



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΛΟΙΟΥ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Μελέτη επάρκειας συστημάτων κατάσβεσης πυρκαγιάς σε
κατάστρωμα οχημάτων επιβατηγού/οχηματαγωγού πλοίου»**

Κοττάς Χρήστος

nm15044

Επιβλέπων: Νικόλαος Θεμελής

Αθήνα, Οκτώβριος 2021

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία επισφραγίζει ένα σπουδαίο κύκλο σπουδών στην Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. που με βοήθησε να αποκτήσω μακρά ποικιλία επιστημονικών γνώσεων και εμπειριών. Με την ολοκλήρωση της θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου Νικόλαο Θεμελή που με καθοδήγησε και συμβούλεψε άριστα ώστε να φέρω εις πέρας την παρούσα εργασία. Επίσης, ήθελα να ευχαριστήσω τους συναδέλφους μου για την συνεργασία και αμείωτη στήριξη τους σε όλη την διάρκεια των φοιτητικών σπουδών.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η επάρκεια του συστήματος κατάσβεσης, κυρίως του συστήματος αυτόματων ψεκαστήρων, έναντι αναπτυσσόμενης πυρκαγιάς σε κατάστρωμα οχημάτων επιβατηγού/οχηματαγωγού πλοίου, μέσω εκτέλεσης ενός αριθμού υπολογιστικών προσομοιώσεων στο λογισμικό FDS (Fire Dynamic Simulator) του προγράμματος PyroSim και εξετάζοντας διαφορετικές παραμέτρους. Οι παράμετροι αυτοί είναι:

- Ο συντελεστής κατάσβεσης (extinguish coefficient) που αποτελεί ένα καθοριστικό αριθμητικό μέγεθος για την κατανόηση και την σωστή χρήση και εξαγωγή αποτελεσμάτων του FDS ως προς την μελέτη κατάσβεσης
- Ο χρόνος ενεργοποίησης των ψεκαστήρων που εξετάζεται από την θερμοκρασία ενεργοποίησης τους (activation temperature) και την απόκριση τους (Response Time Index)
- Η διαφορετική διαρρύθμιση των οχημάτων στον χώρο καθώς και η δοκιμή διαφορετικού τύπου συστήματος κατάσβεσης, όπως το σύστημα ολικού κατακλυσμού νερού με manual ενεργοποίηση

Αρχικά, γίνεται ανάλυση των βασικών αρχών κατάσβεσης μίας φωτιάς, ο τρόπος με τον οποίο αυτή συμβαίνει και τονίζεται η σημασία του νερού ως κύριο μέσο κατάσβεσης. Στην συνέχεια, παρουσιάζονται στατιστικά προσφάτων ατυχημάτων πυρκαγιάς σε επιβατηγά/οχηματαγωγά πλοία, με αναφορά στις καταστροφές που προέκυψαν και έμφαση στην καταγραφή της ανταπόκρισης των ψεκαστήρων. Έπειτα, ακολουθεί και μία σύντομη περιγραφή ενός σημαντικού ατυχήματος των τελευταίων ετών (Lisco Gloria) που σχετίζεται με την λειτουργία των sprinklers. Εν συνεχεία, παρουσιάζονται όλοι οι τύποι συστημάτων κατάσβεσης που εγκαθίστανται σε χώρους Ro-Ro, συνοδευόμενοι από τους ισχύοντες κανονισμούς για την σωστή λειτουργία τους, μαζί με τις τροποποιήσεις τους. Περαιτέρω ανάλυση πραγματοποιείται για την κατηγορία του συστήματος αυτόματων ψεκαστήρων με νερό, περιγράφοντας την διαδικασία λειτουργίας τους και τα μέρη που συνθέτουν την εγκατάστασή τους. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αριθμητικές προσομοιώσεις, τα οποία οδήγησαν στα εξής στα εξής βασικά συμπεράσματα:

- Ο συντελεστής κατάσβεσης πρέπει οπωσδήποτε να λάβει τιμή μεγαλύτερη του 0 ώστε να είναι εμφανής η επίδραση του ψεκασμού του νερού στην πυρκαγιά (burner surface) στο FDS. Παράλληλα, συμπεραίνεται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του τόσο γρηγορότερη είναι η μείωση του HRR, άρα και η κατάσβεση της πυρκαγιάς, με τις διαφορές ωστόσο να είναι μικρής κλίμακας
- Ο χρόνος ενεργοποίησης και γενικότερα η απόκριση των ψεκαστήρων (RTI) αποτελεί πολύ σημαντική παράμετρο για την κατάσβεση, καθώς όσο πιο έγκαιρα συμβαίνει τόσο λιγότερες είναι οι απώλειες και οι καταστροφές
- Το σύστημα αυτόματων ψεκαστήρων ανταποκρίνεται ικανοποιητικά και σε περίπτωση καταστρώματος με πληρότητα 100% σε φορτηγά, σε αντίθεση με το σύστημα ολικού κατακλυσμού που ενεργοποιείται χειροκίνητα και με καθυστέρηση, το οποίο δεν ανταποκρίνεται καλά και παρουσιάζει προβλήματα.

Abstract

This thesis examines the adequacy of a fire-extinguishing system, primarily using automatic sprinklers, against a growing fire on the vehicle deck of a RoPax vessel by running a number of numerical simulations in the FDS (Fire Dynamic Simulator) software of the PyroSim program and examining different parameters. These parameters are:

- The extinguish coefficient, which is a determining numerical quantity for understanding and correctly using and deriving FDS results in relation to the fire-extinguish study
- The activation time of sprinklers tested by their activation temperature and their response (Response Time Index)
- The different arrangement of the vehicles on Ro-Ro space as well as the testing of different type of fire-extinguishing system, such as the water deluge system with manual activation

Firstly, the basic principles of fire extinguishing, the way it happens and the importance of water as the main extinguishing agent are analysed. In the following, statistics of recent fire accidents on ships are presented, with reference to the disasters that occurred and emphasis on recording the response of sprinklers. This is followed by a brief description of a case from the last few years (Lisco Gloria) which is related to the operation of sprinklers. Consequently, all types of extinguishing systems installed in Ro-Ro spaces are presented, together with their regulations and modifications in force for their correct operation. Further analysis is carried out for the category of automatic water sprinklers system, describing their operating procedure and the parts that make up their installation. Finally, the results obtained from the simulations in PyroSim are presented, commented and compared, thus leading to the following main conclusions:

- The extinguish coefficient should definitely take a value greater than 0 in order for the effect of water spray on the fire (burner surface) to be shown in the FDS. At the same time, it is concluded that the higher the value of this coefficient, the faster the reduction of the HRR and therefore the extinguishing of the fire, with the differences being small, however
- The activation time and more generally the response time of the sprinklers (RTI) is a very important parameter for fire-extinguishing, since the sooner it happens, the less the losses and the damages
- The automatic sprinkler system responds well even when the deck is full of trucks, whereas the water deluge system with late manual activation does not responds well and is quite problematic

Πίνακας περιεχομένων

Λίστα με διαγράμματα.....	7
Λίστα με πίνακες	8
1 Εισαγωγή	9
1.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση	9
1.2 Στόχοι μελέτης και κεφάλαια	11
1.3 Χαρακτηριστικά κατάσβεσης πυρκαγιάς από νερό	13
2 Περιπτώσεις και στατιστικά ατυχημάτων πυρκαγιάς σε χώρους Ro-Ro	16
2.1 Περιπτώσεις πυρκαγιών σε χώρους Ro-Ro (2005-2016).....	16
2.2 Κατηγορίες χώρων καταστροφμάτων Ro-Ro	18
2.3 Επιρροή συστημάτων κατάσβεσης στα περιστατικά ατυχημάτων	19
2.4 Περίπτωση ατυχήματος LISCO GLORIA	20
3 Συστήματα κατάσβεσης πυρκαγιάς αναγνωρισμένα από SOLAS (κανονισμοί/απαιτήσεις)	21
3.1 Συστήματα ψεκασμού νερού ενεργοποιούμενα χειροκίνητα σύμφωνα με IMO Resolution A.123(V) και MSC.1/Circ. 1430,Rev.1.....	22
3.2 Αυτόματοι ψεκαστήρες ή συστήματα ψεκασμού ολικού κατακλυσμού νερού σύμφωνα με MSC.1/Circ. 1430,Rev.1.....	24
3.3 Αυτόματα ακροφύσια ή συστήματα ολικού κατακλυσμού με ομίχλη νερού σύμφωνα με MSC.1/Circ. 1430, Rev.1.....	28
3.4 Συστήματα αφρού υψηλής διαστολής (High-expansion foam systems) σύμφωνα με τον κώδικα FSS	32
3.5 Συστήματα κατάσβεσης πυρκαγιάς με αέριο σύμφωνα με τον κώδικα FSS (Gas fire-extinguishing systems).....	35
4 Σύστημα αυτόματων ψεκαστήρων με νερό (automatic water sprinklers systems)	37
4.1 Ανάλυση λειτουργίας συστήματος αυτόματων ψεκαστήρων υγρού τύπου(wet pipe)	38
4.2 Τύποι και λειτουργία κεφαλών ψεκαστήρων (sprinkler heads).....	40
5 Υπολογιστικές προσομοιώσεις.....	43
5.1 FDS.....	43
5.2 PyroSim	44
5.3 Χαρακτηριστικά μοντέλου προσομοιώσεων	49
5.3.1 Κατάστρωμα προσομοιώσεων	49
5.3.2 Επιλογή κατάλληλου πλέγματος.....	50

5.3.3 Χαρακτηριστικά φορτηγών (trucks)	51
5.3.4 Χαρακτηριστικά συστήματος κατάσβεσης πυρκαγιάς (fire extinguishing system).....	56
5.3.5 Εφαρμογή συσκευών μέτρησης θερμοκρασίας (thermocouples).....	63
5.4 Παρουσίαση αριθμητικών προσομοιώσεων	64
5.4.1 1ο Σενάριο.....	65
5.4.2 2ο Σενάριο	67
5.4.3 3ο Σενάριο	71
5.4.4 4ο Σενάριο	73
5.4.5 5ο Σενάριο	75
5.4.6 6ο Σενάριο	77
5.4.7 7ο Σενάριο	79
5.4.8 8ο Σενάριο	83
5.4.9 9ο Σενάριο	86
5.4.10 10ο Σενάριο	89
6 Συμπεράσματα-Παρατηρήσεις	92
6.1 Συντελεστής κατάσβεσης (extinguish coefficient)	93
6.2 Χρόνος ενεργοποίησης ψεκαστήρων (Activation temperature,RTI)	94
6.3 Πληρότητα καταστρώματος σε φορτηγά.....	95
6.4 Προτάσεις για παρόμοια έρευνα στο μέλλον.....	96
Βιβλιογραφία.....	97
Παράρτημα Α.....	99

Λίστα με διαγράμματα

Διάγραμμα 1: Σύγκριση 1 ^{ου} σεναρίου και πυρκαγιάς σχεδίασης, HRR-t	66
Διάγραμμα 2: Χρονική ιστορία θερμοκρασιών 1 ^{ου} σεναρίου.....	66
Διάγραμμα 3: Χρονική ιστορία HRR για το 2 ^ο σενάριο και σύγκριση με το 1 ^ο	68
Διάγραμμα 4 Χρονική ιστορία θερμοκρασιών για το 2 ^ο σενάριο και σύγκριση του με το 1 ^ο	68
Διάγραμμα 5: Χρονική ιστορία του HRR για το 3 ^ο σενάριο και σύγκριση με το 2 ^ο	71
Διάγραμμα 6: Χρονική ιστορία θερμοκρασιών για το 3 ^ο σενάριο και σύγκριση με το 2 ^ο	72
Διάγραμμα 7: Χρονική ιστορία HRR για το 4 ^ο σενάριο και σύγκριση του με το 1 ^ο και το 2 ^ο	74
Διάγραμμα 8: Χρονική ιστορία θερμοκρασιών για το 4 ^ο σενάριο και σύγκριση με το 1 ^ο και το 2 ^ο	74
Διάγραμμα 9: Χρονική ιστορία HRR για το 5 ^ο σενάριο και σύγκριση του με το 4 ^ο	76
Διάγραμμα 10: Χρονική ιστορία θερμοκρασιών για το 5 ^ο σενάριο και σύγκριση με το 4 ^ο	76
Διάγραμμα 11: Χρονική ιστορία HRR για το 6 ^ο σενάριο και σύγκριση με το 4 ^ο και το 5 ^ο	78
Διάγραμμα 12: Χρονική ιστορία θερμοκρασιών για το 6 ^ο σενάριο και σύγκριση με το 4 ^ο και το 5 ^ο	78
Διάγραμμα 13: Χρονική ιστορία HRR για το 7 ^ο σενάριο και σύγκριση του με το 1 ^ο	80
Διάγραμμα 14: Χρονική ιστορία θερμοκρασιών για το 7 ^ο σενάριο και σύγκριση με το 1 ^ο	80
Διάγραμμα 15: Χρονική ιστορία HRR για το 8 ^ο σενάριο και σύγκριση του με το 7 ^ο	85
Διάγραμμα 16: Χρονική ιστορία θερμοκρασιών για το 8 ^ο σενάριο και σύγκριση με το 7 ^ο	85
Διάγραμμα 17: Χρονική ιστορία HRR για το 9 ^ο σενάριο και σύγκριση με το 7 ^ο και το 8 ^ο	87
Διάγραμμα 18: Χρονική ιστορία θερμοκρασιών για το 9 ^ο σενάριο και σύγκριση με το 7 ^ο	88
Διάγραμμα 19: Χρονική ιστορία HRR για το 10 ^ο σενάριο και σύγκριση με το 7 ^ο και το 9 ^ο	90
Διάγραμμα 20: Χρονική ιστορία θερμοκρασιών για το 10 ^ο σενάριο και σύγκριση με το 7 ^ο και το 9 ^ο	91
Διάγραμμα 21: Χρονική ιστορία HRR για 1 πηγή.....	101
Διάγραμμα 22: T,t σε θέση πάνω από την πηγή.....	101
Διάγραμμα 23: Χρονική ιστορία HRR προσομοίωσης με ψεκαστήρες και e_coef=0 m ² s/kg.....	104
Διάγραμμα 24: T,t σε μία θέση πάνω από την πηγή για προσομοίωση με ψεκαστήρες και e_coef=0 m ² s/kg.....	104
Διάγραμμα 25: Χρονική ιστορία HRR προσομοίωσης με ψεκαστήρες και e_coef=1 m ² s/kg.....	105
Διάγραμμα 26: T,t σε μία θέση πάνω από την πηγή για προσομοίωση με ψεκαστήρες και e_coef=1 m ² s/kg.....	105

Λίστα με πίνακες

Πίνακας 1: Πλεονεκτήματα/Μειονεκτήματα χειροκίνητα ενεργοποιούμενου συστήματος ψεκασμού νερού.....	24
Πίνακας 2: Ελάχιστη παροχή νερού για deck με ύψος <2.5 m	24
Πίνακας 3: Ελάχιστη παροχή νερού για deck με ύψος 6.5 m > z >2.5 m.....	25
Πίνακας 4: Ελάχιστη παροχή νερού για deck με ύψος >6.5 m	25
Πίνακας 5: Πλεονεκτήματα/Μειονεκτήματα συστήματος αυτόματων ψεκαστήρων.....	28
Πίνακας 6: Ενδεικτικές τιμές παραμέτρων για συστήματα ομίχλης με χαμηλή πίεση.....	29
Πίνακας 7: Ενδεικτικές τιμές παραμέτρων για συστήματα ομίχλης με υψηλή πίεση.....	29
Πίνακας 8: Πλεονεκτήματα/Μειονεκτήματα συστημάτων ομίχλης νερού	31
Πίνακας 9: Πλεονεκτήματα/Μειονεκτήματα συστημάτων κατάσβεσης με αφρό υψηλής διαστολής.....	34
Πίνακας 10: Πλεονεκτήματα/Μειονεκτήματα συστημάτων κατάσβεσης με αέριο	36
Πίνακας 11: Όλα τα σενάρια που πραγματοποιήθηκαν	64
Πίνακας 12: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών στοιχείων των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων.....	92

1 Εισαγωγή

Παρά την ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας και ταυτόχρονα την επιρροή της πάνω στην ναυτιλία, υπάρχουν πολλά ζητήματα ακόμα που πρέπει να αντιμετωπιστούν στα πλαίσια της αποδοτικότερης και ασφαλέστερης μετακίνησης αφού μέσω των πλοίων πραγματοποιείται ένα τεράστιο ποσοστό της μεταφοράς του παγκόσμιου εμπορίου. Από τα ζητήματα αυτά άκρως σημαντικό είναι οι πυρκαγιές που λαμβάνουν χώρα στα καταστρώματα ή σε άλλους χώρους των πλοίων και αποτελούν σοβαρό κίνδυνο.

Συγκεκριμένα τα τελευταία χρόνια, πολλοί άνθρωποι χάνουν την ζωή τους ή τραυματίζονται σοβαρά ενώ μεγάλες υλικές ζημιές προκαλούνται που μπορεί να οδηγήσουν και σε ολική απώλεια του πλοίου, λόγω των πυρκαγιών που συμβαίνουν σε επιβατηγά/οχηματαγωγά πλοία. Αυτά τα ατυχήματα στους χώρους Ro-Ro δείχνουν να παρουσιάζουν έναν αυξανόμενο ρυθμό που συμβαίνουν τα τελευταία χρόνια σύμφωνα με τα καταγεγραμμένα στατιστικά. Όπως είναι γνωστό, στα καταστρώματα οχημάτων (χώροι ro-ro) όλα τα αυτοκίνητα, φορτηγά και τρέιλερ τοποθετούνται σε πολύ κοντινές αποστάσεις ώστε να επιτυγχάνεται μέγιστη δυνατή οικονομία του χώρου. Αυτά τα οχήματα, ειδικά τα φορτηγά, είτε από μόνα τους είτε λόγω του φορτίου που μεταφέρουν είναι πολύ ευάλωτα στο αναφλεγούν και να δημιουργήσουν καταστροφικές συνέπειες στο πλοίο, στο πλήρωμα, στους επιβάτες αλλά και στο περιβάλλον.

Με λίγα λόγια, τα πλοία αυτά μεταφέρουν μεγάλη ποσότητα καύσιμης ύλης μέσα στους χώρους τους για αυτό και προκύπτει αυτή η αυξημένη επικινδυνότητα για πυρκαγιά. Άλλος ένας λόγος επικινδυνότητας για τους χώρους Ro-Ro είναι ότι δεν υπάρχουν διαχωριστικά ενδιάμεσα στις αποστάσεις των οχημάτων, με αποτέλεσμα η φωτιά να μην δύναται να αποκλειστεί σε ένα μικρό χώρο και να περιοριστεί από μόνη της, αλλά παραμονεύει ο κίνδυνος εξάπλωσης της σε όλο τον χώρο του καταστρώματος που μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλες ζημιές έως και απώλεια του πλοίου. Επίσης, όταν η διαρρύθμιση του χώρου είναι ανοιχτό κατάστρωμα με μεγάλα ανοίγματα τότε αυξάνεται και η διαθεσιμότητα του οξυγόνου πράγμα που ευνοεί ακόμα περισσότερο τις συνθήκες καύσης και μπορεί να οδηγήσει σε ανεξέλεγκτη πυρκαγιά. (Pagonis & Themelis, 2020)

Για τον λόγο αυτό, προκειμένου η λειτουργία των πλοίων να γίνεται όλο και ασφαλέστερα, η μελέτη και η βελτίωση της πυρασφάλειας αποτελεί πρωταρχική προτεραιότητα για την βιομηχανία της ναυτιλίας, τόσο στην σχεδίαση όσο και κατά την λειτουργία των πλοίων. Παρόλο που η πυρασφάλεια απαρτίζεται από πολλά σημαντικά σκέλη, η παρούσα εργασία εστιάζεται στην μελέτη των **συστημάτων κατάσβεσης πυρκαγιάς (fire extinguishing systems)** στα καταστρώματα οχημάτων επιβατηγών/οχηματαγωγών πλοίων.

1.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

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 πηγών ανάφλεξης, της διάδοσης και εξέλιξης της πυρκαγιάς με εξέταση των αιτιών τους, μελέτη των ισχυόντων κανονισμών, ανάλυση των συμβατικών και

εναλλακτικών συστημάτων κατάσβεσης, μελέτη του περιορισμού της θερμικής ακτινοβολίας, ανάλυση της απόκρισης των συστημάτων πυρανίχνευσης αλλά και προσομοιώσεις σε υπολογιστικό κώδικα ρευστομηχανικής (Fire Dynamic Simulator – FDS) για την μελέτη και κατανόηση των παραμέτρων τους. Παρακάτω παρατίθενται ορισμένα συμπεράσματα και παρατηρήσεις από τέτοιες μελέτες.

Σε μελέτη των παραμέτρων που επηρεάζουν την ανάπτυξη της πυρκαγιάς σε κατάστρωμα RoPax πλοίου (Pagonis & Themelis, 2020), προσδιορίστηκε η επίδραση των παραμέτρων: της διάταξης των οχημάτων στον χώρο, της διαρρύθμισης του ίδιου του χώρου και του ανέμου. Τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν ήταν:

- Οι αποστάσεις μεταξύ των οχημάτων είναι σημαντική παράμετρος για τη διάδοση της πυρκαγιάς ενώ η στρατηγική τοποθέτηση τους μπορεί να αποτρέψει πυρκαγιά μεγάλης κλίμακας
- Οι χώροι με ανοίγματα παρουσιάζουν μεγαλύτερη επικινδυνότητα όσον αφορά την τελική κατάληξη της πυρκαγιάς, σε σχέση με τους κλειστούς χώρους
- Ο άνεμος μπορεί να οδηγήσει σε μια ανεξέλεγκτη πυρκαγιά

Στη μελέτη που πραγματοποιήθηκε με θέμα τη μοντελοποίηση πυρκαγιάς σε κατάστρωμα RoPax πλοίου (Koromila, Rouangare, & Spyrou, 2021), εξετάστηκε η εξέλιξη της πυρκαγιάς (ανάφλεξη, ανάπτυξη και πτωτική περίοδος), μέσω του προσδιορισμού του ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας (HRR). Το HRR υπολογίστηκε με βάση τις ιδιότητες των επιμέρους υλικών που υπάρχουν σε οχήματα (πλαστικά καλύμματα οχημάτων, καύσιμα κλπ) για τα διάφορα στάδια της πυρκαγιάς. Ακολούθησε προσομοίωση πυρκαγιάς η οποία οδήγησε στα ακόλουθα συμπεράσματα, με βάση τους κανονισμούς του IMO (2016) για την ασφάλεια της ανθρώπινης ζωής σε περίπτωση πυρκαγιάς:

- Η θερμοκρασία στις εξόδους κινδύνου υπερέβη τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή της (60 °C) σε 24 λεπτά από την έναρξη της πυρκαγιάς
- Το ποσοστό του διοξειδίου του άνθρακα υπερέβη τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του (1200 ppm) σε 23 λεπτά από την έναρξη της πυρκαγιάς

Επομένως, για την ασφαλή εκκένωση του πλοίου όλοι οι επιβάτες και το προσωπικό πρέπει αφήσει το πλοίο μέχρι τα πρώτα 23 λεπτά από την έναρξη της πυρκαγιάς. Μετά από αυτό το χρονικό διάστημα επικρατούσε κίνδυνος ασφυξίας.

Μία ακόμη μελέτη που πραγματοποιήθηκε ήταν η πειραματική μελέτη περιορισμού της θερμικής ακτινοβολίας με «κουρτίνες νερού» (water curtains) σε μειωμένης κλίμακας κατάστρωμα ενός επιβατηγού/οχηματαγωγού πλοίου (Zeinali, et al., 2021). Συγκεκριμένα, οι προσομοιώσεις έλαβαν χώρα σε κατάστρωμα με κλίμακα 1:12.5, με «κουρτίνες νερού» από ακροφύσια ομίχλης νερού πίεσης 3-8 bar και την πηγή ακτινοβολίας στους 550 °C. Η αποτελεσματικότητα του περιορισμού της εκτιμήθηκε μέσω της σύγκρισης των επιπέδων ακτινοβολίας για περιπτώσεις με διάφορες τιμές αριθμού «κουρτινών», παροχής και πίεσης νερού. Από τα αποτελέσματα εξάγεται το εξής συμπέρασμα:

- Οι υψηλές τιμές παροχής και πίεσης νερού επιδρούν περισσότερο στον περιορισμό ακτινοβολίας συγκριτικά με την εφαρμογή μεγάλου αριθμού «κουρτινών» (53% έναντι 36%)

Σε μελέτη απόκρισης των συστημάτων πυρανίχνευσης σε κατάστρωμα οχημάτων επιβατηγού/οχηματαγωγού πλοίου (Gomatos, 2021), με πραγματοποίηση μιας σειράς υπολογιστικών προσομοιώσεων στο FDS εξετάστηκαν διαφορετικές παραμέτρους και η ένταση της πυρκαγιάς, η ευαισθησία και η διάταξη των ανιχνευτών, η φόρτωση του καταστρώματος και η επίδραση του ανέμου. Από την μελέτη αυτή προέκυψαν τα εξής βασικά συμπεράσματα:

- Η πυρκαγιά με ανάπτυξη αργού ρυθμού είναι δυσκολότερα ανιχνεύσιμη συγκριτικά με αυτή με ανάπτυξη γρήγορου ρυθμού
- Η πυκνή διάταξη ανιχνευτών προσφέρει αμεσότερη απόκριση σε σχέση με μία πιο αραιή διάταξη
- Η ανίχνευση θερμότητας φαίνεται να είναι ταχύτερη σε ένα μερικώς φορτωμένο κατάστρωμα, ωστόσο η ανίχνευση καπνού φαίνεται να αποκρίνεται αμεσότερα όταν το κατάστρωμα είναι πλήρως φορτωμένο
- Η ποσότητα καπνού που παράγεται ανά γραμμάριο καυσίμου επηρεάζει την ανίχνευση καπνού ενώ αντίστοιχα η παρουσία ανέμου την καθυστερεί

Ακόμα μία μελέτη που έχει πραγματοποιηθεί είναι η εξέταση εναλλακτικών συστημάτων κατάσβεσης σε χώρο Ro-Ro ενός πλοίου (EMSA, 2018) ως προς την αποτελεσματικότητά τους και τα εκτιμώμενα κόστη, ενώ για κάποια από αυτά εκτελέστηκαν προσομοιώσεις μεγάλης κλίμακας. Τα 3 αυτά συστήματα που εξετάστηκαν ήταν τα συστήματα Compressed Air Foam (CAFs), συστήματα ψεκαστήρων αφρού νερού και οι «κουρτίνες» νερού (water curtains). Από την μελέτη αυτών βγήκαν τα εξής συμπεράσματα:

- Το σύστημα water curtains είναι το φθηνότερο, όμως οι περιοχές που διαχωρίζονται από τις «κουρτίνες» απαιτούν χώρο φορτίου, το οποίο θα αποβεί πολύ κοστοβόρο μακροπρόθεσμα για τον πλοιοκτήτη
- Το κόστος εγκατάστασης του συστήματος CAFs ήταν πολύ υψηλό και η καταστολή της φωτιάς ήταν περιορισμένη στις δοκιμές μεγάλης κλίμακας
- Το σύστημα αφρού νερού περιόριζε την το μέγεθος της πυρκαγιάς μόνο για κάποιους °C

1.2 Στόχοι μελέτης και κεφάλαια

Όπως κατέστη σαφές αλλά θα αναλυθεί και στην συνέχεια, οι χώροι ro-ro ενέχουν κινδύνους ανάπτυξης πυρκαγιάς που οδηγούν σε καταστροφικές συνέπειες. Στην παρούσα εργασία, εξετάζεται η επάρκεια του συστήματος κατάσβεσης στον χώρο οχημάτων με την διερεύνηση των διαφόρων παραμέτρων που επιδρούν στο πρόβλημα. Με λίγα λόγια, εξετάζεται το κομμάτι της πυρασφάλειας όπου η φωτιά έχει ξεκινήσει και πρέπει να

εξουδετερωθεί ή να περιοριστεί. Μέσα σε αυτά γίνεται αναφορά σε όλες τις κατηγορίες συστημάτων κατάσβεσης για χώρους ro-ro καθώς και τους κανονισμούς πίσω από αυτούς. Παράλληλα, γίνεται και μία πιο εκτενής ανάλυση στα χαρακτηριστικά και στην διαδικασία λειτουργίας του συνηθέστερου συστήματος.

Για την παραπάνω ανάλυση και για την πρακτική κατανόηση των παραμέτρων που επηρεάζουν την εξέλιξη και την κατάσβεση της πυρκαγιάς, θα πραγματοποιηθούν υπολογιστικές προσομοιώσεις με το πρόγραμμα FDS στο περιβάλλον PyroSim, από τις οποίες προκύπτουν σημαντικές παρατηρήσεις.

Στο τελευταίο μέρος του 1^{ου} κεφαλαίου, παρουσιάζονται οι τρόποι και τα μέσα με τα οποία μια πυρκαγιά μπορεί να σβήσει. Συγκεκριμένα, αναφέρεται το νερό ως κύριο κατασβεστικό μέσο και αναλύεται με ποιους τρόπους θερμικά καταφέρνει να καταστέλλει και να σβήνει την φωτιά. Ωστόσο, αναφέρονται και οι περιπτώσεις και οι συνθήκες πυρκαγιάς όπου το νερό δεν θεωρείται ως το πλέον κατάλληλο κατασβεστικό μέσο.

Στο 2^ο κεφάλαιο γίνεται μελέτη των πρόσφατων ατυχημάτων. Παρουσιάζονται τα στατιστικά για τις πυρκαγιές που έχουν καταγραφεί τα τελευταία χρόνια σε ό,τι αφορά τους τύπους πλοίων, τις κατηγορίες των χώρων καταστρωμάτων Ro-Ro όπου ξεκίνησαν οι πυρκαγιές καθώς την λειτουργία και ενεργοποίηση των συστημάτων κατάσβεσης. Τέλος, ακολουθεί και η ανάλυση των γεγονότων μίας περίπτωσης ατυχήματος σε πλοίο ro-ro.

Στο 3^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται όλες οι κατηγορίες συστημάτων κατάσβεσης για τους χώρους Ro-Ro όπως αναγνωρίζονται από SOLAS, μαζί με τους ισχύοντες κανονισμούς για αυτά. Το μεγαλύτερο μέρος των απαιτήσεων προκύπτει από IMO Resolution A.123(V), τον MSC.1/Circ. 1430/Rev.1 (IMO,2018) και Fire Safety System (FSS) Code.

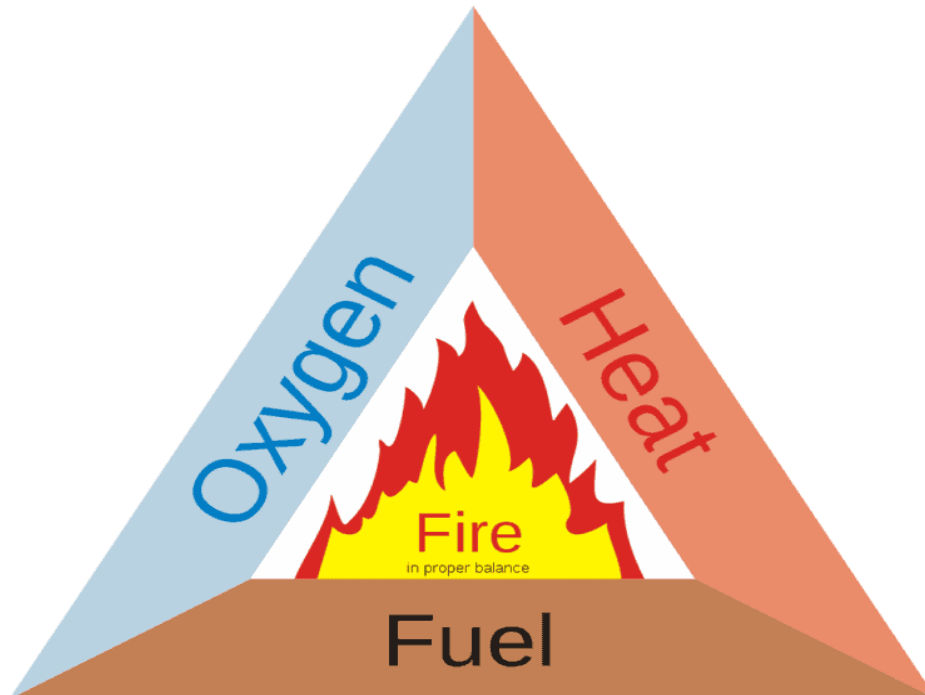
Στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά και η διαδικασία λειτουργίας των συστημάτων κατάσβεσης που χρησιμοποιούνται στις υπολογιστικές προσομοιώσεις της παρούσας εργασίας. Πρόκειται για το σύστημα αυτόματων ψεκαστήρων με νερό (water automatic sprinklers) και το σύστημα ολικού κατακλυσμού με νερό (water deluge system).

Το 5^ο κεφάλαιο εμπεριέχει τις υπολογιστικές προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν για τη μελέτη των παραμέτρων του συστήματος κατάσβεσης και της διαρρύθμισης του καταστρώματος που επιδρούν στην διάδοση και την κατάσβεση μιας φωτιάς σε χώρο ro-ro. Παρουσιάζεται συνοπτικά το πρόγραμμα και το γραφικό του περιβάλλον (PyroSim), μέσω του οποίου υλοποιείται ο κώδικας του FDS ενώ επίσης περιγράφονται η γεωμετρία του καταστρώματος, τα θερμικά χαρακτηριστικά και οι διαστάσεις του μοντέλου (φορτηγά) καθώς και όλες οι βασικές παράμετροι που μελετώνται για το σύστημα κατάσβεσης αυτόματων ψεκαστήρων. 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 και παρουσιάζονται στο 6^ο κεφάλαιο. Στο ίδιο κεφάλαιο αναφέρονται και προτάσεις για αντίστοιχη μελλοντική έρευνα.

1.3 Χαρακτηριστικά κατάσβεσης πυρκαγιάς από νερό

Για να λαμβάνει χώρα μία πυρκαγιά πρέπει να συνυπάρχουν 3 παράγοντες:

- Καύσιμη ύλη (οποιοδήποτε υλικό που καίγεται)
- Θερμότητα
- Οξυγόνο (επιτρέπει στο καύσιμο να αντιδράει εξώθερμα- καύση)



Εικόνα 1: Το τρίγωνο της φωτιάς (<https://firefighterinsider.com/why-and-how-does-water-put-out-fire-revealed/>)

Σύμφωνα με την εικόνα 1 φαίνονται σε μορφή τριγώνου (τρίγωνο της φωτιάς) οι 3 βασικοί παράγοντες που συνθέτουν την καύση και κατ' επέκταση και την πυρκαγιά.

Έτσι, η κατάσβεση μίας πυρκαγιάς συνθέτεται από την εξάλειψη τουλάχιστον ενός εκ των 3 αυτών στοιχείων. Παρόλο που υπάρχουν αρκετά κατασβεστικά μέσα (κάποια θα αναφερθούν και στο κεφάλαιο 3, εικόνα 2) το **νερό** παραμένει το πιο διαδεδομένο. Με την πρώτη ματιά, το νερό ή το H_2O φαίνεται να είναι το λιγότερο ικανό χημικό στοιχείο για την κατάσβεση φωτιάς καθώς δημιουργείται από υδρογόνο και οξυγόνο που είναι πολύ εύφλεκτα. Όμως το νερό δεν θερμαίνεται σε τέτοια επίπεδα ώστε να διασπαστεί σε οξυγόνο και υδρογόνο και να υπάρχει ο κίνδυνος καύση τους αλλά αντιθέτως έχει την δυνατότητα να σβήνει την φωτιά με δύο τρόπους.

Πρώτα, απορροφάει την θερμότητα από την φωτιά όπου και αποτελεί την κύρια μέθοδο με την οποία το νερό σβήνει την φωτιά. Συγκεκριμένα, όταν το νερό πέφτει πάνω στην επιφάνεια καύσης απομακρύνει την ενέργεια από την διαδικασία της πυρόλυσης και κατ' επέκταση μειώνει τον ρυθμό καύσης της καύσιμης ύλης. Η απομάκρυνση αυτή της ενέργειας μεταφράζεται με την μείωση του ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας (Heat

Release Rate=HRR) του καιγόμενου υλικού, ένα μέγεθος που θα αποτελέσει βασικό εργαλείο για τις προσομοιώσεις της παρούσας εργασίας.

Ο δεύτερος τρόπος είναι ότι με την εκτόξευση του νερού η φωτιά σταματάει να «αναπνέει». Με λίγα λόγια, το νερό λειτουργεί σαν κάλυμμα πάνω από την επιφάνεια καύσης απομονώνοντας το υλικό που καίγεται από την πηγή οξυγόνου. Με την αποστέρηση αυτή του οξυγόνου το καύσιμο δεν έχει την δυνατότητα να αντιδράσει με αυτό, και έτσι η αντίδραση της καύσης χάνει το βασικό της συστατικό και κατ' επέκταση η φωτιά σβήνει.

Ωστόσο, το νερό δεν αποτελεί πάντα το κατάλληλο μέσο για κατάσβεση μίας πυρκαγιάς. Για τον λόγο αυτό θα αναλυθούν κάποιες συνθήκες και περιπτώσεις όπου ισχύει αυτό το γεγονός. Αρχικά, η πρώτη τέτοια περίπτωση είναι αυτή της πυρκαγιάς από ηλεκτρισμό. Το πρόβλημα σε αυτή δεν συναντάται στην ικανότητα του νερού να σβήσει την φωτιά, αλλά στο ότι μπορεί να δημιουργηθεί μεγαλύτερο πρόβλημα αφού το νερό είναι καλός αγωγός του ηλεκτρισμού και μπορεί να οδηγήσει σε θανατηφόρα ατυχήματα (ηλεκτροπληξία κλπ.) σε άτομα που βρίσκονται κοντά ή χειρίζονται τον πυροσβεστικό εξοπλισμό.

Άλλη μία κατάσταση μη καταλληλότητας χρήσης του νερού είναι η φωτιά από διαρροές πετρελαίων και υγρών. Ενώ το νερό είναι ικανό να εξουδετερώσει την φωτιά, ψύχοντας και απομακρύνοντας το οξυγόνο από αυτή, εγκυμονεί ο κίνδυνος να διασκορπιστεί το καιγόμενο υλικό τριγύρω από την πηγή και τελικώς η πυρκαγιά να εξαπλωθεί αντί για να σβήσει.

Τέλος, υπάρχει μία περίπτωση όπου το νερό μπορεί να δεχθεί τόσο μεγάλη θερμότητα και να φτάσει στο σημείο να διασπαστεί σε υδρογόνο και οξυγόνο. Αυτή η κατάσταση συναντάται στις πυρκαγιές από μέταλλα (μαγνήσιο, νάτριο κλπ.) όπου στην καύση μπορούν να προκύψουν τόσο υψηλά επίπεδα θερμότητας. Η διάσπαση αυτή δημιουργεί ένα πολύ εκρηκτικό συνδυασμό αφού το παραγόμενο αέριο υδρογόνου καίγεται άμεσα και βίαια με την παρουσία του οξυγόνου.¹

Για όλες αυτές τις περιπτώσεις συνιστώνται άλλων ειδών κατασβεστικά μέσα όπως η σκόνη, ο αφρός κλπ. Ωστόσο, πέρα από αυτές τις εξαιρέσεις, το νερό αποτελεί το πιο αποδοτικό κατασβεστικό μέσο λόγω του πολύ μικρού του κόστους, της αφθονίας του και των υψηλών ψυκτικών ιδιοτήτων του.

Σε αυτό το σημείο θα δοθεί και μία συνοπτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών των υπόλοιπων μέσων κατάσβεσης καθώς και τον τρόπο που επιδρούν στην φωτιά.

1. Αφρός

Ο αφρός χρησιμοποιείται κυρίως για την κατάσβεση πυρκαγιών υγρών καυσίμων, πετρελαιοειδών, χρωμάτων, λαδιών κ.α. Ο αφρός παράγεται με χρήση ειδικών αυλών από νερό, αφρογόνο υγρό και αέρα. Αποτελείται κατά 94-97% από νερό και 3-6% από αφρογόνο υγρό. Ο αφρός δρα κατασβεστικά με διπλή ενέργεια, ως απομονωτικό και ως ψυκτικό μέσο. Πρέπει να αποφεύγεται η χρήση του σε πυρκαγιές με παρουσία ηλεκτρικού ρεύματος, γιατί αποτελείται κυρίως από νερό και υπάρχει κίνδυνος ηλεκτροπληξίας.

2. Διοξείδιο του άνθρακα CO2

¹ (<https://firefighterinsider.com/why-and-how-does-water-put-out-fire-revealed/>)

Το διοξείδιο του άνθρακα είναι αέριο, βαρύτερο του αέρα, δεν καίγεται ούτε συντηρεί την

καύση, δεν είναι τοξικό, αλλά ασφυκτικό σε μεγάλη συγκέντρωση στον αέρα. Στην κατάσβεση συντελεί αντικαθιστώντας το οξυγόνο στο τρίγωνο της φωτιάς (fire triangle) ή και απλά εκτοπίζοντας το ενώ επίσης ψύχει και το ίδιο το καύσιμο επειδή συνήθως εξάγεται σε χαμηλές θερμοκρασίες από τον πυροσβεστήρα.

3. Κατασβεστικές ξηρές σκόνες

Οι ξηρές (χημικές) σκόνες κατάσβεσης είναι κονιοποιημένες στερεές ουσίες με ορισμένη χημική σύνθεση, που επιδρούν κατασβεστικά στην πυρκαγιά κυρίως, με διακοπή της αλυσωτής χημικής αντίδρασης και δευτερευόντως με την ψυκτική δράση αυτών.

4. Υδρατμός

Το νερό υπό μορφή υδρατμού ενεργεί για την κατάσβεση μιας πυρκαγιάς, κυρίως με απομόνωση των φλεγόμενων σωμάτων από τον ατμοσφαιρικό αέρα. Η χρήση του είναι περιορισμένη.

5. Νέα υλικά κατάσβεσης

Νέων κατασβεστικά υλικά σύμφωνα με την ισχύουσα νομοθεσία πυροπροστασίας.

6. Άμμος, χώμα, καλύμματα

Η αποστέρωση του οξυγόνου από μια μικρή πυρκαγιά μπορεί να γίνει με κάλυψη αυτής με άμμο, χώμα, τσιμέντο, γύψο, μαρμαρόσκονη, ασβεστόσκονη και γενικά οποιοδήποτε άκαυστο υλικό σε σκόνη.

Εάν τα παραπάνω υλικά είναι βρεγμένα, η κατάσβεση είναι πιο αποτελεσματική, γιατί εκτός από **απομόνωση**, έχουμε και **ψύξη** του υλικού που καίγεται.



Εικόνα 2: Διαφορετικά είδη μέσων πυρόσβεσης (<https://www.highspeedtraining.co.uk/hub/different-types-of-fire-extinguishers/>)

2 Περιπτώσεις και στατιστικά ατυχημάτων πυρκαγιάς σε χώρους Ro-Ro

Αρχικά πρέπει να σημειωθεί ότι στην ανάλυση ακολουθείται περιλαμβάνονται μόνο πλοία που έχουν συμμορφωθεί με την σύμβαση SOLAS. Εν συνεχεία, στα πλαίσια της ανάλυσης οι περιπτώσεις πυρκαγιάς έχουν διαχωριστεί σε τρεις κατηγορίες:

- RoPax vessels
- Vehicle carries
- General Ro-Ro cargo vessels

Αυτή η κατηγοριοποίηση βασίζεται σε κανονισμούς, στο επιθυμητό μεταφερόμενο φορτίο και στην ταξινόμηση του, στην διαδικασία των εμπορικών συναλλαγών καθώς και στα συστήματα εξουδετέρωσης πυρκαγιών που προτείνονται για χώρους Ro-Ro.

2.1 Περιπτώσεις πυρκαγιών σε χώρους Ro-Ro (2005-2016)

Από διεθνείς βάσεις δεδομένων, αναφορές ατυχημάτων του **EMSA (European Marine Safety Agency)** και συνεντεύξεις με ιδιοκτήτες πλοίων έχουν ταυτοποιηθεί 35 πυρκαγιές σε χώρους Ro-Ro στην περίοδο 2005-2016. Σημαντικό ζήτημα αποτελεί η σωστή διεκπεραίωση της συχνότητας και κατ' επέκταση της πιθανότητας που συμβαίνουν τα ατυχήματα, κάτι που μελετάται σύμφωνα με την ανωτέρω κατηγοριοποίηση.

Πιο συγκεκριμένα, σε συνολικό στόλο από 750 πλοία **RoPax** με χωρητικότητα άνω των 4000grt έχουν καταγραφεί 18 περιστατικά πυρκαγιών στους αντίστοιχους χώρους, δηλαδή περίπου 2×10^{-3} ατυχήματα ανά χρόνο ζωής πλοίου. Πέντε από αυτά προκάλεσαν σοβαρές ζημιές, υποχρεωτική εγκατάλειψη του σκάφους ακόμα και τραυματισμούς και θανάτους, υπολογίζοντας έτσι περίπου 0.56×10^{-3} τέτοιες περιπτώσεις κάθε χρόνο ζωής πλοίου. Σε όλες τις περιπτώσεις, η πυρκαγιά προκαλούταν είτε από το μεταφερόμενο φορτίο ή από την σύνδεση ισχύος μεταξύ φορτηγού-ψυγείου και του πλοίου καθιστώντας την βλάβη του τελευταίου την πιο πιθανή και συνήθη αιτία για τις 4 από τις 5 πυρκαγιές. Επιπλέον, σύμφωνα με τα δεδομένα, καθοριστικό ρόλο στις πυρκαγιές με σοβαρές επιπτώσεις παίζει η λανθασμένη χρήση του συστήματος fixed fire-extinguishing. Το συμπέρασμα αυτό προήλθε από το γεγονός ότι σε 3 σοβαρές περιπτώσεις ατυχημάτων το σύστημα δεν λειτούργησε σωστά. Συγκεκριμένα, στο Norman Atlantic και Lisco Gloria, το νερό δεν απελευθερώθηκε στο κατάστρωμα που λάμβανε χώρα η πυρκαγιά, ενώ στην περίπτωση του Commodore ο ψεκασμός του νερού καθυστέρησε κατά 25 λεπτά. Το περιστατικό του Lisco Gloria θα αναλυθεί και εκτενέστερα σε επόμενο κεφάλαιο.

Σε ό,τι αφορά τα **General Cargo Ro-Ro** πλοία, σε στόλο 560 πλοίων με μεταφορική ικανότητα πάνω από 4000 grt (Gross Register Tonnage = ολική χωρητικότητα) έχουν καταγραφεί 8 περιστατικά πυρκαγιών στους χώρους Ro-Ro, δηλαδή περίπου 1.19×10^{-3} πυρκαγιές κάθε ένα χρόνο ζωής πλοίου. Ένα από αυτά οδήγησε σε ολική απώλεια του πλοίου, ενώ άλλη μια περίπτωση πλοίου δεν οδηγήθηκε καν σε επισκευή, υπολογίζοντας έτσι τον ρυθμό σοβαρών πυρκαγιών σε 0.30×10^{-3} ανά χρόνο ζωής πλοίου. Οι αιτίες των ατυχημάτων αυτών έχουν προσδιοριστεί μόνο για 3 από αυτά, εκ των οποίων τα δύο ήταν

λόγω μετακίνησης του φορτίου σε αντίθετο άνεμο και καιρό και το τρίτο προήλθε μέσα από την αποθήκη του φορτίου στο κατάστρωμα Ro-Ro.

Ωστόσο, σημαντικό ζήτημα αποτελεί και η αποσαφήνιση της αιτίας για το περιστατικό της ολικής απώλειας του πλοίου. Σύμφωνα με τα δεδομένα και επειδή τα Cargo Ro-Ro πλοία συνήθως χρησιμοποιούν για την κατάσβεση, συστήματα ολικού κατακλυσμού (deluge), η αιτία προσδιορίζεται στην μη δυνατότητα λειτουργίας του συστήματος αυτού.

Στην τρίτη και τελευταία κατηγορία, σε στόλο 825 πλοίων vehicle carriers με χωρητικότητα άνω των 4000grt έχουν καταγραφεί 9 περιστατικά πυρκαγιών, δηλαδή περίπου 0.91×10^{-3} κάθε ένα χρόνο ζωής πλοίου. Τα τρία από αυτά προκάλεσαν σοβαρές ζημιές ενώ σημειώθηκε 1 θάνατος εξαιτίας απελευθέρωσης διοξειδίου του άνθρακα, υπολογίζοντας έτσι τον δείκτη σοβαρών πυρκαγιών σε 0.4×10^{-3} κάθε χρόνο ζωής πλοίου. Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν προέκυψε καμία ολική απώλεια πλοίου με εξαίρεση μία περίπτωση στην οποία λόγω της ηλικίας και της αγοραστικής του αξίας δεν οδηγήθηκε σε επισκευή. Όσον αφορά τις αιτίες που προκλήθηκαν τα ατυχήματα αυτά, έχουν προσδιοριστεί μόνο για 2 από αυτά, από τα οποία το ένα σχετιζόταν πιθανώς με το ηλεκτρικό σύστημα από κάποιο μεταφερόμενο αυτοκίνητο τελευταίας τεχνολογίας.

Όπως έχει γίνει και κατανοητό από την ανάλυση των ατυχημάτων πυρκαγιάς σε πλοία που μεταφέρουν οχήματα, η εύρεση και η αποσαφήνιση των αιτιών τους αποτελεί ένα σημαντικό ζήτημα. Για την καλύτερη κατανόηση, στην εικόνα 3 παρουσιάζεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας που καταγράφει και ομαδοποιεί όλες τις πυρκαγιές σύμφωνα με τους λόγους που ξεκίνησαν.

The causes were identified as follows:

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
Total, all entries	18	8	9	35

Εικόνα 3: Αιτίες έναρξης πυρκαγιών σε ατυχήματα παλαιότερων ετών (DNV, 2016)

Όπως φαίνεται και από τον πίνακα, σε ένα αξιοσημείωτο ποσοστό των ατυχημάτων (ένα 40% ήτοι 14 από τα 35) η αιτία για την οποία ξεκίνησε η πυρκαγιά παραμένει άγνωστη. Το συγκεκριμένο ποσοστό καταδεικνύει την δυσκολία ανίχνευσης των αιτιών, ένα συμπέρασμα που ανάγεται από το γεγονός ότι η διαδικασία απαιτεί προσεκτική και δαπανηρή έρευνα χρήζοντας την ανάγκη χρηματοδότησης.

2.2 Κατηγορίες χώρων καταστρωμάτων Ro-Ro

Σύμφωνα με τα δεδομένα, σημαντικό ρόλο στην μελέτη των ατυχημάτων παίζει και η σχεδίαση του χώρου καταστρώματος Ro-Ro. Για τον λόγο αυτό είναι σημαντικό σε αρχικό στάδιο να περιγραφεί η ταξινόμηση των χώρων αυτών στους 3 τύπους στους οποίους χωρίζονται όπως έχουν διατυπωθεί από SOLAS:

- Closed Ro-Ro spaces
- Open Ro-Ro decks (openings are typically aft and in sides, but not above)
- Open Ro-Ro decks/weather deck type (open decks with no deck above Ro-Ro lanes) which is completely exposed to the weather from above and from at least two sides

Σύμφωνα με τα στοιχεία καταγράφεται ότι και στις 4 περιπτώσεις που οδηγήθηκαν σε ολική απώλεια του σκάφους, η φωτιά αναπτύχθηκε σε ανοιχτό κατάστρωμα με πρυμναίο και πλάγια ανοίγματα (3 περιπτώσεις σε πλοία RoPaxs και 1 σε general Ro-Ro). Η αυξημένη αυτή επικινδυνότητα σε ανοιχτό κατάστρωμα (με πλάγια και πρυμναία ανοίγματα) προκύπτει από το γεγονός ότι παρουσιάζεται μεγάλη πρόκληση όσον αφορά το σενάριο πυρκαγιάς αφού λόγω της εξαέρωσης, δημιουργείται πυρκαγιά με αυξημένη τροφοδοσία οξυγόνου (O₂) κάτω από στεγανό κατάστρωμα από ατσάλι το οποίο αντανάκλα θερμότητα και συσσωρεύει θερμά αέρια. Επιπλέον, αξιοσημείωτες δυσκολίες και προκλήσεις σχετίζονται και με την διάσωση του πληρώματος σε αυτών των ειδών χώρων. Πιο συγκεκριμένα, προκύπτουν σημαντικά ζητήματα σχετικά με τις διόδους διαφυγής, την κατάλληλη τοποθεσία των διασωστικών μέσων καθώς και με την εισαγωγή αέρα μέσα στο μηχανοστάσιο και στις γεννήτριες έκτακτης ανάγκης τα οποία προέρχονται κυρίως από τις ζημιές που τους προκαλούνται από τον καπνό και τις φλόγες που διαπερνούν τα ανοίγματα. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η κατάσταση θα ήταν πολύ καλύτερη και για τα 4 περιστατικά απώλειας σκάφους αν το σύστημα fire-extinguishing είχε λειτουργήσει σωστά και έγκαιρα. Στην συνέχεια θα αναλυθούν εκτενέστερα και τα συστήματα κατάσβεσης σε καταστρώματα Ro-Ro. Εν συνεχεία, σε 3 περιπτώσεις ατυχημάτων το πλοίο δεν επέστρεψε για επισκευή, κυρίως λόγω συνδυασμού των βλαβών, της αγοραστικής του αξίας και της ηλικίας του. Στις δύο εξ αυτών η φωτιά αναπτύχθηκε μέσα σε κλειστό κατάστρωμα Ro-Ro καθιστώντας τις ζημιές σημαντικά λιγότερο σοβαρές σε σχέση με τις περιπτώσεις των ανοιχτών χώρων που οδήγησαν σε ολική απώλεια. Παρόμοια στοιχεία συλλέγονται και για τις 2 πυρκαγιές που έλαβαν χώρα σε καταστρώματα καιρού (weather decks, εικόνα 4) οι οποίες παρόλο που ήταν μεγάλης διάστασης και έφεραν σημαντικές καταστροφές, τελικά η κρίσιμη κατάσταση ήρθε υπό έλεγχο οδηγώντας τους αναλυτές στο συμπέρασμα ότι μία παρόμοια φωτιά σε ένα κατάστρωμα της 2^{ης} κατηγορίας θα ήταν δυσκολότερο να αντιμετωπιστεί.



Εικόνα 4: Ανοιχτό κατάστρωμα (weather deck) (DNV, 2016)

2.3 Επιρροή συστημάτων κατάσβεσης στα περιστατικά ατυχημάτων

Όλοι αυτοί οι χώροι Ro-Ro που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 2.2 πρέπει να προστατεύονται από ένα καθορισμένο σύστημα κατάσβεσης πυρκαγιάς (fixed fire-extinguishing system). Για τα πλοία μεταφοράς οχημάτων και επιβατών, το σύστημα που κυρίως χρησιμοποιείται είναι αυτό του ολικού κατακλυσμού ή των αυτόματων ψεκαστήρων. Σύμφωνα με τον πίνακα της εικόνας 5 (DNV, 2016), καταγράφονται 9 ατυχήματα με τον απολογισμό ζημιών τους, που συνέβησαν στο χρονικό διάστημα 2005-2016, καθώς και ποια ήταν η ανταπόκριση των ψεκαστήρων στο καθένα από αυτά.

