφαλείας, τα οχηματαγωγά πλοία τους απαγορεύουν να διατηρούν τους κινητήρες τους σε λειτουργία και τους υποχρεώνουν να συνδέονται με την κύρια πηγή ισχύος του πλοίου. Μάρτυρες δήλωσαν ότι το Norman Atlantic δεν ήταν εφοδιασμένο με αρκετές θέσεις σύνδεσης για τον αριθμό των ψυκτικών φορτηγών που μεταφέρει. Αυτός θεωρείται ο λόγος πίσω από τη σπίθα που προκάλεσε τη θανατηφόρα φωτιά.

Σε γενικές γραμμές, σε περίπτωση πυρκαγιάς, ο άνεμος παίζει θεμελιώδη ρόλο, όχι μόνο στην ανάπτυξη της πυρκαγιάς, αλλά και στη διάδοσή του. Σε αυτήν τη συγκεκριμένη περίπτωση, οι καιρικές συνθήκες, ιδίως ο άνεμος, καθώς και η ταχύτητα του πλοίου, ήταν σημαντικές και δεν μπορούν να αγνοηθούν. Τέτοιες παράμετροι έχουν διαδραματίσει σίγουρα σημαντικό ρόλο τόσο για τους ανιχνευτές καπνού όσο και για τις πρώτες φάσεις της φωτιάς και για τη διάδοσή της. Έτσι, στην προκαταρκτική ανάλυση της εξέλιξης και της πορείας του καπνού σημαντικό ρόλο παίζει το γεγονός ότι στο συγκεκριμένο κατάστρωμα υπάρχουν μεγάλα πλευρικά ανοίγματα και μια ολόκληρη πλευρά, η πρύμνη, είναι εντελώς ανοιχτή.

Η επίδραση του ανέμου φαίνεται καθαρά από τις ασύμμετρες ζημιές που προκλήθηκαν. Παρατίθενται παρακάτω κάποιες φωτογραφίες που επιβεβαιώνουν το παραπάνω γεγονός.



Εικόνα 8: Η δεξιά πλευρά του πλοίου που προκλήθηκαν οι περισσότερες ζημιές [Ministry of Infrastructure and Transport on Norman Atlantic]



Εικόνα 9: Αριστερά = Port Side με την κατασκευή σχεδόν άθικτη, Δεξιά = Starboard Side με την κατασκευή να έχει υποστεί σημαντικές παραμορφώσεις [Ministry of Infrastructure and Transport on Norman Atlantic]

Η πυρκαγιά ανιχνεύτηκε αργά από τους αισθητήρες, λόγω των πλευρικών ανοιγμάτων, τα οποία, σε συνδυασμό με τον ισχυρό άνεμο που φυσούσε σε αυτήν την περιοχή, επέτρεψαν στην πυρκαγιά να αναπτυχθεί τόσο πολύ που, όταν τελικά εντοπίστηκε, δεν θα μπορούσε πλέον να τεθεί υπό έλεγχο είτε από την ομάδα πυρόσβεσης είτε από το σύστημα κατάσβεσης, εξαιτίας της μεγάλης περιοχής του γκαράζ στην οποία είχε αναπτυχθεί. Επιπλέον, τα διαθέσιμα συστήματα CCTV δεν παρείχαν πλήρη επισκόπηση της περιοχής, επειδή, όπως ορίζεται από τον ισχύοντα κανονισμό, εγκαταστάθηκαν αποκλειστικά για τον έλεγχο των μη εξουσιοδοτημένων προσβάσεων σε αυτά τα δωμάτια, κυρίως για λόγους ασφαλείας, όπως επίσης και για την παρακολούθηση των κινήσεων οχημάτων σε αντίξοες καιρικές συνθήκες.

#### **Περιορισμός - Κατάσβεση πυρκαγιάς**

Όπως τονίστηκε στις δηλώσεις που έγιναν, η ομάδα πυρόσβεσης και εκείνοι που έκαναν τις περιπολίες δεν μπόρεσαν να κινηθούν εύκολα στο γκαράζ, επειδή η φωτιά είχε τεράστιες διαστάσεις. Επιπλέον, όπως αναφέρθηκε σε ορισμένες συνεντεύξεις, αντιμετωπίστηκαν δυσκολίες εισόδου στο χώρο του γκαράζ λόγω της μικρής απόστασης μεταξύ των οχημάτων που - ακόμη και αν συμμορφώνεται με τον

κανονισμό - μπορεί να γίνει ακόμα πιο δύσκολο λόγω των στολών και του εξοπλισμού πυρόσβεσης.

Το σύστημα κατάσβεσης άνοιξε σε λάθος περιοχή και για τέσσερις περιοχές, ενώ μετά από λίγα λεπτά καθορίστηκε άχρηστο, καθώς η κύρια πηγή τροφοδοσίας αποσυνδέθηκε, πιθανώς λόγω της ζημιάς που προκλήθηκε από φωτιά στα εκτεθειμένα καλώδια στην οροφή του καταστρώματος 4. Σε τέτοιες συνθήκες, το σύστημα κατάσβεσης θα μπορούσε να τροφοδοτείται μόνο από την αντλία έκτακτης ανάγκης, η οποία, ωστόσο, δεν παρείχε αρκετό νερό για να σβήσει αποτελεσματικά την πυρκαγιά.

Η μόνη αποτελεσματική δράση που εφαρμόστηκε για τον μετριασμό των επιπτώσεων της φωτιάς ήταν η επέμβαση των ρυμουλκών που έστριψαν το πλοίο με την πλήρη προς την κατεύθυνση του ανέμου και ψύχραναν την γάστρα με νερό, εμποδίζοντας το σκάφος από το να καταστραφεί εντελώς.



Εικόνα 10: Προσπάθειες διάσωσης - κατάσβεσης φωτιάς [Newsbeast]

Η θεωρητική προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε από το Ministry of Infrastructure and Transport καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η φωτιά έφτασε γρήγορα σε τέτοια επίπεδα απελευθέρωσης θερμότητας και θερμοκρασίας που οποιαδήποτε παρέμβαση των ομάδων πυρόσβεσης ήταν άχρηστη. Με άλλα λόγια, παρά το γεγονός ότι το σύστημα κατάσβεσης σε συνδυασμό με το σύστημα ανίχνευσης και τα επίπεδα εκπαίδευσης του πληρώματος συμμορφώνονται πλήρως με τους ισχύοντες

κανονισμούς, συνολικά κρίνεται ανεπαρκές για την καταπολέμηση μιας πυρκαγιάς τέτοιου πλάτους.

### **Συμπεράσματα**

Η μελέτη και η προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε από το Ministry of Infrastructure and Transport για την ανάλυση της εξέλιξης και της διάδοσης της φωτιάς επισημαίνει τα ακόλουθα για το περιστατικό:

- γρήγορη εξάπλωση
- μεγάλη ποσότητα παραγόμενου καπνού
- υψηλές θερμοκρασίες

Μερικές από τις αιτίες που οδήγησαν σε μία πυρκαγιά με πολύ γρήγορη χρονική και θερμική εξέλιξη αποτελούν:

- πέρασε μεγάλο χρονικό διάστημα ανάμεσα στην ανίχνευση, την προειδοποίηση και την προσπάθεια κατάσβεσης
- υψηλός χρόνος αντίδρασης των ενεργών συστημάτων προστασίας
- υψηλό φορτίο πυρκαγιάς
- μικρή απόσταση ανάμεσα στα εύφλεκτα υλικά
- πλήρης και συνεχής εξαερισμός
- μεγάλοι όγκοι των διαμερισμάτων
- απουσία κατακόρυφων διαμερισμάτων

Οι δηλώσεις και οι πληροφορίες που συγκεντρώθηκαν δείχνουν ότι ο χρόνος που πέρασε από την πρώτη ανίχνευση έως τη γενική προειδοποίηση του συναγερμού πυρκαγιάς και τελικά την ενεργοποίηση του συστήματος κατάσβεσης ήταν, πιθανότατα, περίπου 20 λεπτά. Ο χρόνος ανάπτυξης της φωτιάς από την ανάφλεξή της είναι περίπου 30-35 λεπτά.

Καθώς ο εξαερισμός του διαμερίσματος εξαρτάται από τα ανοίγματα προς τα έξω, σε αυτήν την περίπτωση, όπου η κατεύθυνση και η δύναμη του ανέμου ήταν επίσης ένα κρίσιμο στοιχείο, τα ανοίγματα που ήταν διαθέσιμα για να αφήσουν τον καθαρό αέρα να εισέλθει μειώθηκαν, καθώς εμποδίστηκαν από τον ήδη υπάρχον καπνό. Με αυτόν τον τρόπο η ποσότητα καθαρού αέρα που διατίθεται για καύση μειώθηκε, ενώ τα άκαυτα αέρια πυρόλυσης κατευθύνονταν προς τα έξω από το διαμέρισμα μαζί με καπνούς. Όταν βρέθηκαν κοντά στα ανοίγματα, βρήκαν αρκετό οξυγόνο για να αναφλεγούν και να προκαλέσουν φλόγες που έβγαιναν από τα παράθυρα, όπως συνήθως συμβαίνει όταν η πυρκαγιά βρίσκεται στο γενικευμένο στάδιο.

## 4.3 Η περίπτωση του Sorrento

### 4.3.1 Γενικά

Ένα ακόμα σοβαρό ατύχημα πυρκαγιάς σε επιβατηγό-οχηματαγωγό πλοίο συνέβη στις 28 Απριλίου 2015 στο πλοίο Sorrento. Το M/V Sorrento είναι και αυτό ένα roll-on/roll-off passenger ferry (ROPAX) που άνηκε στην εταιρία Atlantica di Navigazione Spa, μέλος του Grimaldi Group, ενώ ναυλωνόταν από την Transmediterranea Acciona. Το δρομολόγιο που εξυπηρετούσε συνέδεε την Βαλένθια με τη Μαγιόρκα και συγκεκριμένα την πόλη Palma de Mallorca.

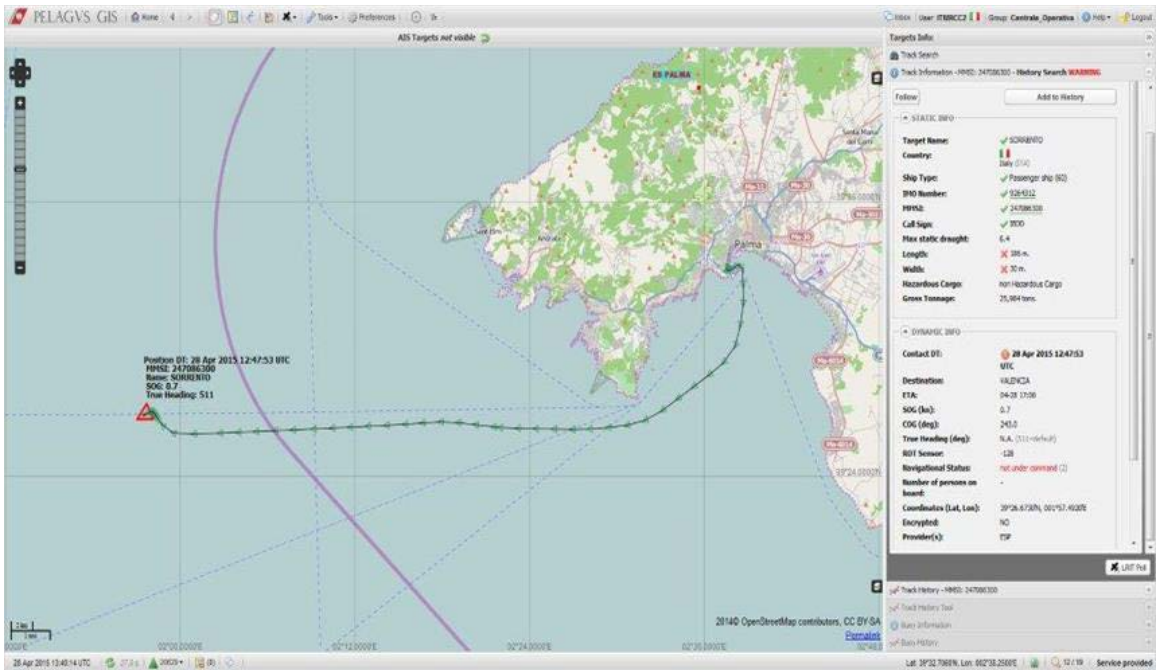


Εικόνα 11: Sorrento [MarineTraffic]

Το πλοίο είναι κατασκευής του 2003, έχοντας 186.35 μέτρα μήκος, 25.6 μέτρα πλάτος και 6.79 μέτρα βύθισμα. Η χωρητικότητα επιβατών ανέρχεται στα 954 άτομα. Οι πληροφορίες που παρατίθενται, βασίζονται στην αναφορά “Fire on Board Ro-Ro Pax SORRENTO” του Ministry of Infrastructure and Transport.

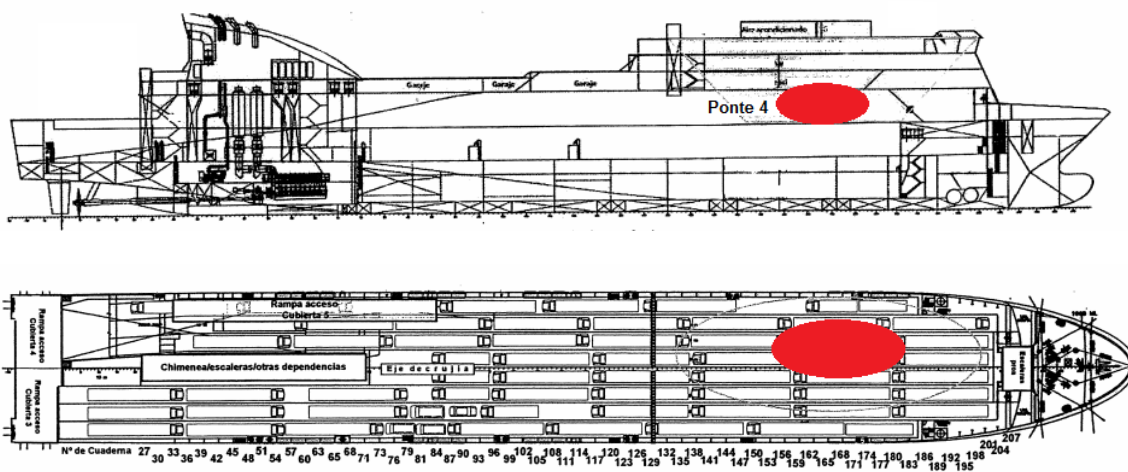
### 4.3.2 Συμβάντα

Στις 28 Απριλίου του 2015 στις 11:45 και ενώ το πλοίο βρισκόταν 20 μίλια δυτικά από την Palma de Mallorca μια σοβαρή φωτιά ξέσπασε σε ένα κατάστρωμα οχημάτων. Το πλοίο είχε ξεκινήσει από τη Μαγιόρκα με προορισμό το λιμάνι της Βαλένθια και σε αυτό το ταξίδι επέβαιναν 110 επιβάτες, το πλήρωμα αποτελούταν από 46 άτομα ενώ μεταφέρονταν 123 φορτηγά.



Εικόνα 12: Διαδρομή του πλοίου και σημείο έναρξης πυρκαγιάς [Ministry of Infrastructure and Transport on Sorrento]

Η πυρκαγιά ξεκίνησε από το γκαράζ στο κατάστρωμα 4 του πλοίου, όπου ενεργοποιήθηκε ο ανιχνευτής στο frame 168. Παρά την παρέμβαση της ομάδας πυρόσβεσης και την ενεργοποίηση του συστήματος κατάσβεσης, η φωτιά αποδείχθηκε σύντομα ανεξέλεγκτη. Ο δυνατός αέρας σε συνδυασμό με το ανοιχτό κατάστρωμα, παρομοίως με την περίπτωση του Norman Atlantic, τροφοδοτούσαν την καύση, οδηγώντας σε γρήγορη εξάπλωση.



Εικόνα 13: Το πιθανό σημείο έναρξης της πυρκαγιάς [Ministry of Infrastructure and Transport on Sorrento]



Για τους παραπάνω λόγους και ενώ είχε σταλεί σήμα κινδύνου στις 12:12, ο Καπετάνιος διέταξε την εγκατάλειψη του σκάφους. Συντόμως, άλλα επιβατηγά πλοία και ρυμουλκά που βρίσκονταν στην περιοχή, μαζί με ένα ελικόπτερο της Ισπανικής Ακτοφυλακής, έσπευσαν στο σημείο για βοήθεια.

Περίπου στις 12:35, παρά τις δύσκολες καιρικές συνθήκες, η σωστική λέμβος που βρισκόταν στη δεξιά πλευρά του πλοίου, αφού είχαν επιβιβαστεί 113 άτομα σε αυτή, κατέβηκε στο νερό και κατευθύνθηκε προς ένα επιβατηγό που είχε φτάσει στο σημείο. Λίγο αργότερα η αντίστοιχη σωστική λέμβος που βρισκόταν στην αριστερή πλευρά του πλοίου και ενώ σε αυτήν επέβαιναν 33 άτομα μαζί με τον καπετάνιο, ακολούθησε την ίδια διαδικασία. Με τη βοήθεια του ελικοπτέρου διασώθηκαν και τα υπόλοιπα 6 άτομα του πληρώματος.

Συνολικά, λόγω της γρήγορης αντίδρασης του πληρώματος και της βοήθειας των κοντινών πλοίων, η εκκένωση του σκάφους ήταν επιτυχής, χωρίς να υπάρξουν δηλαδή θύματα. Τα 14 άτομα που τραυματίστηκαν ελαφρά μεταφέρθηκαν σε νοσοκομείο (όπου αποδείχθηκε ότι ήταν άνευ κινδύνου), ενώ το πλοίο ρυμουλκήθηκε, όταν θεωρήθηκε ασφαλής η διαδικασία, μέχρι το λιμάνι του Sagunto στις 5/5/2015.

#### 4.3.3 Η Πυρκαγιά (Λάθη - Έναρξη - Εξάπλωση - Αντιμετώπιση)

Το περιστατικό σε γενικές γραμμές μοιάζει πολύ με την περίπτωση του Norman Atlantic. Τα πλοία είναι παρόμοια σε διαστάσεις και διαρρύθμιση. Η πυρκαγιά, και στις 2 περιπτώσεις ξεκίνησε από το ίδιο κατάστρωμα (deck 4), το οποίο έχει πλήρως ανοιχτή την πίσω πλευρά του και πλευρικά ανοίγματα κατά το μήκος που επιτρέπουν την είσοδο του αέρα. Η φωτιά προήλθε, επίσης, από δυσλειτουργία φορτηγού-ψυγείου και έφτασε πολύ γρήγορα μεγάλες διαστάσεις, γεγονός που έθεσε την κατάσταση ως μη διαχειρίσιμη και ανάγκασε τον καπετάνιο να διατάξει την εγκατάλειψη του σκάφους.



Εικόνα 14: Δεξιά πλευρά Sorrento [Ministry of Infrastructure and Transport on Sorrento]



Εικόνα 15: Εμπρόσθια όψη Sorrento [Ministry of Infrastructure and Transport on Sorrento]

Οι ζημιές που προκλήθηκαν στην κατασκευή του πλοίου, στην περίπτωση του Sorrento, ήταν εμφανώς μεγαλύτερες, που είναι ένδειξη επίτευξης υψηλότερων θερμοκρασιών. Κατά την μετέπειτα έρευνα πάνω στο πλοίο, διαπιστώθηκε η κατάρρευση του καταστρώματος 5 (στο οποίο υπήρχαν ένας κύριος διάδρομος, τουαλέτες, κουζίνα, εστιατόριο) ακριβώς πάνω από το πιθανό σημείο έναρξης της φωτιάς. Παραμορφώσεις παρατηρήθηκαν και σε άλλα κοντινά σημεία του καταστρώματος, με μια εμφανώς περισσότερες ζημιές στην αριστερή πλευρά του πλοίου.



Εικόνα 16: Όψη της περιοχής που κατέρρευσε [Ministry of Infrastructure and Transport on Sorrento]



Εικόνα 17: Όψη του καταστώματος 4 [Ministry of Infrastructure and Transport on Sorrento]



Εικόνα 18: Οι επηρεασμένες από την πυρκαγιά περιοχές: Αριστερά=Norman Atlantic, Δεξιά=Sorrento [Galiano I. et al., 2016]

## 5 Αριθμητικές προσομοιώσεις πυρκαγιάς

Το πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο αποσκοπεί στην παράθεση των αριθμητικών προσομοιώσεων, που πραγματοποιήθηκαν στο πρόγραμμα PyroSim [Thunderhead Engineering, 2020], στην σύγκριση και στον σχολιασμό τους. Στην αρχή του κεφαλαίου δίνονται μερικές πληροφορίες για το λογισμικό FDS (Fire Dynamic Simulator) [McGrattan K. et al., 2020] και για το πρόγραμμα PyroSim [Thunderhead Engineering, 2020] για την βοήθεια του αναγνώστη.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται το μοντέλο του καταστρώματος φορτηγών που χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα και δίνονται οι διαστάσεις του χώρου και των ανοιγμάτων του. Ακολουθεί η μοντελοποίηση των φορτηγών και ο ορισμός του ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας για αυτά, καθώς επίσης παρουσιάζεται το πλέγμα που επιλέχθηκε για τους υπολογισμούς.

Η παράθεση των προσομοιώσεων γίνεται στο τέλος του κεφαλαίου. Παρουσιάζεται η διάταξη του χώρου για καθεμία από τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, καταγράφονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν και τέλος πραγματοποιείται σύγκριση των διαγραμμάτων που απεικονίζουν το ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας (HRR). Προκύπτουν, έτσι, συμπεράσματα και παρατηρήσεις για καθεμία από τις βασικές παραμέτρους που ελέγχονται.

### 5.1 FDS

Σύμφωνα με το “Fire Dynamics Simulator User’s Guide” [McGrattan, K. et al., 2020], το λογισμικό FDS (Fire Dynamic Simulator) είναι ένα CFD (Computational Fluid Dynamics) μοντέλο προσομοίωσης για τη ροή ρευστών που παράγονται από πυρκαγιές. Το πρόγραμμα επιλύει αριθμητικά ένα μεγάλο αριθμό Navier-Stokes εξισώσεων, που είναι κατάλληλες για χαμηλής ταχύτητας, θερμικά οδηγούμενης ροής, με έμφαση στη μεταφορά καπνού και θερμότητας από την φωτιά, για να περιγράψει την εξέλιξή της. Το λογισμικό διατίθεται δωρεάν και αναπτύχθηκε από το National Institute Of Standards and Technology (NIST) σε συνεργασία με το VTT Technical Research Centre of Finland. Η πρώτη έκδοση έγινε διαθέσιμη στο κοινό τον Φεβρουάριο του 2000.

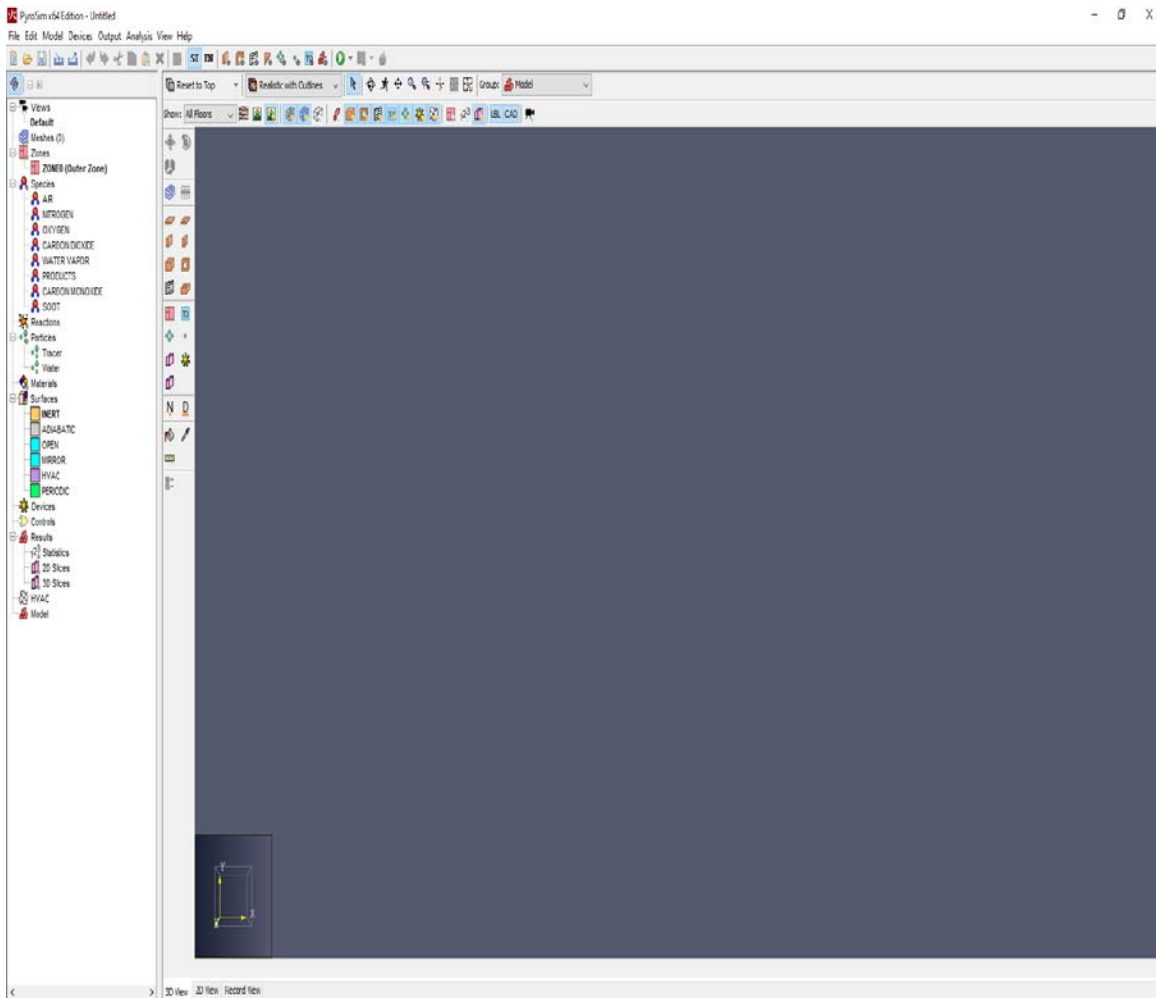
Μέχρι σήμερα, οι μισές περίπου από τις εφαρμογές του μοντέλου πραγματοποιούνται για τον σχεδιασμό συστημάτων χειρισμού καπνού και μελετών για ψεκαστήρες/ανιχνευτές. Το άλλο μισό αποσκοπεί σε βιομηχανικές και οικιστικές ανακατασκευές για την καλύτερη αντιμετώπιση πιθανής πυρκαγιάς. Καθ' όλη τη διάρκεια της ανάπτυξής του, το FDS στοχεύει στην επίλυση πρακτικών προβλημάτων στη μηχανική πυροπροστασίας (fire protection engineering), ενώ παράλληλα παρέχει ένα εργαλείο για τη μελέτη καύσης και θεμελιωδών μεγεθών, που αφορούν φωτιές.

