



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

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Μελέτη συστημάτων ανίχνευσης πυρκαγιάς σε
κατάστρωμα RO/RO πλοίου»**

Γομάτος Βασίλειος

nm16008

Επιβλέπων: Νικόλαος Θεμελής

Αθήνα, Ιούλιος 2021

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας και ακολούθως την ολοκλήρωση των σπουδών μου στη σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Νικόλαο Θεμελή για την υποδειγματική στήριξη και συνεργασία καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον παππού μου Ηρόδοτο και τη γιαγιά μου Μαρία που παρ' όλες τις δυσκολίες κατάφεραν να επιτελέσουν το ρόλο των γονιών μου όλα αυτά τα χρόνια.

*Αφιερώνεται στη γιαγιά μου Αγάπη
που έφυγε σήμερα από κοντά μας..*

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η απόκριση των συστημάτων πυρανίχνευσης σε κατάστρωμα οχημάτων επιβατηγού/οχηματαγωγού πλοίου, με την πραγματοποίηση μιας σειράς υπολογιστικών προσομοιώσεων εξετάζοντας διαφορετικές παραμέτρους και συγκεκριμένα την ένταση της πυρκαγιάς, την ευαισθησία και τη διάταξη των ανιχνευτών, τη φόρτωση του καταστρώματος και την επίδραση του ανέμου. Αρχικά, δίνονται οι βασικές αρχές μετάδοσης θερμότητας για την κατανόηση της διάδοσης μιας πυρκαγιάς. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται το κανονιστικό πλαίσιο όπως περιγράφεται στις διατάξεις της SOLAS και του Fire Safety System Code (FSS) που αφορούν τα συστήματα ανίχνευσης πυρκαγιάς. Ακολουθεί περιγραφή των διαφόρων ανιχνευτών καπνού και θερμότητας καθώς και η αρχή λειτουργίας τους. Έπειτα, προσδιορίζοντας τους παράγοντες που επηρεάζουν την ανίχνευση της πυρκαγιάς, εξετάζεται η επιλογή του κατάλληλου συστήματος ανίχνευσης με βάση στοιχεία από τη μελέτη της EMSA (Firesafe II detection and decision). Παράλληλα, μελετάται το μαθηματικό μοντέλο ανίχνευσης θερμότητας, καθώς και η επέκταση του στο σύστημα ανίχνευσης καπνού μέσω της επίλυσης των εξισώσεων που διέπουν το φαινόμενο. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις, σχολιάζονται και συγκρίνονται, καταλήγοντας, στα εξής βασικά συμπεράσματα:

- Η ευαισθησία των ανιχνευτών αποτελεί σημαντική παράμετρο για την έγκαιρη ανίχνευση καπνού και θερμότητας
- Η παρουσία του ανέμου καθυστερεί αρκετά την ανίχνευση θερμότητας αλλά και του καπνού
- Η πυρκαγιά που αναπτύσσεται με αργό ρυθμό είναι δυσκολότερο να ανιχνευτεί συγκριτικά με μία “γρήγορη” πυρκαγιά
- Η ποσότητα καπνού που παράγεται ανά γραμμάριο καύσιμης ύλης επηρεάζει άμεσα την ανίχνευση καπνού
- Μια 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

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η κατανόηση της αρχής λειτουργίας των συστημάτων ανίχνευσης θερμότητας και καπνού σε καταστρώματα οχημάτων, καθώς και η απόκριση τους υπό διάφορες συνθήκες. Η επιλογή του κατάλληλου συστήματος πυρανίχνευσης προσφέρει υψηλότερα επίπεδα πυρασφάλειας, καθώς η ανίχνευση της πυρκαγιάς στο πρώιμο της στάδιο καθιστά την κατάσβεση της περισσότερο διαχειρίσιμη, αποτρέποντας έτσι πιθανές ανθρώπινες απώλειες, οικονομικές και οικολογικές καταστροφές.

Abstract

The present thesis examined the response of the fire detection systems on the deck of passenger/Ro-Ro ships, by performing a series of numerical simulations examining different parameters, namely the intensity of the fire, the sensitivity and the arrangement of the detectors, the deck's loading condition, the wind effect. Firstly, the basic principles of heat transfer are stated, in order to understand how a fire is spread. Subsequently, the current SOLAS and FSS code regulations concerning fire detection systems are presented. Then follows the description of the various smoke and heat detectors and their operation principle. Thereafter, identifying the factors that affect the fire's detection, the selection of the appropriate detection system is examined, based on data from the study of EMSA (Firesafe II detection and decision). Furthermore, the mathematical model of heat detection, as well as its application on smoke detection systems through the solution the equations that govern the phenomenon are studied. Finally, the results obtained from the simulations are presented, commented on and compared, concluding to the following main outcomes:

- The detectors' sensitivity is a crucial parameter of early detection of smoke and heat
- The presence of wind delays the detection of heat and smoke
- A slow-growing fire is more difficult to detect than a "fast" fire
- The amount of smoke produced per gram of fuel directly affects the detection of smoke
- A dense detector array provides a more immediate response than a sparse array
- Heat detection appears to be faster on a partially loaded deck; on the other hand, smoke detection appears to respond more immediately when the deck is fully loaded

The aim of this thesis is to comprehend the operation principles of heat and smoke detection systems on vehicle decks, as well as their response under various conditions. Choosing the appropriate fire detection system offers a higher level of fire safety, as the detection of the fire at an early stage makes its extinguishing more manageable, thus preventing possible human losses, economic and ecological disasters.

Λίστα με πίνακες

Πίνακας 1. Ενδεικτικές τιμές θερμικής ακτινοβολίας (kW/m^2) [Drysdale, 2011]	16
Πίνακας 2. Τιμές θερμικής ακτινοβολίας για διάφορα στάδια πυρκαγιάς [Drysdale 2011]	17
Πίνακας 3. Τιμές του συντελεστή ρυθμού ανάπτυξης α για αργή, μέτρια, γρήγορη και πολύ γρήγορη "t-squared" πυρκαγιά (Themelis & Spyrou 2012)	20
Πίνακας 4. Μέγιστη απόσταση ανιχνευτών βάσει FSS Code	28
Πίνακας 5. Βασικά μέτρα περιορισμού διακινδύνευσης (EMSA 2018)	38
Πίνακας 6. Επιδράσεις των διαφόρων παραμέτρων στο χρόνο ανίχνευσης όπως προέκυψαν από την επίλυση του μαθηματικού μοντέλου.	43
Πίνακας 7. Μέσες τιμές του λόγου $OD/\Delta T$ για διάφορους τύπους καυσίμων (Hesketad and Delechatsios 1997)	44
Πίνακας 8. Προτεινόμενες τιμές των παραμέτρων του μοντέλου Cleary (FDS manual)	49
Πίνακας 9. Σενάρια που εξετάστηκαν στις υπολογιστικές προσομοιώσεις.	60
Πίνακας 10. Αποτελέσματα της Α' ομάδας προσομοιώσεων	62
Πίνακας 11. Αποτελέσματα Β' ομάδας προσομοιώσεων.	64
Πίνακας 12. Αποτελέσματα Γ' ομάδας προσομοιώσεων	66
Πίνακας 13. Πίνακας αποτελεσμάτων Δ' ομάδας προσομοιώσεων.	68
Πίνακας 14. Αποτελέσματα προσομοιώσεων πυρκαγιάς για τον προσδιορισμό του χρόνου ανίχνευσης.	70
Πίνακας 15. Αποτελέσματα προσομοιώσεων πυρκαγιάς για τον προσδιορισμό του χρόνου ανίχνευσης με 1.5 φορά λιγότερους ανιχνευτές.	70

Λίστα με διαγράμματα

Διάγραμμα 1. Η πορεία μιας πυρκαγιάς εκφρασμένη ως το ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας σε συνάρτηση με το χρόνο [Drysdale, 2011]	18
Διάγραμμα 2. Χρονική ιστορία του ρυθμού ανάπτυξης πυρκαγιάς όπως περιγράφεται από αργή, μέση, γρήγορη και πολύ γρήγορη t-squared πυρκαγιά.	20
Διάγραμμα 3. Τυπικό σενάριο πυρκαγιάς όσον αφορά την ανίχνευση πυρκαγιάς (ή την πρόληψη) EMSA (2018)	34
Διάγραμμα 4. Αποκρίσεις ανιχνευτών με R=1, R=4 και R=8 m σε πυρκαγιά που αναπτύσσεται με αργό ρυθμό	42
Διάγραμμα 5. Αποκρίσεις ανιχνευτών με R=1, R=4 και R=8 m σε πυρκαγιά που αναπτύσσεται με μέτριο ρυθμό.	42
Διάγραμμα 6. Σύγκριση απόκρισης ανιχνευτών για διαφορετικά RTI, R=4m	43
Διάγραμμα 7. Ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας για φορτηγό (Breuillard, A. et al., 2012).	51
Διάγραμμα 8. Αναπαράσταση των HRR που χρησιμοποιήθηκαν για να μοντελοποιήσουν το ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας.	54
Διάγραμμα 9. Αναπαράσταση των HRR που χρησιμοποιήθηκαν για να μοντελοποιήσουν το ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας καθώς και τα HRR που υπολόγισε το PyroSim για τις αντίστοιχες περιπτώσεις. Παρατηρείται ότι η θεωρητική καμπύλη της αργής πυρκαγιάς είναι περίπου ίδια με εκείνη που προέκυψε από υπολογισμό στο PyroSim.	61
Διάγραμμα 10. 1η και 2η ανίχνευση θερμοκρασίας για 100% φόρτωση καταστρώματος	63
Διάγραμμα 11. Χρονική ιστορία των δύο ανιχνευτών που ενεργοποιήθηκαν πρώτοι και ήταν ρυθμισμένοι για κάλυψη 11.5%/m (soot yield: 0.06, 100% φόρτωση καταστρώματος)	63
Διάγραμμα 12. Καμπύλη πειραματικού HRR παρουσία ανέμου όπως υπολογίστηκε στο PyroSim και καμπύλη πειραματικού HRR. Παρατηρείται ότι η επίδραση του ανέμου σε αυτό το χρονικό διάστημα είναι αμελητέα. Ο άνεμος πρόκειται να αυξήσει το HRR μετά τα 1000 sec	64
Διάγραμμα 13. Απόκριση συστήματος ανίχνευσης θερμότητας για αργή πυρκαγιά και πλήρως φορτωμένο κατάστρωμα χωρίς άνεμο.	65
Διάγραμμα 14. Χρονική ιστορία του πρώτου ζεύγους ανιχνευτών καπνού που εντόπισε την πυρκαγιά με ευαισθησία 11.5%/m.	65
Διάγραμμα 15. Απόκριση πρώτου ζεύγους ανιχνευτών θερμότητας για αργή πυρκαγιά και πλήρως φορτωμένο κατάστρωμα χωρίς άνεμο.	66
Διάγραμμα 16. Χρονική ιστορία του πρώτου ζεύγους ανιχνευτών που εντόπισε την πυρκαγιά με ευαισθησία 11.5%/m.	67
Διάγραμμα 17. Απόκριση πρώτου ζεύγους ανιχνευτών θερμότητας στο τελευταίο πείραμα	68
Διάγραμμα 18. Απόκριση πρώτου ζεύγους ανιχνευτών καπνού με obscuration Threshold (ποσοστό κάλυψης καπνού) 6.5%/m στο τελευταίο πείραμα.	69
Διάγραμμα 19. Επίδραση ευαισθησίας των ανιχνευτών καπνού στο χρόνο ανίχνευσης της πυρκαγιάς (Αποτελέσματα Δ' ομάδας προσομοιώσεων)	72
Διάγραμμα 20. Απόκριση πρώτου ζεύγους ανιχνευτών θερμότητας.	77
Διάγραμμα 21. Απόκριση πρώτου ζεύγους ανιχνευτών καπνού που ήταν ρυθμισμένοι να ενεργοποιούνται για obscuration threshold 3.28%/m.	77
Διάγραμμα 22. Απόκριση πρώτου ζεύγους ανιχνευτών καπνού που ήταν ρυθμισμένοι να ενεργοποιούνται για obscuration threshold 11.5%/m.	78
Διάγραμμα 23. Απόκριση πρώτου ζεύγους ανιχνευτών θερμότητας.	78
Διάγραμμα 24. Απόκριση πρώτου ζεύγους ανιχνευτών καπνού που ήταν ρυθμισμένοι να ενεργοποιούνται για obscuration threshold 3.28%/m.	79
Διάγραμμα 25. Απόκριση πρώτου ζεύγους ανιχνευτών καπνού που ήταν ρυθμισμένοι να ενεργοποιούνται για obscuration threshold 11.5%/m.	79
Διάγραμμα 26. Απόκριση πρώτου ζεύγους ανιχνευτών θερμότητας.	80
Διάγραμμα 27. Απόκριση πρώτου ζεύγους ανιχνευτών καπνού που ήταν ρυθμισμένοι να ενεργοποιούνται για obscuration threshold 3.28%/m.	80

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....	9
1. Εισαγωγή	12
1.1 Σχετικές μελέτες με τα συστήματα ανίχνευσης πυρκαγιάς	12
1.2 Στόχος και δομή της εργασίας.....	14
2. Χαρακτηριστικά πυρκαγιών	16
2.1 Μετάδοση θερμότητας και στάδια πυρκαγιάς	16
2.2 Ρυθμός ανάπτυξης πυρκαγιάς.....	19
3. Κανονισμοί και απαιτήσεις σχετικά με την ανίχνευση πυρκαγιάς	21
3.1 Πηγές.....	21
3.2 Ορισμοί.....	21
3.3 Απαιτήσεις συστημάτων ανίχνευσης και συναγερμού	23
3.3.1 Ορισμοί	23
3.3.2 Είδη συστημάτων.....	23
3.3.3 Τεχνικές προδιαγραφές	24
3.3.4 Πηγές Τροφοδοσίας.....	25
3.3.5 Απαιτήσεις συστήματος.....	26
3.3.6 Απαιτήσεις εγκατάστασης	27
3.3.7 Θέσεις ανιχνευτών.....	27
3.3.8 Απαιτήσεις ελέγχου συστήματος	28
3.3.9 Δοκιμές ανιχνευτών	28
3.3.10 Συστήματα ανίχνευσης καπνού εξαγωγής δείγματος.....	29
3.3.11 Απαιτήσεις εγκατάστασης	30
4. Ανιχνευτές πυρκαγιάς	31
4.1 Αισθητήρια πυρκαγιάς.....	31
4.2 Τύποι αισθητηρίων	31
5. Παράγοντες που επηρεάζουν την ανίχνευση	34
5.1 Επίδραση φόρτωσης καταστρώματος στο χρόνο ανίχνευσης	35
5.1.1 Διαμόρφωση φόρτωσης καταστρώματος	35
5.1.2 Επίδραση του είδους του φορτίου	35
5.1.3 Επίδραση της διάταξης του φορτίου	35
6. Επιλογή κατάλληλου συστήματος ανίχνευσης	38
6.1 Προσδιορισμός των μέτρων περιορισμού διακινδύνευσης (RCMs- Risk Control Measures)....	38

6.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μέτρων περιορισμού της διακινδύνευσης	38
6.2.1 Συνδυασμός ανίχνευσης καπνού και θερμότητας	39
6.2.2 Αποκλεισμός/κλείσιμο πλευρικών ανοιγμάτων PS & SB	39
6.2.3 Αύξηση συχνότητας περιπολιών πυρκαγιάς	39
7. Θεωρητικά μοντέλα ανίχνευσης πυρκαγιάς.....	40
7.1 Το μαθηματικό μοντέλο ανίχνευσης θερμότητας.....	40
7.1.1 Εφαρμογή του μαθηματικού μοντέλου.....	41
7.1.2 Εφαρμογή του μοντέλου ανίχνευσης θερμότητας στην ανίχνευση του καπνού	43
7.1.3 Εφαρμογή της διαφορικής εξίσωσης του Schifilti στην ανίχνευση καπνού.	44
7.1.4 Βελτιστοποίηση απόδοσης συστήματος ανίχνευσης καπνού σε επιβατηγά πλοία	45
8. Αριθμητικές προσομοιώσεις πυρκαγιάς	46
8.1 FDS	46
8.2 Μοντελοποίηση ανίχνευσης καπνού σε FDS.....	47
8.3 PyroSim	49
8.4 Μοντέλο και σενάρια προσομοιώσεων	50
8.5 Υπολογιστικές προσομοιώσεις	60
Α' ομάδα προσομοιώσεων: επίδραση soot yield και φόρτωσης καταστρώματος	62
Β' Ομάδα προσομοιώσεων: Επίδραση ανέμου	64
Γ' Ομάδα προσομοιώσεων: Επίδραση ρυθμού αύξησης πυρκαγιάς.....	66
Δ' Σενάριο προσομοιώσεων: Επίδραση ποσοστού κάλυψης ανιχνευτών	67
9. Σύγκριση αποτελεσμάτων και συμπεράσματα.....	70
9.1 Το σενάριο της πυρκαγιάς	71
9.2 Ευαισθησία ανιχνευτών.....	71
9.3 Φόρτωση καταστρώματος.....	72
9.4 Άνεμος.....	72
9.5 Soot Yield	73
9.6 Σύγκριση συστημάτων ανίχνευσης θερμότητας και καπνού	73
9.7 Σύνοψη και προτάσεις για μελλοντική έρευνα	74
Βιβλιογραφία.....	75
Παράρτημα-Αποτελέσματα ομάδων προσομοιώσεων στο PyroSim	77
Α' Ομάδα προσομοιώσεων.....	77
Α1.....	77
Α2.....	78
Α3.....	80
Α4.....	81
Β' Ομάδα προσομοιώσεων.....	83

B1.....	83
B2.....	84
Γ' Ομάδα προσομοιώσεων	86
Γ1.....	86
Γ2.....	87
Δ' Ομάδα Προσομοιώσεων	89

1. Εισαγωγή

Η μελέτη πυρασφάλειας και πυροπροστασίας σε καταστρώματα οχημάτων πλοίων τύπου RoPax είναι πολύ σημαντική, τόσο στο στάδιο της σχεδίασης, όσο και στη λειτουργία του πλοίου. Σύμφωνα με στατιστική μελέτη της EMSA (2018), από το 2002 έως το 2016, έχουν καταγραφεί 132 ατυχήματα πυρκαγιάς, εκ των οποίων τα 37 (30 %) έλαβαν χώρα σε χώρους ro-ro προκαλώντας ανθρώπινες απώλειες, υλικές ζημιές ή ακόμη και ολική καταστροφή του πλοίου. Χαρακτηριστικές περιπτώσεις τέτοιων ατυχημάτων ήταν τα πλοία M / V Al Salam Boccaccio 98, προκαλώντας 1031 ανθρώπινες απώλειες και αγνοούμενους και το Norman Atlantic, με 18 ανθρώπινες απώλειες.

Ένας από τους βασικούς πυλώνες της πυρασφάλειας είναι η πυρανίχνευση. Η ανίχνευση μιας πυρκαγιάς στο πρώιμο της στάδιο μειώνει τις πιθανότητες να υπάρξουν ανθρώπινες απώλειες, ζημιές στην κατασκευή του πλοίου, αλλά και περιβαλλοντικές καταστροφές. Τα ευρέως διαδεδομένα συστήματα πυρανίχνευσης που χρησιμοποιούνται στα πλοία είναι το σύστημα ανίχνευσης θερμότητας και το σύστημα ανίχνευσης καπνού, ο συνδυασμός των οποίων μπορεί να προσφέρει υψηλά επίπεδα πυρασφάλειας. Πέρα, όμως, από την ύπαρξη ενός σταθερού συστήματος ανίχνευσης, είναι απαραίτητη η τακτική εκτέλεση περιπολιών πυρκαγιάς από το πλήρωμα του πλοίου. Αρκετά από τα ατυχήματα πυρκαγιάς σε χώρους ro-ro οφείλονταν σε προβλήματα σχετικά με την ανίχνευση. Τα προβλήματα αυτά προκλήθηκαν από:

- Εσωτερικές αιτίες όπως :
 - Η κακή εγκατάσταση του συστήματος πυρανίχνευσης
 - Ο λανθασμένος χειρισμός του συστήματος από το πλήρωμα
 - Η ανεπαρκής εκτέλεση περιπολιών πυρκαγιάς
- Εξωτερικές αιτίες όπως:
 - Ο άνεμος και ο εξαερισμός
 - Τα ανοίγματα σε χώρους ro-ro

Επομένως, προκειμένου να επιτευχθούν υψηλότερα επίπεδα πυρασφάλειας σε χώρους ro-ro, είναι αναγκαίο να σχεδιαστεί κατάλληλα ένα σταθερό σύστημα πυρανίχνευσης, το οποίο θα χρησιμοποιείται συνετά και θα συμβάλλει, σε συνδυασμό με την τακτική εκτέλεση περιπολιών, στην έγκαιρη ανίχνευση της πυρκαγιάς και κατ' επέκταση στην ευκολότερη αντιμετώπιση της.

1.1 Σχετικές μελέτες με τα συστήματα ανίχνευσης πυρκαγιάς

Λόγω της εκτεταμένης συζήτησης για το θέμα των πυρκαγιών σε χώρους ro-ro, υπάρχει μια εκτενής λίστα αναφορών και μελετών που έχουν δημοσιευθεί. Η λίστα αυτή αφορά θέματα όπως τους παράγοντες που επηρεάζουν την ανάπτυξη της πυρκαγιάς, την απόκριση του συστήματος ανίχνευσης, τη βελτιστοποίηση των συστημάτων ανίχνευσης θερμότητας και καπνού, μαθηματικά μοντέλα ανίχνευσης πυρκαγιάς αλλά και προσομοιώσεις σε υπολογιστικό κώδικα ρευστομηχανικής (Fire Dynamic Simulator- FDS) για την μελέτη των παραμέτρων που επηρεάζουν την απόκριση των συστημάτων ανίχνευσης πυρκαγιάς. Παρακάτω παρατίθενται ορισμένα συμπεράσματα και παρατηρήσεις από τέτοιες μελέτες.

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, η ασφαλής εκκένωση του πλοίου θεωρήθηκε εφικτή στα πρώτα 23 λεπτά από την έναρξη της πυρκαγιάς. Μετά από αυτό το χρονικό διάστημα επικρατούσε κίνδυνος ασφυξίας.

Σε μελέτη των παραμέτρων που επηρεάζουν την ανάπτυξη της πυρκαγιάς σε κατάστρωμα RoPax πλοίου (Themelis & Pagonis 2021), προσδιορίστηκε η επίδραση: της διάταξης των οχημάτων, των ανοιγμάτων στο χώρο του καταστρώματος και του ανέμου. Τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν ήταν :

- Οι αποστάσεις μεταξύ των οχημάτων είναι σημαντική παράμετρος για τη διάδοση της πυρκαγιάς
- 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 για διερεύνηση αποτελεσματικών μέτρων με σκοπό τη μείωση του κινδύνου πυρκαγιών (FIRESAFE II) [EMSA,2018], παρουσιάζονται μέτρα περιορισμού του κινδύνου της πυρκαγιάς μέσω της κατάλληλης σχεδίασης του συστήματος ανίχνευσης. Βασικά συμπεράσματα αυτής της μελέτης ήταν :

- Η χρήση συνδυασμένης ανίχνευσης θερμότητας και καπνού δύναται προσφέρει καλύτερη παρακολούθηση και εντοπισμό της θέσης της πυρκαγιάς
- Το κλείσιμο-αποκλεισμός των ανοιγμάτων σε χώρους ro-ro βελτιστοποιεί την απόκριση των συστημάτων ανίχνευσης θερμότητας και καπνού
- Η διάταξη των οχημάτων σε συνδυασμό με το ύψος οροφής του καταστρώματος επηρεάζει τις συνθήκες ροής του αέρα, οι οποίες με τη σειρά τους έχουν άμεσο αντίκτυπο στην απόκριση του συστήματος ανίχνευσης
- Το σενάριο της πυρκαγιάς, δηλαδή ο τρόπος ανάπτυξης της, επηρεάζει το χρόνο που απαιτείται για την ανίχνευση της

Σε μελέτη που πραγματοποιήθηκε με σκοπό τη βελτιστοποίηση της απόδοσης των ανιχνευτών καπνού σε επιβατηγά πλοία (Themelis & Spyrou 2012), παρουσιάστηκε το μαθηματικό μοντέλο ανίχνευσης θερμότητας, η εφαρμογή του στο σύστημα ανίχνευσης καπνού και εξήχθησαν κάποια βασικά συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση διαφόρων παραμέτρων που επηρεάζουν το χρόνο ανίχνευσης του καπνού. Μερικά από αυτά ήταν :

- Η αύξηση της ευαισθησίας των ανιχνευτών καπνού μειώνει σε μεγάλο βαθμό το χρόνο ανίχνευσης της πυρκαγιάς, μειώνοντας τον 7 φορές περισσότερο σε σχέση με ανιχνευτές χαμηλής ευαισθησίας
- Μειώνοντας το εμβαδόν κάλυψης που ελέγχει κάθε ανιχνευτής καπνού, ο χρόνος ανίχνευσης καπνού μειώνεται έως και 3 φορές

Σε μία ακόμη μελέτη, σχετική με την ανίχνευση της πυρκαγιάς, παρουσιάστηκε και ποσοτικοποιήθηκε το κριτήριο της έγκαιρης ανίχνευσης (Antoine Cassez & Pierrick Mindykowski 2021). Το κανονιστικό πλαίσιο της SOLAS απαιτεί έγκαιρη ανίχνευση πυρκαγιάς χωρίς όμως να την

ποσοτικοποιεί. Στη μελέτη που διεξήχθη η έγκαιρη ανίχνευση ορίστηκε με βάση το χρόνο που απαιτείται για την ασφαλή κατάσβεση με τη χρήση πυροσβεστήρα από ένα μέλος του πληρώματος. Συγκεκριμένα, θα πρέπει :

- Η κατάσβεση της πυρκαγιάς να γίνει πριν τα βλαβερά της για τον άνθρωπο παράγωγα (ακτινοβολία, καπνός, μονοξείδιο του άνθρακα, θερμότητα) φτάσουν σε επικίνδυνες τιμές
- Η κατάσβεση της πυρκαγιάς να γίνει από μία ασφαλή απόσταση για τον άνθρωπο, αλλά και επαρκή για να αποδώσει ο πυροσβεστήρας

Επομένως, δεν αρκεί μόνο η έγκαιρη ανίχνευση της πυρκαγιάς στο πρώιμο της στάδιο, αλλά απαιτείται έγκαιρη ανίχνευση με σκοπό την ασφαλή κατάσβεση της από το πλήρωμα.

1.2 Στόχος και δομή της εργασίας

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιούνται προσομοιώσεις διαφόρων σεναρίων πυρκαγιάς στο κατάστρωμα φορτηγών ενός επιβατηγού/οχηματαγωγού πλοίου, με απώτερο στόχο τον υπολογισμό της απόκρισης των συστημάτων ανίχνευσης θερμότητας και καπνού. Συγκεκριμένα μελετήθηκε η απόκριση του συστήματος ανίχνευσης:

- Για μία πυρκαγιά η ανάπτυξη της οποίας είναι αντιπροσωπευτική για ένα φορτηγό που καίγεται σε ανοιχτό χώρο, καθώς επίσης και για μία πυρκαγιά η οποία αναπτύσσεται με αργό ρυθμό
- Σε συνθήκες με και χωρίς άνεμο
- Σε συνθήκες 100% και 50% φόρτωσης καταστρώματος
- Σε συνθήκες παραγωγής αραιού και πυκνού καπνού (soot yield) κατά την καύση
- Για διαφορετικές τιμές ευαισθησίας των ανιχνευτών
- Για διαφορετικό αριθμό ανιχνευτών

Για την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό PyroSim της εταιρίας ThunderHead Engineering. Στο λογισμικό αυτό σχεδιάστηκε ένα κατάστρωμα φορτηγών και τοποθετήθηκαν ανιχνευτές θερμότητας και καπνού σύμφωνα με το κανονιστικό πλαίσιο της SOLAS και του Fire Safety Code (FSS).

Για την εκπόνηση των προσομοιώσεων, η πυρκαγιά μοντελοποιήθηκε μέσω του ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας (HRR), της αντίδρασης της καύσης και της ποσότητας καπνού που παράγεται κατά την καύση. Σε όλες τις περιπτώσεις που χρησιμοποιήθηκαν, κατασκευάστηκαν οι θεωρητικές-πρότυπες καμπύλες του ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας και συγκρίθηκαν με αυτές που προέκυψαν από τον υπολογισμό του προγράμματος, με σκοπό τον έλεγχο της εγκυρότητας τους. Τέλος, από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων πυρκαγιάς, παρουσιάζεται η απόκριση του κάθε συστήματος πυρανίχνευσης συναρτήσει του χρόνου, καθώς επίσης και ο χρόνος που απαιτήθηκε για την ανίχνευση της πυρκαγιάς από τα συστήματα ανίχνευσης θερμότητας και καπνού.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές αρχές της μετάδοσης θερμότητας και τα μεγέθη που μας βοηθούν να ποσοτικοποιήσουμε την ένταση μιας πυρκαγιάς. Ορίζεται ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας (Heat Release Rate – HRR), μέγεθος το οποίο χρησιμοποιείται στις προσομοιώσεις για την σύγκριση των διαφόρων περιπτώσεων. Παράλληλα, παρατίθενται διαγράμματα του ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας για αργή, μέτρια, γρήγορη και πολύ γρήγορη πυρκαγιά.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι ισχύοντες κανονισμοί που αφορούν την πυρανίχνευση σε επιβατηγά/οχηματαγωγά πλοία. Το μεγαλύτερο μέρος των απαιτήσεων προκύπτει από το Safety Of Life At Sea (SOLAS) Chapter II-2 Fire detection και το Fire Safety System (FSS) Code.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στους διαφόρους τύπους ανιχνευτών που χρησιμοποιούνται σε πλοία, καθώς και στην αρχή λειτουργίας τους.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι παράγοντες που επηρεάζουν την ανίχνευση της πυρκαγιάς σύμφωνα με τη μελέτη Firesafe II Detection and Decision της EMSA. Δίνεται έμφαση στην επίδραση της φόρτωσης του καταστρώματος και του είδους του φορτίου στο χρόνο ανίχνευσης της πυρκαγιάς από τα διάφορα συστήματα.

Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά σε μέτρα περιορισμού της διακινδύνευσης της πυρκαγιάς που προτάθηκαν από τη μελέτη Firesafe II Detection and Decision της EMSA. Παρατίθενται λύσεις σχετικές με τη φόρτωση του καταστρώματος, το κλείσιμο των ανοιγμάτων σε χώρους ro-ro αλλά και το σταθερό σύστημα ανίχνευσης της πυρκαγιάς.

Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζεται το μαθηματικό μοντέλο ανίχνευσης θερμότητας και η επέκταση του στο σύστημα ανίχνευσης καπνού. Παρουσιάζονται οι σχετικές εξισώσεις, καθώς επίσης και ένα παράδειγμα στο οποίο μελετάται η απόκριση ενός ανιχνευτή θερμότητας για διάφορες συνθήκες.