Vessel	Time to release	Damages, other findings
RoPax vessels		
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	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
Cargo Ro-Ro vessels		
UND Adriyatik	Did not operate	Total loss of vessel

Εικόνα 5: Χρόνος ενεργοποίησης συστήματος κατάσβεσης σε πρόσφατα ατυχήματα και οι αντίστοιχες συνέπειες (DNV, 2016)

Σε γενικότερο πλαίσιο, από τις καταγεγραμμένες αυτές πυρκαγιές φαίνεται ότι η αργοπορημένη ή η μη ενεργοποίηση του συστήματος κατάσβεσης είναι μείζονος σημασίας αφού αυξάνει την έκταση των τελικών καταστροφών στο πλοίο. (DNV, 2016)

2.4 Περίπτωση ατυχήματος Lisco Gloria

Στην παρούσα εργασία θα αναλυθεί η περίπτωση του ατυχήματος του πλοίου Lisco Gloria. Το πλοίο αυτό πρόκειται για ένα Ro-Ro passenger vessel με λιθουανική σημαία, μεταφορική ικανότητα ίση με 7.620 t και κατασκευασμένο το 2002 (Εικόνα 6). Σύμφωνα με το **investigation report 445/10** της **Lithuanian Maritime Safety Administration** (Kaufmann, 2012), το πλοίο Lisco Gloria ξεκίνησε το ταξίδι του το απόγευμα στις 8 Οκτωβρίου του 2010 από το Κιέλο της Γερμανίας με προορισμό την πόλη Κλαϊπέντα στην Λιθουανία. Το πλήρωμα του απαριθμούταν από 32 μέλη ενώ ο αριθμός επιβατών υπολογίζεται στους 203. (Jonathan, 2020)



Εικόνα 6: Το επιβατηγό/οχηματαγωγό πλοίο Lisco Gloria (Kaufmann, 2012)

Το κύριο του κατάστρωμα (upper deck) απαρτιζόταν κυρίως από σταθμευμένα αυτοκίνητα και φορτηγά αλλά και από νταλίκες οι οποίες λειτουργούν σαν φορτηγά-ψυγεία μεταφέροντας προϊόντα. Αυτές οι μονάδες ψύξης μπροστά από κάθε trailer ελεγχόντουσαν τακτικά από κάποιο μέλος του πληρώματος, ώστε να παρατηρούν την θερμοκρασία του φορτίου. Μετά από μία ώρα από την έναρξη του ταξιδιού, ένα μέλος του πληρώματος έκανε τον καθιερωμένο έλεγχο ολόκληρου του κύριου καταστρώματος (από την πλώρη μέχρι την πρύμνη) σε όλα τα οχήματα. Όμως λίγα λεπτά πριν τα μεσάνυχτα, κατά την επιστροφή του στους χώρους καταστρωμάτων, αντιλήφθηκε την φωτιά μέσω της μυρωδιάς και την ίδια στιγμή ενεργοποιήθηκε ο συναγερμός πυρκαγιάς για την περιοχή του γκαράζ ο οποίος ακούστηκε μέχρι την γέφυρα που βρισκόταν ο επικεφαλής. Αυτός με την σειρά του αναζητούσε την πηγή της φωτιάς μέσω των CCTV monitors, μέχρι που το μέλος που εκτελούσε την υπηρεσία ανακάλυψε ότι η φωτιά προερχόταν από την μηχανή ενός από τα φορτηγά-ψυγεία που ελέγχθηκαν στην αρχή. Μετά και τον εντοπισμό, ο επικεφαλής ενεργοποίησε άμεσα το σύστημα κατάσβεσης (πάνω από το αντίστοιχο γκαράζ) αλλά αυτό απέτυχε καθώς οι ψεκαστήρες δεν λειτούργησαν ποτέ και δεν ψέκασαν καθόλου νερό στον χώρο. Παράλληλα η παρέμβαση κάποιου μέλους του πληρώματος ώστε να βοηθήσει στην κατάσβεση δεν ήταν τόσο εφικτή καθώς το κατάστρωμα ήταν πλήρως γεμάτο με καπνό. Το γεγονός αυτό και σε συνδυασμό με την συνεχόμενη παροχή οξυγόνου από τα ανοίγματα οδήγησε στην ανεξέλεγκτη εξάπλωση της πυρκαγιάς, την απόφαση για εκκένωση ολόκληρου του πλοίου και τελικώς στην ολική απώλεια, αλλά χωρίς κάποιον θάνατο ή σοβαρό τραυματισμό (Εικόνα 7). Σύμφωνα με τους πραγματογνώμονες, η αποτυχία ενεργοποίησης του συστήματος κατάσβεσης οφείλεται σε ανθρώπινο λάθος. (Kaufmann, 2012)



Εικόνα 7: Κατάσταση του πλοίου “Lisco Gloria” μετά τις καταστροφές του ατυχήματος (Kaufmann, 2012)






3 Συστήματα κατάσβεσης πυρκαγιάς αναγνωρισμένα από SOLAS (Κανονισμοί και απαιτήσεις) (EMSA, 2018; IMO, 2018)

Για τις περιπτώσεις πυρκαγιών σε πλοία με μεταφερόμενο φορτίο οχήματα (Ro-Ro) έχουν αναγνωριστεί και κατηγοριοποιηθεί σύμφωνα με τον SOLAS τα ακόλουθα συστήματα κατάσβεσης:

- Συστήματα ψεκασμού νερού που ενεργοποιούνται χειροκίνητα και σχεδιάζονται και εγκαθίστανται σύμφωνα με τις ρυθμιστικές απαιτήσεις του κανονισμού Resolution A.123(V) και MSC.1/Circ. 1430,Rev.1 (IMO,2018)
- Αυτόματοι ψεκαστήρες (sprinklers) ή συστήματα ολικού κατακλυσμού νερού (deluge) σχεδιασμένα και εγκατεστημένα σύμφωνα με τις ρυθμιστικές απαιτήσεις του κανονισμού MSC.1/Circ. 1430,Rev.1 (IMO,2018)
- Αυτόματο ακροφύσιο ή συστήματα water deluge mist ελεγχμένα και εγκατεστημένα σύμφωνα με τις διαδικασίες δοκιμών πυρκαγιάς και οδηγίες εγκατάστασης του κανονισμού MSC.1/Circ. 1430,Rev.1 (IMO,2018)
- Συστήματα αφρού υψηλής διαστολής (High-expansion foam) που εγκαθίστανται σύμφωνα με τις απαιτήσεις του FSS Code
- Συστήματα κατάσβεσης πυρκαγιάς με αέριο (Gas fire-extinguishing) εγκατεστημένα σύμφωνα με τις απαιτήσεις του FSS Code

Στην εικόνα 8 απεικονίζονται αυτές οι κατηγορίες συστημάτων κατάσβεσης μαζί με τον εξοπλισμό τους από τον οποίο εξάγεται το αντίστοιχο μέσο κατάσβεσης. Επίσης, φαίνεται ποια είναι η χρήση της κάθε κατηγορίας πάνω στην πυρκαγιά καθώς και ποιος είναι ο κύριος τρόπος που σβήνει το κάθε μέσο την φωτιά. Συγκεκριμένα, οι τρόποι αυτοί απαρτίζονται από την αποστέρηση οξυγόνου από την πηγή της φωτιάς (smothering) και από την απευθείας ψύξη της επιφάνειας καύσης (cooling). Τέλος, αναφέρονται και κάποια γρήγορα tips για την σωστή λειτουργία του κάθε συστήματος.

Fixed firefighting equipment

Type	Used	Tips
Sprinkler 	Cooling	Check piping is free from damage and that the compartment has the correctly rated nozzle. Never paint over nozzles.
Drencher 	Cooling	Check manually operated valves are open and that nozzles are not blocked. Always verify if release controls are set to local or remote release.
Hi-fog 	Smothering	Release hi-fog as soon as a fire is confirmed. Never paint over nozzles.
High expansion foam 	Smothering	Release foam as soon as a fire is confirmed.
CO ₂ 	Smothering	Before release, batten down and seal the compartment and verify that everyone on board the ship has been accounted for. CO ₂ is a dangerous health hazard.

Εικόνα 8: Ο εξοπλισμός των συστημάτων κατάσβεσης (ακροφύσια, τρόπος κατάσβεσης, tips) (EMSA, 2018)

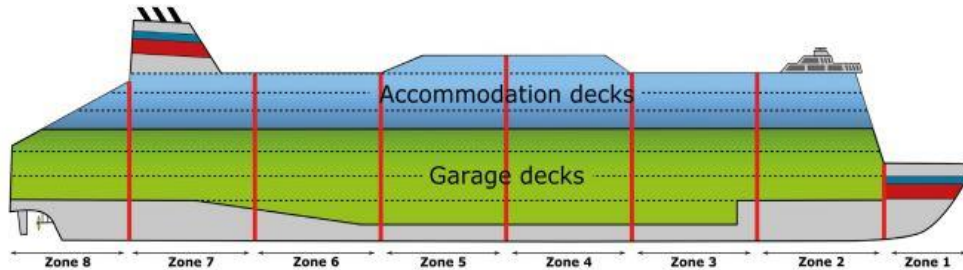
Όπως γίνεται αντιληπτό, όλη η διαδικασία κατάσβεσης στηρίζεται σε 3 βασικά μέσα όπως είναι το νερό, τα αέρια (με κυριότερο το διοξείδιο του άνθρακα) και ο αφρός. Στην συνέχεια έπεται η περεταίρω ανάλυση των συστημάτων αυτών ώστε να διεκπεραιωθεί η σωστή και η κατάλληλη χρήση τους, κάτι που αποτελεί ένα σημαντικό ζήτημα για την σωστή διαχείριση των πυρκαγιών.

3.1 Συστήματα ψεκασμού νερού ενεργοποιούμενα χειροκίνητα σύμφωνα με IMO Resolution A.123(V) και MSC.1/Circ. 1430,Rev.1 (IMO,2018)

Τα συστήματα αυτά πρέπει να σχεδιάζονται και να εγκαθίστανται σύμφωνα με τα ακόλουθα όπως τα απαιτεί ο κανονισμός:

- Η συνολική παροχή του νερού του συστήματος αναλόγως με το μέγεθος του χώρου που θα καλύψει πρέπει να παίρνει την ελάχιστη τιμή:
 1. 3.5 m³/min για χώρους με μέγιστο ύψος 2.5 m ή
 2. 5 m³/min για χώρους με ύψος μεγαλύτερο των 2.5 m
- Το σύστημα πρέπει να χωρίζεται σε ζώνες όπου η κάθε ζώνη να καλύπτει ολόκληρο το πλάτος του πλοίου και να έχει ελάχιστο μήκος ίσο με 20 m (Εικόνα 9)
- Η χωρητικότητα της αντλίας του συστήματος πρέπει να είναι επαρκής ώστε να εξασφαλίζει πλήρως την χωρητικότητα της εκροής του νερού που χρειάζεται για τουλάχιστον 2 ζώνες

- Οι βαλβίδες διαχωρισμού των τμημάτων πρέπει να είναι τοποθετημένες εκτός των προστατευόμενων χώρων



Εικόνα 9: Διαχωρισμός του πλοίου σε ζώνες (EMSA, 2018)

Η απόφαση Resolution A.123(V) του IMO υιοθετήθηκε το 1967 ενώ το τεχνικό υπόβαθρο των δεδομένων πιθανώς βασίστηκε σε δοκιμές πυρκαγιών που έλαβαν χώρα στις αρχές της δεκαετίας του 1960, παρόλο που αυτό δεν έχει αναγνωριστεί πλήρως. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι κανένα σύστημα πλέον δεν ακολουθεί τις απαιτήσεις της Resolution A.123(V) μετά την εισαγωγή του MSC.1/Circ.1430 το 2012 και μετέπειτα των αναθεωρημένων οδηγιών του MSC.1/Circ.1430/Rev.1 το 2018.

Όσον αφορά παραδείγματα σχεδίασης του συστήματος, για χώρους με χαμηλό ύψος και πλάτος 30 m ένα σύστημα κατακλυσμού θα είχε ελάχιστη παροχή νερού ίση με 4200 L/min ενώ ένα αντίστοιχο σύστημα για χώρους με μεγάλο ύψος και ίδιο πλάτος θα είχε ελάχιστη παροχή ίση με 6000 L/min.

Συγκεντρώνοντας τα παραπάνω όπως και κάποια άλλα στοιχεία, στον πίνακα 1 παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της συγκεκριμένης κατηγορίας συστήματος κατάσβεσης.

Συστήματα ψεκασμού νερού ενεργοποιούμενα χειροκίνητα σύμφωνα με τον κανόνα IMO Resolution A.123(V) και MSC.1/Circ. 1430,Rev.1 (IMO,2018)	
Τα συστήματα ψεκασμού νερού ελέγχουν την ανάπτυξη της φωτιάς βρέχοντας και ψύχοντας την επιφάνεια καύσης	
Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Καθόλου περιβαλλοντολογικό ρίσκο λόγω ότι το κατασβεστικό μέσο δεν είναι τοξικό	Πρόβλημα στην καταστολή πυρκαγιών οι οποίες προστατεύονται από την απευθείας εφαρμογή νερού
Αποτελεσματικό για φωτιές με συνηθισμένα στερεά καύσιμα	Όχι τόσο αποτελεσματικό για φωτιές από διαρροές εύφλεκτων υγρών
Απλό και αξιόπιστο σύστημα	Απαιτείται ανθρώπινη παρέμβαση για την ενεργοποίηση
Είναι εφικτή η χειροκίνητη ενεργοποίηση του συστήματος σε πρώιμο στάδιο αν η πυρκαγιά ανιχνευτεί νωρίτερα (είτε οπτικά ή από fire detection system)	Προκύπτουν ζημιές από το νερό και προβλήματα στην ευστάθεια του πλοίου
Η χειροκίνητη ενεργοποίηση επιτρέπει την	Οι οδηγίες για σχεδίαση και εγκατάσταση

στρατηγική λειτουργία του συστήματος	καθορίστηκαν την δεκαετία του 60', καθιστώντας έτσι τις επιδόσεις όχι πλήρως κατάλληλες για σήμερα
Χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης	

Πίνακας 1: Πλεονεκτήματα/Μειονεκτήματα χειροκίνητα ενεργοποιούμενου συστήματος ψεκασμού νερού

3.2 Αυτόματοι ψεκαστήρες ή συστήματα ψεκασμού ολικού κατακλυσμού νερού σύμφωνα με MSC.1/Circ. 1430,Rev.1 (IMO,2018)

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι απαιτήσεις σχεδιασμού και εγκατάστασης των αυτόματων ψεκαστήρων και των συστημάτων κατακλυσμού ήταν καθορισμένες μερικώς σύμφωνα με τα αποτελέσματα του **IMPRO-project**. Το project αυτό περιλάμβανε μια συνολική βιβλιογραφική έρευνα πάνω στον σχεδιασμό και την χρήση των παραδοσιακών συστημάτων sprinkler για τις παρόμοιες δοκιμές πυρκαγιών και κατάσβεσης τους (μικρής και μεγάλης κλίμακας) που διεξήχθησαν ώστε να καθορίσουν τις οδηγίες εγκατάστασης των συστημάτων.

Με την εισαγωγή του MSC.1/Circ.1430, προσφέρθηκε η δυνατότητα χρήσης υγρών, ξηρών ή pre-action συστημάτων κατάσβεσης, δηλαδή με άλλα λόγια συστημάτων που χρησιμοποιούν αυτόματους ψεκαστήρες ή ακροφύσια. Οι ψεκαστήρες αυτοί ενεργοποιούνται μέσω της θερμότητας της πυρκαγιάς και εν συνεχεία εκκενώνεται πρωταρχικά το νερό πάνω από την επιφάνεια καύσης. Ωστόσο, τα συστήματα αυτά που χρησιμοποιούν τέτοια μέσα ψεκασμού επιτρέπονται μόνο για κλειστούς ro-ro χώρους, χώρους ειδικών κατηγοριών καθώς και γενικά άλλους χώρους όπου οι συνθήκες ανέμου δεν είναι πιθανόν να επηρεάσουν την επίδοση του συστήματος. Τα συστήματα ολικού κατακλυσμού μπορούν να εφαρμοστούν σε ανοιχτούς χώρους ro-ro όπου οι πραγματικές συνθήκες ανέμου λαμβάνονται υπόψη, χρησιμοποιώντας για παράδειγμα υψηλής ταχύτητας ακροφύσια.

Αναλόγως με το μέγεθος του ύψους των χώρων που οι ψεκαστήρες θα πρέπει να καλύψουν, ο προτεινόμενος σχεδιασμός του συστήματος διαφέρει σε κάθε κατάσταση σύμφωνα με τον κανόνα MSC.1/Circ.1430.

Πιο συγκεκριμένα για χώρους με ελεύθερο ύψος ίσο ή λιγότερο από 2.5 m, η ελάχιστη απαιτούμενη παροχή νερού και επιφάνεια κάλυψης φαίνεται στον πίνακα 2.

Type of system	Minimum water discharge density (mm/min)	Minimum coverage area
Wet-pipe system	6.5	280 m ²
Dry-pipe or pre-action system	6.5	280 m ²
Deluge system	5	2 x 20 m x the full breadth of the protected space

Πίνακας 2: Ελάχιστη παροχή νερού για deck με ύψος <2.5 m

Για το ίδιο εύρος ύψους καταστρώματος, η θερμοκρασία ενεργοποίησης και λειτουργίας πρέπει να βρίσκεται στο εύρος μεταξύ των 57 °C και 79°C και standard χαρακτηριστικά απόκρισης.

Το πρωταρχικό πλεονέκτημα των δύο πρώτων κατηγοριών έναντι των συστημάτων ολικού κατακλυσμού είναι ότι το σύστημα τυπικά ενεργοποιείται νωρίτερα και οι συνολικοί ρυθμοί παροχής νερού είναι αρκετά χαμηλότερες. Όσον αφορά τις τιμές του flow rate, όπως συμπεραίνεται και από τον πίνακα 2, για χαμηλού ύψους χώρους με πλάτος 30 m τα συστήματα υγρού, ξηρού τύπου και προενέργειας σχεδιάζονται για ελάχιστη παροχή νερού ίση με 1820 L/min ενώ τα συστήματα κατακλυσμού σχεδιάζονται αντίστοιχα για 6000 L/min.

Για χώρους με ύψος μεγαλύτερο των 2.5 m αλλά λιγότερο των 6.5 m οι προτεινόμενες απαιτήσεις σχεδίασης εγκεκριμένες από τον IMO φαίνονται στον πίνακα 3.

Type of system	Minimum water discharge density (mm/min)	Minimum coverage area
Wet-pipe system	15	280 m ²
Dry-pipe or pre-action system	15	365 m ²
Deluge system	10	2 x 20 m x the full breadth of the protected space

Πίνακας 3: Ελάχιστη παροχή νερού για deck με ύψος 6.5 m > z > 2.5 m

Για το ίδιο εύρος ύψους καταστρώματος, η θερμοκρασία ενεργοποίησης και λειτουργίας πρέπει να βρίσκεται στο εύρος μεταξύ των 121 °C και 149 °C και standard χαρακτηριστικά απόκρισης.

Για καταστρώματα οχημάτων ύψους μέσα στο προαναφερθέν εύρος με πλάτος 30 m, τα συστήματα των δύο πρώτων κατηγοριών σχεδιάζονται για παροχή νερού ίση με 4200 litre/min (wet pipe system) ή 5475 litre/min (dry-pipe or pre-action system) αντίστοιχα, ενώ το σύστημα ολικού κατακλυσμού (deluge) σχεδιάζεται για παροχή ίση με 12000 litre/min. Στην πράξη, ωστόσο, αναμένεται να ενεργοποιηθούν λιγότεροι αυτόματοι ψεκαστήρες συγκριτικά με αυτούς στην περιοχή σχεδίασης, καθιστώντας έτσι τα συστήματα με αυτόματους ψεκαστήρες ακόμα πιο προνομιακά σε σχετικά με τους ρυθμούς παροχής νερού.

Ανάλογες απαιτήσεις σχεδίασης προτείνονται και για καταστρώματα ύψους μεγαλύτερου από 6.5 m αλλά μικρότερου από 9 m και οι τιμές τους φαίνονται στον πίνακα 4.

Type of system	Minimum water discharge density (mm/min)	Minimum coverage area
Wet-pipe system	20	280 m ²
Dry-pipe or pre-action system	20	365 m ²
Deluge system	15	2 x 20 m x the full breadth of the protected space

Πίνακας 4: Ελάχιστη παροχή νερού για deck με ύψος >6.5 m

Για την καλύτερη κατανόηση αυτής της κατηγορίας, θα δοθούν και κάποιοι ορισμοί αυτούσιου όπως ακριβώς αναγράφονται στον **MSC.1/Circ.1430/Rev.1** (IMO, 2018):

1. “Area of operation is a design area for wet-pipe, automatic sprinkler system (to be determined for performance-based systems by the test procedure described in the appendix to these Guidelines).”
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.”
3. “Automatic system is a system utilizing either automatic sprinklers or nozzles or a system that is automatically activated by a fire detection system.”
- 4 “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.”
5. “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.”
6. “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.”
7. “Fire control limits the size of a fire by distribution of water so as to decrease the heat release rate, while controlling ceiling gas temperatures and pre-wetting adjacent combustibles and/or reducing heat radiation to avoid structural damage.”
8. “Fire suppression is the sharp reduction of the heat release rate of a fire and the prevention of regrowth.”
9. “K-factor is a sprinkler nozzle discharge coefficient determined by testing, that is used to calculate flow rate at any given pressure through the relationship $Q = k P^{1/2}$, where Q is the flow rate in litres per minute, and P is the pressure in bars.”
10. “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.”
11. “Performance-based requirements are based on the results of fire tests conducted on specific nozzle design and arrangements. The required engineering parameters for such systems are determined by the results of the fire tests.”

12. “Prescriptive based requirements are specific requirements, such as minimum water discharge density or maximum nozzle spacing, and are applied equally to all systems designed to this approach.”

13. “Pump means a single water pump, with its associated driver and control or an individual pump within a pump unit.”

14. “Pump unit means a single water pump, or two or more pumps connected together to form a unit, with their associated driver(s) and controls.”

15. “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.”

16. “Water-based extinguishing medium is fresh water or seawater, with or without an antifreeze solution and/or additives to enhance fire-extinguishing capability.”

17. “Water discharge density is the unit rate of water application to an area or surface expressed in mm/min (equal to (l/min)/m²).”

18. “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.” (IMO, 2018)

Συγκεντρώνοντας τα παραπάνω όπως και κάποια άλλα στοιχεία, στον πίνακα 5 παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της συγκεκριμένης κατηγορίας συστήματος κατάσβεσης.

Αυτόματοι ψεκαστήρες ή συστήματα ψεκασμού ολικού κατακλυσμού νερού σύμφωνα με τον κανόνα MSC.1/Circ. 1430,Rev.1 (IMO,2018)	
Οι αυτόματοι ψεκαστήρες και τα συστήματα ψεκασμού νερού ελέγχουν την φωτιά βρέχοντας και ψύχοντας της επιφάνειας καύσης	
Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Καθόλου περιβαλλοντολογικό ρίσκο λόγω ότι το κατασβεστικό μέσο δεν είναι τοξικό	Πρόβλημα στην καταστολή πυρκαγιών οι οποίες προστατεύονται από την απευθείας εφαρμογή νερού
Αποτελεσματικό για πυρκαγιές με συνηθισμένα στερεά καύσιμα	Όχι τόσο αποτελεσματικό για φωτιές από διαρροές εύφλεκτων υγρών
Αξιόπιστο σύστημα με απλή και αναγνωρισμένη σχεδίαση	Προκύπτουν ζημιές από το νερό και προβλήματα στην ευστάθεια του πλοίου
Χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης	Υψηλοί ρυθμοί παροχής νερού (ισχύει για τα συστήματα κατακλυσμού)
Ενεργοποίηση του συστήματος σε νωρίτερο χρόνο (ισχύει για αυτήν την κατηγορία) για συγκεκριμένες καταστάσεις και σενάρια πυρκαγιών (βλέπε μειονεκτήματα)	Η αυτόματη ενεργοποίηση του συστήματος εμποδίζει τις δυνατότητες για στρατηγική λειτουργία. Για παράδειγμα, το σύστημα να ξεκινήσει να ψύχει χώρους και περιοχές που

	δεν περιλαμβάνονται μέσα στην πυρκαγιά
Μειωμένοι ρυθμοί παροχής νερού (ισχύει μόνο για τις κατηγορίες συστημάτων wet-,dry- ή pre-action)	Ίσως να βρεθούν καταστάσεις ή σενάρια πυρκαγιάς όπου η αυτόματη ενεργοποίηση του συστήματος αργοπορεί συγκριτικά με το ενεργοποιούμενα χειροκίνητα
	Μετά το πέρας της πυρκαγιάς, είναι απαραίτητο να αντικατασταθούν οι χρησιμοποιημένοι αυτόματοι ψεκαστήρες ή ακροφύσια ώστε να επέλθει το σύστημα σε λειτουργία ξανά

Πίνακας 5: Πλεονεκτήματα/Μειονεκτήματα συστήματος αυτόματων ψεκαστήρων

3.3 Αυτόματα ακροφύσια ή συστήματα ολικού κατακλυσμού με ομίχλη νερού σύμφωνα με MSC.1/Circ. 1430,Rev.1 (IMO,2018)

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω στην παρούσα έκθεση, οι διαδικασίες δοκιμής πυρκαγιών για «fixed water-based fire-fighting systems for ro-ro spaces and special category spaces equivalent to that referred to in Resolution A.123(V)» εκδόθηκαν πρώτα στο MSC.1/Circ.1272 το 2008 και αργότερα υιοθετήθηκαν από τον MSC.1/Circ. 1430 το 2012. Τα κριτήρια αποδοχής επιλέχθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι κάπως υψηλότερα από αυτά που καθορίστηκαν με σημείο αναφοράς σχεδιασμένο σύμφωνα με το Resolution A.123(V).

Αυτήν την στιγμή, υπάρχουν αρκετά εγκεκριμένα συστήματα με ομίχλη νερού, είτε αυτόματα είτε κατακλυσμού, στην αγορά. Μία διαφορά με την προηγούμενη κατηγορία συστημάτων είναι ότι η ομίχλη νερού συνεπάγεται ότι είναι κανονικό νερό που ψεκάζεται με αυξημένη πίεση σε σχέση με πριν. Στον πίνακα 6 φαίνεται η λίστα με τις παραμέτρους εγκατάστασης δύο εγκεκριμένων συστημάτων κατακλυσμού με νέφος νερού, ένα χαμηλής πίεσης και ένα υψηλής.



Εικόνα 10: Ψεκαστήρας ομίχλης νερού (<https://www.riskonet.com/en/hype-or-realistic-alternative-the-facts-about-water-mist/>)

System	Low-pressure system	High-pressure system
Maximum deck height [m]	5	5
Nozzle K-factor [metric]	23	3.3
Minimum water pressure [bar]	6	80
Corresponding flow rate per nozzle [litre/minute]	56.3	29.5
Nozzle spacing [m x m]	3.5 x 3.5 (12.25 m ²)	3.8 x 3.8 (14.4 m ²)
Corresponding water density [mm/min]	4.6	2.0
Design area	2 x 20 m x the full breadth of the protected space	

Πίνακας 6: Ενδεικτικές τιμές παραμέτρων για συστήματα ομίχλης με χαμηλή πίεση

Για καταστρώματα με ύψος 5 m και πλάτος 30 m, τα δύο συστήματα σχεδιάζονται για ελάχιστη συνολική παροχή νερού ίση με 5520 litre/min και 2400 litre/min, αντίστοιχα. Η διαφορά αυτή της παροχής οφείλεται στο γεγονός ότι η πίεση, και κατ'επέκταση η πυκνότητα, του νερού (μικρότερου μεγέθους σταγόνες) του δεύτερου συστήματος είναι αισθητά μεγαλύτερη δίνοντας την δυνατότητα για μικρότερο όγκο νερού στην μονάδα του χρόνου.

Στην συνέχεια, στον πίνακα 7 δίνονται οι απαιτούμενοι παράμετροι εγκατάστασης για δύο αυτόματα συστήματα με ομίχλη νερού υψηλής πίεσης.

System	High-pressure system	High-pressure system
Maximum deck height [m]	5	5
Nozzle K-factor [metric]	3.1	4.2
Minimum water pressure [bar]	80	100
Corresponding flow rate per nozzle [litre/minute]	27.7	42.0
Nozzle spacing [m x m]	3.8 x 3.8 (14.4 m ²)	4 x 4 (16 m ²)
Corresponding water density [mm/min]	1.9	2.6
Design area	Wet-pipe system: 280 m ² Dry-pipe system: 365 m ²	

Πίνακας 7: Ενδεικτικές τιμές παραμέτρων για συστήματα ομίχλης με υψηλή πίεση

Για κατάστρωμα ύψους 5 m, αυτά τα συστήματα πρέπει να σχεδιάζονται για περιοχή λειτουργίας ίση με 280 m² όταν πρόκειται για εγκατάσταση συστήματος υγρού τύπου και 365 m² για εγκατάσταση συστήματος ξηρού τύπου. Αντίστοιχα, οι ελάχιστοι ρυθμοί παροχής νερού των δύο συστημάτων είναι 532 litre/min και 728 litre/min.

Εξαιτίας του κόστους εγκατάστασης, τα αυτόματα συστήματα παρουσιάζονται καταλληλότερα έναντι των συστημάτων κατακλυσμού και έτσι λίγες τέτοιες εγκαταστάσεις έχουν χρησιμοποιηθεί, σύμφωνα με τα λεγόμενα που αντλήθηκαν από αρκετούς κατασκευαστές κατά την βιβλιογραφική έρευνα. Τα κόστη αυτά προκύπτουν από το γεγονός ότι ένα σύστημα κατακλυσμού απαιτεί μονάδα αντλίας με υψηλότερη χωρητικότητα αφού η έκταση λειτουργίας είναι αισθητά μεγαλύτερη και κατ' επέκταση η

υψηλότερη εκροή νερού αυξάνει την ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος. Επιπροσθέτως, το συγκεκριμένο σύστημα χρειάζεται μεγάλο αριθμό βαλβίδων κατακλυσμού, σε αντίθεση με τα συστήματα κατάσβεσης υγρού ή ξηρού τύπου όπου η εγκατάσταση μίας βαλβίδας ελέγχου και ανίχνευσης ανά κατάστρωμα είναι αρκετή. Ωστόσο, σύμφωνα με τις πληροφορίες από έναν από τους κατασκευαστές που ρωτήθηκαν, για χώρους go-go μεγάλων διαστάσεων τα προαναφερθέντα συστήματα χωρίζονται σε τμήματα με περίπου 80-90 αυτόματα ακροφύσια το καθένα (περίπου 30 m μήκος το κάθε τμήμα). Η τμηματοποίηση αυτή συμβαίνει κυρίως για πρακτικούς σκοπούς δίνοντας ανεξαρτησία στο κάθε τμήμα. Αρχικά, τα καταστρώματα έχουν την δυνατότητα να ανυψώνονται, όταν χρειάζεται, όντας σε χωρισμένα τμήματα ενώ επίσης και οι διατάξεις των σωληνώσεων είναι βολικό να ακολουθούν την ίδια κατανομή. Τέλος, ωφέλιμο αποτέλεσμα της παραπάνω διάταξης αποτελεί η δυνατότητα που παρέχεται να γνωρίζει το πλήρωμα την τοποθεσία της πυρκαγιάς ώστε να μπορεί να παρέμβει, αν χρειαστεί, και να ελέγχει την κατάσταση. Ένα παράδειγμα της λειτουργίας ενός συστήματος ομίχλης είναι αυτό της αποθήκης της εικόνας 11 όπου διακρίνεται το μικρότερο μέγεθος των σταγόνων (λόγω της παραπάνω συμπίεσης που έχουν υποστεί) σε σχέση με τους αυτόματους ψεκαστήρες και γίνεται εύκολα αντιληπτό εξαιτίας του λευκού χρώματος που μοιάζει με νέφος ενώ αντίστοιχα το ίδιο διακρίνεται και από την εικόνα 10 όπου απεικονίζεται ένα ακροφύσιο υψηλής πίεσης ψεκασμού ομίχλης νερού.



Εικόνα 11: Ψεκασμός ομίχλης νερού (<https://insights.globalspec.com/article/14177/is-water-mist-fire-suppression-the-successor-to-traditional-sprinklers>)

Σύμφωνα με κάποιους κατασκευαστές συστημάτων κατάσβεσης που έχουν συμμετάσχει στις δοκιμές πυρκαγιών του MSC.1/Circ.1430, είναι συνήθης πρακτική ότι οι δοκιμές αυτές που διεξάγονται με αυτόματα ακροφύσια και με τις παραμέτρους σχεδίασης και

εγκατάστασης που αναφέρθηκαν παραπάνω, να θεωρούνται αποδεκτές και για τον σχεδιασμό συστήματος κατακλυσμού (deluge). Έμμεσα αυτό σημαίνει ότι ο χρόνος ενεργοποίησης ενός συστήματος κατακλυσμού δεν θα πρέπει να είναι μεγαλύτερος από αυτόν ενός αυτόματου συστήματος.

Συνοψίζοντας όλες τις παραπάνω πληροφορίες, στον Πίνακα 8 περιγράφονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των συστημάτων κατάσβεσης ομίχλης νερού.

Αυτόματα ακροφύσια ή συστήματα ολικού κατακλυσμού με ομίχλη νερού σύμφωνα με τον κανόνα MSC.1/Circ. 1430, Rev.1 (IMO,2018)	
Οι μικρότερες σταγόνες νερού των συστημάτων αυτών επιτρέπουν στο εκνέφωμα νερού να ελέγχει, καταστέλλει, ή και να σβήνει τις πυρκαγιές μέσω της ψύξης της φλόγας και των περιβαλλόμενων αερίων, εκτοπίζοντας το οξυγόνο μέσω της εξάτμισης και του περιορισμού της θερμότητας ακτινοβολίας	
Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Ελάχιστη διακινδύνευση για περιβαλλοντολογική καταστροφή λόγω ότι το μέσο κατάσβεσης δεν είναι τοξικό	Τα συστήματα ομίχλης απαιτούν υψηλότερης ποιότητας νερό συγκριτικά με τους παραδοσιακούς ψεκαστήρες
Ενεργοποίηση σε νωρίτερο χρόνο (ισχύει μόνο για αυτόματους ψεκαστήρες και συστήματα αυτόματου κατακλυσμού) για συγκεκριμένες καταστάσεις και σενάρια πυρκαγιάς	Αυξημένοι ρυθμοί παροχής νερού (ισχύει μόνο για τα συστήματα κατακλυσμού)
Ο περιορισμός της ακτινοβολίας μπορεί να σταματήσει την εξάπλωση της φωτιάς και να μειώσει την αεριοποίηση στην επιφάνεια καυσίμου	Υψηλότερη πιθανότητα για αποτυχία του συστήματος συγκριτικά με τα συστήματα παραδοσιακών ψεκαστήρων
Αποτελεσματικότερο το σύστημα συγκριτικά με τα ψυκτικά αέρια σε περιπτώσεις κλειστών χώρων με φυσικό εξαερισμό	Η αυτόματη ενεργοποίηση του συστήματος εμποδίζει τις δυνατότητες για στρατηγική λειτουργία. Για παράδειγμα, το σύστημα να ξεκινήσει να ψύχει χώρους και περιοχές που δεν περιλαμβάνονται μέσα στην πυρκαγιά
Μειώνει τις θερμοκρασίες και βελτιώνει την ορατότητα, επιτρέποντας την πρόσβαση σε προστατευμένα διαμερίσματα κατά την διάρκεια της καταστολής της φωτιάς	Ίσως να βρεθούν καταστάσεις ή σενάρια πυρκαγιάς όπου η αυτόματη ενεργοποίηση του συστήματος αργοπορεί συγκριτικά με το ενεργοποιούμενα χειροκίνητα
Μειωμένοι ρυθμοί παροχής νερού (ισχύει μόνο για τις κατηγορίες συστημάτων wet-,dry- ή pre-action)	Μετά το πέρας της πυρκαγιάς, είναι απαραίτητο να αντικατασταθούν οι χρησιμοποιημένοι αυτόματοι ψεκαστήρες ή ακροφύσια ώστε να επέλθει το σύστημα σε λειτουργία ξανά

Πίνακας 8: Πλεονεκτήματα/Μειονεκτήματα συστημάτων ομίχλης νερού

3.4 Συστήματα αφρού υψηλής διαστολής (High-expansion foam systems) σύμφωνα με τον κώδικα FSS (IMO,2014)

Οι αφροί υψηλής διαστολής παρουσιάζουν λόγο διαστολής μέσα στο εύρος 200 έως 1000 και καθίστανται κατάλληλοι για κλειστούς και περιφραγμένους χώρους όπως τα υπόστεγα αεροπλάνων, όπου η γρήγορη πλήρωση με αφρό και ο έλεγχος του όγκου της πυρκαγιάς απαιτούνται. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι αυτό της Εικόνας 12, στην οποία απεικονίζεται ένα σύστημα αφρού υψηλής διαστολής σε δοκιμή λειτουργίας του στην αεροπορική βάση Rosecrans Air National Guard Base, Mo. Στην πράξη, όταν μεγάλος όγκος αφρού κατακλύζει την προστατευόμενη περιοχή, εμποδίζει την εισαγωγή του αέρα στην εστία της φωτιάς αποτελώντας έτσι τον πρωταρχικό μηχανισμό εξόντωσης της πυρκαγιάς. Πιο συγκεκριμένα, όσο ο αφρός δημιουργείται με το νερό και έρχεται σε επαφή με την φωτιά, παράγονται μεγάλες ποσότητες υδρατμών οι οποίες βοηθούν στην μείωση της συγκέντρωσης οξυγόνου στον διαθέσιμο αέρα. Επιπλέον, η περιεκτικότητα νερού στον αφρό δίνει την δυνατότητα ψύξης της φωτιάς, ειδικότερα σε περιπτώσεις με χαμηλό λόγο διαστολής όπου η περιεκτικότητα νερού είναι υψηλότερη. Κάτι άλλο που αξίζει να αναφερθεί είναι ότι ο αφρός απομονώνει τα εύφλεκτα υλικά που ακόμα δεν έχουν πιάσει φωτιά ενώ η ηχηρό πλεονέκτημα του είναι ότι μπορεί και εξαπλώνεται σε όλη την επιφάνεια καύσης και γύρω από τα εμπόδια γεμίζοντας πλήρως τους χώρους.

Όσον αφορά την παραγωγή του αφρού, οι γεννήτριες που είναι υπεύθυνες για αυτή την διαδικασία πρέπει να τροφοδοτούνται με αέρα από την ατμόσφαιρα ενώ ταυτόχρονα πρέπει να παρέχεται μηχανισμός εξαερισμού υψηλού επιπέδου για τον αέρα (συμπεριλαμβανομένων και των αερίων καύσης) που εκτοπίζεται από τον αφρό. Ο απαιτούμενος αυτός εξαερισμός θα πρέπει να αποτελείται από ανοίγματα, είτε ανοιχτά είτε κλειστά και διατεταγμένα έτσι ώστε να ανοίγουν αυτόματα όταν το σύστημα λειτουργεί. Εναλλακτικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανεμιστήρες εξάτμισης οι οποίοι ωστόσο χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής σε λειτουργία με υψηλές θερμοκρασίες.



Εικόνα 12 : Κατάσβεση με αφρό σε κλειστό χώρο (<https://www.youtube.com/watch?v=P35JR-ZdQb4>)

Τα συστήματα αφρού υψηλής διαστολής αφρού είναι αναγνωρισμένα από την **SOLAS Chapter II-2/20** για χρήση σε χώρους οχημάτων, χώρους ειδικής κατηγορίας (special category spaces) καθώς και χώρους Ro-Ro. Πιο συγκεκριμένα, το Chapter 6 – Fixed foam fire extinguishing – του FSS Code (IMO, 2014) περιέχει τις προδιαγραφές και τις λεπτομέρειες για τα συστήματα αυτά που είναι υπεύθυνα για την προστασία των χώρων του μηχανοστασίου και του φορτίου καθώς και των προαναφερθέντων χώρων, σύμφωνα με το Regulation II-2/20.6.1.3. Το σύστημα πρέπει να είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να παράγει αφρό στον απαιτούμενο βαθμό εφαρμογής μετά το πέρας ενός λεπτού από την έναρξη παροχής, ενώ η διαρρύθμιση των προστατευόμενων χώρων θα πρέπει να προσφέρει τον συνεχή εξαερισμό τους όσο αυτοί γεμίζονται με αφρό. Δηλαδή, σε όλες τις διαδικασίες θα πρέπει να φροντίζεται ότι οι πόρτες καθώς και άλλα κατάλληλα ανοίγματα παραμένουν ανοιχτά σε περίπτωση πυρκαγιάς. Επιπλέον, αυτά τα συστήματα αφρού με εξαερισμό θα πρέπει να έχουν επαρκή χωρητικότητα παραγωγής αφρού ώστε να σιγουρεύεται η επίτευξη του ελάχιστου βαθμού πλήρωσης (minimum filling rate) του σχεδιαστή καθώς και να μπορούν γεμίζουν ολοκληρωτικά τους χώρους με τις μέγιστες διαστάσεις μέσα σε 10 λεπτά. Ωστόσο, για συστήματα κατάσβεσης σε χώρους οχημάτων, ro-ro και ειδικών κατηγοριών με καταστρώματα που είναι αεροστεγή και έχουν ύψος μικρότερο των 3 m, ο βαθμός πλήρωσης δεν πρέπει να είναι μικρότερος από τα 2/3 του βαθμού πλήρωσης που έχει προτείνει ο σχεδιαστής ενώ ταυτόχρονα η επάρκεια του πρέπει να είναι τέτοια ώστε να γεμίζει τους χώρους μέγιστων διαστάσεων εντός 10 λεπτών. Τα συστήματα αφρού υψηλής διαστολής χρησιμοποιούνται συνήθως για την προστασία καταστρωμάτων πλήρως γεμάτα με αυτοκίνητα και φορτηγά, σαν εναλλακτική των συστημάτων διοξειδίου του άνθρακα.

Σύμφωνα με τον NFPA 11 (National Fire Protection Association) (NFPA11, 2021), ο συνιστώμενος ρυθμός παροχής του αφρού πρέπει να υπολογίζεται από την εξίσωση (1):

$$R=(VT+R_S) \cdot C_N \cdot C_L \quad (1)$$

όπου

- R = ρυθμός παροχής αφρού σε m³/minute.
- V = όγκος εμβάπτισης σε m³.
- T = χρόνος εμβάπτισης σε minutes.
- R_S = ρυθμός διάσπασης του αφρού από τους ψεκαστήρες σε m³/minute.
- C_N =συντελεστής αποκατάστασης λόγω της φυσιολογικής συρρίκνωσης του αφρού. Τυπικά αυτός ο συντελεστής ρυθμίζεται να ισούται με 1.15 και πρόκειται για μία εμπειρική τιμή η οποία βασίζεται στην μείωση της ποσότητας αφρού λόγω της φωτιάς, της ψύξης των επιφανειών, της απορροφητικότητα των προμηθειών κλπ.
- C_L=συντελεστής αποκατάστασης λόγω διαρροής του αφρού από τα προστατευόμενα τμήματα γύρω από τις πόρτες και τα υπόλοιπα ανοίγματα. Η τιμή του συντελεστή αυτού πρέπει να είναι τουλάχιστον 1.2 ακόμα και για κατασκευές με όλα τα ανοίγματα στεγανοποιημένα.

Για χώρους ro-ro που περιλαμβάνουν ποικίλους κινδύνους έναρξης πυρκαγιάς καθώς και οι πιθανότερες ραγδαίες εξάπλωση από το ένα κατάστρωμα στο άλλο είναι πολύ υψηλές, ο μικρός χρόνος καταστολής της φωτιάς καθίσταται απαραίτητος.

Επίσης με κατασβεστικό μέσο τον αφρό ελαχιστοποιούνται οι πιθανές ζημιές που προκαλούνται στις επιφάνειες από το νερό, καθώς η περιεκτικότητα του σε αυτό είναι μικρή. Ωστόσο, πρέπει να αναφερθεί ότι αυτά τα συστήματα απαιτούν υψηλού επιπέδου συντήρηση ώστε να διασφαλίζεται η αξιόπιστη λειτουργία τους ενώ παράλληλα εμφανίζουν περισσότερους πιθανούς τρόπους αποτυχίας από τα συστήματα αυτόματων ψεκαστήρων.

Στον πίνακα 9 συνοψίζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των συστημάτων αυτής της κατηγορίας:

Συστήματα αφρού υψηλής διαστολής (High-expansion foam systems) σύμφωνα με τον κώδικα FSS	
Ο αφρός υψηλής διαστολής γεμίζει γρήγορα έναν κλειστό χώρο και σχηματίζει μία «κουβέρτα» πάνω από την φωτιά. Ο μηχανισμός αυτός αφαιρεί την παροχή οξυγόνου στο καύσιμο και εμποδίζει τις αναθυμιάσεις του καυσίμου να παραχθούν. Επίσης, χάρις την περιεκτικότητα του αφρού σε νερό προκύπτει και η ψύξη της επιφάνειας καυσίμου.	
Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Ο αφρός γεμίζει την προστατευόμενη περιοχή και εμποδίζει την απεριόριστη εισαγωγή αέρα στην φωτιά	Περιπλοκότητα του συστήματος παραγωγής αφρού, καθώς απαιτείται μία φτερωτή συνδεδεμένη με την παροχή ισχύος και παροχή φρέσκου αέρα
Ο αφρός ψύχει και περιορίζει την ακτινοβολία θερμότητας	Απαιτείται γρήγορη ανίχνευση, λειτουργία και μικροί χρόνοι καταστολής για υψηλή απόδοση
Ο ατμοποιημένος αφρός μειώνει την συγκέντρωση οξυγόνου	Πιθανή καθυστέρηση της χειροκίνητης λειτουργίας του συστήματος λόγω του καθαρισμού του αφρού
Καλύπτει και καταστέλλει τις φωτιές από διαρροές εύφλεκτων υγρών	Απαιτήσεις για συντήρηση υψηλότερου επιπέδου και περισσότεροι τρόποι αποτυχίας από το σύστημα αυτόματων ψεκαστήρων
Μπορεί να ελέγχει και να σβήσει τις αναθυμιάσεις από διαρροές εύφλεκτων ή τοξικών υγρών	Οι προστατευόμενες περιοχές πρέπει να αερίζονται πολύ καλά ώστε να αποφεύγεται η ανάπτυξη θετικών πιέσεων
Τυπικά χρησιμοποιεί μικρότερη ποσότητα νερού από τα συστήματα ψεκαστήρων	Αρνητικό περιβαλλοντολογικό αποτύπωμα του αφρού
Επιπρόσθετα οφέλη όταν ο αφρός παράγεται με παροχή αέρα από τον εσωτερικό χώρο	Απαιτείται η ολική εκκένωση του χώρου πριν την λειτουργία του συστήματος
	Εξαιρετικά δύσκολη η ανθρώπινη παρέμβαση για κατάσβεση επειδή ο χώρος έχει γεμίσει με αφρό
	Πολύ περιορισμένα διαθέσιμα δεδομένα από αντίστοιχες δοκιμές πυρκαγιών με αυτή την κατηγορία συστήματος κατάσβεσης

Πίνακας 9: Πλεονεκτήματα/Μειονεκτήματα συστημάτων κατάσβεσης με αφρό υψηλής διαστολής

3.5 Συστήματα κατάσβεσης πυρκαγιάς με αέριο σύμφωνα με τον κώδικα FSS (Gas fire-extinguishing systems) (IMO,2014)

Η σχεδίαση και η εγκατάσταση των συστημάτων κατάσβεσης με αέριο δίνονται από το κεφάλαιο 5 του FSS Code. Μερικές από τις απαιτήσεις αυτές αναφέρονται στην συνέχεια.

Αρχικά, οι ψεκασθήρες πρέπει να διατάσσονται με τέτοιο τρόπο ώστε να πετυχαίνεται η ομοιόμορφη διανομή του κατασβεστικού μέσου. Οι βαλβίδες ελέγχου πρέπει να είναι προσβάσιμες, απλές στην λειτουργία αλλά και να ομαδοποιούνται μαζί σε όσο το δυνατό λιγότερες τοποθεσίες και θέσεις όπου οι πιθανότητες να αποκοπούν από την φωτιά είναι μικρές. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι η αυτόματη απελευθέρωση του κατασβεστικού μέσου δεν επιτρέπεται, εκτός αν τηρούνται οι προϋποθέσεις του Οργανισμού. Το μέσο που χρησιμοποιείται κυρίως από αυτό το σύστημα είναι το διοξείδιο του άνθρακα, το οποίο μπορεί να αποβεί επιβλαβές για τους εργαζόμενους στον χώρο. Για τον λόγο αυτό, απαιτείται η ενεργοποίηση ενός συναγερμού πριν την έναρξη ψεκασμού του αερίου ώστε να υπάρχει ο διαθέσιμος χρόνος για πλήρη εκκένωση του χώρου. Το χρονικό διάστημα αυτό δεν πρέπει σίγουρα να είναι λιγότερο από 20 s.

Για τα καταστρώματα οχημάτων και τους χώρους Ro-Ro, η διαθέσιμη ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα πρέπει να είναι επαρκής ώστε να καλύπτει τουλάχιστον το 45% του όγκου του χώρου που μπορεί να στεγανοποιηθεί, ενώ παράλληλα τουλάχιστον τα 2/3 του απαιτούμενου αερίου πρέπει να έχουν απελευθερωθεί μέσα σε 10 λεπτά. Επίσης πρέπει να αναφερθεί ότι τα παρόντα συστήματα δεν χρησιμοποιούνται για πυροπροστασία των χώρων ειδικής κατηγορίας.

Για την διαδικασία λειτουργίας τους, τα μέλη του πληρώματος πρέπει να έχουν δύο ξεχωριστά χειριστήρια για την απελευθέρωση του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και την επιβεβαίωση της ενεργοποίησης του συναγερμού. Συγκεκριμένα, το ένα χρησιμοποιείται για το άνοιγμα της βαλβίδας του σωλήνα μεταφοράς αερίου στον χώρο και το δεύτερο για την έναρξη παροχής του από την δεξαμενή αποθήκευσης.

Στον πίνακα 10 συνοψίζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των συστημάτων αυτής της κατηγορίας:

Συστήματα κατάσβεσης πυρκαγιάς με αέριο σύμφωνα με τον κώδικα FSS (Gas fire-extinguishing systems)	
Οι πυροσβεστήρες αερίου αντικαθιστούν το οξυγόνο μέσα στον χώρο με διοξείδιο του άνθρακα, μειώνοντας την περιεκτικότητά του σε τέτοια επίπεδα ώστε να μην επαρκής για να λάβει χώρα η καύση	
Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Αδρανή αέρια όπως το CO ₂ έχουν μηδενική επιρροή στην καταστροφή του όζοντος και γενικά κανένα οικολογικό αποτύπωμα	Απαιτείται μεγάλος όγκος για τους πυροσβεστήρες για να εξουδετερώσουν μία πυρκαγιά, κάτι που έχει επιπτώσεις στους περιορισμούς σε σχέση με τον χώρο
Αδρανή αέρια όπως το CO ₂ δεν υπόκειται σε θερμική αποσύνθεση, που σημαίνει ότι δεν δημιουργούν καύση σε	Η απότομη μετατόπιση του οξυγόνου, τα υψηλά επίπεδα θορύβου καθώς και η μειωμένη ορατότητα είναι ένα ζήτημα όταν ρέει το CO ₂

Αποτελεσματικό για ηλεκτρικές, ordinary A Class και διαρροής εύφλεκτων υγρών πυρκαγιές	Απαιτείται περαιτέρω ασφάλεια για το πλήρωμα
	Αργοπορημένη ενεργοποίηση συστήματος καθώς δεν είναι επιθυμητή η αυτόματη λειτουργία
	Περιορισμένη ψύξη του χώρου
	Δεν δύναται η χρήση του συστήματος για ψύξη γειτονικών χώρων

Πίνακας 10: Πλεονεκτήματα/Μειονεκτήματα συστημάτων κατάσβεσης με αέριο

4 Σύστημα αυτόματων ψεκαστήρων με νερό (automatic water sprinklers system)

Τα συστήματα κατάσβεσης που χρησιμοποιούνται συνήθως στις περιπτώσεις πυρκαγιών στα καταστώματα οχημάτων (και γενικότερα σε πυρκαγιές κλειστών χώρων) καθώς και αυτά που εξετάζονται στις προσομοιώσεις της παρούσας διπλωματικής, είναι αυτά της 2^{ης} κατηγορίας του 3^{ου} κεφαλαίου, δηλαδή τα συστήματα αυτόματων ψεκαστήρων με νερό (water sprinklers systems). Πρόκειται για αυτά που χαρακτηρίζονται πιο αποτελεσματικά και χωρίζονται σε τέσσερις διαφορετικούς τύπους όπως παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω:

• Συστήματα υγρού τύπου (wet pipe)

Στα συστήματα αυτά οι ψεκαστήρες συνδέονται με τις σωληνώσεις (piping system) που είναι πάντοτε γεμάτες με νερό υπό πίεση καθώς τους παρέχεται μόνιμα νερό από δεξαμενή (water supply) και κάθε ακροφύσιο —που προστατεύει μια ορισμένη επιφάνεια του δαπέδου — ανοίγει αυτόματα, όταν η θερμοκρασία στην περιοχή του ξεπεράσει ένα προκαθορισμένο όριο. Τα συστήματα υγρού τύπου χρησιμοποιούνται για την προστασία χώρων στους οποίους η θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη από 4° C, γιατί έτσι αποκλείεται ο κίνδυνος να παγώσει το νερό στους σωλήνες.

• Συστήματα ξηρού τύπου (dry pipe)

Στα συστήματα αυτά οι ψεκαστήρες συνδέονται με τις σωληνώσεις (piping system) που περιέχουν πεπιεσμένο αέρα ή άζωτο. Μόλις λειτουργήσουν τα ακροφύσια φεύγει ο αέρας (ή το άζωτο) από το σύστημα, η βαλβίδα ξηρού τύπου ανοίγει και το νερό γεμίζει τις σωληνώσεις και εκτοξεύεται από τα ανοιχτά ακροφύσια.

• Συστήματα προενέργειας (Pre-action)

Τα συστήματα αυτά αποτελούνται από ένα συνδυασμό ανιχνευτών και σωληνώσεων, που περιέχουν αέρα. Σε περίπτωση πυρκαγιάς, λόγω ανύψωσης της θερμοκρασίας, ενεργοποιούνται οι ανιχνευτές (που βρίσκονται στην ίδια περιοχή με τους sprinklers), το νερό γεμίζει τις σωληνώσεις και εκτοξεύεται από τα ακροφύσια.