## 5.2 PyroSim

Σύμφωνα με το “PyroSim User Manual” [Thunderhead Engineering, 2020], το PyroSim είναι ένα λογισμικό που αναπτύχθηκε από την εταιρία Thunderhead Engineering Consultants, Inc., με σκοπό να διευκολύνει την προετοιμασία των αρχείων εισόδου για τις προσομοιώσεις που θα γίνουν από το FDS. Οι κύριες λειτουργίες του PyroSim καλύπτουν την διαδραστική δημιουργία σύνθετων μοντέλων (χρήση σχεδίων, δημιουργία πολλαπλών επαναλαμβανόμενων αντικειμένων, δημιουργία τοίχων με καμπυλότητα και κλιμακοστασίων κ.λπ.), την εισαγωγή υπαρχόντων FDS, PyroSim και CAD αρχείων. Ακόμα προσφέρονται πολλά εργαλεία για την δημιουργία βασικών γεωμετρικών στοιχείων και συνδυασμών (αντικείμενα, τρύπες, αεραγωγοί, δωμάτια, νέφη σωματιδίων), που αναπαριστούν τα πραγματικά αντικείμενα που βρίσκονται μέσα σε κτίρια. Το PyroSim προσφέρει άμεση πληροφόρηση στον χρήστη σχετικά με τη δομή του αρχείου εισαγωγής και τα σφάλματα που πιθανόν να προκύψουν. Περιληπτικά το PyroSim προσφέρει δυνατότητες όπως:

- Εισαγωγή CAD αρχείων για την δημιουργία και διαχείριση πολύπλοκων μοντέλων
- 2D και 3D γεωμετρικά σχεδιαστικά εργαλεία
- Ενσωματωμένη παράλληλη επεξεργασία
- Μετρικό και Αγγλικό σύστημα μονάδων
- Εργαλεία για την διαχείριση πολλών meshes
- Πολλές γλώσσες μετάφρασης
- HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) συστήματα ενσωματωμένα για την προσομοίωση
- Εισαγωγή υπαρχόντων FDS μοντέλων

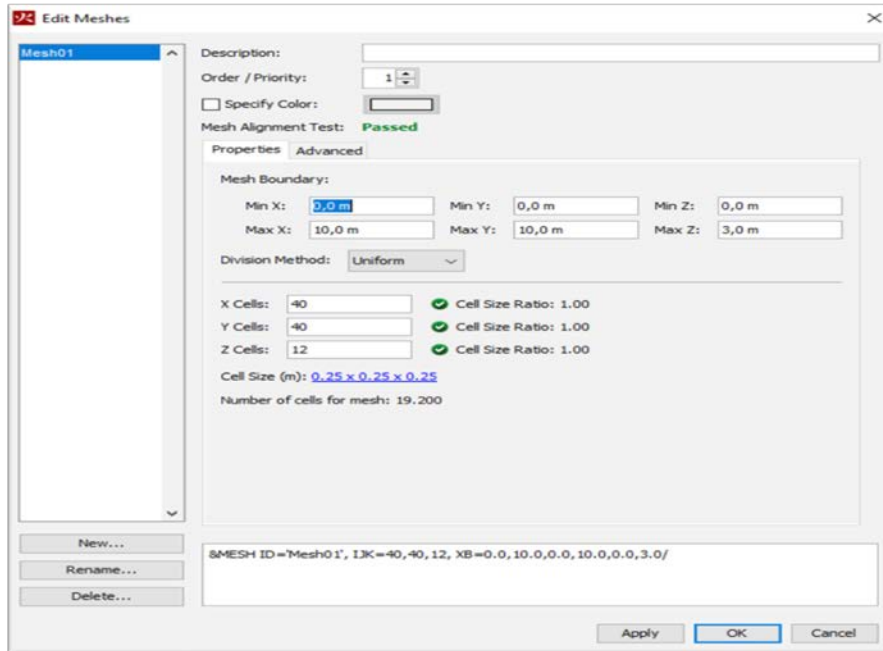
Η τρέχων έκδοση του προγράμματος (PyroSim 2020) περιλαμβάνει την έκδοση 6.7.4 του FDS για την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων. Παρακάτω παρουσιάζονται εν συντομία οι βασικές δυνατότητες και τα εργαλεία που χρειάζεται ο χρήστης για την ενασχόληση με το πρόγραμμα.



Εικόνα 19: Γραφικό περιβάλλον PyroSim

## Πλέγμα

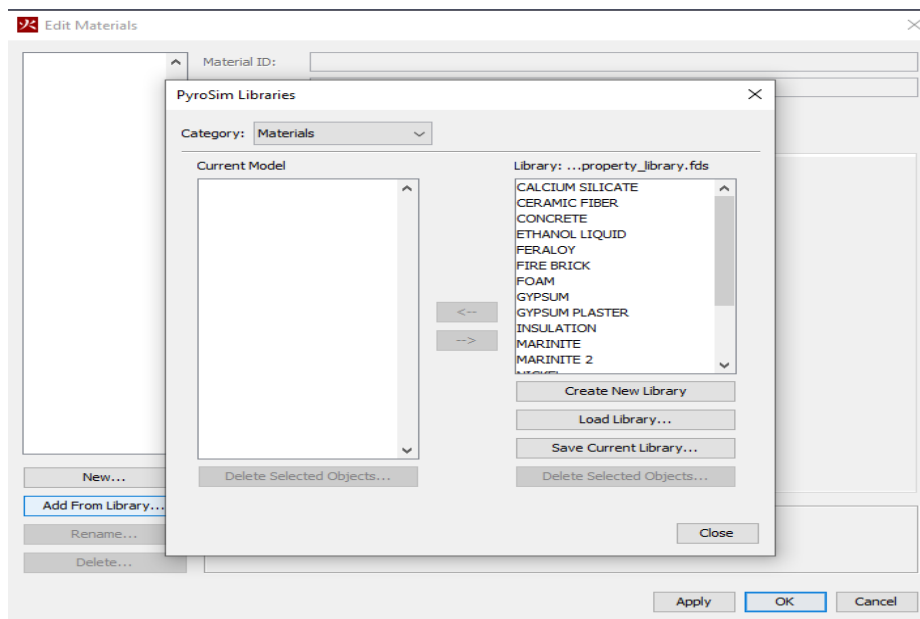
Όλοι οι υπολογισμοί για το πρόγραμμα πραγματοποιούνται σε υπολογιστικά πλέγματα, που ονομάζονται meshes. Κάθε αντικείμενο (εμπόδια, αεραγωγοί κ.λπ.) που συμμετέχει στην προσομοίωση πρέπει να είναι μέσα και να συμμορφώνεται με αυτό το πλέγμα. Όταν κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει, το αντικείμενο αυτομάτως αλλάζει θέση κατά την προσομοίωση. Αν κάποιο αντικείμενο βρίσκεται έξω από τα όρια του πλέγματος δεν οδηγεί σε σφάλμα, αλλά δεν εμφανίζεται στα αποτελέσματα.



Εικόνα 20: Δημιουργώντας ένα mesh

## Υλικά

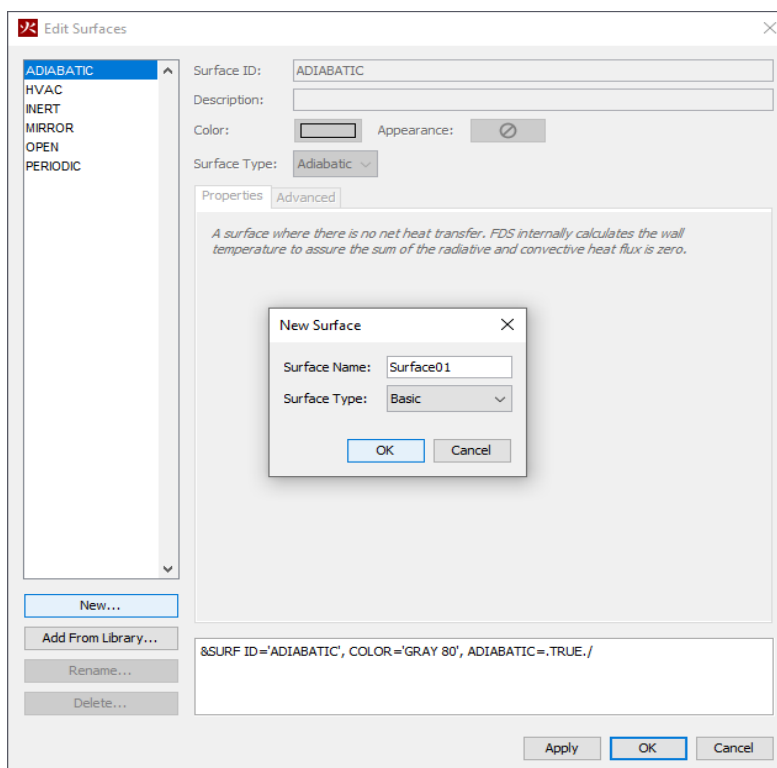
Για να προσομοιώσεις μια επιφάνεια με ιδιότητες κάποιου στερεού ή υγρού χρειάζεται να ορισθεί αυτό το υλικό, προσδίδοντας του συγκεκριμένες θερμικές ιδιότητες και συμπεριφορές κατά την καύση. Το PyroSim παρέχει μια βιβλιοθήκη με τέτοια υλικά, ενώ ταυτόχρονα δίνει την δυνατότητα να ορισθεί κάποιο με διαφορετικές ιδιότητες.



Εικόνα 21: Υλικά από την βιβλιοθήκη του PyroSim

## Επιφάνειες

Οι επιφάνειες χρησιμοποιούνται για να ορίσουν τις ιδιότητες στερεών αντικειμένων και αεραγωγών στο μοντέλο. Κάθε επιφάνεια μπορεί να ορισθεί από υλικά σε ανάμειξη, δίνοντας το ποσοστό του καθενός, ή σε στρώσεις, δίνοντας το πάχος αυτών. Εκτός από τον ορισμό της θερμικής αγωγιμότητας για στερεά, παρέχονται δυνατότητες για τον ορισμό επιφανειών ως burner με καθορισμένο ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας, θερμοκρασιών ανάφλεξης για αντικείμενα καθώς και ταχύτητα παροχής αέρα από αεραγωγούς. Το πρόγραμμα παρέχει από μόνο του κάποιες τυποποιημένες επιφάνειες, αλλά ο χρήστης μπορεί να ορίσει καινούριες βασισμένες στις ήδη υπάρχουσες προσδίδοντας διαφορετικές ιδιότητες.



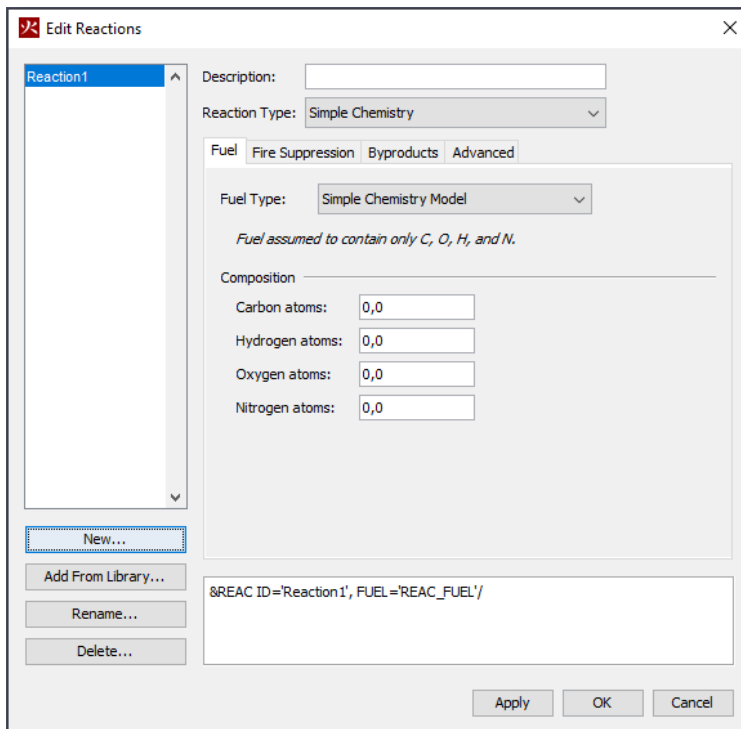
Εικόνα 22: Επιφάνειες στο PyroSim

## Αντίδραση

Για την υλοποίηση του πειράματος είναι απαραίτητο να ορίσουμε την αντίδραση που πραγματοποιείται. Η αντίδραση ορίζεται από τα προϊόντα και τα παράγωγα της καύσης. Και σε αυτή την περίπτωση υπάρχουν τυποποιημένες αντιδράσεις, αλλά ταυτόχρονα δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να ορίσει κάτι καινούριο. Πρόκειται για την καύση των αερίων, καθώς συνήθως η πυρόλυση των στερεών ορίζεται από τον



ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (Heat Release Rate Per Unit Area ή HRRPUA).



Εικόνα 23: Ορισμός αντίδρασης στο PyroSim

## Συσκευές

Συσκευές χρησιμοποιούνται είτε για την καταμέτρηση ποσοτήτων είτε για την προσομοίωση πιο περίπλοκων αισθητήρων, όπως ανιχνευτές καπνού, ψεκαστήρες κ.α.. Περαιτέρω επιλογές προσφέρονται για κάθε αισθητήρα, όπως τιμές ενεργοποίησης (θερμοκρασία, ορατότητα) για τους ανιχνευτές και ροή/πίεση για τους ψεκαστήρες. Τα αποτελέσματα καταγράφονται και αποθηκεύονται, για να μπορεί να παραχθεί η χρονική ιστορία για κάθε συσκευή.

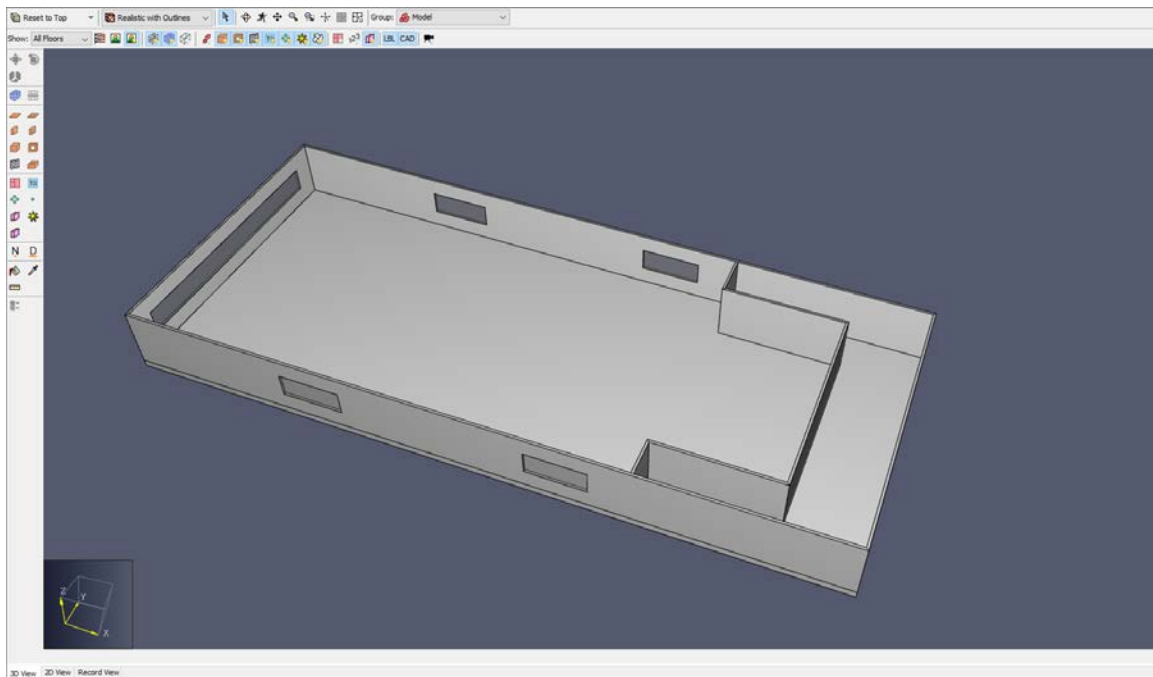
## Έλεγχος

Τα αντικείμενα μπορούν να οριστούν ώστε να ενεργοποιούνται ή να απενεργοποιούνται κατά την διάρκεια της προσομοίωσης, όταν συμβαίνει ένα συγκεκριμένο γεγονός. Ακόμα, εντολές ελέγχου (control) μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τις συσκευές, όπως ενεργοποίηση ψεκαστήρων ή απενεργοποίηση συστήματος εξαερισμού όταν κάποιος αισθητήρας καπνού ενεργοποιηθεί, κάτι που είναι αρκετά χρήσιμο για τις μελέτες πυρασφάλειας.

## 5.3 Το Μοντέλο

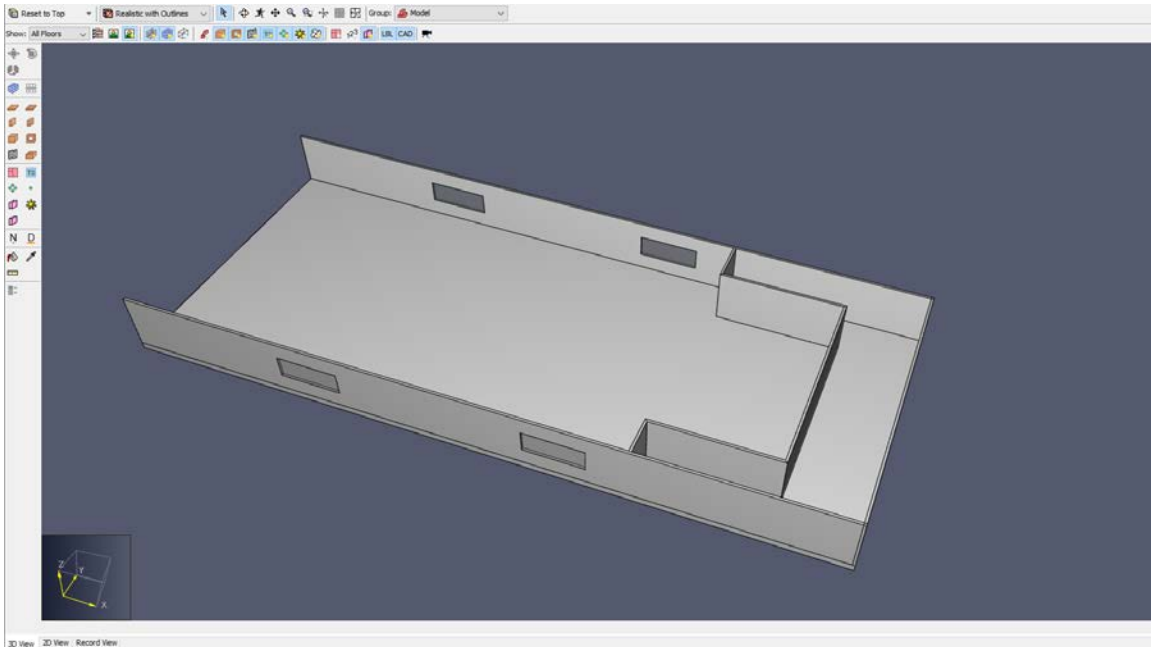
### 5.3.1 Γεωμετρία καταστρώματος

Τα πειράματα είχαν ως στόχο τον γενικότερο σχολιασμό κάποιων παραμέτρων, δηλαδή το κατά πόσο συγκεκριμένες αλλαγές στον χώρο του καταστρώματος (ανοίγματα), στην διαρρύθμιση των φορητών (αποστάσεις και πληρότητα) και στις καιρικές συνθήκες (άνεμος) θα επηρέαζαν την εξέλιξη της πυρκαγιάς. Το πλήρες μοντέλο αφορά ένα τυπικό κατάστρωμα φορητών σε ένα RoPax πλοίο και έχει διαστάσεις 150 m μήκος x 24 m πλάτος x 5 m ύψος. Ωστόσο για τον βέλτιστο σχεδιασμό, με στόχο την ακρίβεια των αποτελεσμάτων και την πραγματοποίηση αριθμού πειραμάτων για διαφορετικές περιπτώσεις, χρησιμοποιήθηκε μόνο ένα μέρος του καταστρώματος για την μελέτη. Η χρήση ολόκληρου του χώρου σε συνδυασμό με ένα πλέγμα με μικρό μέγεθος κελιών, για την απαιτούμενη ακρίβεια, οδήγησε σε υψηλό υπολογιστικό κόστος.



Εικόνα 24: Η γεωμετρία του χώρου που χρησιμοποιήθηκε

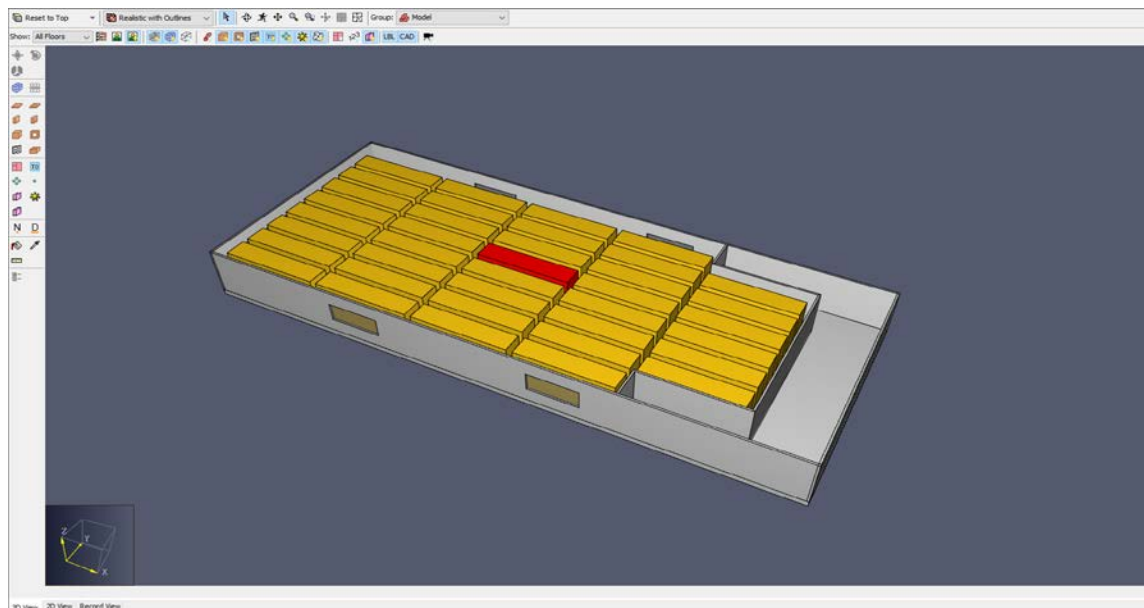
Η τελική γεωμετρία για τους υπολογισμούς φαίνεται παραπάνω. Είναι το πρωραίο μέρος του καταστρώματος και έχει 50 m μήκος, 24 m πλάτος και 5 m ύψος. Υπάρχουν 2 ανοίγματα σε κάθε πλευρά με διαστάσεις 5 m μήκος x 2 m ύψος. Σε ένα αντίστοιχο ανοιχτό κατάστρωμα RoPax πλοίου στην πρυμναία πλευρά δεν θα υπήρχε τοίχος. Στη μελέτη που πραγματοποιήθηκε δοκιμάστηκαν δύο περιπτώσεις, στην πρώτη έχουμε τοίχο με διαστάσεις ανοίγματος 20 m πλάτος x 2 m ύψος, ενώ στην δεύτερη θεωρούμε την πλευρά ανοιχτή.