Το όγδοο κεφάλαιο εμπεριέχει τις υπολογιστικές προσομοιώσεις για τη μελέτη της απόκρισης των συστημάτων ανίχνευσης θερμότητας και καπνού. Παρουσιάζεται συνοπτικά το πρόγραμμα PyroSim, μέσω του οποίου υλοποιείται κώδικας FDS και στη συνέχεια παρατίθενται μία-μία οι περιπτώσεις που εξετάστηκαν, καθώς και τα αποτελέσματα της κάθε προσομοίωσης. Παράλληλα, γίνεται αναφορά στο μαθηματικό μοντέλο ανίχνευσης καπνού που χρησιμοποιείται από τα προγράμματα προσομοίωσης πυρκαγιάς (FDS). Τέλος, συγκρίνονται τα αποτελέσματα και οδηγούμαστε σε παρατηρήσεις και συμπεράσματα για τις παραμέτρους που εξετάστηκαν.

2. Χαρακτηριστικά πυρκαγιών

2.1 Μετάδοση θερμότητας και στάδια πυρκαγιάς

Προκειμένου να γίνει κατανοητή η διαδικασία με την οποία εξελίσσεται μια πυρκαγιά θεωρείται χρήσιμο να αναφερθούν μερικές βασικές αρχές μετάδοσης θερμότητας σε καταστώματα, αλλά και σε ολόκληρο το πλοίο. Με βάση τις παραπάνω αρχές, η φωτιά μεταφέρεται από το σημείο της έναρξης της σε χώρους με διαθέσιμη καύσιμη ύλη.

Η μεταφορά θερμότητας γίνεται με τρεις τρόπους :

- Αγωγιμότητα, που συμβαίνει μέσω της διάδοσης των μοριακών δονήσεων μεταξύ στερεών αντικειμένων που βρίσκονται σε επαφή. Το φαινόμενο της αγωγής θερμότητας επηρεάζεται από παράγοντες όπως η θερμική αγωγιμότητα των υλικών και η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των αντικειμένων. Ο ρυθμός μεταφοράς της θερμότητας εξαρτάται από τους παραπάνω παράγοντες (νόμος Fourier).
- Συναγωγή, όπου η θερμότητα μεταφέρεται από την κίνηση των ρευστών. Τα θερμά αέρια τείνουν να ανεβαίνουν (με την αύξηση της θερμοκρασίας η πυκνότητα του αερίου μειώνεται) και να μεταφέρουν θερμότητα στις οροφές και στους τοίχους. Γι' αυτούς τους λόγους θεωρείται ο πρωταρχικός τρόπος εξάπλωσης της πυρκαγιάς.
- Ακτινοβολία, όπου είναι η μεταφορά θερμότητας μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από ένα σώμα σε ένα άλλο. Όλα τα σώματα που έχουν θερμοκρασία μεγαλύτερη από το απόλυτο 0 εκπέμπουν ακτινοβολία. Η ακτινοβολία συντηρεί την καύση, καθώς η ενέργεια της ακτινοβολίας συμβάλλει στην πυρόλυση του καυσίμου.

Μερικές τιμές αναφοράς για τη θερμική ακτινοβολία φαίνονται στον πίνακα 1.

Πίνακας 1. Ενδεικτικές τιμές θερμικής ακτινοβολίας (kW/m²) [Drysdale, 2011]

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

Το επίπεδο ακτινοβολίας που συνήθως απαιτείται για την ανάφλεξη στερεών είναι 10 kW/m², που αντιστοιχεί σε ένα στρώμα θερμών καπνών σε θερμοκρασία περίπου 400 °C. Το σημείο flashover, δηλαδή η έναρξη της γενικευμένης πυρκαγιάς, συμβαίνει όταν το στρώμα των θερμών αερίων ακτινοβολεί περίπου 20 kW/m² (~600 °C).

Κατά τη διάρκεια των διαφόρων σταδίων ανάπτυξης πυρκαγιάς εκλύονται διαφορετικές τιμές ακτινοβολίας.

Συγκεκριμένα, στον πίνακα 2 φαίνονται τα επίπεδα ακτινοβολίας κατά την ανάφλεξη, το σημείο flashover, την πλήρως αναπτυγμένη πυρκαγιά και τέλος, τη σοβαρή πυρκαγιά.

Πίνακας 2. Τιμές θερμικής ακτινοβολίας για διάφορα στάδια πυρκαγιάς [Drysdale 2011]

Fire step	Thermal radiation (kW/m ²)
Ignition	10
Flashover	20-40
Fully developed fire	50
Serious fire	100

Αξίζει να σημειωθεί ότι όταν η πυρκαγιά εξελίσσεται σε κλειστούς χώρους, ακόμη κι αν δεν υπάρχουν φλόγες, τα θερμά αέρια εκλύουν σημαντικά ποσά ακτινοβολίας που διαχέονται σε όλο τον όγκο του χώρου που λαμβάνει χώρα η πυρκαγιά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας στο χώρο με αποτέλεσμα να προκαλείται το φαινόμενο της ανάφλεξης (flashover). Σε αυτή τη φάση, η πυρκαγιά επεκτείνεται από σώματα που καίγονται σε όλα τα υπόλοιπα σώματα που συνυπάρχουν στον ίδιο χώρο. Είναι, λοιπόν, σημαντικό η ανίχνευση να προηγείται του σημείου flashover, προκειμένου να διευκολυνθεί η κατάσβεση της πυρκαγιάς.

Από τη στιγμή που η πυρκαγιά φτάσει στο σημείο “flashover” παρατηρείται έντονη αύξηση των θερμών αερίων αλλά και του παραγόμενου καπνού. Σε αυτή τη φάση, καθοριστικό ρόλο για την εξέλιξη της πυρκαγιάς αποτελεί ο εξαερισμός. Σε κλειστούς χώρους με ελάχιστο ή καθόλου εξαερισμό, η παροχή του φρέσκου αέρα που τροφοδοτεί την καύση είναι μικρή, με αποτέλεσμα η χαμηλή παροχή οξυγόνου να οδηγεί στην έντονη δημιουργία καπνού. Αντίθετα, στην περίπτωση ανοιχτών χώρων, η παροχή οξυγόνου είναι επαρκής με αποτέλεσμα να τροφοδοτείται συνεχώς η καύση και η πυρκαγιά να εξελίσσεται με ταχύτερους ρυθμούς παρατηρώντας έντονες φλόγες.

Η διάδοση της πυρκαγιάς είναι δυνατή αν η θερμική ροή ενός αντικειμένου αναφλέξει και τα άλλα υλικά που συνυπάρχουν στο χώρο. Τα αντικείμενα που βρίσκονται κοντά σε σώματα τα οποία καίγονται, θερμαίνονται εξαιτίας της θερμικής ροής, κι έτσι αυξάνεται η θερμοκρασία τους ώσπου να φτάσει το σημείο αυτανάφλεξης. Τότε ενεργοποιείται η αντίδραση της οξειδωσης και απελευθερώνεται θερμότητα. Τα επίπεδα ενέργειας (θερμικής ροής) που χρειάζονται για την ανάφλεξη ενός υλικού διαφέρουν ανάλογα με :

- το μέγεθος τους και την υγρασία, για στερεά καύσιμα
- την επιφάνεια και την πτητικότητα, για υγρά καύσιμα
- τη συγκέντρωση, για αέρια καύσιμα

Ο χρόνος που απαιτείται για την ανάφλεξη ενός υλικού που υπόκειται σε θερμική ροή εξαρτάται από την κρίσιμη ροή θερμότητας (critical heat flux – CHF), η οποία είναι συγκεκριμένη για κάθε υλικό.

Η κρίσιμη ροή θερμότητας αποτελεί κριτήριο για να χαρακτηριστεί ένα υλικό :

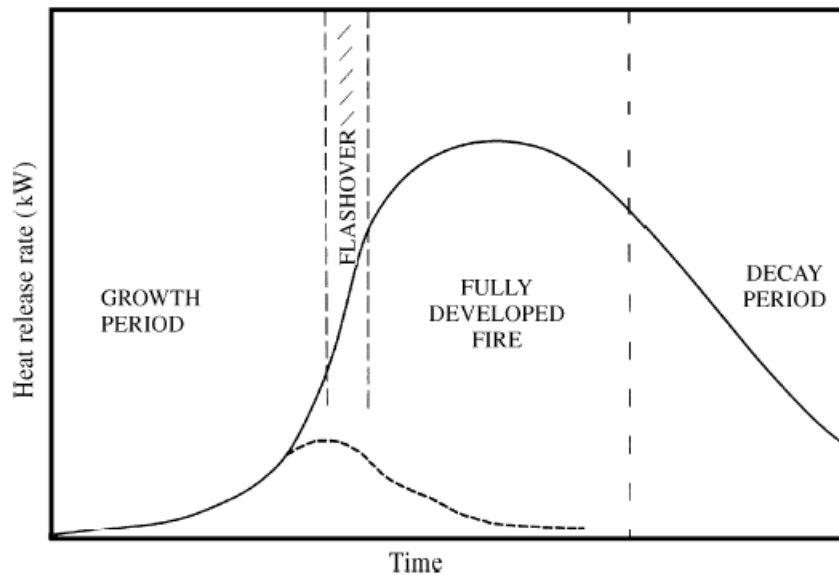
- εύφλεκτο, όπως για παράδειγμα το χαρτί, τα χαλιά και οι κουρτίνες που μπορούν να καούν υπό θερμικές ροές μικρότερες των 10kW/m²
- συμβατικό, δηλαδή με χαμηλή θερμική αδράνεια (ανάφλεξη υπό θερμική ροή μικρότερη των 20 kW/m²)
- μη εύφλεκτό, δηλαδή με σχετικά μεγάλη θερμική αδράνεια (άνω των 40kW/m²).

Η πυρκαγιά με βάση τα παραπάνω χωρίζεται σε 3 στάδια :

- Το στάδιο ανάπτυξης ή αλλιώς pre-flashover stage, κατά το οποίο η μέση θερμοκρασία του διαμερίσματος είναι σχετικά χαμηλή και η πυρκαγιά εντοπίζεται κοντά στον χώρο προέλευσης της.

- Η πλήρως αναπτυγμένη πυρκαγιά ή post-flashover stage, κατά τη διάρκεια της οποίας όλα τα εύφλεκτα αντικείμενα στο χώρο εμπλέκονται και ο χώρος γεμίζει με φλόγες.
- Η πτωτική περίοδος (decay period), που η μέση θερμοκρασία έχει μειωθεί στο 80% της μέγιστης αξίας της.

Στο Διάγραμμα 1 αποτυπώνονται τα 3 στάδια της πυρκαγιάς συναρτήσει του ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας (Heat Release Rate).



Διάγραμμα 1. Η πορεία μιας πυρκαγιάς εκφρασμένη ως ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας σε συνάρτηση με το χρόνο [Drysdale, 2011]

A. Στο εναρκτήριο στάδιο της πυρκαγιάς η μέση θερμοκρασία στο χώρο είναι χαμηλή και η πυρκαγιά είναι περιορισμένη στην περιοχή της αρχικής εστίας. Παρατηρούνται υψηλές θερμοκρασίες μέσα και γύρω από τα υλικά που καίγονται και ο παραγόμενος καπνός αρχίζει και εμφανίζει ένα θερμό στρώμα στην οροφή του διαμερίσματος. Κατά τη διάρκεια του σταδίου αυτού, ποσότητα άκαυστων και εύφλεκτων αερίων αναμιγνύεται με το φρέσκο αέρα πλησίον της οροφής ενός κλειστού χώρου, με αποτέλεσμα την καύση τους σε κάποια απόσταση από την εστία της πυρκαγιάς. Έτσι, σχηματίζεται ένα μέτωπο φλόγας κατά μήκος της οροφής που λέγεται rollover. Η διαφορά του με το flashover είναι ότι κατά το rollover, καίγονται μόνο τα αέρια που βρίσκονται στο χώρο και όχι όλα τα υλικά.

B. Στη συνέχεια, στο σημείο flashover, που είναι και το στάδιο της ανάφλεξης, γίνεται η μετάβαση από το εναρκτήριο στάδιο στο στάδιο πλήρους ανάπτυξης της πυρκαγιάς. Εκδηλώνεται σε πολύ σύντομο χρόνο και κατά τη διάρκεια του παρατηρείται απότομη εξάπλωση της πυρκαγιάς σε όλα τα καύσιμα υλικά του διαμερίσματος. Σε περίπτωση που η πυρκαγιά φτάσει σ' αυτό το σημείο, η αντιμετώπιση της είναι ιδιαίτερα δύσκολη, επομένως είναι πολύ σημαντικό η ανίχνευση της να προηγείται αυτού του σταδίου. Παρ' όλα αυτά το στάδιο αυτό δεν υπάρχει σε πυρκαγιά που εξελίσσεται σε μεγάλους χώρους (π.χ κατάστρωμα οχημάτων), σε αυτές τις περιπτώσεις υπάρχει κυρίως το στάδιο του spreadover, δηλαδή σταδιακή εξάπλωση της πυρκαγιάς στη διαθέσιμη καύσιμη ύλη.

Γ. Μετά το πέρας του σταδίου flashover, όλη η καύσιμη ύλη καίγεται και η πορεία της πυρκαγιάς καθορίζεται ξεκάθαρα από την ποσότητα του οξυγόνου που την τροφοδοτεί. Όσο λιγότερο οξυγόνο είναι διαθέσιμο για την καύση, τόσο πιο αργά καίγονται τα υλικά του διαμερίσματος.

Δ. Αφού καταναλωθεί το διαθέσιμο καύσιμο ή το οξυγόνο στο χώρο η πυρκαγιά σβήνει (decay period), σε αυτό το στάδιο παρατηρείται έντονος καπνός λόγω χαμηλής περιεκτικότητας σε οξυγόνο.

2.2 Ρυθμός ανάπτυξης πυρκαγιάς

Ο επικρατέστερος τρόπος να αναπαρασταθεί-μοντελοποιηθεί μια πυρκαγιά είναι προσδιορίζοντας τον ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας (Heat Release Rate-HRR). Ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας είναι ένα μέγεθος που περιγράφει την ροή θερμότητας από ένα καύσιμο που καίγεται στη μονάδα του χρόνου. Έχει μονάδες ισχύος W (Watt).

Ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας HRR είναι ένα αξιόπιστο μέγεθος για να περιγράψει η επικινδυνότητα ενός υλικού σε περίπτωση πυρκαγιάς. Παρέχει την πληροφορία για το ποια είναι η χρονική στιγμή κατά την οποία έχουμε τη μέγιστη θερμική ροή. Αυτό, πρακτικά, σημαίνει πως για δύο υλικά για τα οποία η θερμότητα που εκλύεται από την καύση τους είναι κοινή, πιο επικίνδυνο είναι αυτό που παρουσιάζει την μέγιστη τιμή του HRR πρώτο.

Κάθε υλικό παρουσιάζει διαφορετική μεταβολή του HRR. Για λόγους ταξινόμησης των υλικών, ένα πρακτικό μέγεθος που χρησιμοποιείται είναι ο χρόνος που χρειάζεται ένα υλικό προκειμένου να μεγιστοποιηθεί ο ρυθμός ανάπτυξης πυρκαγιάς λαμβάνοντας την τιμή 1 MW.

Στη μηχανική πυρασφαλείας, συχνά χρησιμοποιείται η παραδοχή ότι ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας (HRR) από μία πυρκαγιά στο στάδιο ανάπτυξης της είναι ανάλογος του τετραγώνου του χρόνου.

Είναι δηλαδή :

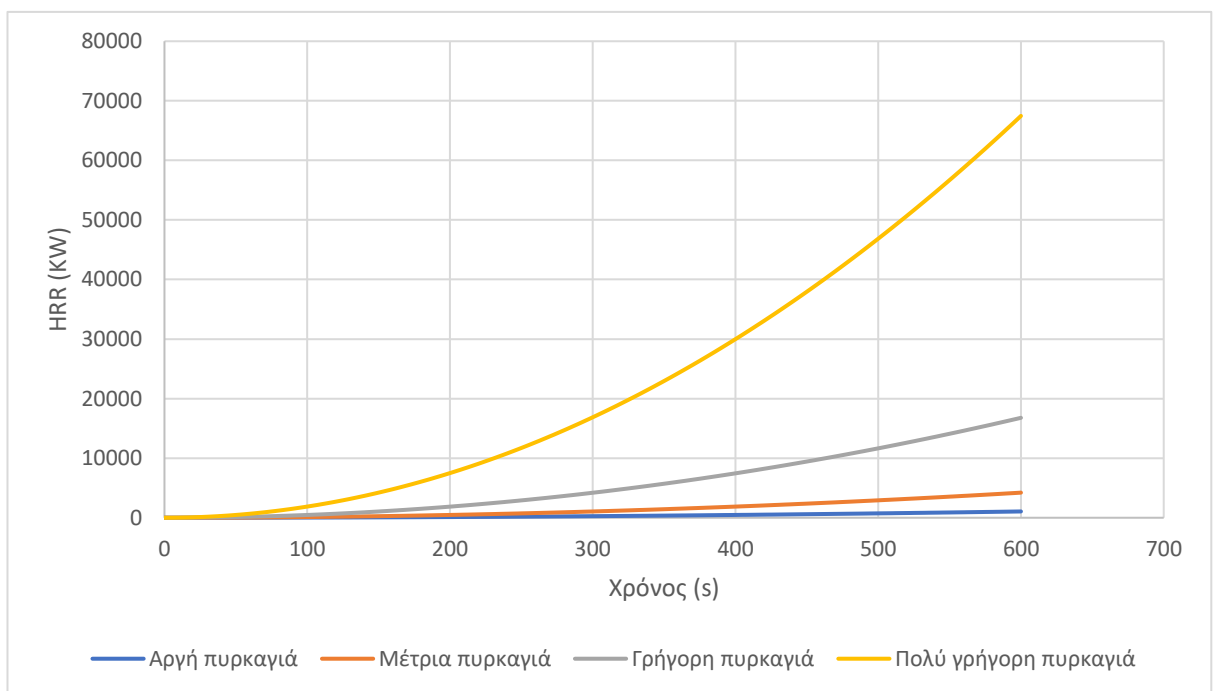
$$HRR = at^2 [KW]$$

Όπου $a [\frac{KW}{s^2}]$ ο συντελεστής ρυθμού ανάπτυξης πυρκαγιάς.

Ο συντελεστής α χαρακτηρίζει άμεσα το ρυθμό ανάπτυξης της πυρκαγιάς. Στον πίνακα 3 (Themelis & Srgrou 2012) παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή α που αντιστοιχούν σε "t-squared" πυρκαγιές που αναπτύσσονται με αργό, μέτριο, γρήγορο και πολύ γρήγορο ρυθμό, καθώς και ο χρόνος που απαιτείται σε κάθε περίπτωση προκειμένου το HRR να λάβει την τιμή 1055 KW. Με βάση τα στοιχεία του πίνακα 3 κατασκευάζονται οι καμπύλες του HRR, στο στάδιο της ανάπτυξης, για αργή, μέτρια, γρήγορη και πολύ γρήγορη "t-squared" πυρκαγιά (διάγραμμα 2).

Πίνακας 3. Τιμές του συντελεστή ρυθμού ανάπτυξης α για αργή, μέτρια, γρήγορη και πολύ γρήγορη "t-squared" πυρκαγιά (Themelis & Spyrou 2012)

Growth rate characterization	Pertinent design fire scenario	Growth coefficient α	Required time for fire to reach 1055 kW
Slow	Floor coverings	0.00293	600
Medium	Shop counters, office furniture	0.0117	300
Fast	Bedding, displays, and padded workstation partitioning	0.0466	150
Ultrafast	Upholstered furniture and stacked furniture near combustible linings, lightweight furnishings, packing material in rubbish pile, nonfire-retardant plastic foams storage, cardboard of plastic boxes in vertical storage arrangement	0.1874	75



Διάγραμμα 2. Χρονική ιστορία του ρυθμού ανάπτυξης πυρκαγιάς όπως περιγράφεται από αργή, μέση, γρήγορη και πολύ γρήγορη t-squared πυρκαγιά.

3. Κανονισμοί και απαιτήσεις σχετικά με την ανίχνευση πυρκαγιάς

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται οι κανονισμοί και οι απαιτήσεις για ανίχνευση πυρκαγιάς που ισχύουν σε χώρους οχημάτων, σε χώρους ro-ro και σε ειδικής κατηγορίας χώρους επιβατηγών/οχηματαγωγών πλοίων.

3.1 Πηγές

Οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν για τους κανονισμούς είναι :

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

Οι παραπάνω πηγές αποτελούν έγγραφα του IMO.

3.2 Ορισμοί

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

– “Vehicle spaces are cargo spaces intended for carriage of motor vehicles with fuel in their tanks for their own propulsion.”

– “Ro-ro spaces are spaces not normally subdivided in any way and normally extending to either a substantial length or the entire length of the ship in which motor vehicles with fuel in their tanks for their own propulsion and/or goods (packaged or in bulk, in or on rail or road cars, vehicles (including road or rail tankers), trailers, containers, pallets, demountable tanks or in or on similar stowage units or other receptacles) can be loaded and unloaded normally in a horizontal direction.”

– “Special category spaces are those enclosed vehicle spaces above and below the bulkhead deck, into and from which vehicles can be driven and to which passengers have access. Special category spaces may be accommodated on more than one deck provided that the total overall clear height for vehicles does not exceed 10 m.”

Οι χώροι ειδικής κατηγορίας, με άλλα λόγια, είναι χώροι ro-ro στους οποίους οι επιβάτες έχουν πρόσβαση, πιθανόν και κατά την διάρκεια του ταξιδιού. Αυτοί οι χώροι αποτελούν τον πιο συχνό τύπο κλειστού ro-ro χώρου σε ro-ro επιβατηγά πλοία. Σημειώνεται ότι οι ανοιχτοί ro-ro χώροι δεν θεωρούνται χώροι ειδικής κατηγορίας.

– “Weather deck is a deck which is completely exposed to the weather from above and from at least two sides.”

– An open vehicle or ro-ro space is “either open at both ends or [has] an opening at one end and [is] provided with adequate natural ventilation effective over [its] entire length through permanent openings distributed in the side plating or deckhead or from above, having a total area of at least 10% of the total area of the space sides.”

– “A closed vehicle or ro-ro space is any vehicle or ro-ro space which is neither open nor a weather deck.”

– ““A” class divisions are those divisions formed by bulkheads and decks which comply with the following criteria: o they are constructed of steel or other equivalent material;

- they are suitably stiffened;

- they are insulated with approved non-combustible materials such that the average temperature of the unexposed side will not rise more than 140°C above the original temperature, nor will the temperature, at any one point, including any joint, rise more than 180°C above the original temperature, within the time listed below:
 - class "A-60" 60 min
 - class "A-30" 30 min
 - class "A-15" 15 min
 - class "A-0" 0 min

 - they are constructed as to be capable of preventing the passage of smoke and flame to the end of the one-hour standard fire test; and
 - the Administration required a test of a prototype bulkhead or deck in accordance with the Fire Test Procedures Code to ensure that it meets the above requirements for integrity and temperature rise.
- ""B" class divisions are those divisions formed by bulkheads, decks, ceilings or linings which comply with the following criteria:
- they are constructed of approved non-combustible materials and all materials used in the construction and erection of "B" class divisions are non-combustible, with the exception that combustible veneers may be permitted provided they meet other appropriate requirements of this chapter;
 - they have an insulation value such that the average temperature of the unexposed side will not rise more than 140°C above the original temperature, nor will the temperature at any one point, including any joint, rise more than 225°C above the original temperature, within the time listed below:
 - class "B-15" 15 min
 - class "B-0" 0 min

 - they are constructed as to be capable of preventing the passage of flame to the end of the first half hour of the standard fire test; and
 - the Administration required a test of a prototype division in accordance with the Fire Test Procedures Code to ensure that it meets the above requirements for integrity and temperature rise."
- ""C" class divisions are divisions constructed of approved non-combustible materials. They need meet neither requirements relative to the passage of smoke and flame nor limitations relative to the temperature rise. Combustible veneers are permitted provided they meet the requirements of this chapter."

3.3 Απαιτήσεις συστημάτων ανίχνευσης και συναγερμού

Αυτό το κεφάλαιο περιγράφει τις προδιαγραφές των συστημάτων ανίχνευσης πυρκαγιάς, όπως απαιτείται από το κεφάλαιο II-2 της SOLAS. Εκτός εάν ορίζεται ρητώς διαφορετικά, οι απαιτήσεις του παρόντος κεφαλαίου ισχύουν για πλοία που κατασκευάστηκαν από την 1^η Ιουλίου 2012 και μετά.

3.3.1 Ορισμοί

- *Ενότητα (Unit)* ορίζεται μια ομάδα ανιχνευτών πυρκαγιάς και χειροκίνητων σημείων κλήσης,
- *Δυνατότητα αναγνώρισης ενότητας* ορίζεται ως ένα σύστημα με την ικανότητα αναγνώρισης της ενότητας στην οποία έχει ενεργοποιηθεί ένας ανιχνευτής ή ένα χειροκίνητο σημείο κλήσης.
- *Ατομικά αναγνωρίσιμο* χαρακτηρίζεται ένα σύστημα το οποίο έχει την ικανότητα να προσδιορίζει την ακριβή θέση και τον τύπο του ανιχνευτή ή το χειροκίνητο ενεργοποιημένο σημείο κλήσης που έχει ενεργοποιηθεί, και το οποίο μπορεί να διαφοροποιήσει το σήμα αυτής της συσκευής από όλα τα άλλα.

3.3.2 Είδη συστημάτων

Γενικές απαιτήσεις

Με βάση τον κανονισμό SOLAS II-2/20.4.1, απαιτείται ένα σταθερό σύστημα ανίχνευσης και συναγερμού πυρκαγιάς να τοποθετηθεί σε όλους τους ro-ro χώρους. Σύμφωνα με τον κανονισμό MSC/Circ 1615 του IMO, απαιτείται σταθερό σύστημα ανίχνευσης που είναι σε θέση να ανιχνεύει έγκαιρα την πυρκαγιά. Το είδος του συστήματος ανίχνευσης, καθώς και οι θέσεις και οι αποστάσεις μεταξύ των ανιχνευτών καθορίζεται από τη σημαία. Τέλος, σε περιπτώσεις που είναι απαραίτητο (π.χ. στην φορτοεκφόρτωση), προβλέπεται να απενεργοποιείται το σύστημα ανίχνευσης, προκειμένου να αποφευχθούν εσφαλμένοι συναγερμοί πυρκαγιάς.

Χώροι ειδικής κατηγορίας

Στους χώρους ειδικής κατηγορίας, με βάση τον κανονισμό SOLAS II-2//20.4.3.1, θα πρέπει ένα αποτελεσματικό σύστημα περιπολίας να μεριμνά καθ' όλη τη διάρκεια του ταξιδιού για την πυρασφάλεια, και έτσι, δεν απαιτείται σύστημα ανίχνευσης και συναγερμού πυρκαγιάς σε αυτούς τους χώρους.

Είδη σταθερών συστημάτων ανίχνευσης πυρκαγιάς

Ο κανονισμός SOLAS II-2/20.4.1 απαιτεί ένα σταθερό σύστημα ανίχνευσης και συναγερμού πυρκαγιάς σύμφωνα με τις απαιτήσεις του FSS Code. Σε ανοιχτούς χώρους οχημάτων, ανοιχτούς χώρους ro-ro και σε χώρους ειδικής κατηγορίας, το σύστημα ανίχνευσης καπνού εξαγωγής δείγματος (sample detection system), με βάση τον SOLAS II-2/20.4.2, απαγορεύεται να χρησιμοποιείται. Για τα επιβατηγά πλοία που κατασκευάστηκαν από το 2010 και μετά, το σύστημα θα πρέπει να είναι ικανό να αναγνωρίσει μεμονωμένα κάθε ανιχνευτή και χειροκίνητο σημείο κλήσης [FSS Code Ch.9 par2.1.7]. Πριν το 2010, το σύστημα υποχρεούταν να διαχωρίζεται σε τομείς και να είναι ικανό να υποδείξει σε ποιον τομέα άνηκε ο ανιχνευτής που είχε ενεργοποιηθεί.

Περιπολίες

Με βάση τον κανονισμό SOLAS II-2/7.8 και SOLAS II-2/20.4.3.1, σε επιβατηγά πλοία που μεταφέρουν περισσότερους από 36 επιβάτες, κάθε μέλος της περιπολίας θα πρέπει να έχει στην κατοχή του μία φορητή συσκευή ραδιοτηλεφώνου, να είναι καταλλήλως εκπαιδευμένο και να γνωρίζει τους χώρους του πλοίου.

3.3.3 Τεχνικές προδιαγραφές

3.3.3.1

Κατά την SOLAS II-2/20.4.1, οποιοδήποτε απαιτούμενο σύστημα ανίχνευσης και συναγερμού πυρκαγιάς με χειροκίνητα σημεία κλήσης πρέπει να μπορεί να λειτουργεί άμεσα, ανά πάσα στιγμή. Παρ' όλα αυτά, συγκεκριμένοι χώροι μπορεί να αποσυνδεθούν, για παράδειγμα, εργαστήρια κατά τη διάρκεια θερμών κατεργασιών και χώροι go-go κατά τη διάρκεια της φόρτωσης. Τα μέσα για την αποσύνδεση των ανιχνευτών πρέπει να είναι σχεδιασμένα για αυτόματη επαναφορά συστήματος σε κανονική παρακολούθηση μετά από προκαθορισμένο χρόνο που είναι κατάλληλος για την εν λόγω λειτουργία.

3.3.3.2

Το σύστημα ανίχνευσης πυρκαγιάς θα πρέπει να είναι σχεδιασμένο ώστε :

1. Να ελέγχει και να παρακολουθεί τα σήματα εισόδου από όλους τους συνδεδεμένους ανιχνευτές πυρκαγιάς και καπνού και τα χειροκίνητα σημεία κλήσης,
2. Να παρέχει σήματα εξόδου στη γέφυρα, να διατηρεί τον κεντρικό σταθμό ελέγχου συνεχώς επανδρωμένο ή το κέντρο ασφαλείας επί του πλοίου για να ειδοποιηθεί το πλήρωμα σχετικά με τις συνθήκες πυρκαγιάς και βλάβης,
3. Να παρακολουθεί τα τροφοδοτικά και τα κυκλώματα που απαιτούνται για τη λειτουργία του συστήματος για απώλεια ισχύος και συνθήκες βλάβης, και
4. το σύστημα μπορεί να διευθετηθεί με σήματα εξόδου σε άλλα συστήματα πυρασφάλειας, όπως:
 1. συστήματα τηλεειδοποίησης, συναγερμός πυρκαγιάς ή συστήματα δημόσιας διεύθυνσης,
 2. διακοπή του εξαερισμού,
 3. πόρτες πυρκαγιάς,
 4. αποσβεστήρες πυρκαγιάς,
 5. συστήματα καταιωνιστήρων,
 6. συστήματα εξαγωγής καπνού,
 7. συστήματα φωτισμού χαμηλής θέσης,
 8. σταθερά τοπικά συστήματα πυρόσβεσης εφαρμογών,
 9. συστήματα τηλεόρασης κλειστού κυκλώματος (CCTV), και
 10. άλλα συστήματα πυρασφάλειας.