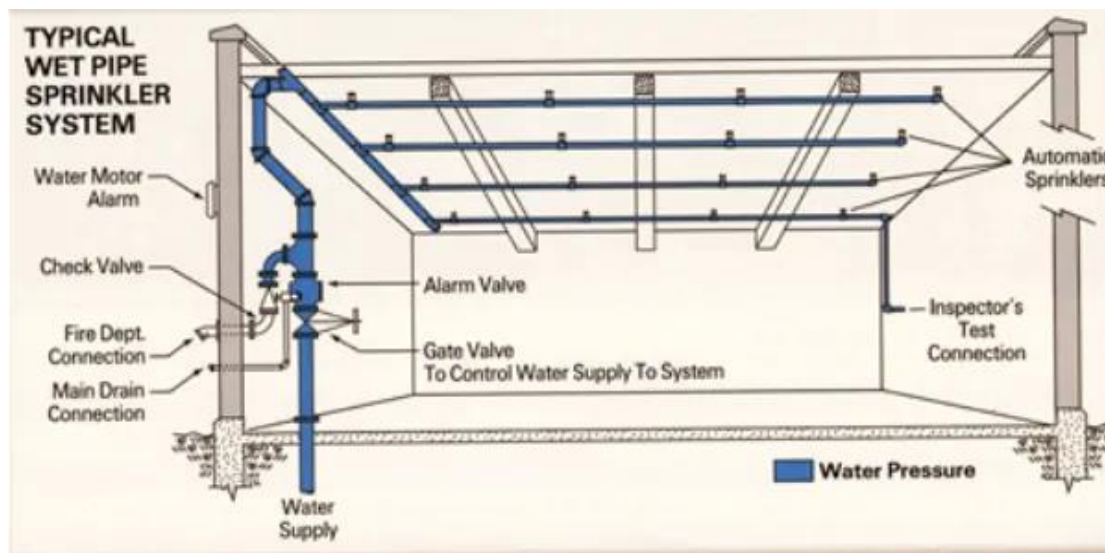
• Συστήματα ολικού κατακλυσμού (DELUGE)

Στα συστήματα αυτά τα ακροφύσια ή οι ψεκαστήρες είναι ανοιχτού τύπου και είναι προσκολλημένοι σε σωληνώσεις (piping system) οι οποίες συνδέονται με δεξαμενή νερού μέσω της βαλβίδας ελέγχου. Η βαλβίδα αυτή ανοίγει μόλις ενεργοποιηθούν οι ανιχνευτές, που βρίσκονται στην ίδια περιοχή με τους sprinklers, λόγω ανύψωσης της θερμοκρασίας και επιτρέπει την άμεση κατάθλιψη νερού από όλα τα ακροφύσια συγχρόνως. Δηλαδή η βασική διαφορά μεταξύ των συστημάτων προενέργειας και ολικού κατακλυσμού, είναι ότι στα τελευταία έχουμε ταυτόχρονη λειτουργία όλων των ακροφυσίων.²

² <https://www.firesecurity.gr/katasbesi/katigories.htm>

4.1 Ανάλυση λειτουργίας συστήματος αυτόματων ψεκαστήρων υγρού τύπου (wet pipe)

Από τους τύπους συστημάτων αυτόματων ψεκαστήρων που αναφέρθηκαν παραπάνω θα αναλυθεί εκτενέστερα η διαδικασία λειτουργίας και η διάταξη του συστήματος υγρού τύπου (wet pipe system, εικόνα 13) καθώς είναι αυτό που χρησιμοποιείται κυρίως στις προσομοιώσεις του επόμενου κεφαλαίου.



Εικόνα 13: Διάταξη τυπικού συστήματος αυτόματων ψεκαστήρων νερού (wet pipe)
(<https://www.qrfs.com/blog/75-fire-sprinkler-systems-history-types-and-uses/>)

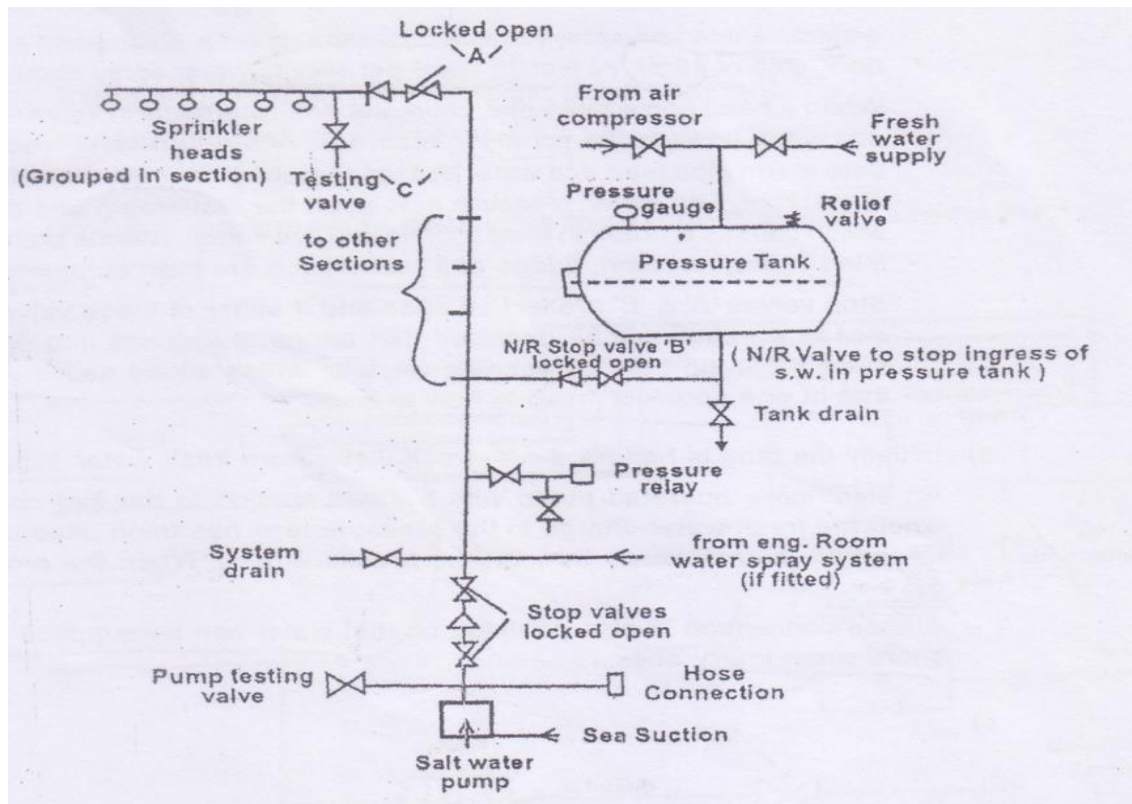
Ουσιαστικά πρόκειται για ένα αυτόματο σύστημα ανίχνευσης, συναγερμού και κατάσβεσης το οποίο μπορεί να αντιμετωπίσει γρήγορα και αποτελεσματικά οποιαδήποτε έξαρση πυρκαγιάς μπορεί να προκύψει σε χώρους ro-ro, διαμονής ή άλλα μέρη του πλοίου.

Το σύστημα αποτελείται από αρκετά τμήματα που περιλαμβάνουν έναν αριθμό κεφαλών ψεκαστήρων (sprinkler head) που τοποθετούνται στις σωληνώσεις κοντά στο ταβάνι. Το κάθε τμήμα συνδέεται μέσω μίας βαλβίδας ελέγχου (control valve) με ένα ψεκαστήρα ο οποίος με την σειρά του είναι συνδεδεμένος με δεξαμενή νερού υπό πίεση και μία αντλία. Ο αριθμός των κεφαλών των ψεκαστήρων δεν πρέπει να ξεπερνάει τους 200 σε κάθε τμήμα ενώ παράλληλα πρέπει να διαθέτει και ένα σύστημα συναγερμού.

Αρχικά, ολόκληρο το σύστημα γεμίζει με φρέσκο νερό σε πίεση περίπου 8 bar από μία δεξαμενή η οποία διατηρείται υπό πίεση από πεπιεσμένο αέρα. Αυτή η διάταξη συνθέτεται έτσι ώστε η πίεση στην υψηλότερη κεφαλή του ψεκαστήρα να μην είναι μικρότερη από 4.8 bar ενώ παράλληλα να συνδέεται και με μία ανεξάρτητη αντλία θαλασσινού νερού με την δικιά της αναρρόφηση. Η κάθε κεφαλή του ψεκαστήρα διαθέτει ένα μηχανισμό με ένα εύηκτο στοιχείο (heat-sensitive element), το οποίο όταν φτάσει μία συγκεκριμένη θερμοκρασία, σπάει και επιτρέπει στο νερό να απελευθερωθεί. Τα είδη και η λειτουργία αυτών των μηχανισμών θα αναλυθούν στο κεφάλαιο 4.2.

Όταν η κεφαλή του ψεκαστήρα ξεκινάει να λειτουργεί, η βαλβίδα non return alarm του τμήματος ανοίγει και το νερό ρέει στην κεφαλή. Αυτή η βαλβίδα αποκαλύπτει μία

σωλήνωση, που συνδέεται με το σύστημα συναγερμού, από την οποία περνάει το νερό και καταλήγει σε ένα διάφραγμα. Η πίεση του νερού δρα στο διάφραγμα, το οποίο προκαλεί διακοπή στο ενεργό κύκλωμα συναγερμού. Έτσι ενεργοποιούνται αυτόματα οι συναγερμοί σε όλους τους χώρους του πλοίου ώστε ενημερωθούν οι επιβάτες και το πλήρωμα. Επίσης το σύστημα διαθέτει αισθητήρες όπου όταν η πίεση πέσει στα 5 bar, ενεργοποιείται αυτόματα η αντλία θαλασσινού νερού ώστε να συνεχίζει να παρέχει θαλασσινό νερό. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι για την σωστή λειτουργία της αντλίας νερού και των αυτόματων συναγερμών πρέπει να παρέχονται τουλάχιστον δύο πηγές ισχύος καθώς και να ελέγχεται όλο το σύστημα ανά εβδομάδα. Στην εικόνα 14 αναπαριστάται σχηματικά η εγκατάσταση του συστήματος με όλα τα μέρη και εξαρτήματα του καθώς και την σύνδεση μεταξύ τους.



Εικόνα 14: Εγκατάσταση συστήματος αυτόματων ψεκαστήρων με όλα τα μέρη του και την μεταξύ τους σύνδεση (<https://marineengineeringonline.com/automatic-water-sprinkler-system/>)

4.2 Τύποι και λειτουργία κεφαλών ψεκαστήρων (sprinkler heads)

Οι κεφαλές των ψεκαστήρων υγρού τύπου διακρίνονται σε 2 τύπους αναλόγως με τον μηχανισμό με τον οποίο διατηρούνται κλειστοί (heat-sensitive elements) και κατ' επέκταση ενεργοποιούνται. Οι τύποι αυτοί είναι:

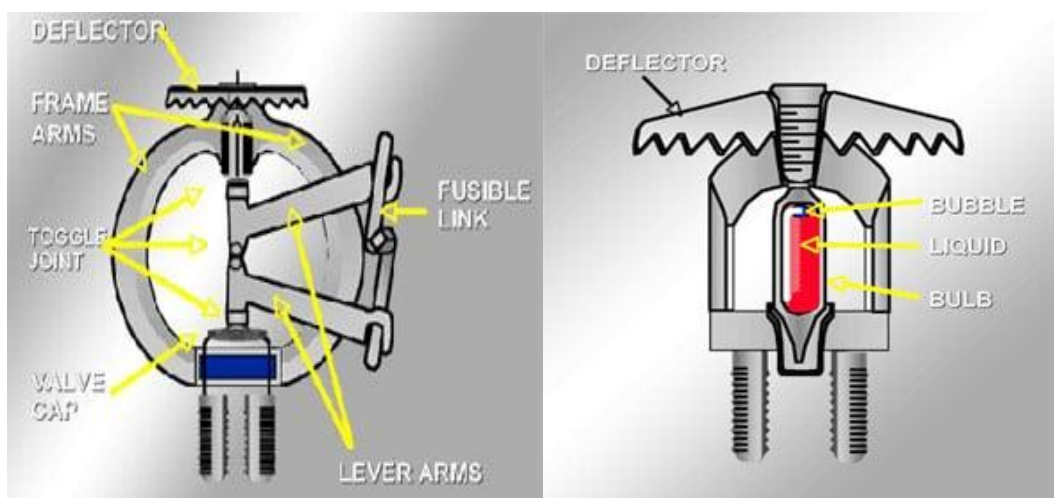
1. **Fusible link sprinkler head:** που πρόκειται για ένα αυτόματο μηχανισμό που διαθέτει δύο ελάσματα από εύτηκτο μεταλλικό κράμα που έχουν συγκολληθεί. Το έλασμα αυτό διατηρεί το καπάκι, που εμποδίζει την δίοδο, στην θέση του. Την στιγμή που η αρχική θερμοκρασία γύρω από το ακροφύσιο φτάνει μία καθορισμένη θερμοκρασία το συγκολλημένο διπλό έλασμα λιώνει και προκαλεί την απομάκρυνση των δύο πλακών και κατ' επέκταση την πτώση του καπακιού. Τότε ανοίγει η δίοδος για το νερό το οποίο απελευθερώνεται αμέσως. Να σημειωθεί ότι το νερό πέφτει μόνο από τις κεφαλές που η τριγύρω θερμοκρασία έχει φτάσει την προκαθορισμένη και κατά συνέπεια βρέχονται μόνο οι περιοχές κοντά στην πηγή κάτι που περιορίζει και τις πιθανές ζημιές από το νερό.
2. **Glass bulb sprinkler heads:** που πρόκειται για έναν αυτόματο μηχανισμό που περιέχει ένα γυάλινο φιαλίδιο με κατάλληλο διασταλτικό υγρό. Το φιαλίδιο αυτό διατηρεί το καπάκι της βαλβίδας στην θέση του. Όταν η αρχική θερμοκρασία του υγρού φτάσει την καθορισμένη θερμοκρασία για έναρξη ψεκασμού, το υγρό διαστέλλεται προκαλώντας το σπάσιμο του γυάλινου φιαλιδίου και την πτώση του καπακιού, επιτρέποντας στο νερό να απελευθερωθεί. Όπως και στο προηγούμενο μηχανισμό, λόγω της ενεργοποίησης των ψεκαστήρων με αυτόν τον τρόπο υπάρχει οικονομία στην κατανάλωση νερού άρα μειώνονται και οι πιθανές ζημιές από αυτό. Στην εικόνα 17 αναπαριστάται ακριβώς η πορεία του glass bulb sprinkler head, σε 4 φάσεις, από την στιγμή που το υγρό φτάνει την θερμοκρασία ενεργοποίησης μέχρι την στιγμή που το νερό ψεκάζεται.



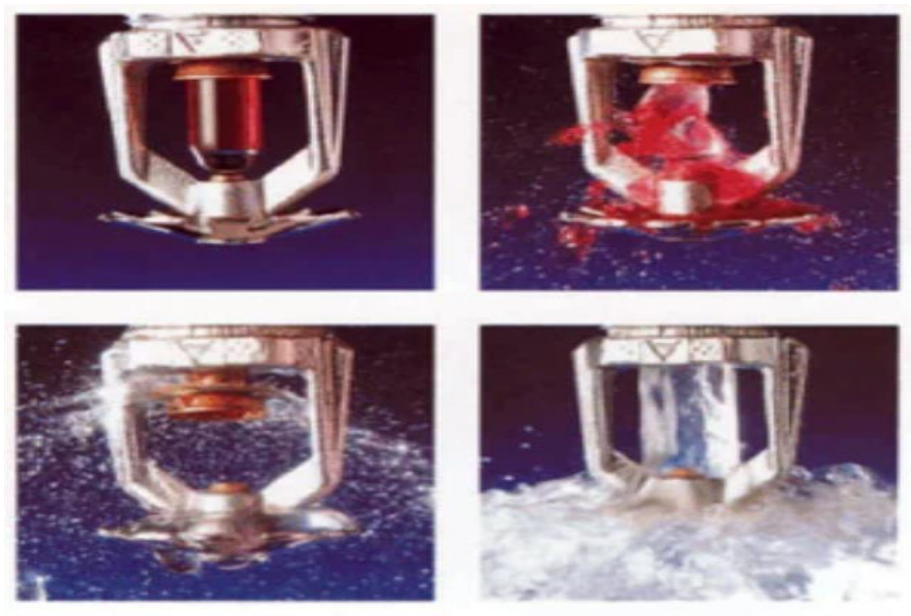
Εικόνα 15: Glass bulb sprinkler head and fusible link sprinkler head (<https://kinetixfire.com/fusible-link-vs-glass-bulb-sprinkler-heads/>)

Πέρα από τους μηχανισμούς αυτούς ενεργοποίησης (heat-sensitive elements) που ήδη αναφέρθηκαν παραπάνω, διαφορετικά στοιχεία μεταξύ αυτών των δύο τύπων εντοπίζονται και στην θερμοκρασία λειτουργίας. Ωστόσο, δεν θα γίνει κάποια περαιτέρω αναφορά καθώς η θερμοκρασία αυτή καθορίζεται και από τους επίσημους κανονισμούς όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3. Αυτό που αξίζει να αναφερθεί είναι ότι αναλόγως αυτήν την θερμοκρασία, τα φιαλίδια παράγονται και με διαφορετικό χρώμα, κάτι που ελκύει κάποιες φορές τους κατασκευαστές να διαλέξουν αυτόν τον τύπο ψεκαστήρων για αισθητικούς λόγους παρόλο που και οι 2 μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε όλες τις εφαρμογές.

Στην εικόνα 16 φαίνονται τα δομικά εξαρτήματα των δύο τύπων ακροφυσίων ενώ στην εικόνα 15 φαίνονται οι δύο τύποι σε ρεαλιστική μορφή. Από εκεί διαπιστώνεται ότι πέραν των αναφερθέντων διαφορών, οι μηχανισμοί και των δύο εμφανίζουν αρκετές ομοιότητες για αυτό και μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις ίδιες εφαρμογές. Η αξιοσημείωτη ομοιότητα τους είναι ο εκτροπέας (deflector) που βρίσκεται στο τέλος του ακροφυσίου. Αυτό το εξάρτημα είναι μία τρυπητή στρογγυλή πλάκα η οποία, την στιγμή που πέφτει η βαλβίδα, ξεκινάει να περιστρέφεται πολύ γρήγορα ενώ το νερό που απελευθερώνεται προσκρούει πάνω του και έτσι προκύπτει ο ψεκασμός.



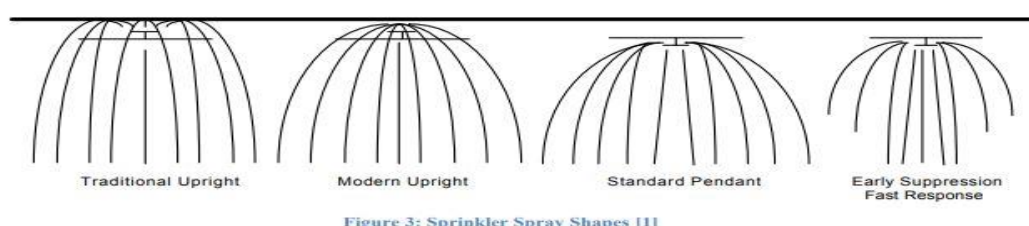
Εικόνα 16: Δύο είδη κεφαλών ψεκαστήρων με τις διαφορές στα εξαρτήματα τους
(<https://www.verisk.com/insurance/capabilities/underwriting/commercial-property/sprinkler-systems/automatic-sprinklers/>)



Εικόνα 17: Οι 4 φάσεις της ενεργοποίησης ψεκαστήρα με σπάσιμο φιαλιδίου με διασταλτικό υγρό (<https://www.verisk.com/insurance/capabilities/underwriting/commercial-property/sprinkler-systems/automatic-sprinklers/>)

Στις προσομοιώσεις της παρούσας εργασίας που λαμβάνουν χώρα στο πρόγραμμα PyroSim χρησιμοποιούνται κεφαλές τύπου fusible link, η όπως αποκαλούνται ακριβώς στο πρόγραμμα temperature link sprinklers.

Μία άλλη παράμετρος του ακροφυσίου Sprinkler και γενικότερα του ψεκαστήρα είναι η μορφή του ψεκασμού (shape of spray). Στην εικόνα 18 φαίνονται οι 4 διαφορετικές αναπαραστάσεις του ψεκασμού του νερού. Οι δύο μορφές upright προσφέρουν πυροπροστασία και στο ταβάνι καθώς όπως φαίνεται οι γραμμές τους ακουμπάνε την πάνω επιφάνεια και την ψύχουν σε αντίθεση με τις άλλες δύο. Ωστόσο, ένα μειονέκτημα αυτών είναι ότι η σωλήνωση είναι τοποθετημένη κάτω από τις κεφαλές γεγονός που εμποδίζει τον άμεσο και γρήγορο ψεκασμό (spray cone). Το μειονέκτημα αυτό αποφεύγεται με τους standard pendant sprinklers των οποίων τα ακροφύσια εγκαθίστανται χαμηλότερα από την σωλήνωση. Οι pendant ψεκαστήρες μοιάζουν αρκετά με τον τύπου modern upright, όμως με την διαφορετική διάταξη σωλήνα-κεφαλής καθίσταται πιο αποτελεσματικός ο έλεγχος της φωτιάς. Η μορφή ψεκασμού Early suppression fast response (ESFR) είναι η πιο αποτελεσματική αφού ανταποκρίνονται στην θερμότητα γρηγορότερα από τους υπόλοιπους ενώ η παροχή νερού τους είναι μεγαλύτερη σε μικρότερη περιοχή. (Bourque & Svirsky, 2013)



Εικόνα 18: Sprinkler shape of spray (Bourque & Svirsky, 2013)

5 Υπολογιστικές προσομοιώσεις

Στο τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζεται το υπολογιστικό μέρος της παρούσας εργασίας και συγκεκριμένα όλες οι αριθμητικές προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στο πρόγραμμα Pyrosim (Thunderheadeng, 2020) μαζί με τα αποτελέσματα τους. Το αντικείμενο και ο στόχος των υπολογιστικών προσομοιώσεων της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη κατάσβεσης πυρκαγιάς σε κατάστρωμα φορτηγών (truck) RoPax πλοίου. Πιο συγκεκριμένα, η μελέτη απαρτίζεται από τον σχολιασμό και την σύγκριση διάφορων παραμέτρων του συστήματος κατάσβεσης σε συνδυασμό και με κάποιες αλλαγές της διαρρύθμισης του χώρου. Με λίγα λόγια εξετάζεται το πώς οι ψεκαστήρες και η λειτουργία τους μπορούν να επηρεάσουν την πορεία της πυρκαγιάς. Για την καλύτερη κατανόηση των διαδικασιών που εκτυλίχθηκαν, στην αρχή του παρόντος κεφαλαίου εισάγονται κάποιες πληροφορίες για το Pyrosim (Thunderheadeng, 2020) καθώς και για το λογισμικό **FDS (Fire Dynamic Simulator)** που λειτουργεί.

Στην συνέχεια, παρουσιάζεται το κατάστρωμα φορτηγών στο οποίο πραγματοποιήθηκαν όλες οι προσομοιώσεις με ακριβή ανάλυση της γεωμετρίας του, της διαρρύθμισης του χώρου και τους λόγους επιλογής τους καθώς επίσης και του πλέγματος (mesh). Έπειτα, περιγράφεται η μοντελοποίηση των φορτηγών μέσα στον χώρο του καταστρώματος με τις ακριβείς διαστάσεις τους καθώς και με την ανάλυση των θερμοδυναμικών παραμέτρων τους. Τέλος, παρουσιάζεται η επιλογή του συστήματος κατάσβεσης μαζί με τις παραμέτρους του, στοιχείο που αποτελεί και το μείζον ζήτημα της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Στο τέλος του κεφαλαίου παραθέτονται ξεχωριστά όλα τα σενάρια που εκτελέστηκαν, με τις διαφορετικές παραμέτρους που έχει το καθένα και καταγράφοντας όλα τα αποτελέσματα που εξήχθησαν. Τέλος, πραγματοποιείται εξέταση και σύγκριση μέσω των διαγραμμάτων ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας (HRR), θερμοκρασιών και των στιγμιότυπων από τα 2D slides των προσομοιώσεων ώστε να προκύψουν τα αντίστοιχα συμπεράσματα για τις διάφορες παραμέτρους που ελέγχονται.

5.1 FDS

Σύμφωνα με το “Fire Dynamics Simulator User’s Guide” (NIST, 2016), 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. (NIST, 2016)

5.2 PyroSim

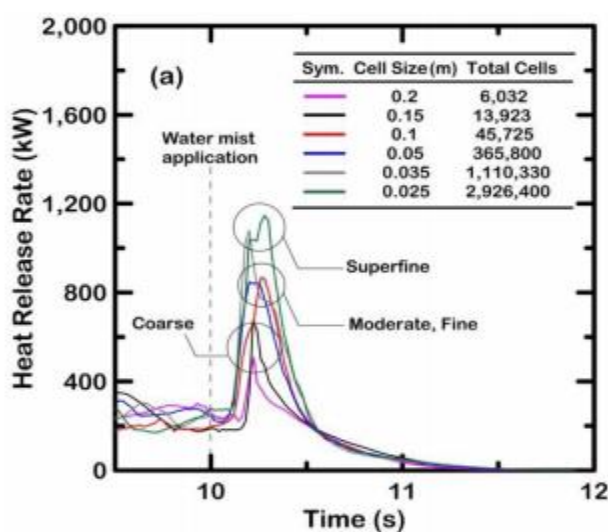
Σύμφωνα με το “PyroSim User Manual, (Thunderhead Engineering, 2020) το PyroSim είναι ένα λογισμικό που αναπτύχθηκε από την εταιρία Thunderhead Engineering Consultants, Inc., με σκοπό να διευκολύνει την προετοιμασία των αρχείων εισόδου για τις προσομοιώσεις που θα γίνουν από το FDS. Οι κύριες λειτουργίες 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 τρέχουσα 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. (Thunderhead Engineering, 2020)

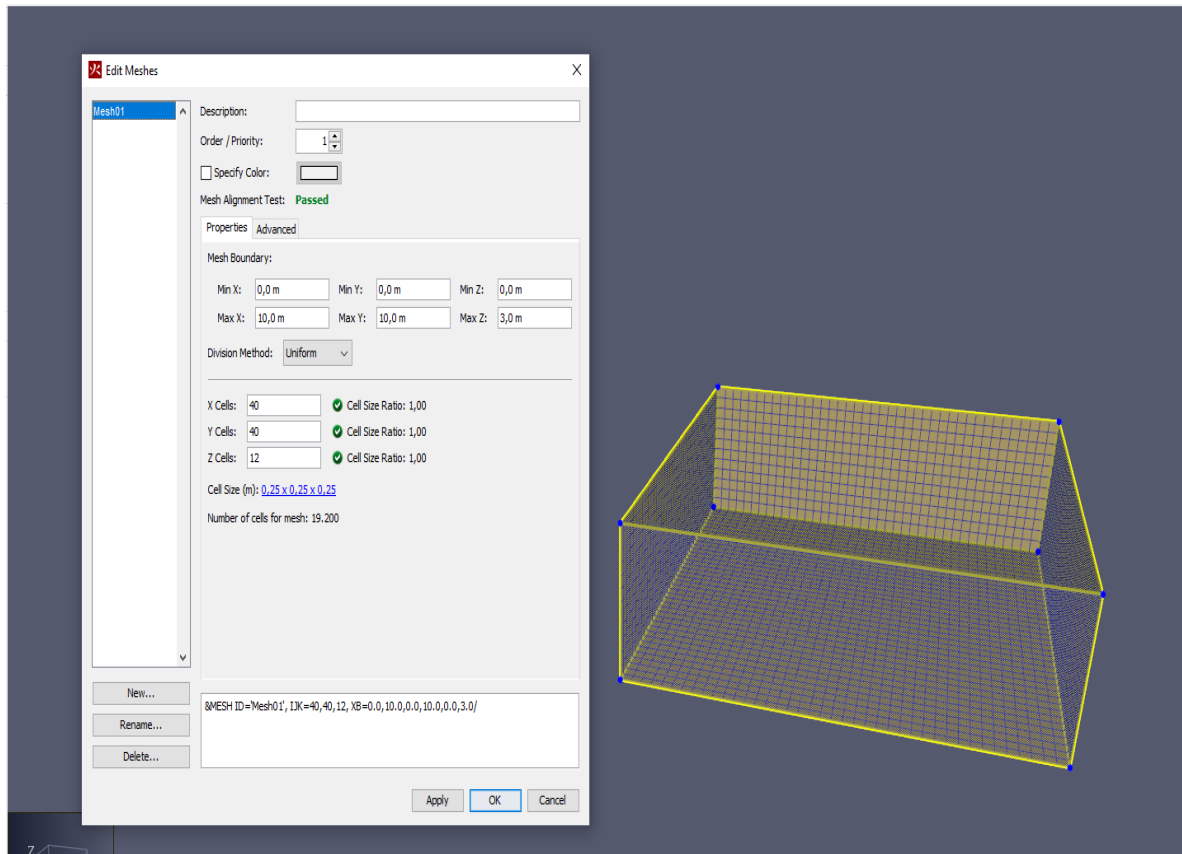
Πλέγμα (mesh)

Το πλέγμα (mesh ή grid) περικλείει όλο τον χώρο που λαμβάνουν χώρα οι προσομοιώσεις ενώ παράλληλα σε αυτό πραγματοποιούνται όλοι οι υπολογισμοί για το πρόγραμμα. Όλες οι κατασκευές και οι συσκευές πρέπει να εμπεριέχονται εντός των ορίων του πλέγματος και να συμμορφώνονται με αυτό, γιατί σε αντίθετη περίπτωση τα αντικείμενα αυτά δεν θα συμμετέχουν στους υπολογισμούς και κατ' επέκταση στα αποτελέσματα. Ένας σημαντικός παράγοντας στην ασφάλεια των αποτελεσμάτων αποτελεί το μέγεθος των κελιών (cells) του πλέγματος. Συγκεκριμένα, και σύμφωνα με την εικόνα 19 όσο πυκνότερο είναι το πλέγμα (δηλαδή μεγαλύτερος αριθμός κελιών με μικρότερο μέγεθος) τόσο πιο έγκυρα είναι τα αποτελέσματα.



Εικόνα 19: Επιρροή mesh size στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων (Lee, 2019)

Ωστόσο, είναι πολύ σημαντικό να συνυπολογιστεί και η δυσκολία εξαγωγής των αποτελεσμάτων καθώς όσο πυκνότερο είναι το mesh τόσο μεγαλύτερος είναι και ο υπολογιστικός χρόνος για την υλοποίηση των προσομοιώσεων. Στην εικόνα 20 φαίνεται το σχήμα ενός τυχαίου πλέγματος καθώς και ο τρόπος δημιουργίας του (επιλογή κελιών, διαστάσεων κλπ.) μέσα στο PyroSim.



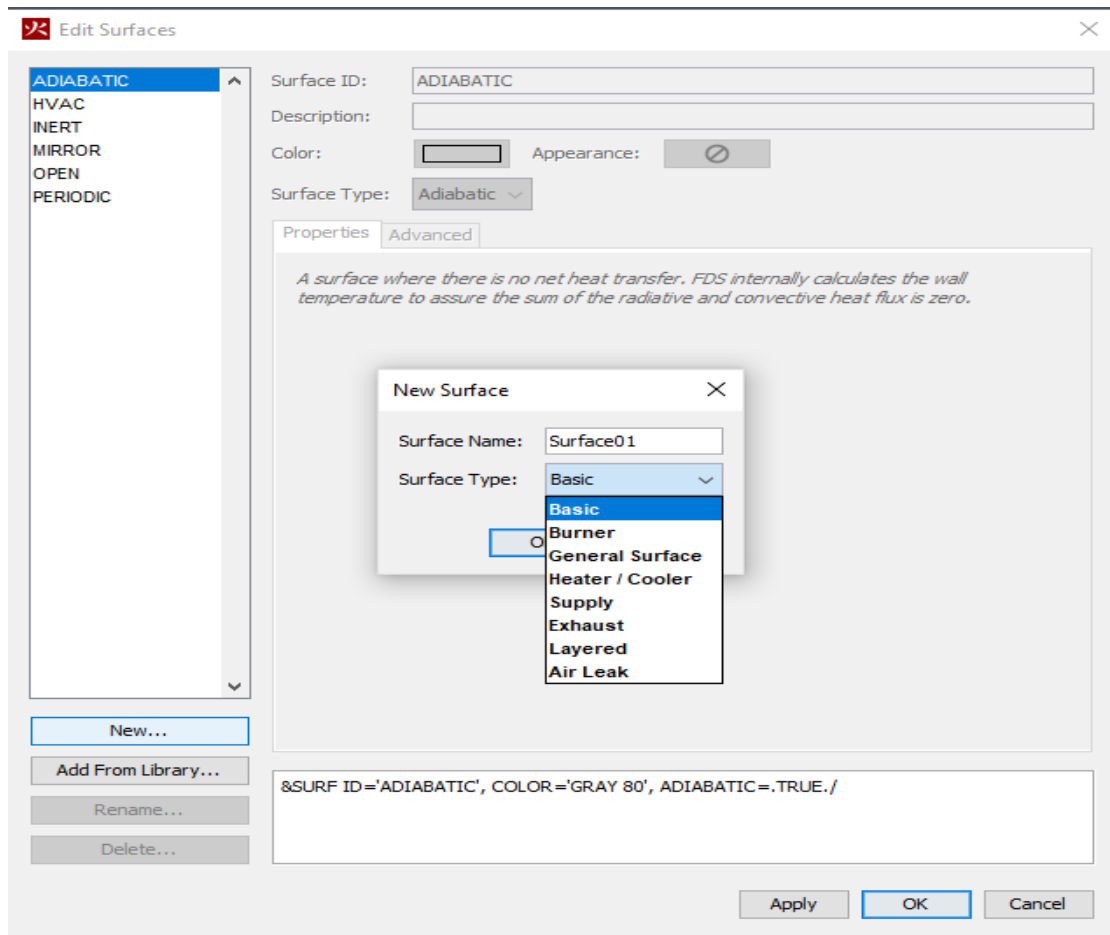
Εικόνα 20: Δημιουργία ενός τυχαίου πλέγματος στο PyroSim

Υλικά (materials)

Κάθε επιφάνεια μπορεί να ορίζεται από ένα υλικό το οποίο προσδίδει σε αυτήν συγκεκριμένες θερμικές ιδιότητες. Από το PyroSim παρέχεται μία βιβλιοθήκη με διάφορα υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις προσομοιώσεις, ενώ παράλληλα δίνεται και η δυνατότητα δημιουργίας νέων υλικών με διαφορετικές ιδιότητες.

Επιφάνειες (surfaces)

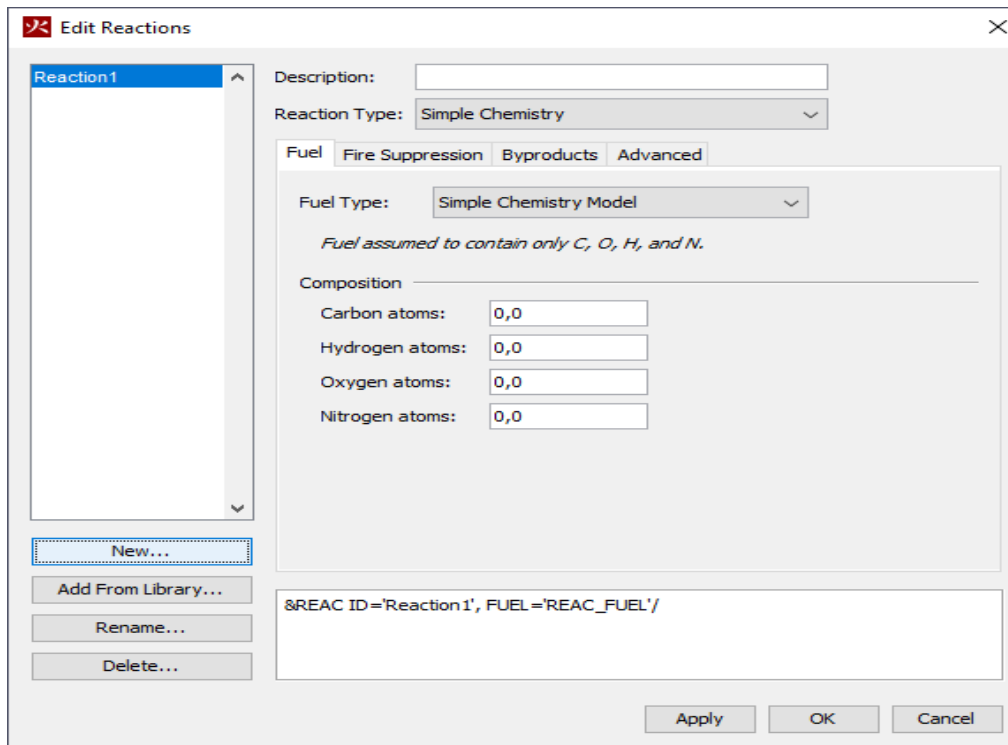
Οι επιφάνειες αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα εργαλεία του προγράμματος, ιδιαίτερα για την μελέτη πυρασφάλειας, και η επιλογή τους πρέπει να είναι πολύ προσεκτική. Αρχικά, ορίζουν τις ιδιότητες των αντικειμένων και των αεραγωγών και γενικότερα προσδιορίζουν την πορεία της πυρκαγιάς. Μπορούν να οριστούν είτε ως burner με καθορισμένο ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας ανά τετραγωνικό μέτρο (Heat Release Rate per Unit Area) ή ως layered surface με συγκεκριμένη σύνθεση στρώσεων υλικών και θερμοκρασία ανάφλεξης ή ακόμα και ως supply surface για εισαγωγή αέρα από αεραγωγό με καθορισμένη ταχύτητα. Από το PyroSim παρέχονται κάποιες επιφάνειες με default ιδιότητες, ωστόσο και πάλι δίνεται η δυνατότητα δημιουργίας καινούριων προσδίδοντας διαφορετικά χαρακτηριστικά. (Εικόνα 21)



Εικόνα 21: Δημιουργία επιφανειών στο PyroSim

Αντίδραση (Reaction)

Η αντίδραση είναι ακόμα ένα απαραίτητο εργαλείο του προγράμματος που χωρίς τον ορισμό της δεν υφίσταται πυρκαγιά. Ουσιαστικά ο ορισμός της συντελείται με την σύνθεση της χημικής αντίδρασης της καύσης η οποία είτε μπορεί να επιλεγθεί αμέσως από την βιβλιοθήκη του PyroSim ή να δημιουργηθεί καινούρια από τον χρήστη όπως φαίνεται στην Εικόνα 22.



Εικόνα 22: Δημιουργία Χημικής αντίδρασης στο PyroSim

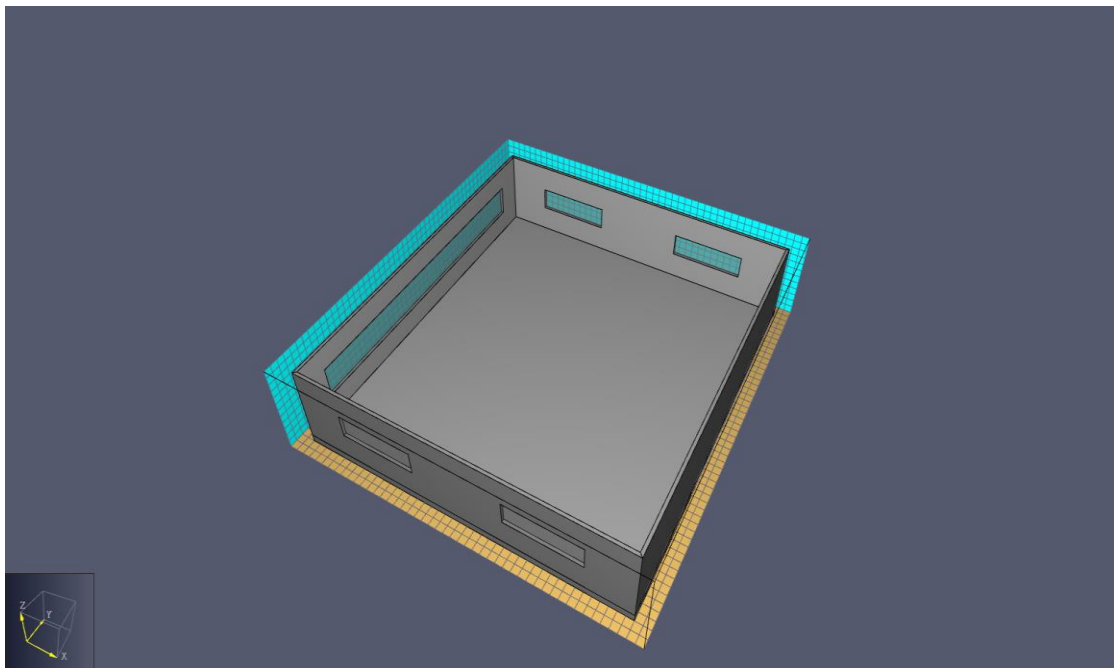
Συσκευές (devices)

Για την καταμέτρηση ποσοτήτων και την εύρεση αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων χρησιμοποιούνται συσκευές όπως θερμοζεύγη, ψεκαστήρες κλπ. Η λειτουργία αυτών των συσκευών είναι πολύ σημαντική καθώς τα αποτελέσματά τους καθορίζουν τις χρονικές ιστορίες των προσομοιώσεων. Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στην ενεργοποίηση και γενικότερα στις παραμέτρους των ψεκαστήρων (sprinklers) αφού αποτελούν το κύριο θέμα της παρούσας εργασίας.

5.3 Χαρακτηριστικά μοντέλου προσομοιώσεων

5.3.1 Κατάστρωμα προσομοιώσεων

Όσον αφορά τα μεγέθη του χώρου, ένα τυπικό κατάστρωμα οχημάτων πλοίου Ro-Ro θα ήταν κατασκευασμένο με διαστάσεις 150 m μήκος x 24 m πλάτος x 5 m ύψος. Ωστόσο, επειδή ο υπολογιστικός χρόνος για την έκδοση αποτελεσμάτων σε τέτοια μεγέθη είναι πολύ μεγάλος, επιλέχθηκε αρχικά η κατασκευή ενός μέρους του καταστρώματος για την διαδικασία των προσομοιώσεων, με διαστάσεις 60 m μήκος x 24 m πλάτος x 5 m ύψος. Μετά από δοκιμές σεναρίων σε αυτό βρέθηκε ότι και πάλι ο απαιτούμενος υπολογιστικός χρόνος δεν είναι ο επιθυμητός. Το πρόβλημα αυτό με τον χρόνο γεννάται από το γεγονός ότι με την ενεργοποίηση των ψεκαστήρων (sprinklers), το πρόγραμμα (FDS) καλείται να διαβάσει και να τρέξει υπολογισμούς με όλη την παροχή νερού ώστε να δώσει τα αντίστοιχα θερμοδυναμικά αποτελέσματα της επιρροής τους. Έτσι, για μία αρχική διερεύνηση της επίδρασης των sprinkler στο πλαίσιο μίας διπλωματικής εργασίας σχεδιάστηκε σαν τελικό μοντέλο για τις προσομοιώσεις, το κατάστρωμα της εικόνας 23, του οποίου οι διαστάσεις είναι 22 m μήκος x 24 m πλάτος x 5 m ύψος. Οι γαλάζιες επιφάνειες που διακρίνονται στο κατάστρωμα είναι τα όρια του πλέγματος (mesh boundaries) και το χρώμα τους αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ορίζονται ως ανοιχτές επιφάνειες (open surfaces) ώστε να είναι δυνατή η εισροή οξυγόνου στον χώρο.

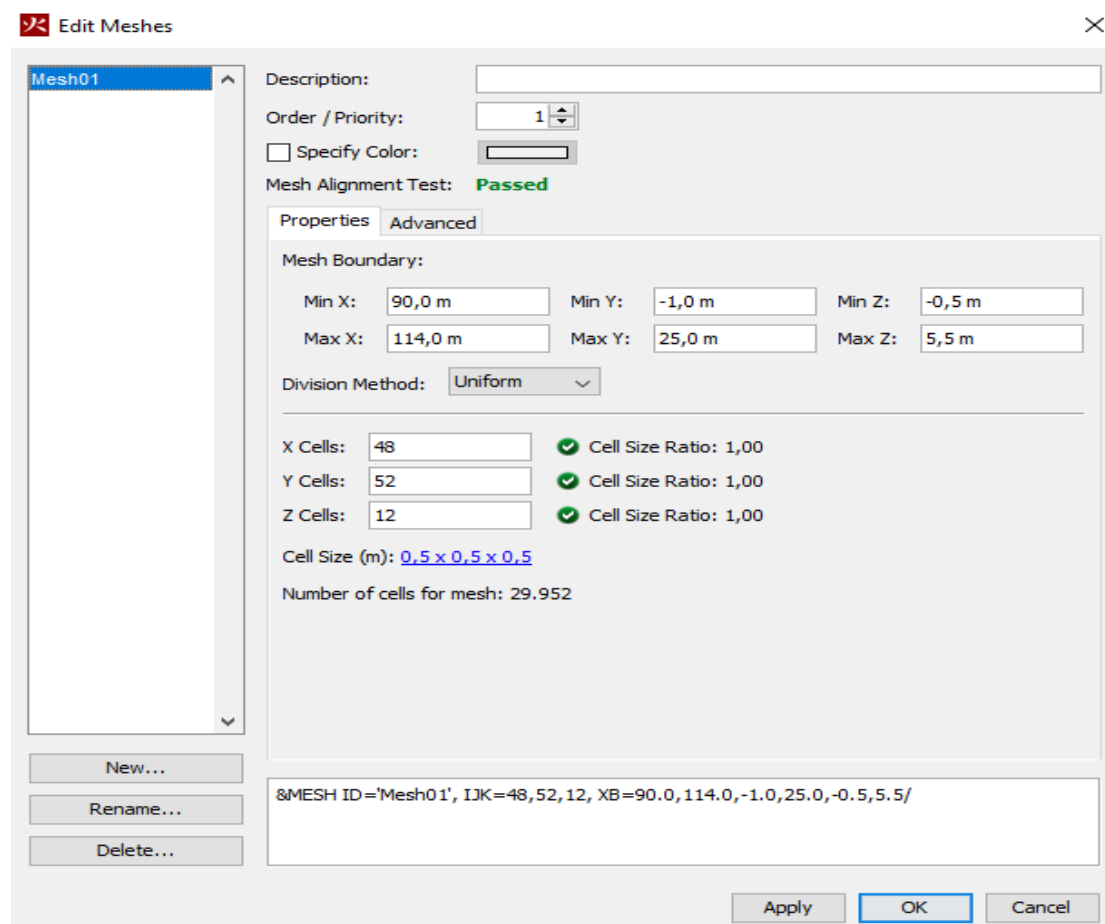


Εικόνα 23: Μοντέλο καταστρώματος για τις προσομοιώσεις

Όπως έχει ήδη αναλυθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, η σχεδίαση των χώρων Ro-Ro χωρίζονται σε 3 κατηγορίες. Για τις προσομοιώσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας σχεδιάστηκε και χρησιμοποιήθηκε ανοιχτό κατάστρωμα πλήρως κλειστό από πάνω με πρυμναίο και πλάγια ανοίγματα (Open Ro-Ro decks with aft and side openings) (Εικόνα 23). Όπως έχει αναφερθεί και στο κεφάλαιο 2, η συγκεκριμένη κατηγορία διαρρύθμισης χώρου παρουσιάζει την μεγαλύτερη επικινδυνότητα σε περίπτωση ανάπτυξης πυρκαγιάς και για αυτό επιλέγεται να συνθέσει το μοντέλο που θα λάβουν χώρα οι προσομοιώσεις. Οι ακριβείς διαστάσεις των ανοιγμάτων είναι 5 m μήκος και 1.5 m ύψος για τα πλάγια και 20 m μήκος και 2 m ύψος για το πρυμναίο, ενώ ο ρόλος τους είναι να παρέχουν τις συνθήκες αερισμού (ventilation conditions) μέσα στον χώρο.

5.3.2 Επιλογή κατάλληλου πλέγματος

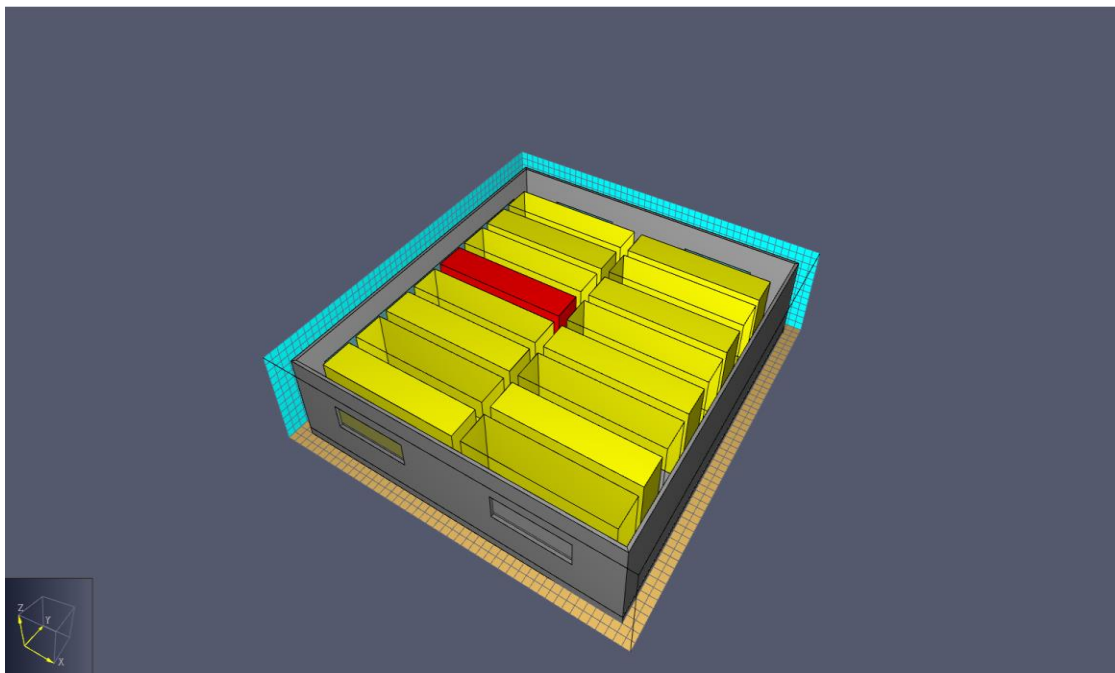
Για τις προσομοιώσεις που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία, επιλέχθηκε ομοιόμορφο πλέγμα που να καλύπτει όλο τον χώρο του καταστρώματος που δημιουργήθηκε αλλά και να επεκτείνεται πέρα από αυτό (Εικόνα 24) ώστε να είναι εφικτή και η μελέτη της πορείας του καπνού και του οξυγόνου έξω από τα ανοίγματα. Για τον καλύτερο συνδυασμό ακρίβειας αποτελεσμάτων και υπολογιστικού χρόνου, επιλέχθηκε το μέγεθος του κάθε κελιού να είναι 0.5 m και στους 3 άξονες και συνολικά 29952 κελιά να συνθέτουν ολόκληρο τον χώρο των προσομοιώσεων.



Εικόνα 24: Επιλογή πλέγματος για τις προσομοιώσεις στο PyroSim

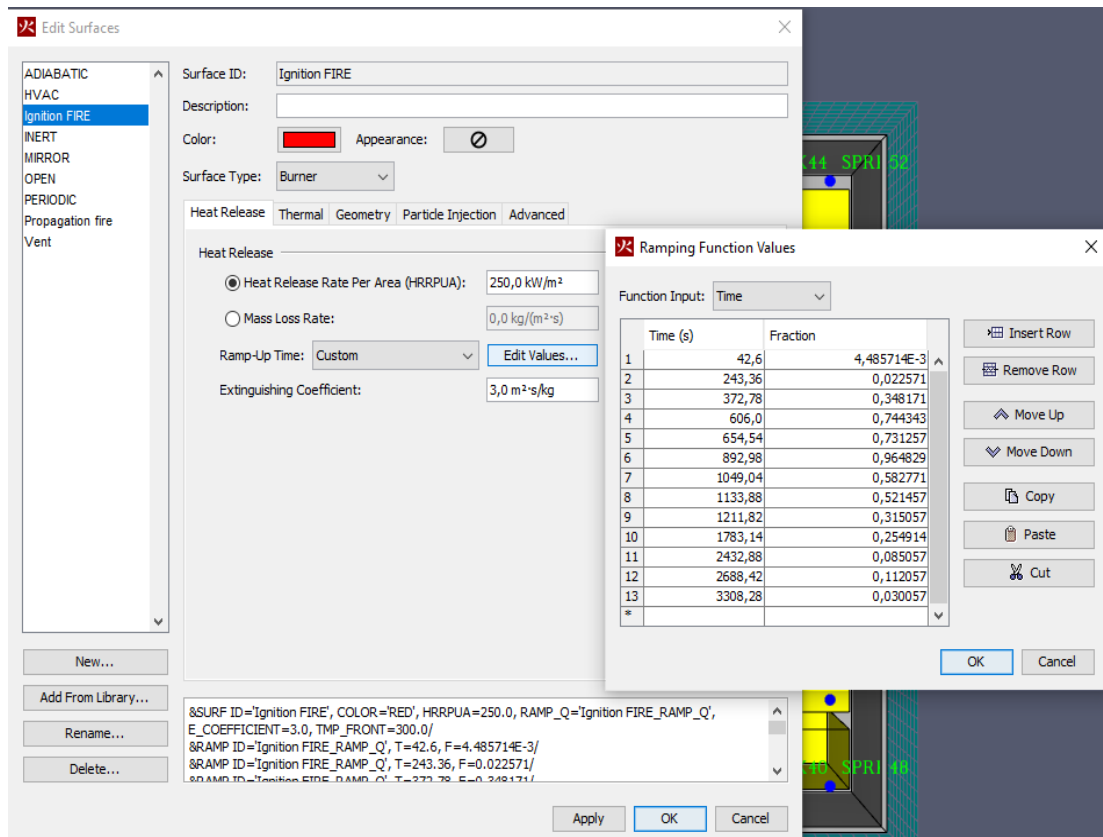
5.3.3 Χαρακτηριστικά φορτηγών (trucks)

Στον χώρο που περιγράφηκε παραπάνω θα τοποθετηθούν φορτηγά (trucks) με διάφορες διατάξεις και χαρακτηριστικά, ώστε να μελετηθούν οι συμπεριφορές τους σε προσομοιώσεις πυρασφάλειας. Αρχικά, πρέπει να σημειωθεί ότι τα φορτηγά αυτά κατασκευάστηκαν σαν ορθογώνια παραλληλεπίπεδα κουτιά αφού η σχεδίαση με την αναλυτική τους γεωμετρία θα κόστιζε αρκετά στον υπολογιστικό χρόνο. Σύμφωνα με δοκιμές σε πειράματα (Arvidson, 2009; Pagonis & Themelis, 2020), οι μέγιστες διαστάσεις ενός φορτηγού (freight truck) στην Ευρώπη είναι 18.75 m μήκος, 2.55 m πλάτος και 4.5 m ύψος. Τηρώντας τα όρια αυτά, οι διαστάσεις των φορτηγών που επιλέχθηκαν είναι 9.6 x 2.1 x 4.2 m. Στην εικόνα 25, φαίνεται ο χώρος του καταστρώματος πληρωμένος με όλα τα φορτηγά που μπορούν να χωρέσουν (σύνολο 16) τα οποία σχεδιάστηκαν με αποστάσεις μεταξύ τους ίσες με 0.6 m τόσο εγκάρσια όσο και διαμήκη.