Εικόνα 25: Εναλλακτική γεωμετρία

### 5.3.2 Φορτηγά (γεωμετρία και HRR)

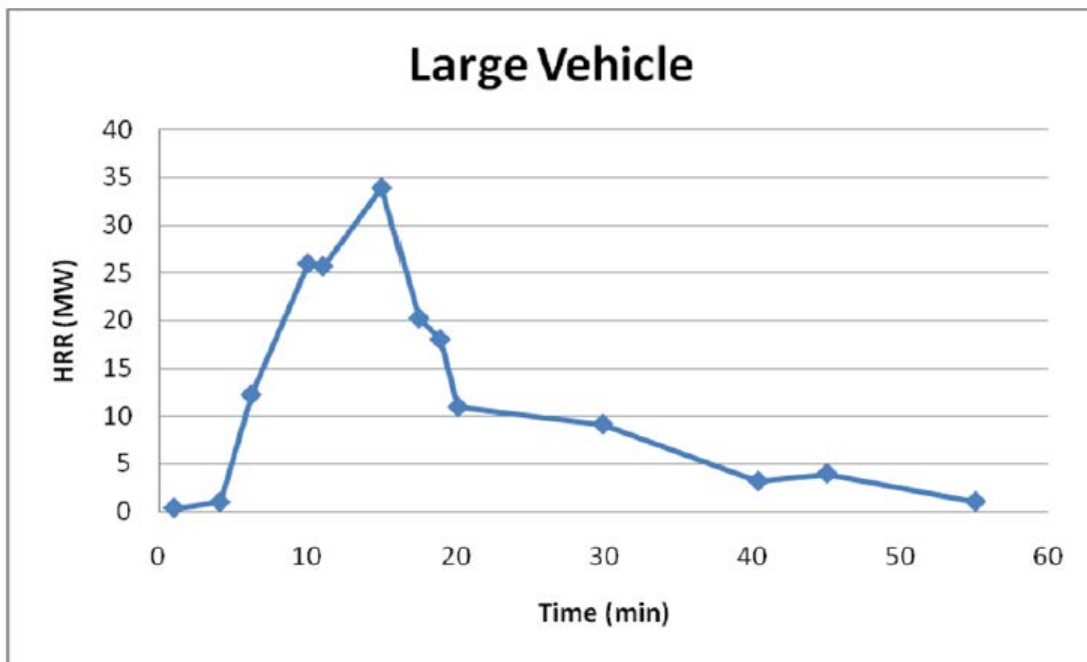
Το κατάστρωμα θεωρήθηκε σαν γκαράζ φορτηγών. Τα φορτηγά μοντελοποιήθηκαν ως κουτιά για την οικονομία του υπολογιστικού χρόνου. Οι διαστάσεις των κουτιών είναι 9.6 m μήκος x 2.1 m πλάτος x 4.2 m ύψος, που αντιστοιχούν σε μέσες διαστάσεις φορτηγού. Οι μεταξύ τους αποστάσεις τόσο κατά το διάμηκες όσο και κατά το εγκάρσιο θεωρήθηκαν 0.6 m.



Εικόνα 26: Διαρρύθμιση καταστρώματος με τα φορτηγά

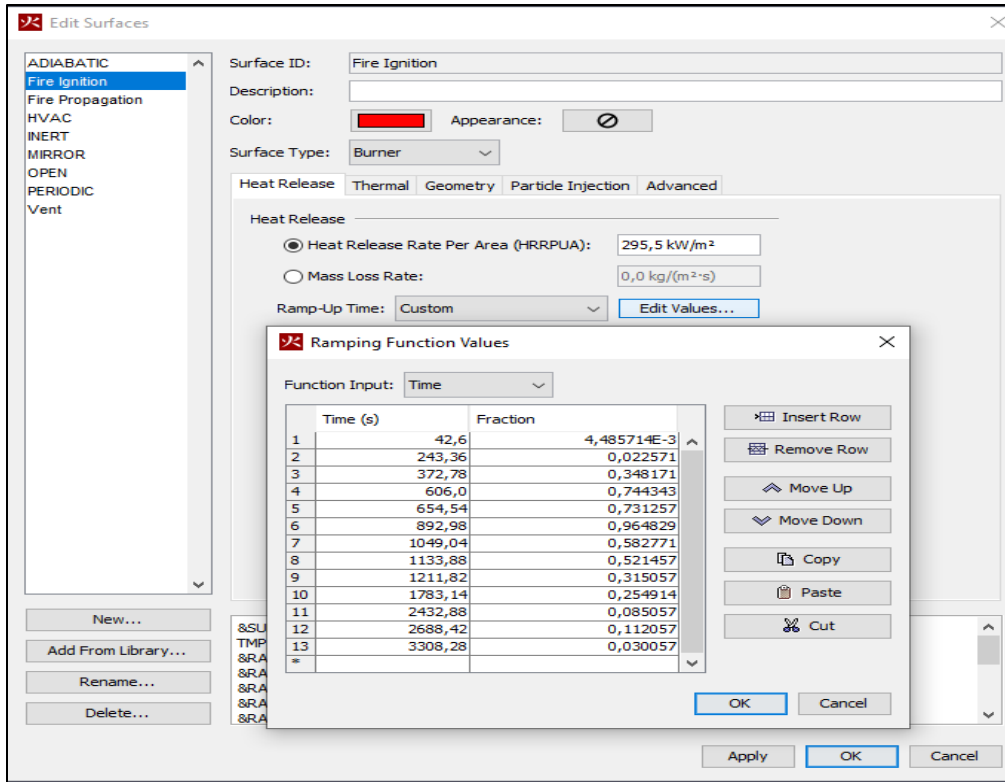
Ο χώρος πλήρως γεμάτος με φορτίο φαίνεται παραπάνω. Το κόκκινο κουτί αναπαριστά το φορτηγό που ευθύνεται για την εκκίνηση της πυρκαγιάς, ενώ τα κίτρινα αναπαριστούν τα υπόλοιπα οχήματα.

Από την μελέτη που πραγματοποιήθηκε σχετικά με το ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας, βρέθηκε ότι τα 35 MW είναι η μέγιστη ισχύς που παράγεται από μια πυρκαγιά σε ένα φορτηγό, με συνολικό φορτίο πυρκαγιάς 33 GJ (εμβαδόν κάτω από την καμπύλη). Το παρακάτω διάγραμμα, σύμφωνα με την αναφορά “Probabilistic Framework for Onboard Fire Safety” των Breuillard, A. et al., 2012, αποτυπώνει την χρονική ιστορία του ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας, που προέκυψε από πείραμα για ένα φορτηγό σε ανοιχτό χώρο.

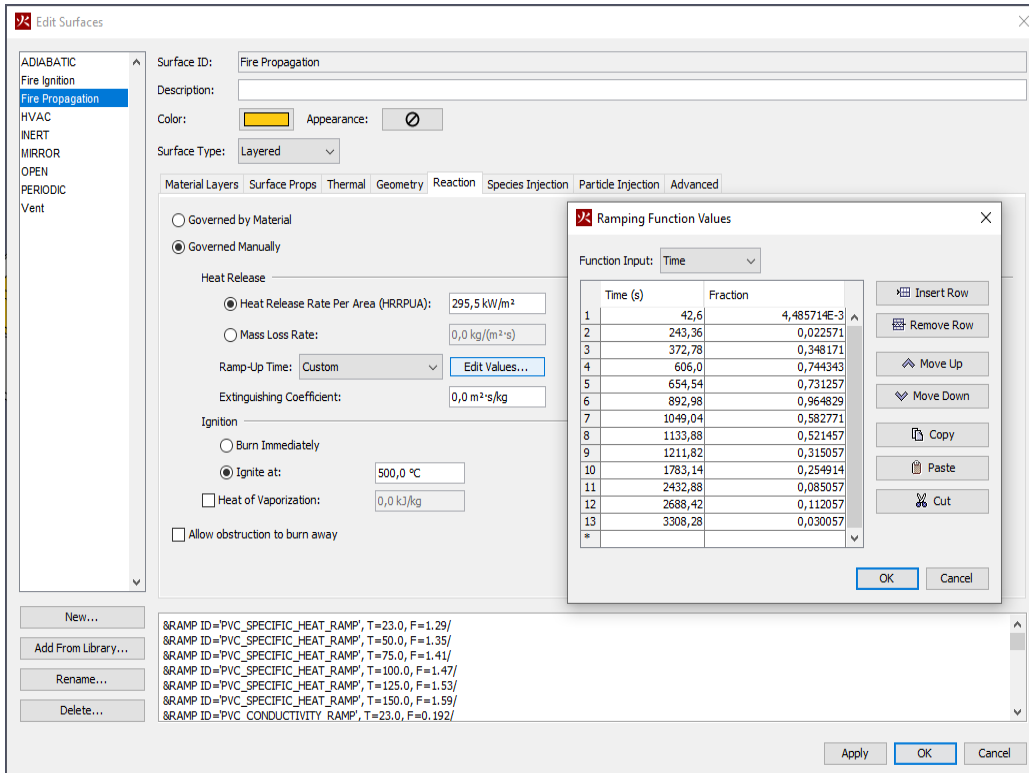


Διάγραμμα 7: Ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας για φορτηγό [Breuillard, A. et al., 2012]

Έτσι οι επιφάνειες του φορτηγού που θεωρείται η πηγή της φωτιάς ορίστηκαν ως burner επιφάνειες με στόχο την επίτευξη της παραπάνω χρονικής ιστορίας. Οι επιφάνειες των υπόλοιπων φορτηγών έχουν οριστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να αναφλέγονται στους 500°C (θεωρείται ότι σε αυτή την θερμοκρασία θα αρχίσουν να αναφλέγονται τα πλαστικά καλύμματα των φορτηγών και έτσι θα ξεκινήσει η συνολική ανάφλεξη) και να παράγουν το ίδιο HRR.



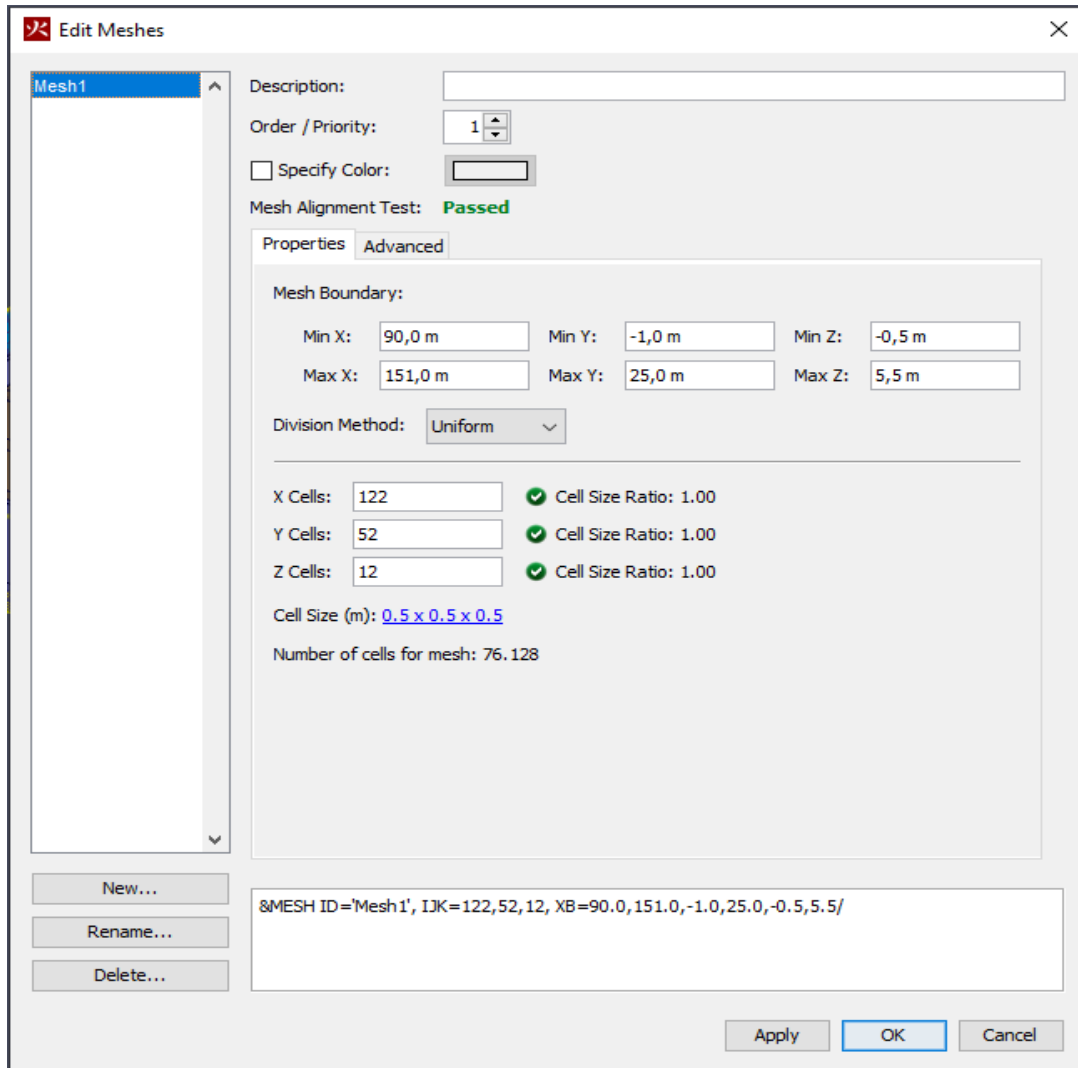
Εικόνα 27: Ορισμός επιφάνειας με custom HRR για το φορτηγό-πηγή



Εικόνα 28: Ορισμός επιφάνειας για τα υπόλοιπα φορτηγά

### 5.3.3 Επιλογή πλέγματος

Για τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε ομοιόμορφο πλέγμα που καλύπτει ολόκληρο τον χώρο και επεκτείνεται και λίγο παραπάνω για την μελέτη της πορείας του καπνού που εξέρχεται από τα ανοίγματα. Το μέγεθος των κελιών είναι 0.5 m σε κάθε κατεύθυνση φτάνοντας έτσι στα 76128 κελιά συνολικά, επιλογή που έγινε όπως αναφέρθηκε και παραπάνω για την βέλτιστη ακρίβεια σε συνδυασμό με τη προσπάθεια μείωσης του υπολογιστικού χρόνου.



Εικόνα 29: Το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα

Αξίζει να σημειωθεί πως τα όρια του πλέγματος σε κάθε κατεύθυνση (εκτός από το  $z_{\min}$ ) θεωρήθηκαν ανοιχτά. Με αυτό τον τρόπο το πρόγραμμα «καταλαβαίνει» και πραγματοποιεί την εισαγωγή αέρα στον χώρο, χωρίς τον οποίο τα αποτελέσματα θα ήταν λανθασμένα.

## 5.4 Υπολογιστικά Πειράματα

Με τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, εξετάζεται η επίδραση τριών κυρίως παραμέτρων στην εξέλιξη και την τελική κατάληξη της πυρκαγιάς. Αυτοί οι παράμετροι είναι: η διαρρύθμιση των οχημάτων στο χώρο, η διαρρύθμιση του ίδιου του χώρου και ο άνεμος. Στον Πίνακα 16 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά κάθε πειράματος.

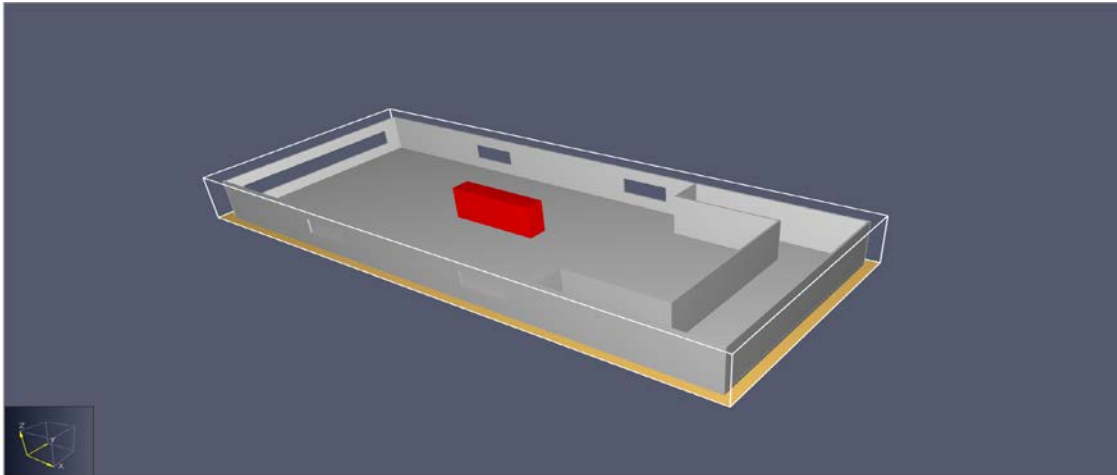
	Αριθμός φορτηγών	Διάταξη φορτηγών	Πρυμναία πλευρά	Άνεμος	Σύστημα κατάσβεσης
1 <sup>ο</sup> Πείραμα	1	Μόνο φορτηγό-πηγή	Τοίχος με άνοιγμα	✗	✗
2 <sup>ο</sup> Πείραμα	9	Γύρω από φορτηγό-πηγή	Τοίχος με άνοιγμα	✗	✗
3 <sup>ο</sup> Πείραμα	24	Γύρω από φορτηγό-πηγή	Τοίχος με άνοιγμα	✗	✗
4 <sup>ο</sup> Πείραμα	19	Διάταξη ένα παρά ένα	Τοίχος με άνοιγμα	✗	✗
5 <sup>ο</sup> Πείραμα	30	Χωρίς τελευταία σειρά	Τοίχος με άνοιγμα	✗	✗
6 <sup>ο</sup> Πείραμα	38	Πληρότητα	Τοίχος με άνοιγμα	✗	✗
7 <sup>ο</sup> Πείραμα	30	Χωρίς τελευταία σειρά	Χωρίς τοίχο	✗	✗
8 <sup>ο</sup> Πείραμα	38	Πληρότητα	Χωρίς τοίχο	✗	✗
9 <sup>ο</sup> Πείραμα	38	Πληρότητα	Τοίχος με άνοιγμα	✓	✗
10 <sup>ο</sup> Πείραμα	38	Πληρότητα	Καθόλου ανοίγματα	✗	✗

Πίνακας 16: Χαρακτηριστικά πειραμάτων

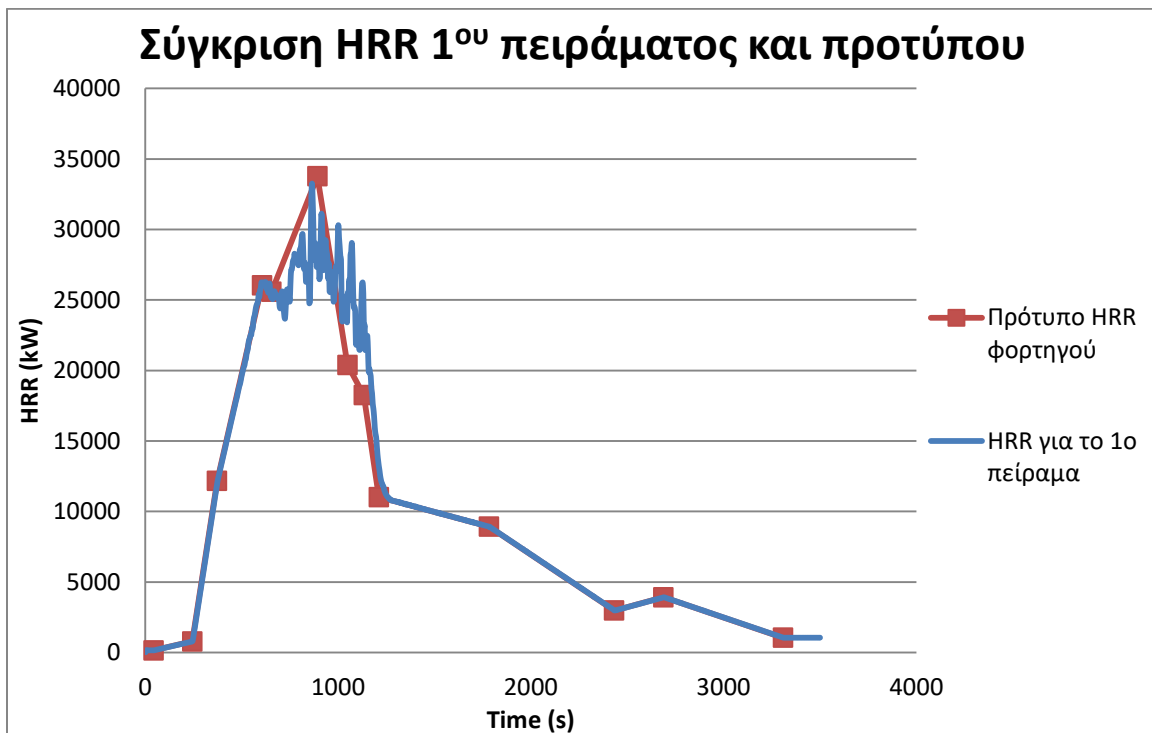
Ακολουθεί η καταγραφή και ο σχολιασμός των 10 βασικών πειραμάτων, καθώς και η μεταξύ τους σύγκριση που οδηγεί σε βασικά συμπεράσματα.

### 5.4.1 1ο Πείραμα

Το πρώτο πείραμα πραγματοποιήθηκε μόνο με το φορτηγό-πηγή στο κατάστρωμα έτσι ώστε να επιβεβαιωθεί η χρονική ιστορία του HRR. Όπως φαίνεται παρακάτω τα αποτελέσματα είναι αρκετά ικανοποιητικά και το Διάγραμμα 8 παρουσιάζει τιμές πολύ κοντά σε εκείνες του Διαγράμματος 7.



Εικόνα 30: Χώρος κατά το 1<sup>ο</sup> πείραμα

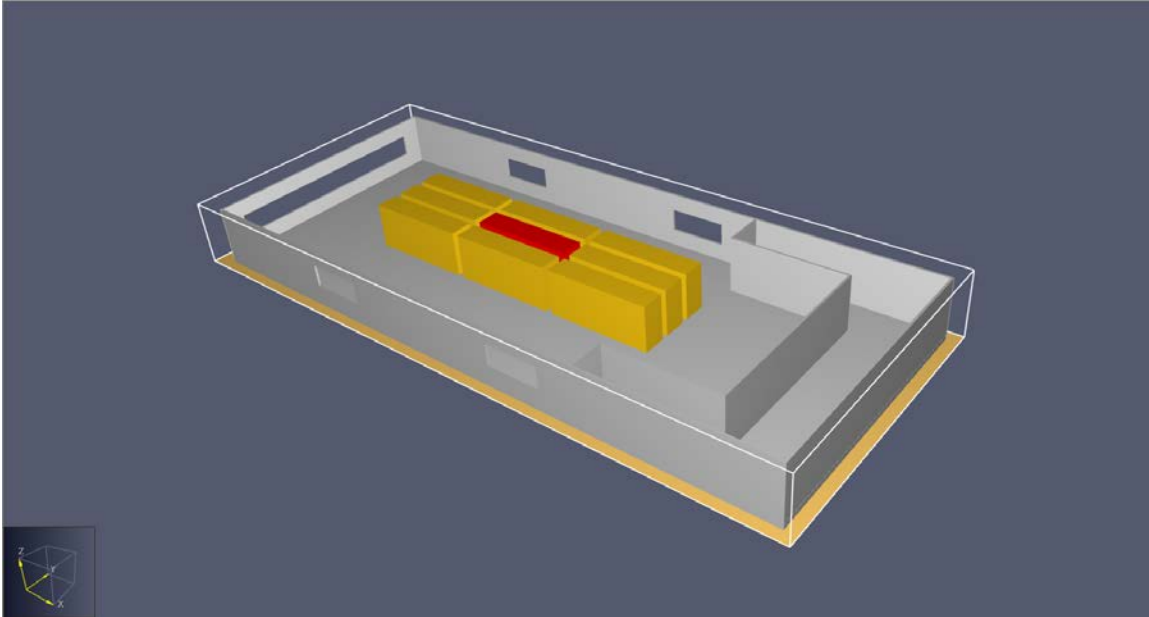


Διάγραμμα 8: Χρονική ιστορία HRR για το 1ο πείραμα σε σύγκριση με το πρότυπο που χρησιμοποιήθηκε

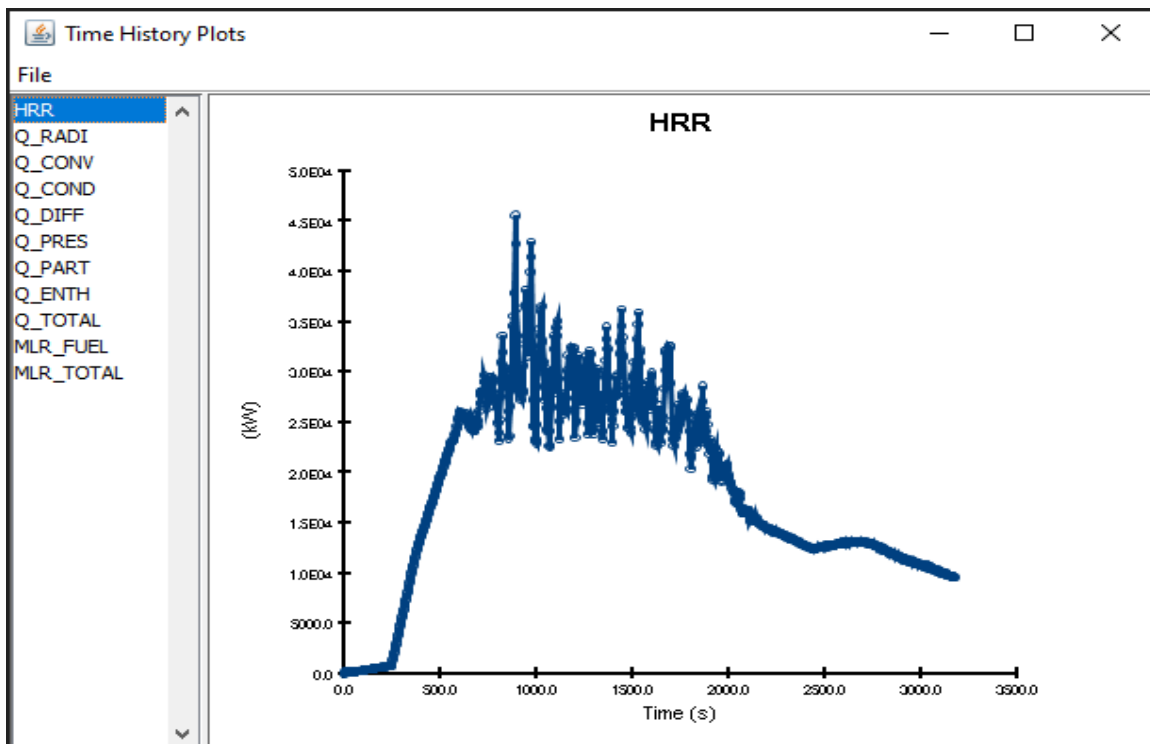


## 5.4.2 2ο Πείραμα

Το δεύτερο πείραμα πραγματοποιήθηκε με το φορτηγό-πηγή και με τα 8 πιο κοντινά του φορτηγά. Εξετάζεται η διαφορά της χρονικής ιστορίας του HRR με τη διαφορετική διαρρύθμιση των φορτηγών στο κατάστρωμα.