Το σύστημα και ο εξοπλισμός πρέπει να είναι κατάλληλα σχεδιασμένοι, ώστε να αντέχουν στις μεταβολές και τις μεταβατικές τάσεις τροφοδοσίας, τις αλλαγές θερμοκρασίας περιβάλλοντος, τους κραδασμούς, την υγρασία, τις κρούσεις και τη διάβρωση που συνήθως συναντώνται στα πλοία. Όλος ο ηλεκτρικός και ηλεκτρονικός εξοπλισμός στη γέφυρα ή κοντά στη γέφυρα πρέπει να δοκιμάζεται για ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα, λαμβάνοντας υπόψη τις συστάσεις που έχει αναπτύξει ο IMO.

Τα σταθερά συστήματα ανίχνευσης πυρκαγιάς και συναγερμού πυρκαγιάς με ατομικά αναγνωρίσιμους ανιχνευτές πυρκαγιάς, πρέπει να είναι διατεταγμένα έτσι ώστε:

1. Να παρέχονται μέσα για να διασφαλιστεί ότι οποιοδήποτε σφάλμα (π.χ. διακοπή ρεύματος, βραχυκύκλωμα, γείωση κ.λπ.) που συμβαίνει στην ενότητα δεν θα αποτρέψει τη συνεχιζόμενη ατομική αναγνώριση των υπόλοιπων συνδεδεμένων ανιχνευτών στην ενότητα.
2. Να γίνονται όλες οι ρυθμίσεις ώστε να είναι δυνατή η επαναφορά της αρχικής διαμόρφωσης του συστήματος σε περίπτωση βλάβης (π.χ. ηλεκτρικά, ηλεκτρονικά κ.λπ.).
3. Ο πρώτος ενεργοποιημένος συναγερμός πυρκαγιάς να μην εμποδίσει κανέναν άλλο ανιχνευτή να ενεργοποιήσει περαιτέρω συναγερμούς πυρκαγιάς.

Στα επιβατηγά πλοία, το σταθερό σύστημα ανίχνευσης και συναγερμού πυρκαγιάς πρέπει να είναι σε θέση να εντοπίζει εξ αποστάσεως και μεμονωμένα κάθε ανιχνευτή και χειροκίνητο σημείο κλήσης. Οι ανιχνευτές πυρκαγιάς που είναι τοποθετημένοι σε καμπίνες επιβατηγών πλοίων, όταν ενεργοποιούνται, πρέπει επίσης να είναι σε θέση να εκπέμπουν συναγερμό στο χώρο όπου βρίσκονται. Στα φορτηγά πλοία και στα επιβατηγά πλοία, το σταθερό σύστημα ανίχνευσης πυρκαγιάς και συναγερμού πυρκαγιάς διαθέτει, τουλάχιστον, ικανότητα αναγνώρισης τμημάτων.

3.3.4 Πηγές Τροφοδοσίας

Συνεχής δυνατότητα ανίχνευσης πυρκαγιάς

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

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

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

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

Μέγεθος της πηγής ισχύος

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

Συνέπειες σφάλματος

Μετά από κάποιο ηλεκτρικό σφάλμα ή βλάβη:

- Η ικανότητα αναγνώρισης πρέπει να διατηρείται σε ολόκληρο τον τομέα, εκτός από τον ελαττωματικό ανιχνευτή (FSS Ch. 9 §2.1.6.1, που ισχύει για addressable συστήματα)
- Η αρχική διαμόρφωση θα πρέπει να αποκατασταθεί [FSS Ch. 9 §2.1.6.2, ισχύει για addressable συστήματα)

Προσωρινή αποσύνδεση

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

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

Ακόμη διευκρινίζεται ότι :

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

3.3.5 Απαιτήσεις συστήματος

- Οι ανιχνευτές λειτουργούν με θερμότητα, καπνό ή άλλα προϊόντα καύσης, φλόγας ή οποιονδήποτε συνδυασμό αυτών των παραγόντων. Ανιχνευτές που λειτουργούν με άλλους παράγοντες, μπορούν να εξεταστούν από τη Σημαία, υπό την προϋπόθεση ότι δεν είναι λιγότερο ευαίσθητοι από τους συμβατικούς ανιχνευτές.

- Οι ανιχνευτές καπνού, που απαιτούνται σε όλα τα κλιμακοστάσια, τους διαδρόμους και τις οδούς διαφυγής εντός των χώρων διαμονής, πρέπει να είναι πιστοποιημένοι να λειτουργούν πριν η πυκνότητα του καπνού υπερβεί το 12,5% κάλυψη ανά μέτρο, αλλά όχι έως ότου η πυκνότητα καπνού υπερβεί το 2% κάλυψη ανά μέτρο, όταν δοκιμάζεται σύμφωνα με πρότυπα EN 54: 2001 και IEC60092-504. Εναλλακτικά πρότυπα δοκιμών μπορούν να χρησιμοποιηθούν όπως καθορίζεται από τη Σημαία. Οι ανιχνευτές καπνού που θα εγκατασταθούν σε άλλους χώρους πρέπει να λειτουργούν εντός των ορίων ευαισθησίας προς ικανοποίηση της Σημαίας, λαμβάνοντας υπόψη την αποφυγή της υποευαισθησίας ή της υπερευαισθησίας του ανιχνευτή.

- Οι ανιχνευτές θερμότητας πρέπει να πιστοποιούνται ότι λειτουργούν πριν η θερμοκρασία υπερβεί τους 78°C αλλά όχι έως ότου η θερμοκρασία υπερβεί τους 54°C, όταν η θερμοκρασία ανυψώνεται σε αυτά τα όρια με ρυθμό μικρότερο από 1°C ανά λεπτό, όταν δοκιμάζεται σύμφωνα με τα πρότυπα EN 54: 2001 και IEC 60092-504. Εναλλακτικά πρότυπα δοκιμών μπορούν να χρησιμοποιηθούν όπως καθορίζεται από τη Σημαία.

- Η θερμοκρασία λειτουργίας των ανιχνευτών θερμότητας σε στεγνωτήρια και παρόμοιους χώρους με υψηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος μπορεί να είναι έως 130°C και έως 140°C σε σάουνες.

- Οι ανιχνευτές φλόγας δοκιμάζονται σύμφωνα με τα πρότυπα EN 54-10: 2001 και IEC 60092-504. Εναλλακτικά πρότυπα δοκιμών μπορούν να χρησιμοποιηθούν όπως καθορίζεται από τη Σημαία.

- Όλοι οι ανιχνευτές πρέπει να είναι τέτοιου τύπου ώστε να μπορούν να ελεγχθούν για σωστή λειτουργία και να αποκατασταθούν σε κανονική επιτήρηση χωρίς την ανανέωση οποιουδήποτε εξαρτήματος.

- Σταθερά συστήματα ανίχνευσης πυρκαγιάς και συναγερμού πυρκαγιάς για μπαλκόνια καμπινών εγκρίνονται, βάσει των κανονισμών του IMO.

- Οι ανιχνευτές που είναι τοποθετημένοι σε επικίνδυνες περιοχές πρέπει να δοκιμάζονται και να εγκρίνονται για τέτοια χρήση. Οι ανιχνευτές που απαιτούνται από τον κανονισμό II-2 / 20.4 και είναι εγκατεστημένοι σε χώρους που συμμορφώνονται με τον κανονισμό II-2 / 20.3.2.2 της Σύμβασης SOLAS δεν χρειάζεται να είναι κατάλληλοι για επικίνδυνες περιοχές.

3.3.6 Απαιτήσεις εγκατάστασης

Σύμφωνα με τον FSS Code οι ανιχνευτές και τα χειροκίνητα σημεία κλήσης θα πρέπει να ομαδοποιούνται.

- Ένα τμήμα ανιχνευτών πυρκαγιάς που καλύπτει έναν χώρο εξυπηρέτησης ή έναν χώρο διαμονής δεν θα πρέπει να περιλαμβάνει μηχανοστάσιο κατηγορίας A ή χώρο ro-ro. Ένα τμήμα ανιχνευτών πυρκαγιάς που καλύπτει χώρο ro-ro δεν πρέπει να περιλαμβάνει μηχανοστάσιο κατηγορίας A. Για σταθερά συστήματα ανίχνευσης πυρκαγιάς με απομακρυσμένους και ατομικά αναγνωρίσιμους ανιχνευτές, θα πρέπει κάθε τμήμα που καλύπτει ανιχνευτές πυρκαγιάς σε καταλύματα, χώρους υπηρεσίας και σταθμούς ελέγχου να μην καλύπτει ανιχνευτές πυρκαγιάς σε μηχανοστάσια κατηγορίας A ή ro-ro.
- Όταν το σταθερό σύστημα ανίχνευσης πυρκαγιάς και συναγερμού πυρκαγιάς δεν περιλαμβάνει μέσα απομακρυσμένης αναγνώρισης για κάθε ανιχνευτή ξεχωριστά και κανένα τμήμα που καλύπτει περισσότερα από ένα κατάστρωμα εντός χώρων διαμονής, χώρων εξυπηρέτησης και σταθμών ελέγχου κανονικά δεν επιτρέπεται, εκτός αν πρόκειται για τμήμα που καλύπτει μια κλειστή σκάλα. Προκειμένου να αποφευχθεί η καθυστέρηση στον προσδιορισμό της πηγής πυρκαγιάς, ο αριθμός των κλειστών χώρων που περιλαμβάνονται σε κάθε ενότητα περιορίζεται.
- Στα επιβατηγά πλοία, ένα τμήμα ανιχνευτών και χειροκίνητων σημείων κλήσης δεν πρέπει να βρίσκεται σε περισσότερες από μία κύριες κατακόρυφες ζώνες, εκτός από τα μπαλκόνια καμπίνας.

3.3.7 Θέσεις ανιχνευτών

- Ένα σημαντικό πρακτικό ζήτημα είναι οι θέσεις των ανιχνευτών . Ο FSS Code αναφέρει ότι οι ανιχνευτές θα πρέπει να βρίσκονται σε θέσεις που βελτιστοποιείται η απόδοσή τους. Θέσεις κοντά σε δοκούς και αγωγούς εξαερισμού όπου τα πρότυπα ροής του αέρα θα μπορούσαν να επηρεάσουν δυσμενώς την απόδοση και θέσεις όπου είναι πιθανή η κρούση ή η φυσική ζημιά , πρέπει να αποφεύγονται. Οι ανιχνευτές πρέπει να βρίσκονται στην εναέρια περιοχή σε ελάχιστη απόσταση 0.5m μακριά από τα διαφράγματα , εκτός από διαδρόμους ερμάρια και κλιμακοστάσια.
- Η μέγιστη απόσταση των ανιχνευτών πρέπει να είναι σύμφωνη με τον πίνακα 4:

Πίνακας 4.Μέγιστη απόσταση ανιχνευτών βάσει FSS Code

Τύπος ανιχνευτή	Μέγιστη επιφάνεια δαπέδου ανά ανιχνευτή (m ²)	Μέγιστη απόσταση μεταξύ κέντρων (m)	Μέγιστη απόσταση από τα διαφράγματα (m)
Θερμότητα	37	9	4.5
Καπνός	74	11	5.5

- Όταν ένα σταθερό σύστημα ανίχνευσης πυρκαγιάς και συναγερμού πυρκαγιάς απαιτείται από τον κανονισμό II-2 / 7.5 της Σύμβασης, οι χώροι με μικρό ή καθόλου κίνδυνο πυρκαγιάς δεν χρειάζεται να είναι εφοδιασμένοι με ανιχνευτές. Τέτοιοι χώροι περιλαμβάνουν κενούς χώρους χωρίς αποθήκευση καύσιμων, ιδιωτικά μπάνια, δημόσιες τουαλέτες, αποθηκευτικούς χώρους μέσω πυρόσβεσης, ερμάρια καθαρισμού εργαλείων (στα οποία δεν είναι αποθηκευμένα εύφλεκτα υγρά), ανοιχτούς χώρους καταστώματος και κλειστούς περιπάτους με μικρό ή καθόλου κίνδυνο πυρκαγιάς και που αερίζονται φυσικά από μόνιμα ανοίγματα.

3.3.8 Απαιτήσεις ελέγχου συστήματος

Οπτικά και ακουστικά σήματα πυρκαγιάς

- Η ενεργοποίηση οποιουδήποτε ανιχνευτή ή χειροκίνητου σημείου κλήσης ενεργοποιεί ένα οπτικό και ακουστικό σήμα συναγερμού πυρανίχνευσης στον πίνακα ελέγχου και μονάδες ένδειξης. Εάν τα σήματα δεν έχουν αναγνωριστεί εντός 2 λεπτών, ακούγεται αυτόματα ένας ηχητικός συναγερμός πυρκαγιάς σε όλους τους χώρους διαμονής και εξυπηρέτησης του πληρώματος, τους σταθμούς ελέγχου και τους χώρους μηχανημάτων της κατηγορίας Α. Αυτό το σύστημα ηχητικών συναγερμών δεν χρειάζεται να αποτελεί αναπόσπαστο μέρος του συστήματος ανίχνευσης .
- Σε επιβατηγά πλοία, ο πίνακας ελέγχου πρέπει να βρίσκεται στο κέντρο ασφάλειας επί του πλοίου. Στα φορτηγά πλοία, ο πίνακας ελέγχου πρέπει να βρίσκεται στη γέφυρα πλοήγησης ή στον πυροσβεστικό σταθμό.
- Σε επιβατηγά πλοία, στη γέφυρα πλοήγησης πρέπει να βρίσκεται μια μονάδα ένδειξης που είναι ικανή να προσδιορίζει μεμονωμένα κάθε ανιχνευτή που έχει ενεργοποιηθεί ή χειροκίνητο σημείο κλήσης που έχει λειτουργήσει. Σε φορτηγά πλοία, μια μονάδα ένδειξης πρέπει να βρίσκεται στη γέφυρα πλοήγησης, εάν ο πίνακας ελέγχου βρίσκεται στον πυροσβεστικό σταθμό. Σε πλοία που κατασκευάστηκαν από την 1η Ιουλίου 2014 και μετά, με αίθουσα ελέγχου φορτίου, μια πρόσθετη μονάδα ένδειξης θα πρέπει να βρίσκεται στην αίθουσα ελέγχου φορτίου. Στα φορτηγά πλοία και στα μπαλκόνια επιβατικών επιβατών, οι μονάδες ένδειξης πρέπει, τουλάχιστον, να υποδεικνύουν το τμήμα στο οποίο έχει ενεργοποιηθεί ένας ανιχνευτής ή έχει λειτουργήσει χειροκίνητο σημείο κλήσης.
- Το σύστημα πρέπει να ρυθμιστεί ώστε να επανέρχεται αυτόματα στην κανονική κατάσταση λειτουργίας μετά την εκκαθάριση των συνθηκών συναγερμού και βλάβης.

3.3.9 Δοκιμές ανιχνευτών

Είναι σημαντικό όλοι οι ανιχνευτές πυρκαγιάς να συντηρούνται και να ελέγχεται η σωστή η λειτουργία τους. Με βάση τον FSS Code:

Οι ανιχνευτές δοκιμάζονται περιοδικά χρησιμοποιώντας εξοπλισμό κατάλληλο για τους τύπους πυρκαγιάς στους οποίους ο ανιχνευτής έχει σχεδιαστεί να ανταποκρίνεται. Σε πλοία που

κατασκευάστηκαν από την 1η Ιουλίου 2014 και μετά, οι ανιχνευτές που είναι εγκατεστημένοι σε ψυχρούς χώρους όπως ψυκτικά διαμερίσματα δοκιμάζονται με τη χρήση διαδικασιών που λαμβάνουν δεόντως υπόψη αυτές τις τοποθεσίες .

3.3.10 Συστήματα ανίχνευσης καπνού εξαγωγής δείγματος

Σ' αυτή την παράγραφο περιγράφονται λεπτομερώς οι προδιαγραφές των συστημάτων ανίχνευσης καπνού εξαγωγής δείγματος σε χώρους φορτίου όπως απαιτείται από το κεφάλαιο II-2 της Σύμβασης SOLAS. Εκτός εάν ορίζεται ρητώς διαφορετικά, οι απαιτήσεις του παρόντος κεφαλαίου ισχύουν για πλοία που κατασκευάστηκαν από την 1η Ιανουαρίου 2012

Τεχνικές προδιαγραφές FSS Code

Ένα σύστημα εντοπισμού καπνού εξαγωγής δείγματος (ASD) αποτελείται από τα ακόλουθα κύρια συστατικά:

1. συσσωρευτές καπνού: συσκευές συλλογής αέρα εγκατεστημένες στα ανοιχτά άκρα των σωλήνων δειγματοληψίας σε κάθε χώρο φορτίου, που εκτελούν τη φυσική λειτουργία της συλλογής δειγμάτων αέρα για μετάδοση στον πίνακα ελέγχου μέσω των σωλήνων δειγματοληψίας, και μπορεί επίσης να λειτουργούν ως ακροφύσια εκκένωσης για το σύστημα πυρόσβεσης αερίου, εάν είναι εγκατεστημένο,
 2. σωλήνες δειγματοληψίας (sampling pipes): ένα δίκτυο σωληνώσεων που συνδέει τους συσσωρευτές καπνού με τον πίνακα ελέγχου, διατεταγμένο σε τμήματα που επιτρέπουν την εύκολη αναγνώριση της θέσης της πυρκαγιάς,
 3. βαλβίδες τριών κατευθύνσεων: εάν το σύστημα είναι διασυνδεδεμένο με σύστημα πυρόσβεσης σταθερού αερίου, χρησιμοποιούνται βαλβίδες τριών κατευθύνσεων για την ευθυγράμμιση των σωλήνων δειγματοληψίας στον πίνακα ελέγχου και, εάν ανιχνευθεί πυρκαγιά, οι βαλβίδες τριών κατευθύνσεων είναι επανατοποθετημένες ώστε να συνδέουν τους σωλήνες δειγματοληψίας με το σύστημα πυρόσβεσης πολλαπλής εκκένωσης και να απομονώνουν τον πίνακα ελέγχου, και
 4. πίνακας ελέγχου: το κύριο στοιχείο του συστήματος που παρέχει συνεχή παρακολούθηση των προστατευμένων χώρων για ένδειξη καπνού. Συνήθως μπορεί να περιλαμβάνει θάλαμο παρακολούθησης ή μονάδες ανίχνευσης καπνού. Ο εξαγόμενος αέρας από τους προστατευόμενους χώρους αντλείται μέσω των συσσωρευτών καπνού και των σωλήνων δειγματοληψίας στον θάλαμο προβολής και στη συνέχεια στον θάλαμο ανίχνευσης καπνού όπου η ροή αέρα παρακολουθείται από ηλεκτρικούς ανιχνευτές καπνού. Εάν ανιχνευθεί καπνός, το repeater panel (συνήθως στη γέφυρα) εκπέμπει αυτόματα έναν συναγερμό. Το πλήρωμα μπορεί στη συνέχεια να προσδιορίσει στη μονάδα ανίχνευσης καπνού σε ποιο μέρος του φορτίου εξελίσσεται η πυρκαγιά και να χειριστεί τη σχετική βαλβίδα για την εκκένωση του πυροσβεστικού παράγοντα.
- Η μονάδα ανίχνευσης πρέπει να πιστοποιείται ότι λειτουργεί πριν η πυκνότητα καπνού εντός του θαλάμου ανίχνευσης υπερβεί το 6,65% κάλυψη ανά μέτρο.
 - Ο πίνακας ελέγχου επιτρέπει την παρατήρηση καπνού στους επιμέρους σωλήνες δειγματοληψίας
 - Οι σωλήνες δειγματοληψίας πρέπει να είναι σχεδιασμένοι έτσι ώστε να εξασφαλίζουν ότι, στο μέτρο του δυνατού, εξαγονται ίσες ποσότητες ροής αέρα από κάθε διασυνδεδεμένο συσσωρευτή.
 - Οι σωλήνες δειγματοληψίας πρέπει να διαθέτουν διάταξη για περιοδικό καθαρισμό με πεπιεσμένο αέρα.

- Ο πίνακας ελέγχου για το σύστημα ανίχνευσης καπνού δοκιμάζεται σύμφωνα με τα πρότυπα EN 54-2 (1997), EN 54-4 (1997) και IEC 60092-504 (2001).

3.3.11 Απαιτήσεις εγκατάστασης

- Συσσωρευτές καπνού

Κατά τον FSS Code τουλάχιστον ένας συσσωρευτής καπνού πρέπει να βρίσκεται σε κάθε κλειστό χώρο για τον οποίο απαιτείται ανίχνευση καπνού.

Οι συσσωρευτές καπνού πρέπει να τοποθετούνται στο εναέριο ή όσο το δυνατόν υψηλότερο σημείο στον προστατευόμενο χώρο και να απέχουν τόσο ώστε κανένα μέρος της περιοχής του εναέριου καταστρώματος να μην απέχει οριζόντια από τον συσσωρευτή περισσότερο από 12 m. Όταν χρησιμοποιούνται συστήματα σε χώρους που μπορεί να αερίζονται μηχανικά, η θέση των συσσωρευτών καπνού ορίζεται λαμβάνοντας υπόψη τις επιπτώσεις του αερισμού. Πρέπει να παρέχεται τουλάχιστον ένας πρόσθετος συσσωρευτής καπνού στο πάνω μέρος κάθε αγωγού εξαερισμού.

- Σωλήνες δειγματοληψίας (sampling pipes)

Οι σωλήνες δειγματοληψίας πρέπει να είναι κατάλληλα ρυθμισμένοι ώστε να είναι εύκολα αναγνωρίσιμη η θέση της πυρκαγιάς.

4. Ανιχνευτές πυρκαγιάς

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά και οι αρχές λειτουργίας των κύριων ανιχνευτών πυρκαγιάς σύμφωνα με στοιχεία από την NFPA 72 (National Fire Alarm and Signaling Code- Chapter 3 2013 Edition).

4.1 Αισθητήρια πυρκαγιάς

Όλα τα αισθητήρια που χρησιμοποιούνται για να ανιχνεύσουν αυτόματα την πυρκαγιά ή κάποιο από τα παράγωγα της αποτελούν το κυριότερο μέρος του συστήματος πυρανίχνευσης. Από τα αισθητήρια ξεκινάει η ενεργοποίηση του, οπότε η κατάλληλη για κάθε χώρο επιλογή και η σωστή τοποθέτηση τους παίζει μεγάλο ρόλο στην αξιοπιστία του όλου συστήματος. Ειδικά η επιλογή του κατάλληλου για κάθε χώρο αισθητηρίου είναι το βασικότερο σημείο που πρέπει να προσέξει όποιος σχεδιάζει ένα σύστημα πυρανίχνευσης.

4.2 Τύποι αισθητηρίων

-Ανιχνευτές καπνού

Είναι οι ανιχνευτές που χρησιμοποιούνται στους περισσότερους χώρους γιατί έχουν πολύ καλούς χρόνους ενεργοποίησης. Προσπαθούν να ανιχνεύσουν το πιο συνηθισμένο παράγωγο της πυρκαγιάς, τον καπνό. Υπάρχουν δύο βασικές μέθοδοι ανίχνευσης από τις οποίες παίρνουν το όνομα τους και οι ανιχνευτές που τις χρησιμοποιούν:

- Ανιχνευτής ιονισμού καπνού

Χρησιμοποιεί ένα θάλαμο του οποίου οι δύο απέναντι πλευρές είναι ηλεκτρόδια συνδεδεμένα στον θετικό και τον αρνητικό πόλο του κυκλώματος του. Μια μικρή ποσότητα ραδιενεργού υλικού Αμερίκιου (Am^{241}), ιονίζει τον αέρα μέσα στο θάλαμο, παράγοντας αρνητικά και θετικά ιόντα. Εξ αιτίας αυτών των ιόντων ένα ρεύμα διαρρέει τον αέρα του θαλάμου ανάμεσα στο θετικό και το αρνητικό ηλεκτρόδιο. Όταν στο θάλαμο εισέλθουν σωματίδια καπνού, ο αριθμός των ιόντων μειώνεται και αντίστοιχα μειώνεται και το ρεύμα που τον διαρρέει. Οι σημερινοί ανιχνευτές ιονισμού καπνού χρησιμοποιούν δύο θαλάμους. Ο ένας είναι κλειστός (δεν επιτρέπει την είσοδο αέρα από το περιβάλλον) και ο δεύτερος ανοιχτός. Η ανίχνευση του καπνού γίνεται με τη σύγκριση των ρευμάτων που διαρρέουν τους δύο θαλάμους. Η ανίχνευση καπνού με τη μέθοδο του ιονισμού είναι η πρώτη που χρησιμοποιήθηκε. Έχει όμως το βασικό μειονέκτημα της εκπομπής ραδιενέργειας, η οποία αν και είναι μικρή δεν παύει να είναι υπολογίσιμη, ειδικά σε συστήματα πυρανίχνευσης που χρησιμοποιούν πολλούς ανιχνευτές.

- **Ανιχνευτής ορατού καπνού**

Ονομάζεται αλλιώς φωτοηλεκτρικός ή οπτικοηλεκτρικός ανιχνευτής καπνού. Χρησιμοποιεί ένα θάλαμο κατασκευασμένο από μαύρο αντιανακλαστικό υλικό. Μέσα στο θάλαμο υπάρχει ένας πομπός και ένας δέκτης υπέρυθρης ακτινοβολίας, τοποθετημένοι με τέτοιο τρόπο, που η δέση εκπομπής του ενός να μην φτάνει απ' ευθείας στον άλλον. Όταν στο θάλαμο υπάρχει καθαρός αέρας ο δέκτης δεν λαμβάνει ακτινοβολία. Με την εισαγωγή του καπνού στο θάλαμο μία ποσότητα της ακτινοβολίας του πομπού αντανακλάται στα σωματίδια του και φτάνει στο δέκτη. Τα ηλεκτρονικά κυκλώματα στα οποία είναι συνδεδεμένος ο δέκτης συγκρίνουν την ακτινοβολία με μια προρυθμισμένη ποσότητα για να αποφασίσουν αν ο καπνός έχει ξεπεράσει τα όρια του συναγερμού. Για λόγους μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας, οι πομποί των ανιχνευτών αυτού του τύπου δεν εκπέμπουν μόνιμα αλλά περιοδικά και για μικρά χρονικά διαστήματα. Η αξιοπιστία τους βρίσκεται σε πολύ υψηλά επίπεδα, η ενέργεια που καταναλώνουν είναι ελάχιστη και οι απαιτήσεις για συντήρηση σχετικά μικρές. Δεν περιέχουν εξαρτήματα βλαβερά για τον άνθρωπο ή το περιβάλλον.

Συνήθως είναι η πρώτη επιλογή για κάθε χώρο. Δεν προτείνεται η τοποθέτηση τους μόνο εκεί που υπάρχουν συνθήκες που τους κάνουν να δίνουν ψευδείς συναγερμούς (π.χ. χώροι με αυξημένη ποσότητα σκόνης ή υδρατμών).

- **Ανιχνευτής καπνού δέσμης (Beam detector)**

Είναι και αυτοί οπτικοί ανιχνευτές καπνού, χωρίς κλειστό θάλαμο, που χρησιμοποιούνται για να καλύψουν μεγάλους χώρους. Αποτελούνται, συνήθως, από τρία κομμάτια: τον πομπό υπέρυθρων, τον δέκτη και το μηχανισμό ελέγχου. Ο πομπός εκπέμπει στο χώρο μία δέσμη υπέρυθρης ακτινοβολίας με μήκος κύματος που απορροφάται από τα μόρια καπνού. Όταν στο χώρο δεν υπάρχει καπνός, ο δέκτης λαμβάνει μία ποσότητα αυτής της ακτινοβολίας. Σε περίπτωση πυρκαγιάς, ο καπνός απορροφά μέρος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας και αυτή που φτάνει στο δέκτη μειώνεται. Αν η μείωση ξεπεράσει ένα προ-ρυθμισμένο ποσοστό τότε ο ανιχνευτής δίνει συναγερμό.

- **Ανιχνευτές θερμότητας**

Χρησιμοποιούνται σε χώρους που για διάφορους λόγους (π.χ. ύπαρξη καπνού, σκόνης ή υδρατμών σε κανονικές συνθήκες) δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ανιχνευτές καπνού. Προσπαθούν να ανιχνεύσουν ένα άλλο συνηθισμένο παράγωγο μίας πυρκαγιάς, την αύξηση της θερμοκρασίας. Υπάρχουν δύο τύποι τέτοιων ανιχνευτών:

- **Θερμοδιαφορικός ανιχνευτής**

Είναι ανιχνευτές που ενεργοποιούνται με την απότομη αύξηση της θερμοκρασίας. Χρησιμοποιούν δύο αισθητήρια θερμοκρασίας, τοποθετημένα σε τέτοιες θέσεις, που το ένα να επηρεάζεται γρήγορα από την αλλαγή της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος και το δεύτερο αργά. Τα εσωτερικά τους κυκλώματα μετρούν το ρυθμό μεταβολής της θερμοκρασίας, συγκρίνοντας τις μετρήσεις από τα δύο αισθητήρια. Αν ο ρυθμός είναι μεγαλύτερος του επιτρεπόμενου για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, τότε δίνεται συναγερμός πυρκαγιάς.

- **Θερμικός ανιχνευτής**

Είναι ανιχνευτές που ενεργοποιούνται όταν η θερμοκρασία ξεπεράσει ένα σταθερό όριο. Υπάρχουν ανιχνευτές που ενεργοποιούνται στους 60, 70 ή 90 °C, ανάλογα με τις απαιτήσεις του χώρου στον οποίο θα τοποθετηθούν. Παρ' όλο που σαν ανιχνευτές είναι αξιόπιστοι, είναι αυτοί που θα αντιδράσουν τελευταίοι σε περίπτωση πυρκαγιάς, γι' αυτό και τοποθετούνται σε χώρους όπου οι συνθήκες δεν επιτρέπουν την τοποθέτηση άλλου τύπου ανιχνευτή.

- **Ανιχνευτές εκρηκτικών αερίων**

Παρ' όλο που η ανίχνευση εκρηκτικών και τοξικών αερίων είναι ένας ξεχωριστός τομέας, που έχει διαφορετικούς στόχους από την πυρανίχνευση, αρκετές φορές υπάρχει ανάγκη να συνδεθούν σε συστήματα πυρανίχνευσης και ανιχνευτές εκρηκτικών αερίων για να προληφθεί μία πυρκαγιά πριν ακόμα αυτή εκδηλωθεί. Ο τρόπος κατασκευής των ανιχνευτών αυτών απαιτεί ειδική σύνδεση με τον πίνακα και επιπλέον υπάρχει ειδικός περιορισμός στον αριθμό τους που μπορεί να συνδεθεί σε κάθε πίνακα.

Δύο βασικοί τύποι συνδέονται συνήθως σε συστήματα πυρανίχνευσης:

- Ο ανιχνευτής φυσικού αερίου, που περιέχει αισθητήριο κατασκευασμένο ειδικά για να ανιχνεύει μεθάνιο (το κύριο συστατικό του φυσικού αερίου)

- Ο ανιχνευτής υγραερίου, που περιέχει αισθητήριο φτιαγμένο ειδικά για να ανιχνεύει προπάνιο και βουτάνιο (από τα οποία αποτελείται το υγραέριο).