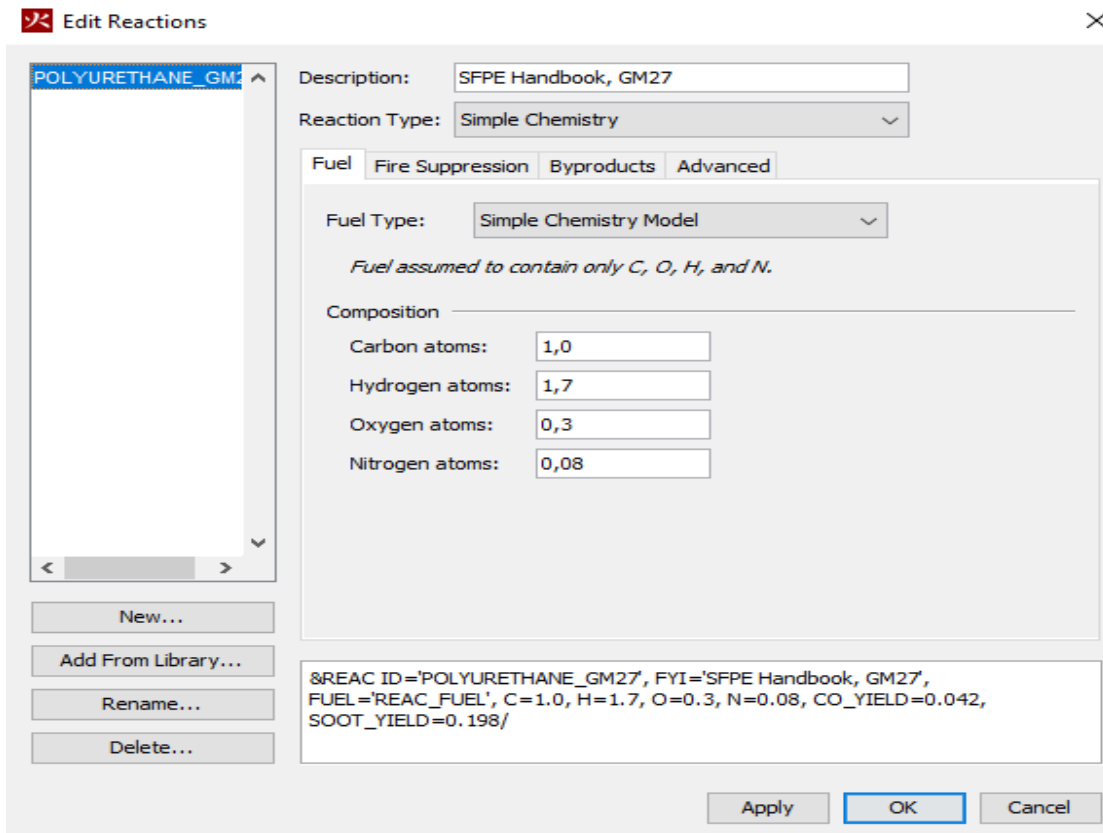


Εικόνα 25: Μοντέλο καταστρώματος για τις προσομοιώσεις πλήρως γεμάτο με φορτηγά

Τα φορτηγά αυτά χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Σε αυτό με το κόκκινο χρώμα που πρόκειται για την εστία της πυρκαγιάς (fire ignition truck), στο οποίο οι επιφάνειες του ορίστηκαν ως burner με τα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες που φαίνονται στην εικόνα 26. Ωστόσο όπως έχει ήδη αναφερθεί, χωρίς τον ορισμό της χημικής αντίδρασης καύσης δεν υφίσταται πυρκαγιά. Στα πλαίσια αυτού του γεγονότος επιλέχθηκε από την βιβλιοθήκη του Pyrosim η **POLYURETHANE_GM27** και ορίστηκε ως αντίδραση καύσης των προσομοιώσεων ενώ η ακριβής σύνθεση της φαίνεται στην εικόνα 27.

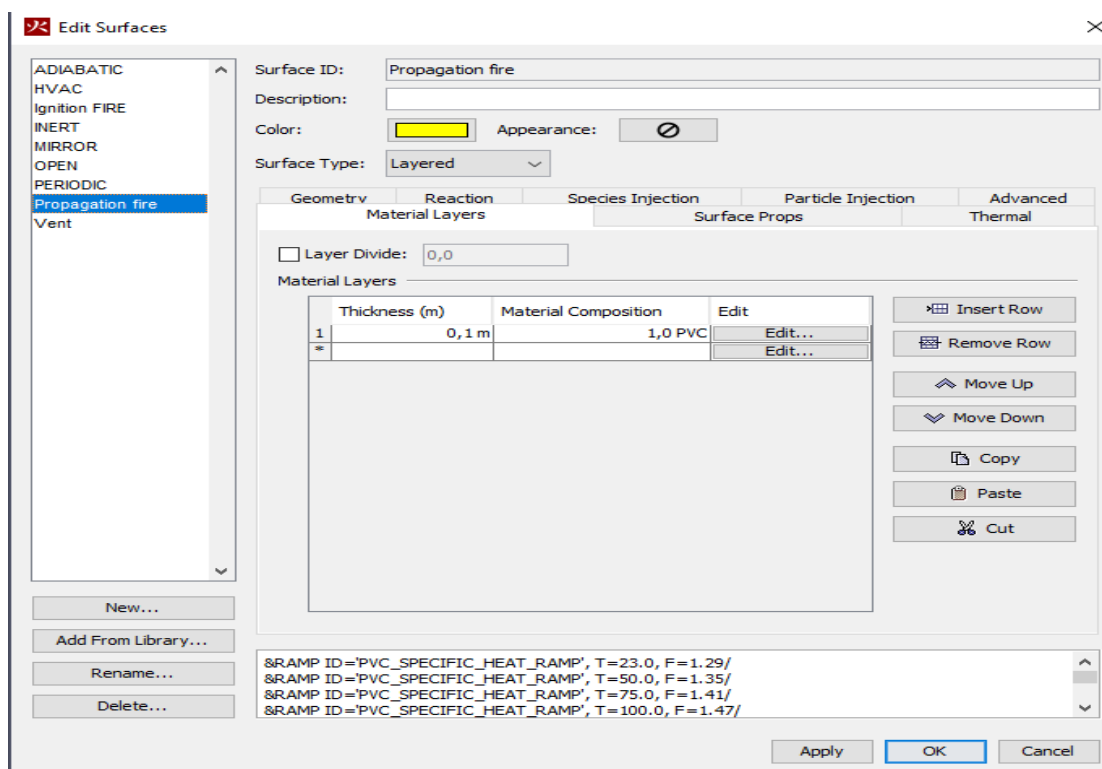


Εικόνα 26: Επιλογή HRRPUA και ramp-up value για τις προσομοιώσεις στο PyroSim

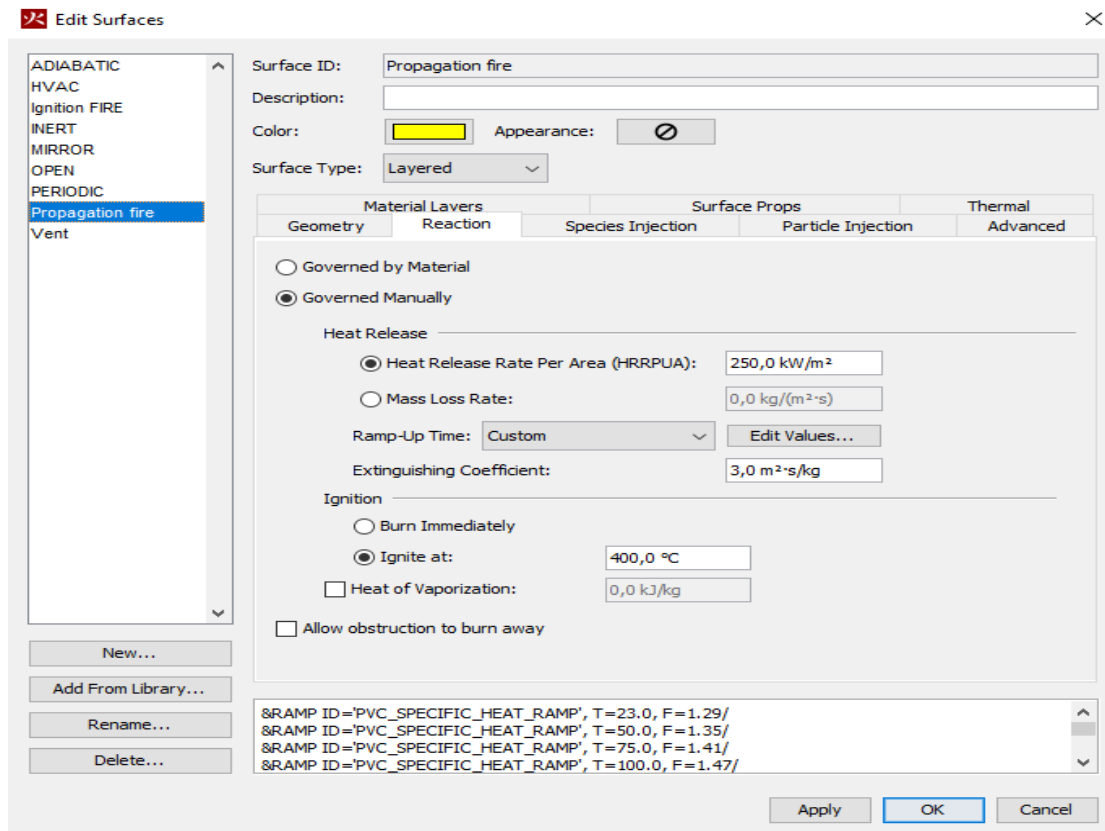


Εικόνα 27: Σύνθεση χημικής αντίδρασης της καύσης για τις προσομοιώσεις στο PyroSim

Στην 2^η κατηγορία κατατάσσονται όλα τα υπόλοιπα φορητά τα οποία αναφλέγονται από την θερμότητα που εκπέμπεται από το φορητό-πηγή μόλις πιάσουν την θερμοκρασία ανάφλεξης. Για την κατασκευή τους ορίστηκαν ως layered επιφάνειες ενώ ως υλικό για την σύνθεση τους χρησιμοποιήθηκε το πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC) όπως φαίνεται στην εικόνα 28. Το υλικό αυτό είναι ένα συνθετικό πλαστικό πολυμερές το οποίο χρησιμοποιείται συχνά στα καλύμματα φορητών αφού αποτελεί το βασικό συστατικό για την κατασκευή της δερματίνης. Παράλληλα, δεν θεωρείται εύφλεκτο και η θερμοκρασία ανάφλεξης του είναι κοντά στους 400°C (Εικόνα 29). Τέλος, όλα τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά και διαστάσεις αυτής της κατηγορίας παραμένουν ίδια με την προηγούμενη.

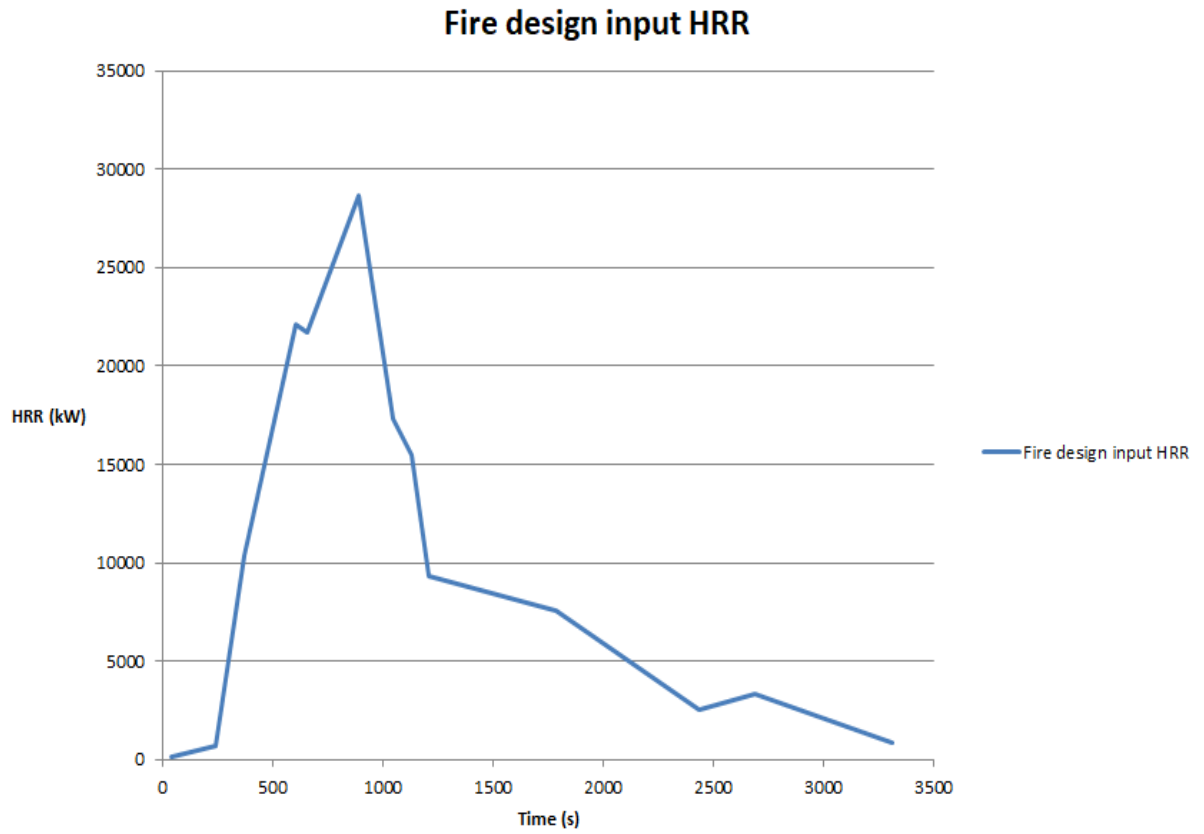


Εικόνα 28: Ορισμός επιφανειών των υπόλοιπων φορητών ως layered και η αντίστοιχη σύνθεση τους στο PyroSim



Εικόνα 29: Χαρακτηριστικά layered surfaces

Έπειτα από μελέτη διαφόρων project (Frid & Palm, 2010; Larsson, Ingason, & Arvidson, 2002; Arvidson, 2009), που αφορούν προσομοιώσεις πυρκαγιάς ενός φορτηγού σε κατάστρωμα ro-ro, βρέθηκε ότι η μέγιστη θερμότητα που μπορεί να απελευθερωθεί κυμαίνεται από 15-130 MW και η τιμή της εξαρτάται από την παροχή οξυγόνου (ventilation conditions) και το φορτίο του φορτηγού (δηλαδή το υλικό της εστίας της φωτιάς). Για την παρούσα εργασία επιλέχθηκε η τιμή των 30 MW περίπου σαν μέγιστη ισχύς. Έτσι για την συνολική επιφάνεια των 118.44 m² του φορτηγού δόθηκε η τιμή 250 kW/m² στο HRRPUA (Εικόνα 26) ώστε να καλύψει την προαναφερθείσα απαίτηση ($250 \cdot 118.44 = 29610 \text{ kW}$). Όσον αφορά την χρονική ιστορία του HRR, δόθηκαν οι τιμές ως custom και είναι αυτές που φαίνονται στην εικόνα 26 στο παράθυρο Ramping Function Values για διάρκεια μίας ώρας πυρκαγιάς (3500 s), όπως αντλήθηκαν από διπλωματική εργασία (Pagonis & Themelis, 2020). Τα χαρακτηριστικά αυτά συνθέτουν την δοκιμή πυρκαγιάς σχεδίασης (fire design), τα οποία θα χρησιμοποιηθούν ως input στο πρόγραμμα pyrosim και αποτελούν το εργαλείο για την εξαγωγή των επιθυμητών αποτελεσμάτων για το κάθε σενάριο που θα δοκιμαστεί. Τέλος, στην εικόνα 30 φαίνεται το διάγραμμα της χρονικής ιστορίας του ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας ενός φορτηγού για την πρότυπη δοκιμή πυρκαγιάς που αναφέρθηκε παραπάνω.

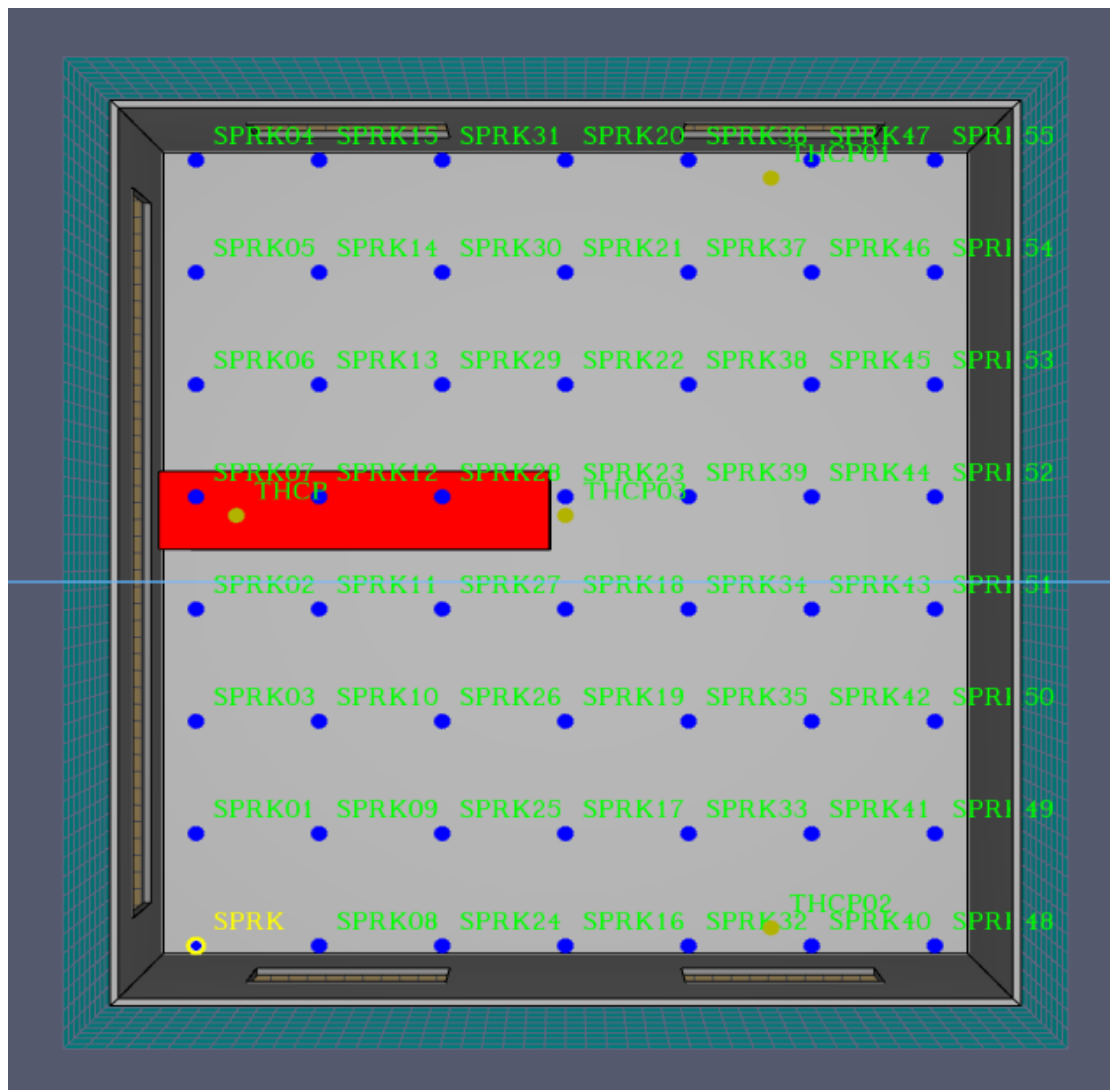


Εικόνα 30: Πυρκαγιά σχεδίασης που προκύπτει από τις custom τιμές του HRR στο παράθυρο Ramping Function Values

5.3.4 Χαρακτηριστικά συστήματος κατάσβεσης πυρκαγιάς (fire extinguishing system)

Η εξέταση της επάρκειας του συστήματος πυρόσβεσης αποτελεί το κύριο αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Για τον λόγο αυτό, η περιγραφή και ανάλυση των παραμέτρων και χαρακτηριστικών που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις καθίσταται απαραίτητη.

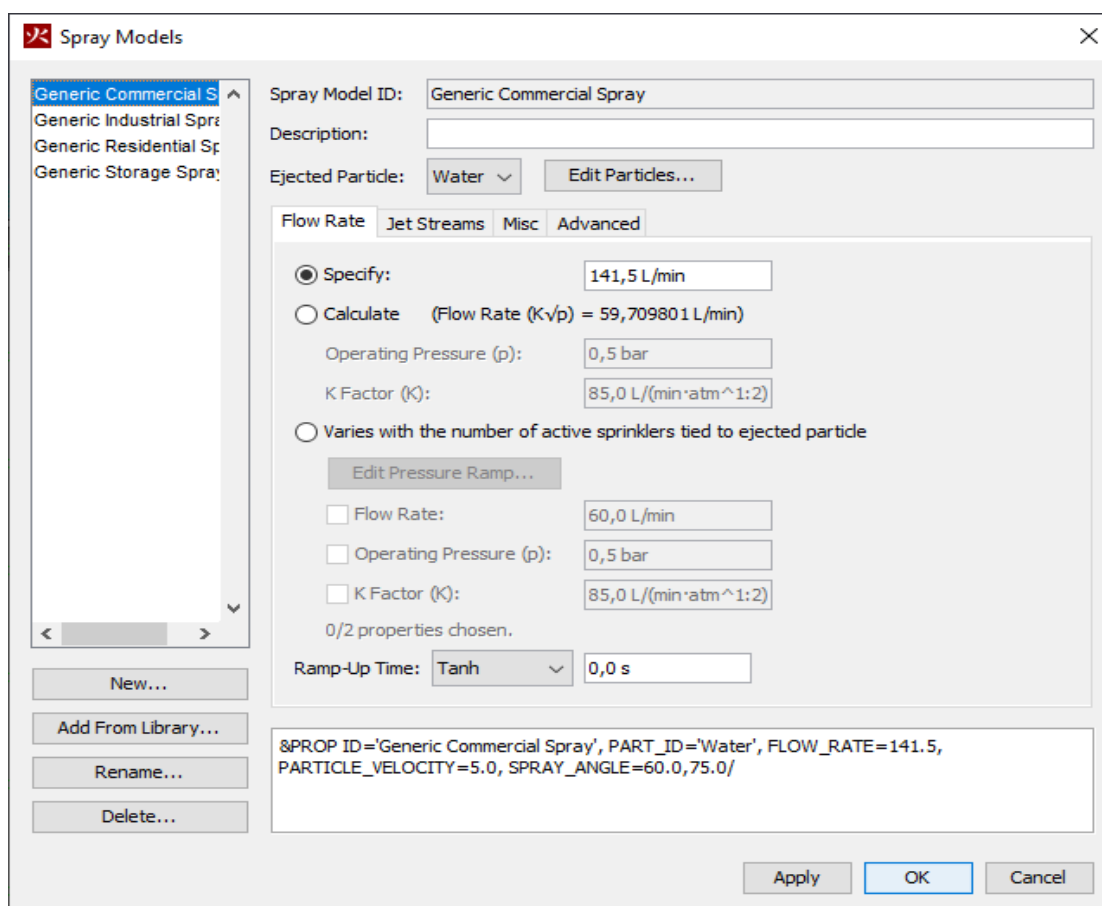
Αρχικά, για όλα τα σενάρια που εξετάστηκαν στην συνέχεια, επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν είτε το σύστημα αυτόματων ψεκαστήρων (automatic sprinklers) ή το σύστημα ολικού κατακλυσμού νερού (deluge) δηλαδή η 2^η κατηγορία του 3^{ου} κεφαλαίου. Ο λόγος για την επιλογή αυτή είναι η γρήγορη ανταπόκριση και ενεργοποίηση που παρέχεται από τα συστήματα αυτής της κατηγορίας έναντι της αναπτυσσόμενης φωτιάς. Για την ομαλή λειτουργία καθώς και πλήρη κάλυψη όλου του εξεταζόμενου χώρου, πολύ σημαντικό ζήτημα είναι η σωστή διάταξη των ψεκαστήρων.



Εικόνα 31: Διάταξη ψεκαστήρων στον χώρο προσομοίωσης

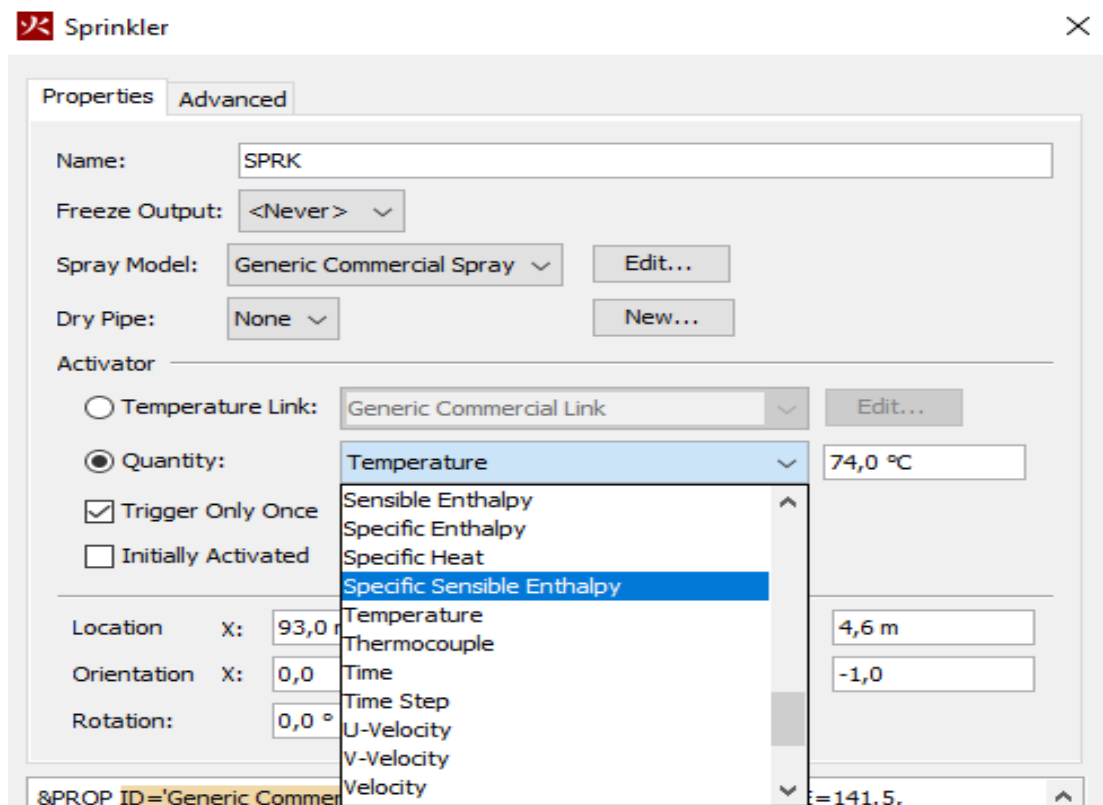
Όπως φαίνεται και από την εικόνα 31, οι ψεκαστήρες πρέπει να τοποθετούνται μέσα στον χώρο με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορούν να καλύπτουν όλα τα οχήματα που βρίσκονται στο κατάστρωμα καθώς και να εξασφαλίζεται ότι δεν εκτίθενται σε πιθανή ζημιά από το νερό. Επίσης, από κανονισμούς SOLAS (IMO, 2018), η οριζόντια απόσταση μεταξύ δύο ψεκαστήρων δεν πρέπει να ξεπερνάει τα 3.2 m. Έτσι συνυπολογίζοντας όλες τις παραπάνω απαιτήσεις, όλοι οι ψεκαστήρες (συνολικά 56) τοποθετήθηκαν σε απόσταση 3 μέτρων μεταξύ τους και σε ύψος 4.6 m από το δάπεδο.

Μία πολύ σημαντική παράμετρος για την καταστολή της φωτιάς είναι το νερό των ψεκαστήρων, που αποτελεί το κατασβεστικό μέσο, και ο ρυθμός ροής (flow rate) του πάνω στις επιφάνειες. Πιο συγκεκριμένα, από SOLAS (κεφάλαιο 3.2, Πίνακας 2) η ελάχιστη απαιτούμενη ποσότητα παροχής νερού (water discharge density) για κατάστρωμα με ύψος 5 m είναι 15 mm/min. Υπολογίζοντας ότι η περιοχή κάλυψης για το κατάστρωμα των προσομοιώσεων είναι 528 m², η τελική συνολική ποσότητα παροχής νερού εκτιμάται ίση με 7920 l/min από την οποία διαιρούμενη με τον συνολικό αριθμό των ψεκαστήρων προκύπτει η παροχή του κάθε ψεκαστήρα ξεχωριστά και ισούται με 141.5 l/min (Εικόνα 32).



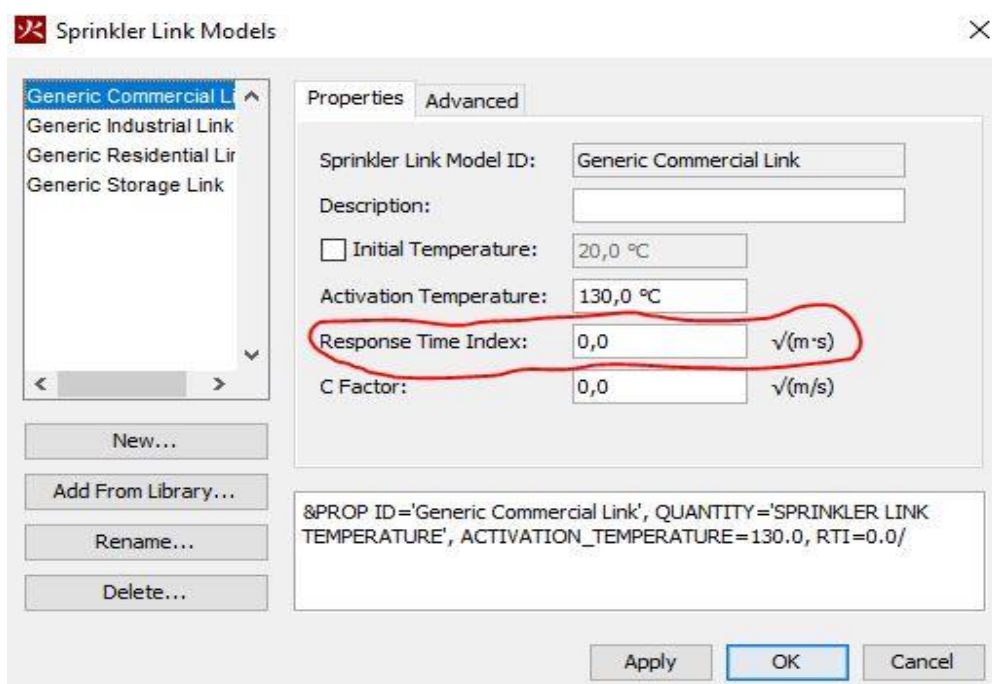
Εικόνα 32: Επιλογή παροχής νερού sprinklers στο PyroSim

Ένα άλλο βασικό ζήτημα του συστήματος κατάσβεσης αυτόματων ψεκαστήρων είναι ο τρόπος ενεργοποίησης τους από την εκκίνηση της πυρκαγιάς. Γενικότερα, οι ψεκαστήρες χαρακτηρίζονται ως heat-activated καθώς ενεργοποιούνται μέσω της θερμότητας των θερμών αερίων. Οι δύο παράμετροι που συνθέτουν αυτό το ζήτημα είναι η **θερμοκρασία ενεργοποίησης (activation temperature)** και το **RTI (Response Time Index)**. Για την πρώτη παράμετρο όπως έχει ήδη αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, ισχύει ότι όταν η θερμοκρασία στον αισθητήρα του ψεκαστήρα φτάσει την απαιτούμενη θερμοκρασία (αυτή που του έχει οριστεί) μέσω της θερμότητας των θερμών αερίων, τότε αυτός ανοίγει αυτόματα (sprinkler temperature link). Τα περισσότερα σενάρια που εκτελέστηκαν στην παρούσα εργασία ακολούθησαν αυτόν τον τρόπο και η θερμοκρασία ενεργοποίησης επιλέχθηκε να είναι οι 130 °C. Η επιλογή της τιμής αυτής έρχεται ως απόρροια των κανονισμών (IMO, 2018) όπου αναφέρεται ότι για κατάστρωμα με ύψος πάνω από 2.5 m η ενδεδειγμένη θερμοκρασία λειτουργίας πρέπει να κυμαίνεται στο εύρος 121-149 °C (Κεφάλαιο 3.2). Ωστόσο, πέρα από την θερμοκρασία, το Pyrosim παρέχει και άλλες ποσότητες που χρησιμοποιούνται σαν απαίτηση για την έναρξη λειτουργίας των ψεκαστήρων, όπως φαίνεται στην εικόνα 33. Στην παρούσα διπλωματική εξετάστηκαν και παραδείγματα προσομοιώσεων με διαφορετικό στοιχείο σαν κριτήριο ενεργοποίησης, οι οποίες θα παρουσιαστούν στην συνέχεια.



Εικόνα 33: Επιλογή activator των ψεκαστήρων στο PyroSim

Η 2^η παράμετρος για την έναρξη λειτουργίας του ψεκασμού του νερού είναι το RTI (Response Time Index) και πρόκειται για ένα δείκτη που παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στο πόσο γρήγορη ανταπόκριση εμφανίζουν οι ψεκαστές έναντι της πυρκαγιάς. Πιο συγκεκριμένα, ο δείκτης αυτός καθορίζει την θερμική απόκριση (thermal responsiveness) της κεφαλής του ψεκαστήρα (sprinkler head) και υπολογίζει ουσιαστικά τον χρόνο που απαιτείται για να ενεργοποιηθεί ο ψεκαστήρας, από την στιγμή που οι θερμοκρασίες γύρω από την κεφαλή ξεπεράσουν την θερμοκρασία ενεργοποίησης. Οι τιμές που δίνονται σε αυτόν τον συντελεστή είναι εμπειρικές και αντλούνται από πειραματικά δεδομένα παλαιότερων δοκιμών ενώ η μονάδα μέτρησης του είναι το $1 \sqrt{(m \cdot s)}$. Το συγκεκριμένο μέγεθος κατέχει μεγάλη σημασία για την μελέτη του συστήματος κατάσβεσης (ιδίως σε λογισμικό FDS) και για αυτό αποτελεί βασικό αντικείμενο σύγκρισης για τις προσομοιώσεις που θα εξεταστούν στην συνέχεια (Εικόνα 34). (Miikka, 2017)

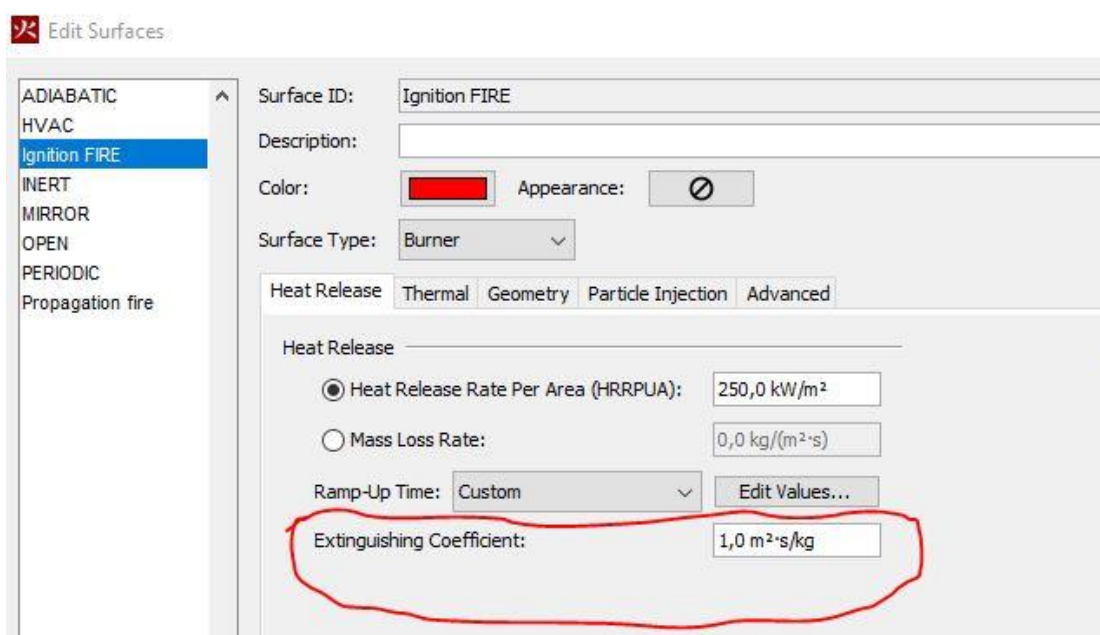


Εικόνα 34: Φόρμα επιλογής τιμής του RTI στο PyroSim

Οι τιμές που επιλέχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν στις υπολογιστικές προσομοιώσεις στην συνέχεια βασίστηκαν σε τυπικές τιμές RTI που αντλήθηκαν από δοκιμές σε πειράματα. Οι τιμές αυτές είναι τα 35 και $110 \sqrt{(m \cdot s)}$, με την μικρότερη τιμή, να δηλώνει ψεκαστήρα γρήγορης απόκρισης (fast response sprinkler) ενώ την μεγαλύτερη να δηλώνει ψεκαστήρα κανονικής απόκρισης (standard response sprinkler). (Frid & Palm, 2010) Με λίγα λόγια, όσο μικρή η τιμή τόσο πιο γρήγορη η ανταπόκριση στην ανάπτυξη της φωτιάς. Αυτές οι τιμές είναι και αυτές που δοκιμάζονται στις προσομοιώσεις του κεφαλαίου 5.4.

Το νερό μειώνει τον ρυθμό πυρόλυσης του καυσίμου μέσω της ψύξης της επιφάνειας του καυσίμου καθώς και προκαλώντας αλλαγές στις χημικές αντιδράσεις που απελευθερώνουν αέρια καύσιμα από το στερεό. Θεωρείται ότι η εκτόξευση του νερού πάνω στην επιφάνεια του καυσίμου απομακρύνει ενέργεια από την διαδικασία πυρόλυσης και κατά συνέπεια μειώνει τον ρυθμό καύσης του. Όταν το καύσιμο (δηλαδή η πηγή της φωτιάς), κατά την

πραγματοποίηση προσομοιώσεων στο FDS, ορίζεται μέσω επιφανειών layered που έχουν καθορισμένη σύνθεση υλικών (material composition) και ο ρυθμός καύσης (HRR) του εξαρτάται από αυτήν, τότε δεν χρειάζεται να οριστεί κάποια πρόσθετη παράμετρος κατάσβεσης. Όμως όταν οι επιφάνειες της πηγής ορίζονται ως burner με συγκεκριμένο HRRPUA, όπως συμβαίνει στις προσομοιώσεις της παρούσας εργασίας, τότε η προσομοιωμένη πυρκαγιά ενεργεί σαν φωτιά αερίου (gas burner) με καθορισμένη πορεία του HRR. Για τον λόγο αυτό χρειάζεται να οριστεί μία παράμετρος που να ελέγχει την καταστολή της φωτιάς από το νερό κατά την χρήση του FDS. Αυτή η παράμετρος είναι πολύ μεγάλης σημασίας και ονομάζεται **συντελεστής κατάσβεσης (extinguish coefficient)**, με την απόδοση τιμής του στο PyroSim να γίνεται μέσα από τα χαρακτηριστικά της κατηγορίας επιφάνειας burner (Εικόνα 35). (NIST, 2016) Στα πλαίσια της παρούσας εργασία η συγκεκριμένη παράμετρος θα αναφέρεται εν συντομία και ως e_coef.



Εικόνα 35: Επιλογή extinguish coefficient στο PyroSim

Για την καλύτερη κατανόηση αυτής της παραμέτρου και της σημασίας της, είναι χρήσιμο να γίνει ανάλυση του θεωρητικού υπόβαθρου της θερμοδυναμικής συμπεριφοράς της φωτιάς σε συνθήκες κατάσβεσης από νερό όταν οι επιφάνειες καυσίμου ορίζονται ως burner. Δηλαδή, το μαθηματικό μοντέλο που εξηγεί πως ο ψεκασμός του νερού μειώνει το HRR της πυρκαγιάς (Heat Release Rate) κατά την χρήση του FDS. Αρχικά, ο όρος extinguish coefficient εμφανίστηκε πρώτη φορά από τους H.Z. Yu et al, (1994) όπου σύμφωνα με την μελέτη τους, ο ολικός ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας μίας φωτιάς (HRR) μετά την εφαρμογή ψεκασμού νερού μπορεί να εκφραστεί από την ακόλουθη εκθετική συνάρτηση:

$$\dot{Q}(t) = \dot{Q}_0 \cdot e^{-k(t-t_0)} \quad (2)$$

Όπου

- $\dot{Q}(t)$ είναι ο συνολικός ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας σε χρόνο t μετά την εφαρμογή νερού
- \dot{Q}_0 είναι ο συνολικός ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας την χρονική στιγμή (t_0) που ξεκινάει η απελευθέρωση του νερού από τους ψεκαστήρες και

- k είναι μία εμπειρική παράμετρος που σχετίζεται με την παροχή νερού και τις ιδιότητες του φλεγόμενου υλικού

Όμως, οι H.Z. Yu et al, (1994) πρότειναν ότι συντελεστής k μπορεί να εκφραστεί και σαν γραμμική συνάρτηση της παροχής μάζας νερού ανά m^2 , \dot{m}_w'' , με μονάδα μέτρησης το 1 kg/m^2 . Εν συνεχεία, προκειμένου να προσαρμοστεί ένας συντελεστής κατάσβεσης (e_coef) στις προσομοιώσεις FDS και να γίνουν φιλικότερα ως προς τον χρήστη, οι Hamins και McGrattan (Hamins, 2003) αναθεώρησαν την σχέση (2), ώστε να εκφράσουν το HRR μέσω του ρυθμού απώλειας μάζας του καυσίμου, ως εξής:

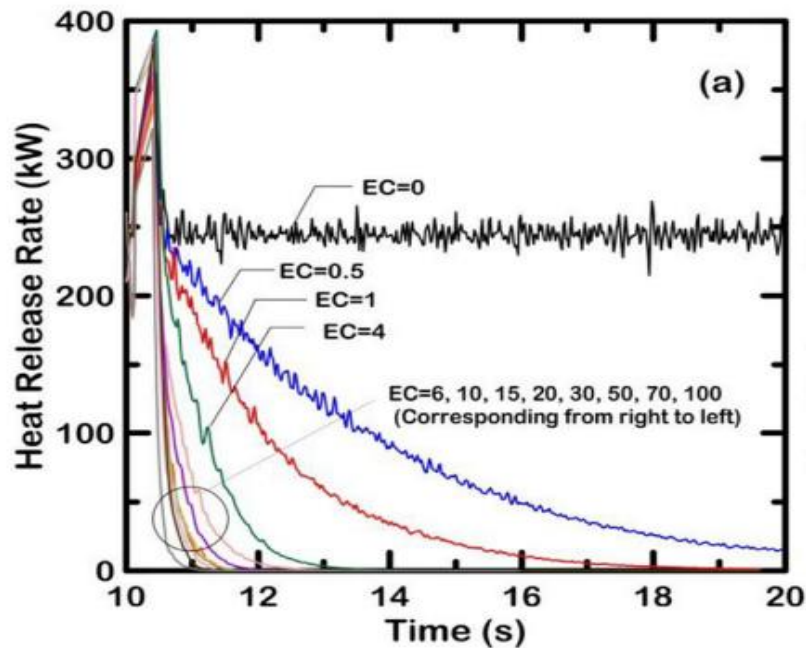
$$\dot{m}_f''(t) = \dot{m}_{f,0}'' \cdot (t) e^{-\int k(t) dt} \quad (3)$$

Όπου

- $\dot{m}_f''(t)$ είναι ο ρυθμός απώλειας μάζας του καυσίμου μετά την έναρξη του ψεκασμού του νερού
- $\dot{m}_{f,0}''(t)$ είναι ο ρυθμός απώλειας μάζας του καυσίμου όπως τον έχει επιλέξει ο χρήστης, την χρονική στιγμή που δεν εκτοξεύεται καθόλου νερό και
- ο συντελεστής k που σε αυτήν την σχέση εκφράζεται σαν συνάρτηση του χρόνου $k(t)$ και ισχύει ότι:

$$k(t) = E_COEFFICIENT \cdot \dot{m}_w'' \quad [1/s] \quad (4)$$

Όπου $E_COEFFICIENT$ είναι ο συντελεστής κατάσβεσης (extinguish coefficient) με μονάδα μέτρησης το $1 \text{ m}^2/(\text{kg}\cdot\text{s})$. Οι τιμές για τον $E_COEFFICIENT$ είναι εμπειρικές και η επιλογή τους για τις προσομοιώσεις στην συνέχεια συσχετίζεται με πειραματικά δεδομένα παλαιότερων δοκιμών και δεδομένα άλλων υπολογιστικών προσομοιώσεων. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με το περιοδικό Nuclear Engineering and Technology (Lee, 2019), πραγματοποιήθηκαν διάφορες προσομοιώσεις σε FDS, για πυρκαγιά σε απλό δωμάτιο με μία πόρτα όπου για σύστημα κατάσβεσης χρησιμοποιήθηκαν ψεκαστικές ομίχλης νερού. Ένα μέρος της μελέτης αυτής είναι η σύγκριση διαφόρων τιμών του extinguish coefficient ως προς το ποια είναι η επιρροή τους στον ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας της πυρκαγιάς. Στην εικόνα 36 φαίνεται το διάγραμμα HRR-t που αντλήθηκε από την μελέτη αυτή. Σε αυτό απεικονίζονται οι καμπύλες για διάφορες τιμές του e_coef από 0-100 $\text{m}^2/(\text{kg}\cdot\text{s})$ και διακρίνεται ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής αυτός τόσο πιο απότομη είναι η μείωση του HRR και ταυτόχρονα τόσο πιο γρήγορα σβήνει η φωτιά. Παράλληλα όμως, παρατηρείται και ότι όσο περισσότερο αυξάνεται αυτός ο συντελεστής τόσο μειώνεται η αύξηση της πτώσης του HRR (από ένα όριο και μετά οι καμπύλες HRR,t τείνουν να συμπίπτουν).



Εικόνα 36: Σύγκριση παραμέτρου e_coef (Lee, 2019)

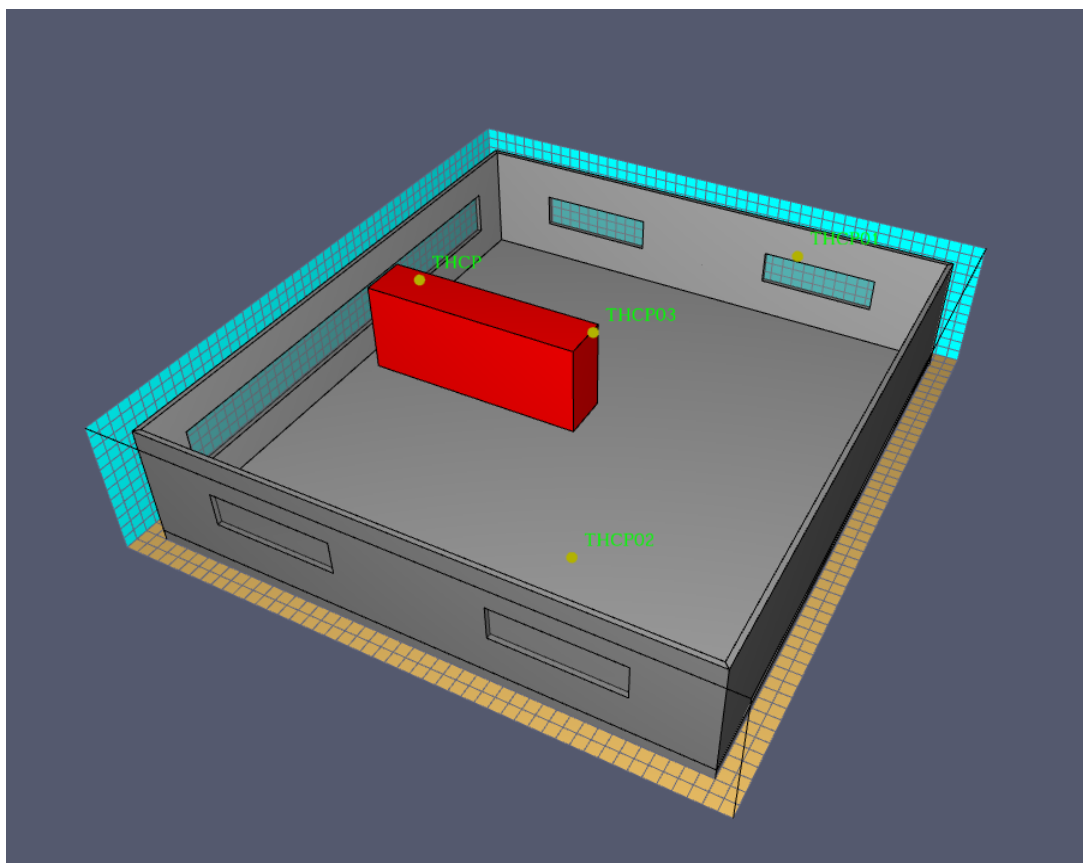
Να σημειωθεί ότι μέσω της εξίσωσης (3), που δείχνει την μείωση του HRR από την χρονική στιγμή ενεργοποίησης των ψεκαστήρων, μοντελοποιείται η αποτελεσματικότητα των sprinklers έναντι της πυρκαγιάς (Themelis N., 2012) και προκύπτουν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του επόμενου κεφαλαίου.

Πέρα από την ανάλυση των θερμοδυναμικών εξισώσεων και την αναζήτηση πληροφοριών από άλλες μελέτες, για την ακόμα καλύτερη κατανόηση και διερεύνηση της επιρροής και σημασίας του extinguish coefficient, πραγματοποιήθηκαν κάποιες υπολογιστικές προσομοιώσεις πριν από τις τελικές που θα παρουσιαστούν στο κεφάλαιο 5.4. Οι προσομοιώσεις αυτές έλαβαν χώρα σε μοντέλο μικρότερων διαστάσεων και για πυρκαγιά πολύ μικρότερης διάρκειας ώστε να προκύψει γρήγορη εξαγωγή αποτελεσμάτων που θα βοηθήσουν στην καλύτερη κατανόηση της σημασίας του συντελεστή κατάσβεσης (e_coef) και κατ' επέκταση στην καλύτερη χρήση του λογισμικού FDS ως προς την κατάσβεση πυρκαγιάς (fire extinguishing). Οι προσομοιώσεις αυτές παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα Α και με αυτόν τον τρόπο συντελούν και στην τελική επιλογή των τιμών του συντελεστή για τα τελικά σενάρια, σε συνδυασμό με το διάγραμμα της Εικόνας 36.

Πέρα από τους παράγοντες που αναφέρθηκαν υπάρχουν και άλλες παράμετροι που επηρεάζουν την λειτουργία του συστήματος ψεκαστήρων νερού οι οποίες δεν εξετάζονται στην παρούσα διπλωματική εργασία. Οι παράμετροι αυτοί είναι η πίεση της παροχής του νερού κάθε ψεκαστήρα (operating pressure) που λαμβάνει την τιμή 2.8 bar, οι σταγόνες νερού που πέφτουν ανά s που ισούται με 5000 DPS (Droplets per Seconds) καθώς και η γωνία ψεκασμού του νερού που κυμαίνεται από 60° έως 70° . Οι τιμές αυτές είναι δίνονται ίδιες για όλα τα σενάρια που πραγματοποιήθηκαν ενώ η επιλογή τους αντλήθηκε ως default από το FDS.

5.3.5 Εφαρμογή συσκευών μέτρησης θερμοκρασίας (thermocouples)

Για την καταμέτρηση της θερμοκρασίας μέσα στον χώρο καθ' όλη την διάρκεια των προσομοιώσεων και κατ' επέκταση την δυνατότητα εξαγωγής των διαγραμμάτων Temperature-Time (τα οποία αποτελούν βασικό εργαλείο για τα σενάρια που εξετάστηκαν), τοποθετήθηκαν 4 θερμοζεύγη (thermocouples).



Εικόνα 37: Οι θέσεις των μετρητών θερμοκρασίας μέσα στο κατάστρωμα

Η ακριβής τους τοποθεσία (Εικόνα 37) επιλέχθηκε με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε μία συσκευή να βρίσκεται ακριβώς πάνω από το φορτηγό-πηγή και κοντά στο πρυμναίο άνοιγμα ($x=94$ m, $y=13$ m, $z=4.7$ m), μία να βρίσκεται στο κέντρο του καταστρώματος ($x=102$ m, $y=13$ m, $z=4.7$ m) και δύο να βρίσκονται κοντά στα πωραία πλάγια ανοίγματα ($x=107$ m, $y=22$ m, $z=4.7$ m και $x=107$ m, $y=2$ m, $z=4.7$ m).

5.4 Παρουσίαση αριθμητικών προσομοιώσεων

Με τις αριθμητικές προσομοιώσεις που εκτελέστηκαν και θα παρουσιαστούν σε αυτό το κεφάλαιο, εξετάζεται η επίδραση του αυτόματου συστήματος κατάσβεσης στην αναπτυσσόμενη πυρκαγιά μέσα σε ένα κατάστρωμα Ro-Ro πλοίου. Οι παράμετροι οι οποίοι θα εξεταστούν κυρίως, είναι η θερμοκρασία ενεργοποίησης (activation temperature) του συστήματος και ο δείκτης RTI, ο συντελεστής κατάσβεσης (extinguish coefficient), η πληρότητα του χώρου σε φορηγά καθώς και η χρήση συστήματος κατάσβεσης με ολικό κατακλυσμό νερού (water deluge system) που ενεργοποιείται από το πλήρωμα σε συγκεκριμένο χρόνο. Στον πίνακα 11 αναγράφονται συγκεντρωτικά όλα τα σενάρια που πραγματοποιήθηκαν μαζί με τα χαρακτηριστικά τους.