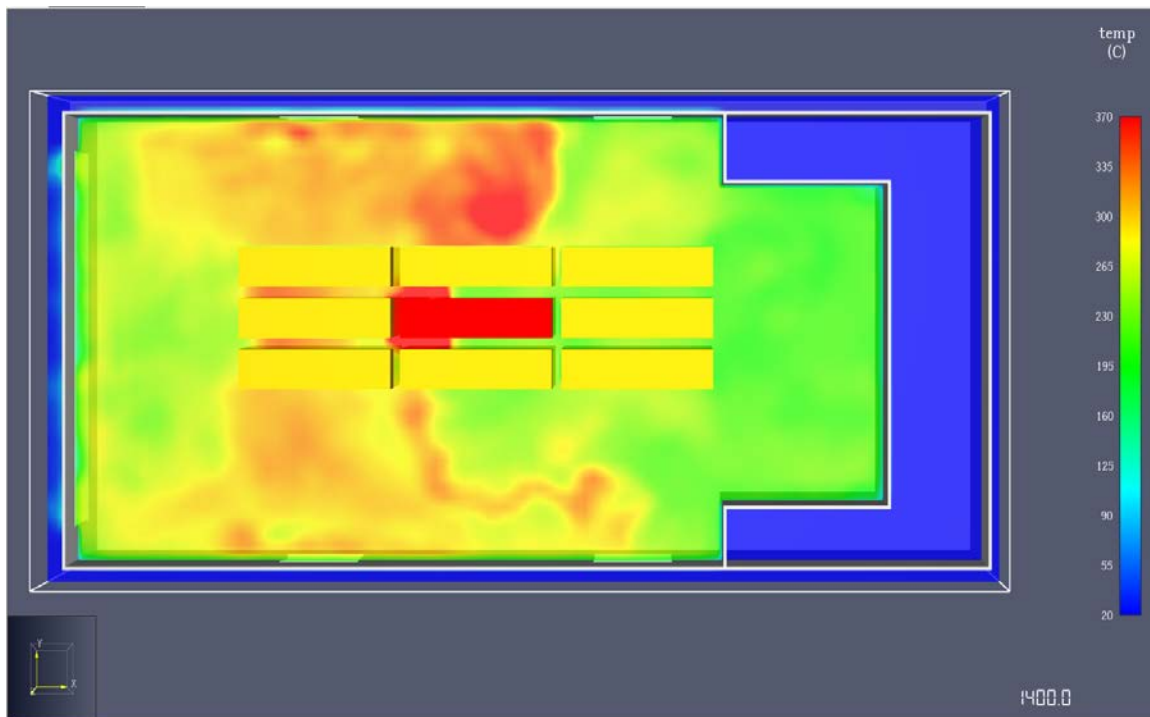
Εικόνα 31: Χώρος κατά το 2<sup>ο</sup> πείραμα



Διάγραμμα 9: Χρονική ιστορία HRR για το 2<sup>ο</sup> πείραμα

Παρατηρείται μια σαφής αύξηση στον ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας, που δικαιολογείται με την ανάφλεξη των γύρω φορτηγών και την συνδρομή των επιφανειών τους στο HRR. Τα φορτηγά που αναφλέγονται είναι εκείνα που είναι πιο κοντά στο πυρμναίο άνοιγμα, καθώς εκεί υπάρχει διαθέσιμο οξυγόνο, δηλαδή καύσιμο. Σημειώνεται, επίσης, πως σε αυτή την περίπτωση και παρά τις διακυμάνσεις, υπάρχει ένα μεγάλο χρονικό διάστημα (περίπου 1000 sec) όπου ο μέσος ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας είναι περίπου 27 MW, που πιθανόν κάνει την κατάσταση μη διαχειρίσιμη.

Παρακάτω παρατίθεται η κατάσταση που επικρατεί στο κατάστρωμα για την χρονική στιγμή των 1400 δευτερολέπτων. Πρόκειται για μία επιφάνεια που μετράει την θερμοκρασία σε ένα συγκεκριμένο ύψος, στην περίπτωση αυτή στα 3 μέτρα. Βλέπουμε αυξημένες τιμές κυρίως γύρω από την πηγή και προς την κατεύθυνση των ανοιγμάτων.

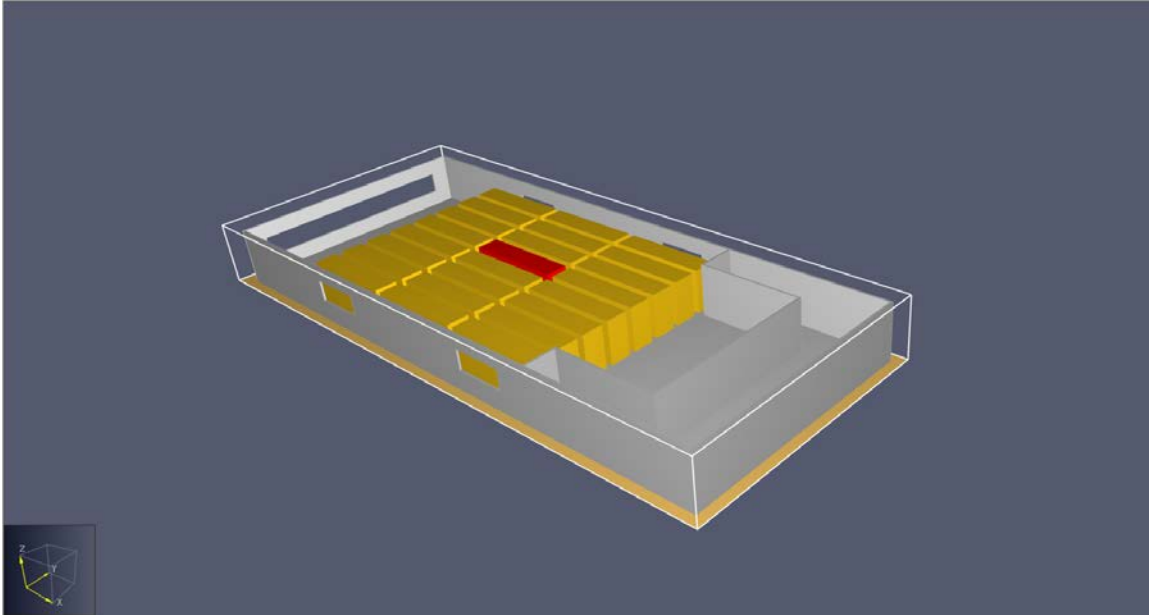


Εικόνα 32: Θερμοκρασιακή κατάσταση για  $z=3m$  τη χρονική στιγμή  $t=1400s$

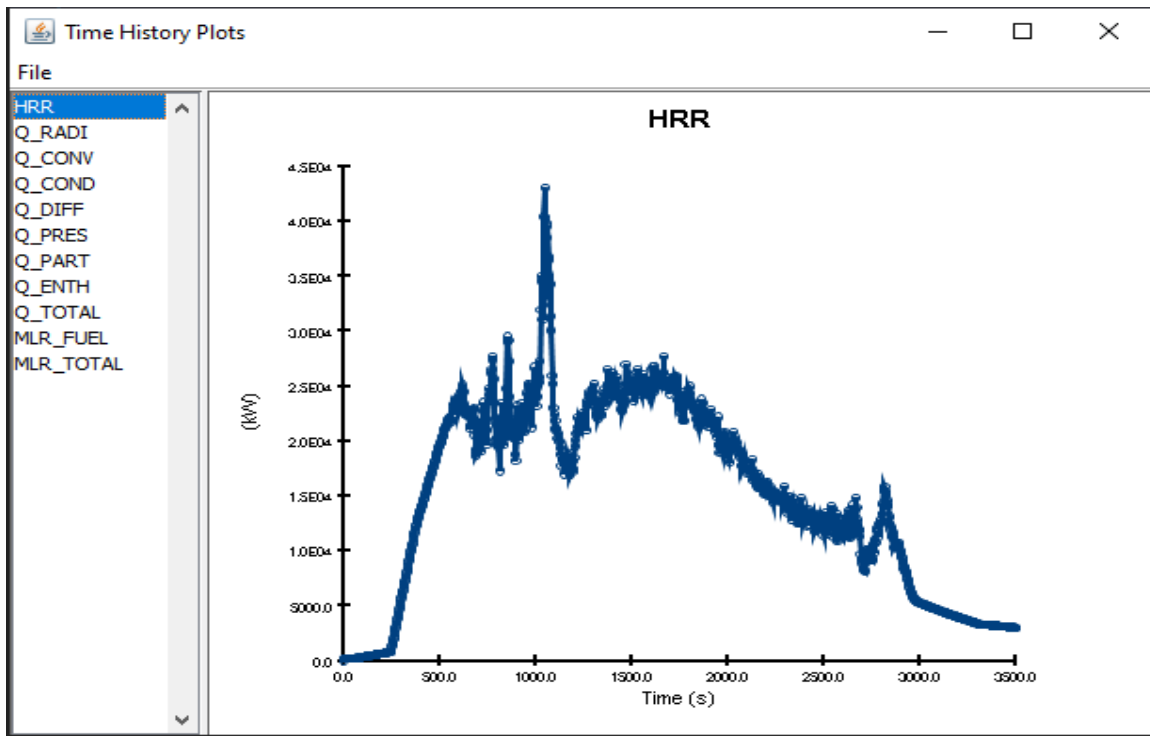
Οι μέγιστες θερμοκρασίες παρατηρούνται βέβαια στο ταβάνι του χώρου, δηλαδή στο ύψος των 5 μέτρων. Για αυτό το πείραμα η μέγιστη αυτή θερμοκρασία είναι  $620^{\circ}C$ .

### 5.4.3 3ο Πείραμα

Το τρίτο πείραμα πραγματοποιήθηκε με το φορτηγό-πηγή και με τα 23 πιο κοντινά του φορτηγά. Εξετάζεται η διαφορά της χρονικής ιστορίας του HRR με τη διαφορετική διαρρύθμιση των φορτηγών στο κατάστρωμα.



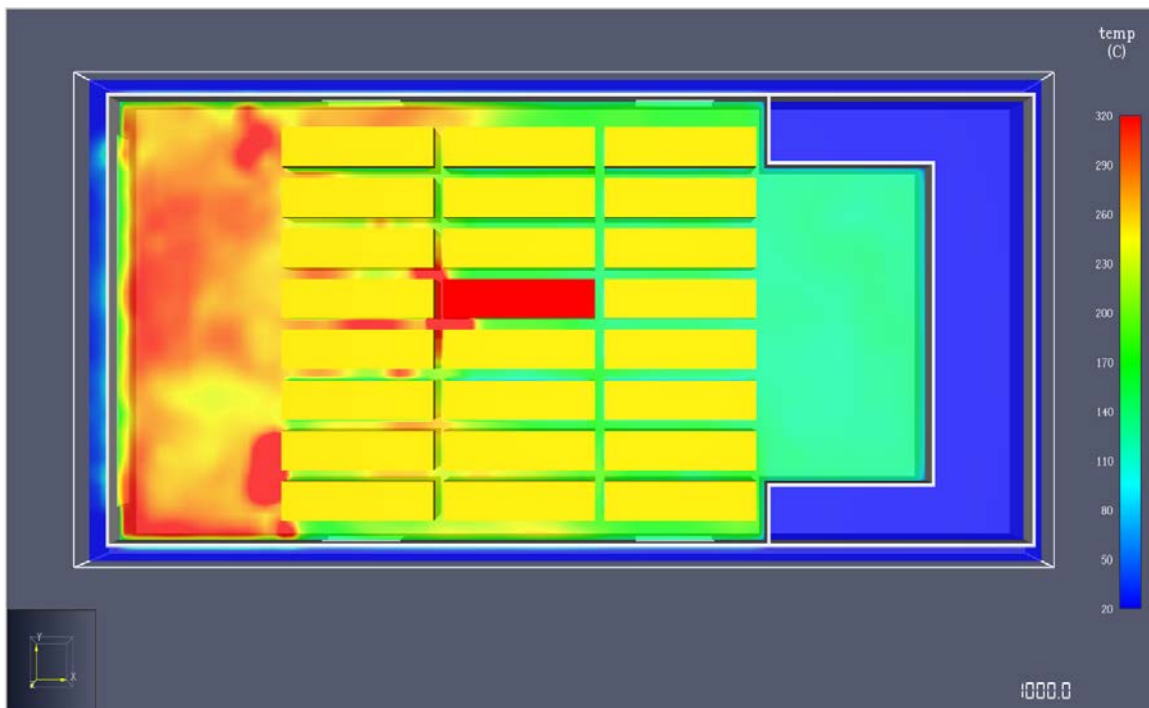
Εικόνα 33: Χώρος κατά το 3<sup>ο</sup> πείραμα



Διάγραμμα 10: Χρονική ιστορία HRR για το 3<sup>ο</sup> πείραμα

Η κατάσταση σε γενικές γραμμές φαίνεται παρόμοια με αυτή του 2<sup>ου</sup> πειράματος. Οι απότομες αυξομειώσεις αποδίδονται στην διαθέσιμη ποσότητα οξυγόνου στο χώρο. Όταν υπάρχει αρκετό διαθέσιμο καύσιμο ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας παίρνει αρκετά υψηλές τιμές. Όμως όταν εξαντληθεί, η έλλειψη καυσίμου σε συνδυασμό με την παραγωγή καπνού, από την καύση, που κατευθύνεται προς τα ανοίγματα και εμποδίζει την εισαγωγή φρέσκου αέρα οδηγεί σε μια απότομη μείωση του HRR.

Οι κύριες διαφορές με το προηγούμενο πείραμα είναι ότι σε αυτή την περίπτωση τα πλαϊνά ανοίγματα εμποδίζονται εν μέρει από τα φορτηγά που στο προηγούμενο πείραμα δεν υπήρχαν. Έτσι, παρά το γεγονός ότι οι χρονικές ιστορίες των HRR ακολουθούν την ίδια μορφή, στο δεύτερο έχουμε λίγο μικρότερες τιμές λόγω του μειωμένου οξυγόνου που εισέρχεται στον χώρο. Είναι λογικό, λοιπόν, στο πείραμα αυτό οι αυξημένες θερμοκρασίες να παρατηρούνται κυρίως προς το πίσω άνοιγμα όπου υπάρχει και ελεύθερος χώρος.

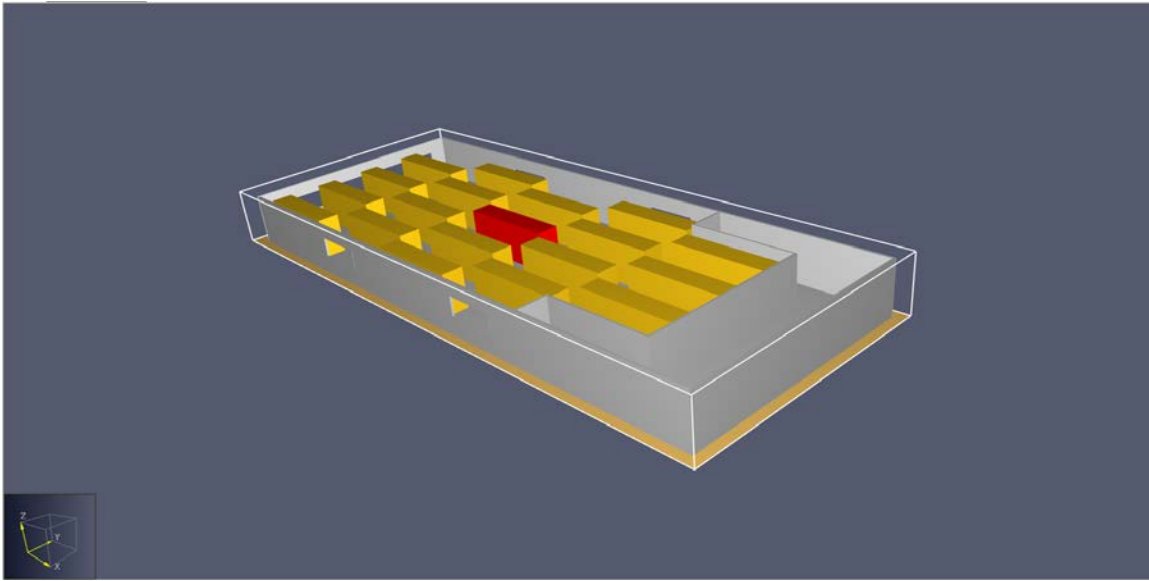


Εικόνα 34: Θερμοκρασιακή κατάσταση για  $z=3m$  τη χρονική στιγμή  $t=1000s$

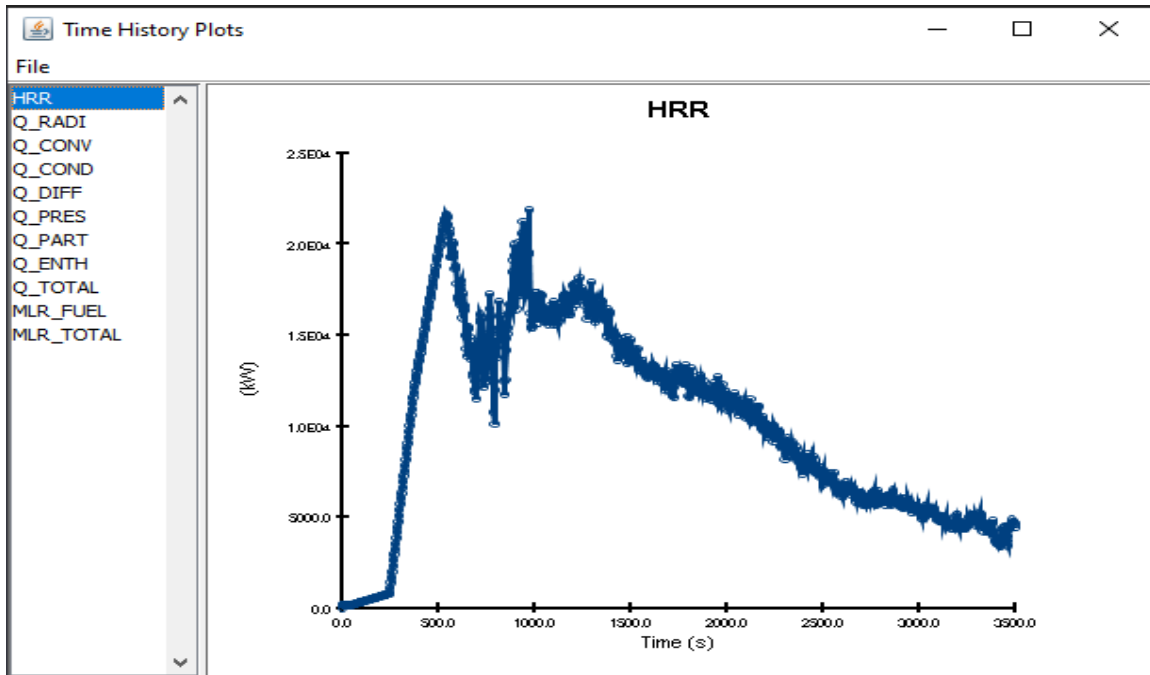
Η μέγιστη θερμοκρασία παρατηρείται στο ταβάνι του χώρου, δηλαδή στο ύψος των 5 μέτρων. Για αυτό το πείραμα η μέγιστη αυτή θερμοκρασία είναι  $520^{\circ}C$ .

#### 5.4.4 4ο Πείραμα

Το τέταρτο πείραμα πραγματοποιήθηκε με την παρουσία των μισών από τα υπόλοιπα φορτηγά τοποθετημένα εναλλάξ ώστε να υπάρχει ελεύθερος χώρος, οπότε οι εγκάρσιες αποστάσεις μεταξύ των φορτηγών είναι 3.3 m. Εξετάζεται η διαφορά της χρονικής ιστορίας του HRR με τη διαφορετική διαρρύθμιση των φορτηγών στο κατάστρωμα.

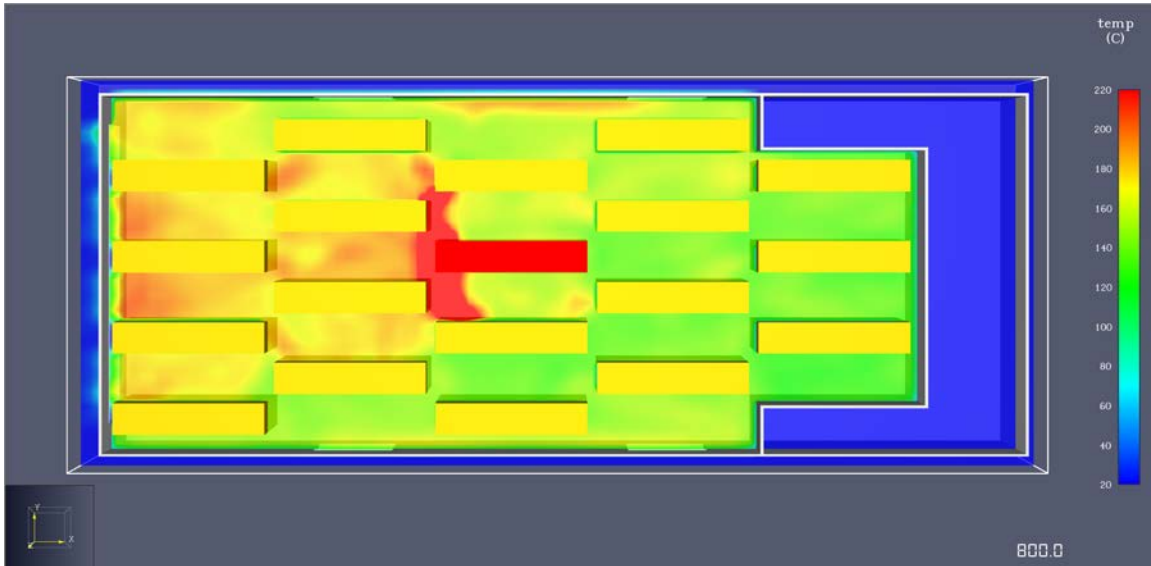


Εικόνα 35: Χώρος κατά το 4<sup>ο</sup> πείραμα

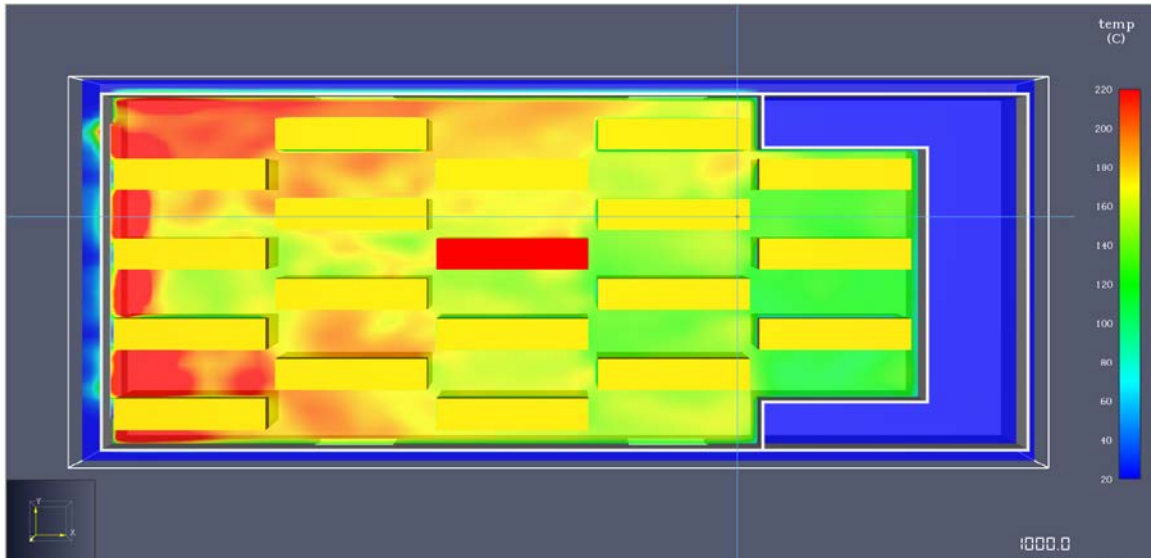


Διάγραμμα 11: Χρονική ιστορία HRR για το 4<sup>ο</sup> πείραμα

Στο πείραμα αυτό παρατηρούνται χαμηλότερες τιμές για τον ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας και κατά συνέπεια και χαμηλότερες θερμοκρασίες. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στη σχετικά μεγάλη απόσταση μεταξύ των φορτηγών, που καθιστά δύσκολη την ανάφλεξή τους και άρα την διάδοση της φωτιάς. Μετά την πρώτη κορυφή του HRR (περίπου στα 600 δευτερόλεπτα) υπάρχει μια μεγάλη μείωση καθώς η πυρκαγιά κατευθύνεται προς το πρυμναίο άνοιγμα. Στη συνέχεια λόγω του διαθέσιμου αέρα το HRR αυξάνεται ξανά.