- Ανιχνευτές φλόγας

Είναι εξειδικευμένοι ανιχνευτές που παρουσιάστηκαν τα τελευταία χρόνια. Περιλαμβάνουν ένα ή περισσότερα αισθητήρια υπέρυθρης ακτινοβολίας και ειδικά διαμορφωμένα κάτοπτρα. Ενεργοποιούνται όταν ανιχνεύσουν παλμούς χαμηλής συχνότητας υπέρυθρης ακτινοβολίας που προέρχονται από την παρουσία φλόγας. Η απόκριση τους εξαρτάται από την επιφάνεια της φωτιάς και την απόσταση της από τον ανιχνευτή. Στην Ευρωπαϊκή Οδηγία EN 54-10, σύμφωνα με την οποία πρέπει να κατασκευάζονται οι ανιχνευτές φλόγας, προβλέπονται τα μεγέθη της φλόγας (σε m) και οι αποστάσεις από τις οποίες πρέπει να δίνεται συναγερμός. Χρησιμοποιούνται συνήθως σε πολύ κρίσιμους, από πλευράς ασφαλείας, χώρους ειδικά σε εκείνους που η εμφάνιση πυρκαγιάς θα καθυστερήσει να παράγει καπνό ή αύξηση θερμοκρασίας. Τέτοιοι χώροι είναι εγκαταστάσεις επεξεργασίας και αποθήκευσης υγρών καυσίμων, υπόστεγα αεροσκαφών, εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, εγκαταστάσεις μεγάλων μετασχηματιστών κ.ά. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ημι-υπαίθριους χώρους, όπου ο αέρας θα εμποδίσει την συγκέντρωση καπνού και θερμότητας σε περίπτωση πυρκαγιάς.

- **Μπουτόν χειροκίνητης ενεργοποίησης συναγερμού πυρκαγιάς**

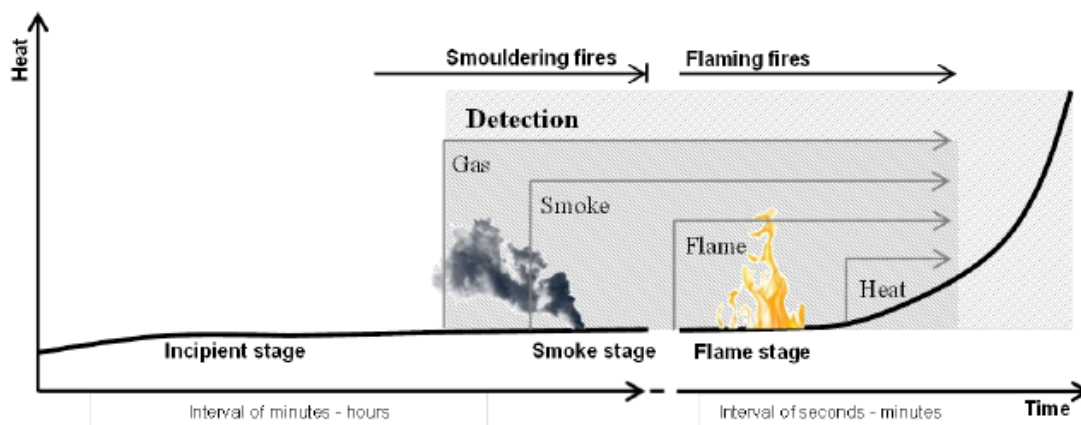
Είναι συσκευές που μπορεί να χρησιμοποιήσει ένας άνθρωπος για να δώσει σήμα συναγερμού πυρκαγιάς. Είναι απαραίτητα σε κάθε σύστημα πυρανίχνευσης. Τοποθετούνται δίπλα στις σκάλες και στις εξόδους, σε ευδιάκριτα σημεία, ώστε ένα τουλάχιστον να εντοπίσει εύκολα μπροστά του κάθε άνθρωπος που έχει διαπιστώσει ύπαρξη πυρκαγιάς σε ένα χώρο και τον εγκαταλείπει. Διαθέτουν ένα διαφανές τμήμα (τζάμι ή διαφανές πλαστικό), το οποίο σπάει ή υποχωρεί όταν πιεστεί με την απαιτούμενη δύναμη. Τότε ένας διακόπτης, κατάλληλα τοποθετημένος, ενεργοποιείται και δίνει το σήμα συναγερμού πυρκαγιάς στον πίνακα. Όπως προβλέπει η Ευρωπαϊκή Οδηγία EN 54-11, τα μπουτόν πρέπει να έχουν τετράγωνο σχήμα, να είναι χρώματος κόκκινου και να έχουν τυπωμένα επάνω τους κάποια σύμβολα ώστε να είναι κατανοητός ο ρόλος τους σε όλους.

5. Παράγοντες που επηρεάζουν την ανίχνευση

Είναι σημαντικό ο μελετητής που σχεδιάζει το σύστημα πυρανίχνευσης να γνωρίζει πως αυτή επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες. Ειδικότερα, ο χρόνος ανίχνευσης είναι το μέγεθος που έχει τη μεγαλύτερη πρακτική σημασία, πόσο γρήγορα δηλαδή είναι σε θέση να εντοπίσει μια πυρκαγιά. Σύμφωνα με μελέτη της EMSA (2018) οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την ανίχνευση είναι :

- Οι θέσεις των ανιχνευτών σε σχέση με τη πυρκαγιά
- Το σενάριο της πυρκαγιάς
- Η τεχνολογία του ανιχνευτή
- Η ροή του αέρα
- Οι καθυστερήσεις του συστήματος ανίχνευσης.

Στο Διάγραμμα 3 απεικονίζεται ένα τυπικό σενάριο πυρκαγιάς ανάλογα με κάθε τεχνολογία ανιχνευτή. Οι περισσότερες πυρκαγιές πριν αναπτύξουν φλόγες εκπέμπουν καπνούς που μπορούν να διαρκέσουν κάποια λεπτά ή κάποιες ώρες. Μόλις αναπτυχθούν φλόγες τότε η πυρκαγιά αρχίζει να αναπτύσσεται και ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας (HRR) αυξάνεται ραγδαία. Οι πυρκαγιές που ξεκινούν λόγω ηλεκτρικού σφάλματος (αιτία αρκετά συχνή για πυρκαγιές σε χώρους go-go) στην αρχή αναπτύσσονται αργά (smouldering fires). Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, οι ανιχνευτές καπνού και αερίων ανιχνεύουν αμεσώτερα την πυρκαγιά σε σχέση με τους ανιχνευτές φλόγας και τους θερμικούς ανιχνευτές. Μάλιστα οι ανιχνευτές αερίων μπορούν να εντοπίσουν την πυρκαγιά πριν ακόμη ξεκινήσει, διότι έχουν τη δυνατότητα να ενεργοποιούνται έπειτα από εκπομπή εύφλεκτων αναθυμιάσεων (π.χ κάποιας διαρροής). Παρ' όλα αυτά, προκειμένου μια πυρκαγιά να είναι ανιχνεύσιμη από τους ανιχνευτές καπνού και τους ανιχνευτές αερίων θα πρέπει να είναι τοποθετημένοι κοντά στην πυρκαγιά προκειμένου ο καπνός που θα συλληφθεί από τον ανιχνευτή να έχει επαρκή συγκέντρωση ώστε να ενεργοποιήσει συναγερμό. Αυτό σημαίνει ότι για πυρκαγιές χαμηλής έντασης το σύστημα ανίχνευσης καπνού ενδεχομένως να μην ενεργοποιήσει συναγερμό.



Διάγραμμα 3. Τυπικό σενάριο πυρκαγιάς όσον αφορά την ανίχνευση πυρκαγιάς (ή την πρόληψη) EMSA (2018)

Προκειμένου να συγκριθεί ο χρόνος ανίχνευσης των παραπάνω συστημάτων πυρανίχνευσης θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψη όλοι οι παράγοντες που προαναφέρθηκαν. Το σενάριο πυρκαγιάς επηρεάζει την πιθανότητα γρήγορης απόκρισης για τα διάφορα είδη ανιχνευτών, ωστόσο μια πυκνότερη ταξινόμηση ανιχνευτών στο χώρο θα μπορούσε να μειώσει το χρόνο ανίχνευσης. Τέλος, για κάθε σύστημα ανίχνευσης ισχύει ότι η παρουσία του ανέμου δυσχεραίνει την ανίχνευση.

5.1 Επίδραση φόρτωσης καταστρώματος στο χρόνο ανίχνευσης.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο χρόνος ανίχνευσης έχει άμεση εξάρτηση με το σενάριο της πυρκαγιάς, τον άνεμο, την ένταση της πυρκαγιάς κ.λ.π. Πέρα από τα παραπάνω, ο χρόνος ανίχνευσης εξαρτάται και από το φορτίο που μεταφέρει το πλοίο καθώς και την διάταξη των οχημάτων στους χώρους go-go.

5.1.1 Διαμόρφωση φόρτωσης καταστρώματος

Η μελέτη της EMSA (2018) επικεντρώνεται στην ανίχνευση πυρκαγιάς σε κατάστρωμα καιρού και σε ανοιχτούς χώρους go-go. Αυτά τα καταστρώματα χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά φορτίου, που αποτελείται κυρίως από εμπορευματοκιβώτια, αυτοκίνητα, λεωφορεία και φορτηγά. Επιπλέον, πρέπει να σημειωθεί ότι μέσα σε φορτηγά, υπάρχουν όλα τα πιθανά είδη αντικειμένων / αγαθών. Επομένως, η ανίχνευση μιας πιθανής πυρκαγιάς στο χώρο του φορτίου επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες. Στη μηχανική πυρασφάλειας η πυκνότητα φορτίου πυρκαγιάς, που αντιπροσωπεύει τα διαθέσιμα καύσιμα ανά τετραγωνικό μέτρο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αντιπροσωπεύσει την ανάπτυξη της. Συνδέοντας το φορτίο της πυρκαγιάς και την ποσότητα του διαθέσιμου καθαρού αέρα (οξυγόνο), μια πυρκαγιά μπορεί να χαρακτηριστεί ως ελεγχόμενη από το καύσιμο σε περίπτωση υψηλής ποσότητας φρέσκου αέρα ή ελεγχόμενη από τον εξερισμό εάν ο διαθέσιμος καθαρός αέρας περιορίζει την ανάπτυξη της πυρκαγιάς. Εάν η πυρκαγιά ελέγχεται από τα καύσιμα, ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας της πυρκαγιάς μπορεί να θεωρηθεί εξαρτώμενος από τη φύση και την ποσότητα των καυσίμων. Τέτοια σενάρια αναμένονται σε κατάστρωμα καιρού και ανοιχτό χώρο go-go.

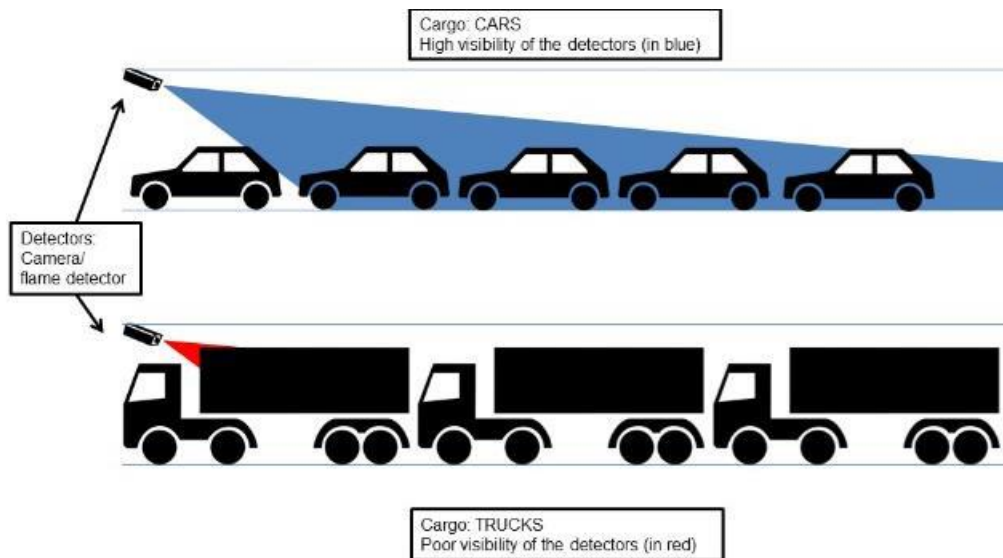
5.1.2 Επίδραση του είδους του φορτίου

Ο τύπος φορτίου μπορεί να επηρεάσει την ανίχνευση για ορισμένα ειδικά σενάρια πυρκαγιάς. Για παράδειγμα, η διαρροή εύφλεκτων αερίων ή υγρών θα μπορούσε να προκαλέσει ένα σενάριο ταχείας φλόγας και θα μπορούσε να υπάρχει ανάγκη για ανίχνευση αερίου ή ανίχνευση φλόγας. Η πυκνότητα διαφορετικών αερίων σε σύγκριση με τον αέρα θα μπορούσε να επηρεάσει τη βέλτιστη θέση των ανιχνευτών αερίου. Ωστόσο, η ανίχνευση αερίου μπορεί να είναι ένα καλό συμπλήρωμα στο σύστημα ανίχνευσης, ειδικά σε περιπτώσεις αυξημένου αριθμού οχημάτων με διαφορετικά καύσιμα που θα μπορούσαν να απελευθερώσουν αέρια πριν από μια πιθανή πυρκαγιά.

5.1.3 Επίδραση της διάταξης του φορτίου

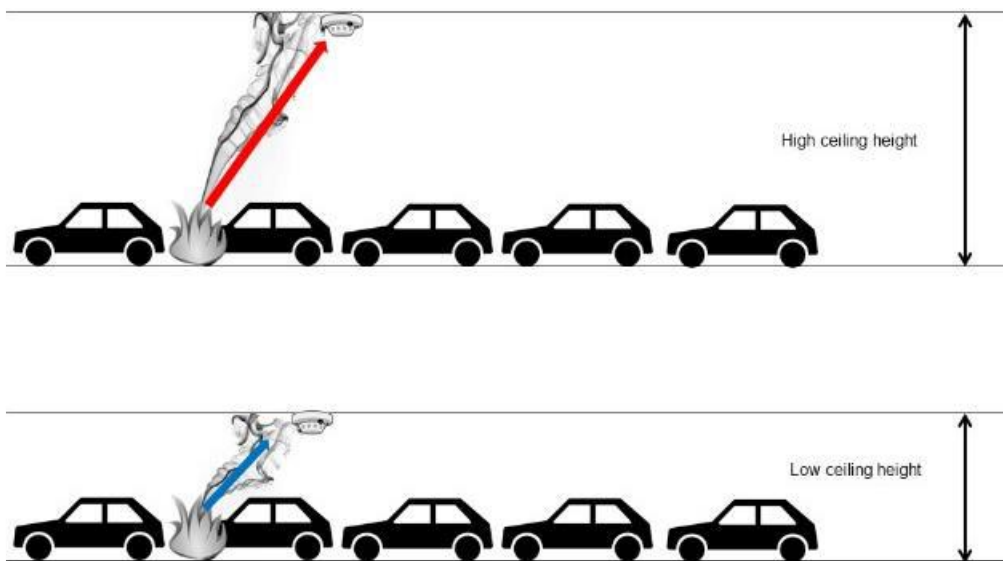
Η διάταξη του φορτίου στα καταστρώματα επηρεάζει με δύο τρόπους την πυρανίχνευση:

- Ο πρώτος είναι το ύψος τους φορτίου, που επηρεάζει άμεσα το οπτικό πεδίο των ανιχνευτών φλόγας και της κάμερας που χρησιμοποιείται για πυρανίχνευση. Ένα παράδειγμα του συγκεκριμένου προβλήματος φαίνεται στην εικόνα 1.



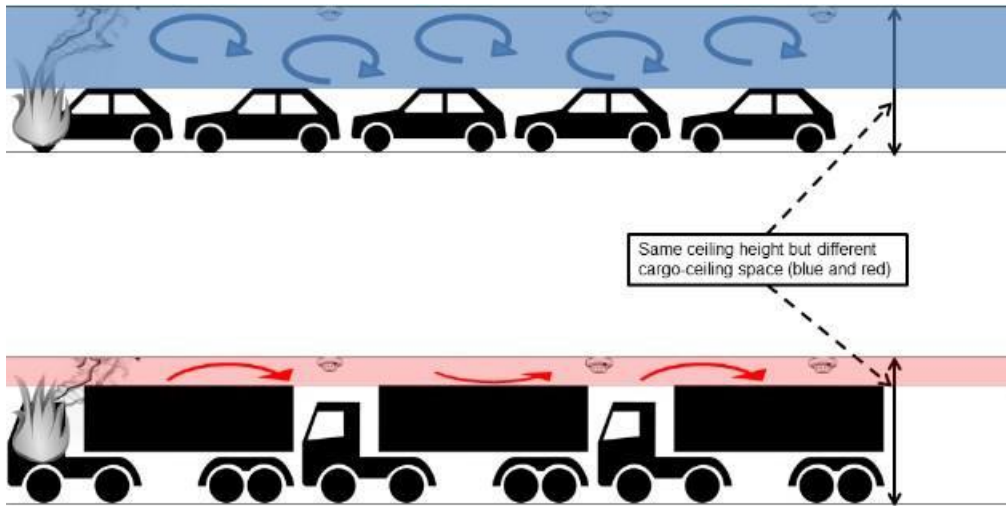
Εικόνα 1. Παράδειγμα εμπόδισης πυρανίχνευσης από τις κάμερες εξαιτίας του ύψους του φορτίου (EMSA 2018).

Όπως φαίνεται στην εικόνα 1 ύψος των οχημάτων δύναται να εμποδίσει τις κάμερες να ανιχνεύσουν την πυρκαγιά, επομένως χαμηλό ύψος καταστρώματος επιδρά αρνητικά στην ανίχνευση της πυρκαγιάς μέσω κάμερας. Ωστόσο, σε ένα ψηλό κατάστρωμα η μεταφορά θερμότητας και καπνού θα καθυστερήσει σε σχέση με ένα χαμηλό κατάστρωμα. Γι' αυτό το λόγο, η ανίχνευση θερμότητας και καπνού ανταποκρίνεται αμεσώτερα σε χαμηλότερα καταστρώματα (εικόνα 2).



Εικόνα 2. παράδειγμα επίδρασης του ύψους οροφής στην ανίχνευση καπνού (EMSA 2018).

Μια άλλη επίδραση του ύψους του καταστρώματος και της απόστασης των οχημάτων από την οροφή, είναι ότι τα ψηλά οχήματα μειώνουν τον χώρο οροφής-φορτίου, ο οποίος δύναται να επιταχύνει τη ροή αέρα (εικόνα 3). Η υψηλή ροή αέρα επηρεάζει τις περισσότερες τεχνολογίες ανίχνευσης, εκτός από την ανίχνευση φλόγας και βίντεο (οι οποίες βέβαια είναι ακατάλληλες λόγω οπτικού πεδίου).



Εικόνα 3. Παράδειγμα επιτάχυνσης ροής αέρα σε περίπτωση υψηλού ύψους φορτίου (EMSA 2018)

6. Επιλογή κατάλληλου συστήματος ανίχνευσης

Ο σχεδιαστής που πρόκειται να επιλέξει το σύστημα πυρανίχνευσης που θα εγκατασταθεί στο πλοίο θα πρέπει να:

- Επικεντρωθεί στις περιοχές του πλοίου όπου ο κίνδυνος πυρκαγιάς είναι αυξημένος και απαιτείται περισσότερος έλεγχος
- Προσδιορίσει τις πιθανές λύσεις για περιορισμό της διακινδύνευσης που οφείλεται σε πιθανή πυρκαγιά
- Να διαλέξει το αποδοτικότερο σύστημα που θα περιορίσει την διακινδύνευση της πυρκαγιάς

Η έγκαιρη ανίχνευση σε χώρους ro-ro είναι πολύ σημαντική για τον μετριασμό της πυρκαγιάς, ωστόσο ενδέχεται κάποιες φορές να αποτύχει. Επομένως, θα πρέπει να τεθούν κάποια μέτρα ώστε να μειωθεί η διακινδύνευση της πυρκαγιάς μέσω της αποδοτικότερης λειτουργίας του συστήματος πυρανίχνευσης. Έπειτα από έρευνα της EMSA (2018) προσδιορίστηκαν κάποια μέτρα που περιορίζουν την διακινδύνευση της πυρκαγιάς.

6.1 Προσδιορισμός των μέτρων περιορισμού διακινδύνευσης (RCMs- Risk Control Measures)

Στη μελέτη που διεξήχθη από την EMSA (2018) παρουσιάζονται τα βασικά μέτρα περιορισμού της διακινδύνευσης (πίνακας 5).

Πίνακας 5. Βασικά μέτρα περιορισμού διακινδύνευσης (EMSA 2018)

Βασικά μέτρα περιορισμού της διακινδύνευσης	RCOs (Risk Control Options)
Combined smoke and heat detection	Combined smoke and heat detection
Fibre optic linear heat detection	
Ban / closure of side (PS&SB) openings (open ro-ro spaces)	Ban / closure of side (PS&SB) openings (open ro-ro spaces)
Increased frequency of fire patrols	Increased frequency of fire patrols
CCTV covering all decks	CCTV covering all decks
Thermal imaging cameras	Flame detection on weather decks
Conventional flame detection	
Detector drone or camera on rail	Not further described
Additional detection means in AFV areas	Additional detection means in AFV areas

6.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μέτρων περιορισμού της διακινδύνευσης

Σ' αυτή την παράγραφο παρουσιάζονται πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα από κάποια μέτρα, τα οποία περιορίζουν τη διακινδύνευση της πυρκαγιάς σε χώρους ro-ro, σύμφωνα με τη μελέτη "Firesafe II-WP1" της EMSA (2018).

6.2.1 Συνδυασμός ανίχνευσης καπνού και θερμότητας

Πλεονεκτήματα

Η ανίχνευση θερμότητας συμπληρώνει την ανίχνευση καπνού με καλύτερη παρακολούθηση της ανάπτυξης πυρκαγιάς και της εξάπλωσης της πυρκαγιάς. Οι ανιχνευτές καπνού ενεργοποιούνται αρκετά γρήγορα, πράγμα που σημαίνει ότι η αύξηση του καπνού και η ανάπτυξη της πυρκαγιάς είναι δύσκολο να ανιχνευθούν. Επιπλέον, ο καπνός εξαπλώνεται γρήγορα και πρόκειται ανιχνευθεί σε όλο το κατάστρωμα ή σε παρακείμενες περιοχές χωρίς το πλήρωμα να γνωρίζει πού υπάρχουν φλόγες. Με την ανίχνευση θερμότητας είναι πιο εύκολο να παρακολουθείται τόσο η ανάπτυξη της πυρκαγιάς όσο και η εξάπλωση της, με αποτέλεσμα να μειώνεται ο κίνδυνος λανθασμένων αποφάσεων, βοηθώντας το πλήρωμα στην εντόπιση της πυρκαγιάς και την αντιμετώπιση της.

Οι ανιχνευτές θερμότητας εμφανίζουν καλή συμπεριφορά σε σκόνη. Αυτό θα μπορούσε να είναι ωφέλιμο με δύο τρόπους. Η ανίχνευση θερμότητας μπορεί να παραμείνει ενεργοποιημένη κατά τη φόρτωση και την εκφόρτωση του καταστρώματος, όταν οι ανιχνευτές καπνού γενικά απενεργοποιούνται λόγω του ψευδούς συναγερμού που προκαλείται από αναθυμιάσεις καυσαερίων και τη σκόνη που αναδύεται από κινούμενα οχήματα.

6.2.2 Αποκλεισμός/κλείσιμο πλευρικών ανοιγμάτων PS & SB

Πλεονεκτήματα

Το κύριο πλεονέκτημα των λιγότερων ανοιγμάτων, όσον αφορά στην ανίχνευση πυρκαγιάς, είναι η περιορισμένη ροή αέρα και η αποφυγή ισχυρών ριπών, που επηρεάζουν την κίνηση θερμότητας και καπνού. Γενικά, πολλά ανοίγματα έχουν ως αποτέλεσμα αυξημένους χρόνους απόκρισης, και σε περίπτωση που η πυρκαγιά είναι κοντά σε ένα άνοιγμα, η πυρκαγιά μπορεί να παραμείνει απαρατήρητη για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Το μόνιμο κλείσιμο των ανοιγμάτων έχει επίσης άλλα θετικά αποτελέσματα που δεν σχετίζονται άμεσα με την ανίχνευση, π.χ. βραδύτερη ανάπτυξη πυρκαγιάς, περιορισμένη πιθανή εξάπλωση καπνού και πυρκαγιάς και αυξημένη πιθανότητα επιτυχούς αντιμετώπισης από το σύστημα κατάσβεσης. Τέλος, δεδομένου ότι αναμένονται μειωμένοι χρόνοι απόκρισης και υψηλότερη αξιοπιστία για ανίχνευση θερμότητας και καπνού σε κλειστούς χώρους go-go, μειώνεται η ανάγκη για αυξημένη συχνότητα περιπολιών πυρκαγιάς.

Μειονεκτήματα

Το κλείσιμο των ανοιγμάτων σε υπάρχοντα πλοία θα σήμαινε ότι απαιτείται αυξημένη απαίτηση μηχανικού αερισμού, κάτι που θα μπορούσε να οδηγήσει σε μια αρκετά εκτεταμένη και δαπανηρή εγκατάσταση. Αυτό θα οδηγούσε επίσης σε αυξημένη κατανάλωση καυσίμου, δεδομένου ότι απαιτείται πρόσθετη τροφοδοσία ενέργειας.

6.2.3 Αύξηση συχνότητας περιπολιών πυρκαγιάς

Πλεονεκτήματα

Οι περιπολίες πραγματοποιούνται μετά την αναχώρηση του πλοίου κάθε 30 λεπτά. Το πλήρωμα που εκτελεί την περιπολία θα πρέπει να είναι πλήρως εξοπλισμένο και να είναι εφοδιασμένο με VHF radio. Συχνές περιπολίες μπορούν να αποτρέψουν την εξάπλωση μιας πυρκαγιάς κυρίως όταν αυτή αναπτύσσεται πολύ αργά και το σύστημα ανίχνευσης αδυνατεί να την εντοπίσει.

7. Θεωρητικά μοντέλα ανίχνευσης πυρκαγιάς

Το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει την μαθηματική μοντελοποίηση του προβλήματος της ανίχνευσης πυρκαγιάς. Αφορά αμφότερα τα συστήματα ανίχνευσης θερμότητας και καπνού και μπορεί να εφαρμοστεί με σκοπό μια πρωταρχική εκτίμηση του χρόνου ενεργοποίησης ενός ανιχνευτή. Στη συνέχεια, γίνεται εφαρμογή των εξισώσεων για μια απλή περίπτωση πυρκαγιάς. Τέλος, παρουσιάζεται η επίδραση διαφόρων παραγόντων που επηρεάζουν το χρόνο ανίχνευσης καπνού, καθώς και προτάσεις βελτιστοποίησης του παραθέτοντας αποτελέσματα της δημοσίευσης των Themelis & Spyrou (2012).

7.1 Το μαθηματικό μοντέλο ανίχνευσης θερμότητας

Είναι σημαντικό, πριν παρουσιαστούν οι προσομοιώσεις της πυρκαγιάς για τη μελέτη της απόκρισης των συστημάτων πυρανίχνευσης να παρουσιαστεί το μοντέλο στο οποίο βασίζεται η ανίχνευση θερμότητας. Με το πρόβλημα αυτό έχουν ασχοληθεί πολλοί ερευνητές, στα πλαίσια όμως της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα γίνει αναφορά στην ανάλυση του Schifiliti (Schifiliti et al 2002) για τους ανιχνευτές θερμότητας.

Σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση, η διαφορική εξίσωση που εκτιμά την θερμοκρασία ενός ανιχνευτή είναι η εξής :

$$\frac{dT_{det}}{dt} = \frac{\sqrt{u}}{RTI} (T_{cj} - T_{det}) \quad [1]$$

- Όπου T_{det} [°C] και T_{cj} [°C] οι θερμοκρασίες που καταγράφει ο ανιχνευτής και η θερμοκρασία των θερμών αερίων που παράγονται από την καύση αντίστοιχα
- RTI [(ms)^{1/2}], ο δείκτης χρόνου απόκρισης (Response Time Index).
- u [m/s], η ταχύτητα των θερμών αερίων που παράγονται από την καύση.

Επιπλέον οι παραπάνω όροι δίνονται συναρτήσει του ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας \dot{Q} [KW] για θερμοκρασία περιβάλλοντος T_{amb} [°C].

$$T_{cj} = \begin{cases} T_{amb} + \frac{16.9\dot{Q}}{H^3}, R < 0.18H \\ T_{amb} + \frac{5.38\left(\frac{\dot{Q}}{R}\right)^{\frac{2}{3}}}{H}, R \geq 0.18H \end{cases} \quad [2]$$

$$u = \begin{cases} 0.96 \left(\frac{\dot{Q}}{H}\right)^{\frac{1}{3}}, R < 0.15H \\ \frac{0.195\dot{Q}^{\frac{1}{3}}\sqrt{H}}{R^{\frac{5}{6}}}, R \geq 0.15H \end{cases} \quad [3]$$

Οι εξισώσεις [2] και [3] είναι γνωστές ως εξισώσεις του Alpert (1972).

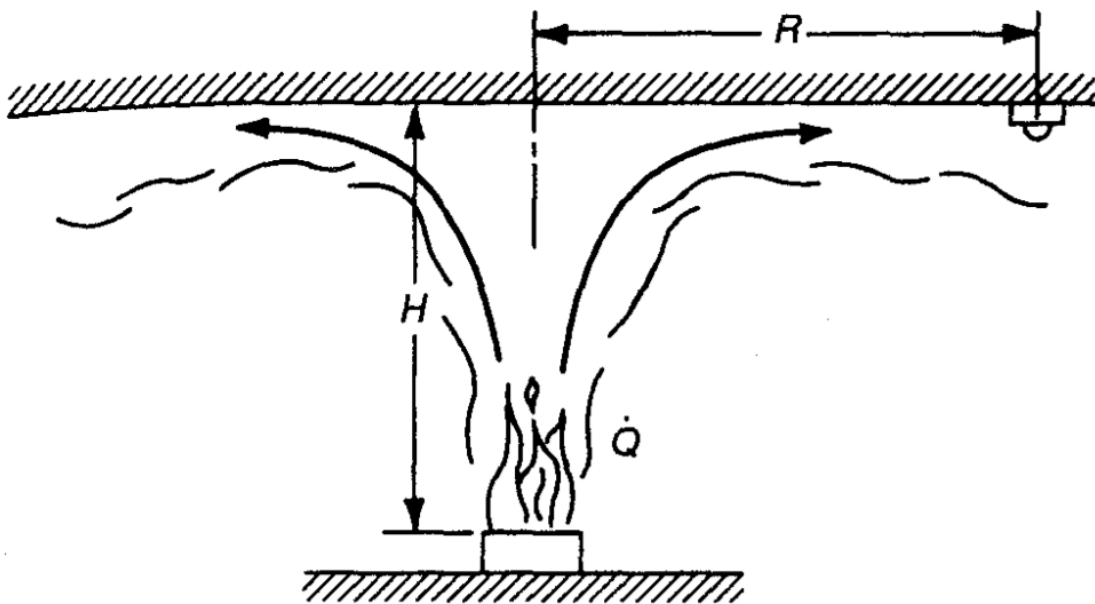
Επιλύοντας τη διαφορική εξίσωση [1] με αρχική συνθήκη τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, λαμβάνονται οι τιμές της θερμοκρασίας που καταγράφει ο ανιχνευτής θερμότητας.