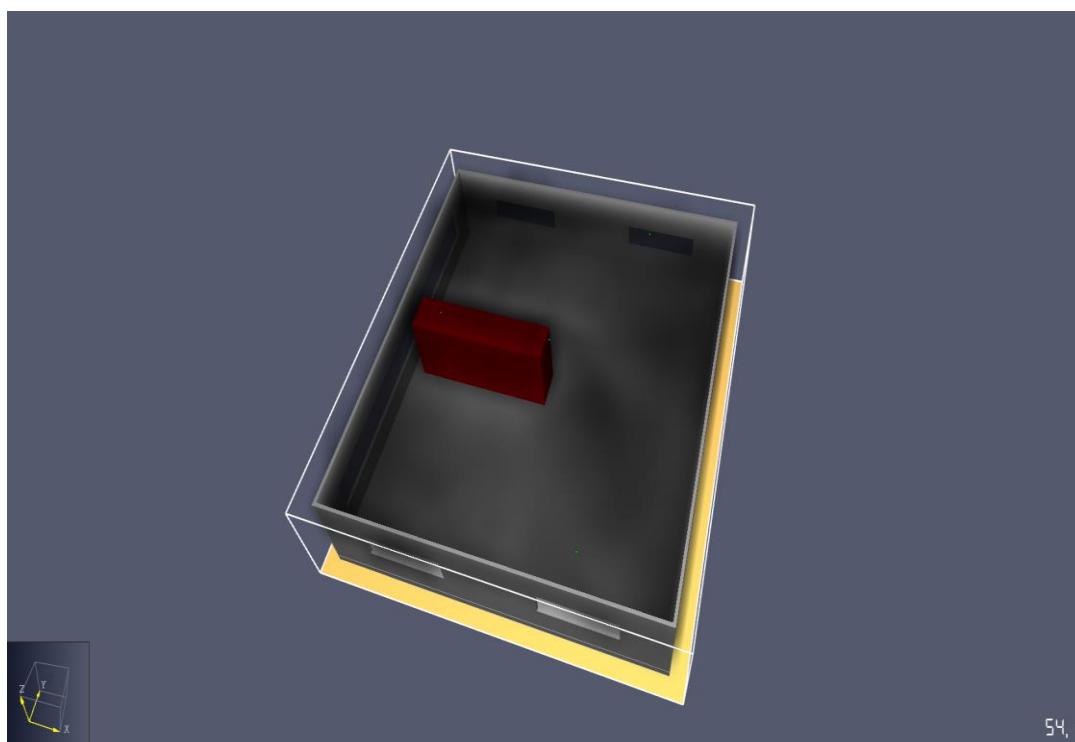
	Αριθμός φορηγών	Διάταξη φορηγών	Άνεμος	Σύστημα Κατάσβεσης	Χαρακτηριστικά Συστήματος Κατάσβεσης
1° Σενάριο	1	Φορηγό-πηγή	ΟΧΙ	ΟΧΙ	-
2° Σενάριο	1	Φορηγό-Πηγή	ΟΧΙ	ΝΑΙ	RTI=33 $\sqrt{(m \cdot s)}$ e_coef=3 m ² /(kg·s) Act. Temp.:130°C
3° Σενάριο	1	Φορηγό-Πηγή	ΟΧΙ	ΝΑΙ	RTI=33 $\sqrt{(m \cdot s)}$ e_coef=0.5 m ² /(kg·s) Act. Temp.: 130°C
4° Σενάριο	1	Φορηγό-Πηγή	ΟΧΙ	ΝΑΙ	RTI=110 $\sqrt{(m \cdot s)}$ e_coef=3 m ² /(kg·s) Act. Temp.: 130°C
5° Σενάριο	1	Φορηγό-Πηγή	ΟΧΙ	ΝΑΙ	RTI=110 $\sqrt{(m \cdot s)}$ e_coef=1 m ² /(kg·s) Act. Temp.: 130°C
6° Σενάριο	1	Φορηγό-Πηγή	ΟΧΙ	ΝΑΙ	RTI=110 $\sqrt{(m \cdot s)}$ e_coef=10 m ² /(kg·s) Act. Temp.: 130°C
7° Σενάριο	16	100% Πληρότητα	ΟΧΙ	ΟΧΙ	-
8° Σενάριο	16	100% Πληρότητα	ΟΧΙ	ΝΑΙ	RTI=33 $\sqrt{(m \cdot s)}$ e_coef=3 m ² /(kg·s) Act. Temp.:130°C
9° Σενάριο	16	100% Πληρότητα	ΟΧΙ	ΝΑΙ	Ενεργοποίηση όλων των sprinklers στα 600 s e_coef=3 m ² /(kg·s)
10° Σενάριο	16	100% Πληρότητα	ΟΧΙ	ΝΑΙ	Ενεργοποίηση όλων των sprinklers στα 800 s e_coef=3 m ² /(kg·s)

Πίνακας 11: Όλα τα σενάρια που πραγματοποιήθηκαν

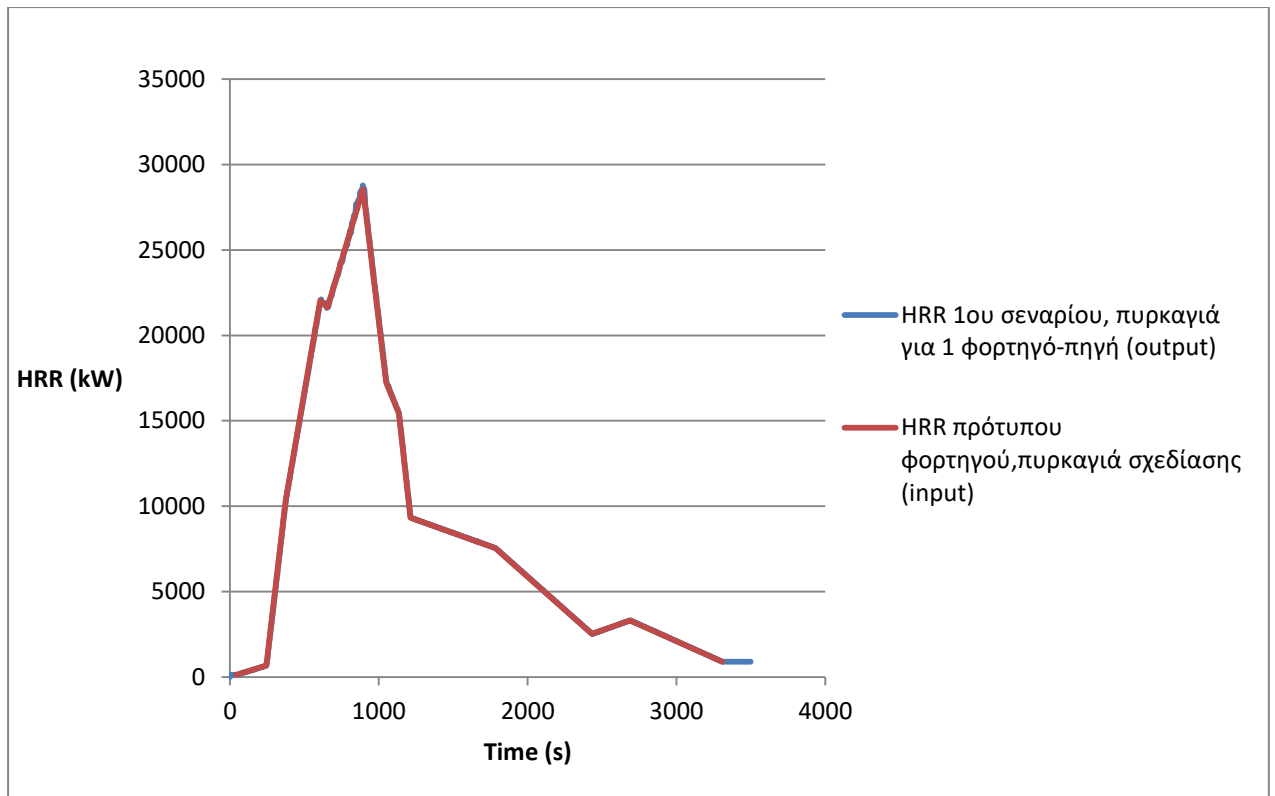
Στη συνέχεια έπεται η καταγραφή και η ανάλυση των αποτελεσμάτων και των 10 σεναρίων καθώς και η σύγκριση μεταξύ τους με σκοπό την εξαγωγή κάποιων συμπερασμάτων.

5.4.1 1^ο Σενάριο

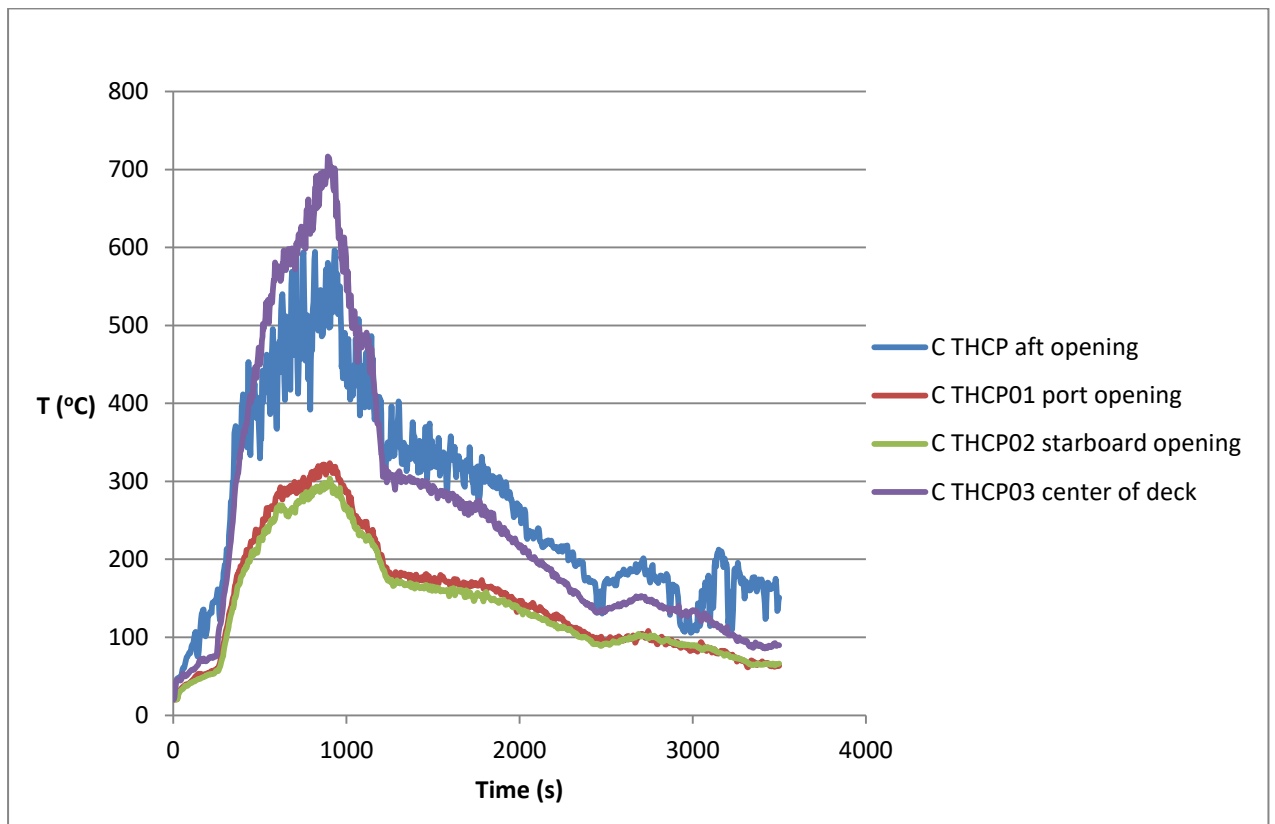
Στην 1^η προσομοίωση εξετάζεται το σενάριο πυρκαγιάς ενός μόνο φορτηγού-πηγή μέσα στον χώρο του καταστρώματος όπως φαίνεται στην εικόνα 38 (t=54 s). Το συγκεκριμένο σενάριο πραγματοποιήθηκε για δύο σκοπούς. Ο πρώτος είναι για να επιβεβαιωθεί η χρονική ιστορία του HRR του πρότυπου φορτηγού, της οποίας οι τιμές αποτελούν το input value για την συνάρτηση ramp-up time σε όλα τα σενάρια που εξετάστηκαν. Σύμφωνα με το διάγραμμα 1, ο ισχυρισμός αυτός είναι έγκυρος αφού οι τιμές των δύο καμπυλών είναι σχεδόν ταυτόσημες. Ο δεύτερος είναι ότι τα αποτελέσματα αυτής της προσομοίωσης θα αποτελέσουν την πρώτη βάση σύγκρισης, στην μελέτη της επιρροής του συστήματος κατάσβεσης, στις προσομοιώσεις που ακολουθούν όπου θα τοποθετηθούν ψεκαστήρες. Σε αυτά τα αποτελέσματα, πέρα από το διάγραμμα 1 (HRR-t), μεγάλη σημασία παρουσιάζει και το διάγραμμα 2 (T-t) όπου πρόκειται για την μέτρηση της θερμοκρασίας στα 4 σημεία που βρίσκονται τα θερμοζεύγη.



Εικόνα 38: Πυρκαγιά ενός φορτηγού-πηγή στο κατάστρωμα



Διάγραμμα 1: Σύγκριση 1^{ου} σεναρίου και πυρκαγιάς σχεδίασης, HRR-t

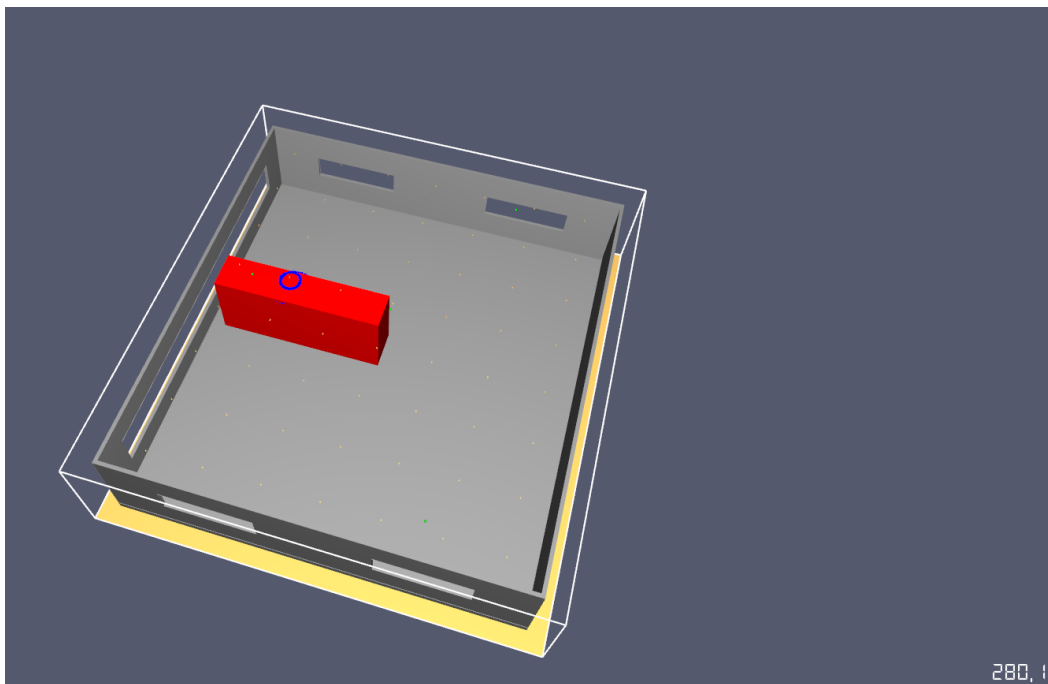


Διάγραμμα 2: Χρονική ιστορία θερμοκρασιών 1^{ου} σεναρίου

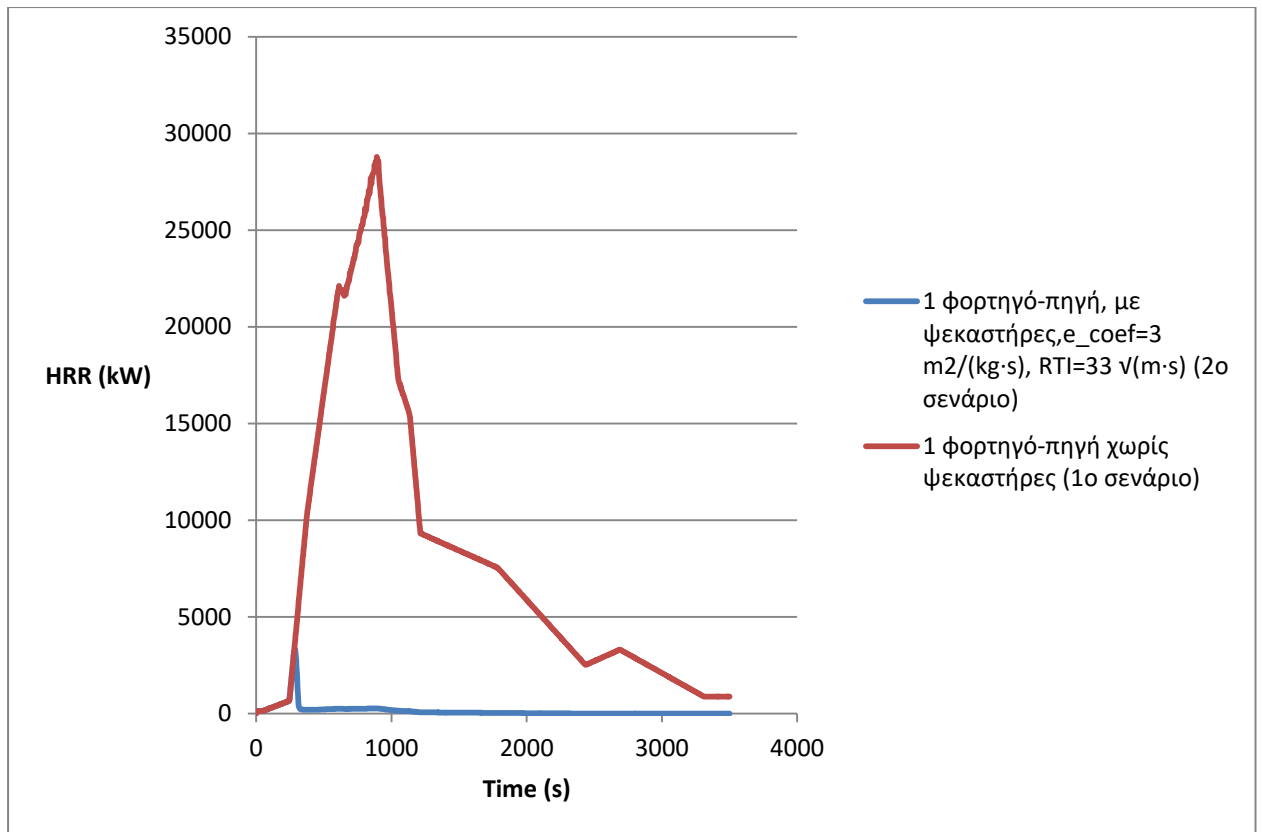
5.4.2 2^ο Σενάριο

Στο 2^ο σενάριο που εξετάστηκε το μοντέλο της προσομοίωσης παραμένει ίδιο με αυτό του 1^{ου} σεναρίου, μόνο που σε αυτήν την περίπτωση τοποθετήθηκαν και ψεκαστήρες (sprinklers). Τόσο η διάταξη που ακολουθούν όσο και η παροχή ψεκασμού του νερού τους (141.5L/min) είναι αυτή που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 5.3.4 και θα ισχύει για όλες τις προσομοιώσεις της παρούσας εργασίας. Όσον αφορά τις υπόλοιπες παραμέτρους των ψεκαστήρων για το παρόν σενάριο, επιλέχθηκε ο e_coef ίσος με $3 \text{ m}^2/(\text{kg}\cdot\text{s})$ ενώ για τον τρόπο ενεργοποίησης του συστήματος δόθηκαν οι τιμές $130 \text{ }^\circ\text{C}$ και $33 \sqrt{(\text{m}\cdot\text{s})}$ για την θερμοκρασία ενεργοποίησης και το RTI αντίστοιχα. Δοθέντων αυτών των τιμών, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται στα διαγράμματα 3,4.

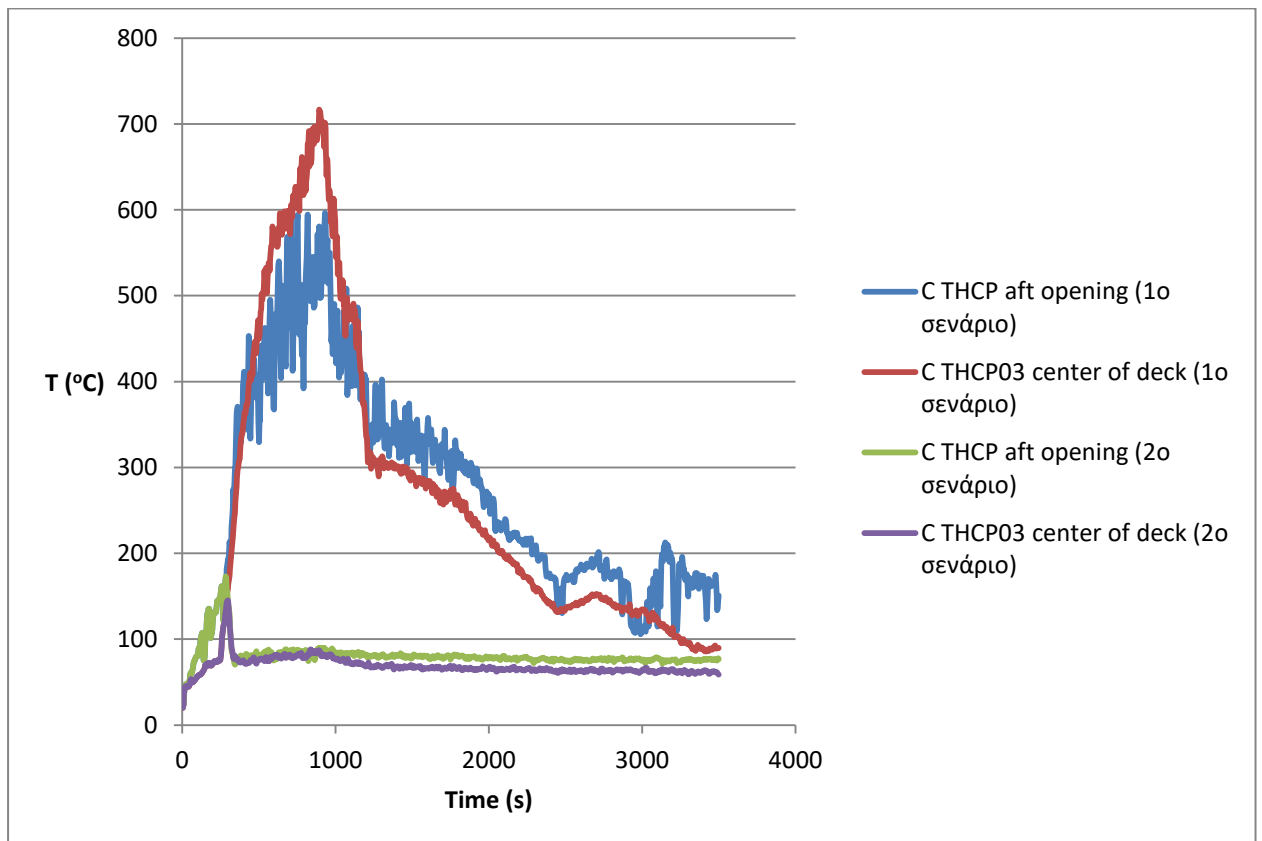
Αρχικά όπως φαίνεται και από την εικόνα 39, ο πρώτος ψεκαστήρας ενεργοποιείται την χρονική στιγμή $t=280 \text{ s}$. Από εκείνη την στιγμή, φαίνεται τόσο το HRR όσο και οι θερμοκρασίες να ακολουθούν μία άκρως πτωτική τάση, οδηγώντας την φωτιά με γρήγορο ρυθμό στο να σβήσει (Διαγράμματα 3,4). Πιο συγκεκριμένα, στο 1^ο σενάριο (χωρίς ψεκαστήρες) το HRR φτάνει μέγιστη τιμή περίπου τα 29000 kW, ενώ στο 2^ο (με ψεκαστήρες) το HRR_{max} ισούται με 3330 kW. Το ίδιο συμβαίνει και με τις θερμοκρασίες όπου στο 1^ο σενάριο η μέγιστη θερμοκρασία ξεπερνάει τους $700 \text{ }^\circ\text{C}$, ενώ στο 2^ο το T_{max} ισούται περίπου με $173 \text{ }^\circ\text{C}$ (προς το πρυμναίο άνοιγμα).



Εικόνα 39: Χρονική στιγμή 280 s που ενεργοποιείται ο 1^{ος} ψεκαστήρας

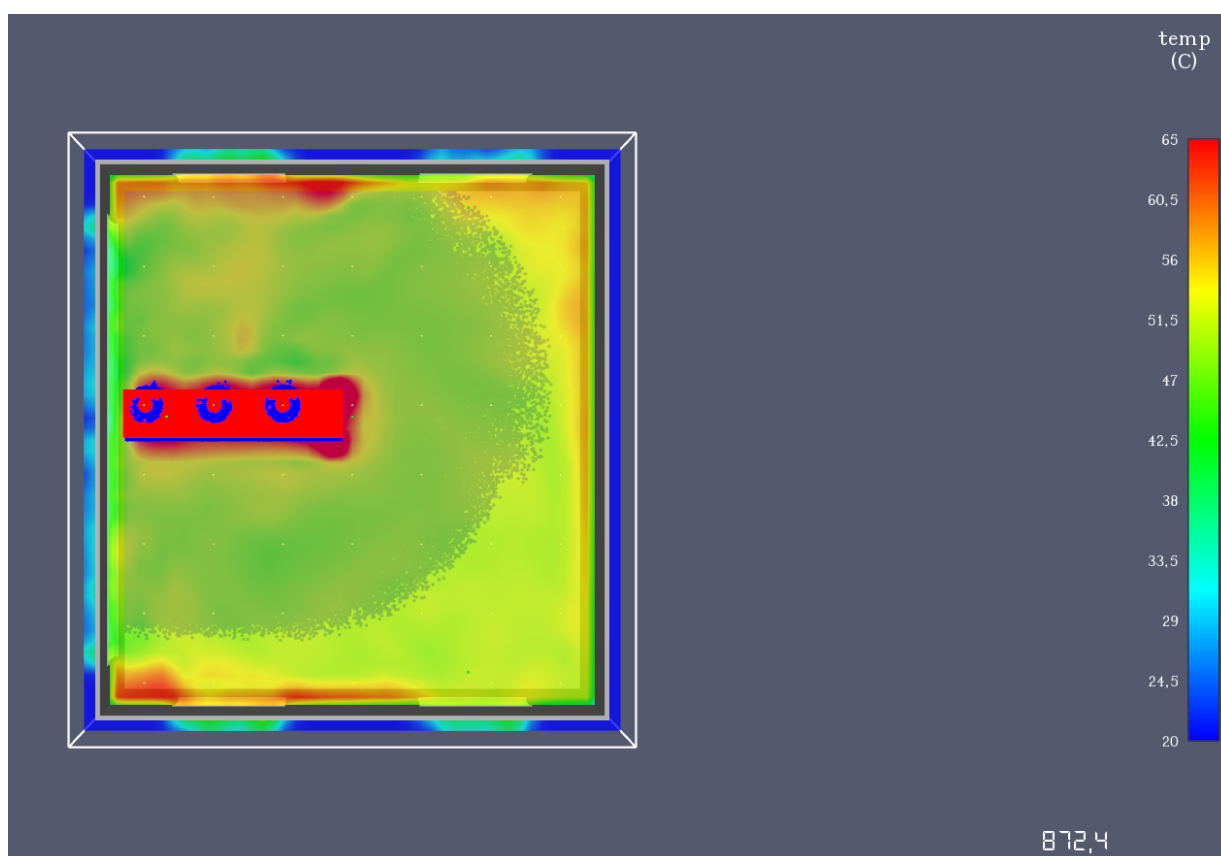


Διάγραμμα 3: Χρονική ιστορία HRR για το 2^ο σενάριο και σύγκριση με το 1^ο

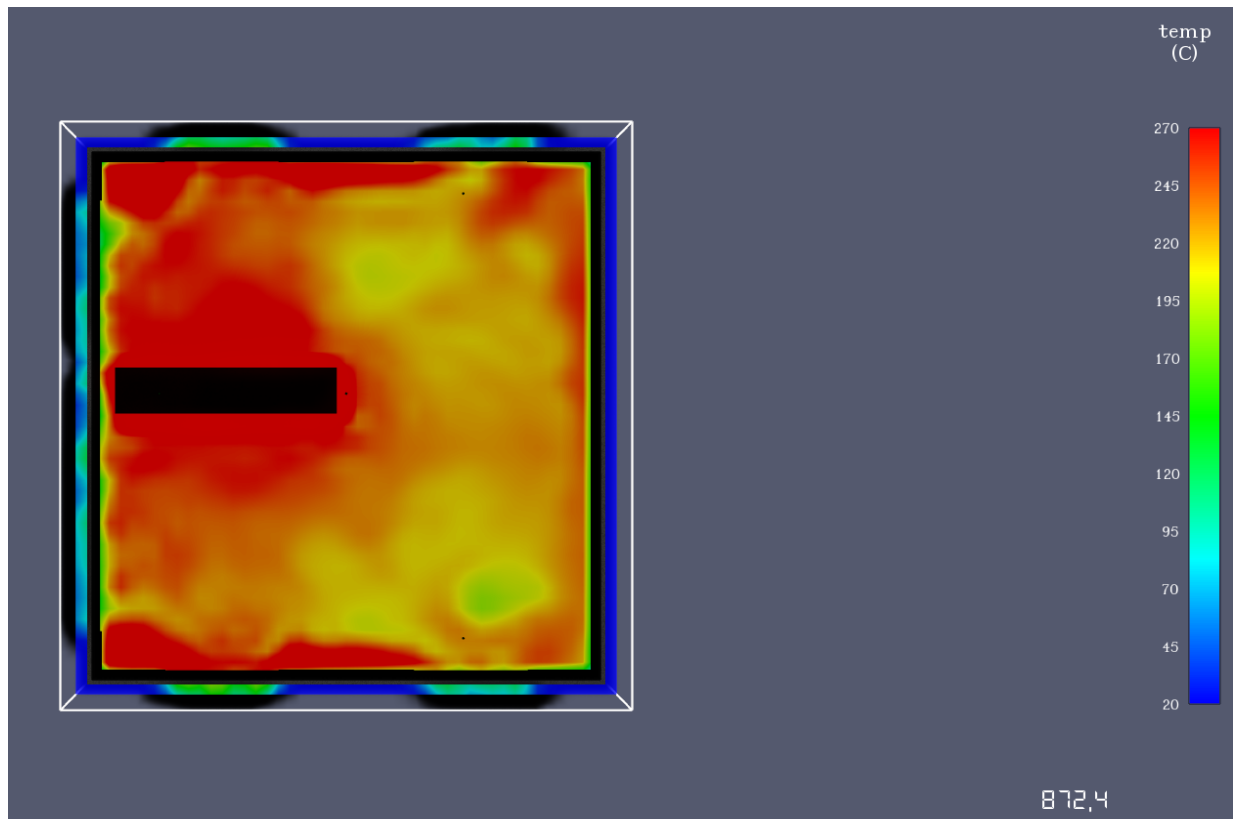


Διάγραμμα 4 Χρονική ιστορία θερμοκρασιών για το 2^ο σενάριο και σύγκριση του με το 1^ο

Γενικότερα, οι υψηλότερες θερμοκρασίες λαμβάνουν χώρα στα ψηλότερα σημεία του καταστρώματος (κοντά στο ταβάνι), καθώς τα θερμά αέρια έχουν κατεύθυνση προς τα επάνω, και κυριότερα κοντά στο κέντρο του. Εν συνεχεία, στις εικόνες 40,41 παρατίθεται η θερμοκρασιακή κατάσταση στο επίπεδο $z=3$ m την χρονική στιγμή $t=872,4$ s, για το 2^ο και το 1^ο σενάριο αντίστοιχα. Από αυτή διακρίνεται ότι οι υψηλότερες θερμοκρασίες βρίσκονται κοντά στα ανοίγματα, καθώς ο παραγόμενος καπνός έχει κατεύθυνση προς τα εκεί, και κυρίως γύρω από το φορτηγό-πηγή. Επιπλέον, με την σύγκριση των δύο καταστάσεων, γίνεται ακόμα πιο αντιληπτή η αισθητή μείωση της θερμοκρασίας στον χώρο λόγω του ψεκασμού του νερού. Όλα τα προαναφερθέντα αποτελέσματα καθιστούν την λειτουργία των ψεκαστήρων άκρως αποδοτική στο παρόν σενάριο, ενώ ο αριθμός αυτών που χρειάστηκε να ενεργοποιηθούν είναι 3 (Εικόνα 40) και συγκεκριμένα αυτοί πάνω από την πηγή.



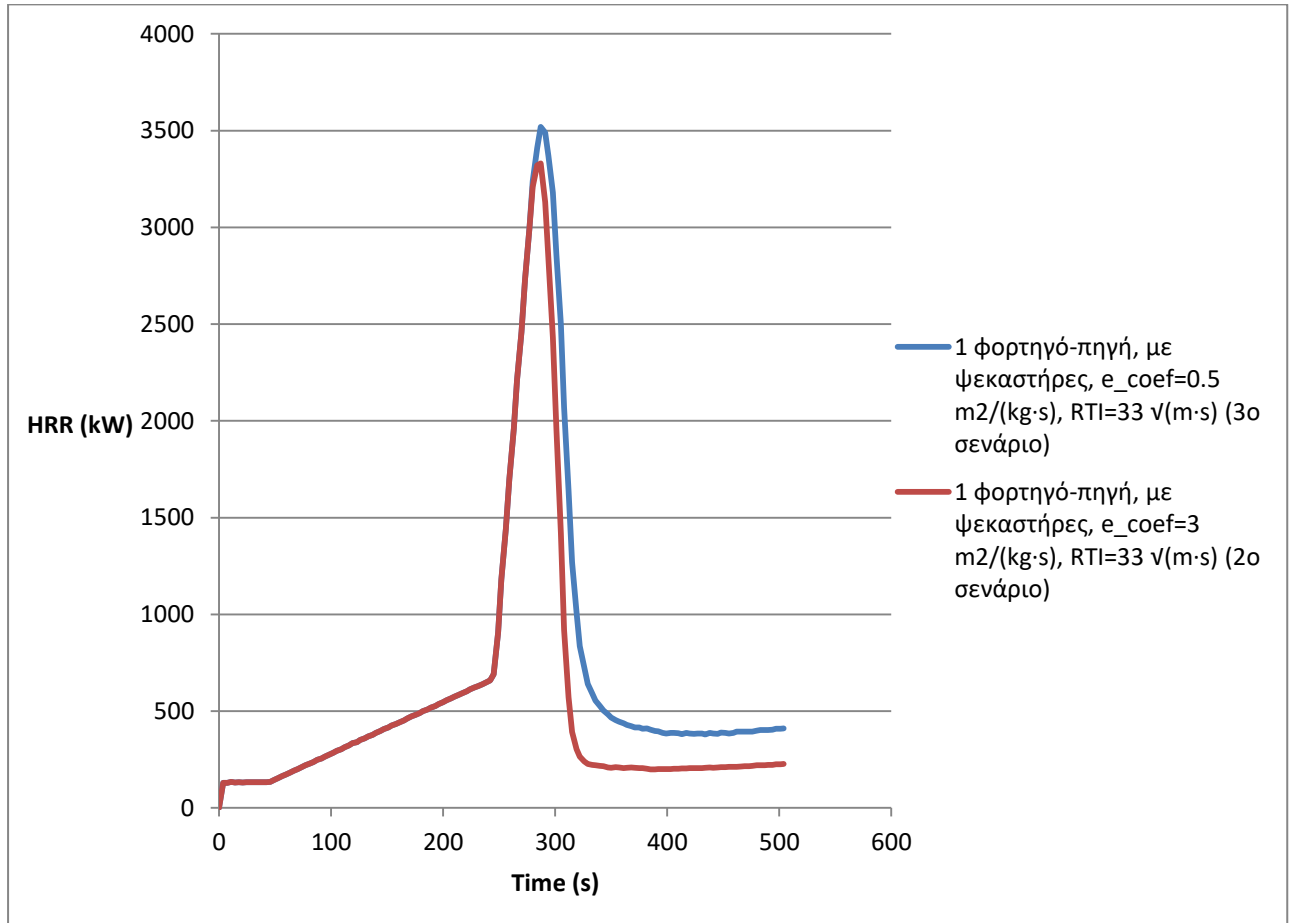
Εικόνα 40: Θερμοκρασιακή κατάσταση στο επίπεδο $z=3$ m την χρονική στιγμή $t=872.4$ s όπου έχουν ενεργοποιηθεί οι 3 ψεκαστήρες πάνω από την πηγή (2^ο σενάριο)



Εικόνα 41: Θερμοκρασιακή κατάσταση στο επίπεδο $z=3$ m την χρονική στιγμή $t=872.4$ s (1^ο σενάριο)

5.4.3 3^ο Σενάριο

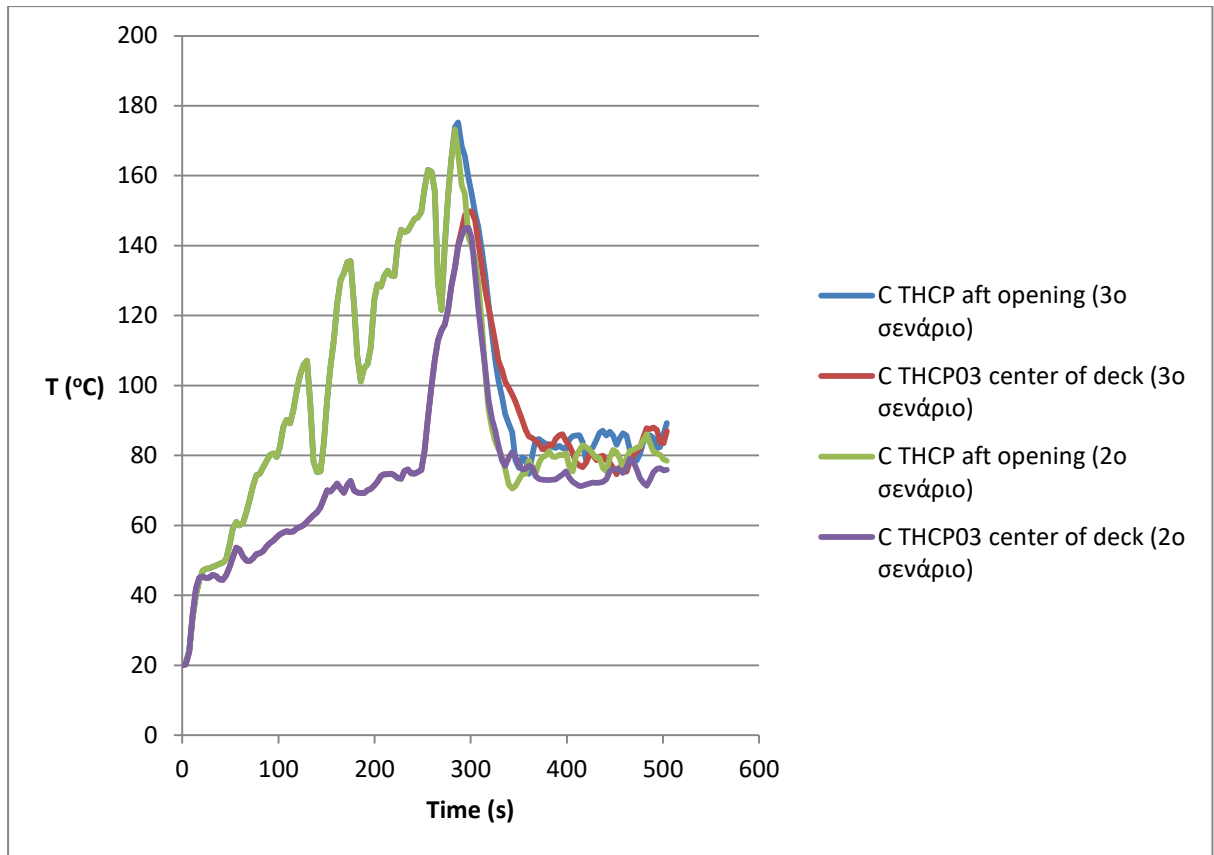
Το 3^ο σενάριο πραγματοποιήθηκε με ίδιο μοντέλο και χαρακτηριστικά με το 2^ο σενάριο, με μόνη διαφορά ότι στον **extinguish coefficient** δόθηκε η τιμή **0.5 m²/(kg·s)**. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται στα διαγράμματα 5,6 όπου εξετάζεται η διαφορά του 3^{ου} σεναρίου με το 2^ο.



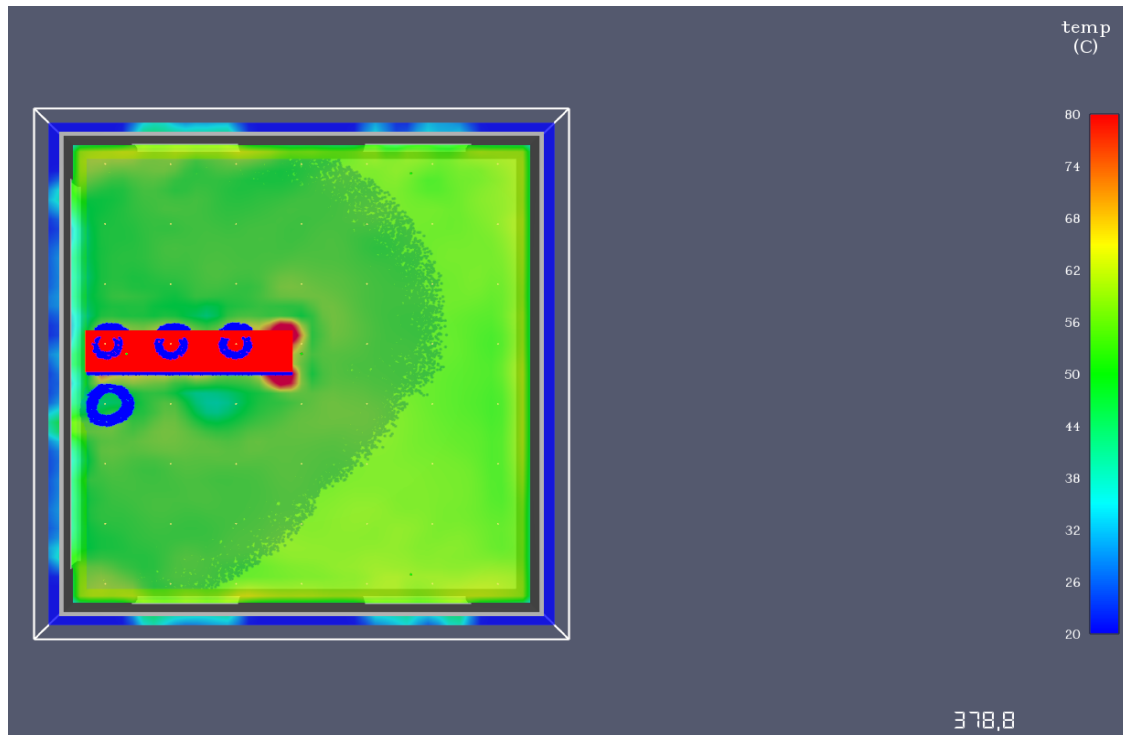
Διάγραμμα 5: Χρονική ιστορία του HRR για το 3^ο σενάριο και σύγκριση με το 2^ο

Αρχικά, ο πρώτος ψεκαστήρας και εδώ ανοίγει την χρονική στιγμή 280 s ενώ γενικότερα η κατάσταση είναι αρκετά παρόμοια με το προηγούμενο σενάριο. Ωστόσο, φαίνεται ότι στην παρούσα προσομοίωση το νερό επιδρά με πιο αργό ρυθμό πάνω στην επιφάνεια καύσης (η πυρκαγιά σβήνει με πιο αργό ρυθμό) έστω και με μικρές διαφορές. Πιο συγκεκριμένα, η μέγιστη τιμή του HRR φτάνει τα 3520 kW έναντι των 3330 kW (διαφορά 190kW) και το συνολικό φορτίο πυρκαγιάς είναι 339 MJ έναντι 271 MJ (διαφορά 68 MJ). ΣΤις θερμοκρασίες η διαφορά χαρακτηρίζεται αμελητέα καθώς η μέγιστη θερμοκρασία στον χώρο φτάνει μέχρι τους 175 °C, ενώ στο προηγούμενο σενάριο το T_{max} ισούται με 173 °C. Άλλη μία διαφορά είναι ότι σε αυτήν την περίπτωση χρειάστηκε να ενεργοποιηθεί και 4^{ος} ψεκαστήρας προκειμένου να επέλθει η καταστολή της πορείας του παραγόμενου καπνού (Εικόνα 42). Αυτές οι διαφορές κατέληξαν στο ότι η επιλογή μικρότερης τιμής για τον extinguish coefficient επέφερε μικρότερη απόδοση για το σύστημα κατάσβεσης. Εντούτοις, η χρήση των αυτόματων ψεκαστήρων χαρακτηρίζεται και σε αυτό το σενάριο ως αποτελεσματική καθώς όπως φαίνεται και από το στιγμιότυπο του μοντέλου την χρονική

στιγμή 378.8 s (Εικόνα 42), η θερμοκρασιακή κατάσταση βρίσκεται σε πολύ καλά επίπεδα 100 s μετά τον πρώτο ψεκασμό, έως και πλήρες σβήσιμο.



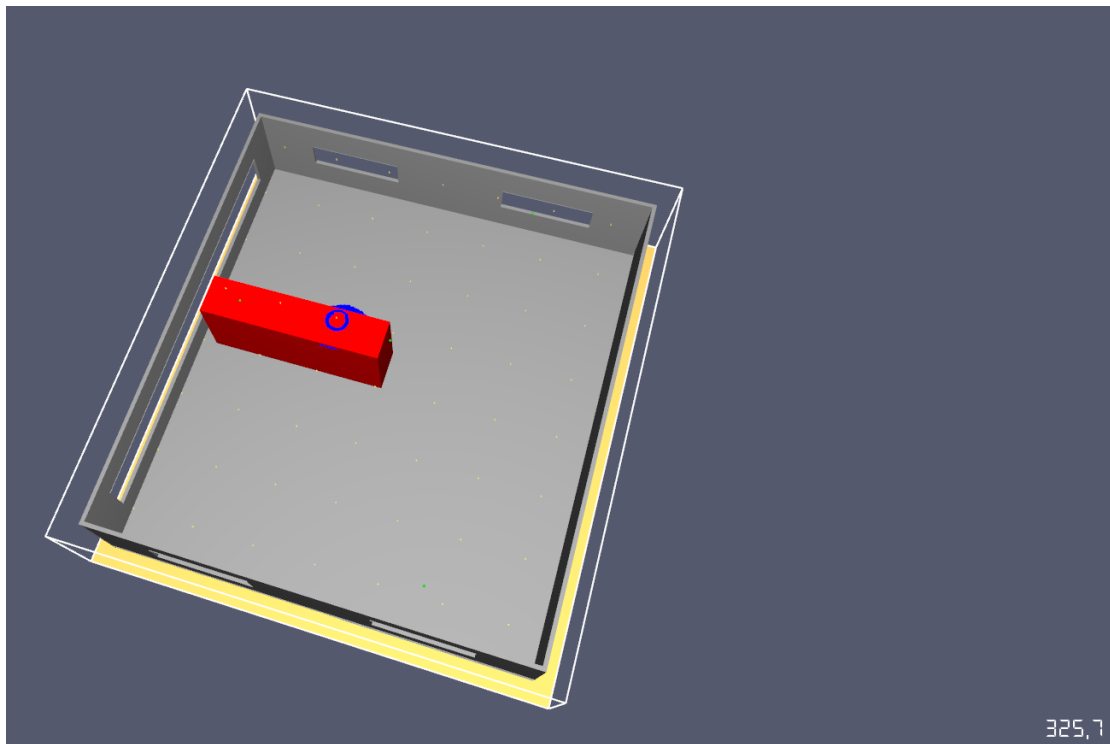
Διάγραμμα 6: Χρονική ιστορία θερμοκρασιών για το 3^ο σενάριο και σύγκριση με το 2^ο



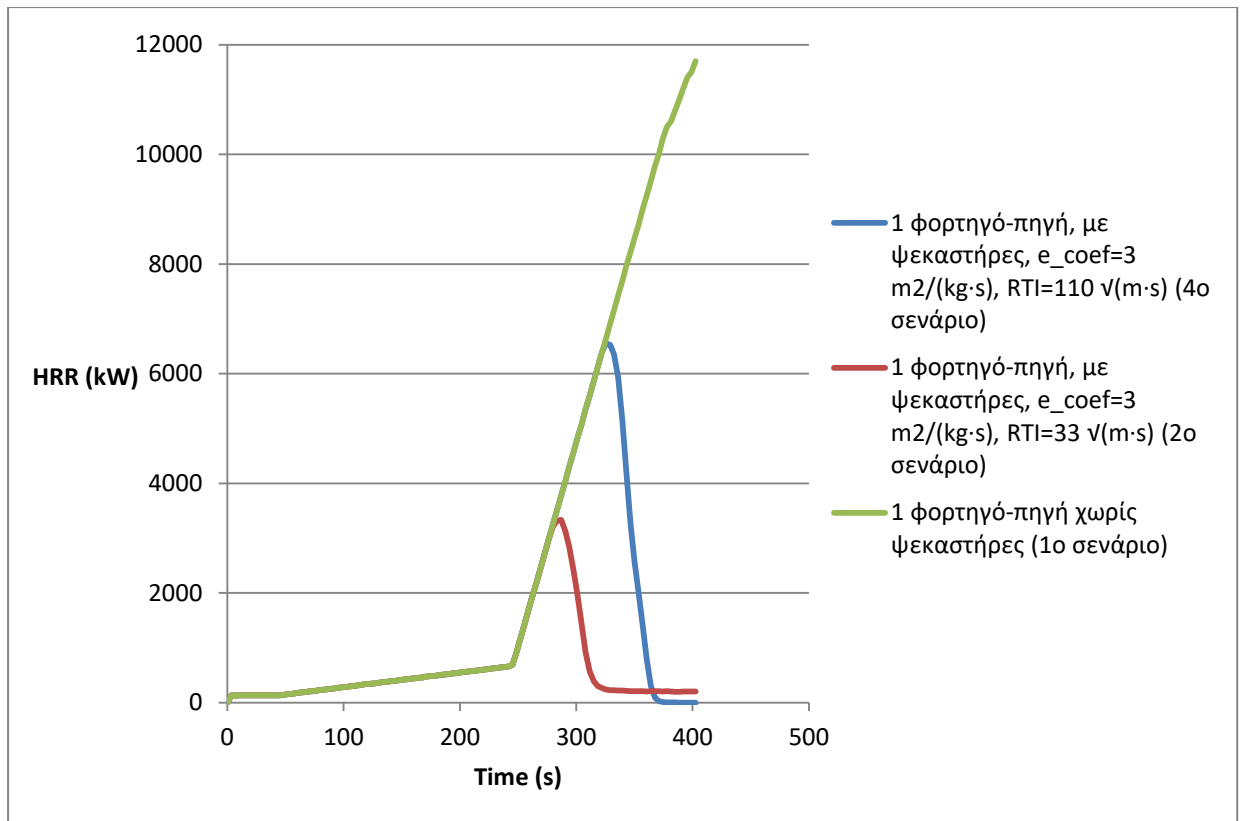
Εικόνα 42: Θερμοκρασιακή κατάσταση στο z= 3 m την χρονική στιγμή t=378.8 s (3^ο σενάριο)

5.4.4 4^ο Σενάριο

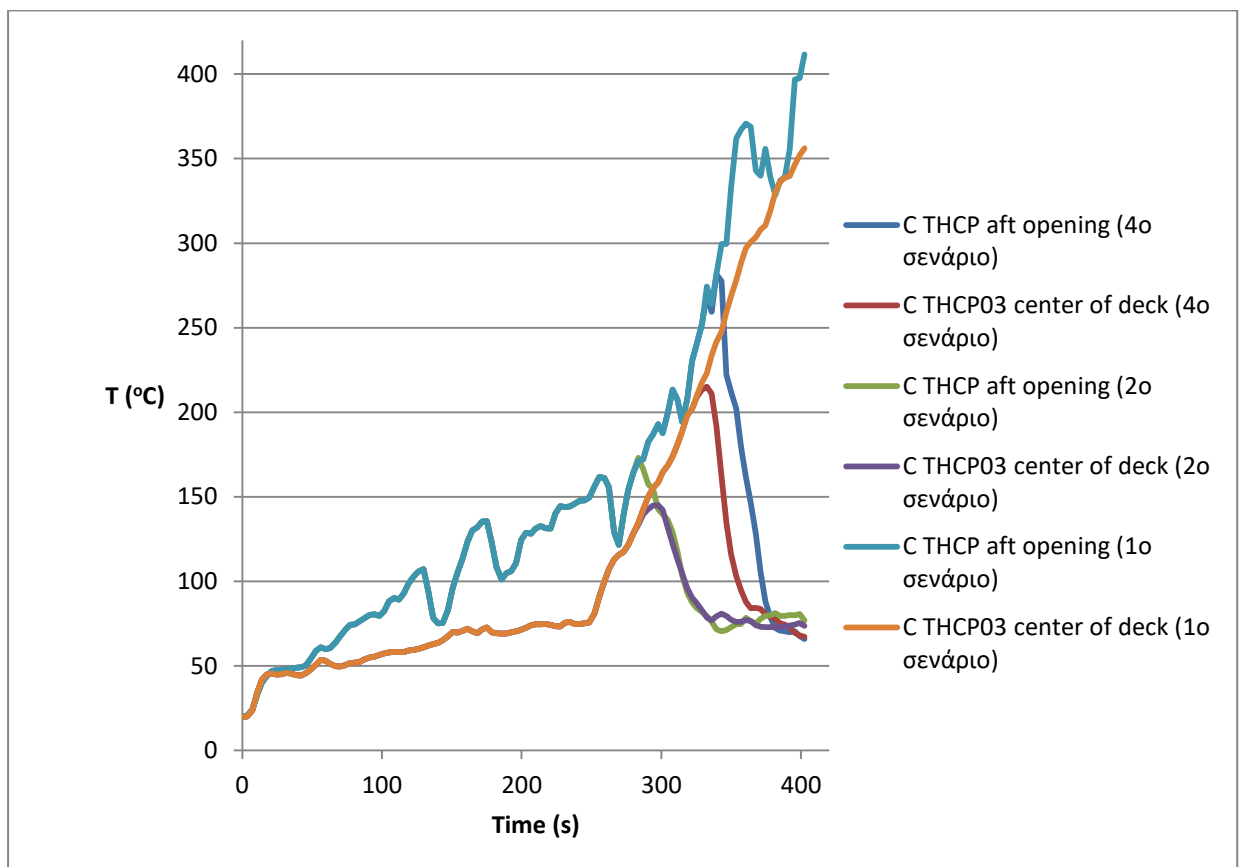
Το 4^ο σενάριο έλαβε χώρα με ακριβώς το ίδιο μοντέλο με αυτό του 2^{ου} σεναρίου, με μοναδική διαφορά τον δείκτη του **RTI** που αφορά τον χρόνο έναρξης λειτουργίας και έλαβε την τιμή **110** $\sqrt{(m \cdot s)}$. Η αλλαγή σε αυτή την παράμετρο επηρεάζει την χρονική στιγμή ενεργοποίησης του συστήματος κατάσβεσης καθώς όπως φαίνεται και από την εικόνα 43, ο πρώτος ψεκαστήρας ανοίγει σε μεταγενέστερη χρονική στιγμή από πριν, και συγκεκριμένα στα 325.7 s. Σύμφωνα με το διάγραμμα 7, η καθυστέρηση αυτή των 45 s έφερε μεγάλη αύξηση τόσο στο φορτίο θερμότητας όσο και στο HRR_{max} . Συγκεκριμένα, το συνολικό φορτίο μετρήθηκε περίπου 526 MJ έναντι 271 MJ του 2^{ου} σεναρίου (διαφορά 255 MJ) και το HRR_{max} ίσο με 6551 kW έναντι 3330 kW (διαφορά 3221 kW). Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ότι προκύπτει σχεδόν διπλάσια παραγόμενη θερμότητα από το καύσιμο και κατά συνέπεια αυξημένες θερμοκρασίες (Διάγραμμα 8). Στην προκειμένη προσομοίωση η μέγιστη θερμοκρασία στον χώρο φτάνει τους 282 °C (aft opening) σε αντίθεση με αυτή του 2^{ου} σεναρίου που ισούται με 173 °C.