Εικόνα 36: Θερμοκρασιακή κατάσταση για  $z=3m$  τη χρονική στιγμή  $t=800s$

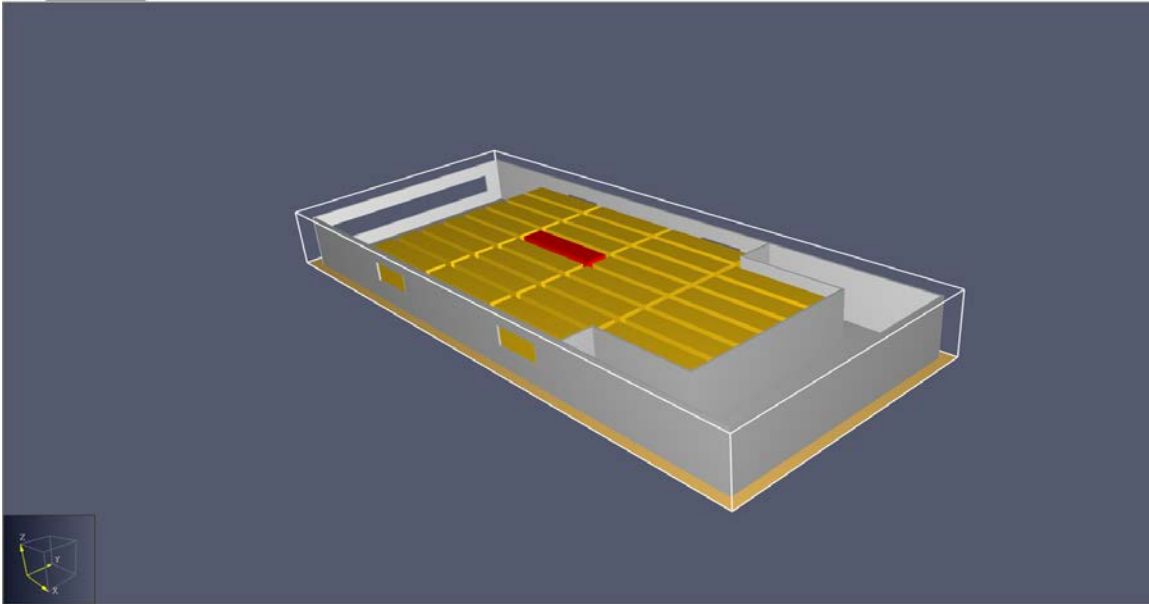


Εικόνα 37: Θερμοκρασιακή κατάσταση για  $z=3m$  τη χρονική στιγμή  $t=1000s$

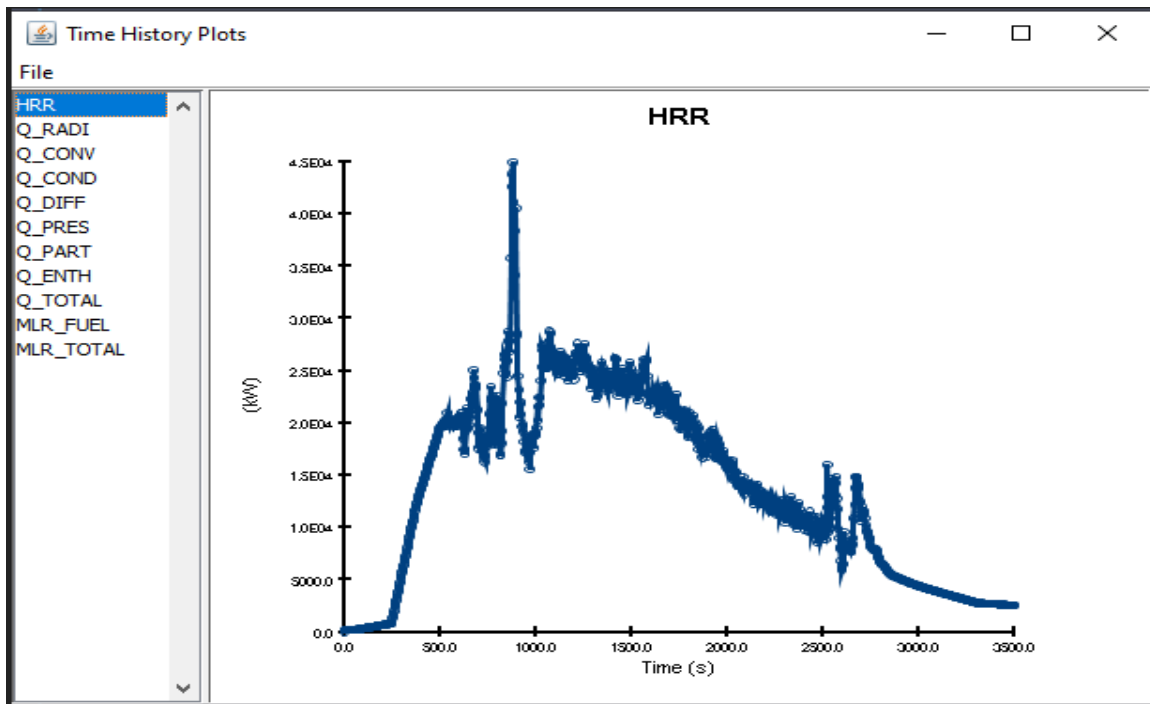
Η μέγιστη θερμοκρασία παρατηρείται στο ταβάνι του χώρου, δηλαδή στο ύψος των 5 μέτρων. Για αυτό το πείραμα η μέγιστη αυτή θερμοκρασία είναι  $420^{\circ}C$ .

### 5.4.5 5ο Πείραμα

Το πέμπτο πείραμα πραγματοποιήθηκε με το χώρο γεμάτο εκτός από την τελευταία σειρά, για να μην εμποδίζεται καθόλου το πυρναίο άνοιγμα. Εξετάζεται η διαφορά της χρονικής ιστορίας του HRR με τη διαφορετική διαρρύθμιση των φορτηγών στο κατάστρωμα.

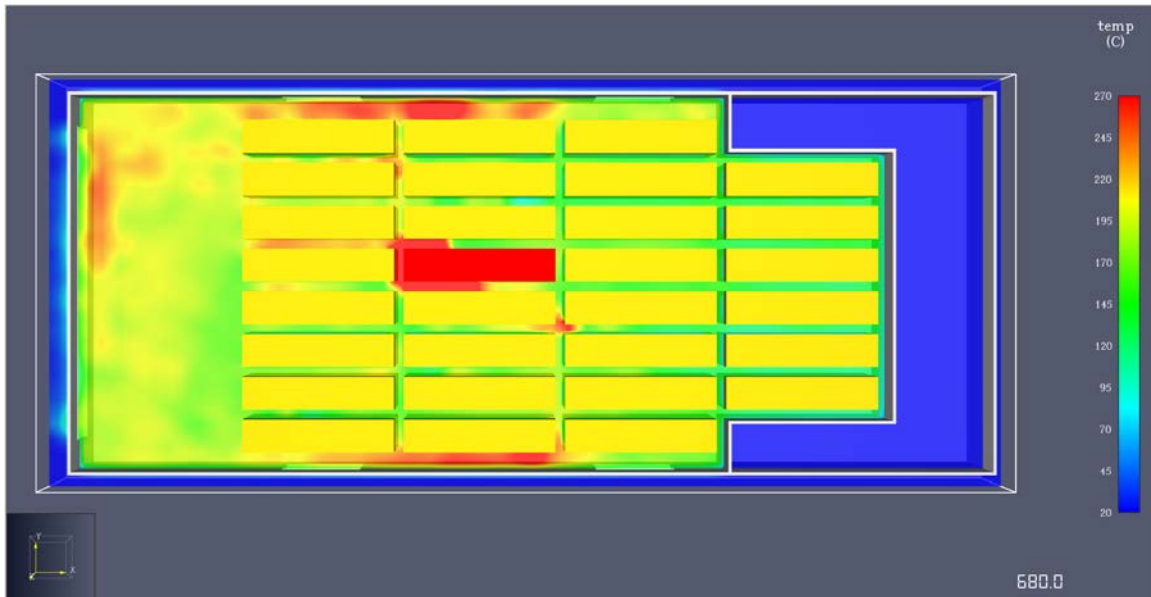


Εικόνα 38: Χώρος κατά το 5<sup>ο</sup> πείραμα

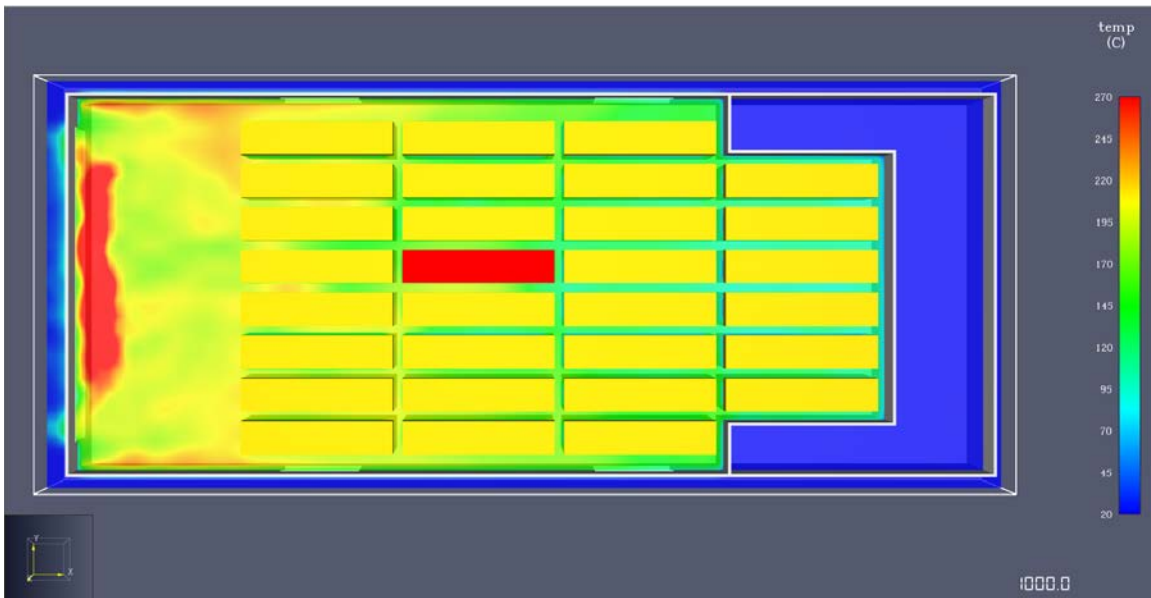


Διάγραμμα 12: Χρονική ιστορία HRR για το 5<sup>ο</sup> πείραμα

Όπως αναμενόταν η χρονική ιστορία του ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας είναι σχεδόν ίδια με αυτή του 3<sup>ου</sup> πειράματος, καθώς η μόνη αλλαγή είναι η παρουσία της μπροστινής σειράς φορτηγών, η οποία δεν επηρεάζει τόσο την διάδοση.



Εικόνα 39: Θερμοκρασιακή κατάσταση για  $z=3\text{m}$  τη χρονική στιγμή  $t=680\text{s}$ , όπου τα θερμά αέρια είναι συγκεντρωμένα κυρίως στα πλαϊνά ανοίγματα



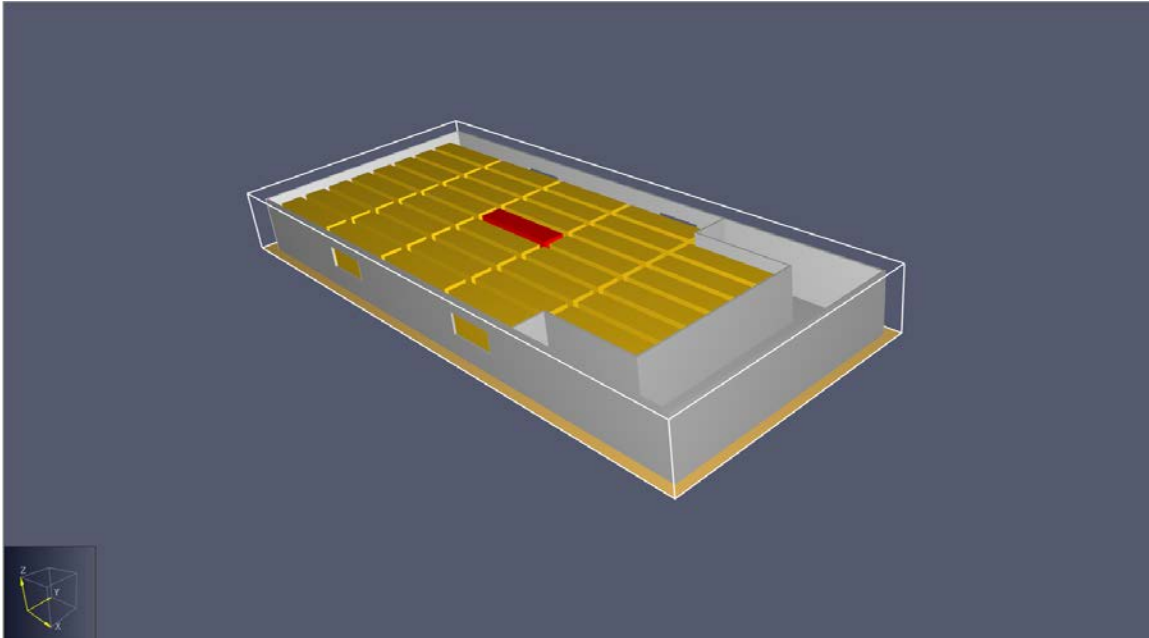
Εικόνα 40: Θερμοκρασιακή κατάσταση για  $z=3\text{m}$  τη χρονική στιγμή  $t=1000\text{s}$ , όπου τα θερμά αέρια είναι συγκεντρωμένα κυρίως στο πρυμναίο άνοιγμα

Η μέγιστη θερμοκρασία παρατηρείται στο ταβάνι του χώρου, δηλαδή στο ύψος των 5 μέτρων. Για αυτό το πείραμα η μέγιστη αυτή θερμοκρασία είναι  $520^{\circ}\text{C}$ .

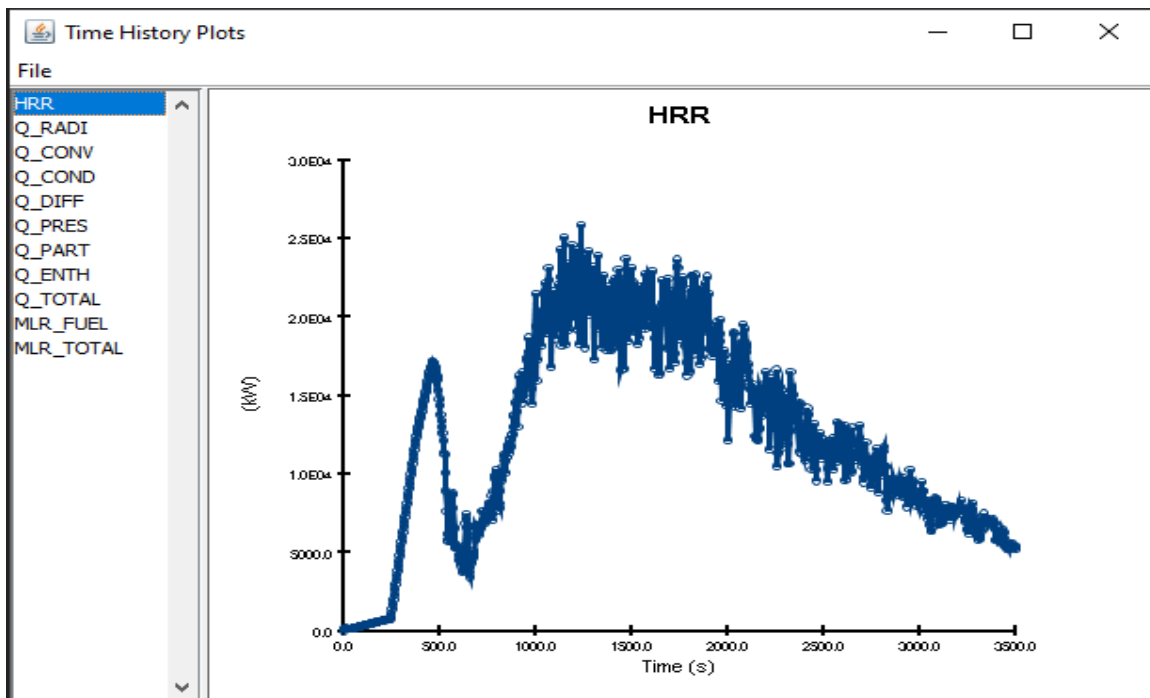


### 5.4.6 6ο Πείραμα

Το έκτο πείραμα πραγματοποιήθηκε με το χώρο πλήρως γεμάτο. Εξετάζεται η διαφορά της χρονικής ιστορίας του HRR με τη διαφορετική διαρρύθμιση των φορτηγών στο κατάστρωμα.

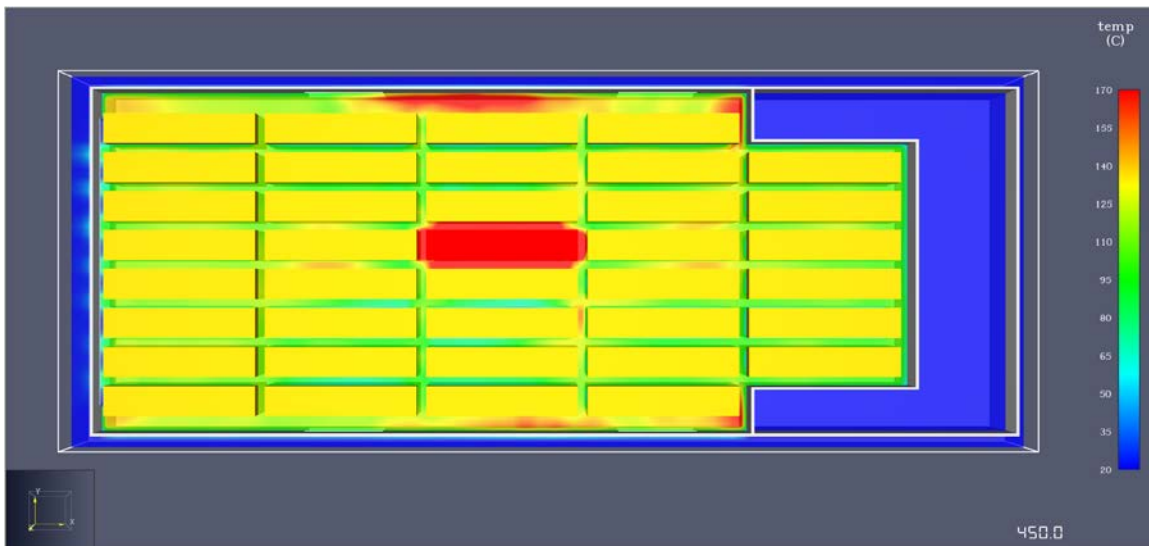


Εικόνα 41: Χώρος κατά το 6<sup>ο</sup> πείραμα

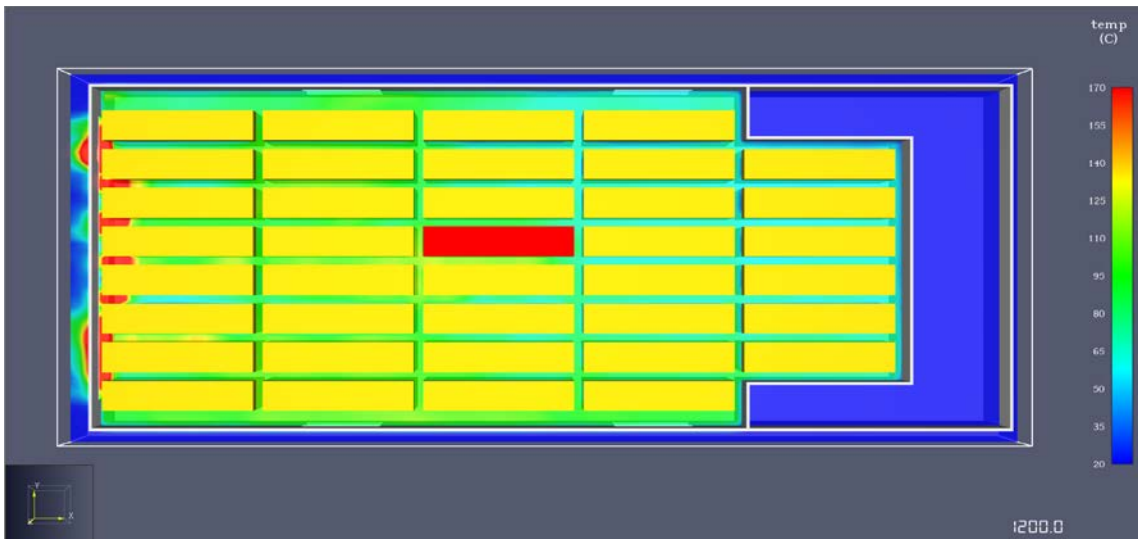


Διάγραμμα 13: Χρονική ιστορία HRR για το 6<sup>ο</sup> πείραμα

Στο πείραμα αυτό, λόγω της πληρότητας του χώρου, παρατηρούνται μειωμένες τιμές του HRR. Η είσοδος αέρα εμποδίζεται από τα φορτηγά που έχουν πολύ μικρές αποστάσεις από τα ανοίγματα και σε συνδυασμό με τον παραγόμενο καπνό από την καύση που ξεκινά, δεν αφήνει περιθώρια μεγάλης εξάπλωσης στην φωτιά. Η κοιλάδα στο γράφημα (στα 500 δευτερόλεπτα) δείχνει την χρονική στιγμή που τα θερμά αέρια αρχίζουν και μεταφέρονται προς το πυρναίο άνοιγμα λόγω έλλειψης οξυγόνου.



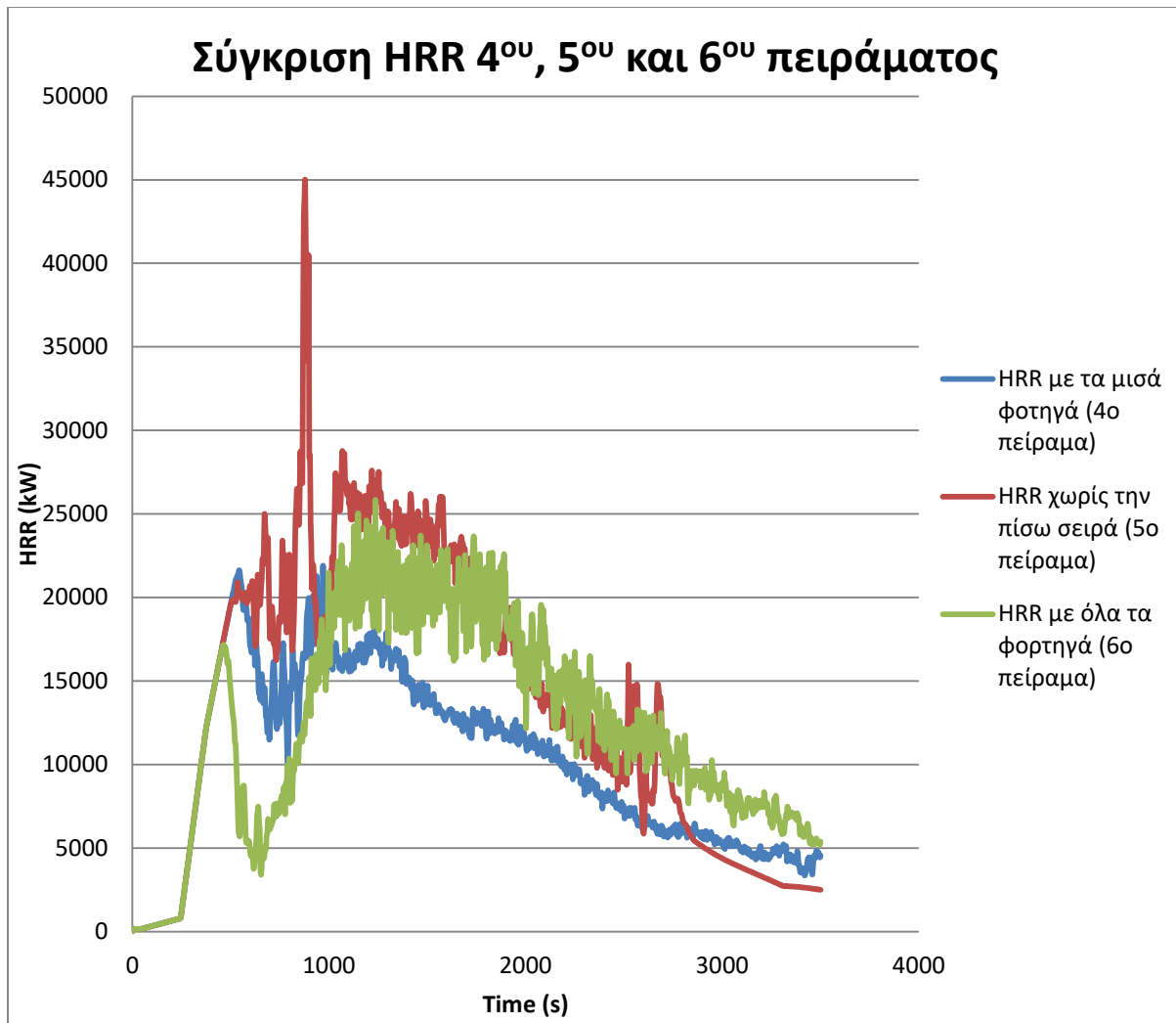
Εικόνα 42: Θερμοκρασιακή κατάσταση για  $z=3m$  τη χρονική στιγμή  $t=450s$ , όπου τα θερμά αέρια είναι συγκεντρωμένα κυρίως στα πλαϊνά ανοίγματα



Εικόνα 43: Θερμοκρασιακή κατάσταση για  $z=3m$  τη χρονική στιγμή  $t=1200s$ , όπου τα θερμά αέρια είναι συγκεντρωμένα κυρίως στο πυρναίο άνοιγμα

Η μέγιστη θερμοκρασία παρατηρείται στο ταβάνι του χώρου, δηλαδή στο ύψος των 5 μέτρων. Για αυτό το πείραμα η μέγιστη αυτή θερμοκρασία είναι  $370^{\circ}C$ .