7.1.1 Εφαρμογή του μαθηματικού μοντέλου

Με βάση όσα αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο η θερμοκρασία που “καταγράφει” ένας ανιχνευτής μπορεί να προσδιοριστεί άμεσα αν είναι γνωστά :

- Η κατακόρυφη απόσταση H του ανιχνευτή από την πηγή της πυρκαγιάς
- Η οριζόντια απόσταση R του ανιχνευτή από την πηγή της πυρκαγιάς
- Το RTI του ανιχνευτή
- Το HRR της πυρκαγιάς

Στην εικόνα 4 παρουσιάζονται σχηματικά οι διάφορες παράμετροι του μαθηματικού μοντέλου ανίχνευσης θερμότητας.



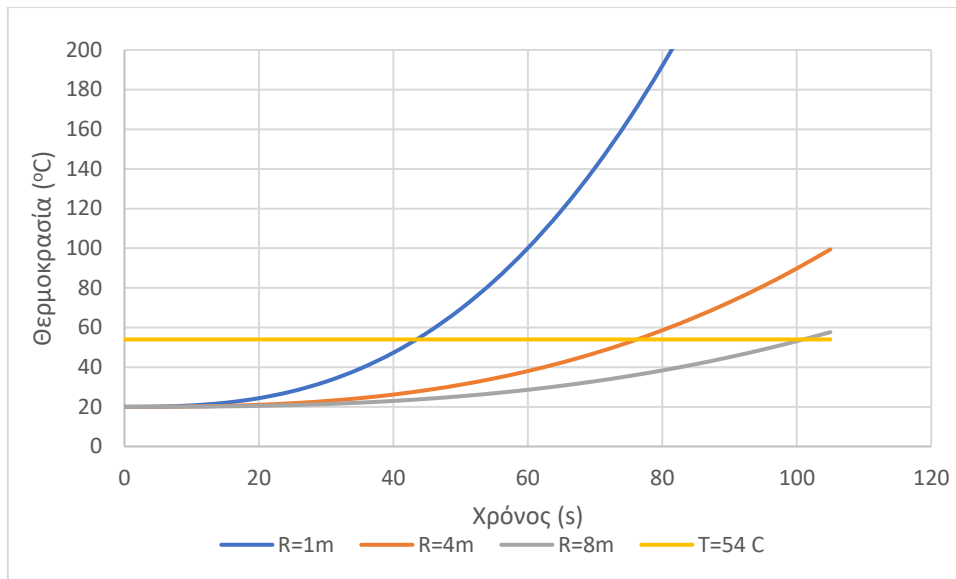
Εικόνα 4. Ροή των θερμών αερίων από την πηγή της πυρκαγιάς προς την οροφή (Yamauchi et al., 2005)

Γνωρίζοντας τις παραπάνω μεταβλητές, υπολογίζεται ο χρόνος ανίχνευσης πυρκαγιάς ενός ανιχνευτή θερμότητας ο οποίος είναι ρυθμισμένος να ενεργοποιείται σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία T_{det} και είναι τοποθετημένος σε μία οροφή ύψους H .

Έστω ένα κατάστρωμα οχημάτων με ύψος οροφής 5m στο οποίο θα πρέπει να τοποθετηθούν ανιχνευτές θερμότητας με θερμοκρασία ενεργοποίησης 54°C . Η καμπύλη του HRR θεωρείται τετραγωνικής μορφής και πρόκειται να εξεταστούν δύο σενάρια πυρκαγιάς:

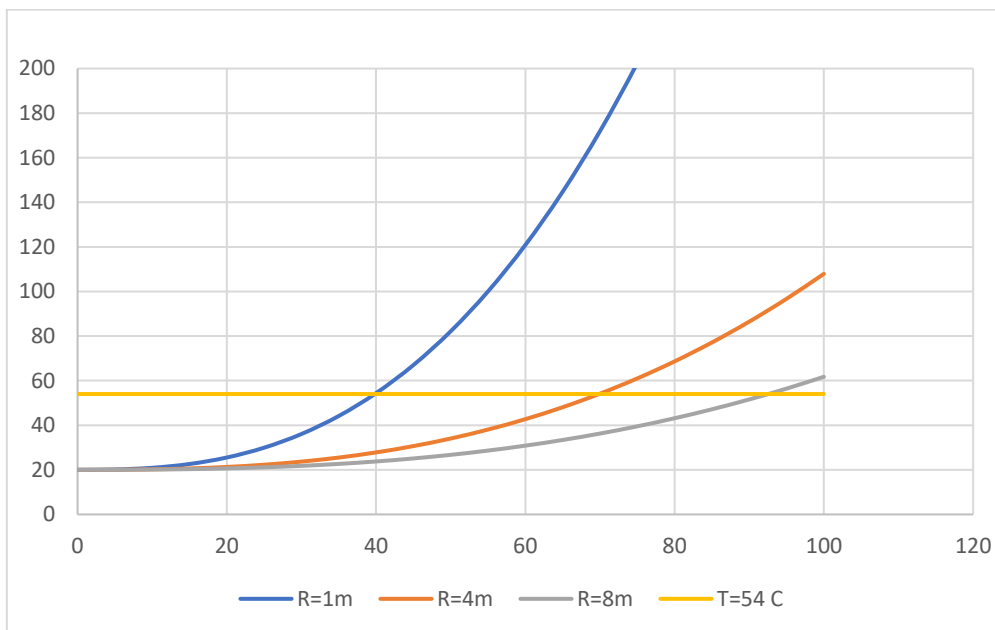
- Αργή με συντελεστή ανάπτυξης $\alpha_1=0.00277 \text{ KW/s}^2$
- μέτρια με συντελεστή ανάπτυξης $\alpha_2=0.0117 \text{ KW/s}^2$

Επιλύοντας την εξίσωση [1] για ένα σενάριο αργού ρυθμού ανάπτυξης αργής πυρκαγιάς με τον ανιχνευτή τοποθετημένο σε οριζόντιες αποστάσεις $R_1=1\text{m}$, $R_2=2\text{m}$ και $R_3=4\text{m}$ χρόνοι ανίχνευσης προσδιορίζονται με βάση το Διάγραμμα 4:



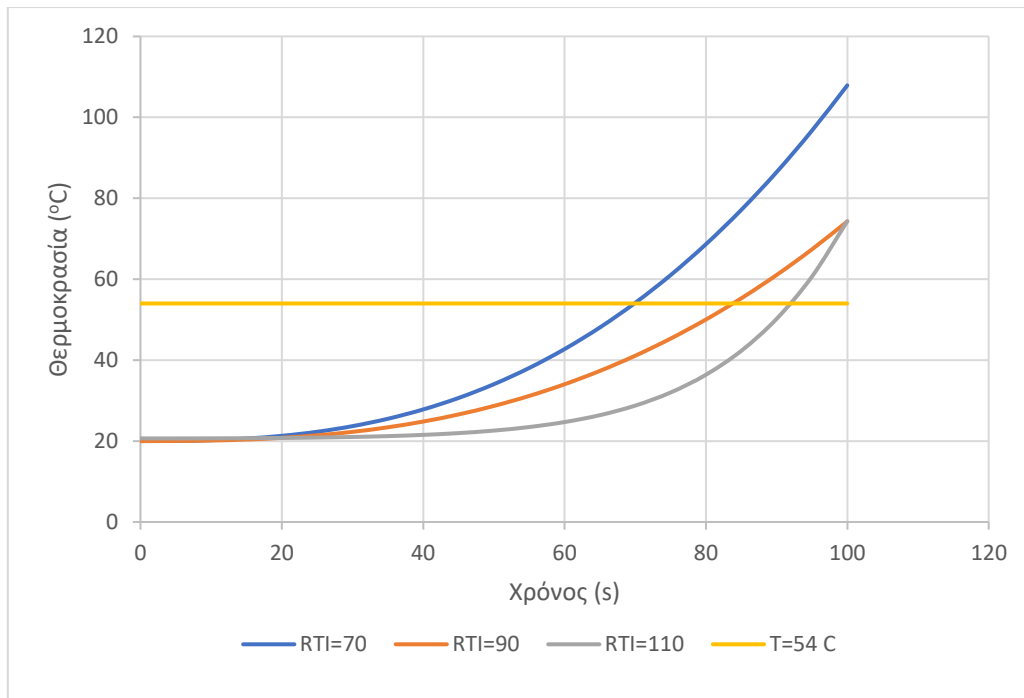
Διάγραμμα 4. Αποκρίσεις ανιχνευτών με $R=1$, $R=4$ και $R=8$ m σε πυρκαγιά που αναπτύσσεται με αργό ρυθμό

Αντίστοιχα, για το σενάριο πυρκαγιάς που αναπτύσσεται με μέτριο ρυθμό προκύπτουν οι εξής αποκρίσεις (διάγραμμα 5):



Διάγραμμα 5. Αποκρίσεις ανιχνευτών με $R=1$, $R=4$ και $R=8$ m σε πυρκαγιά που αναπτύσσεται με μέτριο ρυθμό.

Ακόμη, προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση του RTI, στην περίπτωση της πυρκαγιάς με μέτριο ρυθμό ανάπτυξης εξετάστηκε η απόκριση του ανιχνευτή για RTI: 70, 90 και 110 $(ms)^{1/2}$ (διάγραμμα 6).



Διάγραμμα 6. Σύγκριση απόκρισης ανιχνευτών για διαφορετικά RTI, R=4m

Με βάση τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον πίνακα 6, προκύπτει ότι ο χρόνος ανίχνευσης της πυρκαγιάς εξαρτάται άμεσα από την απόσταση του ανιχνευτή από την πηγή της πυρκαγιάς. Η εξάρτηση αυτή γίνεται μεγαλύτερη όταν η πυρκαγιά είναι μεγαλύτερης έντασης. Όσον αφορά το δείκτη χρόνου απόκρισης RTI, η επιλογή ενός ανιχνευτή με μικρότερο RTI μπορεί να προσφέρει ταχύτερη ανίχνευση.

Πίνακας 6. Επιδράσεις των διαφόρων παραμέτρων στο χρόνο ανίχνευσης όπως προέκυψαν από την επίλυση του μαθηματικού μοντέλου.

Ρυθμός ανάπτυξης πυρκαγιάς	Οριζόντια απόσταση R [m]	RTI [(ms) ^{1/2}]	Χρόνος ανίχνευσης (s)
Αργή	1	70	43
Αργή	4	70	67
Αργή	8	70	99
Μέτρια	1	70	39
Μέτρια	4	70	66
Μέτρια	8	70	91
Μέτρια	4	70	70
Μέτρια	4	90	77
Μέτρια	4	110	83

7.1.2 Εφαρμογή του μοντέλου ανίχνευσης θερμότητας στην ανίχνευση του καπνού

Το προαναφερθέν μοντέλο ανίχνευσης θερμότητας βρίσκει εφαρμογή στο σύστημα ανίχνευσης καπνού. Η βασική ιδέα αυτής της θεώρησης είναι ότι η αύξηση της κάλυψης του καπνού είναι ανάλογη με μία μικρή αύξηση της θερμοκρασίας.

7.1.3 Εφαρμογή της διαφορικής εξίσωσης του Schifiliti στην ανίχνευση καπνού.

Οι ανιχνευτές καπνού οι οποίοι είναι συνήθως είτε ιονισμού είτε φωτοηλεκτρικοί ενεργοποιούνται με βάση την εκτίμηση της οπτικής πυκνότητας και της επισκότισης (Obscuration) του καπνού. Ο καπνός ανάλογα με τη συγκέντρωση του προκαλεί επισκότιση με αποτέλεσμα να μειώνεται η ορατότητα. Ανάλογα με τον τύπο του καυσίμου, την ένταση της πυρκαγιάς, το χρώμα του καπνού και τις συνθήκες εξαερισμού, η επισκότιση του καπνού ποικίλλει. Ο FSS code επιβάλλει οι ανιχνευτές να ενεργοποιούνται σε ποσοστά επισκότισης μεγαλύτερα του 2%/m και μικρότερα του 12.5%/m. Η απόκριση του ανιχνευτή καπνού μπορεί να θεωρηθεί ως απόκριση ενός ανιχνευτή θερμότητας ο οποίος ενεργοποιείται γρήγορα και για μικρή αύξηση της θερμοκρασίας. Η αρχή λειτουργίας των ανιχνευτών καπνού βασίζεται στο μοντέλο των Heskestad and Delichatsios (1977) και των Evans and Stroup (1985). Η βασική αρχή του εν λόγω μοντέλου είναι ότι η συγκέντρωση του καπνού είναι ανάλογη με μία μικρή αύξηση της θερμοκρασίας. Στην πραγματικότητα αυτή η θεώρηση ισχύει σε περίπτωση που οι απώλειες θερμότητας στο χώρο λόγω συναγωγής και λόγω ακτινοβολίας του καπνού είναι αμελητέες. Επίσης, θα πρέπει να θεωρηθεί ότι η κίνηση του καπνού προκαλεί μεταφορά θερμότητας μεταξύ των σωματιδίων του. Έτσι, με ένα δεδομένο τύπου καυσίμου και ένα δεδομένο σενάριο πυρκαγιάς, η οπτική πυκνότητα (OD) μπορεί να ληφθεί ανάλογη με τη συγκέντρωση των σωματιδίων του καπνού που είναι ανάλογη με μία μικρή αύξηση της θερμοκρασίας ΔΤ. Επομένως, υπάρχει μια αναλογία μεταξύ οπτικής πυκνότητας (OD) και αύξησης θερμοκρασίας (ΔΤ).

Οι λόγοι αυτής της αναλογίας έχουν υπολογιστεί από την έρευνα των Heskestad and Delechtsios (1977) για διάφορους τύπους καυσίμου (πίνακας 7).

Πίνακας 7. Μέσες τιμές του λόγου OD/ΔΤ για διάφορους τύπους καυσίμων (Heskestad and Delechtsios 1997)

Material	$10^2 OD/\Delta T$ (1/[m°C])
Wood	0.118
Textiles (cotton)	0.089
Polyvinyl chloride	4.269
Polyurethane	2.397
Polyester	0.181
Foam PU	7.882

Η σχέση που συνδέει την επισκότιση (Obscuration) του καπνού O_u με την ένταση της ακτίνας φωτός χωρίς καπνό I_0 και την ένταση μιας ακτίνας φωτός με καπνό I δίνεται από τις σχέσεις (Schifiliti et al. 2002):

$$O_u = 100 \left[1 - \left(\frac{I}{I_0} \right)^{\frac{1}{l}} \right] \quad [4]$$

Και για τον ορισμό τη οπτικής πυκνότητας ανά μονάδα μήκους σε απόσταση l από την πηγή του φωτοκύτταρου ισχύει:

$$OD = \frac{1}{l} \log_{10} \left(\frac{I_0}{I} \right)^{\frac{1}{l}} \quad [5]$$

Σύμφωνα με τη σύμβαση SOLAS αφού το αποδεκτό όριο της κάλυψης του καπνού ανά μέτρο (Obscuration Threshold) είναι (2% έως 12.5%/m), η οπτική πυκνότητα OD θα πρέπει λαμβάνει τιμές από 0.0088 έως 0.058 m⁻¹.

Επομένως, από τις σχέσεις [4] και [5] σε συνδυασμό με τις τιμές του πίνακα για τους λόγους $OD/\Delta T$ υπολογίζεται η ισοδύναμη αύξηση θερμοκρασίας ΔT για ένα συγκεκριμένο καύσιμο και αντικαθίσταται στη διαφορική εξίσωση του Schifiliti. Ακόμη, η τιμή του RTI για τα συστήματα ανίχνευσης καπνού δεδομένου ότι η απόκριση είναι σχεδόν άμεση, κυμαίνεται μεταξύ 1 και 10 $(ms)^{1/2}$.

Γνωρίζοντας την ισοδύναμη αύξηση της θερμοκρασίας, καθώς και την τιμή του RTI επιλύεται η διαφορική εξίσωση για την εύρεση του χρόνου ανίχνευσης του συστήματος καπνού.

7.1.4 Βελτιστοποίηση απόδοσης συστήματος ανίχνευσης καπνού σε επιβατηγά πλοία

Στη μελέτη των Themelis & Spyrou (2012) έγινε μια εκτίμηση της απόδοσης των ανιχνευτών καπνού στην περιοχή του εστιατορίου ενός επιβατηγού πλοίου. Λήφθηκαν υπόψιν όλες οι ιδιότητες των καύσιμων υλών που υπήρχαν στο χώρο και κατασκευάστηκαν οι καμπύλες του HRR για κάθε καύσιμο.

Έπειτα, τοποθετήθηκαν ανιχνευτές που ικανοποιούσαν τις απαιτήσεις της SOLAS (δηλαδή ποσοστό κάλυψης καπνού 2-12.5 %/m). Κάθε ανιχνευτής κάλυπτε εμβαδόν 8 έως 74 m^2 . Η ισοδύναμη αύξηση της θερμοκρασίας λόγω της επισκότισης λήφθηκε από την τιμή του λόγου $OD/\Delta T=3.997 \cdot 10^{-3}$ [$1/m^{\circ}C$]. Το RTI των ανιχνευτών ήταν 5 [$(ms)^{1/2}$]. Τα αποτελέσματα της παραπάνω έρευνας έδειξαν πως η ανίχνευση γίνεται από 3 έως 7 φορές ταχύτερη σε περίπτωση που επιλεχθούν ανιχνευτές υψηλότερης ευαισθησίας.

Ακόμη, έγινε υπολογισμός της απόκρισης των ανιχνευτών για διαφορετικά εμβαδά κάλυψης του κάθε ανιχνευτή. Παρατηρήθηκε ότι, μειώνοντας το εμβαδόν κάλυψης των ανιχνευτών ο χρόνος ανίχνευσης μειώνεται 2 έως 3 φορές περισσότερο.

8. Αριθμητικές προσομοιώσεις πυρκαγιάς

Αυτό το κεφάλαιο αποτελεί το υπολογιστικό μέρος της διπλωματικής εργασίας και επικεντρώνεται στις αριθμητικές προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στο πρόγραμμα PyroSim [Thunderhead Engineering, 2021], στη σύγκριση και στο σχολιασμό των αποτελεσμάτων τους. Αρχικά, δίνονται κάποιες πληροφορίες για το λογισμικό FDS (Fire Dynamic Simulator) [McGrattan K. et al., 2021] και για το πρόγραμμα PyroSim [Thunderhead Engineering, 2020] με σκοπό να καταλάβει ο αναγνώστης τη διαδικασία που ακολουθήθηκε.

Ακόμη, πρόκειται να παρουσιαστεί το μοντέλο του καταστρώματος φορτηγών που χρησιμοποιήθηκε για τις αριθμητικές προσομοιώσεις, περιγράφοντας πλήρως τη γεωμετρία του (διαστάσεις καταστρώματος και των ανοιγμάτων του). Στη συνέχεια, περιγράφεται η γεωμετρία των φορτηγών, καθώς και η διάταξη τους στο χώρο του καταστρώματος. Τέλος, παρουσιάζεται το σύστημα ανίχνευσης που χρησιμοποιήθηκε στους αριθμητικούς υπολογισμούς (ανιχνευτές και ταξινόμηση τους στο χώρο).

Η απόκριση του συστήματος πυρανίχνευσης εξετάστηκε λαμβάνοντας υπ' όψη τις ακόλουθες παραμέτρους:

- 50 και 100% φόρτωση καταστρώματος
- Ρεαλιστική (με βάση πειραματικά δεδομένα) και αργά αναπτυσσόμενη πυρκαγιά
- Συνθήκες με και χωρίς άνεμο
- Χαμηλή και υψηλή ευαισθησία ανιχνευτών καπνού
- Παραγωγή πυκνού και αραιού καπνού ανά γραμμάριο καύσιμης ύλης (soot yield)
- Αριθμός ανιχνευτών

Στο τέλος αυτού του κεφαλαίου παρατίθενται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων κάθε περίπτωσης. Συγκεκριμένα, ανάλογα με τη διάταξη των φορτηγών στο χώρο, τις ρυθμίσεις των ανιχνευτών, τις συνθήκες ανέμου καθώς και το σενάριο της πυρκαγιάς (πυρκαγιά που εξελίσσεται αργά ή μέτρια) παρουσιάζονται οι καμπύλες του ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας καθώς και οι αποκρίσεις των ανιχνευτών θερμότητας και καπνού.

8.1 FDS

Σύμφωνα με το “Fire Dynamics Simulator User’s Guide” [McGrattan, K. et al., 2020], το λογισμικό FDS (Fire Dynamic Simulator) είναι ένα CFD (Computational Fluid Dynamics) μοντέλο προσομοίωσης για τη ροή ρευστών που παράγονται από πυρκαγιές. Το πρόγραμμα επιλύει αριθμητικά ένα μεγάλο αριθμό Navier-Stokes εξισώσεων, που είναι κατάλληλες για χαμηλής ταχύτητας, θερμικά οδηγούμενης ροής, με έμφαση στη μεταφορά καπνού και θερμότητας από την πυρκαγιά, 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.

8.2 Μοντελοποίηση ανίχνευσης καπνού σε FDS.

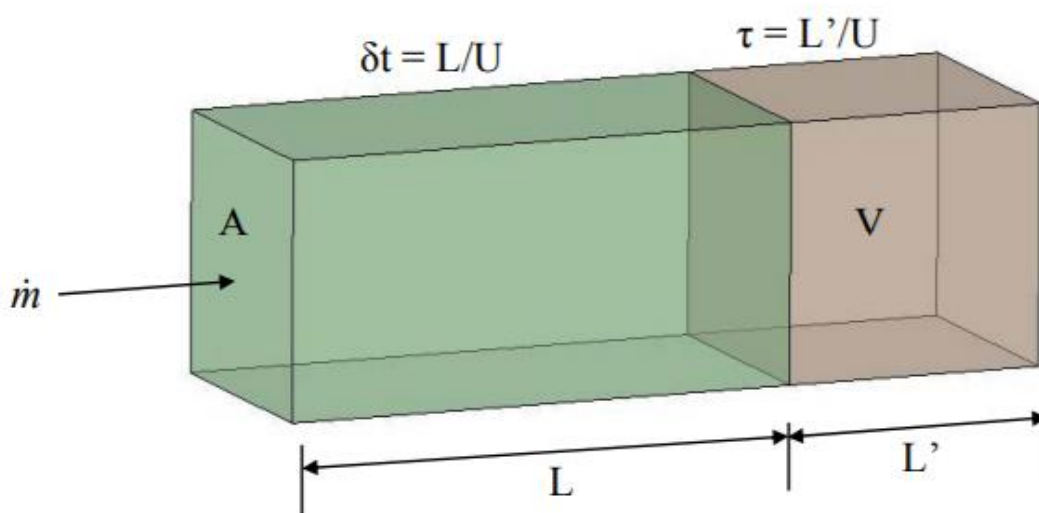
Σε αυτή την παράγραφο περιγράφονται τα μοντέλα ανίχνευσης καπνού με βάση το FDS Manual που χρησιμοποιεί το λογισμικό PyroSim

Η ανίχνευση του καπνού μοντελοποιείται στα FDS (Fire Dynamics Simulations) με βάση δύο μοντέλα, το μοντέλο του Heskestad (1975) και το μοντέλο του Cleary (2000). Τα δύο αυτά μοντέλα πέρα από τον υπολογισμό του χρόνου που απαιτείται ώστε ο καπνός να προκαλέσει ένα ποσοστό κάλυψης ανά μέτρο σε κάποιο σημείο της οροφής, υπολογίζουν την πρόσθετη καθυστέρηση του καπνού ώσου να εισέλθει στο θάλαμο του ανιχνευτή.

Το μοντέλο του Heskestad (1975) προσδιορίζει την καθυστέρηση του καπνού μέχρι να εισέλθει στο θάλαμο του ανιχνευτή. Ο Heskestad εκτίμησε αυτή την χρονική καθυστέρηση ως το λόγο L/U , όπου L ήταν το επιπρόσθετο ισοδύναμο μήκος που θα πρέπει να διανύσει ο καπνός προκειμένου να φτάσει το θάλαμο του ανιχνευτή διασχίζοντας τον με μία ταχύτητα U . Έτσι, προσδιορίζεται η χρονική καθυστέρηση $\tau=L/U$.

Στη συνέχεια, το μοντέλο αυτό επεκτάθηκε στο μοντέλο του Cleary (2000) σύμφωνα με το οποίο λαμβάνεται υπόψη η χρονική καθυστέρηση λόγω εισχώρησης του καπνού στο θάλαμο ανίχνευσης δt , καθώς και η χρονική καθυστέρηση της ανάμιξης του καπνού στο εσωτερικό του αισθητηρίου τ . Οι δύο αυτές παράμετροι είναι συνάρτηση της παροχής μάζας του καπνού \dot{m} που είναι ανάλογη με τον αριθμό Reynolds. Σύμφωνα με το μοντέλο του Cleary (2000) η παροχή του καπνού στον ανιχνευτή προκαλείται από την πτώση πίεσης κατά την εισχώρηση του καπνού στο εσωτερικό της συσκευής. Ο καπνός θεωρείται ότι κινείται μέσα σε αγωγό διατομής A .

Προκειμένου να γίνει πιο κατανοητό το φαινόμενο, στην εικόνα 5 παρουσιάζεται σχηματική αναπαράσταση της πορείας του καπνού προς τον ανιχνευτή.



Εικόνα 5. Απλοποιημένο μοντέλο ροής του καπνού προς τον ανιχνευτή, διακρίνεται η παροχή μάζας \dot{m} , ο όγκος V του θαλάμου του ανιχνευτή, η ισοδύναμη αντίσταση στην είσοδο του ανιχνευτή εκφρασμένη σαν πρόσθετο μήκος L (NIST 2007)

Ο αριθμός Reynolds ορίζεται ως :

$$Re = \frac{Lu}{\nu}$$

Με ν την κινηματική συνεκτικότητα του καπνού και L το χαρακτηριστικό μήκος που αναφέρθηκε ανωτέρω.

Επίσης η παροχή μάζας του καπνού είναι $\dot{m} = Au\rho$, όπου ρ η πυκνότητα του καπνού και u η ταχύτητα του.

Αποδεικνύεται ότι η καθυστέρηση εισόδου του καπνού στο θάλαμο ανίχνευσης δίνεται από τη σχέση:

$$\delta t = \frac{LA\rho}{\dot{m}} = Lu^{-1} \approx a_1 u^{-\beta_1} \quad [6]$$

Ακόμη, σύμφωνα με το μοντέλο Cleary η καθυστέρηση εισόδου του καπνού δεν είναι αποκλειστικά ανάλογη της αντίστροφης τιμής της ταχύτητας. Υπάρχει και ο επιπλέον χρόνος ανάμιξης του καπνού εξωτερικά και εσωτερικά του ανιχνευτή που ορίζεται ως το λόγο της παροχής μάζας του καπνού εκτός του θαλάμου του ανιχνευτή προς την παροχή μάζας του καπνού εντός του θαλάμου.

$$\tau = \frac{\rho V}{\dot{m}} = L'u^{-1} = a_2 u^{-\beta_2} \quad [7]$$

Οι συντελεστές $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2$ των εξισώσεων [6] και [7] είναι σταθεροί όροι που αφορούν τη γεωμετρία του ανιχνευτή

Όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα η παροχή του καπνού καθώς διασχίζει την απόσταση L θα πρέπει να είναι ίση με την παροχή μάζας του καπνού εντός του θαλάμου ανίχνευσης (εξίσωση συνέχειας) .

Θεωρώντας Y_o το ποσοστό της μάζας του καπνού που βρίσκεται εντός του θαλάμου και Y_e το ποσοστό της μάζας του καπνού εκτός του θαλάμου η εξίσωση συνέχειας γράφεται :

$$\frac{\rho V \partial Y_o}{\partial t} = m \{ Y_e(t - \delta t) - Y_o(t) \} \text{ για } t > \delta t$$

Και [8]

$$\frac{\partial Y_o}{\partial t} = 0 \text{ για } t < \delta t$$

Εάν υποθεθεί ότι το ποσοστό μάζας καπνού εντός του θαλάμου είναι μηδέν , τότε η λύση της διαφορικής εξίσωσης (3) δίνει το ποσοστό μάζας εκτός του καπνού :

$$Y_o = \exp \left(- \int_0^1 \frac{1}{\tau(t')} dt' \{ \exp \left(\int_0^1 \frac{1}{\tau(t'')} dt'' \right) Y_e(t' - \delta t) \} \right) \quad [9]$$

Όπου $t' = t/\tau$ και $dt' = dt/\tau$.

Στη συνέχεια το ποσοστό μάζας του καπνού εντός του θαλάμου $Y_o(t)$ μπορεί να μετατραπεί σε κάλυψη καπνού ανά μέτρο (ή αλλιώς σε οπτική πυκνότητα καπνού-obscuration per meter). Η οπτική πυκνότητα του καπνού OD ορίζεται ως :

$$OD = - \ln \left(\frac{I}{I_0} \right) = k_m \rho Y_s L_p \quad [10]$$

Το ποσοστό κάλυψης καπνού OPM (obscuration percentage per meter) ανά μέτρο δίνεται από τη σχέση :

$$OPM = \left(1 - \frac{l}{l_0}\right) * 100 = 100(1 - \exp(-k_m \rho Y_s)) [11]$$

Όπου ο όρος $-k_m \rho Y_s$ είναι ο συντελεστής απώλειας μάζας κατά την καύση.

Έτσι, η κάλυψη καπνού (%/m) εκτός και εντός του θαλάμου του ανιχνευτή μπορεί να υπολογιστεί τελικά από τις σχέσεις:

$$OPM_e(t) = (1 - \exp(-k_m \rho Y_e(t))) * 100 [12]$$

$$OPM_o(t) = (1 - \exp(-k_m \rho Y_o(t))) * 100 [13]$$

Το πρόγραμμα PyroSim που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη απόκρισης των συστημάτων ανίχνευσης καπνού, βασίζεται στα αποτελέσματα του στο παραπάνω μοντέλο. Οι προτεινόμενες τιμές $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2$ και L δίνονται από τον πίνακα 8 (τα μεγέθη $\alpha_e, \beta_e, \alpha_c, \beta_c$ αντιστοιχούν στα $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2$).