Εικόνα 43: Χρονική στιγμή που ενεργοποιείται ο 1^{ος} ψεκαστήρας

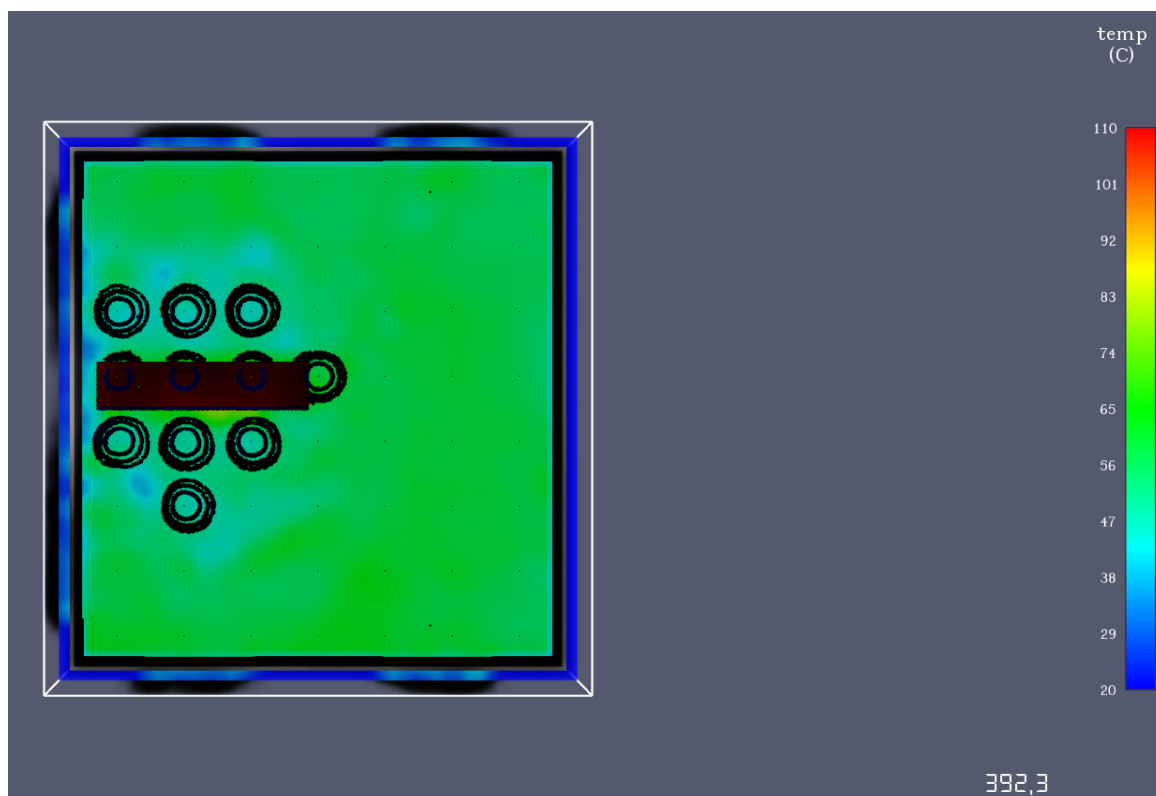


Διάγραμμα 7: Χρονική ιστορία HRR για το 4^ο σενάριο και σύγκριση του με το 1^ο και το 2^ο



Διάγραμμα 8: Χρονική ιστορία θερμοκρασιών για το 4^ο σενάριο και σύγκριση με το 1^ο και το 2^ο

Λόγω των αυξημένων αυτών θερμοκρασιών συνεπάγεται και η λειτουργία περισσότερων ψεκαστήρων καθώς η πυρκαγιά κατάφερε να φτάσει σε υψηλότερα επίπεδα θερμότητας άρα και περισσότεροι αισθητήρες να ξεπεράσουν το σημείο λειτουργίας. Έτσι, σε αυτά τα επίπεδα η ανάγκη για παροχή κατασβεστικού μέσου (νερό) είναι μεγαλύτερη και για αυτό χρειάστηκε να ανοίξουν 11 ψεκαστήρες όπως φαίνεται στην εικόνα 44. Παρόλο που προκύπτει δυσμενέστερη κατάσταση σε σχέση με το 2^ο σενάριο, φαίνεται ότι με την λειτουργία τους σβήνει τελικώς η φωτιά μετά από περίπου 70 s (Εικόνα 44).

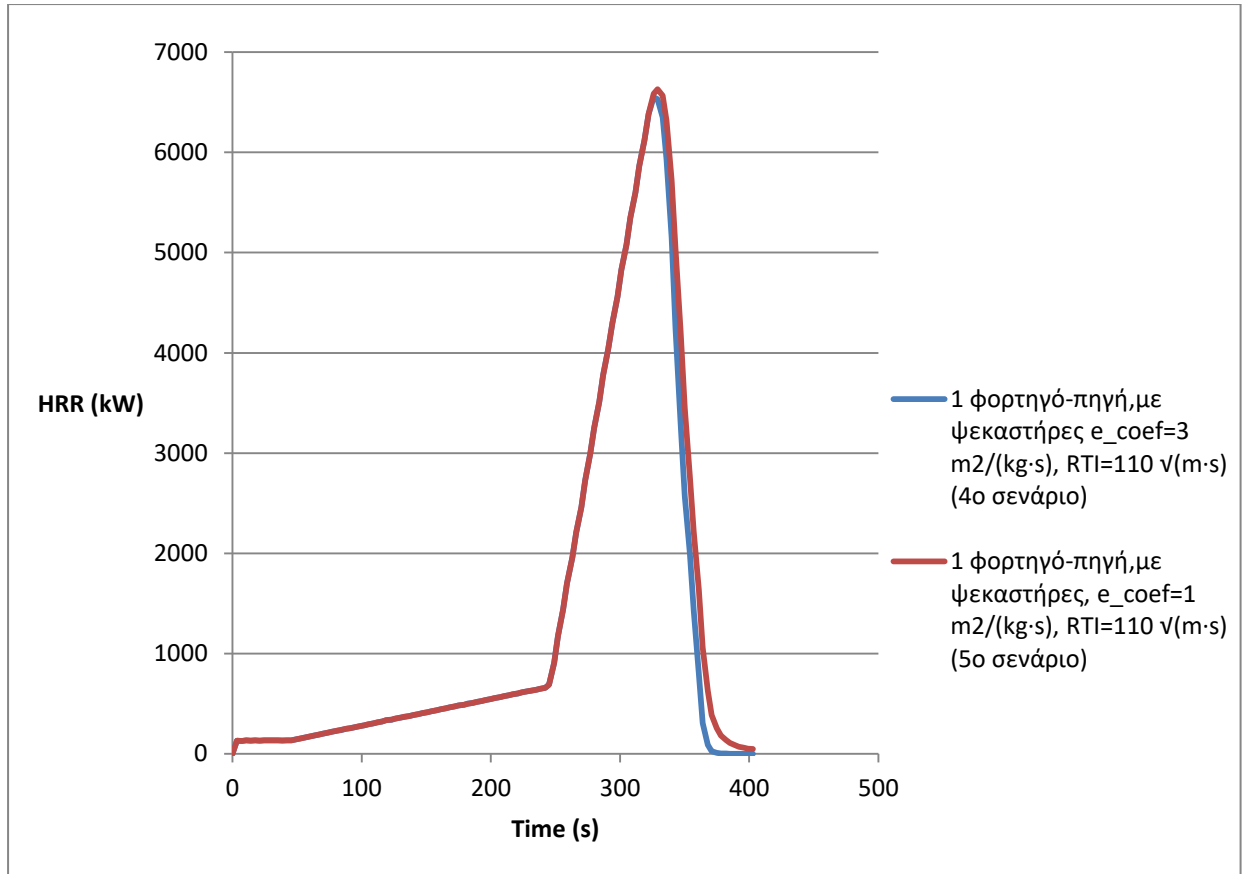


Εικόνα 44: Θερμοκρασιακή κατάσταση στο επίπεδο $z=3$ m την χρονική στιγμή $t=392.3$ s (4^ο σενάριο)

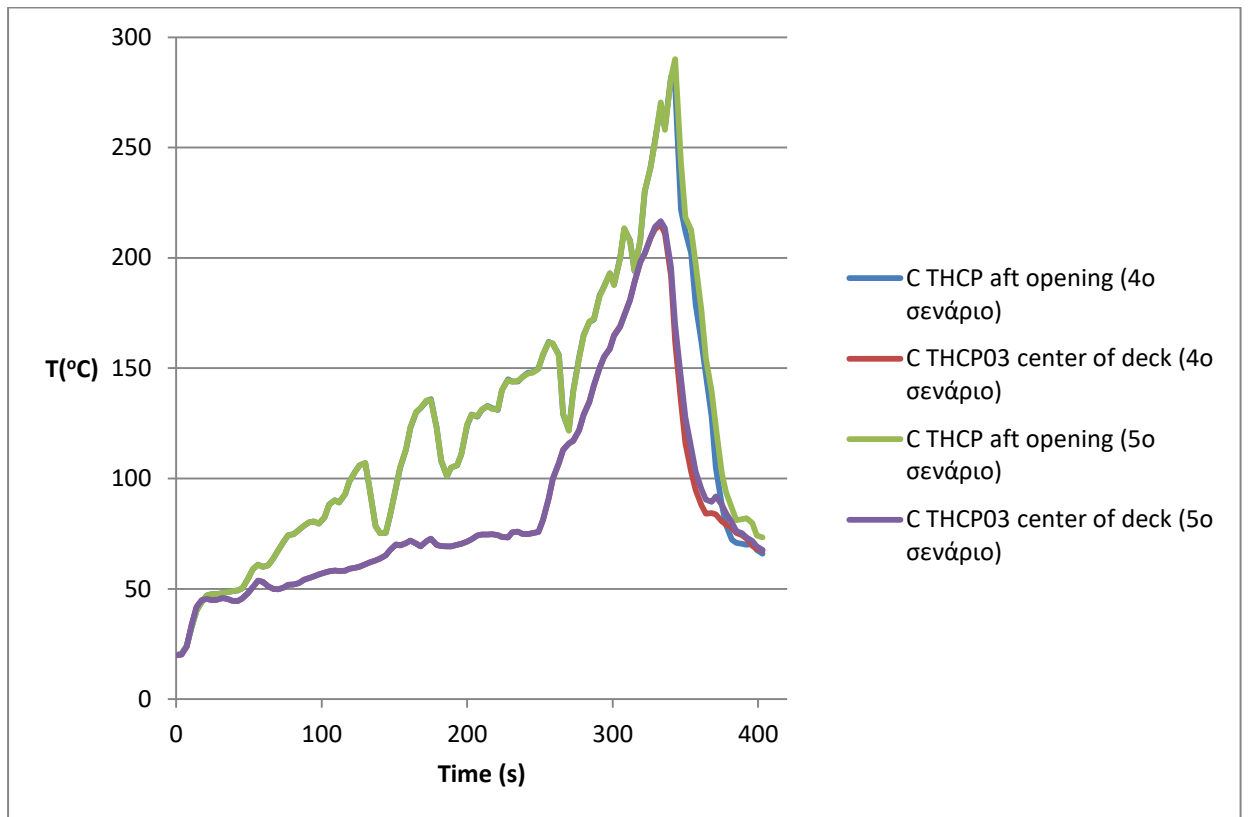
5.4.5 5^ο Σενάριο

Το 5^ο σενάριο εκτελέστηκε με το ίδιο μοντέλο με αυτό του 4^{ου}, με μόνη διαφορά ότι ο **extinguish coefficient** έλαβε την τιμή $1 \text{ m}^2/(\text{kg}\cdot\text{s})$. Ο σκοπός αυτής της προσομοίωσης είναι να ελεγχθεί η επιρροή της διαφορετικής τιμής αυτού του συντελεστή και στην περίπτωση όπου οι ψεκαστήρες παρουσιάζουν πιο αργή απόκριση έναντι της αναπτυσσόμενης πυρκαγιάς.

Σύμφωνα με τα διαγράμματα 9,10 τόσο η καμπύλη της χρονικής ιστορίας του HRR όσο και αυτής της θερμοκρασιακής κατάστασης παρουσιάζουν ελάχιστες διαφορές σε σχέση με τις αντίστοιχες του 4^{ου} σεναρίου, παρόλο που χρειάστηκαν να ενεργοποιηθούν 2 παραπάνω ψεκαστήρες (13 στο σύνολο, Εικόνα 45). Η παραδοχή αυτή αποδεικνύεται και από την μέτρηση του ολικού φορτίου θερμότητας και του HRR_{max} . Το πρώτο μετρήθηκε 559 MJ έναντι 526 MJ (διαφορά 33 MJ) ενώ ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας έφτασε μέχρι την τιμή 6631 kW έναντι 6551 kW (διαφορά 80 kW).

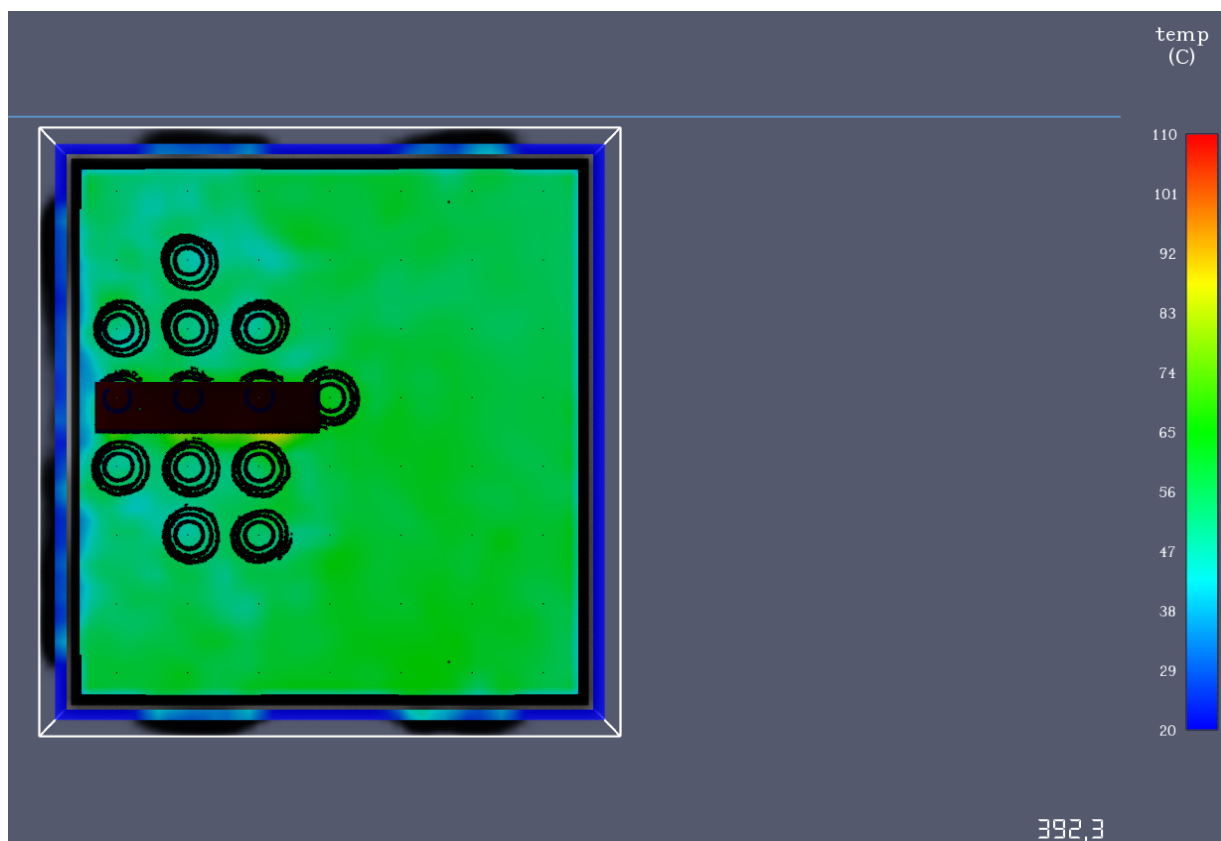


Διάγραμμα 9: Χρονική ιστορία HRR για το 5^ο σενάριο και σύγκριση του με το 4^ο



Διάγραμμα 10: Χρονική ιστορία θερμοκρασιών για το 5^ο σενάριο και σύγκριση με το 4^ο

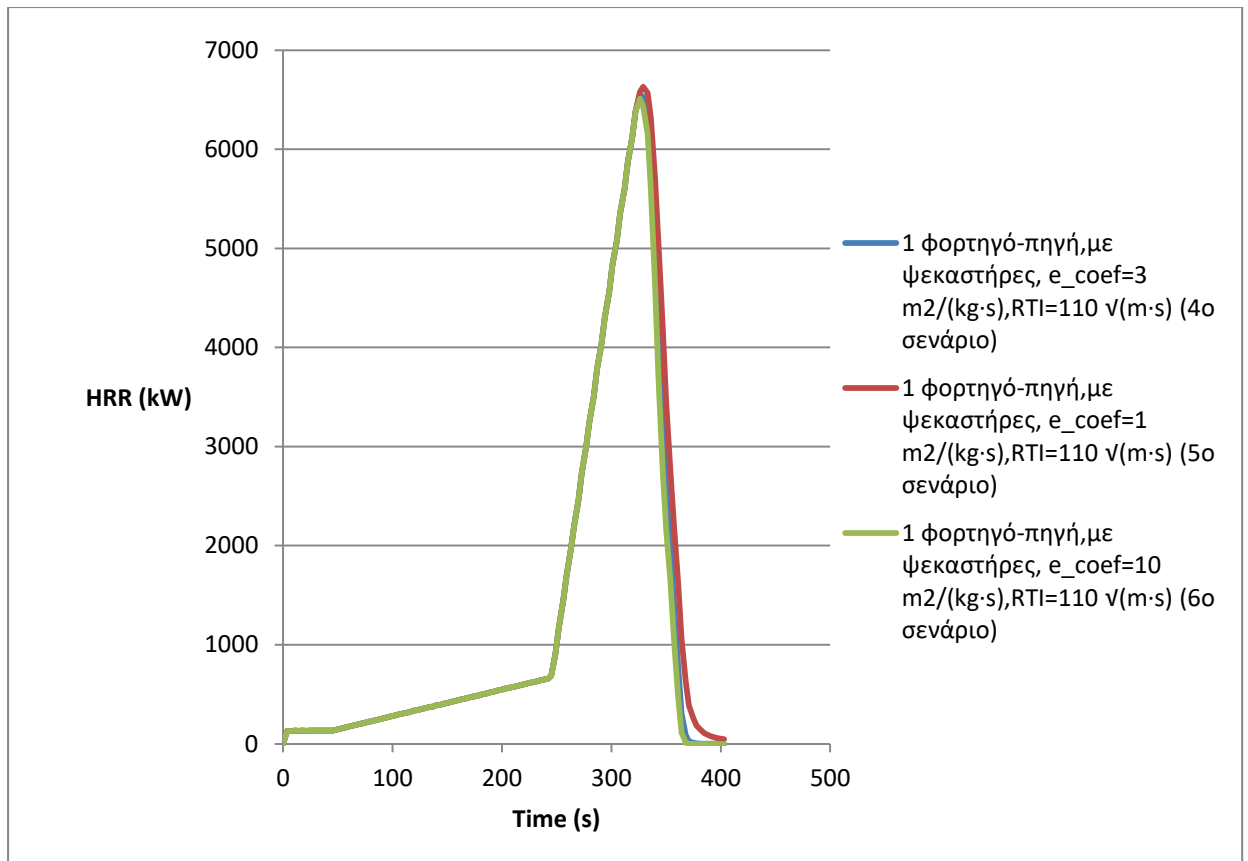
Μπορεί να σημειώνεται μια μικρή πτώση του ρυθμού κατάσβεσης όμως αυτή χαρακτηρίζεται ως αμελητέα κάτι που αποτυπώνεται και στις θερμοκρασίες του διαγράμματος 10, αφού οι καμπύλες μεταξύ των σεναρίων είναι σχεδόν ταυτόσημες. Η μικρή αυτή διαφορά στην επιρροή της αλλαγής τιμής του e_coef εντοπίζεται και στο γεγονός ότι όσο οι ψεκασθήρες αργούν να λειτουργήσουν τόσο η πυρκαγιά αναπτύσσεται περισσότερο και κατ' επέκταση αυξάνεται και η κλίμακα τιμών ενεργειακά. Αυτό συνεπάγεται ότι αναλογικά, μία αύξηση της τάξεως των 33 MJ έχει μικρότερο αντίκτυπο σε σχέση με περιπτώσεις όπου το RTI είναι μικρότερο (βλέπε σύγκριση σεναρίων 2,3).



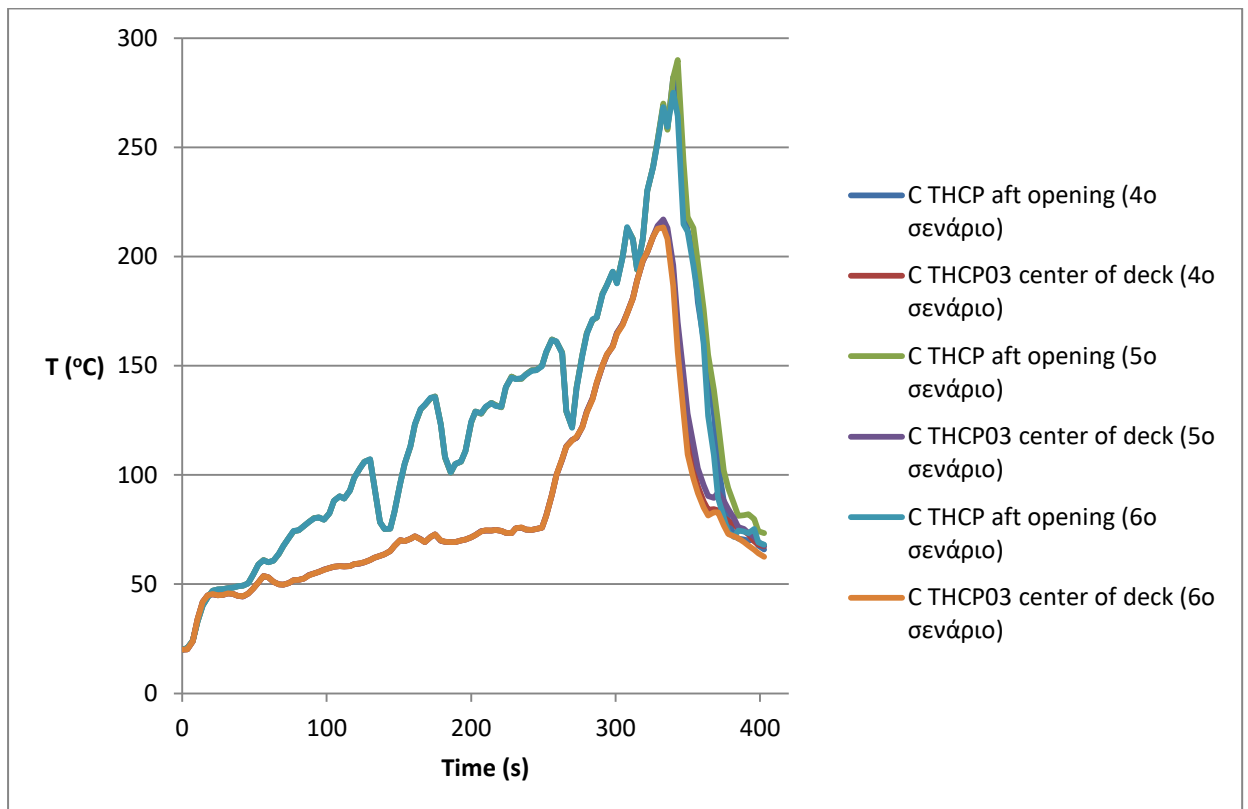
Εικόνα 45: Θερμοκρασιακή κατάσταση στο επίπεδο $z=3$ m την χρονική στιγμή $t=392.3$ s (5^ο σενάριο)

5.4.6 6^ο Σενάριο

Η εκτέλεση του 6^{ου} σεναρίου πραγματοποιήθηκε με σκοπό να εξεταστεί η επιρροή μίας μεγαλύτερης τιμής του **extinguish coefficient** και να συγκριθεί με αυτές των σεναρίων 4,5. Για τον λόγο αυτό, στην παρούσα προσομοίωση ο συντελεστής κατάσβεσης έλαβε την τιμή **10 $m^2/(kg \cdot s)$** ενώ οι υπόλοιπες παράμετροι έμειναν ως έχουν. Στο διάγραμμα 11 απεικονίζονται οι 3 χρονικές ιστορίες HRR με τις 3 διαφορετικές τιμές του e_coef : 1,3 και 10 $m^2/(kg \cdot s)$.



Διάγραμμα 11: Χρονική ιστορία HRR για το 6^ο σενάριο και σύγκριση με το 4^ο και το 5^ο

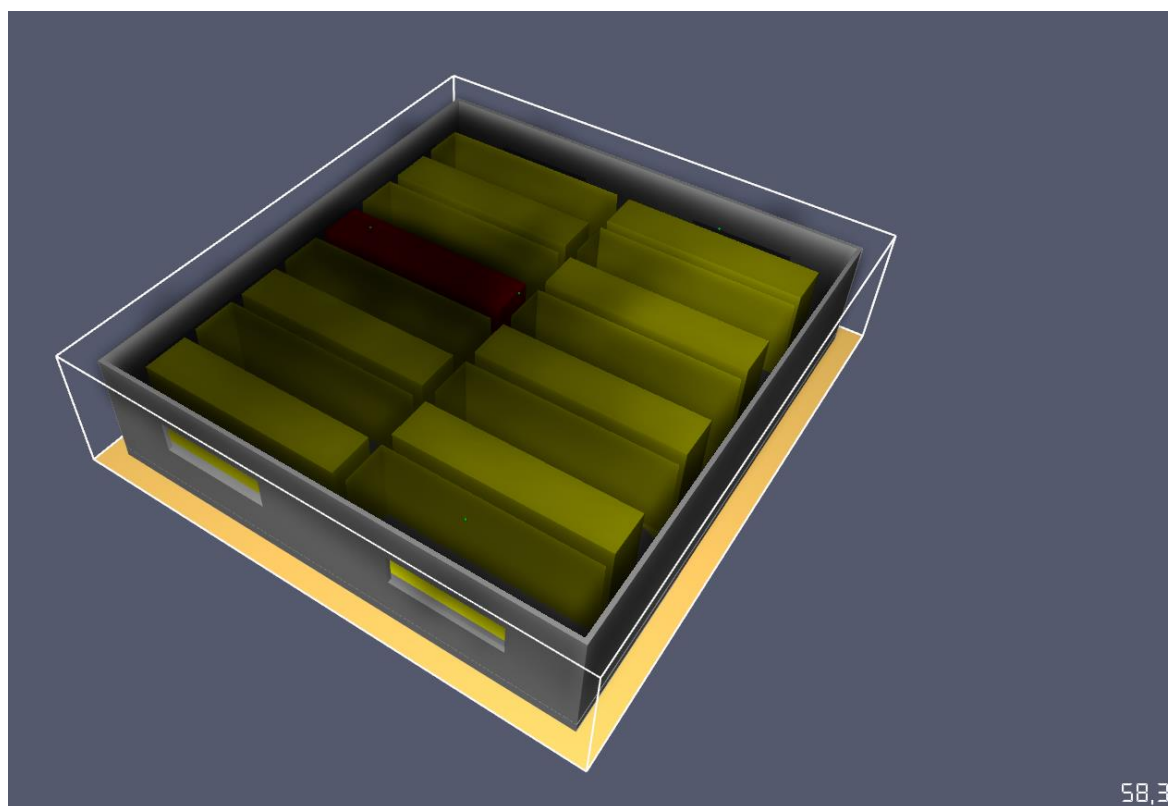


Διάγραμμα 12: Χρονική ιστορία θερμοκρασιών για το 6^ο σενάριο και σύγκριση με το 4^ο και το 5^ο

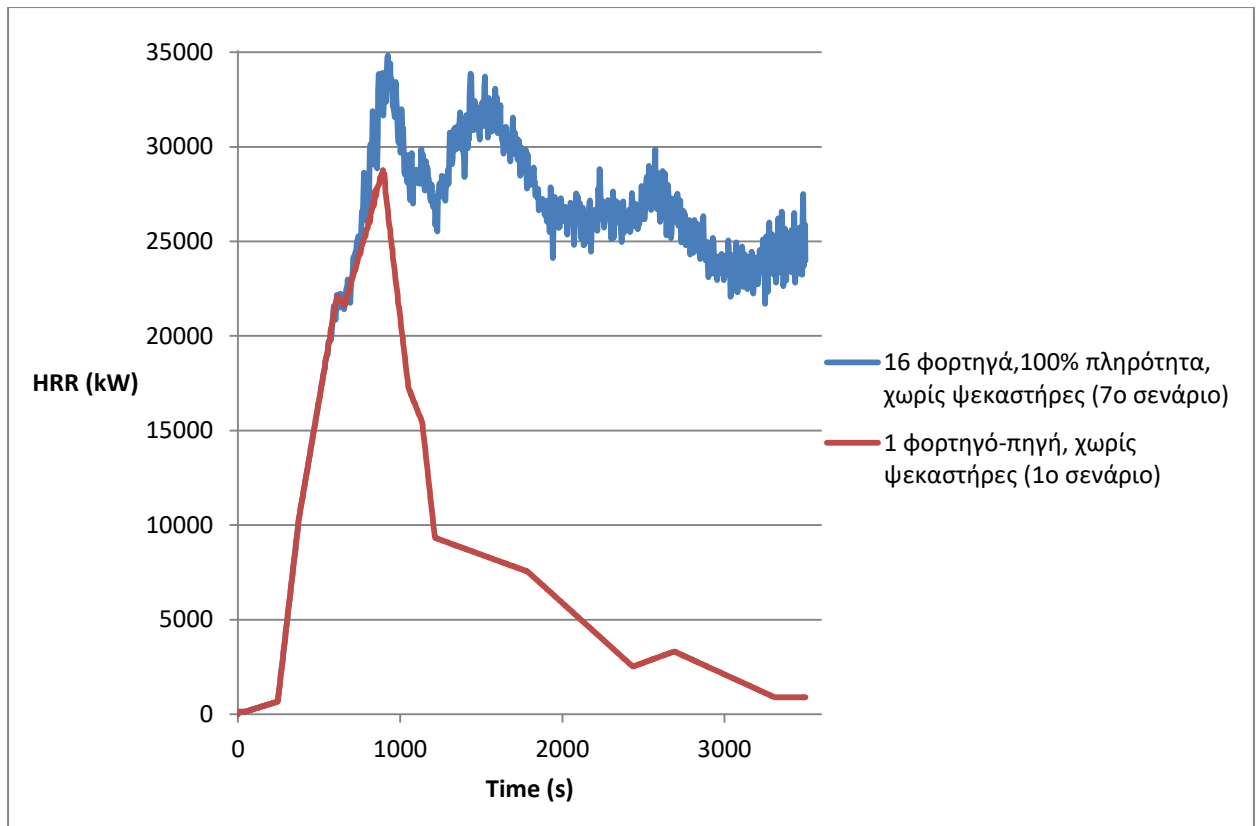
Σύμφωνα με αυτό φαίνεται η πορεία του ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας μέσα στον χρόνο για το 6^ο σενάριο να ταυτίζεται με αυτή του 4^{ου} όπως κατά συνέπεια συμβαίνει και με τις θερμοκρασίες (Διάγραμμα 12). Όπως έχει γίνει αντιληπτό από την ανάλυση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων, όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής κατάσβεσης τόσο πιο αποδοτικό είναι το σύστημα αυτόματων ψεκαστήρων. Δηλαδή ο ρυθμός καύσης του καυσίμου καθώς και η θερμοκρασία του παραγόμενου καπνού μειώνονται γρηγορότερα. Ωστόσο, όπως φαίνεται από τις καμπύλες για τις 3 διαφορετικές τιμές του e_coef του διαγράμματος 11, όσο μεγαλώνει ο αριθμός αυτός τόσο μειώνεται η αύξηση του ρυθμού κατάσβεσης. Με λίγα λόγια, η κόκκινη ($e_coef=1\text{ m}^2/(\text{kg}\cdot\text{s})$) με την μπλε ($e_coef=3\text{ m}^2/(\text{kg}\cdot\text{s})$) καμπύλη παρουσιάζουν μια διαφορά στα θερμικά τους αποτελέσματα, σε αντίθεση με την περίπτωση της μπλε με την πράσινη ($e_coef=10\text{ m}^2/(\text{kg}\cdot\text{s})$) που είναι σχεδόν ταυτόσημες παρόλο που η αύξηση του $e_coefficient$ είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με τις προηγούμενες δύο.

5.4.7 7^ο Σενάριο

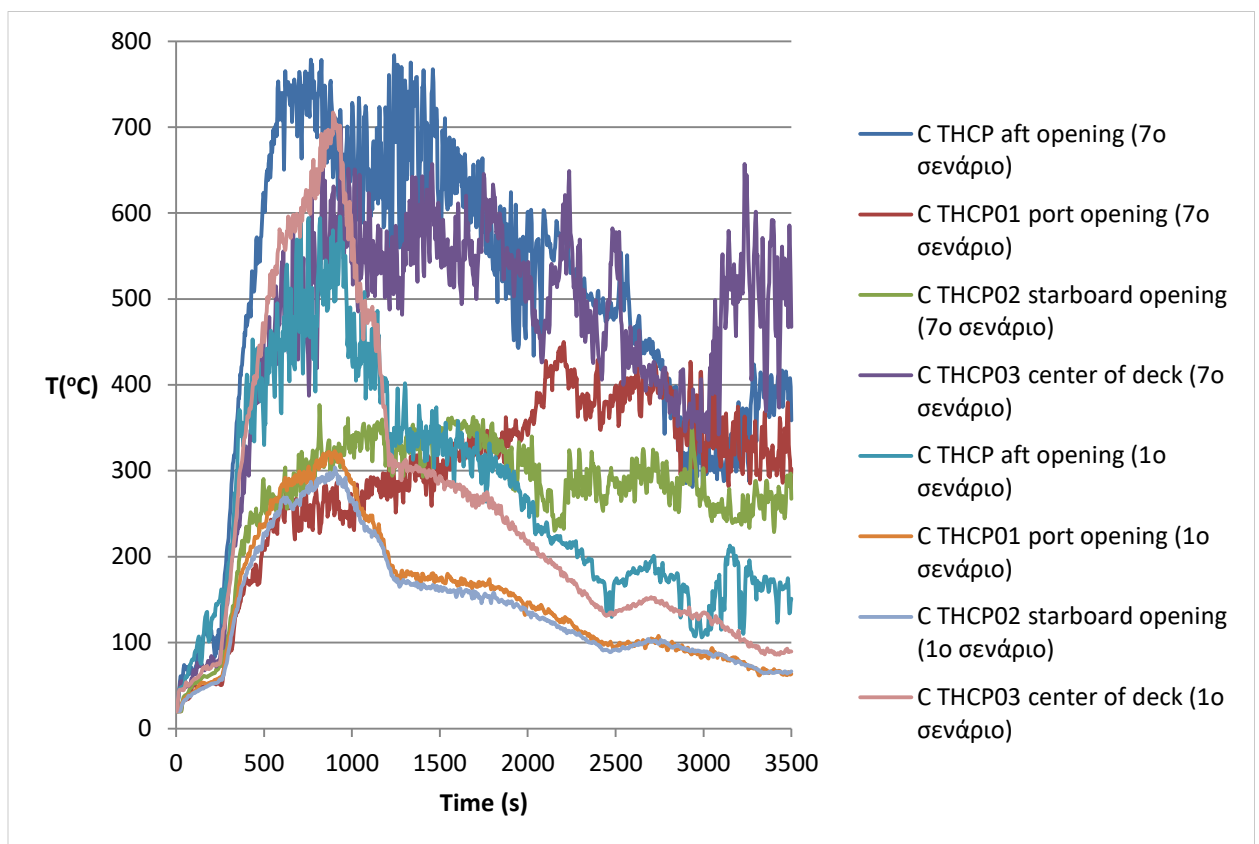
Το 7^ο σενάριο πραγματοποιήθηκε με διαφορετική διαρρύθμιση φορτηγών μέσα στον χώρο. Συγκεκριμένα, προστέθηκαν άλλα 15 φορτηγά (16 στο σύνολο) ώστε το κατάστρωμα να είναι 100 % πληρωμένο με οχήματα, όπως φαίνεται στην εικόνα 46.



Εικόνα 46: Πυρκαγιά σε κατάστρωμα με 100% πληρότητα σε φορτηγά



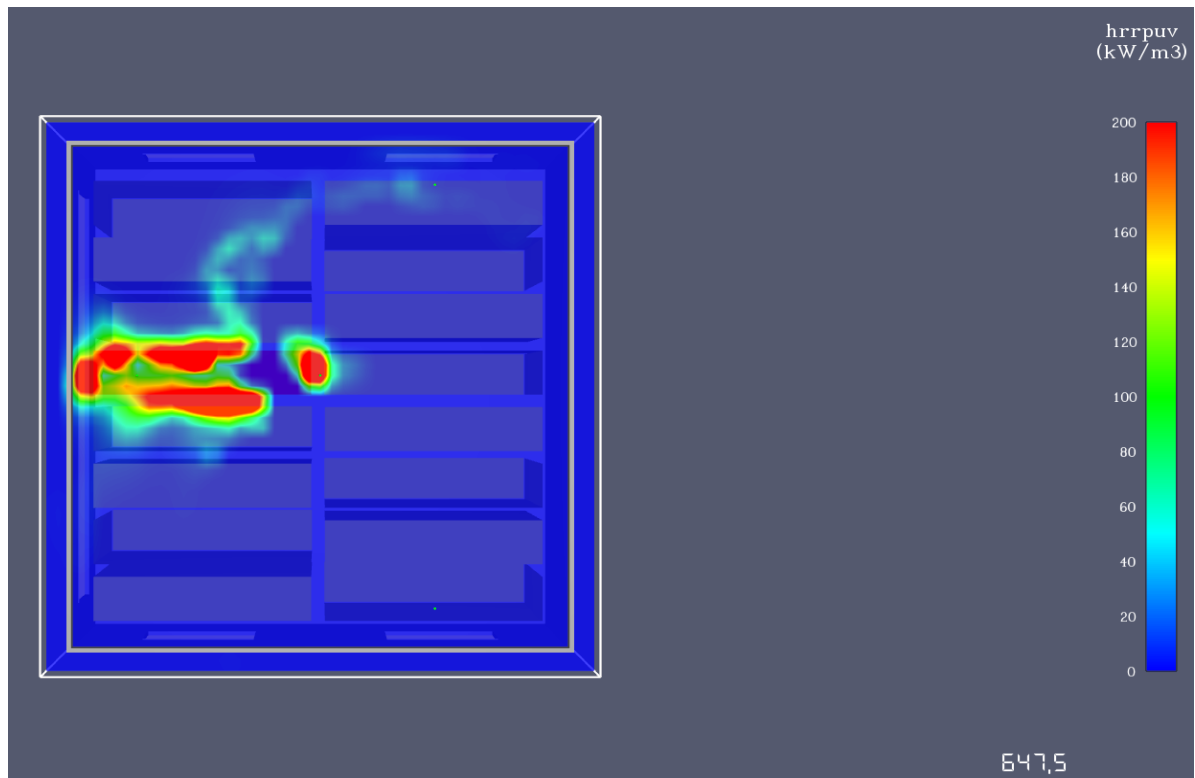
Διάγραμμα 13: Χρονική ιστορία HRR για το 7^ο σενάριο και σύγκριση του με το 1^ο



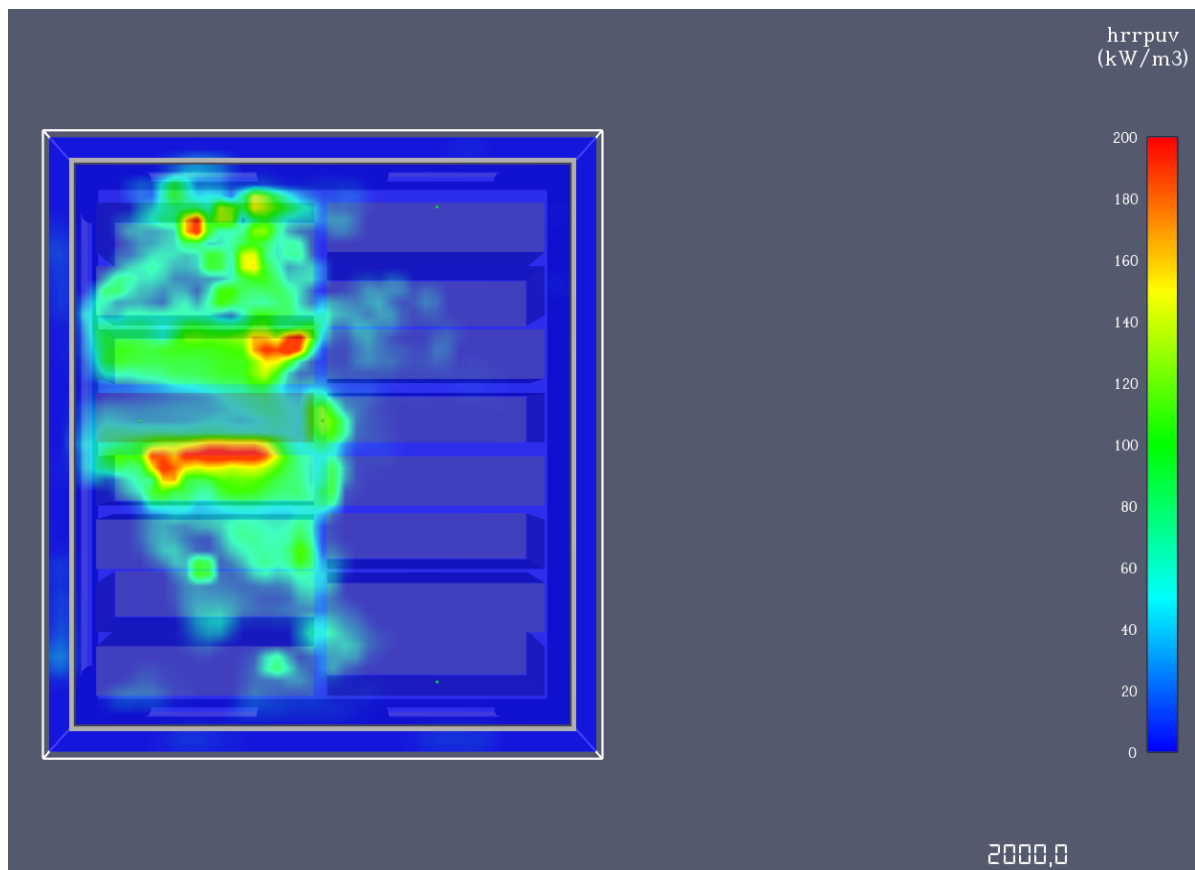
Διάγραμμα 14: Χρονική ιστορία θερμοκρασιών για το 7^ο σενάριο και σύγκριση με το 1^ο

Στην παρούσα προσομοίωση δεν χρησιμοποιήθηκε σύστημα κατάσβεσης, για αυτό και τα αποτελέσματα (διαγράμματα 13,14) της θα αποτελέσουν την βάση σύγκρισης για τα επερχόμενα σενάρια όπου θα τοποθετηθούν αυτόματα ψεκαστήρες.

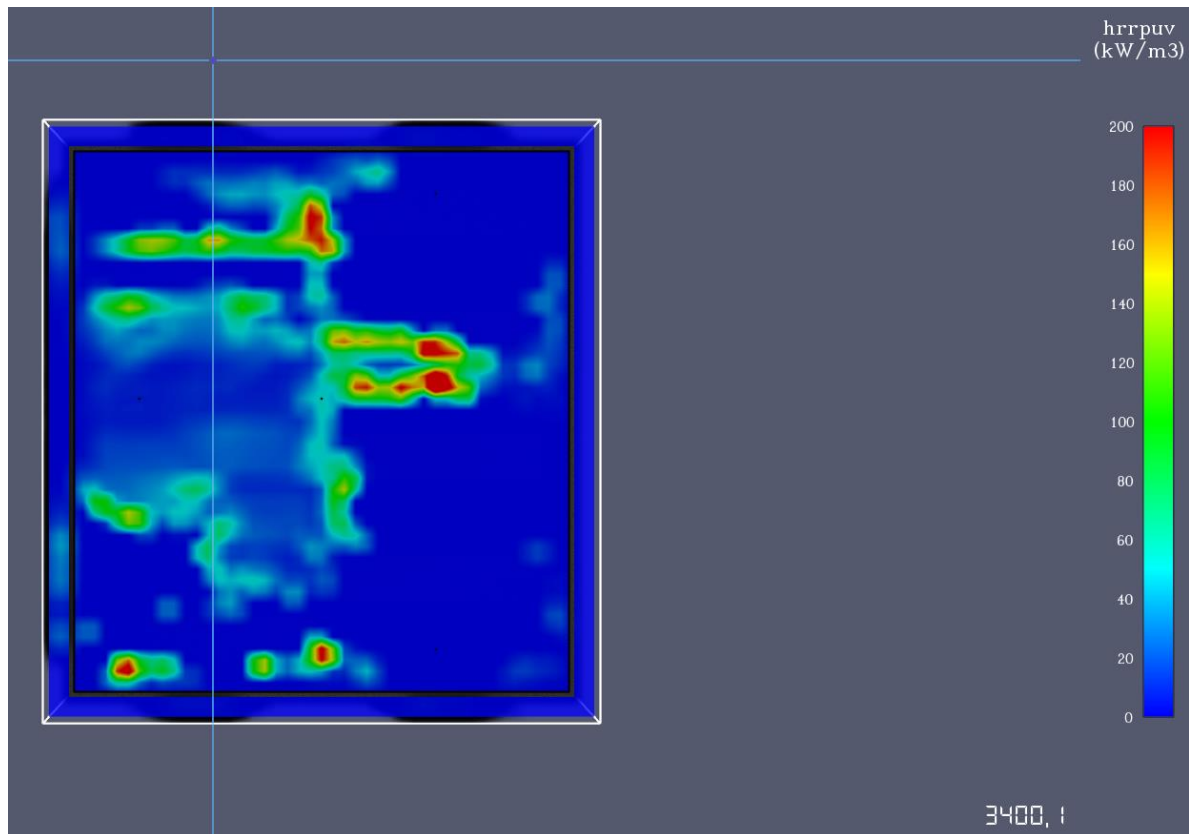
Σύμφωνα με το διάγραμμα 13, ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας σε γεμάτο κατάστρωμα παρουσιάζει αυξημένες τιμές συγκριτικά με την περίπτωση πυρκαγιάς ενός μόνο φορτηγού, φτάνοντας και μέγιστη τιμή έως και 35 MW. Η κατάσταση αυτή προκύπτει από το γεγονός ότι λόγω της πληρότητας του χώρου υπάρχει μονίμως διαθέσιμο καύσιμο (φορτηγά) το οποίο ανά πάσα στιγμή αναφλέγεται. Συγκεκριμένα, η φωτιά φαίνεται να έχει μία τυπική πορεία πυρκαγιάς 1 φορτηγού μέχρι περίπου τα 600 s, όπου σε εκείνο το σημείο αρχίζουν να αναφλέγονται τα φορτηγά γύρω από την πηγή (Εικόνα 46) και προκύπτει η περαιτέρω αύξηση του HRR χωρίς να φτάνει σε καταστολή μέσα στην 1 ώρα της προσομοίωσης. Στις εικόνες 47,48,49 αναπαριστάται ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας ανά μονάδα όγκου (Heat Release Rate Per Volume Area) στο επίπεδο $z=4.5$ m για δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές ($t=647.5$ s, $t=2000$ s και $t=3400$ s) από τις οποίες διακρίνεται ποιες επιφάνειες φορτηγών αναφλέγονται και με ποια ακολουθία. Ωστόσο, στο διάγραμμα 13 παρατηρούνται και κάποιες αυξομειώσεις στις τιμές του HRR οι οποίες οφείλονται στον συνδυασμό της περιορισμένης παροχής αέρα και της μεγάλης ποσότητας καυσίμου μέσα στον χώρο. Αναλυτικότερα, η απουσία ελεύθερου χώρου μέσα στο κατάστρωμα λόγω της 100% πληρότητας του σε συνδυασμό με τις μικρές αποστάσεις μεταξύ των φορτηγών καθώς και η κατεύθυνση του παραγόμενου καπνού προς τα ανοίγματα περιορίζουν την εισαγωγή και την ύπαρξη οξυγόνου για την καύση. Το γεγονός αυτό οδηγεί το HRR σε απότομη μείωση (έως και τοπικό σβήσιμο φωτιάς) μέχρι να αυξηθεί ξανά λόγω της ανάφλεξης των κοντινών φορτηγών. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ανάπτυξη πυρκαγιάς μέσα στον χώρο με μέσο HRR τα 27 MW και τις θερμοκρασίες των θερμών αερίων να κινούνται και αυτές σε υψηλά επίπεδα με την μέγιστη τιμή να φτάνει σχεδόν τους 800 °C στο ταβάνι κοντά στο πυρμναίο άνοιγμα (Διάγραμμα 14), δημιουργώντας έτσι μια γενικότερα δυσμενέστερη κατάσταση.