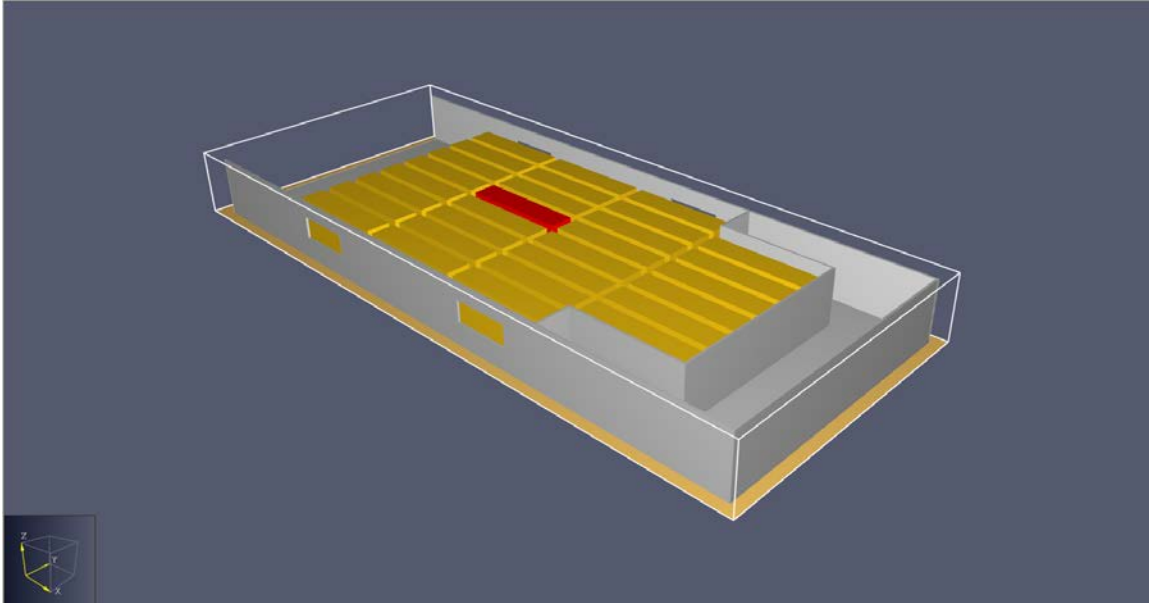
Στο Διάγραμμα 14 γίνεται η σύγκριση των πειραμάτων που διαφέρουν στη διαρρύθμιση των φορτηγών στο χώρο. Οι μεγαλύτερες, αρχικά, τιμές του HRR παρατηρούνται στην περίπτωση που απουσιάζει η τελευταία σειρά φορτηγών. Το γεγονός αυτό καθιστά πιο εύκολη την εισαγωγή του αέρα στο χώρο, κάτι που ευνοεί την πυρκαγιά. Για τον ίδιο λόγο, στο πείραμα με τον χώρο πλήρη έχουμε, αρχικά, χαμηλές τιμές HRR, αφού η εισροή εμποδίζεται όταν τον γκαράζ είναι γεμάτο. Μετά τα 1800s τα δύο αυτά πειράματα φαίνεται να ταυτίζονται, ενώ το 4<sup>ο</sup> πείραμα (μισά φορτηγά) παρουσιάζει χαμηλότερες τιμές λόγω της δυσκολότερης διάδοσης της φωτιάς, αφού οι αποστάσεις μεταξύ των φορτηγών είναι αρκετά μεγαλύτερες.



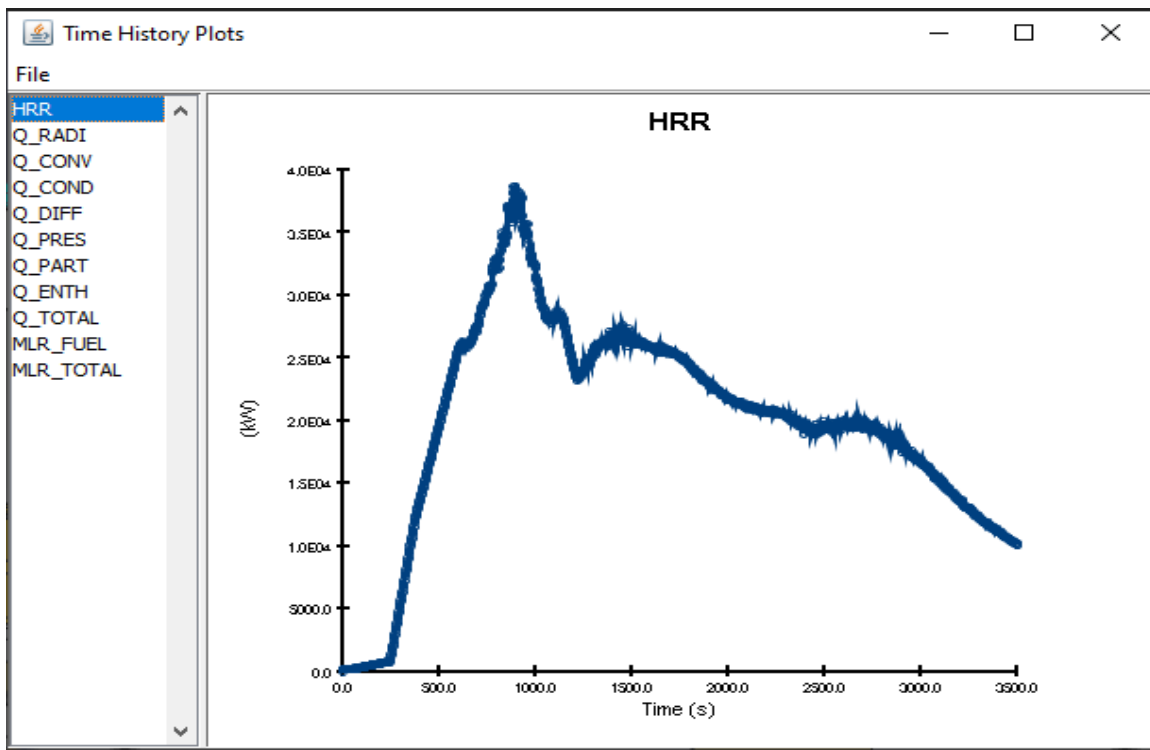
Διάγραμμα 14: Σύγκριση χρονικής ιστορίας HRR για το 4<sup>ο</sup>, 5<sup>ο</sup> και 6<sup>ο</sup> πείραμα

### 5.4.7 7ο Πείραμα

Το έβδομο πείραμα πραγματοποιήθηκε χωρίς να υπάρχει πυρμναίος τοίχος και χωρίς τη παρουσία της τελευταίας σειράς φορτηγών. Εξετάζεται η διαφορά της χρονικής ιστορίας του HRR με τη διαφορετική διαρρύθμιση των φορτηγών στο κατάστρωμα.

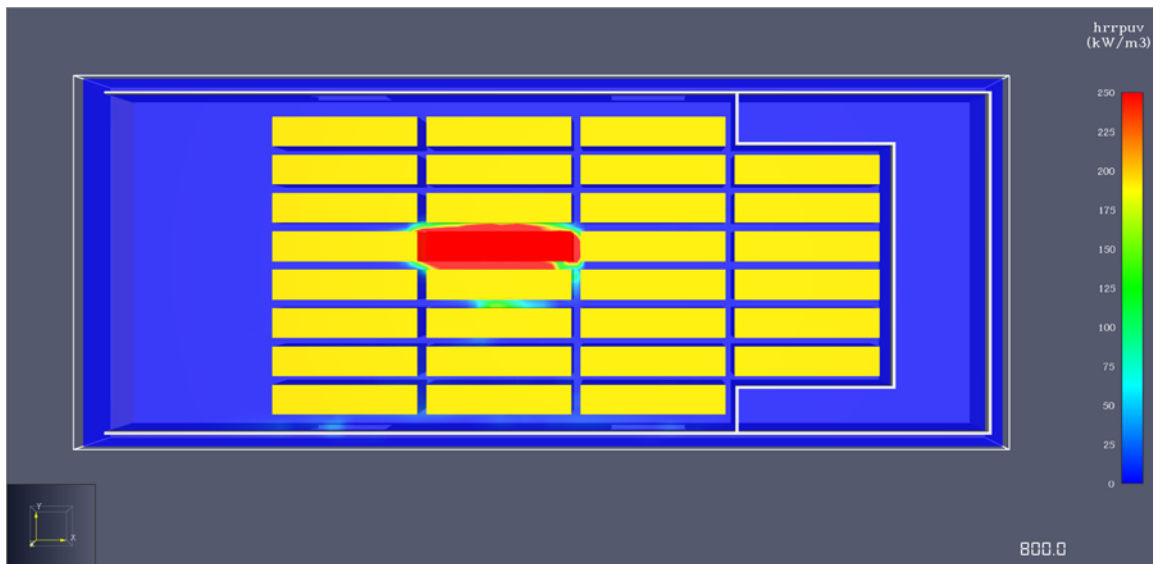


Εικόνα 44: Χώρος κατά το 7<sup>ο</sup> πείραμα

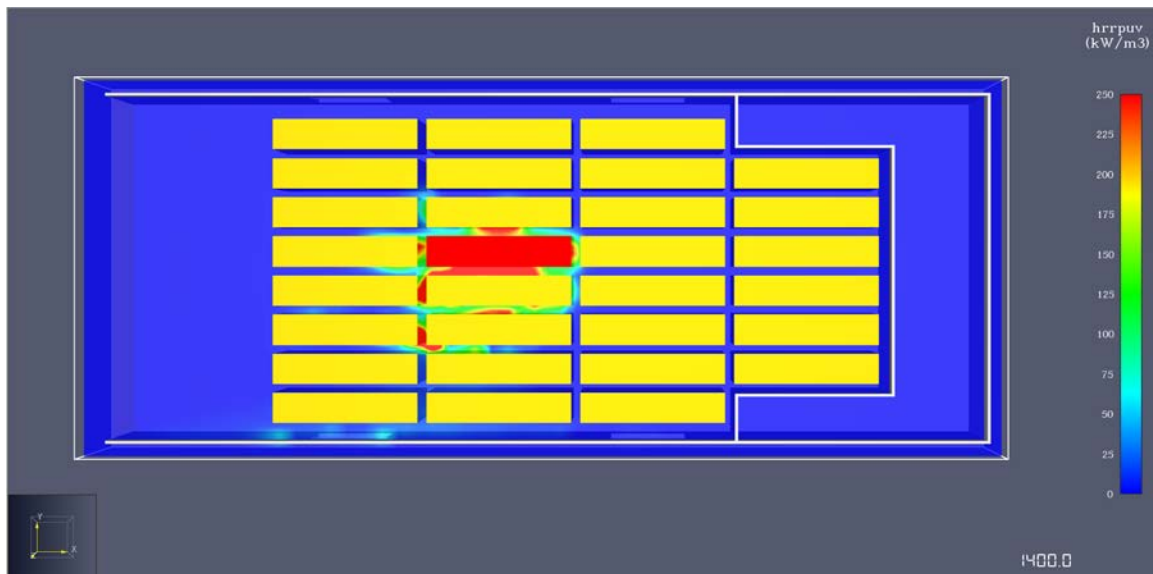


Διάγραμμα 15: Χρονική ιστορία HRR για το 7<sup>ο</sup> πείραμα

Το διάγραμμα, για αυτό το πείραμα, είναι εμφανώς πιο ομαλό από τα προηγούμενα, καθώς η παροχή αέρα είναι σταθερή και συνεχόμενη. Στα πρώτα στάδια της φωτιάς, η μορφή του μοιάζει αρκετά με την μορφή ενός απλού φορτηγού που καίγεται (Διάγραμμα 7). Διαφορές παρατηρούνται από τα 1200 δευτερόλεπτα και μετά, όπου τα κοντινά φορτηγά αρχίζουν και αναφλέγονται και έτσι έχουμε εκ νέου αύξηση του ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας. Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας ανά μονάδα όγκου (Heat Release Rate Per Volume Area) σε ύψος 4 μέτρων από το κατάρωμα για τις χρονικές στιγμές  $t = 800s$  και  $t = 1200s$ , που φανερώνει την ανάφλεξη των επιφανειών των γύρω φορτηγών.



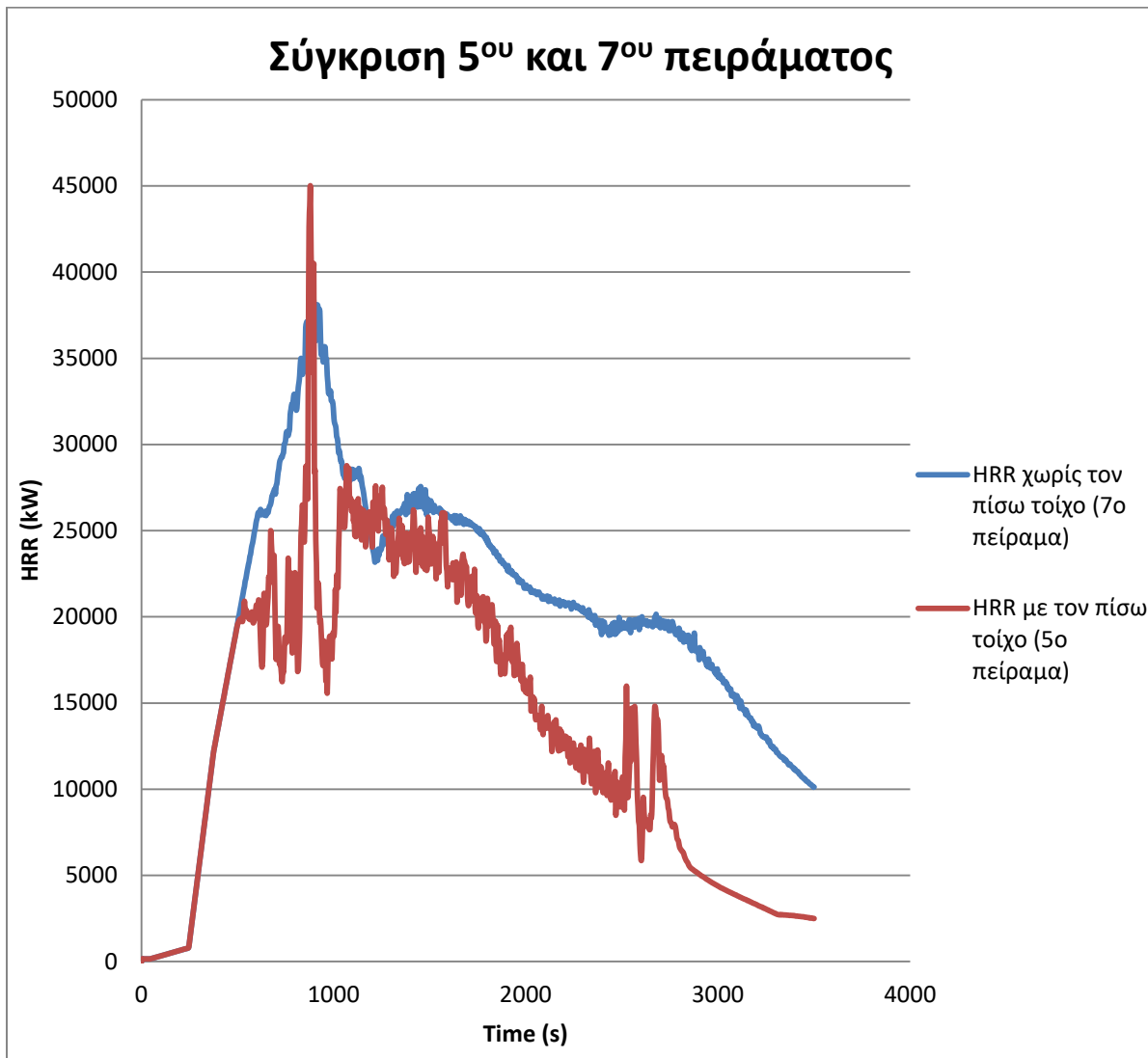
Εικόνα 45: HRRPUV τη χρονική στιγμή  $t=800s$ , όπου καίγεται μόνο το φορτηγό-πηγή



Εικόνα 46: HRRPUV τη χρονική στιγμή  $t=1400s$ , όπου αναφλέγονται και τα κοντινά φορτηγά

Η μέγιστη θερμοκρασία παρατηρείται στο ταβάνι του χώρου, δηλαδή στο ύψος των 5 μέτρων. Για αυτό το πείραμα η μέγιστη αυτή θερμοκρασία είναι 670°C.

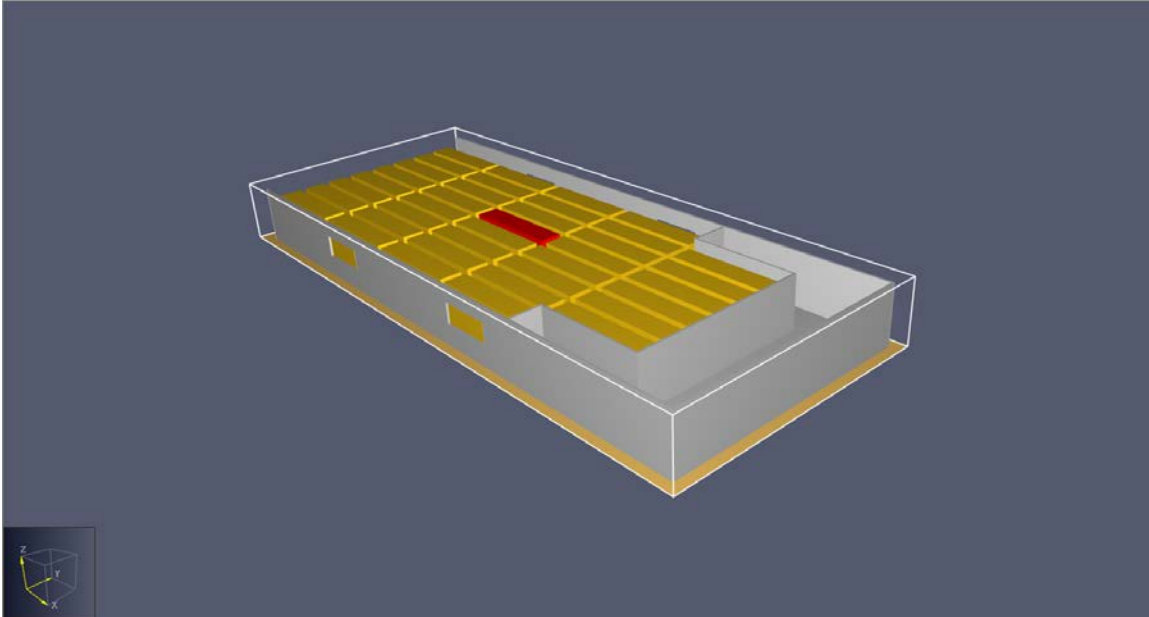
Παρακάτω παρουσιάζεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν για το 5<sup>ο</sup> και το 7<sup>ο</sup> πείραμα. Η διαφορά είναι ότι στην πρώτη περίπτωση υπήρχε πρυμναίος τοίχος με άνοιγμα, ενώ στην δεύτερη το κατάστρωμα ήταν ανοιχτό από την πίσω πλευρά. Και στις 2 περιπτώσεις δεν υπήρχε η τελευταία σειρά φορτηγών. Η σύγκριση αυτή φανερώνει τις, κατά μέσο όρο, υψηλότερες τιμές του HRR για το πείραμα με την ανοιχτή πίσω πλευρά, που δικαιολογείται από την ελεύθερη εισροή αέρα στον χώρο.



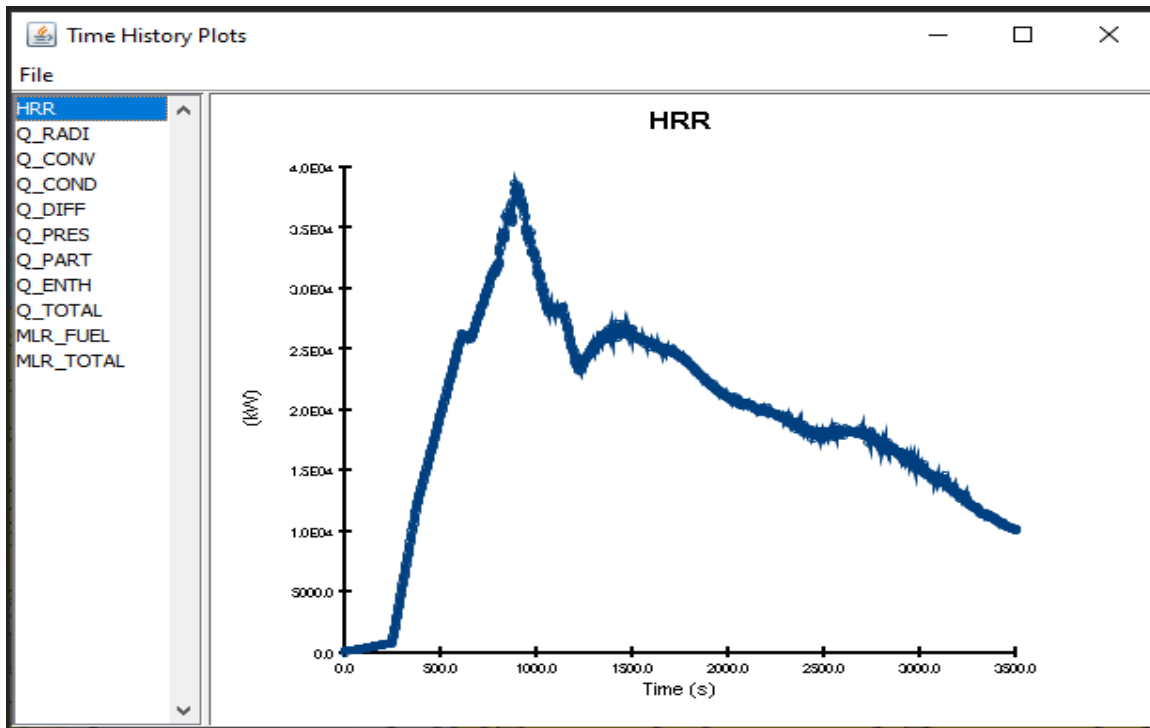
Διάγραμμα 16: Σύγκριση χρονικής ιστορίας HRR για το 5<sup>ο</sup> και 7<sup>ο</sup> πείραμα

### 5.4.8 8ο Πείραμα

Το όγδοο πείραμα πραγματοποιήθηκε με το χώρο πλήρως γεμάτο, αλλά με ανοιχτή την πίσω πλευρά. Εξετάζεται η διαφορά της χρονικής ιστορίας του HRR με τη διαφορετική διαρρύθμιση των φορτηγών στο κατάστρωμα.