Πίνακας 8. Προτεινόμενες τιμές των παραμέτρων του μοντέλου Cleary (FDS manual)

Detector	α_e	β_e	α_c, L	β_c
Cleary Ionization I1	2.5	-0.7	0.8	-0.9
Cleary Ionization I2	1.8	-1.1	1.0	-0.8
Cleary Photoelectric P1	1.8	-1.0	1.0	-0.8
Cleary Photoelectric P2	1.8	-0.8	0.8	-0.8
Heskestad Ionization	—	—	1.8	—

8.3 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:

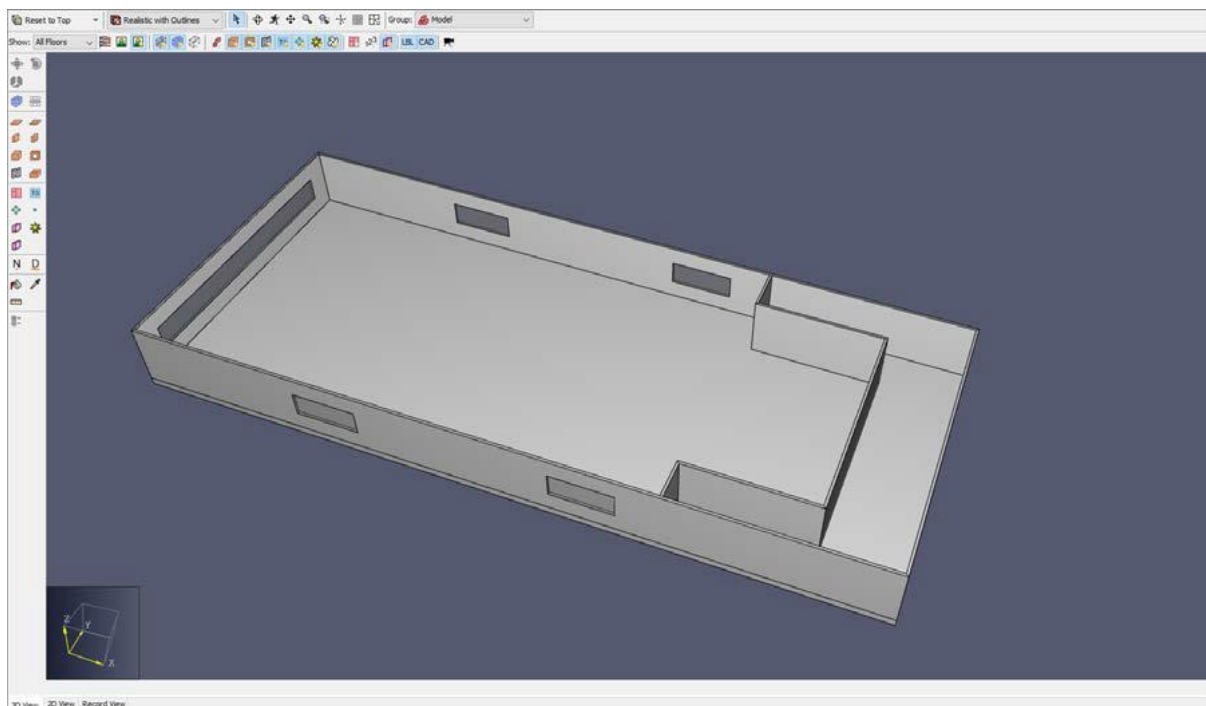
- Εισαγωγή CAD αρχείων για την δημιουργία και διαχείριση πολύπλοκων μοντέλων
- 2D και 3D γεωμετρικά σχεδιαστικά εργαλεία
- Ενσωματωμένη παράλληλη επεξεργασία
- Μετρικό και Αγγλικό σύστημα μονάδων
- Εργαλεία για την διαχείριση πολλών meshes
- HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) συστήματα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

8.4 Μοντέλο και σενάρια προσομοιώσεων

8.4.1 Μοντέλο καταστρώματος

Πριν παρουσιαστούν οι προσομοιώσεις στο σύνολο τους, θεωρήθηκε σκόπιμο να παρουσιαστούν αναλυτικά το μοντέλο που κατασκευάστηκε από τον Ν. Παγώνη (2020), στα πλαίσια της διπλωματικής του εργασίας, και χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία για τον προσδιορισμό της απόκρισης των συστημάτων πυρανίχνευσης. Το πλήρες μοντέλο αφορά ένα τυπικό κατάστρωμα φορτηγών σε ένα RoPax πλοίο και έχει διαστάσεις 150 m μήκος x 24 m πλάτος x 5 m ύψος. Ωστόσο, για τον βέλτιστο σχεδιασμό, με στόχο την ακρίβεια των αποτελεσμάτων και την πραγματοποίηση αριθμού πειραμάτων για διαφορετικές περιπτώσεις, χρησιμοποιήθηκε μόνο ένα μέρος του καταστρώματος για τη μελέτη.

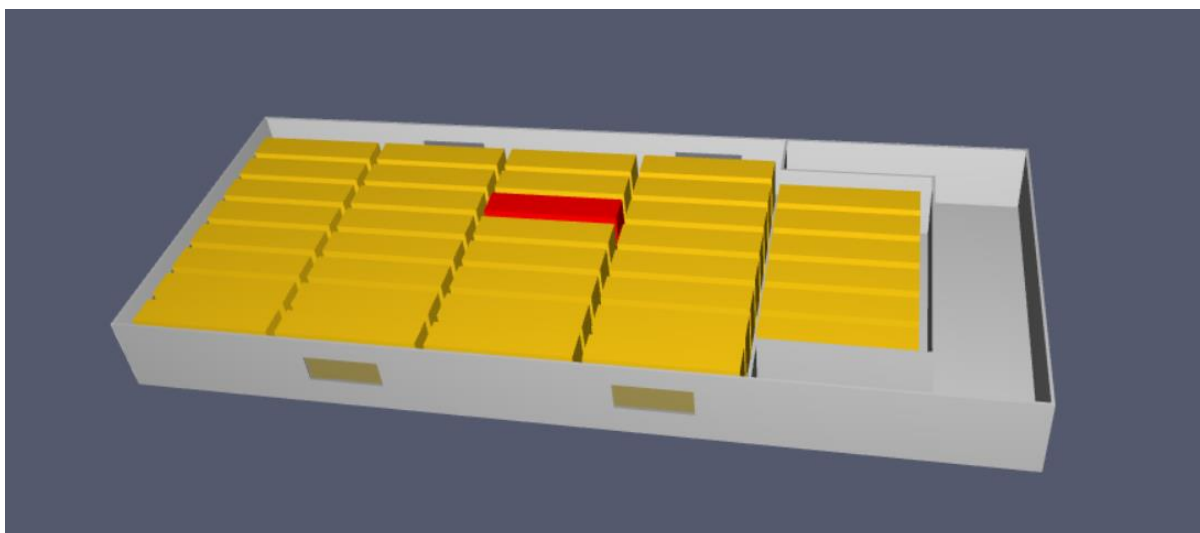


Εικόνα 6. Η γεωμετρία του χώρου που χρησιμοποιήθηκε.

Η γεωμετρία που χρησιμοποιήθηκε για τους υπολογισμούς είναι το πρωραίο μέρος του καταστρώματος με μήκος 58.2m, πλάτος 24m και 5m ύψος (εικόνα 6). Σε κάθε πλευρά υπάρχουν ανοίγματα με διαστάσεις 5m μήκος και 2m ύψος. Σε ένα αντίστοιχο ανοιχτό κατάστρωμα RoPax πλοίου στην πρυμναία πλευρά δεν θα υπήρχε τοίχος. Στο υπό μελέτη μοντέλο χρησιμοποιήθηκε τοίχος με διαστάσεις ανοίγματος 20m πλάτος και 2 m ύψος.

8.4.1.1 Φορτηγά

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

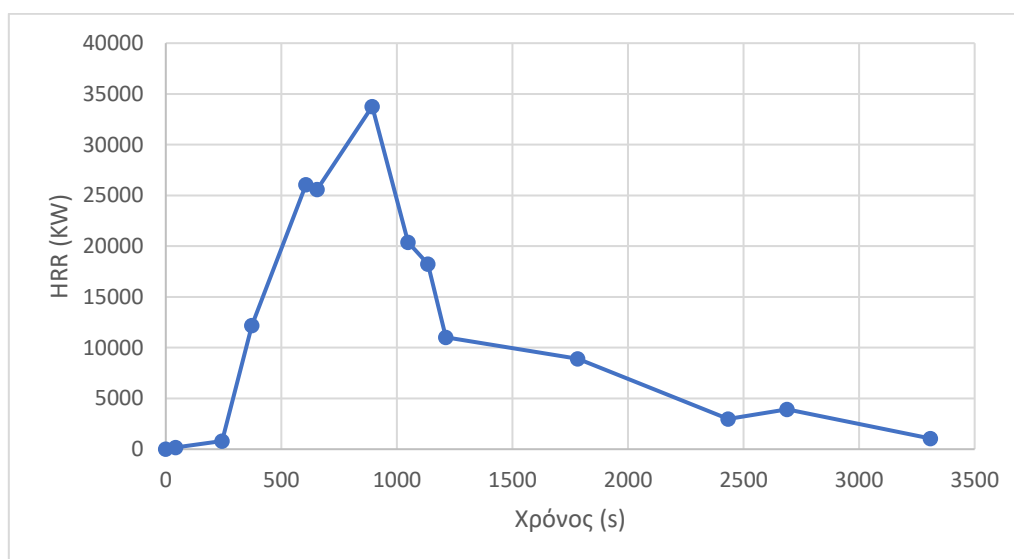


Εικόνα 7. Διαρρύθμιση καταστρώματος με φορτηγά.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 7 το κατάστρωμα είναι πλήρως φορτωμένο, με κόκκινο χρώμα διακρίνεται το φορτηγό-πηγή, δηλαδή το φορτηγό στο οποίο πρόκειται να ξεκινήσει η πυρκαγιά. Τα υπόλοιπα φορτηγά είναι τα κουτιά με κίτρινο χρώμα και αποτελούν την καύσιμη ύλη της πυρκαγιάς.

8.4.1.2 Μοντελοποίηση ρυθμού ανάπτυξης πυρκαγιάς-HRR

Από πείραμα που έχει πραγματοποιηθεί (δες στο Breuillard et al. 2012), βρέθηκε ότι τα 35 MW είναι η μέγιστη ισχύς που παράγεται από μια πυρκαγιά σε ένα φορτηγό, με συνολικό φορτίο πυρκαγιάς 33 GJ (εμβადόν κάτω από την καμπύλη). Το διάγραμμα 7, σύμφωνα με την παραπάνω αναφορά, αποτυπώνει την χρονική ιστορία του ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας, που προέκυψε για ένα φορτηγό σε ανοιχτό χώρο.



Διάγραμμα 7. Ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας για φορτηγό (Breuillard, A. et al., 2012).

Οι επιφάνειες του φορτηγού-πηγή ορίστηκαν ως burner επιφάνειες με ανάλογα χαρακτηριστικά με σκοπό την επίτευξη της παραπάνω χρονικής ιστορίας του HRR. Οι επιφάνειες των υπολοίπων φορτηγών ορίστηκε να αναφλέγονται στους 500°C, θερμοκρασία κατά την οποία αναφλέγονται τα πλαστικά μέρη των φορτηγών (προφυλακτήρες, καλύμματα κλπ).

Για τη μελέτη της απόκρισης των συστημάτων πυρανίχνευσης στις προσομοιώσεις που ακολουθούν εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις για τον ρυθμό ανάπτυξης πυρκαγιάς:

- Πυρκαγιά της οποίας ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας (HRR) προσδιορίστηκε με βάση την καμπύλη του HRR από πείραμα σε φορητό (Διάγραμμα 7)
- Αργή (slow) “t-squared” πυρκαγιά ($\alpha=0.00293 \text{ KW/s}^2$).

Είναι προφανές ότι τα πειραματικά δεδομένα για το HRR είναι πιο ρεαλιστικά από τα δεδομένα μιας “t-squared” πυρκαγιάς. Έχει όμως ενδιαφέρον να εξεταστεί και το θεωρητικό μοντέλο μιας πυρκαγιάς που αναπτύσσεται με αργό ρυθμό (slow-smouldering fire), καθώς αναμένεται οι χρόνοι ανίχνευσης της πυρκαγιάς σ’ αυτή την περίπτωση να είναι μεγαλύτεροι. Επίσης, υπάρχει η πιθανότητα η έναρξη της πυρκαγιάς να εντοπιστεί σε κάποιο εξάρτημα του φορητού (π.χ κάποιο καλώδιο της ψυκτικής μονάδας που ενδεχομένως να διαθέτει) που καίγεται με αργό ρυθμό. Αυτή η περίπτωση δεν καλύπτεται από τα πειραματικά δεδομένα για ένα φορητό που καίγεται στην ολότητα του.

Ορισμός HRR με βάση τα πειραματικά δεδομένα

Στην εικόνα 8 φαίνεται ο ορισμός του HRR σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα.

The screenshot shows the 'Edit Surfaces' window with the 'Fire Ignition' surface selected. The 'Heat Release' tab is active, showing the following settings:

- Surface ID: Fire Ignition
- Description: (empty)
- Color: Red
- Surface Type: Burner
- Heat Release Rate Per Area (HRRPUA): 295.5 kW/m²
- Mass Loss Rate: 0.0 kg/(m²·s)
- Ramp-Up Time: Custom
- Extinguishing Coefficient: 0.0 m²/(kg·s)

The 'Ramping Function Values' dialog box is open, showing a table of Time (s) and Fraction values:

Time (s)	Fraction	
1	42,6	4,85714E-3
2	243,36	0,022571
3	372,78	0,348171
4	606,0	0,744343
5	654,54	0,731257
6	892,98	0,964829
7	1049,04	0,582771
8	1133,88	0,521457
9	1211,82	0,315057
10	1783,14	0,254914
11	2432,88	0,085057
12	2688,42	0,112057
13	3308,28	0,030057
*		

Εικόνα 8. Ορισμός χαρακτηριστικών επιφάνειας burner για το φορητό-πηγή, χρησιμοποιήθηκε ένας custom HRR για την προσομοίωση “Πειραματική πυρκαγιά”.

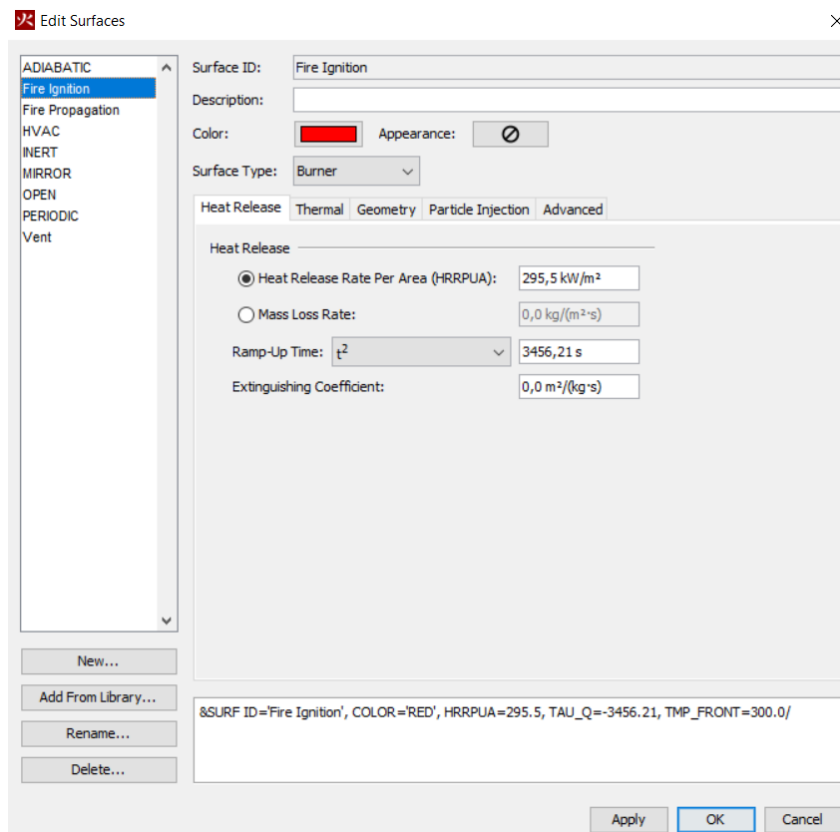
Τα υπόλοιπα φορητά ορίστηκαν να έχουν τις ίδιες ιδιότητες.

Ορισμός HRR για αργή πυρκαγιά

Στην περίπτωση της πυρκαγιάς που αναπτύσσεται με αργό ρυθμό χρησιμοποιήθηκε καμπύλη HRR τετραγωνικής μορφής. Για αργή πυρκαγιά ο συντελεστής του ρυθμού ανάπτυξης α λαμβάνει την τιμή $\alpha=0.00293 \text{ kW/s}^2$.

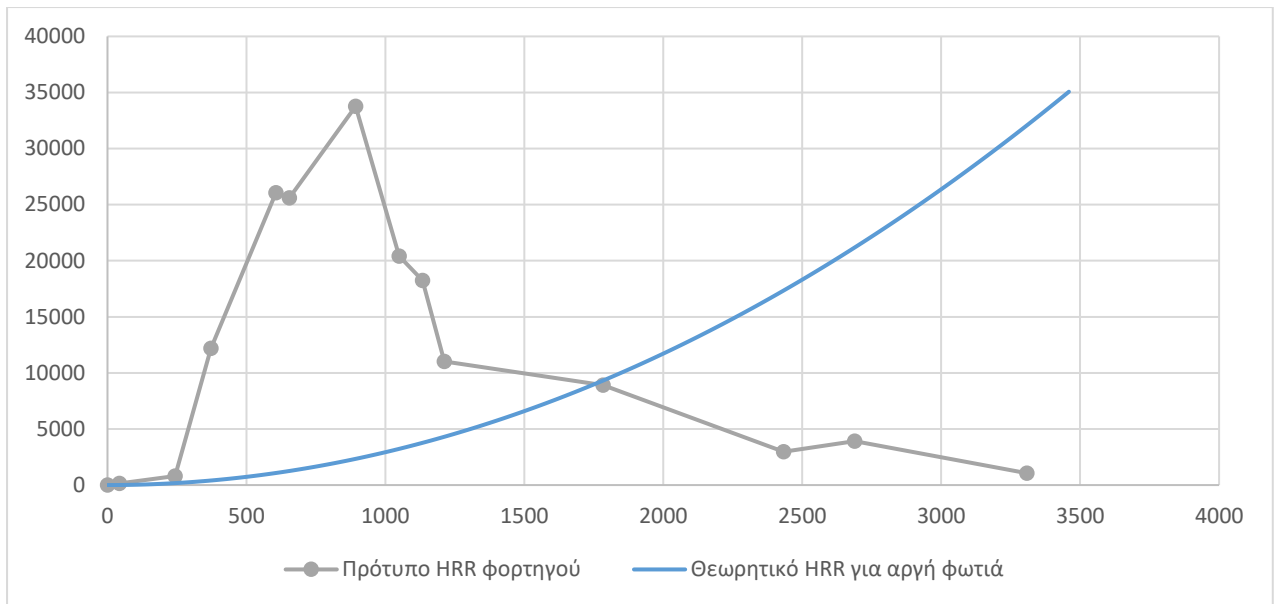
Θεωρήθηκε ότι η μέγιστη τιμή του HRR ισούται με **35 MW** και απαιτείται χρόνος **3456,21sec** για την επίτευξη του.

Τα παραπάνω στοιχεία μοντελοποιήθηκαν στο PyroSim για την επιφάνεια Burner του φορτηγού-πηγή (εικόνα 9).



Εικόνα 9. Ορισμός επιφάνειας του φορτηγού πηγή στο σενάριο της πυρκαγιάς που αναπτύσσεται με αργό ρυθμό.

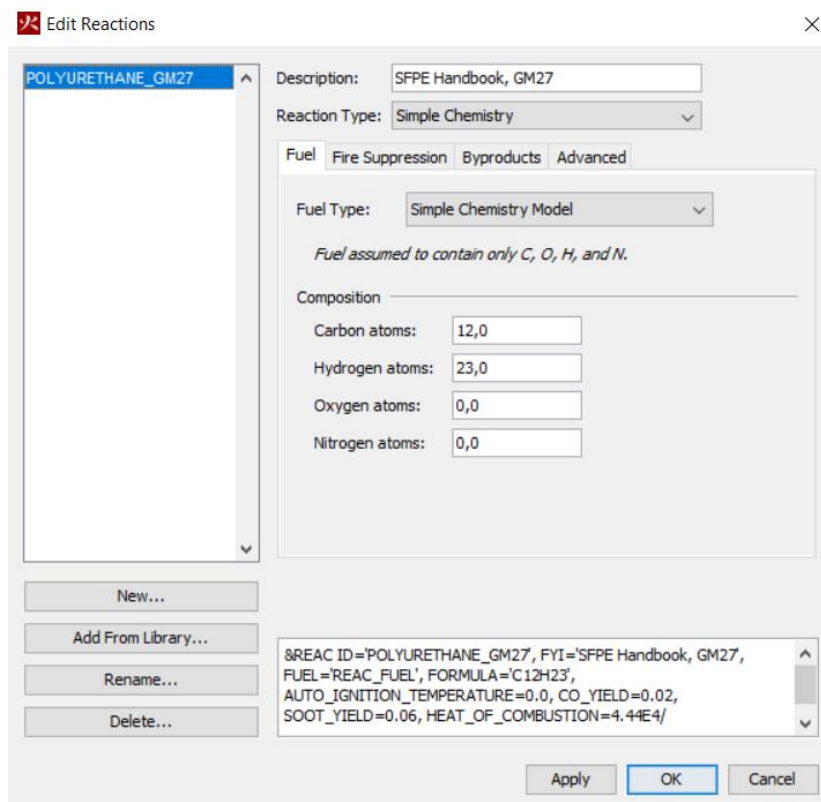
Στο διάγραμμα 8 φαίνεται η αναπαράσταση των HRR που χρησιμοποιήθηκαν για να μοντελοποιήσουν το ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας, καθώς και τα HRR που προέκυψαν από το PyroSim για τις αντίστοιχες περιπτώσεις:



Διάγραμμα 8. Αναπαράσταση των HRR που χρησιμοποιήθηκαν για να μοντελοποιησουν το ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας της πυρκαγιάς.

8.4.1.3 Αντίδραση και soot yield

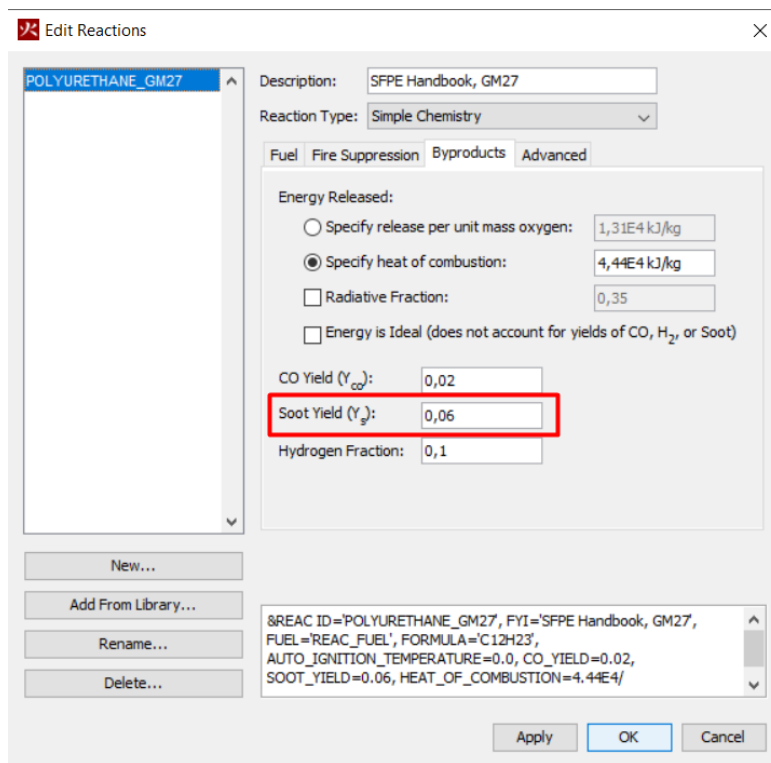
Το PyroSim διαθέτει βιβλιοθήκη με αντιδράσεις που μοντελοποιούν την καύση. Στο συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε η αντίδραση καύσης πολυουρεθάνης, βασικό υλικό των πλαστικών καλυμμάτων των φορτηγών που καίγονται. Ακόμη, ως σύσταση καυσίμου χρησιμοποιήθηκε η σύσταση του Diesel, του καυσίμου δηλαδή που βρίσκεται στις δεξαμενές των φορτηγών. Στην εικόνα 10 παρουσιάζεται ο ορισμός της αντίδρασης της καύσης στο PyroSim.



Εικόνα 10. Μοντελοποίηση αντίδρασης στο PyroSim.

Soot Yield

Ακόμη ένας βασικός παράγοντας που πρόκειται να καθορίσει το χρόνο ανίχνευσης πυρκαγιάς είναι ο καπνός που παράγεται ανά 1 gr καύσιμης ύλης (**Soot yield**). Αναμένονται μεγαλύτεροι χρόνοι ανίχνευσης καπνού για μικρή τιμή του soot yield καθώς ο καπνός που παράγεται είναι αραιότερος. Για καύση πολυουρεθάνης το μέγεθος αυτό λαμβάνει τιμές από 0.02 έως 0.1. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα εξεταστούν δύο περιπτώσεις: για soot yield **0.02** και **0.06** (εικόνα 11).



Εικόνα 11. Ορισμός soot yield στο PyroSim.

8.4.1.4 Ανιχνευτές

Στο μοντέλο εξετάστηκε η απόκριση του συστήματος ανίχνευσης θερμότητας και του συστήματος ανίχνευσης καπνού. Τα δύο συστήματα τοποθετήθηκαν ταυτόχρονα σε κατάλληλες θέσεις ικανοποιώντας τους κανονισμούς του FSS code. Θα εξεταστεί η απόκριση του ζεύγους των ανιχνευτών (θερμοκρασία για τους ανιχνευτές θερμότητας και κάλυψη καπνού για τους ανιχνευτές καπνού) που ενεργοποιήθηκαν πρώτοι σε κάθε περίπτωση προκειμένου να αξιολογηθεί επιπλέον και η εφεδρική ανίχνευση σε περίπτωση κάποιου σφάλματος.

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3.3.7, ο FSS code θέτει περιορισμούς στις θέσεις των ανιχνευτών. Συγκεκριμένα, για τους ανιχνευτές θερμότητας προδιαγράφονται τα εξής :

- Κάθε ανιχνευτής δεν πρέπει να καλύπτει επιφάνεια δαπέδου μεγαλύτερη των 37m².
- Κάθε ανιχνευτής θερμότητας θα πρέπει να απέχει το πολύ 9m από τον γειτονικό του.
- Οι ανιχνευτές θα πρέπει να τοποθετούνται σε απόσταση μεγαλύτερη των 0.5m από τοίχους.

Όσον αφορά τους ανιχνευτές καπνού θα πρέπει:

- Κάθε ανιχνευτής δεν πρέπει να καλύπτει επιφάνεια δαπέδου μεγαλύτερη των 74m².
- Κάθε ανιχνευτής καπνού θα πρέπει να απέχει από τον γειτονικό του το πολύ 11m
- Κάθε ανιχνευτής θα πρέπει να τοποθετείται σε απόσταση μεγαλύτερη των 0.5m από τοίχους.

- Κάθε ανιχνευτής δεν θα πρέπει να ενεργοποιείται σε ποσοστό κάλυψης καπνού μικρότερο από **2%/m** ή μεγαλύτερο από **12.5%/m**

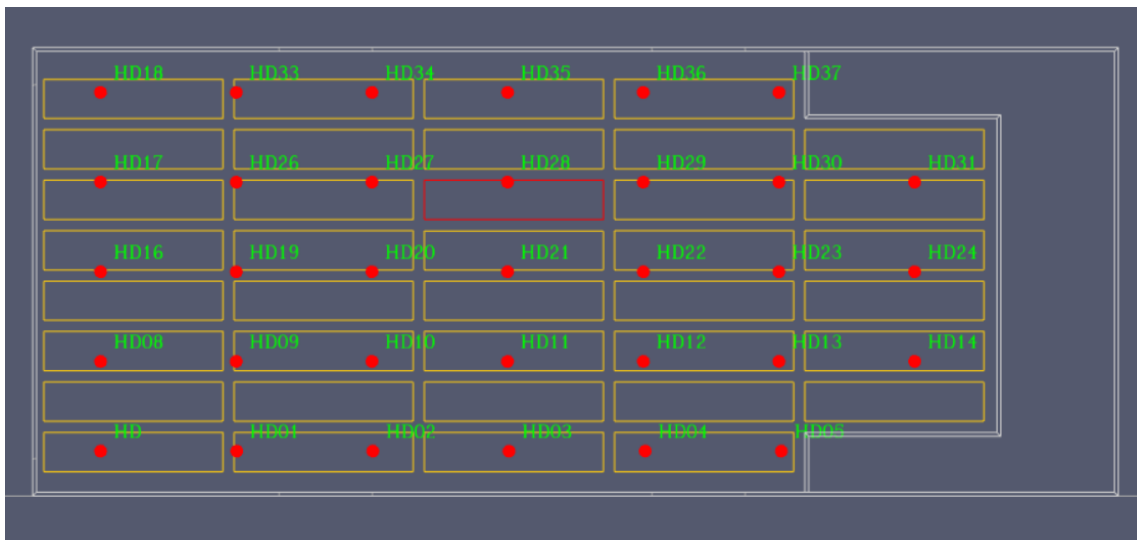
Ανιχνευτές θερμότητας

Το υπό μελέτη κατάστρωμα έχει συνολικό εμβαδό $58.2 \times 24 = 1324.8 \text{ m}^2$. Προκειμένου να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις του FSS code για το κάθε σύστημα ανίχνευσης θα πρέπει:

- Να υπάρχουν τουλάχιστον 36 ανιχνευτές θερμότητας ($1324.8/37=35.8$) και 18 ανιχνευτές καπνού ($1324.8/74=17.9$).
- Θα πρέπει επίσης η μέγιστη απόσταση μεταξύ ανιχνευτών να είναι μικρότερη των 9 μέτρων για τους ανιχνευτές θερμότητας και μικρότερη των 11 μέτρων για ανιχνευτές καπνού.

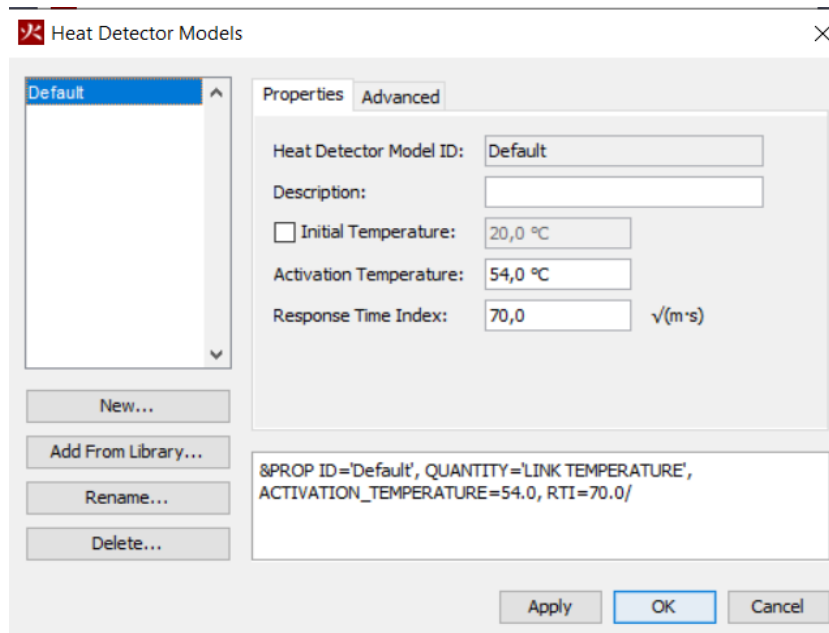
Στο υπό μελέτη μοντέλο για λόγους ασφαλείας τοποθετήθηκαν 40 ανιχνευτές θερμότητας και 21 ανιχνευτές καπνού. Στη συνέχεια, αφαιρέθηκαν ανιχνευτές από την περιοχή του καταστρώματος που δεν υπήρχαν φορητά.