Εικόνα 47: HRRPUV στο επίπεδο $z=4.5$ m την χρονική στιγμή $t=647.5$ s



Εικόνα 48: HRRPUV στο επίπεδο $z=4.5$ m την χρονική στιγμή $t=2000$ s



Εικόνα 49: HRRPUV στο επίπεδο $z=4.5$ m την χρονική στιγμή $t=3400.1$ s

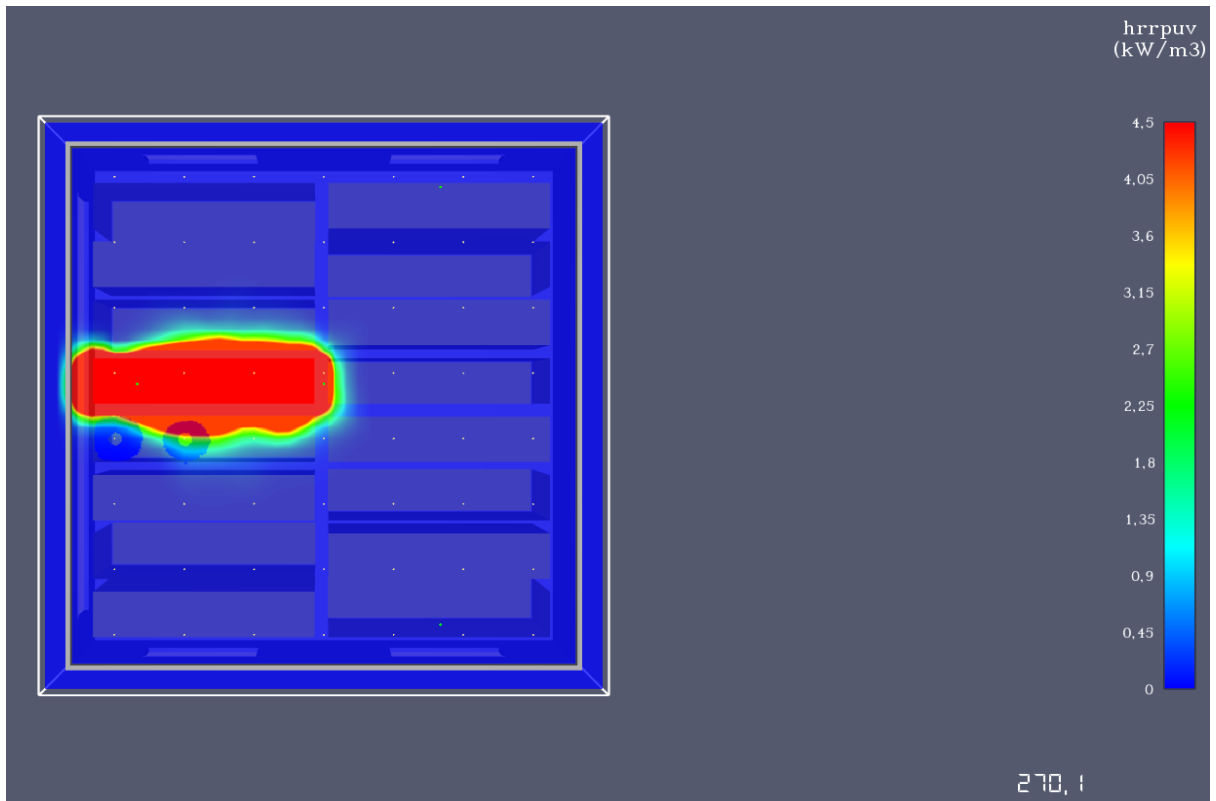
5.4.8 8^ο Σενάριο

Για την εκτέλεση του 8^{ου} σεναρίου το μοντέλο διατηρήθηκε ίδιο με προηγουμένως, με την διαφορά ότι τοποθετήθηκε σύστημα αυτόματων ψεκαστήρων ώστε να μελετηθεί η ικανότητα του συστήματος να ανταποκριθεί σε μία δυσκολότερη κατάσταση. Οι ψεκαστές στήθηκαν με τις ίδιες προδιαγραφές με αυτές του 2^{ου} σεναρίου, δηλαδή:

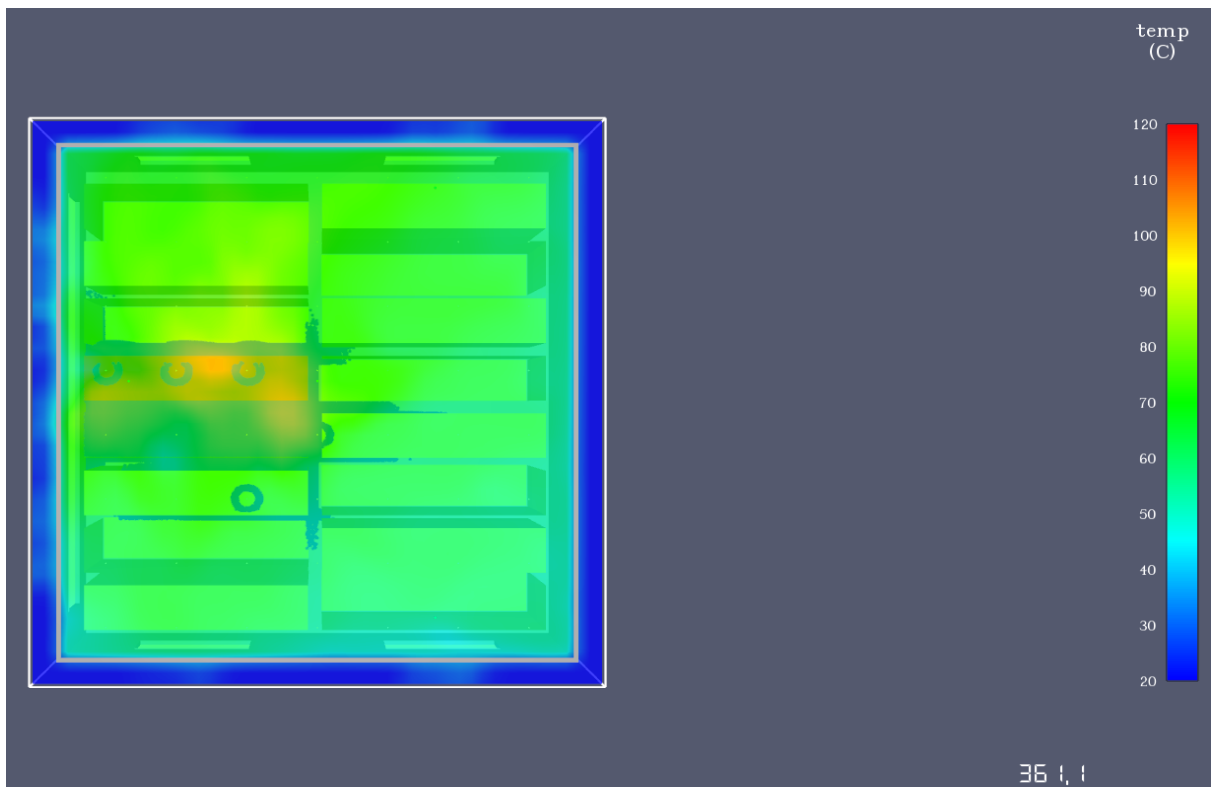
- $e_coef=3 \text{ m}^2/(\text{kg}\cdot\text{s})$
- $RTI=33 \sqrt{(m \cdot s)}$
- Activation temperature=130 °C

Η συγκεκριμένη επιλογή των τιμών για τον e_coef και το RTI θεωρήθηκε καταλληλότερη βασίστηκε στα αποτελέσματα των σεναρίων 1-6. Η λειτουργία τους ξεκινάει την χρονική στιγμή $t=270$ s και συγκεκριμένα από τους ψεκαστές που βρίσκονται πάνω από το φορτηγό ακριβώς δεξιά στην πηγή (Εικόνα 50). Ο λόγος ενεργοποίησης αυτών σε πρώτο στάδιο είναι ότι εξαιτίας της μη ύπαρξης ελεύθερου χώρου, τα θερμά αέρια από την πηγή εγκλωβίζονται στο ενδιάμεσο κενό και κατευθύνονται προς τα πάνω θερμαίνοντας τους αισθητήρες. Στην συνέχεια χρειάστηκε να ανοίξουν και υπόλοιποι ψεκαστές, φτάνοντας τους 8 στο σύνολο. Σύμφωνα με το διάγραμμα 15 το HRR μειώνεται με πολύ γρήγορο ρυθμό από την στιγμή έναρξης του ψεκασμού, οδηγώντας τελικώς την πυρκαγιά σε πλήρη καταστολή μέσα σε χρονικό διάστημα 90 s χωρίς να έχει αναπτυχθεί μεγάλο φορτίο θερμότητας. Κατά συνέπεια, ίδια κατάσταση προκύπτει και με την θερμοκρασιακή

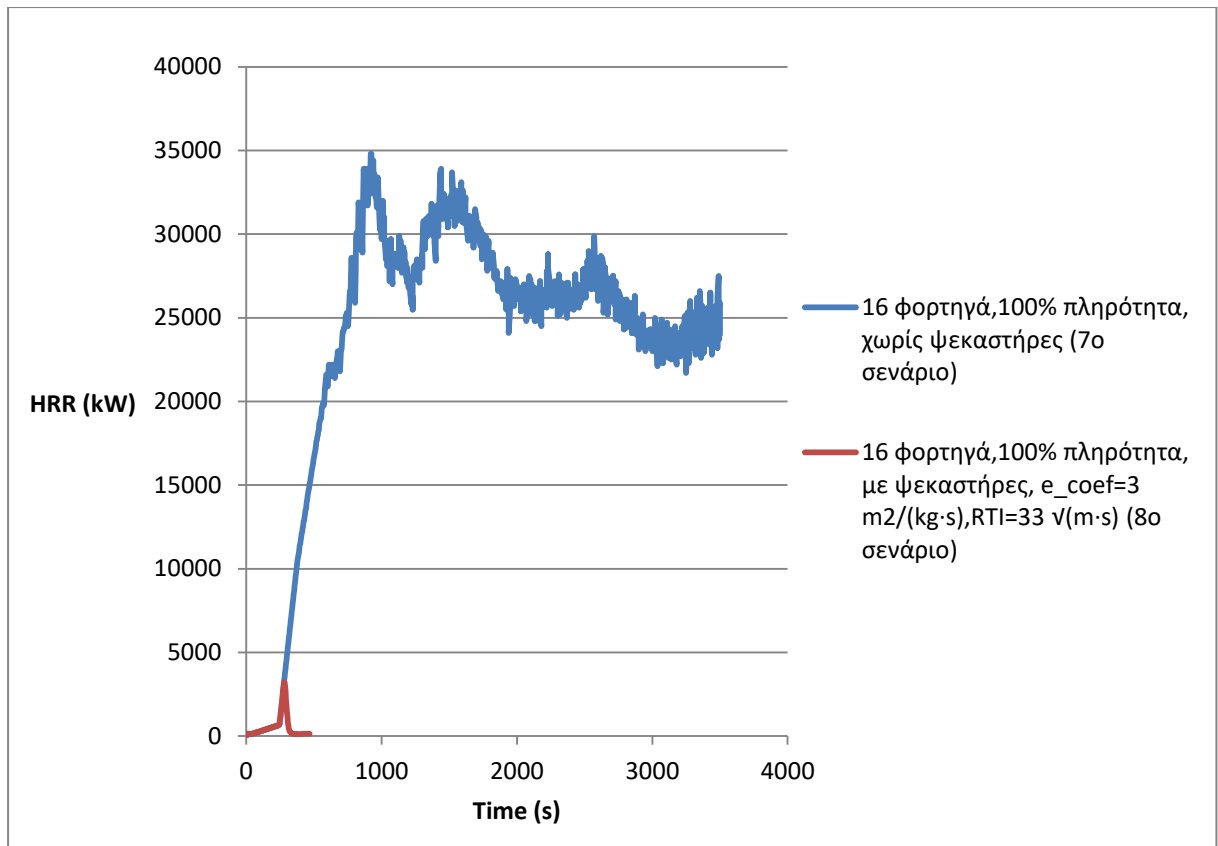
κατάσταση του χώρου, η οποία φαίνεται να κινείται σε πολύ ικανοποιητικά επίπεδα χάρις την επιρροή του νερού (Διάγραμμα 16, Εικόνα 51).



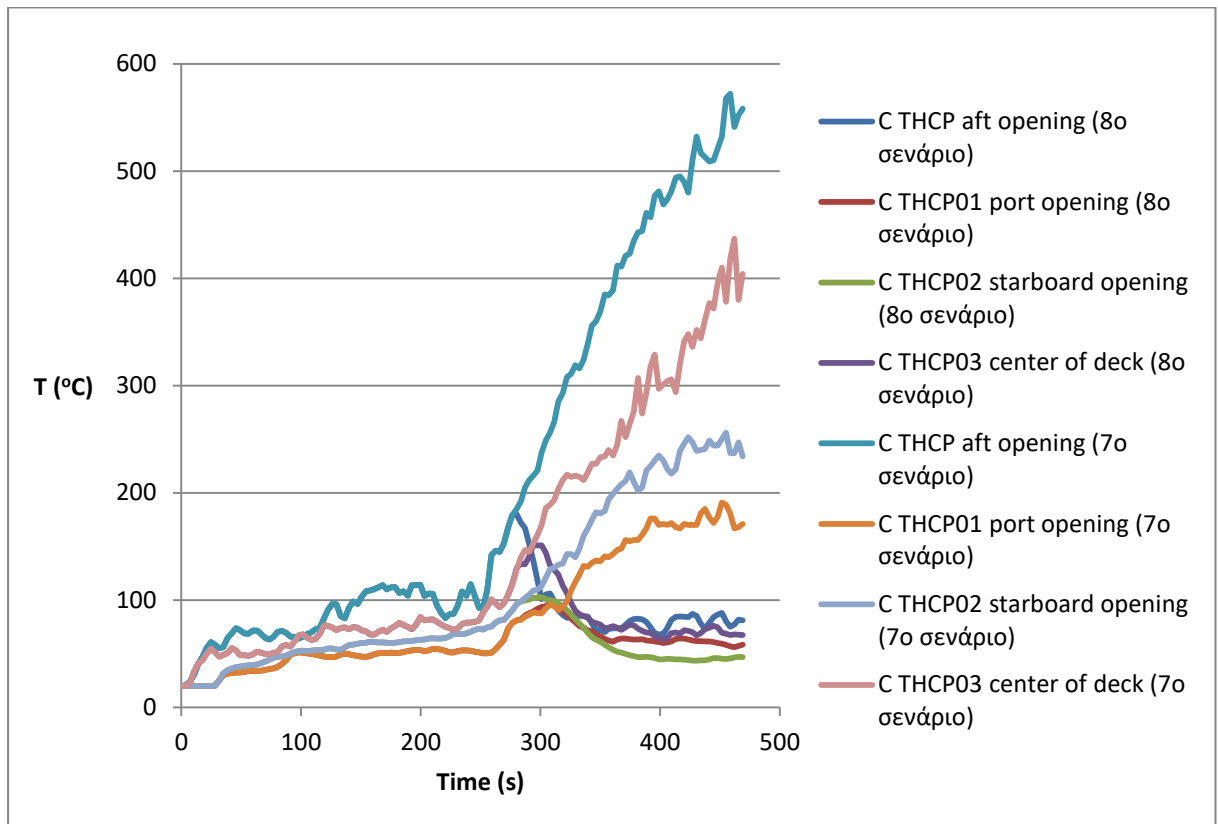
Εικόνα 50: HRRPUV στο επίπεδο $z=4.5$ m την χρονική στιγμή $t=270.1$ s που ενεργοποιούνται οι 1^{οι} ψεκαστήρες



Εικόνα 51: Θερμοκρασιακή κατάσταση στο επίπεδο $z=5$ m την χρονική στιγμή $t=361.1$ s (8^ο σενάριο)



Διάγραμμα 15: Χρονική ιστορία HRR για το 8^ο σενάριο και σύγκριση του με το 7^ο

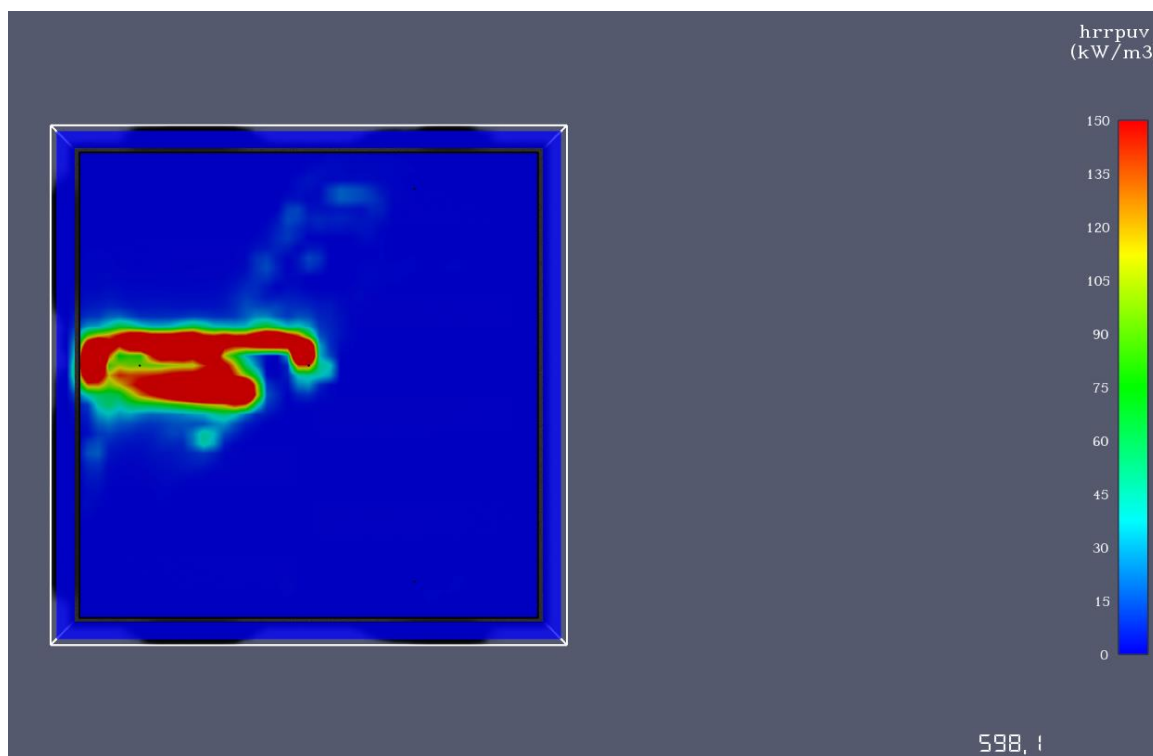


Διάγραμμα 16: Χρονική ιστορία θερμοκρασιών για το 8^ο σενάριο και σύγκριση με το 7^ο

Η γρήγορη ενεργοποίηση και ανταπόκριση των ψεκαστών δεν αφήνει περιθώρια στο να αναπτυχθούν θερμοκρασίες αερίων που να φτάσουν το όριο των 400 °C άρα και να αναφλεχτούν άλλα φορτηγά, κάτι που αποδεικνύεται και από την εικόνα 50 και το διάγραμμα 16. Η παραδοχή αυτή σε συνδυασμό με τα θερμικά αποτελέσματα, καθιστούν την λειτουργία του συστήματος κατάσβεσης άκρως αποδοτική για την παρούσα προσομοίωση.

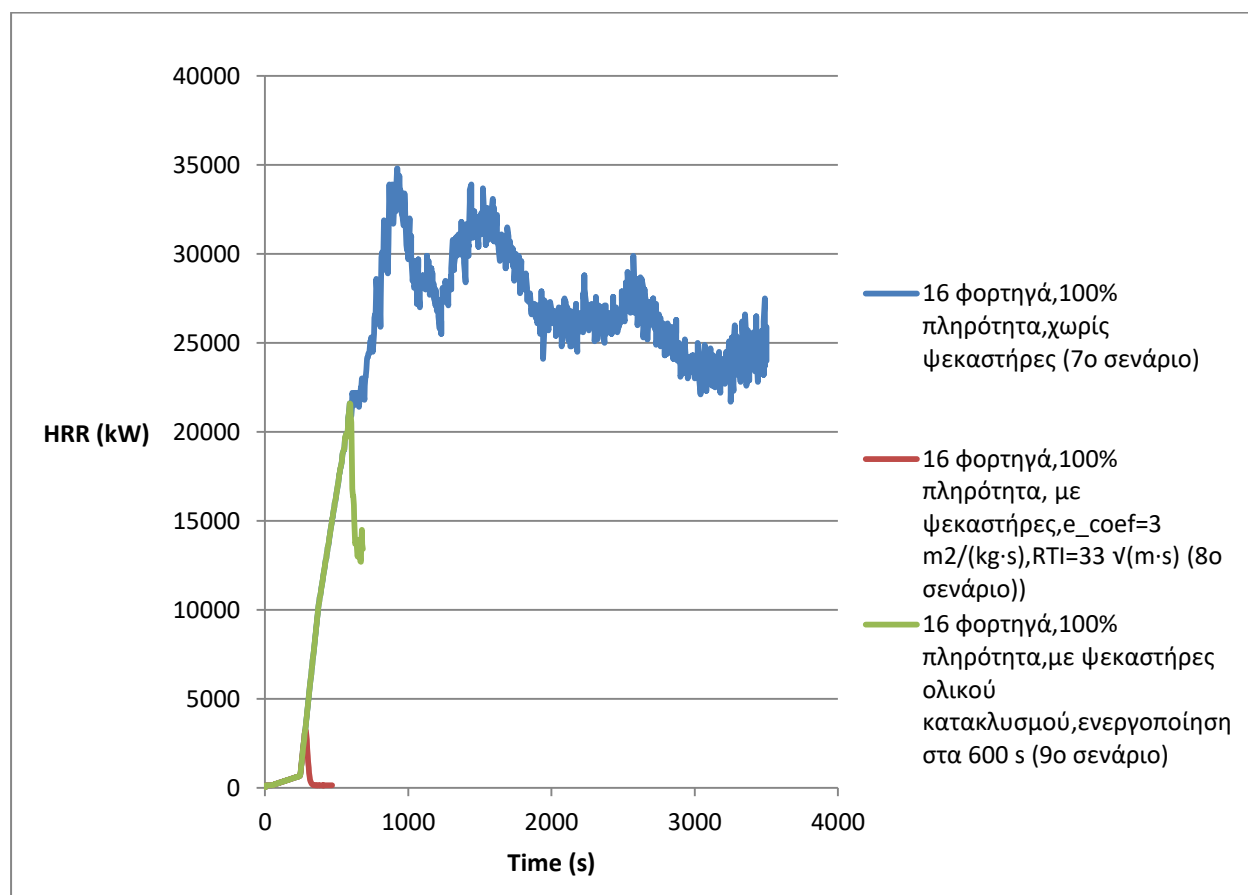
5.4.9 9^ο Σενάριο

Το 9^ο σενάριο πραγματοποιήθηκε με το μοντέλο του 7^{ου} και του 8^{ου} σεναρίου, με την διαφορά ότι εξετάστηκε η χρήση ενός διαφορετικού συστήματος κατάσβεσης. Πρόκειται για το σύστημα ψεκασμού ολικού κατακλυσμού νερού (water deluge system), στο οποίο οι ψεκαστές βρίσκονται στην ίδια διάταξη με τα προηγούμενα παραδείγματα όπως το ίδιο συμβαίνει και με την παροχή ψεκασμού του νερού. Η βασική διαφορά εντοπίζεται στην διαδικασία ενεργοποίησης. Οι κεφαλές των ψεκαστών είναι μόνιμα ανοιχτές με αποτέλεσμα όταν το σύστημα ενεργοποιείται να απελευθερώνεται νερό από όλους ταυτόχρονα (ανοίγουν όλοι ταυτόχρονα). Για τον λόγο αυτό, η έναρξη λειτουργίας τους δεν εναποθέεται στον ορισμό μίας συγκεκριμένης θερμοκρασίας αλλά σε μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή κατά την οποία ενεργοποιούνται όλοι οι ψεκαστές χειροκίνητα από κάποιο μέλος του πληρώματος. Με λίγα λόγια, στο παρόν σενάριο (όπως και στο 10^ο στην συνέχεια) εξετάζεται και η χειροκίνητη ενεργοποίηση του συστήματος κατάσβεσης, συνυπολογίζοντας για την επιλογή της χρονικής στιγμής έναρξης λειτουργίας και την αργή αντίδραση του πληρώματος (χρόνος ανίχνευσης της πυρκαγιάς). Για την παρούσα προσομοίωση, η στιγμή αυτή ρυθμίστηκε να είναι τα 600 s (=10 min). Ο extinguish coefficient επιλέχθηκε να ισούται με 3 m²/(kg·s).



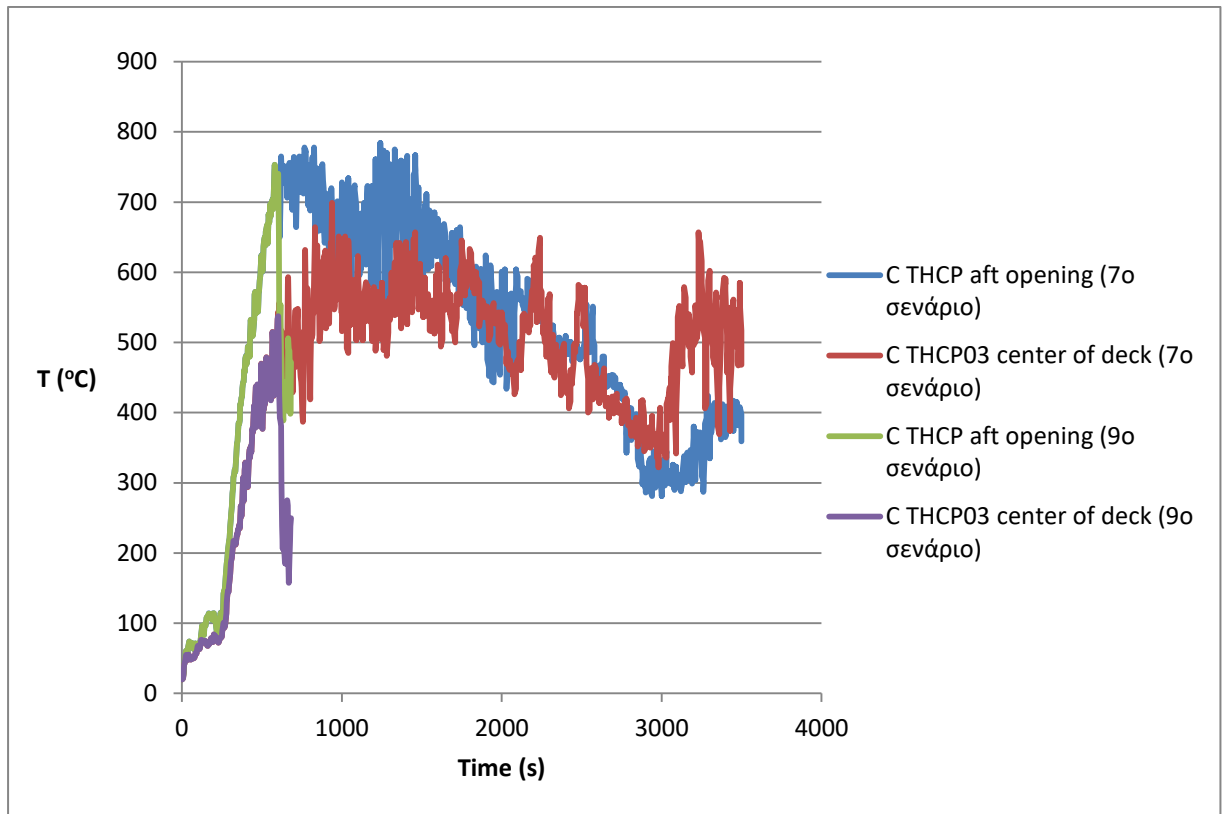
Εικόνα 52: HRRPUV στο επίπεδο z=4.5 m την χρονική στιγμή t=598.1 s

Στο στιγμιότυπο της εικόνας 52 αναπαριστάται η κατάσταση του HRR την χρονική στιγμή λίγο πριν ξεκινήσει ο ψεκασμός του νερού ($t=598.1$ s) όπου φαίνεται ότι μόλις ξεκινάει η ανάφλεξη των γύρω φορτηγών. Λόγω του πολύ μεγάλου υπολογιστικού χρόνου που απαιτούνταν (το πρόγραμμα απαιτείται να διαβάσει την ροή του νερού για όλους τους sprinklers ταυτόχρονα), η προσομοίωση εκτελέστηκε μέχρι τα 682.5 s. Για την χρονική διάρκεια αυτή και σύμφωνα με το διάγραμμα 17, φαίνεται ότι το νερό έχει επιρροή πάνω στις επιφάνειες καύσης και ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας παρουσιάζει πτωτική πορεία. Στα 82.5 s λειτουργίας του συστήματος, το HRR παρουσιάζει μείωση κατά 8191 Kw, δηλαδή 37.9% (από 21606 kW στα 13415 kW), η οποία συνοδεύεται και από κάποιες μικρές αυξομειώσεις λόγω των τοπικών αναφλέξεων των γύρω φορτηγών που είχαν ξεκινήσει.

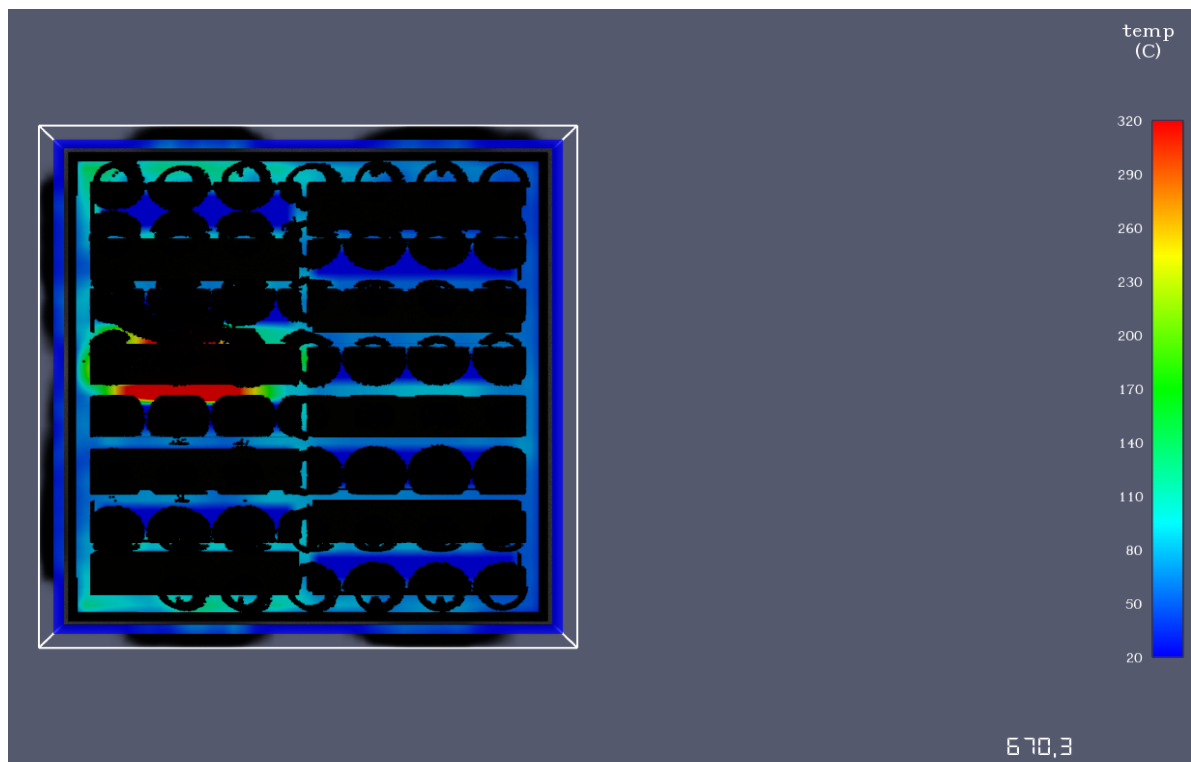


Διάγραμμα 17: Χρονική ιστορία HRR για το 9^ο σενάριο και σύγκριση με το 7^ο και το 8^ο

Η ίδια λογική ακολουθείται και στις θερμοκρασίες των αερίων όπως φαίνεται στο διάγραμμα 18, όπου μπορεί η μέγιστη θερμοκρασία να φτάνει μέχρι την αντίστοιχη του 7^{ου} σεναρίου (760 °C), όμως στην συνέχεια ακολουθεί η απότομη πτώση όπως διαπιστώνεται και από το στιγμιότυπο στο επίπεδο $z=3$ m της εικόνας 53.



Διάγραμμα 18: Χρονική ιστορία θερμοκρασιών για το 9^ο σενάριο και σύγκριση με το 7^ο

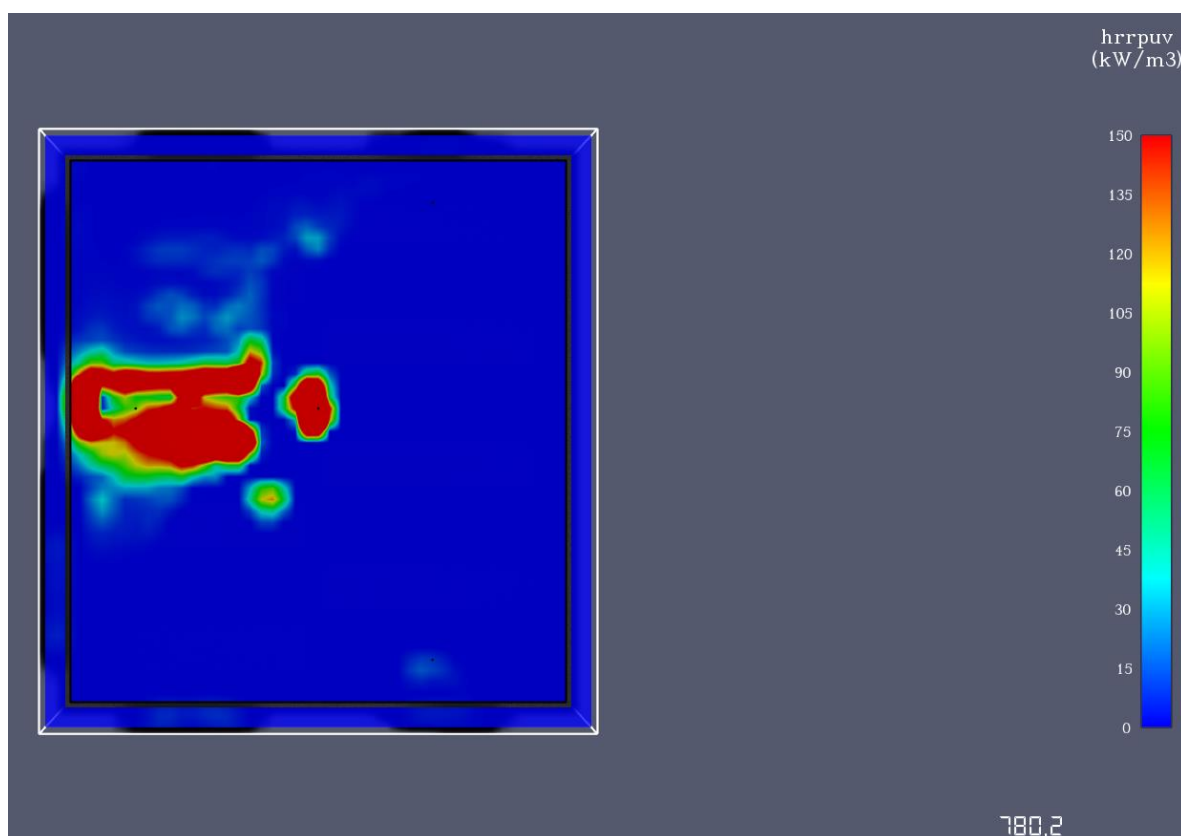


Εικόνα 53: Θερμοκρασιακή κατάσταση στο επίπεδο z=3 m την χρονική στιγμή t=670.3 s (9^ο σενάριο)

Παρόλο που προκύπτει ένα ποσοστό κατάσβεσης της αναπτυσσόμενης πυρκαγιάς, το οποίο οφείλεται κυρίως στις μεγάλες ποσότητες νερού που απελευθερώνονται από την αρχή λόγω του μηχανισμού του συστήματος ολικού κατακλυσμού, η κατάσταση χαρακτηρίζεται αρκετά δυσμενέστερη σε σχέση με το 8^ο σενάριο. Αυτό συμβαίνει διότι με την καθυστέρηση ενεργοποίησης των ψεκαστήρων (>300 s), έχει ήδη παραχθεί μεγάλο φορτίο θερμότητας (5.6 GJ έναντι 244 MJ του 8^{ου} σεναρίου) το οποίο μπορεί να αποβεί ζημιόγono για τον χώρο.

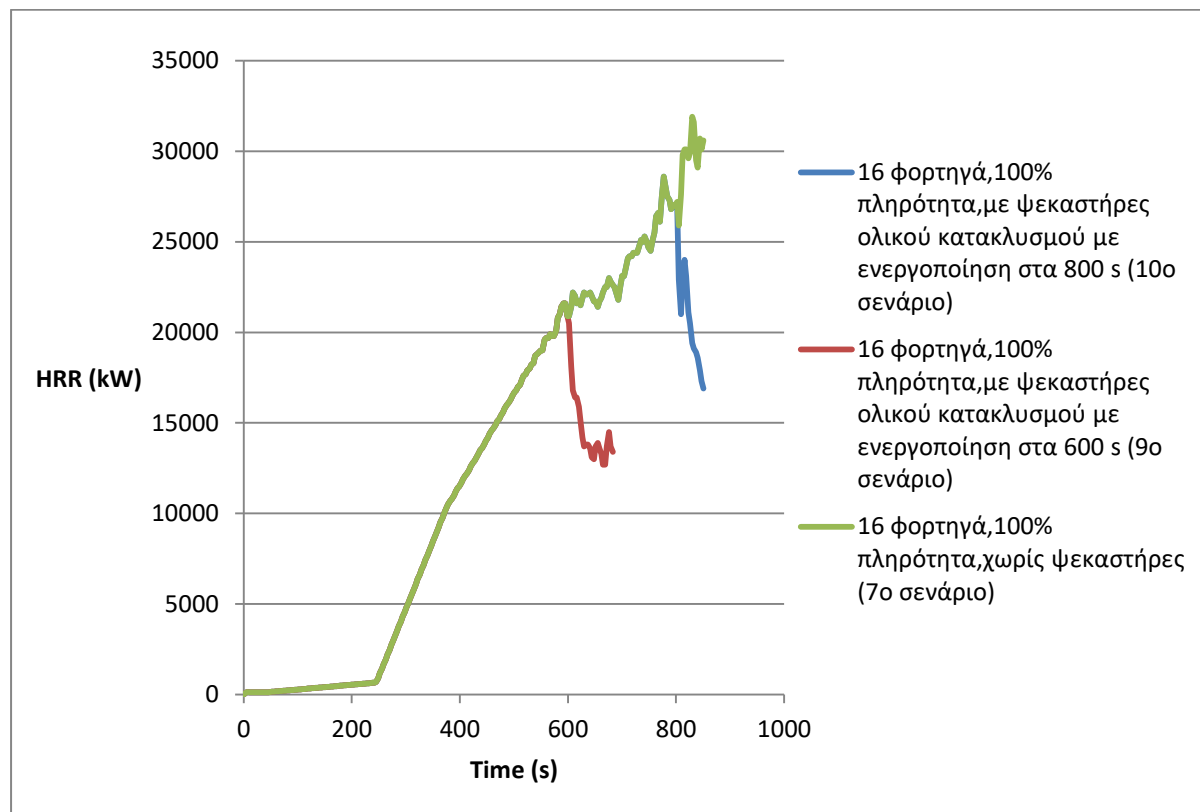
5.4.10 10^ο Σενάριο

Το 10^ο σενάριο πραγματοποιήθηκε με το ίδιο μοντέλο και σύστημα κατάσβεσης με αυτό του 9^{ου}, με μοναδική διαφορά ότι οι ψεκαστές ρυθμίστηκαν να ενεργοποιούνται αργότερα, και συγκεκριμένα στα 800 s. Σε αυτόν τον επιπλέον χρόνο η ανάφλεξη των γύρω φορτηγών έχει προχωρήσει περισσότερο όπως φαίνεται και από το στιγμιότυπο της πορείας του HRRPUV την χρονική στιγμή $t=780$ s (εικόνα 54). Η παρούσα προσομοίωση εκτελέστηκε μέχρι και τα 850.5 s καθώς προέκυψε το ίδιο πρόβλημα υπολογιστικού χρόνου που αναφέρθηκε στην προηγούμενη προσομοίωση.



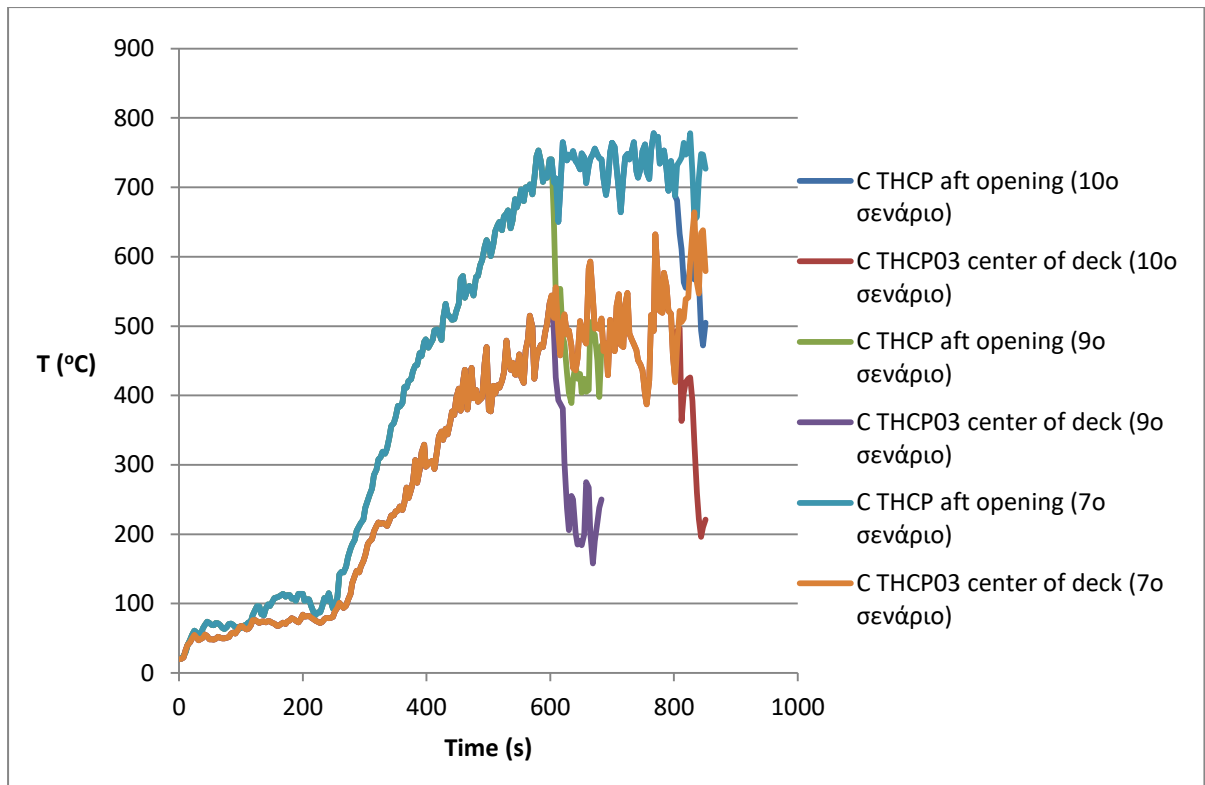
Εικόνα 54: HRRPUV στο επίπεδο $z=4.5$ m την χρονική στιγμή $t=780.2$ s

Για αυτά τα 50.5 μελέτης της λειτουργίας των ψεκασθήρων φαίνεται ότι ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας παρουσιάζει πτωτική πορεία και η φωτιά και ο παραγόμενος καπνός έρχονται σε κάποια ύφεση. Συγκεκριμένα, το HRR από την μέγιστη τιμή των 27000 kW μειώνεται στα 16900 kW (διαφορά 10100 kW), δηλαδή μείωση κατά 37.4% στον ρυθμό καύσης των επιφανειών.

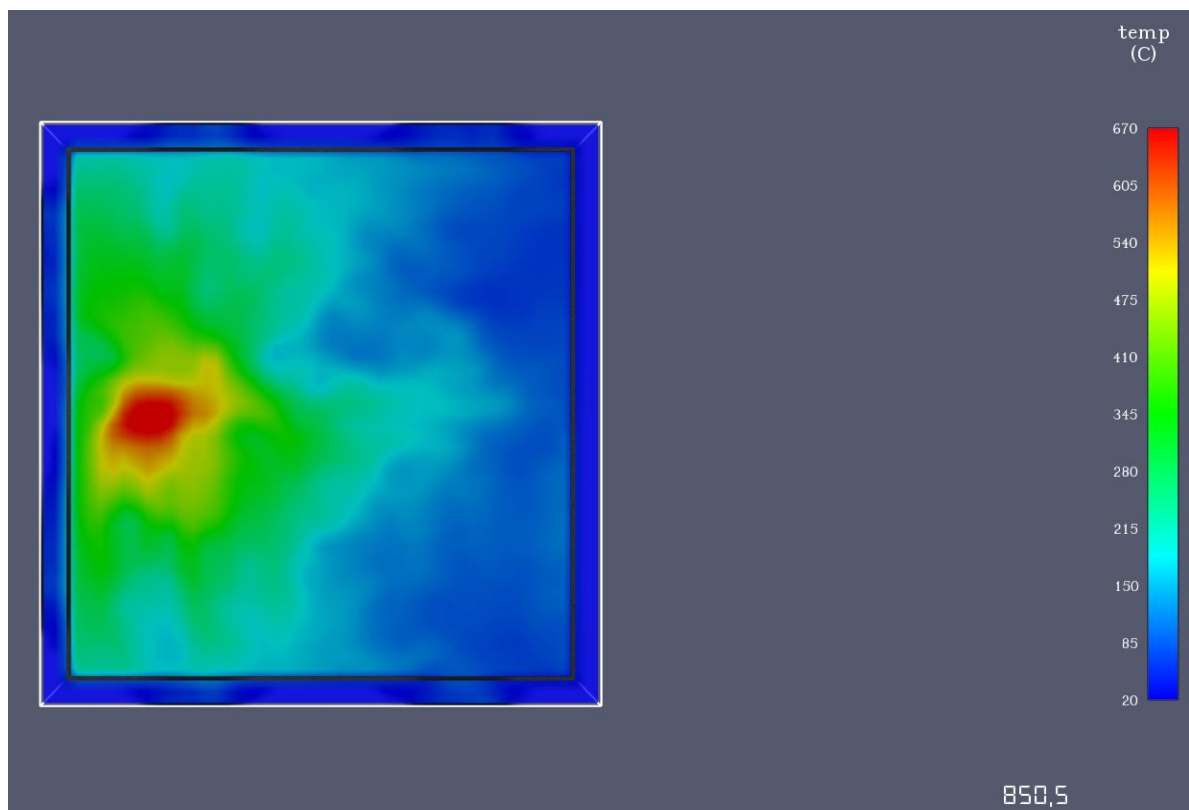


Διάγραμμα 19: Χρονική ιστορία HRR για το 10^ο σενάριο και σύγκριση με το 7^ο και το 9^ο

Στο ίδιο πλαίσιο κινείται και η θερμοκρασιακή κατάσταση των αερίων όπου σύμφωνα με το διάγραμμα 20, που απεικονίζεται η πορεία της στα πιο δυσμενή σημεία (aft opening και center of deck δηλαδή πάνω από την πηγή), φαίνεται οι θερμοκρασίες να μειώνονται λόγω του ψεκασμού του νερού και να φτάνουν περίπου τα επίπεδα του 9^{ου} σεναρίου. Ωστόσο, η καθυστέρηση και η αργή ανταπόκριση των ψεκασθήρων δημιουργεί μία κατάσταση αρκετά δυσκολότερη καθώς μέχρι την στιγμή ενεργοποίησης, η πυρκαγιά έχει περάσει στο στάδιο fire growth και έτσι το HRR έχει αυξηθεί αρκετά και κατ' επέκταση έχει παραχθεί μεγαλύτερη ποσότητα θερμότητας. Το γεγονός αυτό καθιστά το έργο των ψεκασθήρων ακόμα δυσκολότερο καθώς απαιτείται και περισσότερος χρόνος για κατάσβεση μέχρι τα ασφαλή επίπεδα και μεγαλύτερες ποσότητες νερού ενώ επίσης καλούνται να αντιμετωπίσουν και την ταυτόχρονη ανάφλεξη των υπόλοιπων φορτηγών (μεγαλύτερη καύση καυσίμου). Επιπλέον, υπάρχει ακόμα και ο κίνδυνος η κατάσταση να οδηγηθεί σε μη ελέγξιμη αν δεν υπάρχουν τα απαιτούμενα αυτά περιθώρια χρόνου ή αν οι τοπικές αναφλέξεις είναι ισχυρότερες από τον ρυθμό κατάσβεσης. Στην εικόνα 55, που παρουσιάζεται η θερμοκρασιακή κατάσταση του καταστρώματος στο επίπεδο z=5 m την χρονική στιγμή t=850.5 s (ταβάνι), φαίνεται ότι παραμένουν κάποιες υψηλές θερμοκρασίες οι οποίες μπορούν να αποβούν επικίνδυνες.



Διάγραμμα 20: Χρονική ιστορία θερμοκρασιών για το 10^ο σενάριο και σύγκριση με το 7^ο και το 9^ο



Εικόνα 55: Θερμοκρασιακή κατάσταση στο επίπεδο z=5 m την χρονική στιγμή t=850.5 s (10^ο σενάριο)

6. Συμπεράσματα-Παρατηρήσεις

Στον πίνακα 12 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά κάποια βασικά στοιχεία των αποτελεσμάτων για κάθε σενάριο ξεχωριστά. Τα στοιχεία αυτά βοηθούν στην εύκολη σύγκριση, κατανόηση και παρατήρηση των αποτελεσμάτων και είναι τα:

- HRR_{max} : Μέγιστη τιμή του ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας που προέκυψε στην προσομοίωση (η τιμή του HRR κατά την χρονική στιγμή έναρξης λειτουργίας των sprinklers)
- T_{max} : Μέγιστη θερμοκρασία που προέκυψε στην προσομοίωση
- Φορτίο πυρκαγιάς: συνολική θερμότητα που απελευθερώθηκε στον χρόνο της προσομοίωσης
- $t_{activation}$: Χρονική στιγμή ενεργοποίησης των ψεκαστήρων
- $N_{sprinklers}$: Συνολικός αριθμός ψεκαστήρων που ενεργοποιήθηκαν
- Ποσοστιαστικότητα: Ποσοστό μείωσης του HRR_{max} μετά από 30 s και 60 s λειτουργίας των ψεκαστήρων (Ποσοστό αποτελεσματικότητας ψεκαστήρων)

	HRR_{max} (kW)	T_{max} (°C)	Φορτίο Πυρκαγιάς (MJ)	$t_{activation}$ (s)	$N_{sprinklers}$	Παποτελεσματικότητας
1° Σενάριο	28783.197	717	27900	-	-	-
2° Σενάριο	3332.5	173	271	280	3	82.9% σε 30 s 93.5% σε 60 s
3° Σενάριο	3520	175	339	280	4	53.4% σε 30 s 85% σε 60 s
4° Σενάριο	6551	281.5	526	325.7	11	78.1% σε 30 s 100% σε 60 s
5° Σενάριο	6631	290	559	325.7	13	66.6% σε 30 s 98.4% σε 60 s
6° Σενάριο	6510	275	513	325.7	13	83.6% σε 30 s 100% σε 60 s
7° Σενάριο	34833.136	772.5	82800	-	-	-
8° Σενάριο	3221.3795	180	244	270	8	89.4% σε 30 s 95.7% σε 60 s
9° Σενάριο	21605.934	740	5600	600	56	36.6% σε 30 s 38.4% σε 60 s
10° Σενάριο	27000	778	10200	800	56	28.1% σε 30 s 37.4% σε 51 s

Πίνακας 12: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών στοιχείων των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων

Η μέγιστη τιμή του HRR (HRR_{max}) στις προσομοιώσεις με σύστημα κατάσβεσης εντοπίζεται την χρονική στιγμή ενεργοποίησης των sprinklers καθώς από εκείνη την στιγμή και μετά αρχίζει να μειώνεται. Με το μέγεθος Ποσοστιαστικότητα, περιγράφεται τι ποσοστό του HRR_{max} έχει μειωθεί μετά από 30 και 60 s λειτουργίας των ψεκαστήρων. Με λίγα λόγια, υπολογίζεται για όλα τα σενάρια πόσο έχει μειωθεί το HRR σε χρόνους $t=30$ και 60 s από την έναρξη λειτουργίας των ψεκαστήρων. Μοναδική εξαίρεση αποτελεί το 10° σενάριο, του

οποίου ο υπολογιστικός χρόνος για την εξαγωγή αποτελεσμάτων ήταν πολύ μεγάλος και έτσι ήταν εφικτό να πραγματοποιηθεί προσομοίωση μέχρι την χρονική στιγμή 851 s (δηλαδή 51 s λειτουργίας των sprinklers). Έτσι, το $P_{\text{αποτελεσματικότητας}}$ υπολογίστηκε για χρόνους 30 και 51 s.

Σημειώνεται ότι η μέγιστη θερμοκρασία (T_{max}) παρατηρείται στο ταβάνι του καταστρώματος, δηλαδή στα επίπεδα $z=4.8$ m έως $z=5$ m, για όλα τα σενάρια. Επίσης, αναφέρεται ότι η συνολική παραγόμενη θερμότητα μετρήθηκε για την χρονική διάρκεια που εκτελέστηκε η κάθε προσομοίωση και υπολογίστηκε μέσω της μέτρησης του συνολικού εμβαδού του αντίστοιχου διαγράμματος της χρονικής ιστορίας του HRR.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που καταγράφηκαν και σχολιάστηκαν παραπάνω, οδηγούμαστε σε συμπεράσματα πολύ χρήσιμα για την μελέτη. Βέβαια, υπάρχει αρκετός χώρος για εκτέλεση προσομοιώσεων με μεγαλύτερη ποικιλία στις παραμέτρους και ακρίβεια στους υπολογισμούς, ώστε οι παρατηρήσεις να θεωρούνται πιο ασφαλείς και βάσιμες καθώς οι τεράστιοι χρόνοι υπολογισμού, ιδιαίτερα λόγω της παρουσίας ψεκαστήρων, απαιτούσαν μεγάλους χρόνους υπολογισμού για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Ωστόσο, η μελέτη αυτή κάνει ένα βήμα προς την αναγνώριση των βασικών παραμέτρων των συστημάτων κατάσβεσης με ψεκαστήρες, ως προς την επιρροή και την επάρκεια που παρουσιάζουν στην κατάσβεση πυρκαγιάς σε ένα κατάστρωμα οχημάτων. Επιπλέον, η μελέτη αυτή βοηθά και στην περεταίρω κατανόηση των συστημάτων ψεκαστήρων και των αντίστοιχων παραμέτρων τους ως προς την χρήση τους στο λογισμικό FDS. Στόχος είναι η κατανόηση του προβλήματος και η αναζήτηση ενός βέλτιστου συστήματος πυρόσβεσης για τον συγκεκριμένο τύπο πλοίων, ώστε να μειωθούν οι συνέπειες και η έκταση των ατυχημάτων, που περιλαμβάνουν ανθρώπινες απώλειες, οικονομικές και οικολογικές καταστροφές.

Οι παράμετροι που μελετήθηκαν μπορούν να χωριστούν σε 3 κατηγορίες. Οι δύο από αυτές που είναι και οι κυριότερες, είναι ο συντελεστής κατάσβεσης (extinguish coefficient), με εξέταση διάφορων τιμών ως προς την επιρροή του στην πυρκαγιά μέσα στο λογισμικό FDS, και ο χρόνος ενεργοποίησης των ψεκαστήρων με εξέταση τιμών του δείκτη RTI (Response Time Index) και της θερμοκρασίας λειτουργίας (activation temperature). Στην 2^η κατηγορία εντάσσεται και η εξέταση σεναρίου με σύστημα ολικού κατακλυσμού (deluge system) που προσομοιάζει χειροκίνητη ενεργοποίηση (manual operation) ψεκαστήρων σε καθορισμένη χρονική στιγμή. Τέλος, στην άλλη κατηγορία περιλαμβάνονται προσομοιώσεις με το κατάστρωμα πλήρως γεμάτο με φορτηγά καθώς και την εξέταση της λειτουργίας συστήματος κατάσβεσης με ολικό κατακλυσμό νερού (water deluge system) ενεργοποιούμενου χειροκίνητα από το πλήρωμα σε συγκεκριμένους χρόνους.

6.1 Συντελεστής κατάσβεσης (extinguish coefficient)

Ο συντελεστής κατάσβεσης (extinguish coefficient) αποτελεί μια πολύ σημαντική παράμετρο στις προσομοιώσεις για την μελέτη κατάσβεσης πυρκαγιάς σε χώρο Ro-Ro κατά την χρήση του λογισμικού FDS (στην παρούσα εργασία στο πρόγραμμα PyroSim). Αρχικά, όπως έγινε αντιληπτό και από τις δοκιμές του Παραρτήματος Α, η κυριότερη σημασία της παραμέτρου εντοπίζεται στο γεγονός ότι για μία πυρκαγιά στο FDS με καθορισμένη την

πορεία του HRR στο χρόνο (οι επιφάνειες της πηγής ορίζονται ως burner και όχι με σύνθεση κάποιου συγκεκριμένου υλικού (layered surfaces)), μέσω της συνάρτησης ramp-up, ο extinguish coefficient πρέπει οπωσδήποτε να λάβει τιμή μεγαλύτερη του 0. Καθώς, στην περίπτωση που $e_coef=0$, το HRR παραμένει σχεδόν αναλλοίωτο για όλη την χρονική διάρκεια λειτουργίας των ψεκαστήρων, καθιστώντας μη εμφανή την επίδραση της εκτόξευσης του νερού πάνω στην επιφάνεια καύσης και κατ' επέκταση στην φωτιά.