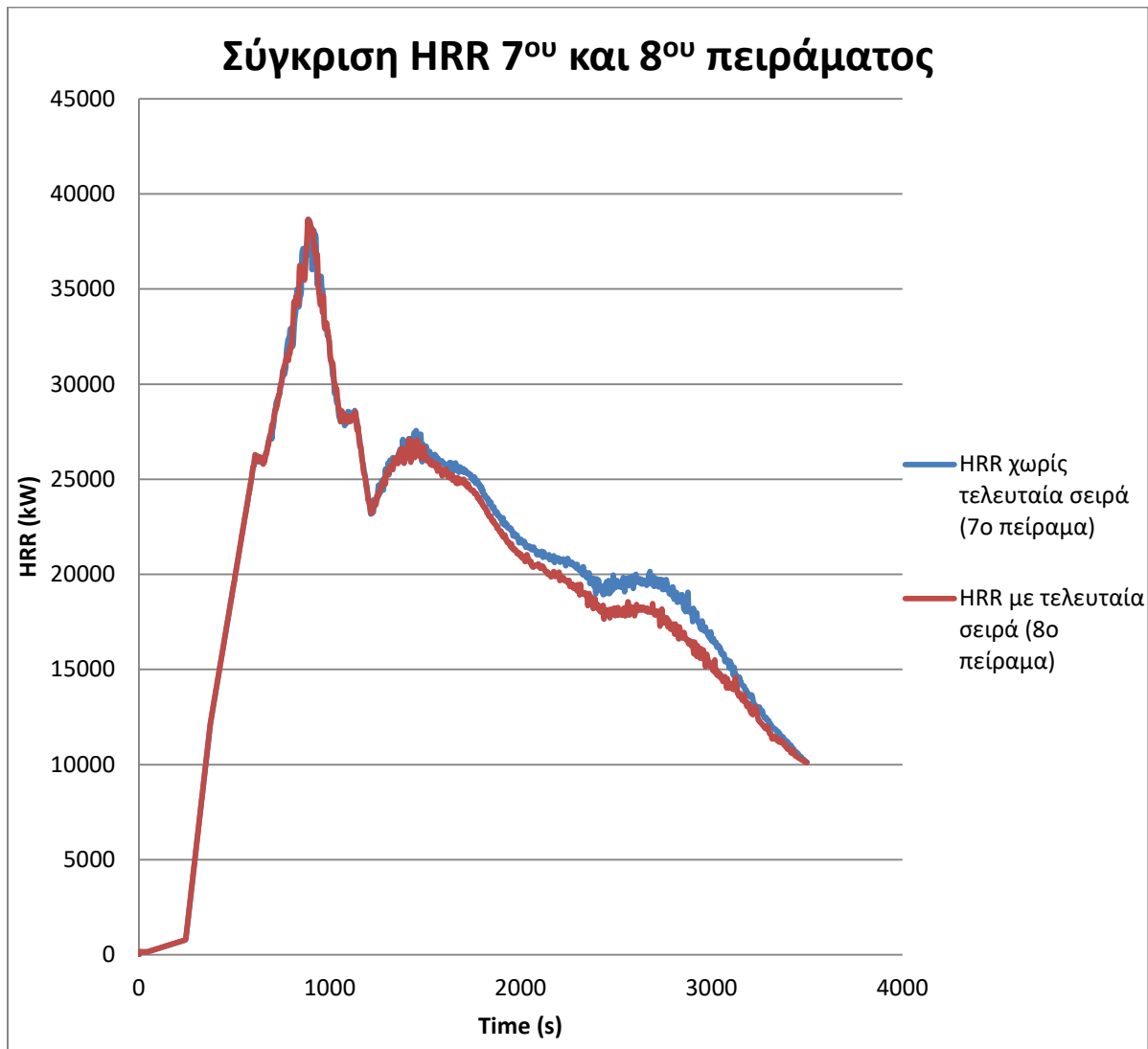
Εικόνα 47: Χώρος κατά το 8<sup>ο</sup> πείραμα



Διάγραμμα 17: Χρονική ιστορία HRR για το 8<sup>ο</sup> πείραμα

Η μέγιστη θερμοκρασία παρατηρείται στο ταβάνι του χώρου, δηλαδή στο ύψος των 5 μέτρων. Για αυτό το πείραμα η μέγιστη αυτή θερμοκρασία είναι 670°C.

Η μορφή του διαγράμματος του ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας είναι ίδια με αυτήν του προηγούμενου πειράματος, όπως αναμενόταν αφού η μόνη διαφορά είναι η παρουσία της τελευταίας σειράς φορητών. Η σημαντική παρατήρηση, που προκύπτει, είναι ότι στην περίπτωση του γεμάτου χώρου, οι τιμές του HRR είναι μικρότερες μετά τα 1400 δευτερόλεπτα. Αυτό συμβαίνει διότι η τελευταία σειρά καταλαμβάνει χώρο τον οποίο στο 7<sup>ο</sup> πείραμα καταλάμβανε αέρας, ενώ ταυτόχρονα δρα ως εμπόδιο στην εισροή του. Έτσι όταν η πυρκαγιά φτάνει στο σημείο που εξαρτάται από το διαθέσιμο οξυγόνο παρατηρείται μείωση του HRR για την περίπτωση που η τελευταία σειρά φορητών υπάρχει.



Διάγραμμα 18: Σύγκριση χρονικής ιστορίας HRR για το 7ο και 8ο πείραμα



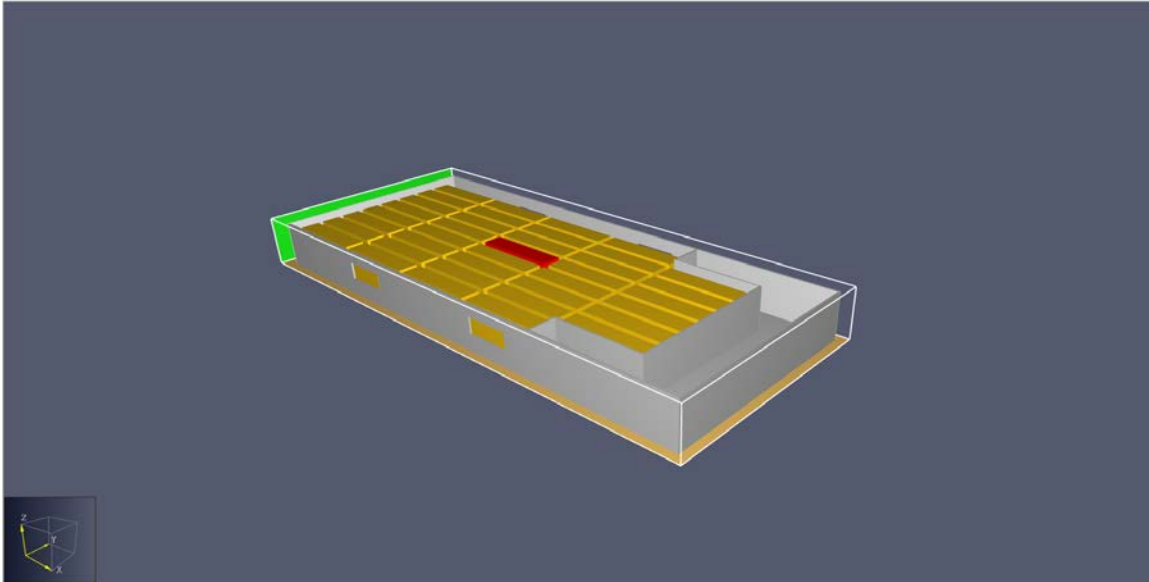
Το 6<sup>ο</sup> και το 8<sup>ο</sup> πείραμα διεξήχθησαν έχοντας και στις 2 περιπτώσεις πληρότητα φορτηγών στο κατάστρωμά τους, με την μόνη διαφορά να βρίσκεται στην ύπαρξη ή όχι του πυρμαίου τοίχου. Η έλλειψη οξυγόνου, ως καύσιμο για την φωτιά, για το 6<sup>ο</sup> πείραμα είναι εμφανής στη σύγκριση των αντίστοιχων HRR. Μάλιστα για το πείραμα με τον πίσω τοίχο παρατηρείται μία απότομη μείωση του ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας στα 500s, ενώ από τα 1500s και έπειτα οι μορφές των διαγραμμάτων είναι όμοιες με μια σχεδόν σταθερή διαφορά των 5000 kW. Με τη σύγκριση αυτή γίνεται κατανοητή η σημασία των ανοιγμάτων για την επέκταση και την ένταση της πυρκαγιάς.



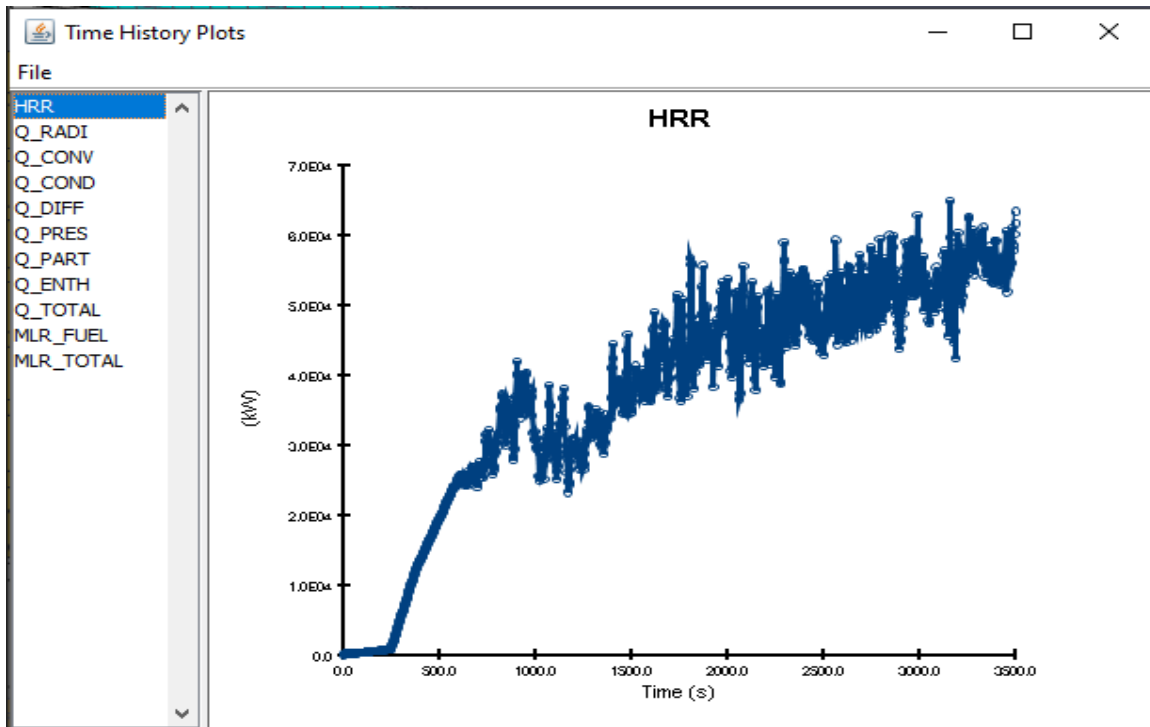
Διάγραμμα 19: Σύγκριση χρονικής ιστορίας HRR για το 6ο και 8ο πείραμα

### 5.4.9 9ο Πείραμα

Το ένατο πείραμα πραγματοποιήθηκε με το χώρο πλήρως γεμάτο και με πυρμαίο τοίχο με άνοιγμα. Σε αυτή την περίπτωση έχουμε και την παρουσία ανέμου, που ορίζεται ως η πράσινη επιφάνεια. Εξετάζεται η διαφορά της χρονικής ιστορίας του HRR με τη διαφορετική διαρρύθμιση των φορτηγών στο κατάστρωμα.

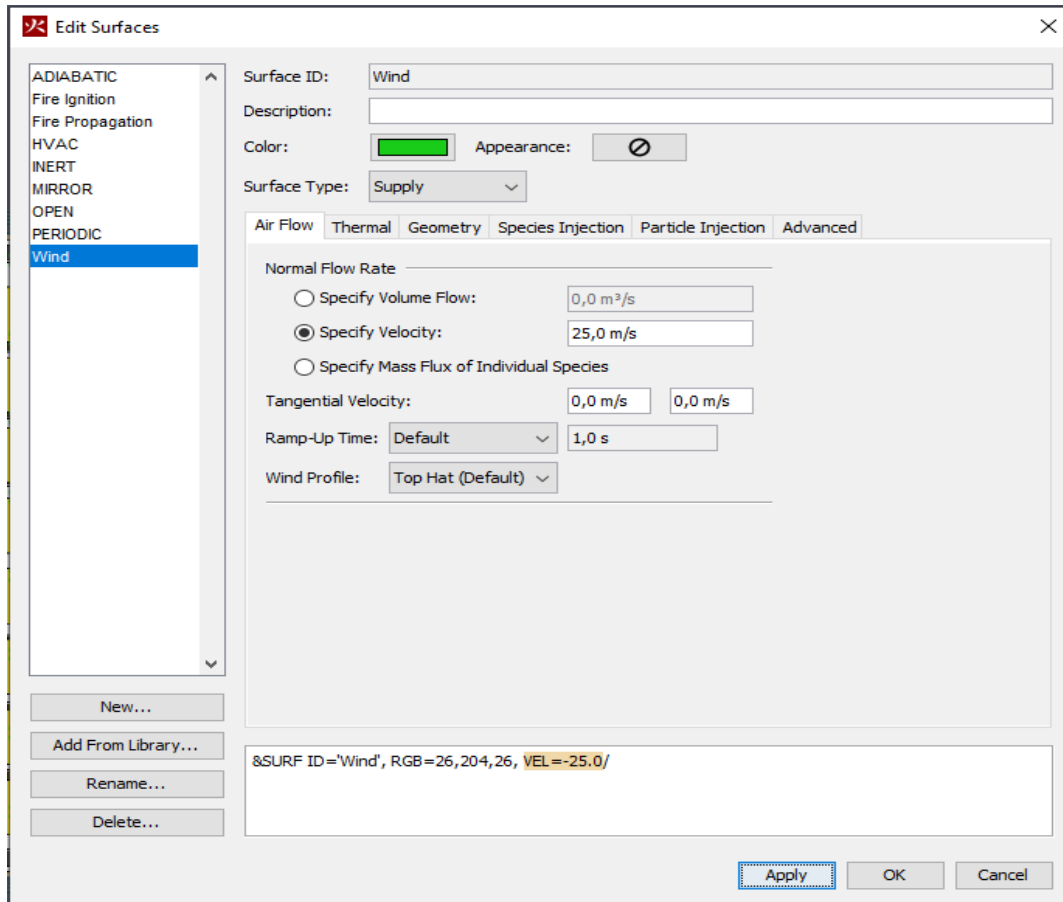


Εικόνα 48: Χώρος κατά το 9ο πείραμα



Διάγραμμα 20: Χρονική ιστορία HRR για το 9<sup>ο</sup> πείραμα

Ο άνεμος στο PyroSim ορίζεται ως μια supply επιφάνεια με δυνατότητες επιλογής όγκου ροής ή συγκεκριμένης ταχύτητας. Για το πείραμα επιλέχθηκε σταθερός άνεμος 25 m/s με κατεύθυνση από την πρύμνη προς την πλώρη, ώστε να είναι κάθετα στο άνοιγμα. Τα 25 m/s αντιστοιχούν σε 10 beaufort ή 49 κόμβους, που θεωρείται μια ισχυρή κατάσταση θάλασσας, επιλογή που έγινε καθώς κάποιες από τις σοβαρές περιπτώσεις που περιγράφονται στα στατιστικά συνέβησαν σε τέτοιες καιρικές συνθήκες.

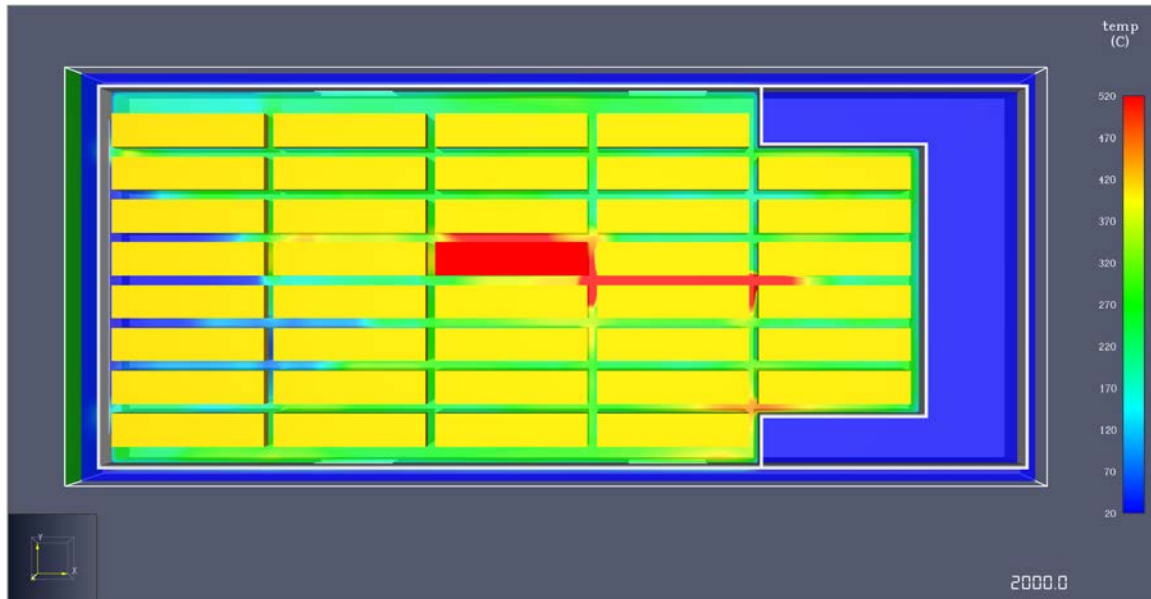


Εικόνα 49: Ορισμός ανέμου στο PyroSim

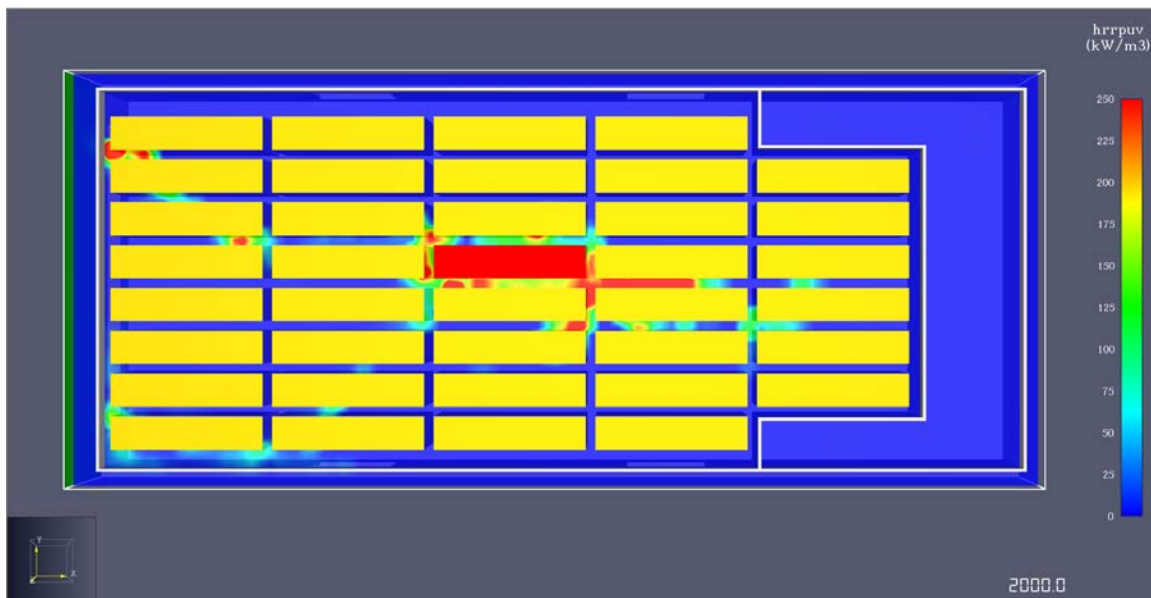
Σε αυτό το πείραμα η παρουσία του ανέμου, που έχει και τέτοια κατεύθυνση ώστε να εισέρχεται από το μεγάλο πρυμναίο άνοιγμα, δίνει στην πυρκαγιά εξαιρετικά μεγάλες διαστάσεις. Η διάδοση και η εξάπλωση γίνεται με μεγάλες ταχύτητες κάτι που πιθανόν σε πραγματικές περιπτώσεις να οδηγήσει σε σοβαρό ατύχημα, ίσως και ολική απώλεια του πλοίου.

Ο αέρας, ενώ κρατάει τον χώρο γύρω από το άνοιγμα σε χαμηλές θερμοκρασίες, ωθεί τα θερμά αέρια και τα προϊόντα της καύσης προς το μπροστινό μέρος του χώρου (Εικόνα 50). Το αποτέλεσμα είναι η ανάφλεξη των φορτηγών εμπρός και γύρω από το

φορτηγό πηγή (Εικόνα 51), εκεί δηλαδή που υπάρχει συσσώρευση υψηλών θερμοκρασιών και φλογών. Η συνεχής τροφοδοσία καυσίμου (οξυγόνου) στη φωτιά, δίνει στο HRR ένα συνεχώς αυξανόμενο ρυθμό.



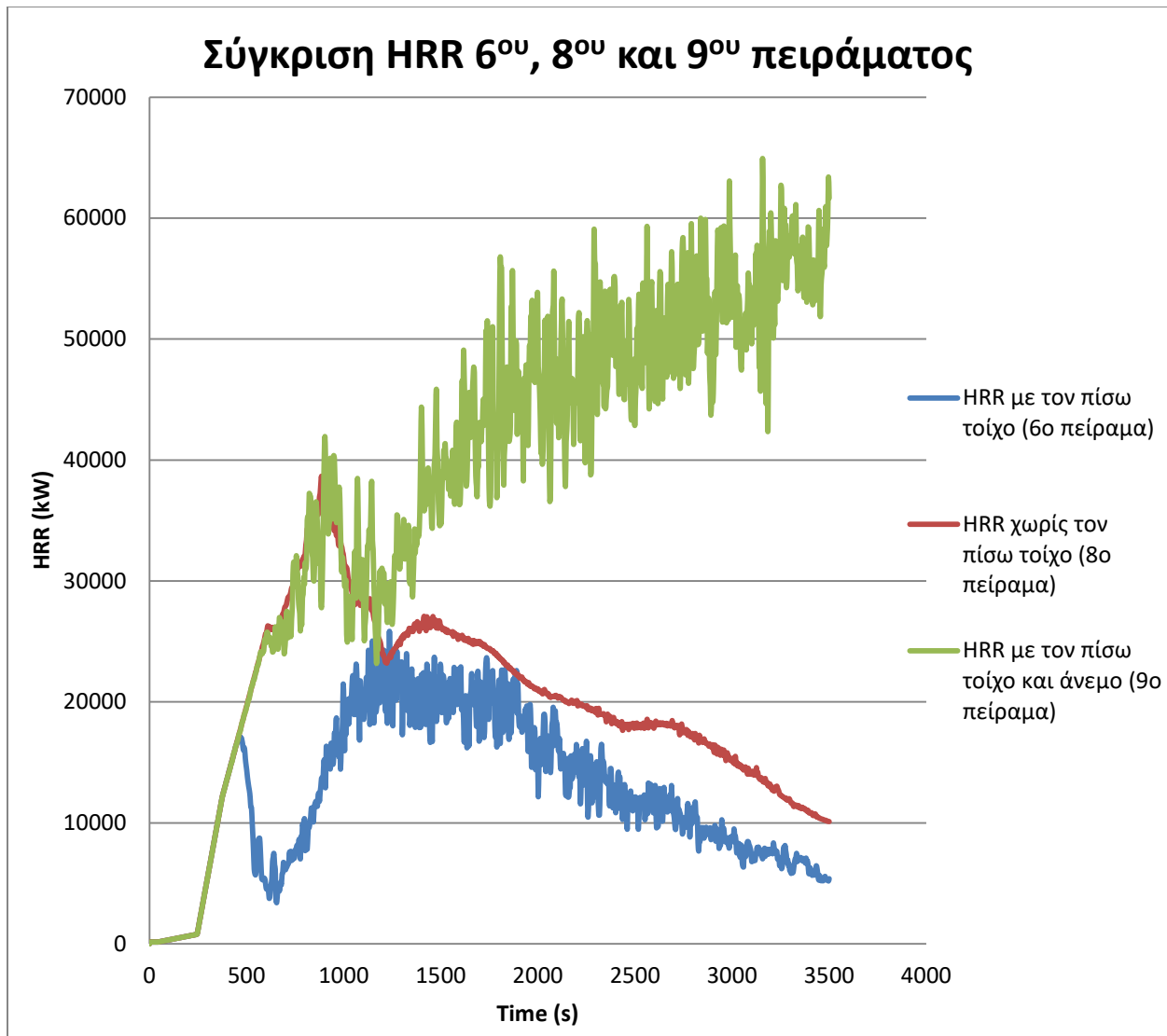
Εικόνα 50: Θερμοκρασιακή κατάσταση για  $z=3\text{m}$  τη χρονική στιγμή  $t=2000\text{s}$ , όπου τα θερμά αέρια είναι συγκεντρωμένα κυρίως στο μπροστινό μέρος του χώρου



Εικόνα 51: HRRPUV τη χρονική στιγμή  $t=2000\text{s}$ , όπου αναφλέγονται τα μπροστινά φορτηγά

Η μέγιστη θερμοκρασία παρατηρείται στο ταβάνι του χώρου, δηλαδή στο ύψος των 5 μέτρων. Για αυτό το πείραμα η μέγιστη αυτή θερμοκρασία είναι  $820^{\circ}\text{C}$ , σαφώς μεγαλύτερη από όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις.