Αφαιρώντας τους ανιχνευτές που είναι εκτός περιοχής του γκαράζ των φορητών προκύπτει η τελική διάταξη των ανιχνευτών θερμότητας (εικόνα 12).



Εικόνα 12. Τελική διάταξη ανιχνευτών θερμότητας.

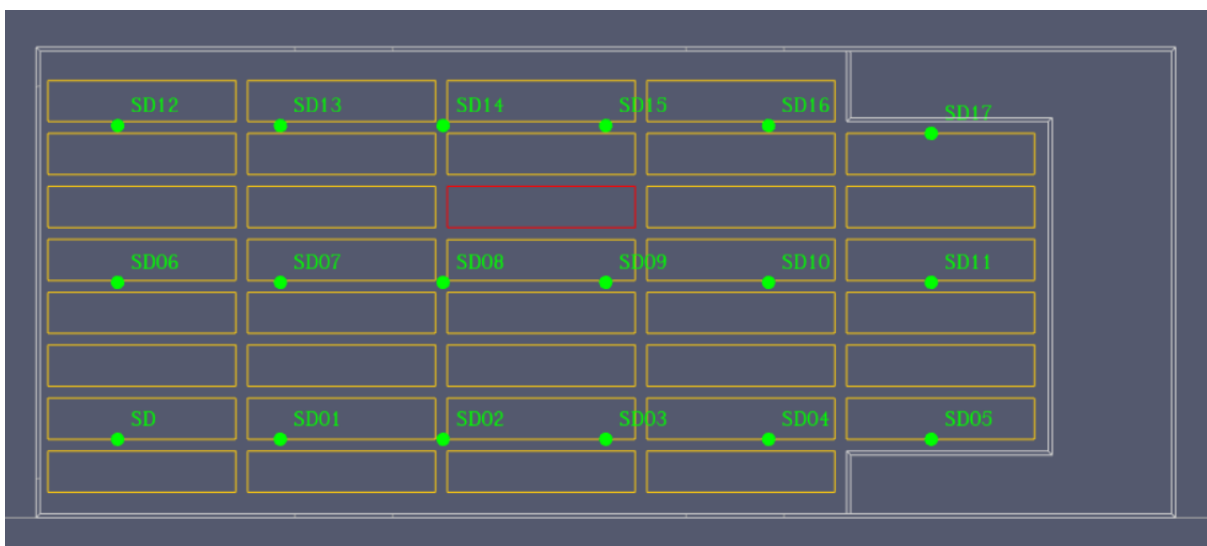
Καθ' όλη τη διάρκεια των προσομοιώσεων, οι ανιχνευτές θερμότητας ήταν ρυθμισμένοι να ενεργοποιούνται όταν "αντιληφθούν" **θερμοκρασία 54°C** και ο δείκτης **RTI** (Response Time Index) έλαβε την τιμή **70(ms)^{1/2}** (εικόνα 13).



Εικόνα 13. Ρύθμιση ανιχνευτών θερμότητας.

Ανιχνευτές καπνού

Στο μοντέλο τοποθετήθηκαν 21 ανιχνευτές καπνού στην οροφή του καταστρώματος (z=4.9m). Προκειμένου να καταναμηθούν ομοιόμορφα το κατάστρωμα χωρίστηκε σε 3 οριζόντιες και 7 κατακόρυφες ζώνες. Έτσι, κάθε ανιχνευτής ελέγχει ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο με διαστάσεις 8.314x8 m, καλύπτοντας τελικά, χωρίς εμβαδού 66.512 m². Όσον αφορά την απόσταση μεταξύ κέντρων των ανιχνευτών, κάθε ανιχνευτής απέχει από τον οριζόντιο και κάθετο γειτονικό του 8.314 m και 8 m αντίστοιχα και έτσι τελικά ικανοποιούνται οι απαιτήσεις του FSS Code και για τα δύο συστήματα πυρανίχνευσης. Στη συνέχεια, όπως και στην περίπτωση των ανιχνευτών θερμότητας, αφαιρέθηκαν οι ανιχνευτές καπνού που ήταν τοποθετημένοι εκτός του του γκαράζ φορτηγών και έτσι, όπως φαίνεται και στην εικόνα 14, χρησιμοποιήθηκαν τελικά **18 ανιχνευτές καπνού**.

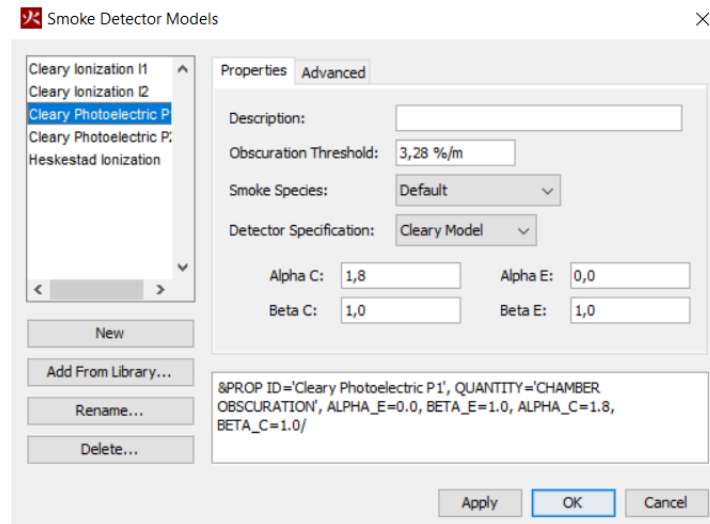


Εικόνα 14. Τελική διάταξη ανιχνευτών καπνού.

Στις προσομοιώσεις που έγιναν, προκειμένου να ελεγχθεί η επίδραση της ευαισθησίας των ανιχνευτών στον χρόνο ανίχνευσης, έγιναν πειράματα με τους ανιχνευτές καπνού να ενεργοποιούνται όταν “αντιληφθούν” :

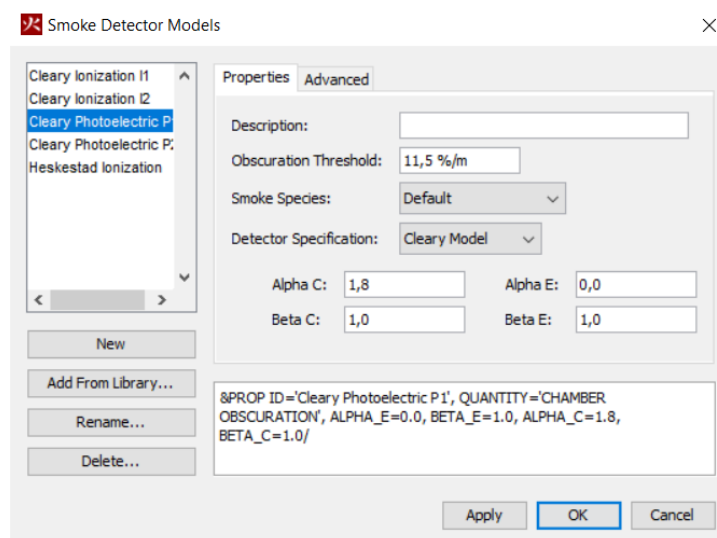
- κάλυψη καπνού (**Obscuration threshold**) **3.28%/m** (συνηθισμένη τιμή για ανιχνευτές καπνού)
- κάλυψη καπνού **11.5%/m**

Στην εικόνα 15 παρουσιάζεται ο ορισμός της ευαισθησίας των ανιχνευτών καπνού στο PyroSim.



Εικόνα 15. Ρύθμιση ανιχνευτή καπνού να ενεργοποιούνται για κάλυψη 3.28%/m

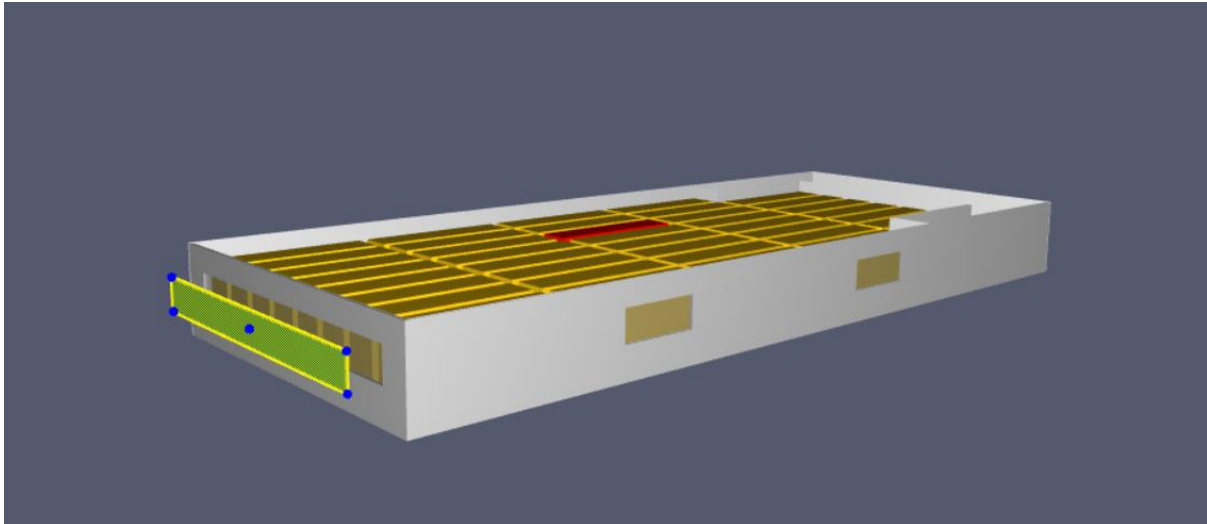
Το PyroSim δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει το είδος των ανιχνευτών καπνού που θα χρησιμοποιήσει (εικόνα 15). Στις προσομοιώσεις που θα ακολουθήσουν χρησιμοποιήθηκαν οι φωτοηλεκτρικοί (Photoelectric) ανιχνευτές οι οποίοι αποκρίνονται καλύτερα σε πυρκαγιές που αναπτύσσονται αργά χωρίς μεγάλες φλόγες. Τα σενάρια της πυρκαγιάς στα οποία έγιναν οι προσομοιώσεις είναι αργή και πειραματική πυρκαγιά (ο χαρακτηρισμός αργή αναφέρεται πάντα στο στάδιο της ανάπτυξης), επομένως οι φλόγες που θα παραχθούν δεν αναμένεται να είναι τόσο έντονες. Όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα 16, υπάρχουν και οι ανιχνευτές ιονισμού οι οποίοι όμως ανταποκρίνονται καλύτερα σε πυρκαγιές με έντονες φλόγες. Τέλος, όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, υπάρχουν δύο μαθηματικά μοντέλα, στα οποία βασίζεται το πρόγραμμα για να προσδιορίσει την απόκριση των ανιχνευτών: το Heskestad Ionization model και το Cleary model με παραμέτρους $\alpha_c, \beta_c, \alpha_e, \beta_e$.



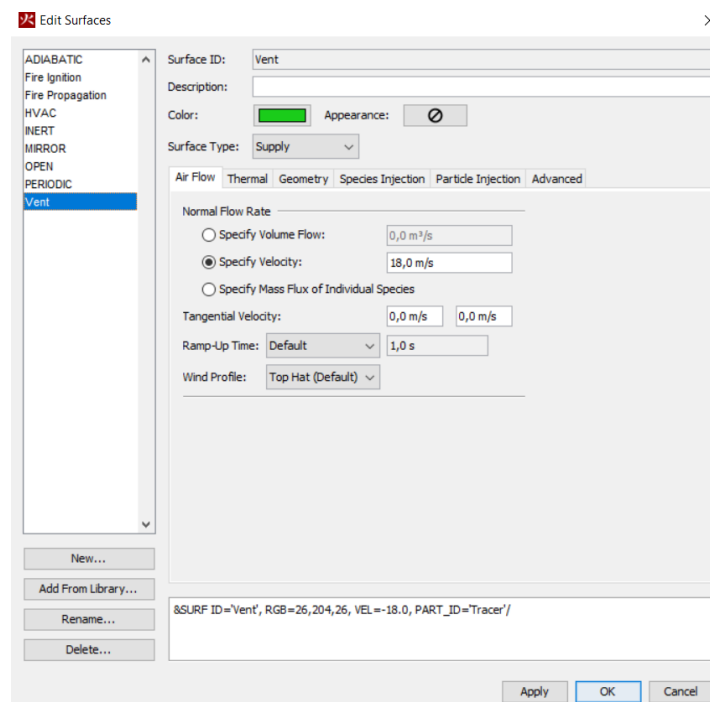
Εικόνα 16. Ρύθμιση ανιχνευτών καπνού να ενεργοποιούνται για κάλυψη 11.5%/m.

8.4.1.5 Άνεμος

Προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση του ανέμου στην ανίχνευση της πυρκαγιάς εξετάστηκε η περίπτωση χωρίς άνεμο και η περίπτωση παρουσίας ανέμου που εισέρχεται στο κατάστρωμα από το πρυμναίο άνοιγμα. Ο άνεμος μοντελοποιήθηκε από μία επιφάνεια Vent στο πρυμναίο μέρος του καταστρώματος (εικόνα 17) και είχε ταχύτητα 18m/s (35 kn) μια ταχύτητα που αντιστοιχεί σε 8 Beaufort. Στην εικόνα 18 φαίνεται ο ορισμός της ταχύτητας του ανέμου ο οποίος παρέχεται από επιφάνεια Vent.



Εικόνα 17. Ορισμός επιφάνειας vent για τη μοντελοποίηση του ανέμου.



Εικόνα 18. Χαρακτηριστικά της επιφάνειας vent.

8.5 Υπολογιστικές προσομοιώσεις

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που εκτελέστηκαν στο PyroSim. Υπολογίστηκε η απόκριση του κάθε συστήματος (θερμοκρασία και κάλυψη καπνού ανά μέτρο) συναρτήσει του χρόνου. Εξετάστηκε η απόκριση του ζεύγους των ανιχνευτών θερμότητας και καπνού που ενεργοποιήθηκε πρώτο. Ο λόγος για τον οποίο εξετάζεται η απόκριση των δύο ανιχνευτών ανά περίπτωση είναι, αφενός για να προσδιοριστεί η χρονική καθυστέρηση μεταξύ πρώτης και δεύτερης ανίχνευσης και αφετέρου να εκτιμηθεί η αποτελεσματικότητα εφεδρικής ανίχνευσης σε περίπτωση δυσλειτουργίας κάποιου ανιχνευτή. Για τον υπολογισμό της απόκρισης του συστήματος ανίχνευσης θερμότητας επιλύθηκαν από το πρόγραμμα μια σειρά εξισώσεων προκειμένου να προσδιοριστεί η θερμοκρασία στην περιοχή του ανιχνευτή θερμότητας λαμβάνοντας υπ' όψη τον δείκτη χρόνου απόκρισης (RTI). Επίσης, για το σύστημα ανίχνευσης καπνού, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Cleary (2000) όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Τα σενάρια που εξετάστηκαν χωρίστηκαν σε 4 ομάδες προσομοιώσεων ανάλογα με τη φόρτωση του καταστώματος, την παρουσία του ανέμου και το ρυθμό ανάπτυξης της πυρκαγιάς. Στην τελευταία ομάδα προσομοιώσεων εξετάστηκε η περίπτωση μιας λιγότερο πυκνής διάταξης ανιχνευτών μελετώντας επιπλέον και την επίδραση της ευαισθησίας των ανιχνευτών καπνού.

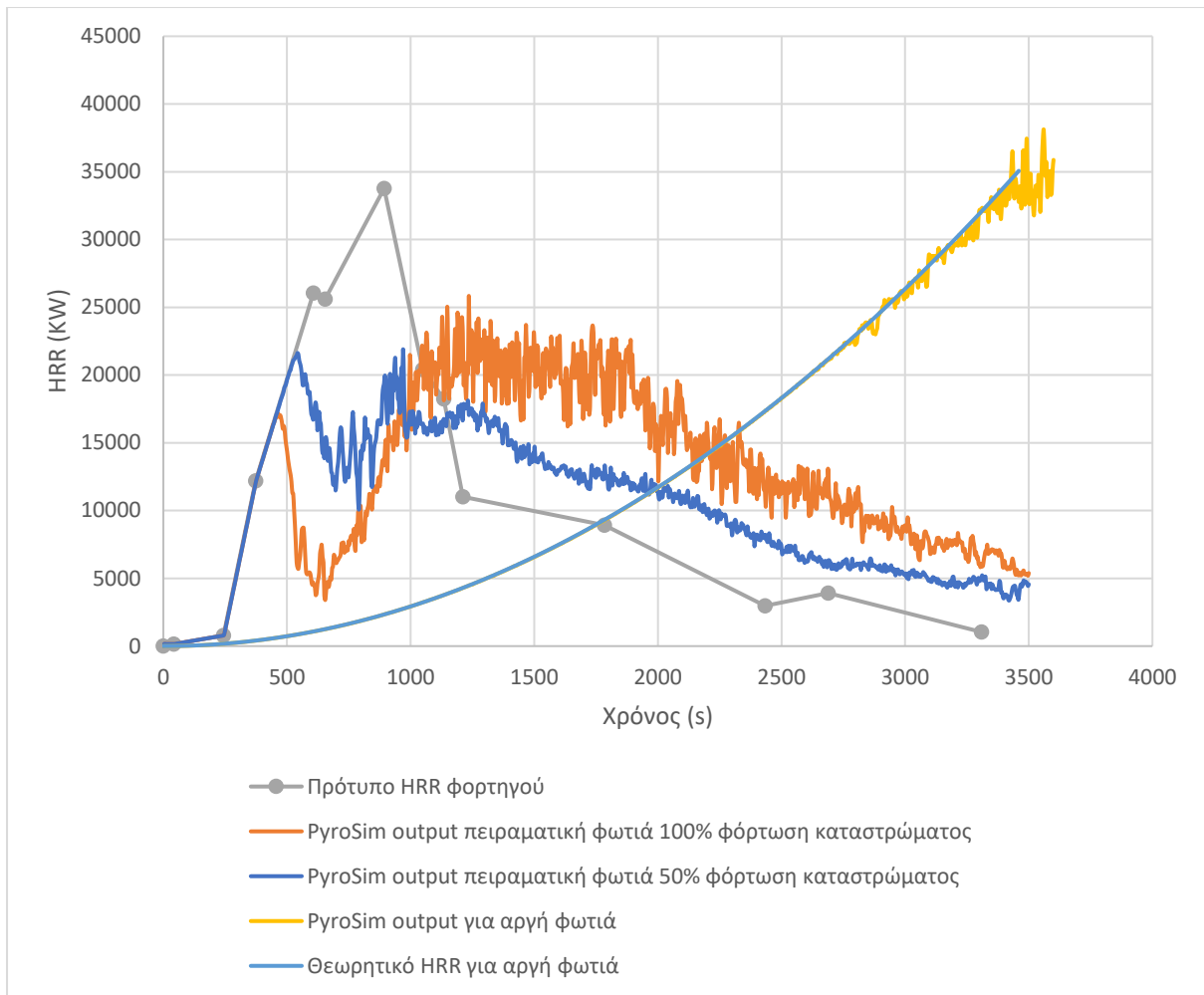
Στον πίνακα 9 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα σενάρια που εξετάστηκαν στο υπολογιστικό μέρος της παρούσας εργασίας:

Πίνακας 9. Σενάρια που εξετάστηκαν στις υπολογιστικές προσομοιώσεις.

Σενάριο	Ανάπτυξη πυρκαγιάς	Φόρτωση καταστώματος	Άνεμος	Soot yield
A1	Σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα	100%	Όχι	0.02
A2	Σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα	100%	Όχι	0.06
A3	Σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα	50%	Όχι	0.02
A4	Σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα	50%	Όχι	0.06
B1	Σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα	100%	Ναι	0.06
B2	Σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα	50%	Ναι	0.06
Γ1	Αργή	100%	Όχι	0.06
Γ2	Αργή	50%	Όχι	0.06
Δ (1.5 φορά λιγότεροι ανιχνευτές)	Αργή	50%	Όχι	0.06

Στο παράρτημα της παρούσας διπλωματικής εργασίας παρατίθενται τα διαγράμματα της απόκρισης των συστημάτων πυρανίχνευσης για κάθε ομάδα προσομοίωσης.

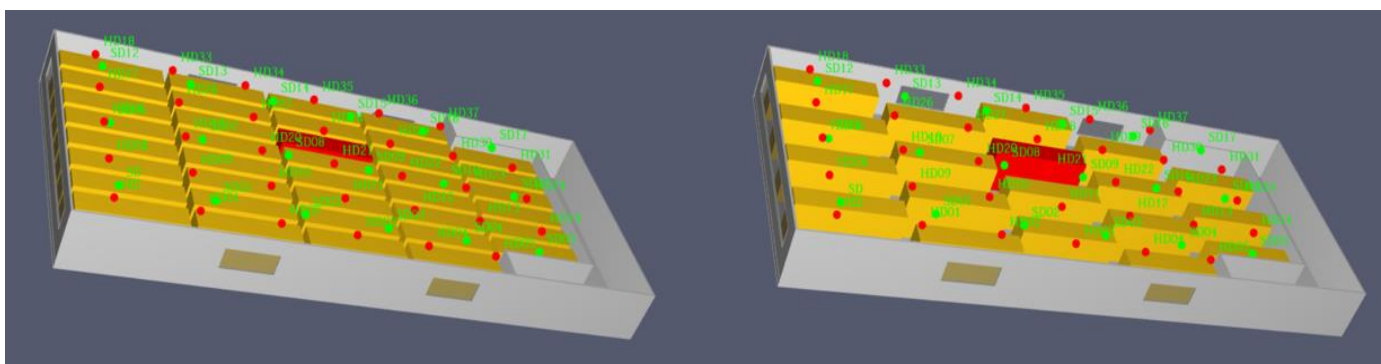
Οι καμπύλες του HRR που προέκυψαν από το PyroSim για πυρκαγιά που αναπτύσσεται με αργό ρυθμό και για την πυρκαγιά που αναπτύσσεται σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα φαίνονται στο διάγραμμα 9:



Διάγραμμα 9. Αναπαράσταση των HRR που χρησιμοποιήθηκαν για να μοντελοποιήσουν το ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας καθώς και τα HRR που υπολόγισε το PyroSim για τις αντίστοιχες περιπτώσεις. Παρατηρείται ότι η θεωρητική καμπύλη της αργής πυρκαγιάς είναι περίπου ίδια με εκείνη που προέκυψε από υπολογισμό στο PyroSim.

Α' ομάδα προσομοιώσεων: επίδραση soot yield και φόρτωσης καταστρώματος

Στην παρούσα ομάδα προσομοιώσεων εξετάστηκε η απόκριση του συστήματος ανίχνευσης για 50% και 100% φόρτωση καταστρώματος απουσία ανέμου (εικόνα 19).



Εικόνα 19. 100% και 50% φόρτωση καταστρώματος

Επίσης, εξετάστηκαν σενάρια για Soot Yield 0.02 και 0.06. Το HRR ορίστηκε στο PyroSim με βάση τα στοιχεία που προέκυψαν από το πείραμα που αναφέρθηκε στο παρόν κεφάλαιο.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εκτέλεση των προσομοιώσεων της Α' ομάδας φαίνονται στον πίνακα 10:

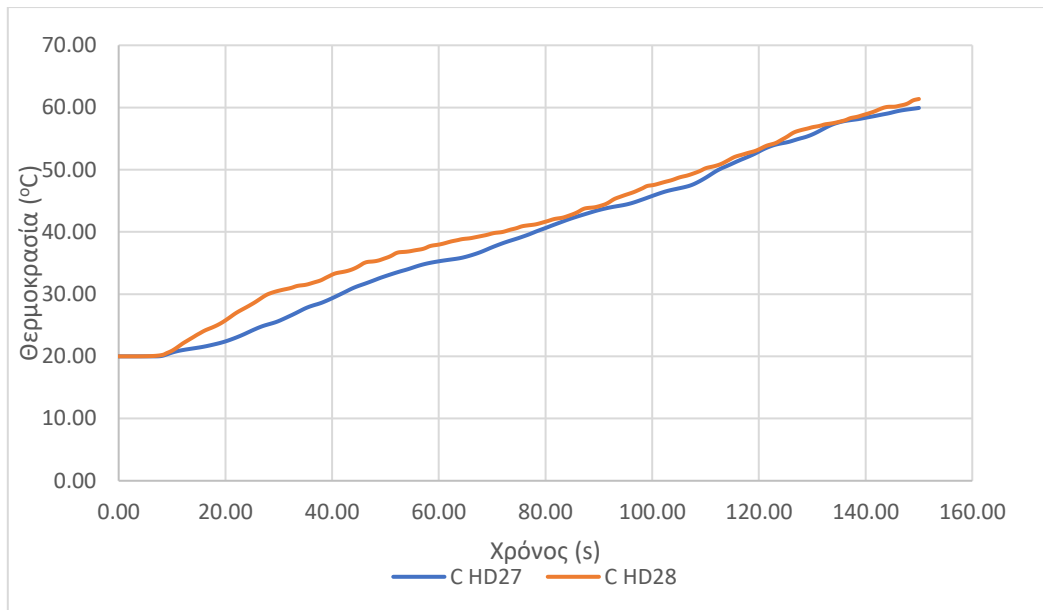
Πίνακας 10. Αποτελέσματα της Α' ομάδας προσομοιώσεων

Σενάρια				1 ^η	2 ^η	1 ^η	2 ^η	1 ^η	2 ^η
Ρυθμός ανάπτυξης πυρκαγιάς	Φόρτωση καταστρώματος	Soot yield	Άνεμος	ανίχνευση θερμότητας (s)	ανίχνευση θερμότητας (s)	ανίχνευση καπνού(s) (3,28%/m)	ανίχνευση καπνού(s) (3,28%/m)	ανίχνευση καπνού(s) (11,5%/m)	ανίχνευση καπνού(s) (11,5%/m)
Με βάση τα πειραματικά δεδομένα	100%	0.02	Όχι	122.13	123.00	11.00	11.36	118.12	123.17
Με βάση τα πειραματικά δεδομένα	100%	0.06	Όχι	119.31	126.48	7.96	8.17	16.09	17.01
Με βάση τα πειραματικά δεδομένα	50%	0.02	Όχι	144.09	198.93	24.43	67.68	201.25	205.28
Με βάση τα πειραματικά δεδομένα	50%	0.06	Όχι	104.30	178.44	7.49	8.18	64.95	69.07

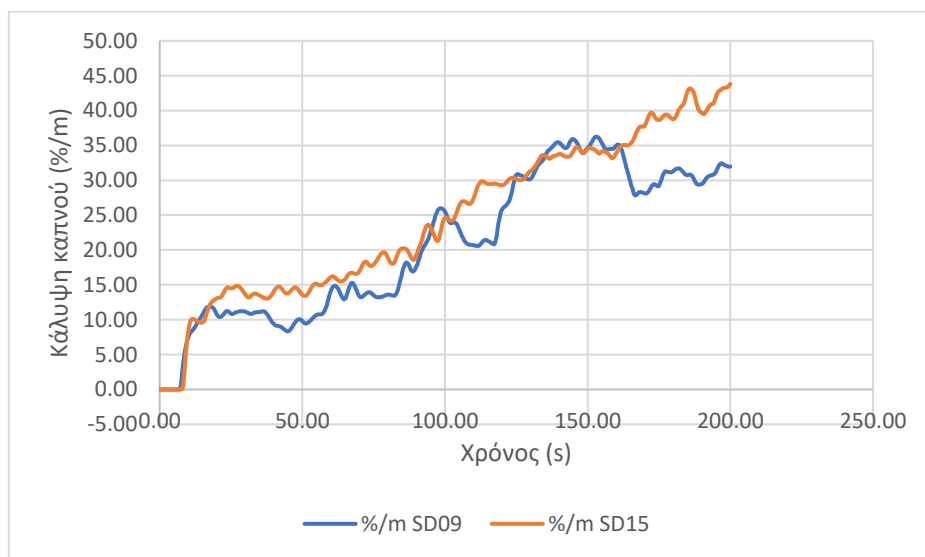
Προκειμένου να γίνει αισθητή η αύξηση της θερμοκρασίας συναρτήσει του χρόνου, καθώς και η αύξηση του ποσοστού κάλυψης καπνού στην περίπτωση της υπό μελέτη πυρκαγιάς, επισυνάπτονται τα διαγράμματα της απόκρισης του πρώτου ζεύγους ανιχνευτών θερμότητας και καπνού όπως υπολογίστηκαν από το PyroSim (διαγράμματα 10 και 11). Τα διαγράμματα αυτά περιλαμβάνουν:

- Τη θερμοκρασία που “καταγράφουν” οι ανιχνευτές θερμότητας συναρτήσει του χρόνου
- Το ποσοστό κάλυψης (Obscuration) του καπνού που “καταγράφουν” οι ανιχνευτές καπνού.

Τα υπόλοιπα διαγράμματα επισυνάπτονται στο παράρτημα της διπλωματικής εργασίας.



Διάγραμμα 10. 1η και 2η ανίχνευση θερμοκρασίας για 100% φόρτωση καταστρώματος

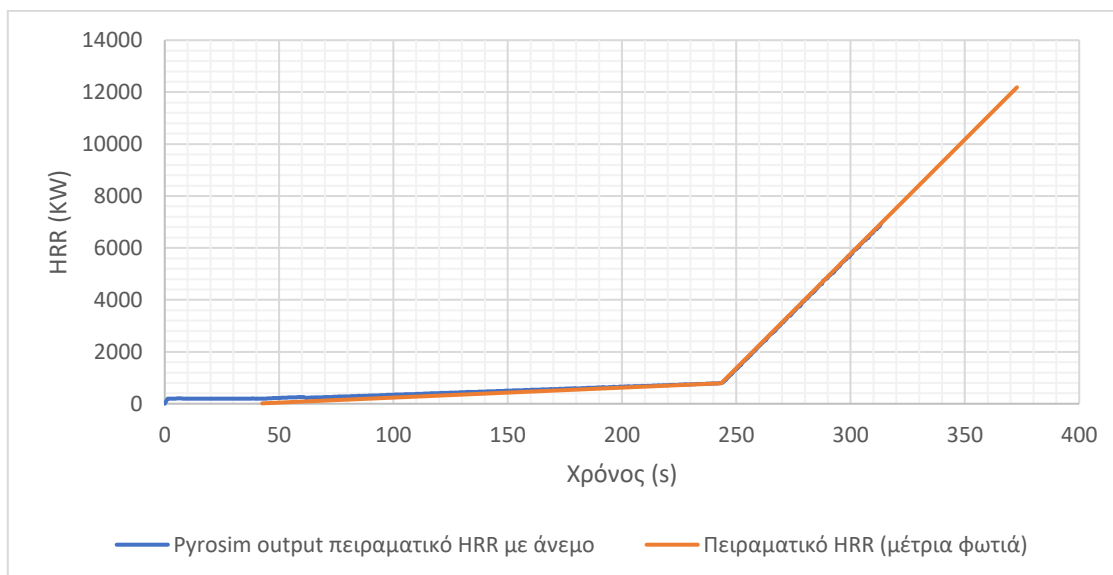


Διάγραμμα 11. Χρονική ιστορία των δύο ανιχνευτών που ενεργοποιήθηκαν πρώτοι και ήταν ρυθμισμένοι για κάλυψη 11.5%/m (soot yield: 0.06, 100% φόρτωση καταστρώματος)

Β' Ομάδα προσομοιώσεων: Επίδραση ανέμου

Σε αυτή την ομάδα προσομοιώσεων εξετάστηκε η επίδραση του ανέμου. Ο άνεμος μοντελοποιήθηκε από μία επιφάνεια vent και παρείχε αέρα ταχύτητας 18 m/s στο πυρναίο άνοιγμα του καταστρώματος. Υπολογίστηκε η απόκριση του συστήματος πυρανίχνευσης για 50% και 100% φόρτωση καταστρώματος.