Για τον λόγο αυτό, εξετάστηκαν κάποιες τιμές του συντελεστή και συγκεκριμένα οι $e_coef=0.5, 1, 3$ και $10 \text{ m}^2\text{/s/kg}$. Από την σύγκριση των αποτελεσμάτων του 2^{ου} με του 3^{ου} σεναρίου (Διάγραμμα 5) και του 4^{ου} με το 5^ο και το 6^ο (Διάγραμμα 11), παρατηρείται ότι όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η τιμή τόσο πιο γρήγορη είναι η καταστολή της πυρκαγιάς και η πτώση της θερμοκρασίας των θερμών αερίων καθώς το $P_{\text{αποτελεσματικότητας}}$ είναι μεγαλύτερο. Αντίστοιχα συνεπάγεται και ότι το HRR_{max} ή T_{max} και η συνολική παραγόμενη θερμότητα θα είναι μικρότερες. Παράλληλα όμως, παρατηρείται ότι όσο περισσότερο αυξάνεται αυτή η τιμή τόσο μειώνεται και η περεταίρω επιρροή στα μεγέθη αυτά. Με λίγα λόγια, οι διαφορές ανάμεσα στα αποτελέσματα του 4^{ου} με το 5^ο σενάριο ($e_coef=3$ και $1 \text{ m}^2\text{/s/kg}$ αντίστοιχα) είναι πιο έντονες συγκριτικά με αυτές του 4^{ου} με το 6^ο ($e_coef=3$ και $10 \text{ m}^2\text{/s/kg}$ αντίστοιχα) όπου οι καμπύλες και τα μεγέθη είναι σχεδόν ταυτόσημα. Συνεπώς, καθίσταται αχρείαστη η εξέταση τιμής μεγαλύτερης των $10 \text{ m}^2\text{/s/kg}$. Ωστόσο, σε γενικότερο πλαίσιο, οι διαφορές αυτές που προκύπτουν στον ρυθμό και στον χρόνο της κατάσβεσης είναι πολύ μικρές (της τάξεως λίγων εκατοντάδων kW και λίγα s) σε σχέση με την μεγάλη κλίμακα πυρκαγιών των προσομοιώσεων της παρούσας διπλωματικής εργασίας και δεν χαρακτηρίζονται ως κρίσιμες και επικίνδυνες. Έτσι, για τις υπόλοιπες προσομοιώσεις στο FDS, ως καταλληλότερη τιμή θεωρήθηκε και επιλέχθηκε η $e_coef=3 \text{ m}^2\text{/s/kg}$. Τα αποτελέσματα αυτά μπορούν να παρέχονται σαν δεδομένα και για μελλοντικές αριθμητικές προσομοιώσεις.

6.2 Χρόνος ενεργοποίησης ψεκαστήρων (Activation temperature, RTI)

Η επόμενη βασική παράμετρος για την μελέτη κατάσβεσης πυρκαγιάς σε κατάστρωμα οχημάτων, είναι ο χρόνος ενεργοποίησης των ψεκαστήρων από την στιγμή έναρξης της φωτιάς. Η μεγάλη σημασία του φαίνεται και από τα στατιστικά του κεφαλαίου 2.3, όπου συμπεραίνεται ότι η αργοπορημένη λειτουργία των sprinklers οδηγεί σε σοβαρές καταστροφές.

Η παράμετρος αυτή εξαρτάται από δύο βασικά μεγέθη: την θερμοκρασία ενεργοποίησης και το RTI. Για το πρώτο μέγεθος, η τιμή που επιλέγεται είναι οι $130 \text{ }^\circ\text{C}$, είναι ίδια σε όλα τα σενάρια (εκτός από το 9^ο και το 10^ο) και βασίζεται στους κανονισμούς από SOLAS. Η τιμή αυτή φαίνεται ότι είναι αποτελεσματική για όλα τα σενάρια, αφού οι ψεκαστήρες σε γενικότερο πλαίσιο ενεργοποιούνται σε έγκαιρους χρόνους, σβήνοντας την φωτιά και αποφεύγοντας τις μεγάλες καταστροφές. Το δεύτερο μέγεθος (RTI) καθορίζει τη χρονική απόκριση των ψεκαστήρων. Στην παρούσα μελέτη, εξετάστηκαν δύο τιμές του δείκτη αυτού και συγκεκριμένα οι $RTI=33$ και $110 \sqrt{\text{m} \cdot \text{s}}$ που χαρακτηρίζουν τον ψεκαστήρα ως γρήγορης (fast response sprinkler) και κανονικής απόκρισης (standard response sprinkler) αντίστοιχα. Από την σύγκριση του 2^{ου} με το 4^ο σενάριο (Διάγραμμα 7), φαίνεται ότι οι ψεκαστήρες κανονικής απόκρισης καθυστερούν να λειτουργήσουν κατά 45.7 s . Και σε αυτήν την περίπτωση, η πυρκαγιά καθίσταται υπό έλεγχο και η καταστολή της προκύπτει

στον ίδιο χρόνο με τα σενάρια λειτουργίας ψεκαστήρων γρήγορης απόκρισης. Ωστόσο, παρατηρείται ότι με τη καθυστέρηση αυτή απελευθερώνεται διπλάσια ποσότητα θερμότητας και το HRR φτάνει τιμή 3300 kW μεγαλύτερη συγκριτικά με το 2^ο σενάριο ενώ παράλληλα απαιτείται περισσότερη παροχή νερού (λειτουργία περισσότερων ψεκαστήρων). Οι διαφορές αυτές πρέπει να λαμβάνονται υπόψη (αντίθετα από την περίπτωση του e_coef), καθώς θα μπορούσαν να αποφέρουν κάποιες παραπάνω μικρές ζημιές, ενώ παράλληλα αποδεικνύουν και πόσο σημαντική είναι η χρονική στιγμή ενεργοποίησης των sprinklers αφού ακόμα και λίγα δευτερόλεπτα καθυστέρησης αποφέρουν μία σεβαστή αύξηση του φορτίου πυρκαγιάς. Τα αποτελέσματα αυτά των κεφαλαίων 6.1 και 6.2 μπορούν να παρέχονται σαν δεδομένα και για μελλοντικές αριθμητικές προσομοιώσεις σε FDS.

6.3 Πληρότητα καταστώματος σε φορτηγά

Όλες οι παρατηρήσεις που αναφέρθηκαν αφορούσαν προσομοιώσεις σε καταστώματα με 1 μόνο φορτηγό-πηγή. Όμως η ύπαρξη και άλλων φορτηγών μέσα στον χώρο αποτελεί μία σημαντική παράμετρο στην μελέτη κατάσβεσης. Συγκεκριμένα, με την τοποθέτηση παραπάνω φορτηγών ώστε η πληρότητα του καταστώματος να φτάσει το 100%, αυξάνεται το διαθέσιμο καύσιμο αφού αυτά αναφλέγονται κανονικά απελευθερώνοντας θερμότητα. Παράλληλα όμως, λόγω της μείωσης του ελεύθερου χώρου μειώνεται και το διαθέσιμο οξυγόνο για καύση. Σε τελικό απολογισμό και σύμφωνα με το 7^ο σενάριο (Διάγραμμα 13) παρατηρούνται αρκετά μεγαλύτερες τιμές του HRR και κατ' επέκταση φορτίο θερμότητας καθιστώντας την κατάσταση δυσκολότερη. Ωστόσο, φαίνεται από τα αποτελέσματα του 8^{ου} σεναρίου (15^ο διάγραμμα) ότι το σύστημα αυτόματων ψεκαστήρων, με τα χαρακτηριστικά του 2^{ου} σεναρίου, ανταποκρίνεται εξίσου ικανοποιητικά με την περίπτωση της πυρκαγιάς 1 φορτηγού-πηγή (2^ο σενάριο, 3^ο διάγραμμα), καθώς οι ψεκαστήρες ενεργοποιούνται έγκαιρα (πριν την ανάφλεξη άλλων φορτηγών) με το φορτίο πυρκαγιάς και τον χρόνο κατάσβεσης να προκύπτουν σχεδόν ίσα.

Στον ίδιο χώρο με το 8^ο σενάριο, εξετάστηκε η χρήση συστήματος κατάσβεσης με κατακλυσμό νερού το οποίο ενεργοποιείται χειροκίνητα από κάποιο μέλος του πληρώματος σε δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές (9^ο και 10^ο σενάριο). Οι στιγμές αυτές είναι τα 600 s και τα 800 s από την έναρξη της πυρκαγιάς, συνυπολογίζοντας σε αυτές την χρονική καθυστέρηση της ανίχνευσης της φωτιάς από το πλήρωμα. Και στις δύο περιπτώσεις (Διαγράμματα 17,19) φαίνεται ότι το σύστημα δεν ανταποκρίνεται ικανοποιητικά αφού ο ρυθμός κατάσβεσης είναι αρκετά αργός (αργή μείωση του HRR) και το HRR και οι θερμοκρασίες φτάνουν σε υψηλά επίπεδα με αποτέλεσμα να παράγεται μεγάλη ποσότητα θερμότητας που μπορεί να προκαλέσει σοβαρές καταστροφές. Παρόλο που εκτοξεύονται μεγάλες ποσότητες νερού στον χώρο, καθώς ανοίγουν και οι 56 sprinklers ταυτόχρονα (deluge system), φαίνεται ότι τις συγκεκριμένες χρονικές στιγμές, η φωτιά έχει φτάσει σε υψηλά επίπεδα ανάπτυξης (μεγάλοι αριθμοί HRR και T), συγκεκριμένα στο στάδιο «growth» και αρκετά κοντά στο στάδιο «fully developed», ενώ παράλληλα έχει ξεκινήσει και η ανάφλεξη των υπόλοιπων φορτηγών (περισσότερη απελευθέρωση θερμότητας) καθιστώντας την κατάσταση αρκετά δύσκολη για καταστολή. Τα αποτελέσματα αυτά αποδεικνύουν για ακόμα μία φορά την τεράστια σημασία της ενεργοποίησης του συστήματος κατάσβεσης σε έγκαιρο χρόνο.

6.4 Προτάσεις για παρόμοια έρευνα στο μέλλον

Η παρούσα διπλωματική αποσκοπεί στην εξέταση της επάρκειας του συστήματος κατάσβεσης σε πυρκαγιά καταστώματος οχημάτων (χώρος Ro-Ro) επιβατηγού/οχηματαγωγού πλοίου από την πλευρά του κανονιστικού πλαισίου, της ανάλυσης της λειτουργίας του, της παρουσίας πρόσφατων ατυχημάτων και της εξέτασης παραμέτρων που επηρεάζουν τον ψεκασμό του νερού πάνω στην φωτιά αλλά και στην αναγνώριση της σωστής χρήσης τους μέσα στο λογισμικό FDS, 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 κατάσβεσης της πυρκαγιάς μέσω υπολογιστικών προσομοιώσεων είναι πολλές. Είναι σαφές ότι οι παράμετροι που σχολιάστηκαν, σε ό,τι αφορά τα σενάρια, είναι μόνο ένα μικρό ποσοστό των συνολικών παραγόντων που μπορούν να επηρεάσουν την κατάσβεση μιας πυρκαγιάς.

Μία παράμετρος που θα μπορούσε να εξεταστεί είναι η επιρροή της διαφορετικής διαρρύθμισης των οχημάτων στον χώρο, στην κατάσβεση και τον περιορισμό της φωτιάς. Με διαφορετικό αριθμό φορτηγών μέσα στον χώρο καθώς και τοποθέτηση σε διαφορετική απόσταση μεταξύ τους, αλλάζει αρκετά η περιεκτικότητα και η κατανομή του οξυγόνου και του διαθέσιμου καυσίμου, και κατά επέκταση οι συνθήκες καύσης και κατάσβεσης. Ταυτόχρονα, μπορούν να δοκιμαστούν και προσομοιώσεις κατάσβεσης με εισαγωγή ανέμου από διάφορες πλευρές του καταστώματος και διαφορετικές κατευθύνσεις, παράμετρος που και πάλι αλλάζει αρκετά τις συνθήκες παροχής οξυγόνου.

Όσον αφορά άλλες προτάσεις για μελλοντική έρευνα, διαφορετικές επιλογές στο ίδιο το σύστημα κατάσβεσης μπορούν να επηρεάσουν τον περιορισμό της φωτιάς. Μια σημαντική παράμετρος που μπορεί να εξεταστεί είναι η δοκιμή εναλλακτικών συστημάτων πυρόσβεσης και γενικότερα η μελέτη της επίδρασης του τύπου του ψυκτικού μέσου στην πυρκαγιά. Συγκεκριμένα, η εξέταση της συμπεριφοράς διαφόρων κατασβεστικών μέσων όπως το νερό υπό υψηλή πίεση (water mist), ο αφρός, το διοξείδιο του άνθρακα, οι ξηρές σκόνες κλπ. καθώς και η σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων τους με αυτά του νερού, αποτελούν σημείο μελέτης που μπορεί να αλλάξει τα δεδομένα στους κανονισμούς με σκοπό την καλύτερη δυνατή αντιμετώπιση μιας φωτιάς σε κατάστρωμα οχημάτων. Γενικότερα, υπάρχει και η δυνατότητα για εξέταση κάποιων περεταίρω παραμέτρων του FDS που επηρεάζουν τις προσομοιώσεις κατάσβεσης. Τέτοιες παράμετροι είναι η πίεση της παροχής νερού, ο αριθμός των σταγόνων που πέφτουν ανά s (DPS=Droplets per Seconds), η γωνία ψεκασμού (spray angle), η διαφορετική διαρρύθμιση των ψεκαστήρων ενώ ένα άλλο σημείο μελέτης θα μπορούσε να είναι η μελέτη κατάσβεσης σε πυρκαγιά που έχει οριστεί από επιφάνειες layered με συγκεκριμένες συνθέσεις υλικών και χωρίς καθορισμένο HRR.

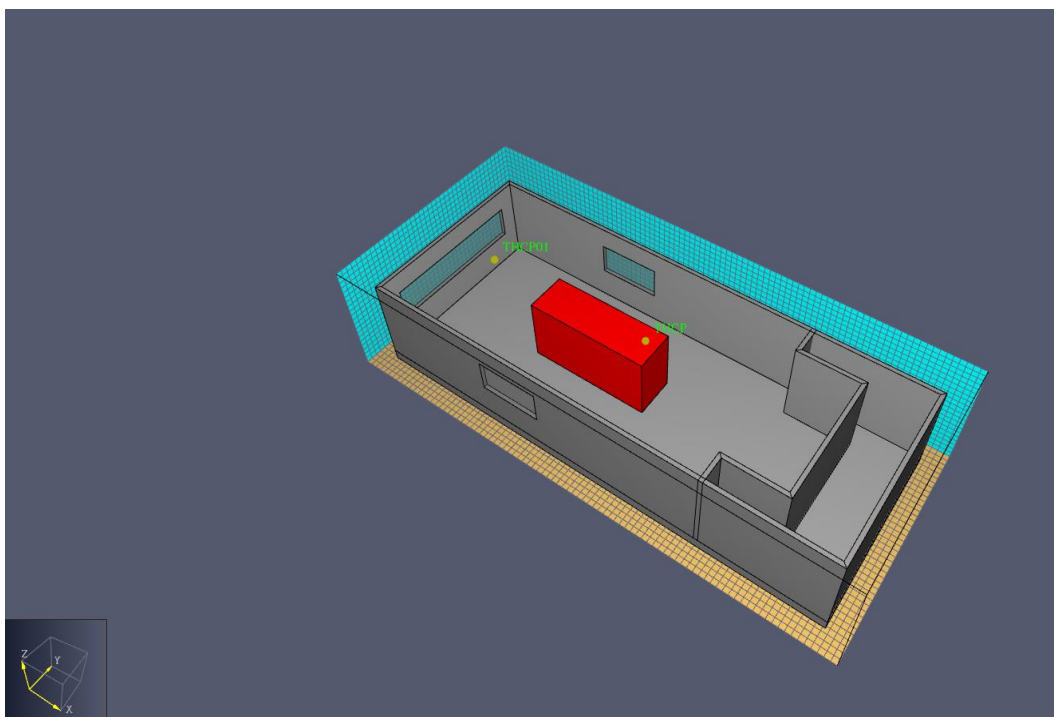
Βιβλιογραφία

- Arvidson, M. (2009). *Large-scale Ro-Ro Deck fire suppression tests*. SP-Technical Research Institute Of Sweden.
- Bourque, M., & Svirsky, T. (2013). *Computational modeling of fire sprinkler spray characteristics using the fire dynamic simulator*. Worcester: Project Report, Worcester Polytechnic Institute.
- DNV. (2016). Fires on ro-ro decks. *GL*.
- EMSA. (2018). *FIRESAFE II Alternative fixed-fire extinguishing systems for ro-ro spaces on ships*. Sweden: European Maritime Safety Agency.
- Frid, R., & Palm, D. (2010). *An analysis of fixed water sprinkler systems on ro-ro decks*. Lund, Sweden: Report, Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University.
- Gomatos, V. (2021). *Response of the fire detection systems on the deck of passenger/Ro-Ro ships*. Athens: Diploma Thesis, School of Naval engineer and marine architect, NTUA.
- Hamins, A. a. (2003). Reduced-scale Experiments On The Water Suppression Of A Rack-storage Commodity Fire For Calibration Of A Cfd Fire Mode. *Fire Safety Science*.
- IMO. (2014). *FSS Code MSC/Res.339(91), Fixed foam fire-extinguishing systems*. International Maritime Organization.
- IMO. (2018). *MSC1/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*. London: International Maritime Organization.
- Jonathan, B. (2020). Ro-Pax and RO-RO fire safety. *Shippax*, 13.
- Kaufmann, J. (2012). *Investigation report for the fire on the ro-ro passenger vessel LISCO GLORIA*. Hamburg, Germany: Bundesstelle für Seeunfalluntersuchung, Lithuanian Maritime Safety Administration.
- Koromila, I., Pouangare, A., & Spyrou, K. (2021). Design Fires for Vehicle Decks of RO/RO Passenger Ships. *Proceedings, 1st International Conference on the Stability and Safety of Ships and Ocean Vehicles*. Glasgow: NTUA.
- Larsson, I., Ingason, H., & Arvidson, M. (2002). *Model scale fire tests on a Vehicle Deck on Board a Ship*. SP- Swedish National Testing and Research Institute.
- Lee, J. (2019). Numerical analysis on the rapid fire suppression using a water mist nozzle in a fire compartment with a door opening. *NUCLEAR ENGINEERING AND TECHNOLOGY*, σσ. 415-419.

- Miikka, L. (2017). *Simulation of water cooling in Fires*. Diploma Thesis, Aalto University.
- Murdoch, E. (2018). *Fire Safety on Ferries*. Standard Club.
- NFPA11. (2021). *Standard for Low-, Medium, and High-Expansion Foam*. National Fire Protection Association.
- NIST. (2016). *FDS manual*.
- Pagonis, N., & Themelis, N. (2020). *Study of the effect of fire on a vehicle deck of Ro-Ro Ship*. Athens: Diploma Thesis, School of the naval engineer and marine architect, NTUA.
- Themelis N., S. J. (2012). *Probabilistic Fire Safety Assessment of Passenger Ships*. Athens: NTUA.
- Thunderhead Engineering. (2020). *PyroSim Example Guide*.
- Thunderhead Engineering. (2020). *PyroSim User's Manual*.
- Yu, H. L. (1994). Suppression Of Rack-storage Fires By Water. *Fire Safety Science*.
- Zeinali, D., Ingold, F., Acem, Z., Mehaddi, R., Parent, G., Collin, A., και συν. (2021). Experimental study of radiation attenuation using water curtains in a reduced-scale deck of a ro-ro ship. *Proceedings, 1st International Conference on the Stability and Safety of Ships and Ocean Vehicles*. Glasgow.
- SOLAS, IMO (2016). *Chapter II-2 - Construction - Fire protection, fire detection and fire extinction*. International Convention for the Safety Of Life At Sea.

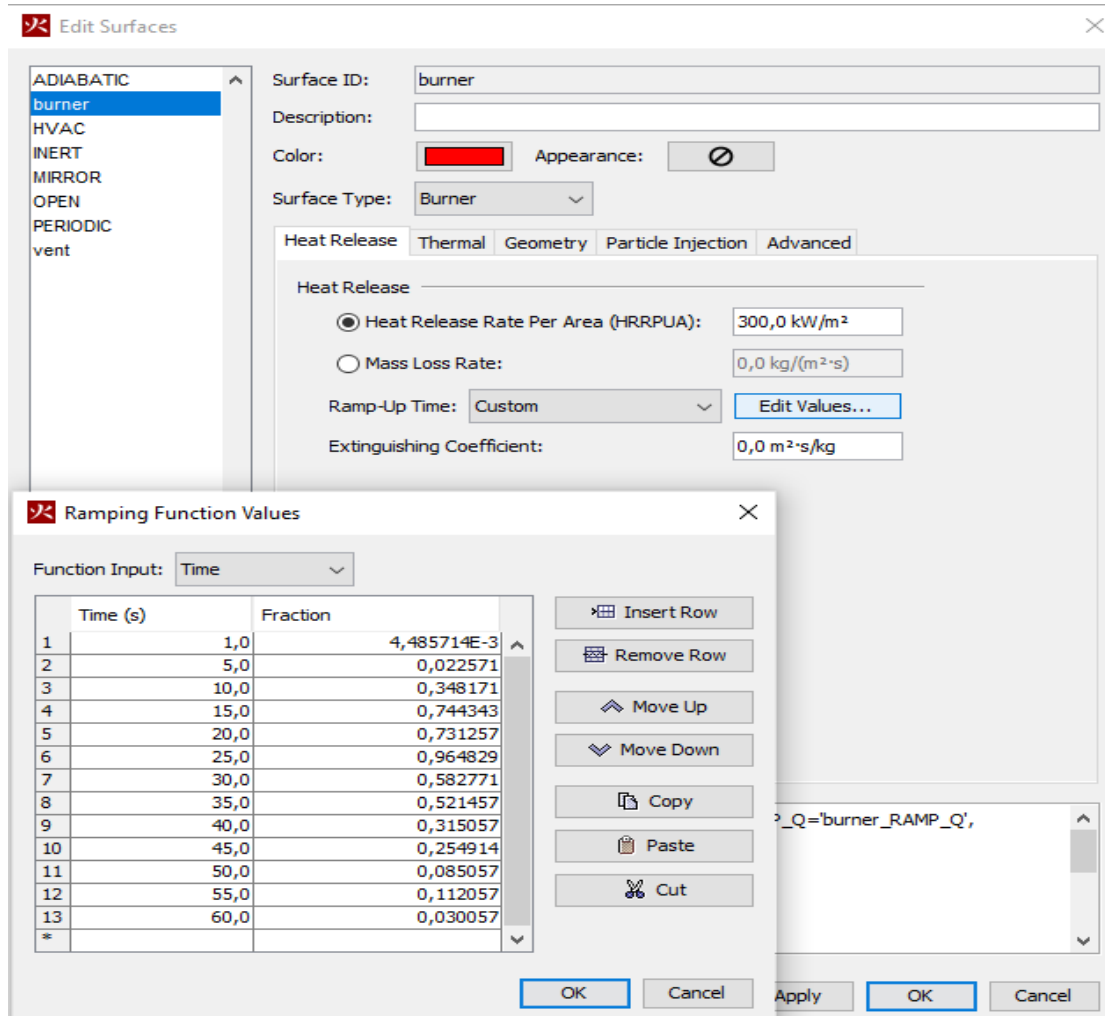
Παράρτημα Α

Για την καλύτερη κατανόηση των παραμέτρων του λογισμικού FDS (και PyroSim) ως προς την κατάσβεση πυρκαγιών με ψεκαστήρες και ειδικότερα την σωστή διεκπεραίωση της σημασίας του *extinguish coefficient*, πραγματοποιήθηκαν κάποιες δοκιμαστικές προσομοιώσεις πριν από την εκτέλεση των βασικών προσομοιώσεων της διπλωματικής εργασίας. Ο σκοπός τους είναι η γρήγορη εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Για τον λόγο εξετάστηκαν δοκιμαστικά σενάρια με χρονική διάρκεια τα 60 s (έναντι των 3500 s) ενώ παράλληλα επιλέχθηκε το μοντέλο της εικόνας 56 του οποίου οι διαστάσεις είναι αρκετά μικρότερες από αυτές του βασικού. Συγκεκριμένα, κατασκευάστηκε χώρος με διαστάσεις 19 m μήκος x 9 m πλάτος x 5 m ύψος, ένα πίσω και δύο πλάγια ανοίγματα.



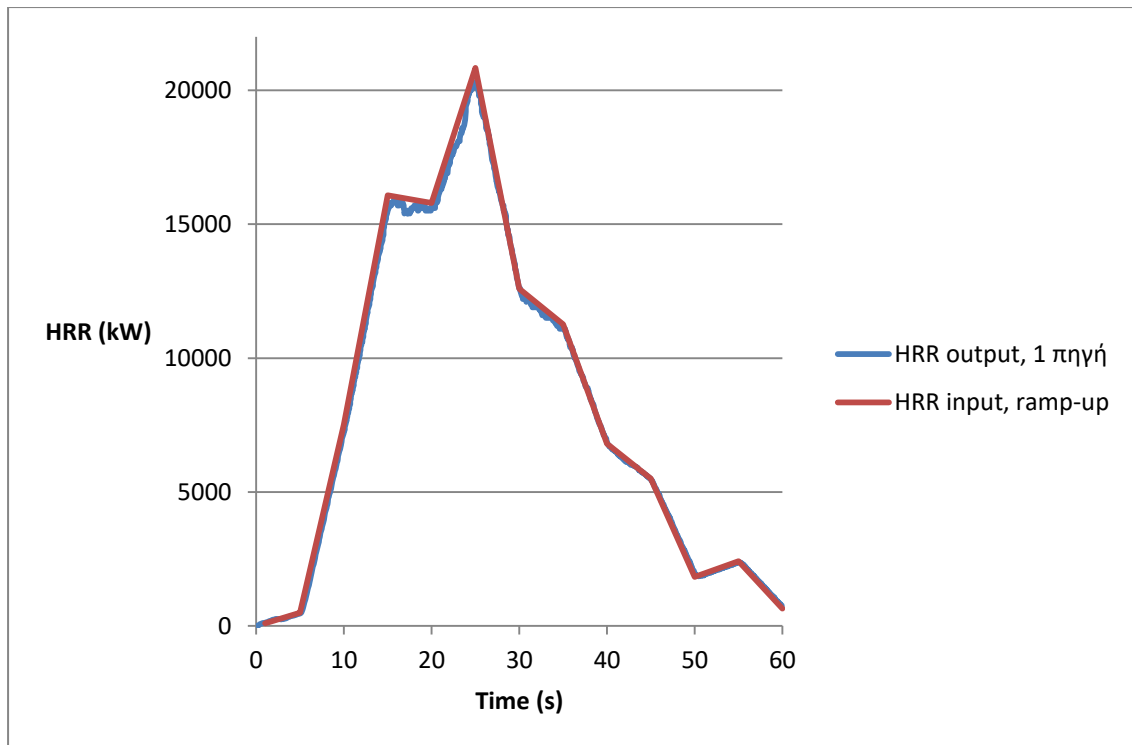
Εικόνα 56: Μοντέλο για τις αρχικές δοκιμαστικές προσομοιώσεις

Για την μέτρηση των θερμοκρασιών τοποθετήθηκαν δύο θερμοζεύγη, THCP01 και THCP, στις θέσεις $x=94$ m, $y=4.5$ m, $z=3.8$ m και $x=102.5$ m, $y=4.5$ m, $z=3.8$ m αντίστοιχα. Με την ίδια λογική κατασκευάστηκε η πηγή πυρκαγιάς, ως ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο με διαστάσεις 6 m μήκος x 2 m πλάτος x 3 m ύψος ενώ οι επιφάνειες του ορίστηκαν κανονικά ως *burner*. Η χημική αντίδραση της καύσης ορίστηκε από την βιβλιοθήκη η POLYURETHANE_GM27 όπως ακριβώς περιγράφεται στην εικόνα 27 του κεφαλαίου 5.3.3. Η μέγιστη τιμή του ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας (HRR_{max}) καθορίστηκε περίπου 20 MW. Για τον λόγο αυτό, το HRR_{PUA} ισούται με 300 kW/m^2 (Εικόνα 62) ώστε με το συνολικό εμβαδό των 72 m^2 των επιφανειών της κατασκευής της πηγής να προκύπτει η επιθυμητή παραγόμενη ισχύς. Η χρονική ιστορία του ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας προκαθορίστηκε μέσω της συνάρτησης *gamr-up* όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 5.3.3 και φαίνεται στην εικόνα 62. Η μοναδική διαφορά είναι ότι σε αυτήν την περίπτωση η πορεία του HRR κατανέμεται στο χρονικό εύρος 1-60 s.

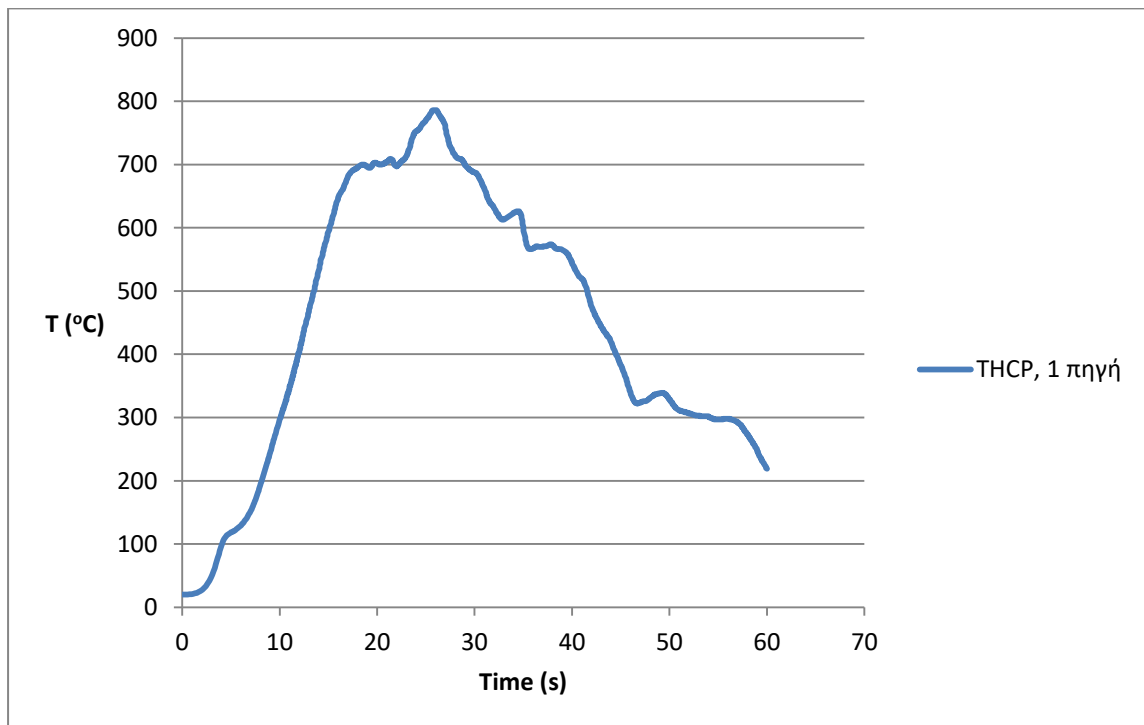


Εικόνα 57: HRRPUA και ramp-up function των burner surface

Στο διάγραμμα 21 φαίνεται η χρονική ιστορία του HRR (HRR,t) για την πυρκαγιά ενός κουτιού-πηγής χρονικής διάρκειας 60 s, όπως ακριβώς εξήχθη από το πρόγραμμα PyroSim, συγκριτικά με την καμπύλη των τιμών input της συνάρτησης ramp-up. Αντίστοιχα στο διάγραμμα 22, φαίνεται η καμπύλη θερμοκρασίας συναρτήσει του χρόνου (T,t) για την ίδια προσομοίωση για θέση ακριβώς πάνω από την πηγή.

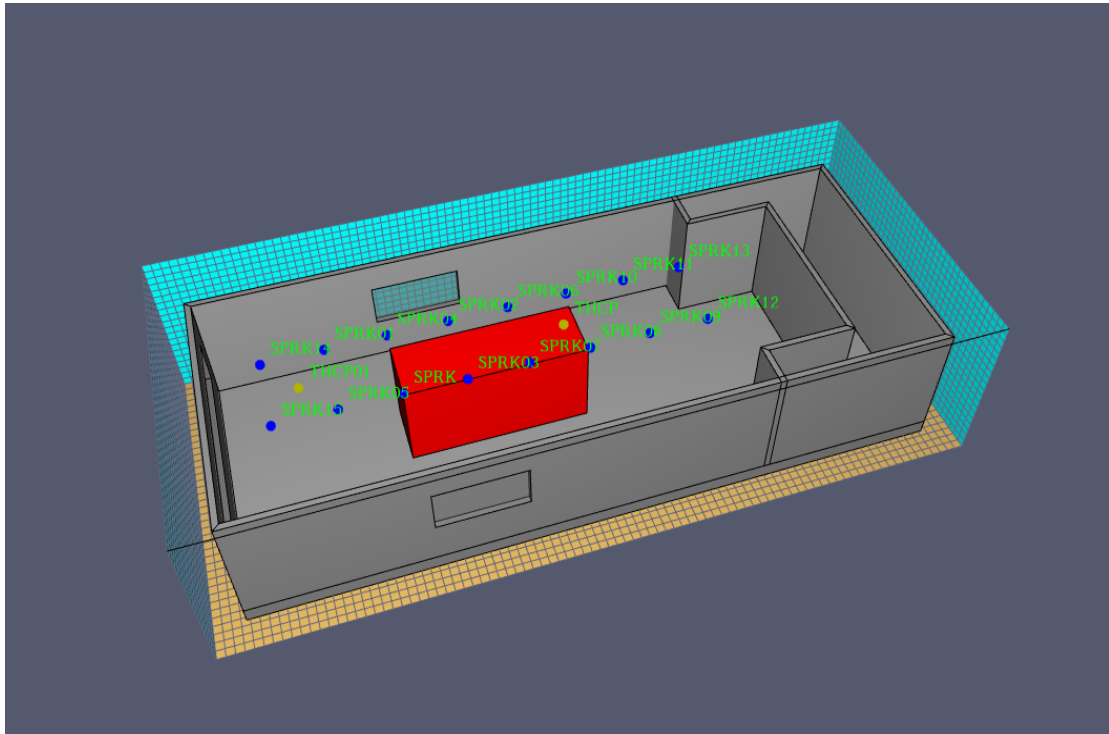


Διάγραμμα 21: Χρονική ιστορία HRR για 1 πηγή

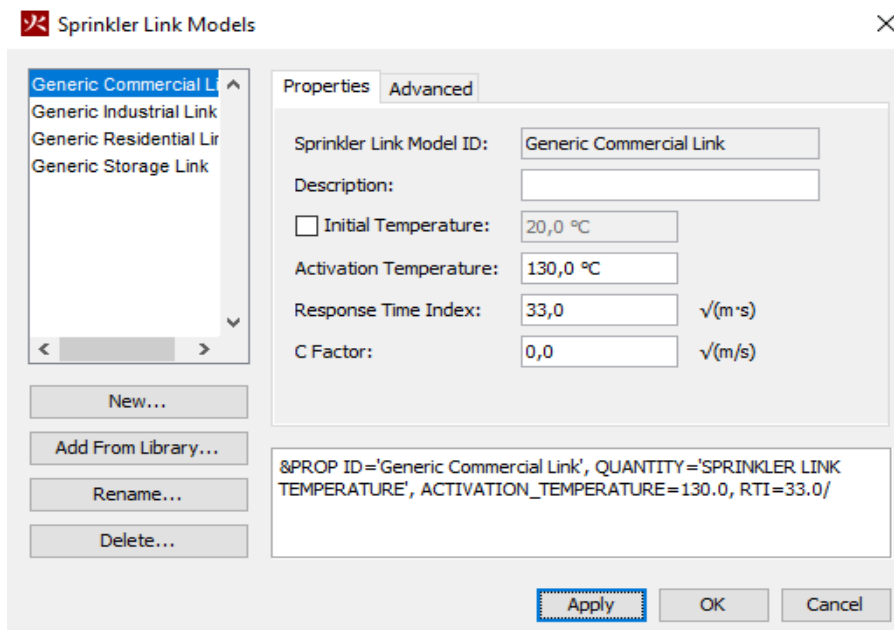


Διάγραμμα 22: T-t σε θέση πάνω από την πηγή

Στην συνέχεια τοποθετήθηκαν ψεκαστήρες νερού (automatic sprinklers) στο μοντέλο ώστε να εξεταστεί η επιρροή τους πάνω στην πορεία της πυρκαγιάς, με γνώμονα τα διαγράμματα 21,22. Οι ψεκαστήρες αυτοί διατάχτηκαν στον χώρο όπως φαίνεται στην εικόνα 58 (16 στο σύνολο) ενώ η παροχή νερού του καθενός ορίστηκε ίση με 190 L/min. Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά τους όπως η θερμοκρασία ενεργοποίησης και ο δείκτης RTI επιλέχθηκαν ίσα με 130 °C και $33 \sqrt{(m \cdot s)}$ όπως φαίνονται στην εικόνα 64.

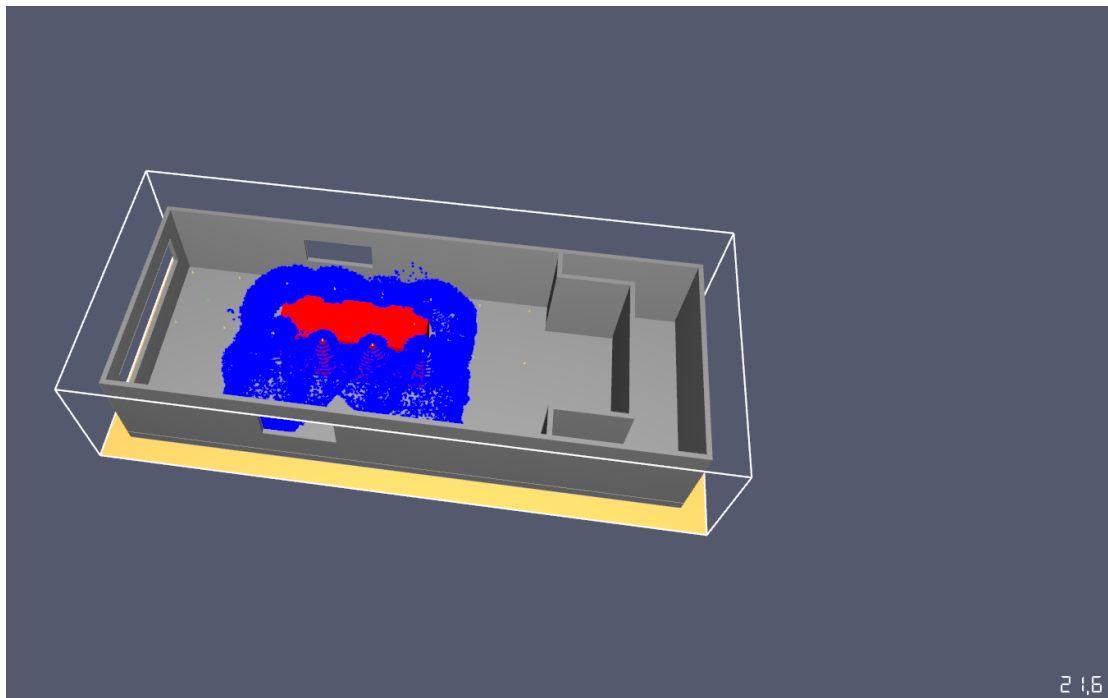


Εικόνα 58: Διάταξη ψεκαστήρων στο κατάστρωμα

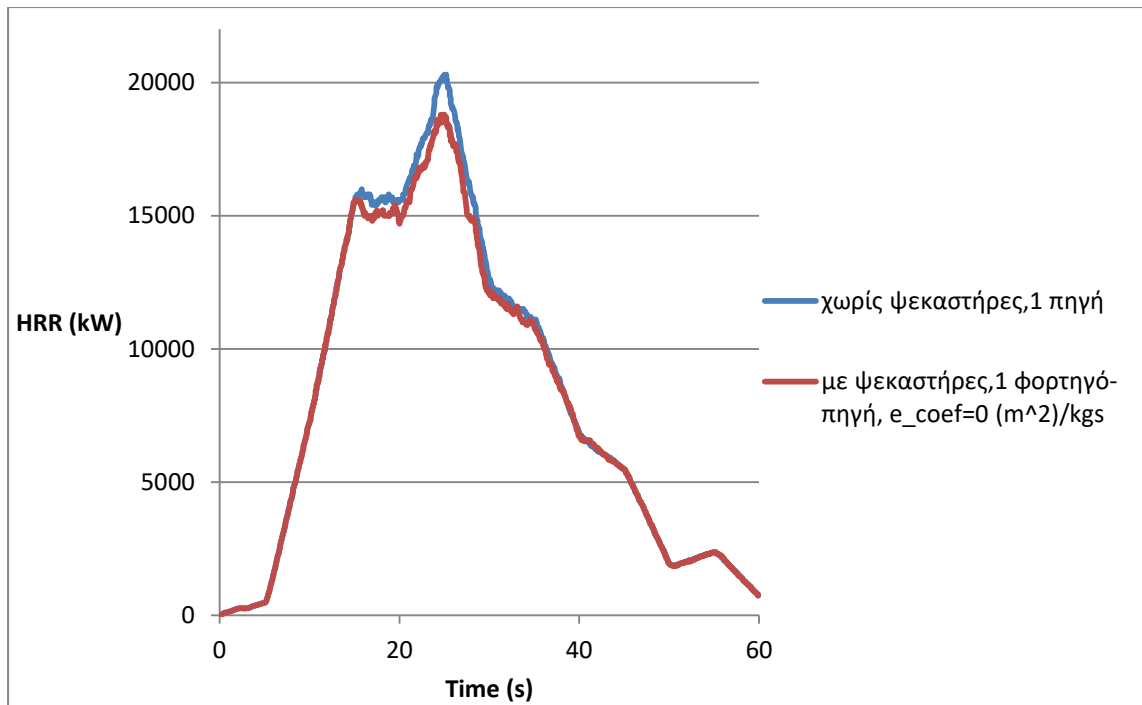


Εικόνα 59: Χαρακτηριστικά ψεκαστήρων για τον χρόνο ενεργοποίησης

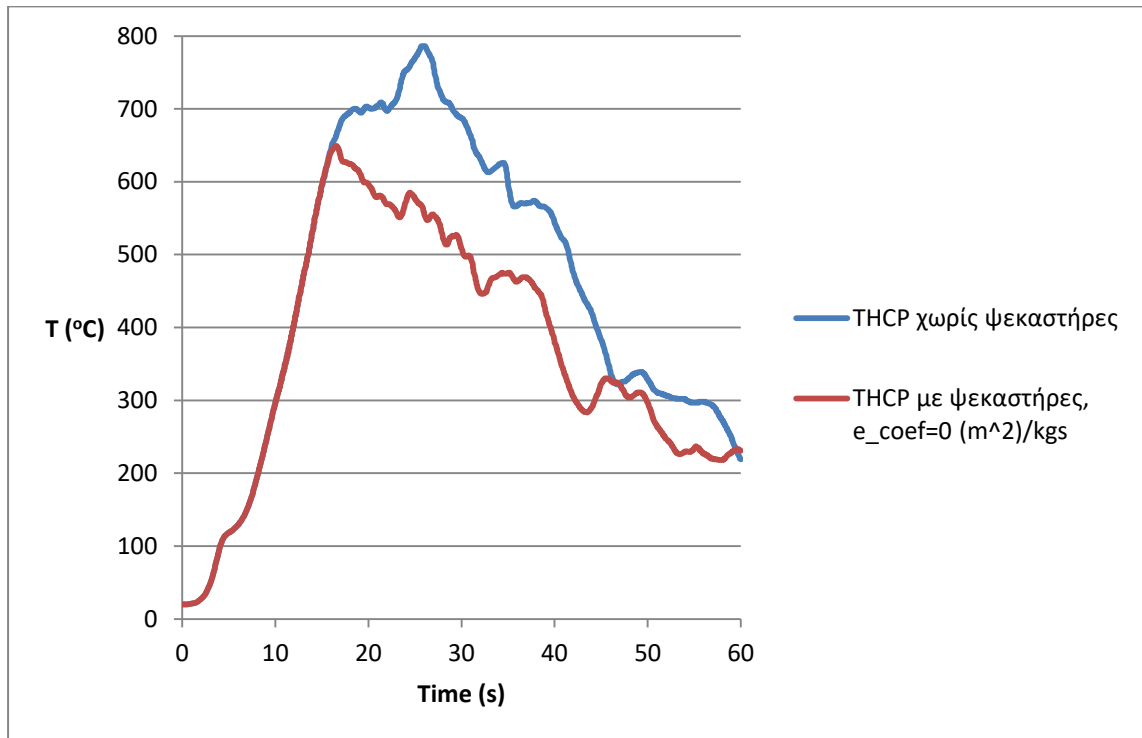
Η 1^η δοκιμαστική προσομοίωση με τους ψεκαστήρες τοποθετημένους πραγματοποιήθηκε με τον **συντελεστή κατάσβεσης (extinguish coefficient) να ισούται με 0**. Σύμφωνα με το στιγμιότυπο της εικόνας 60 του αρχείου PyroSim Results Visualization της προσομοίωσης, φαίνεται ότι οι sprinklers ενεργοποιούνται κανονικά από την χρονική στιγμή $t=20$ s. Ωστόσο, όπως φαίνεται και από το διάγραμμα 23 η χρονική ιστορία του HRR παραμένει σχεδόν αναλλοίωτη σε σχέση με αυτή της προσομοίωσης χωρίς ψεκαστήρες (οι δύο καμπύλες είναι πολύ κοντά αφού οι διαφορές τους είναι μικρές). Το γεγονός αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ο ψεκασμός του νερού πάνω στις επιφάνειες καύσης επηρεάζει ελάχιστα τον ρυθμό καύσης των επιφανειών της πηγής (δηλαδή το HRR) στην παρούσα προσομοίωση, δηλαδή με λίγα λόγια δεν παρατηρείται αισθητή πτώση του που να ερμηνεύεται ως κατάσβεση. Αντιθέτως, δεν συμβαίνει το ίδιο με την θερμοκρασία των θερμών αερίων πάνω από την πηγή (θέση του THCP), καθώς όπως αποδεικνύεται και από το διάγραμμα 24 (T,t), από την χρονική στιγμή $t=18$ s (έναρξη λειτουργίας sprinklers) και μετά ακολουθεί μία πτωτική πορεία με την μέγιστη θερμοκρασία να φτάνει περίπου τους 650 °C (έναντι των περίπου 800 °C προηγουμένως). Η πορεία αυτή δείχνει ότι η πτώση του νερού έχει κάποια επιρροή στις θερμοκρασίες των θερμών αερίων σε αυτήν την προσομοίωση.



Εικόνα 60: Χρονική στιγμή ενεργοποίησης ψεκαστήρων

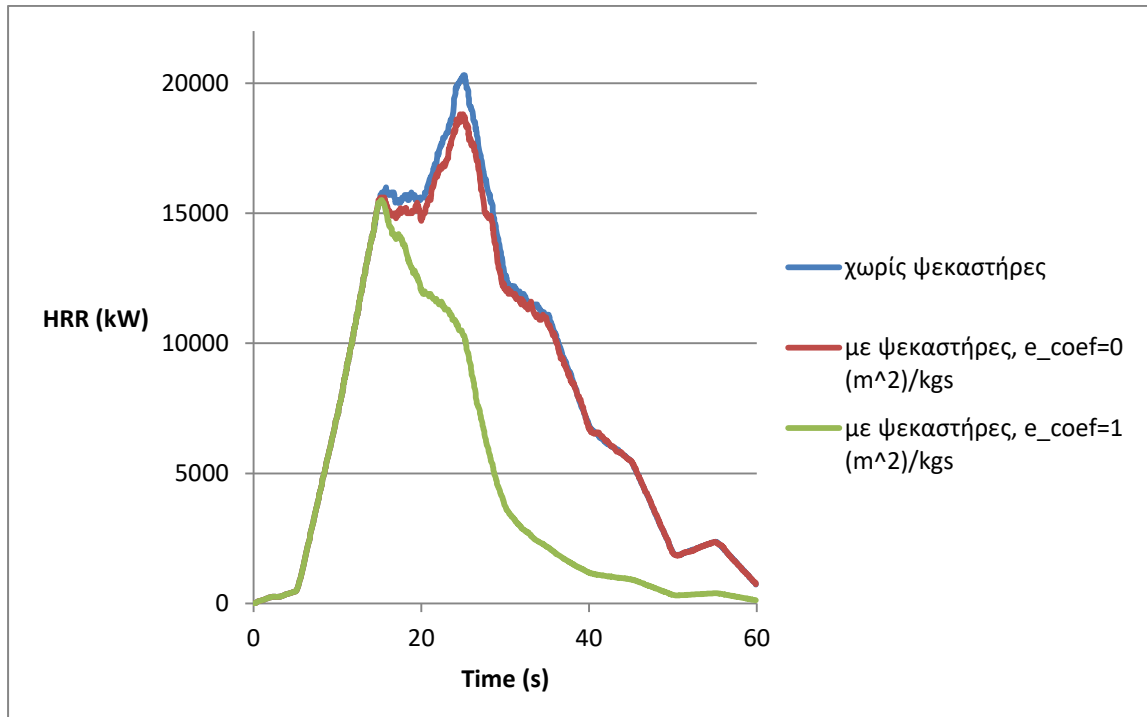


Διάγραμμα 23: Χρονική ιστορία HRR προσομοίωσης με ψεκασθήρες και $e_coef=0 \text{ m}^2/\text{kgs}$

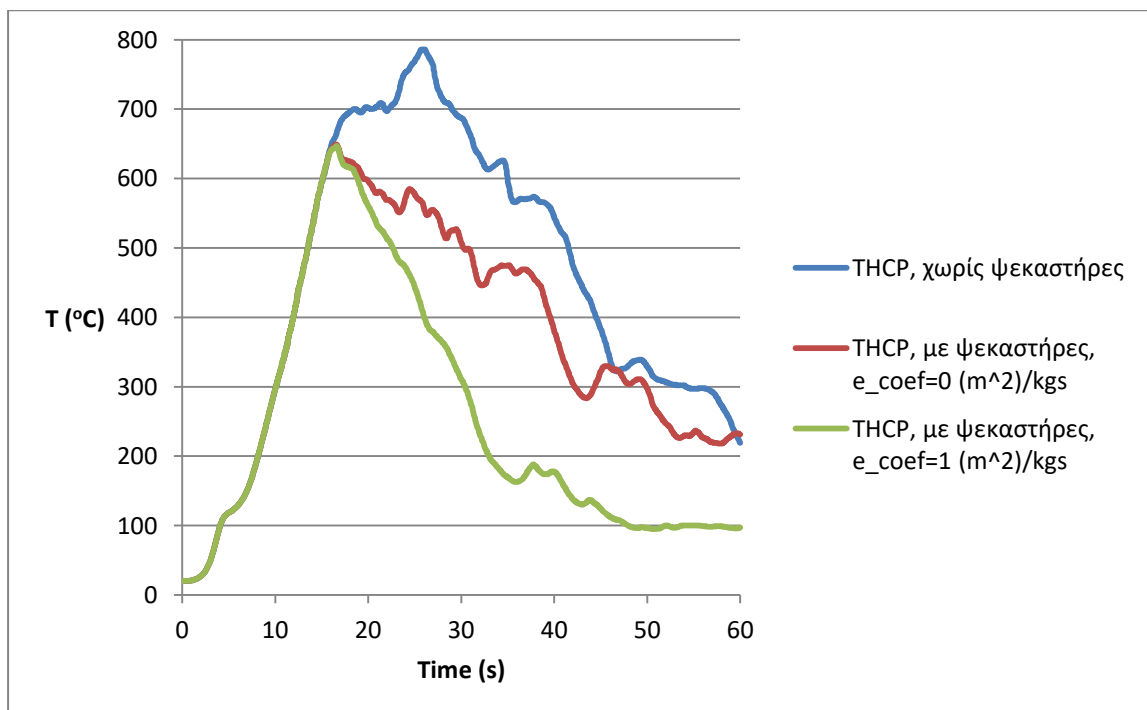


Διάγραμμα 24: T,t σε μία θέση πάνω από την πηγή για προσομοίωση με ψεκασθήρες και $e_coef=0 \text{ m}^2/\text{kgs}$

Η 2^η δοκιμαστική προσομοίωση πυρκαγιάς με ψεκασθήρες πραγματοποιήθηκε με το ίδιο ακριβώς μοντέλο και χαρακτηριστικά με την 1^η, με μοναδική διαφορά ότι ο **συντελεστής κατάσβεσης (extinguish coefficient) ισούται με 1 m²/kgs** (η δοκιμή της τιμής αντλήθηκε από το διάγραμμα της εικόνας 36). Η χρονική στιγμή έναρξης ψεκασμού παραμένει ίδια με το προηγούμενο παράδειγμα, όμως σημαντική διαφορά παρατηρείται στην χρονική ιστορία του ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας.



Διάγραμμα 25: Χρονική ιστορία HRR προσομοίωσης με ψεκασθήρες και e_coef=1 m²/kgs



Διάγραμμα 26: T,t σε μία θέση πάνω από την πηγή για προσομοίωση με ψεκασθήρες και e_coef=1 m²/kgs

Συγκεκριμένα, σύμφωνα με το διάγραμμα 25 φαίνεται ότι το HRR πέφτει απότομα από την χρονική στιγμή ενεργοποίησης των ψεκαστήρων (περίπου 17 s) και μετά. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει ότι ο ψεκασμός του νερού στην επιφάνεια καύσης της πηγής, έχει επιρροή στον ρυθμό καύσης του καυσίμου και κατά συνέπεια τον μειώνει αισθητά, οδηγώντας την φωτιά σε καταστολή για την παρούσα προσομοίωση. Αντίστοιχη πορεία ακολουθεί και η θερμοκρασία του καπνού πάνω από την πηγή, καθώς όπως φαίνεται από το διάγραμμα 26 μειώνεται με ακόμα πιο απότομο ρυθμό συγκριτικά με την προηγούμενη περίπτωση. Η περαιτέρω αυτή πτώση της θερμοκρασίας συνεπάγεται από το γεγονός ότι το νερό επηρεάζει την επιφάνεια καύσης με αποτέλεσμα, πέρα από την μείωση της θερμοκρασίας των θερμών αερίων στο χώρο, να προκύπτει και επιπλέον μείωση των θερμοκρασιών των επιφανειών της πηγής, λόγω της μείωσης της παραγόμενης θερμότητας.

Όπως γίνεται κατανοητό η αλλαγή αυτή τόσο στην χρονική ιστορία του HRR όσο και στις θερμοκρασίες οφείλεται στο **γεγονός ότι ο extinguish coefficient έλαβε την τιμή 1 m²/kgs έναντι της τιμής 0 που έλαβε στην προηγούμενη προσομοίωση**. Συνεπώς, από αυτές τις 3 δοκιμαστικές προσομοιώσεις εξάγεται το συμπέρασμα, ότι για να γίνει αντιληπτή η επιρροή του ψεκασμού του νερού των ψεκαστήρων σε πυρκαγιά που έχει οριστεί με συνάρτηση ramp-up μέσα στο λογισμικό FDS, πρέπει ο συντελεστής αυτός να λάβει οπωσδήποτε τιμή μεγαλύτερη του 0. Για τον λόγο αυτό, στις κύριες υπολογιστικές προσομοιώσεις μεγαλύτερης κλίμακας που πραγματοποιήθηκαν στο κεφάλαιο 5.4, εξετάστηκαν διάφορες θετικές τιμές της παραμέτρου αυτής πάνω στην επιρροή τους στην κατάσβεση της πυρκαγιάς μέσα στο FDS.