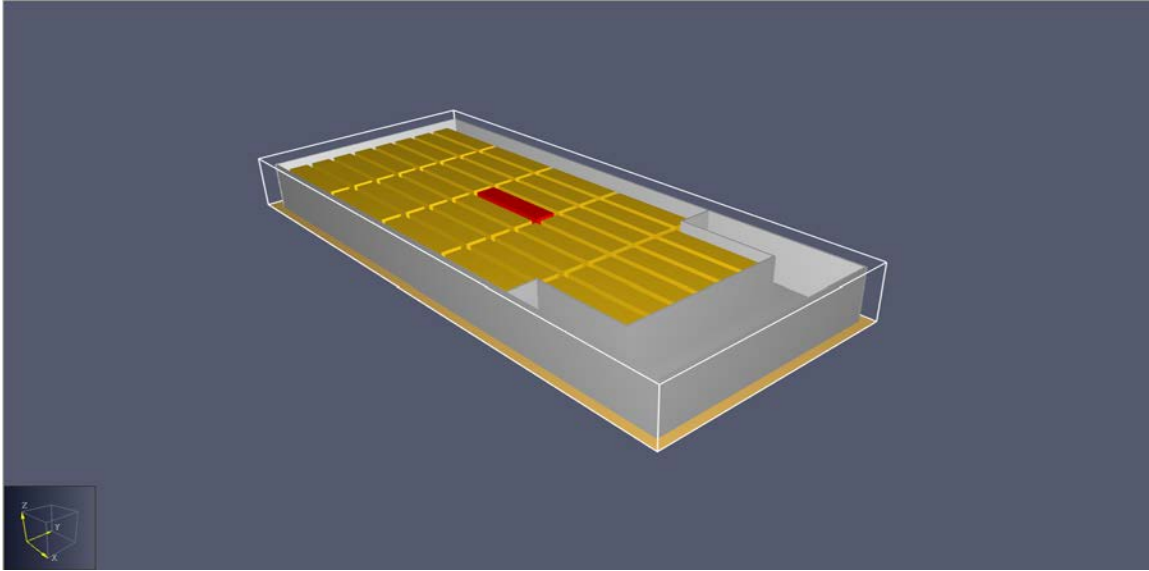
Συγκρίνοντας τα πειράματα, τα οποία είχαν πληρότητα στο γκαράζ, παρατηρούνται σημαντικές διαφορές. Στην περίπτωση που οι καιρικές συνθήκες είναι δυσμενείς και ο άνεμος τροφοδοτεί συνεχώς την πυρκαγιά το τελικό αποτέλεσμα στην μία ώρα δίνει τιμές HRR περίπου 50 MW πάνω από τις υπόλοιπες περιπτώσεις. Ενώ στην αρχή και μέχρι τα 1000s η μορφή του διαγράμματος του πειράματος 9 ακολουθεί εκείνη του πειράματος 8 (χωρίς τον πίσω τοίχο), στη συνέχεια η διαφορά της παρουσίας οξυγόνου στο χώρο ανάμεσα στα 2 πειράματα οδηγεί σε πολύ διαφορετικά αποτελέσματα. Το προφανές συμπέρασμα, που αποτυπώνεται και στο διάγραμμα, είναι πως όσο λιγότερη είναι η ανανέωση του αέρα, τόσο καλύτερη είναι και η έκβαση του πειράματος.



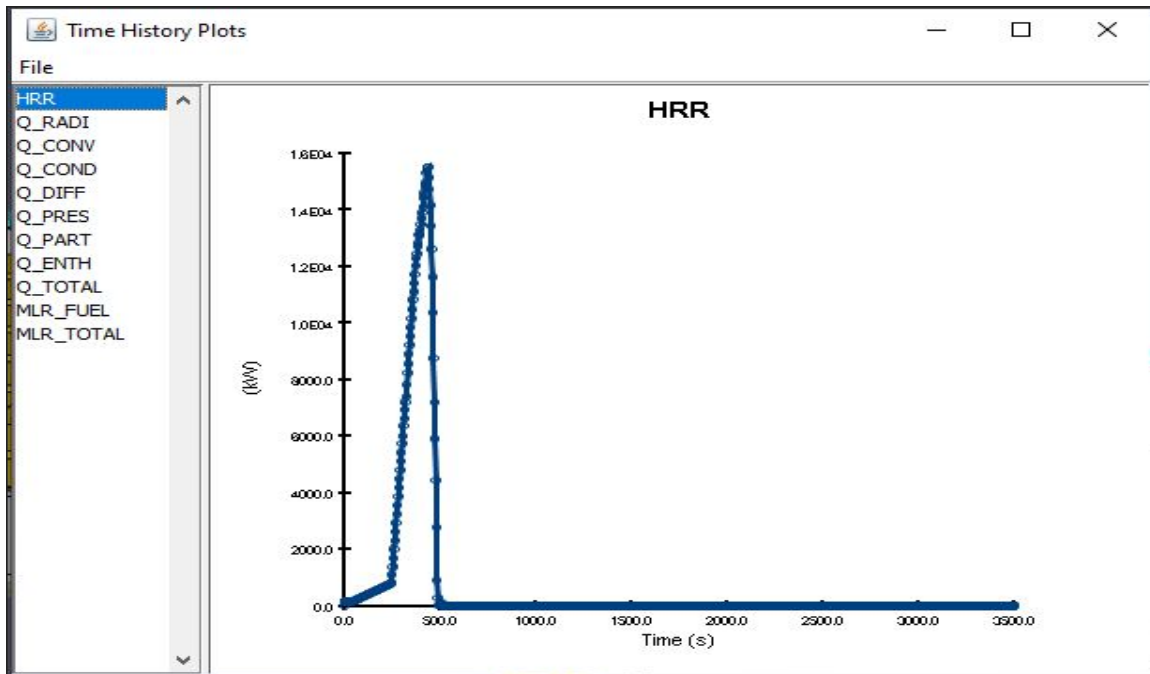
Διάγραμμα 21: Σύγκριση χρονικής ιστορίας HRR για το 6<sup>ο</sup>, 8<sup>ο</sup> και 9<sup>ο</sup> πείραμα

### 5.4.10 10ο Πείραμα

Το δέκατο πείραμα πραγματοποιήθηκε με το χώρο πλήρως γεμάτο, αλλά χωρίς την παρουσία ανοιγμάτων. Εξετάζεται η διαφορά της χρονικής ιστορίας του HRR με τη διαφορετική διαρρύθμιση των φορτηγών στο κατάστρωμα.

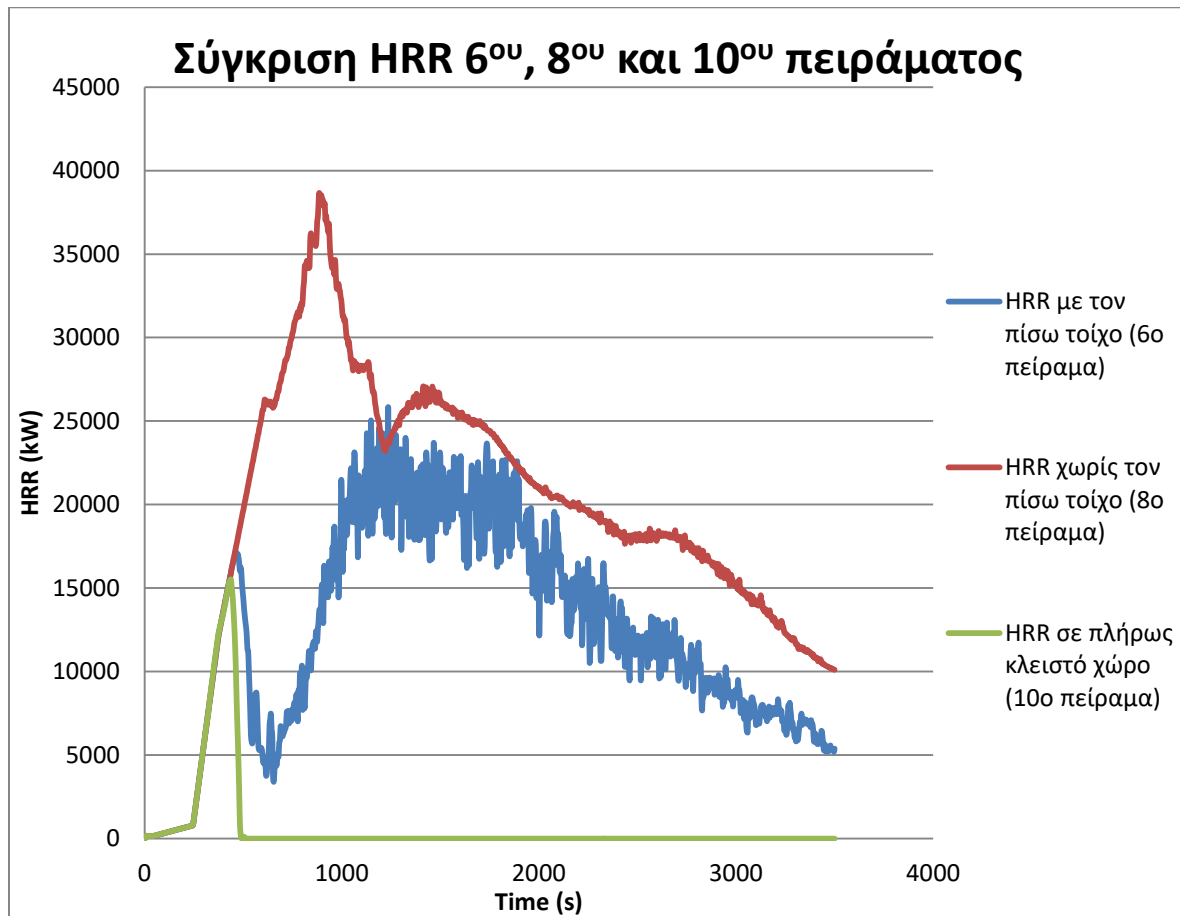


Εικόνα 52: Χώρος κατά το 10<sup>ο</sup> πείραμα



Διάγραμμα 22: Χρονική ιστορία HRR για το 10<sup>ο</sup> πείραμα

Από το Διάγραμμα 22, γίνεται αντιληπτό ότι, για το HRR που δίνουμε για το φορτηγό-πηγή, το οξυγόνο που βρίσκεται στο χώρο επαρκεί μόλις για 500 s. Εκείνη τη χρονική παρατηρείται και η μέγιστη τιμή του ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας, η οποία είναι τα 16 MW. Η μέγιστη θερμοκρασία παρατηρείται στο ταβάνι του χώρου, δηλαδή στο ύψος των 5 μέτρων. Για αυτό το πείραμα η μέγιστη αυτή θερμοκρασία είναι 220°C.



Διάγραμμα 23: Σύγκριση χρονικής ιστορίας HRR για το 6<sup>ο</sup>, 8<sup>ο</sup> και 10<sup>ο</sup> πείραμα

Στην σύγκριση που γίνεται στο Διάγραμμα 23, παρατηρείται ότι στο πείραμα με το άνοιγμα στον πρυμναίο τοίχο (6ο Πείραμα), το οξυγόνο φτάνει σε πολύ οριακά επίπεδα, καθώς το HRR ακολουθεί καθοδική πορεία σχεδόν την ίδια χρονική στιγμή που το οξυγόνο εξαντλείται στο πείραμα χωρίς ανοίγματα (10ο Πείραμα). Αυτό αποδίδεται τόσο στα φορτηγά που εμποδίζουν την εισροή του αέρα, όσο και στα παράγοντα της καύσης που προσπαθούν να εξέλθουν από το χώρο, με αποτέλεσμα να αποτελούν επιπλέον εμπόδιο στην εισαγωγή οξυγόνου.

## 6 Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις

Στον Πίνακα 17 παρουσιάζεται η μέγιστη θερμοκρασία, ο μέγιστος και ο μέσος ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας για κάθε πείραμα, για την εύκολη σύγκριση και κατανόηση των αποτελεσμάτων. Σημειώνεται ότι η μέγιστη θερμοκρασία παρατηρείται στο ταβάνι του χώρου, δηλαδή στο ύψος των 5 μέτρων.

	Max T (°C)	Max HRR (kW)	Average HRR (kW)	Fire Load (GJ)
1 <sup>ο</sup> Πείραμα	520	33260	9430	33.04
2 <sup>ο</sup> Πείραμα	620	45560	18465	58.60
3 <sup>ο</sup> Πείραμα	520	43054	15125	52.99
4 <sup>ο</sup> Πείραμα	420	24906	10187	35.68
5 <sup>ο</sup> Πείραμα	520	44893	13792	48.32
6 <sup>ο</sup> Πείραμα	370	25843	12455	43.63
7 <sup>ο</sup> Πείραμα	670	38646	19906	69.72
8 <sup>ο</sup> Πείραμα	670	38663	19350	67.78
9 <sup>ο</sup> Πείραμα	820	64934	37800	132.32
10 <sup>ο</sup> Πείραμα	220	15521	652	2.28

Πίνακας 17: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών μεγεθών

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που καταγράφηκαν και σχολιάστηκαν παραπάνω, οδηγούμαστε σε συμπεράσματα πολύ χρήσιμα για την μελέτη. Βέβαια, υπάρχει αρκετός χώρος για υλοποίηση πειραμάτων με μεγαλύτερη ποικιλία στις παραμέτρους και ακρίβεια στους υπολογισμούς, ώστε οι παρατηρήσεις να θεωρούνται πιο ασφαλείς και βάσιμες. Ωστόσο, η μελέτη αυτή κάνει ένα βήμα προς την αναγνώριση των βασικών παραμέτρων που επηρεάζουν την εξέλιξη και τη διάδοση μιας πυρκαγιάς σε ένα κατάστρωμα οχημάτων. Στόχος είναι η κατανόηση του προβλήματος και η εδραίωση μιας συνείδησης πυρασφάλειας για τον συγκεκριμένο τύπο πλοίων, ώστε να μειωθούν τα ατυχήματα, που περιλαμβάνουν ανθρώπινες απώλειες, οικονομικές και οικολογικές καταστροφές.



Οι παράμετροι που μελετήθηκαν μπορούν να χωριστούν σε τρεις βασικές κατηγορίες. Αρχικά, δόθηκε σημασία στην διαφορετική τοποθέτηση των οχημάτων (φορτηγών) στο χώρο και το πώς αυτό μπορεί να επηρεάσει την φωτιά. Στη συνέχεια, μελετήθηκε η διαφορετική διαρρύθμιση του ίδιου του χώρου όσον αφορά τα ανοίγματα και την επικοινωνία με το εξωτερικό περιβάλλον. Τέλος, παρουσιάστηκε προσομοίωση με την ύπαρξη ισχυρού σχετικά ανέμου και την συμβολή του στην εξέλιξη της πυρκαγιάς. Οι παρατηρήσεις αυτές συνοψίζονται παρακάτω.

## 6.1 Διαρρύθμιση οχημάτων στο χώρο

Σημαντική παράμετρος φαίνεται να είναι ο τρόπος με τον οποίο τοποθετούνται τα φορτηγά στο κατάστρωμα. Ο χώρος που μένει κενός επηρεάζει κατά πολύ τις τιμές του ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας που αναπτύσσονται. Όπως είδαμε στα πειράματα και στη σύγκρισή τους (Διάγραμμα 14), στις περιπτώσεις που τα φορτηγά ήταν τοποθετημένα κοντά στα ανοίγματα, παρατηρήθηκαν ευνοϊκά αποτελέσματα, καθώς δυσχέραιναν την εισροή του αέρα στο χώρο. Αντίθετα, όταν ο χώρος μπροστά από το πυρμαίο άνοιγμα ήταν κενός υπήρχε εύκολη πρόσβαση του αέρα στο χώρο και άρα ευκολότερη εξάπλωση της πυρκαγιάς και επίτευξη υψηλών θερμοκρασιών.

Ένας άλλος παράγοντας που μπορεί να επηρεάσει την έκβαση της φωτιάς είναι οι αποστάσεις μεταξύ των φορτηγών. Μεγαλώνοντας αυτές τις αποστάσεις, η ανάφλεξη ενός φορτηγού από κάποιο κοντινό, που ήδη αναφλέγεται, καθίσταται δυσκολότερη. Αυτό παρατηρήθηκε κατά την πραγματοποίηση του 4<sup>ου</sup> πειράματος, όπου υπήρχαν μόνο τα μισά φορτηγά σε διάταξη ένα παρά ένα. Οι τιμές του HRR είναι οι χαμηλότερες, συγκρίνοντάς τις με εκείνες των πειραμάτων 5 και 6 (Διάγραμμα 14), όπου οι αποστάσεις μεταξύ των φορτηγών είναι 60 cm. Ακόμα, οι μεγαλύτερες αποστάσεις προσφέρουν και άλλες πρακτικές ευκολίες, όπως την ευκολότερη πρόσβαση στον χώρο της ομάδας πυρόσβεσης επί του πλοίου, πρόβλημα που έχει διατυπωθεί σε αρκετές περιπτώσεις ατυχημάτων από το πλήρωμα.

Τα συμπεράσματα αυτά μπορούν να αξιοποιηθούν αποκλειστικά σε δρομολόγια που δεν έχουν πλήρη χωρητικότητα, δηλαδή σε ένα σεβαστό ποσοστό περιπτώσεων. Η διαρρύθμιση των οχημάτων και οι θέσεις που θα καταλάβουν μπορούν να αποτρέψουν την εξάπλωση της πυρκαγιάς και να αποτελέσουν έναν από τους τρόπους πρόληψης ενός ατυχήματος.

## 6.2 Διαρρύθμιση χώρου

Όπως διαπιστώθηκε και από τα στατιστικά, η πληθώρα των σοβαρών περιπτώσεων συνέβη σε ανοιχτό χώρο go-go. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στην εξάρτηση της πυρκαγιάς από το διαθέσιμο καύσιμο. Σε κλειστούς χώρους, όπου η ανανέωση του

αέρα γίνεται με μηχανικό εξαερισμό, υπάρχει η δυνατότητα διακοπής της λειτουργίας του που καθιστά μια πιθανή φωτιά μικρότερη απειλή σε σχέση με έναν χώρο όπου το οξυγόνο παρέχεται διαρκώς από ανοίγματα.

Το αποτέλεσμα αυτό επιβεβαιώνεται στη μελέτη που πραγματοποιήθηκε. Συγκεκριμένα στα Διαγράμματα 16 και 19, φαίνεται η διαφορά στις τιμές του HRR, για πειράματα με όλες τις συνθήκες πραγματοποίησης να είναι ίδιες, έχοντας μόνη διαφορά την ύπαρξη ή όχι του πρυμναίου τοίχου. Η παρουσία του πρυμναίου τοίχου σε συνδυασμό με την προσπάθεια των παραγόντων της καύσης να εξέλθουν από τον χώρο, δυσκόλευε την ανανέωση του αέρα και κατά συνέπεια την εξέλιξη της φωτιάς. Ακόμα πιο ευνοϊκή θα ήταν η κατάσταση αν ο τοίχος, για τις περιπτώσεις που υπήρχε, δεν είχε καν άνοιγμα.

Για πολλαπλούς λόγους η παρουσία των ανοιχτών καταστρωμάτων δεν μπορεί να εξαιρεθεί. Ωστόσο, είναι δυνατή η εγκατάσταση μηχανισμών (shutters) που θα καλύπτουν τα ανοίγματα σε περίπτωση ανίχνευσης πυρκαγιάς, με στόχο τον περιορισμό της εισροής οξυγόνου στο χώρο. Περαιτέρω μελέτες και κανονισμοί ασφαλείας απαιτούνται μέχρι να μπορεί να εφαρμοστεί κάτι τέτοιο.

### 6.3 Άνεμος

Η σημασία της παρουσίας οξυγόνου στο χώρο που φλέγεται, για την ανάπτυξη της πυρκαγιάς, έχει γίνει αντιληπτή ήδη από τις δυο προηγούμενες παραμέτρους που μελετήθηκαν. Ο άνεμος και η κατεύθυνση του είναι μια ακόμα παράμετρος που καθορίζει την ποσότητα του οξυγόνου που εισέρχεται στο χώρο και επομένως δεν μπορεί να αμεληθεί ως παράγοντας που επηρεάζει τέτοια ατυχήματα.

Από το πείραμα που πραγματοποιήθηκε (δεν υπήρχε δυνατότητα πραγματοποίησης πολλαπλών πειραμάτων με άνεμο, καθώς ο υπολογιστικός χρόνος αυξανόταν δραματικά) φάνηκε ότι οι τιμές του HRR έφτασαν σε πολύ υψηλότερα επίπεδα σε σχέση με παρόμοια πειράματα απουσία ανέμου (Διάγραμμα 21). Παρά το γεγονός ότι οι περιοχές γύρω από τα ανοίγματα διατηρούν χαμηλές θερμοκρασίες, η διαρκής εισροή του αέρα στον χώρο δεν επιτρέπει στα προϊόντα της καύσης να εξέλθουν και τα συγκεντρώνει σε κλειστές περιοχές, τροφοδοτώντας έτσι την φωτιά και αναφλέγοντας τα κοντινά φορτηγά.

Σημαντική παράμετρος για τον άνεμο είναι η κατεύθυνση του και σε συνδυασμό με τον προσανατολισμό των ανοιγμάτων καθορίζει την επιρροή που μπορεί να έχει σε μια τέτοια κατάσταση. Το καλύτερο weather routing και η εγκατάσταση μηχανισμών (shutters) μπορούν να μειώσουν την επικινδυνότητα αυτής της παραμέτρου.

## 6.4 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η παρούσα διπλωματική αποσκοπεί στην εξέταση της πυρασφάλειας σε κατάστρωμα οχημάτων επιβατηγού/οχηματαγωγού πλοίου από την πλευρά του κανονιστικού πλαισίου, της εξέτασης πρόσφατων ατυχημάτων και της εξέτασης παραμέτρων που επηρεάζουν την εξέλιξη μιας πυρκαγιάς μέσω της πραγματοποίησης αριθμητικών προσομοιώσεων διαφόρων σεναρίων.. Παρά το γεγονός ότι αποτελεί ένα πρώτο βήμα προς την κατεύθυνση αυτή, οι ευκαιρίες για μελλοντική έρευνα και για τη συνέχεια της μελέτης της επίδρασης πυρκαγιών μέσω υπολογιστικών προσομοιώσεων είναι πολλές. Είναι σαφές ότι οι παράμετροι που σχολιάστηκαν, σε ό,τι αφορά τα πειράματα, είναι μόνο ένα μικρό ποσοστό των συνολικών παραγόντων που μπορούν να αλλάξουν την πορεία και την εξέλιξη μιας πυρκαγιάς.

Η πιο λεπτομερής εξέταση της επιρροής του τύπου του χώρου (closed, open ή weather deck), θα μπορούσε να προσφέρει χρήσιμες πληροφορίες και σημαντικά συμπεράσματα. Όταν πρόκειται για κλειστό κατάστρωμα, εμφανίζεται η παράμετρος του μηχανικού εξαερισμού και η επίδραση που μπορεί να έχει ο χρόνος μέχρι την απενεργοποίηση αυτού, με στόχο την διακοπή παροχής οξυγόνου και συνεπώς τον περιορισμό της πυρκαγιάς. Στην περίπτωση ανοιχτού καταστρώματος ή καταστρώματος καιρού, η παράμετρος της κατεύθυνσης και της έντασης του ανέμου μπορούν να αποδειχθούν μεγάλης σημασίας, κάτι που εξετάστηκε σε ένα πρωταρχικό στάδιο σε αυτή τη διπλωματική, λόγω του μεγάλου υπολογιστικού κόστους. Επίσης, ο τύπος του καταστρώματος μπορεί να επηρεάσει και τον χρόνο ανίχνευσης της πυρκαγιάς, το οποίο θα μπορούσε επίσης να μελετηθεί μέσω των αριθμητικών προσομοιώσεων.

Μία ακόμα σημαντική παράμετρος, που μελλοντικά μπορεί να εξεταστεί, είναι η επίδραση του συστήματος κατάσβεσης στην εξέλιξη και στον περιορισμό της φωτιάς. Ο τύπος του συστήματος (wet ripe, dry ripe, deluge systems), ο χρόνος ενεργοποίησης, η απόσταση και ο αριθμός ψεκαστήρων, η πυκνότητα και η πίεση νερού παροχής αποτελούν σημεία μελέτης, που πιθανά μπορεί να οδηγήσουν στη θέσπιση πιο ισχυρών και αυστηρών κανονισμών στην κατεύθυνση της βελτίωσης της πυρασφάλειας σε καταστρώματα οχημάτων.

## Βιβλιογραφία

- Breuillard, A., Cassez, A., Kar, A., Patil, S., Grandison, A., Xu, D., et al. (2012). *Probabilistic Framework for Onboard Fire Safety. Benchmarking Of Existing Ships. FIREPROOF project. Deliverable. D3.3.*
- DNV GL. (2016). *Fires on ro-ro decks.*
- EMSA. (2016). *Study investigating cost effective measures for reducing the risk from fires on ro-ro passenger ships (FIRESAFE).* European Maritime Safety Agency.
- EMSA. (2018). *Second study investigating cost-efficient measures for reducing the risk from fires on ro-ro passenger ships (FIRESAFE II).* European Maritime Safety Agency.
- Frid, R., & Palm, D. (2010). *An analysis of fixed water sprinkler systems on ro-ro decks.* Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University, ISSN: 1402-3504.
- Galiano, I., & Fanjul, J. (2016). *Sorrento Ro-Ro Passenger Ship Incident Considerations.* Journal of Maritime Research.
- IMO. (2012) FSI 21/5. *Casualty Statistics and Investigation - Report of the Correspondence Group on Casualty Analysis.* Sub-Committee on Flag State Implementation.
- IMO. (2018) MSC.1/Circ.1430/Rev.1. *Revised guidelines for the design and approval of fixed water-based fire-fighting systems for ro-ro spaces and special category spaces.* Maritime Safety Committee.
- SOLAS, IMO (2009). *Chapter II-2 - Construction - Fire protection, fire detection and fire extinction.* International Convention for the Safety Of Life At Sea.
- IMO. (2007). *FSS code.* International Maritime Organisation (IMO). Fire Safety System (FSS) Code.
- Li, Y. (2004). *Assessment of Vehicle Fires in New Zealand Parking Buildings.* University of Canterbury.
- McGrattan, K., Hostikka, S., Floyd, J., McDermott, R., & Vanella, M. (2020). *Fire Dynamics Simulator User's Guide.*
- Ministry of Infrastructure and Transport. (n.d.). *Fire on board of the ro-ro pax NORMAN ATLANTIC.*

Ministry of Infrastructure and Transport. (n.d.). *Fire on Board Ro-Ro Pax SORRENTO*.

The North of England P&I Association. (2017). *Ro-Ro Fires*.

Themelis, N., & Spyrou, K. (2012). *Optimizing smoke detectors on passenger ships*.  
Proceedings, 11th International Marine Design Conference.

Thunderhead Engineering. (2012). *PyroSim Example Guide*.

Thunderhead Engineering. (2020). *PyroSim User Manual*.

Wade, C. A. (2004). *A User's Guide to Branzfire 2004*.