Η καμπύλη του HRR ορίστηκε στο PyroSim με βάση τα πειραματικά δεδομένα. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 12 η επίδραση του ανέμου στο HRR για τα πρώτα 400sec περίπου είναι αμελητέα.



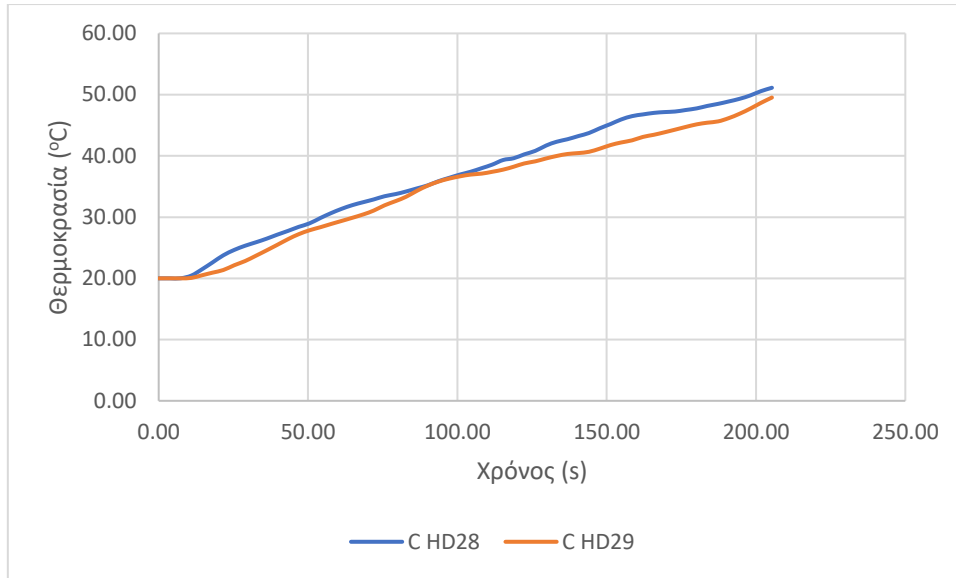
Διάγραμμα 12. Καμπύλη πειραματικού HRR παρουσία ανέμου όπως υπολογίστηκε στο PyroSim και καμπύλη πειραματικού HRR. Παρατηρείται ότι η επίδραση του ανέμου σε αυτό το χρονικό διάστημα είναι αμελητέα. Ο άνεμος πρόκειται να αυξήσει το HRR μετά τα 1000 sec

Τα αποτελέσματα της Β' Ομάδας προσομοιώσεων, όπως υπολογίστηκαν από το PyroSim επισυνάπτονται στον πίνακα 11.

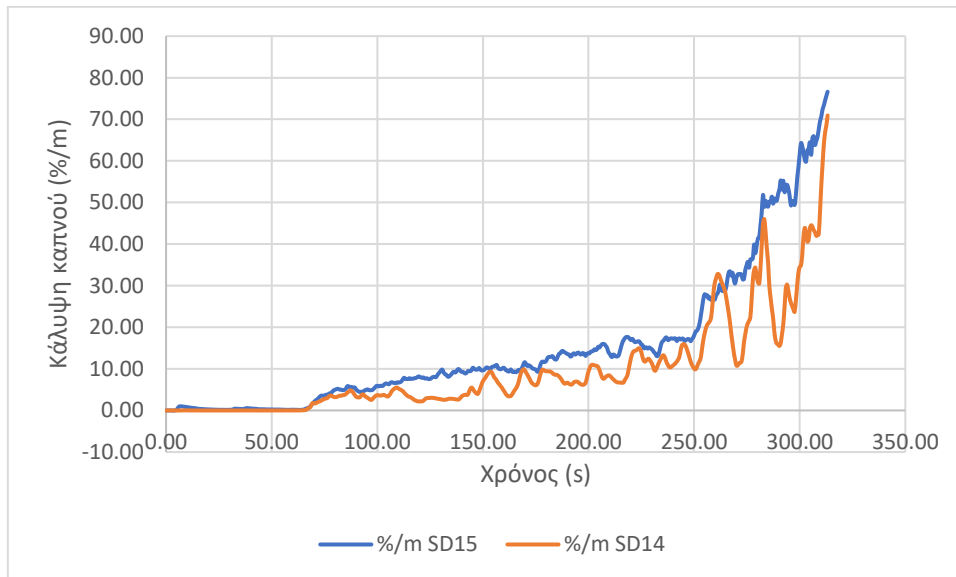
Πίνακας 11. Αποτελέσματα Β' ομάδας προσομοιώσεων.

Σενάρια				1 ^η ανίχνευση θερμότητας (s)	2 ^η ανίχνευση θερμότητας (s)	1 ^η ανίχνευση καπνού(s) (3,28%/m)	2 ^η ανίχνευση καπνού(s) (3,28%/m)	1 ^η ανίχνευση καπνού(s) (11,5%/m)	2 ^η ανίχνευση καπνού(s) (11,5%/m)
Ρυθμός ανάπτυξης πυρκαγιάς	Φόρτωση καταστρώματος	Soot yield	Άνεμος						
Με βάση τα πειραματικά δεδομένα	100%	0.06	Ναι	276.61	279.61	62.41	67.21	169.81	220.22
Με βάση τα πειραματικά δεδομένα	50%	0.06	Ναι	262.82	267.02	16.21	17.41	133.20	271.81

Στα διαγράμματα 13 και 14 φαίνεται η απόκριση του συστήματος ανίχνευσης θερμότητας και καπνού για συνθήκες ανέμου και 100% φόρτωση καταστρώματος.



Διάγραμμα 13. Απόκριση συστήματος ανίχνευσης θερμότητας για αργή πυρκαγιά και πλήρως φορτωμένο κατάστρωμα χωρίς άνεμο.



Διάγραμμα 14. Χρονική ιστορία του πρώτου ζεύγους ανιχνευτών καπνού που εντόπισε την πυρκαγιά με ευαισθησία 11.5%/m.

Γ' Ομάδα προσομοιώσεων: Επίδραση ρυθμού αύξησης πυρκαγιάς

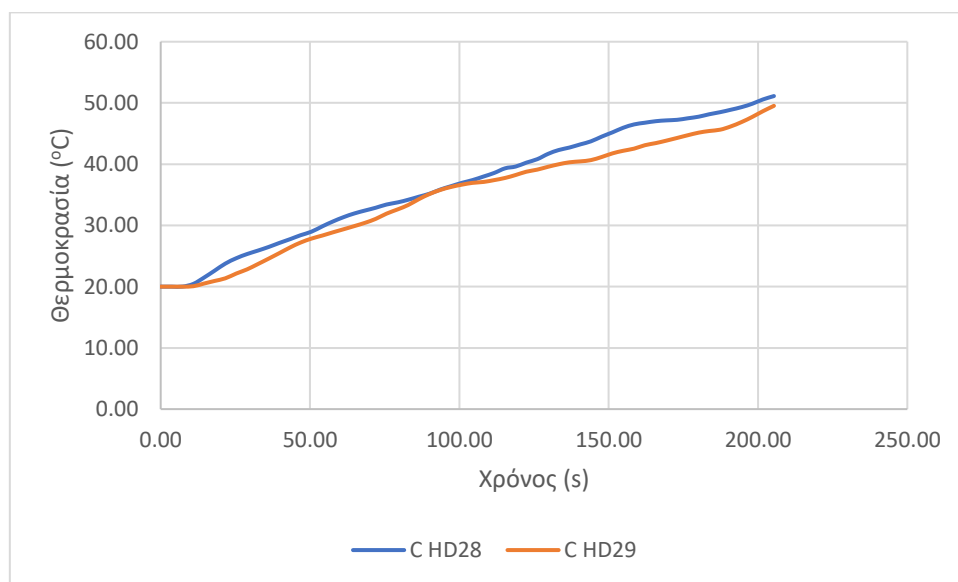
Στην παρούσα ομάδα προσομοιώσεων εκτελέστηκαν υπολογιστικά πειράματα για μία αργά αναπτυσσόμενη "t-squared" πυρκαγιά ($HRR=0.00293t^2$). Όμοια με τις παραπάνω περιπτώσεις εξετάστηκε η απόκριση του συστήματος ανίχνευσης για 100% και 50% φόρτωση καταστρώματος.

Οι χρόνοι ανίχνευσης στην περίπτωση της αργής πυρκαγιάς συγκεντρώνονται στον πίνακα 12:

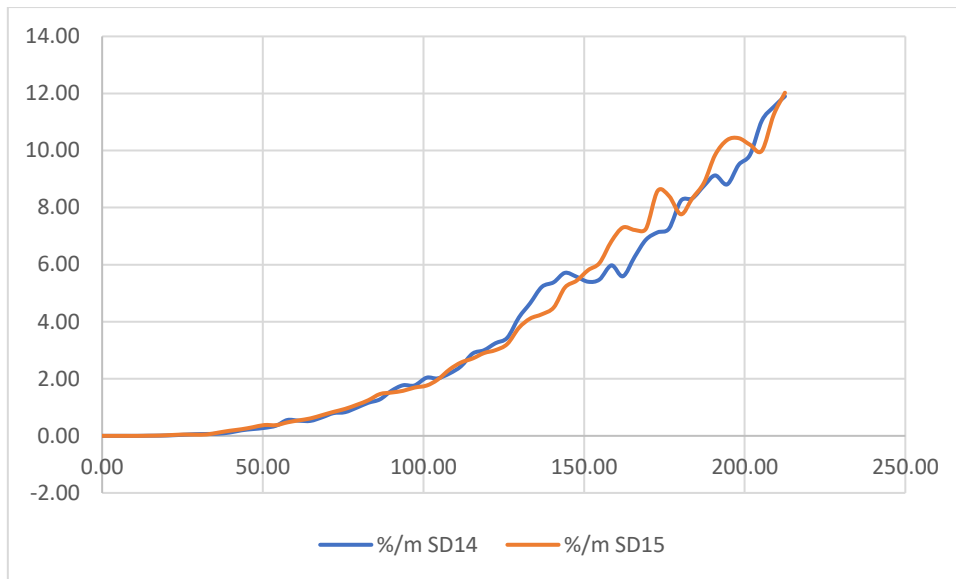
Πίνακας 12. Αποτελέσματα Γ' ομάδας προσομοιώσεων

Σενάρια				1 ^η	2 ^η	1 ^η	2 ^η	1 ^η	2 ^η
Ρυθμός ανάπτυξης πυρκαγιάς	Φόρτωση καταστρώματος	Soot yield	Άνεμος	ανίχνευση θερμότητας (s)	ανίχνευση θερμότητας (s)	ανίχνευση καπνού(s) (3,28%/m)	ανίχνευση καπνού(s) (3,28%/m)	ανίχνευση καπνού(s) (11,5%/m)	ανίχνευση καπνού(s) (11,5%/m)
Αργός	100%	0.06	Όχι	226.91	237.71	126.11	129.72	209.01	212.54
Αργός	50%	0.06	Όχι	198.84	342.11	133.96	144.02	259.84	276.61

Η αύξηση της θερμοκρασίας και του ποσοστού κάλυψης καπνού που κατέγραψαν οι ανιχνευτές θερμότητας και καπνού αντίστοιχα φαίνεται στα Διαγράμματα 15 και 16 που αποτελούν αποτελέσματα της προσομοίωσης στο PyroSim.



Διάγραμμα 15. Απόκριση πρώτου ζεύγους ανιχνευτών θερμότητας για αργή πυρκαγιά και πλήρως φορτωμένο κατάστρωμα χωρίς άνεμο.

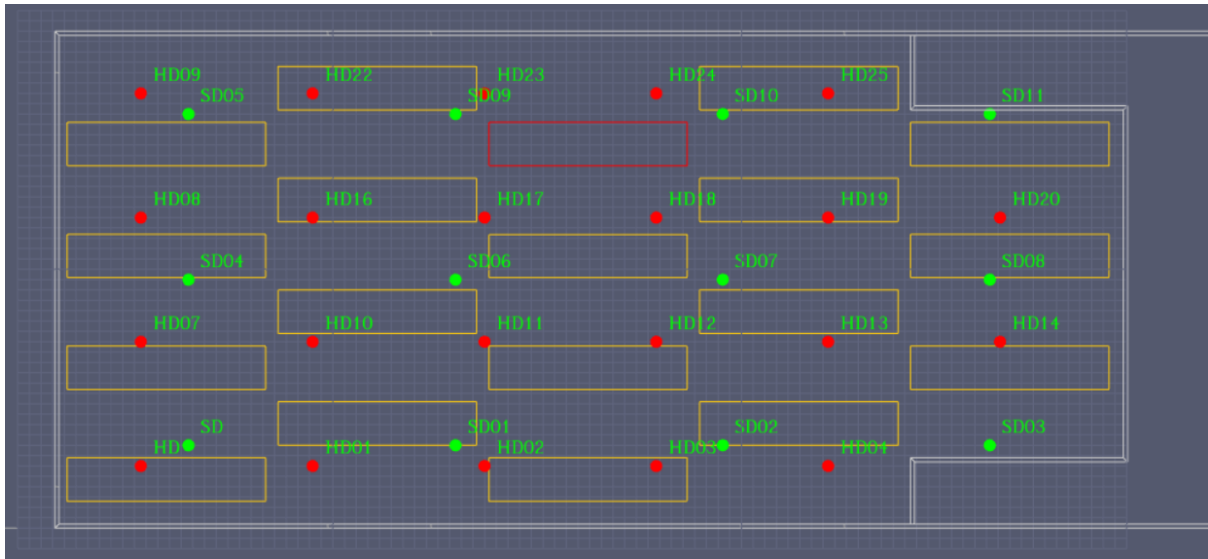


Διάγραμμα 16.Χρονική ιστορία του πρώτου ζεύγους ανιχνευτών που εντόπισε την πυρκαγιά με ευαισθησία 11.5%/m.

Δ' Σενάριο προσομοιώσεων: Επίδραση ποσοστού κάλυψης ανιχνευτών

Τέλος, θα εξεταστεί και μία περίπτωση στην οποία κάθε ανιχνευτής θερμότητας και καπνού θα καλύπτει 1.5 φορά μεγαλύτερο εμβαδόν από τα προηγούμενα πειράματα. Συνεπώς το πλήθος των ανιχνευτών θα διαιρεθεί με το 1.5 και θα στρογγυλοποιηθεί στον πλησιέστερο ακέραιο αριθμό. Έτσι, ενώ στα προηγούμενα σενάρια το κατάστρωμα διέθετε 33 ανιχνευτές θερμότητας και 18 ανιχνευτές καπνού, στο παρακάτω πείραμα στο κατάστρωμα πρόκειται να τοποθετηθούν 22 ανιχνευτές θερμότητας και 12 ανιχνευτές καπνού. Με αυτή τη διάταξη ανιχνευτών οι απαιτήσεις του FSS code παύουν να ισχύουν, ωστόσο κρίθηκε σκόπιμο να εξεταστεί αυτό το σενάριο για να προσδιοριστούν οι συνέπειες του στο χρόνο ανίχνευσης της πυρκαγιάς. Τέλος, σε αυτό το σενάριο παρουσιάζεται η απόκριση του συστήματος ανίχνευσης καπνού το οποίο ήταν ρυθμισμένο να ενεργοποιείται σε ποσοστά κάλυψης καπνού 6.5%/m

Θα εξεταστεί ένα σενάριο αργής "t-squared" πυρκαγιάς με 50 % φόρτωση καταστρώματος. Αναλυτικότερα, η διάταξη των ανιχνευτών και των φορητών φαίνεται στην εικόνα 20:



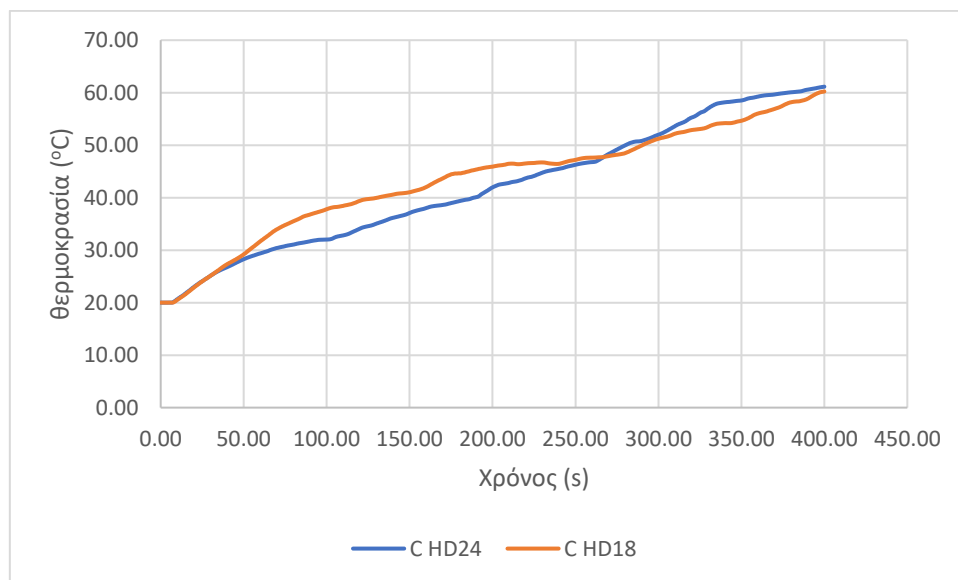
Εικόνα 20. Διάταξη ανιχνευτών και φορητών στο τελευταίο πείραμα

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται στον πίνακα 13:

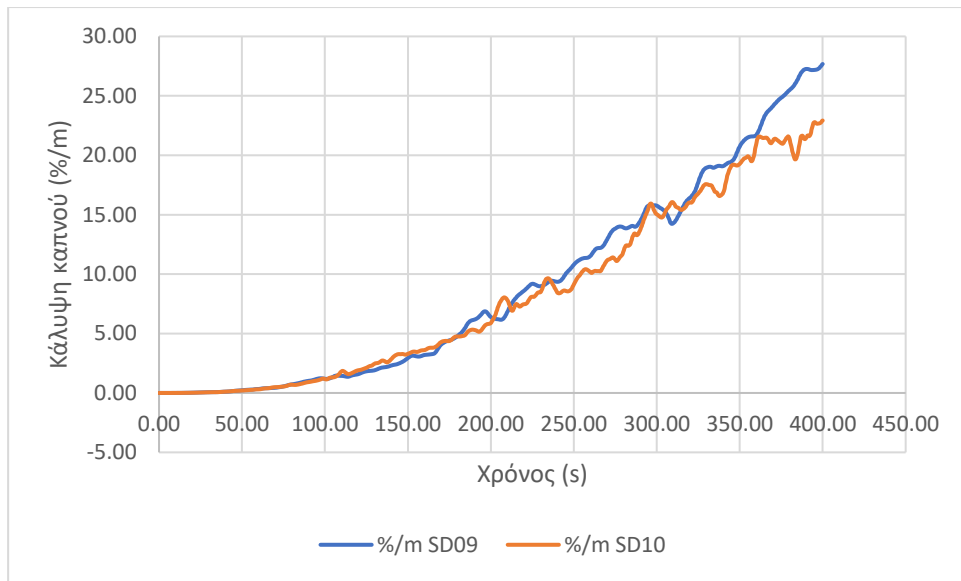
Πίνακας 13. Πίνακας αποτελεσμάτων Δ' ομάδας προσομοιώσεων.

Σενάρια				1 ^η ανίχνευση θερμότητας (s)	2 ^η ανίχνευση θερμότητας (s)	1 ^η ανίχνευση καπνού(s) (3,28%/m)	2 ^η ανίχνευση καπνού(s) (3,28%/m)	1 ^η ανίχνευση καπνού(s) (6,5%)	2 ^η ανίχνευση καπνού(s) (6,5%)	1 ^η ανίχνευση καπνού(s) (11,5%/m)	2 ^η ανίχνευση καπνού(s) (11,5%/m)
Ρυθμός ανάπτυξης πυρκαγιάς	Φόρτωση καταστρώματος	Soot yield	Άνεμος								
Αργός	50%	0.06	Όχι	316.89	334.99	144.06	154.99	193.64	202.51	259.25	270.04

Οι αποκρίσεις του συστήματος ανίχνευσης θερμότητας και καπνού φαίνονται στα διαγράμματα 17 και 18:



Διάγραμμα 17. Απόκριση πρώτου ζεύγους ανιχνευτών θερμότητας στο τελευταίο πείραμα



Διάγραμμα 18. Απόκριση πρώτου ζεύγους ανιχνευτών καπνού με *obscuratation Threshold* (ποσοστό κάλυψης καπνού) 6.5%/m στο τελευταίο πείραμα.

9. Σύγκριση αποτελεσμάτων και συμπεράσματα.

Στους πίνακες 14 και 15 παρατίθενται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των υπολογιστικών προσομοιώσεων με σκοπό την ευδιάκριτη σύγκριση τους. Στη συνέχεια, σχολιάζεται η επίδραση κάθε παραμέτρου που εξετάστηκε.

Πίνακας 14. Αποτελέσματα προσομοιώσεων πυρκαγιάς για τον προσδιορισμό του χρόνου ανίχνευσης.

Σενάρια				1 ^η	2 ^η	1 ^η	2 ^η	1 ^η	2 ^η
Ρυθμός ανάπτυξης πυρκαγιάς	Φόρτωση καταστρώματος	Soot yield	Άνεμος	ανίχνευση θερμότητας (s)	ανίχνευση θερμότητας (s)	ανίχνευση καπνού(s) (3,28%/m)	ανίχνευση καπνού(s) (3,28%/m)	ανίχνευση καπνού(s) (11,5%/m)	ανίχνευση καπνού(s) (11,5%/m)
Με βάση τα πειραματικά δεδομένα	100%	0.02	Όχι	122.13	123.00	11.00	11.36	118.12	123.17
Με βάση τα πειραματικά δεδομένα	100%	0.06	Όχι	119.31	126.48	7.96	8.17	16.09	17.01
Με βάση τα πειραματικά δεδομένα	50%	0.02	Όχι	144.09	198.93	24.43	67.68	201.25	205.28
Με βάση τα πειραματικά δεδομένα	50%	0.06	Όχι	104.30	178.44	7.49	8.18	64.95	69.07
Με βάση τα πειραματικά δεδομένα	100%	0.06	Ναι	276.61	279.61	62.41	67.21	169.81	220.22
Με βάση τα πειραματικά δεδομένα	50%	0.06	Ναι	262.82	267.02	16.21	17.41	133.20	271.81
Αργός	100%	0.06	Όχι	226.91	237.71	126.11	129.72	209.01	212.54
Αργός	50%	0.06	Όχι	198.84	342.11	133.96	144.02	259.84	276.61

Πίνακας 15. Αποτελέσματα προσομοιώσεων πυρκαγιάς για τον προσδιορισμό του χρόνου ανίχνευσης με 1.5 φορές λιγότερους ανιχνευτές.

Σενάρια				1 ^η	2 ^η	1 ^η	2 ^η	1 ^η	2 ^η	1 ^η	2 ^η
Ρυθμός ανάπτυξης πυρκαγιάς	Φόρτωση καταστρώματος	Soot yield	Άνεμος	ανίχνευση θερμότητας (s)	ανίχνευση θερμότητας (s)	ανίχνευση καπνού(s) (3,28%/m)	ανίχνευση καπνού(s) (3,28%/m)	ανίχνευση καπνού(s) (6,5%)	ανίχνευση καπνού(s) (6,5%)	ανίχνευση καπνού(s) (11,5%/m)	ανίχνευση καπνού(s) (11,5%/m)
Αργός	50%	0.06	Όχι	316.89	334.99	144.06	154.99	193.64	202.51	259.25	270.04

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο κεφάλαιο 5 της παρούσας διπλωματικής εργασίας, οι παράγοντες που επηρεάζουν το χρόνο ανίχνευσης της πυρκαγιάς είναι :

- Το σενάριο της πυρκαγιάς (συγκεκριμένα ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας στο στάδιο της ανάπτυξης)
- Η ευαισθησία των ανιχνευτών
- Η φόρτωση του καταστρώματος
- Ο άνεμος
- Η ποσότητα του καπνού που παράγεται από την καύση 1 gr καύσιμης ύλης (soot yield).
- Το πλήθος και η διάταξη των ανιχνευτών

Στις παρακάτω ενότητες αυτού του κεφαλαίου σχολιάζεται η επίδραση των παραμέτρων με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

9.1 Το σενάριο της πυρκαγιάς

Σύστημα ανίχνευσης θερμότητας

Το σενάριο της πυρκαγιάς παίζει καθοριστικό ρόλο στο χρόνο ανίχνευσης. Παρατηρείται ότι για το σύστημα ανίχνευσης θερμότητας σε συνθήκες χωρίς άνεμο ο χρόνος ανίχνευσης είναι διπλάσιος για πυρκαγιά με αργό ρυθμό ανάπτυξης συγκριτικά με την πρότυπη-πειραματική πυρκαγιά. Σε συνθήκες ανέμου η ανίχνευση καθυστερεί ακόμη περισσότερο (περίπου εξαπλάσιος χρόνος σε σχέση με την πρότυπη-πειραματική πυρκαγιά).

Σύστημα ανίχνευσης καπνού

Η ανίχνευση καπνού δυσχεραίνει σε μεγάλο βαθμό όταν η πυρκαγιά αναπτύσσεται με αργό ρυθμό (ο χρόνος ανίχνευσης είναι δεκαπλάσιος σε κάποιες περιπτώσεις σε σχέση με το χρόνο ανίχνευσης της πειραματικής πυρκαγιάς). Αιτία αυτού του φαινομένου είναι η μικρότερη παραγωγή καπνού κατά τη διάρκεια μιας αργά αναπτυσσόμενης πυρκαγιάς.

9.2 Ευαισθησία ανιχνευτών

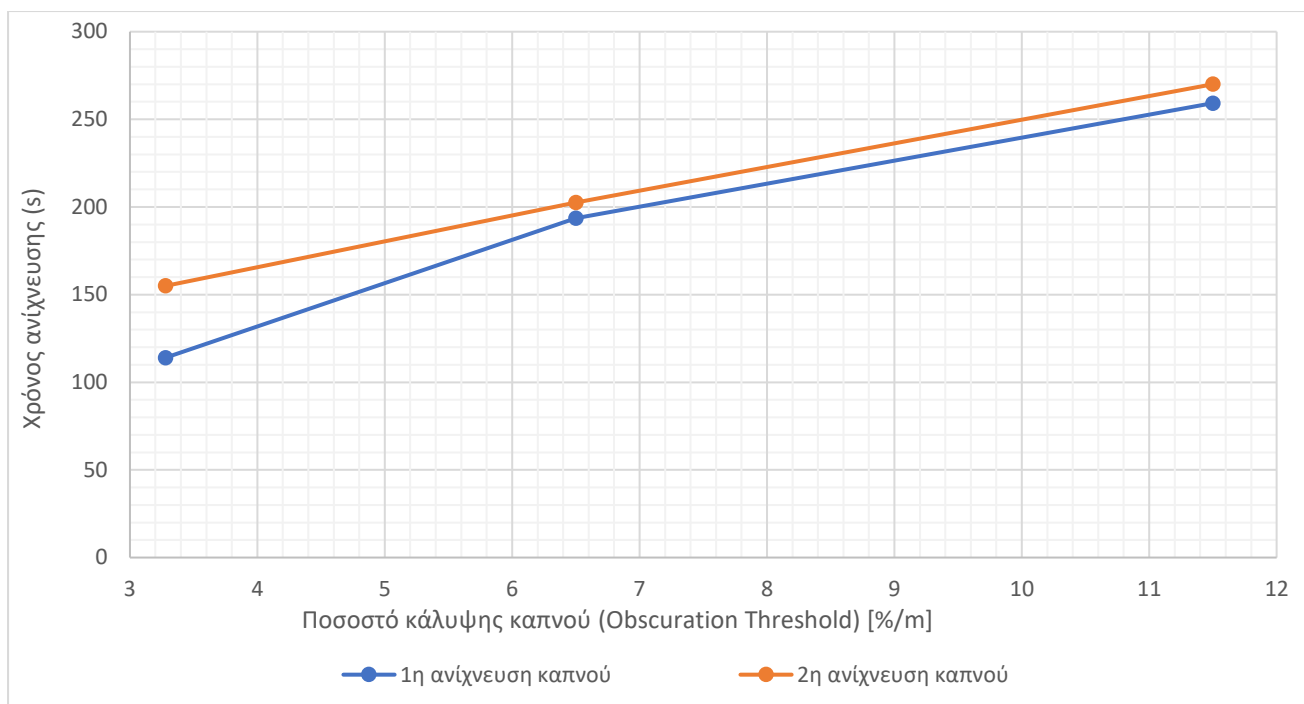
Σύστημα ανίχνευσης θερμότητας

Είναι προφανές ότι ανιχνευτές υψηλής ευαισθησίας ενεργοποιούνται γρηγορότερα παρέχοντας έγκαιρη ανίχνευση. Ωστόσο, ανιχνευτές θερμότητας με υψηλή ευαισθησία ενδέχεται να ενεργοποιούνται και χωρίς να υπάρξει πυρκαγιά, καθώς λόγω καιρού μπορεί να υπάρξουν υψηλές θερμοκρασίες.

Σύστημα ανίχνευσης καπνού

Όμοια με το σύστημα ανίχνευσης θερμότητας, η ανίχνευση του καπνού είναι ταχύτερη εάν οι ανιχνευτές καπνού ενεργοποιούνται σε χαμηλότερα ποσοστά κάλυψης καπνού (Obscuration Threshold). Όπως φαίνεται και στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων η ανίχνευση πιο ευαίσθητων ανιχνευτών ήταν 2 έως 10 φορές ταχύτερη. Παρ' όλα αυτά, πολύ σύστημα με πολύ χαμηλό όριο ενεργοποίησης ανιχνευτών καπνού μπορεί να ενεργοποιηθεί από τις αναθυμιάσεις των κινητήρων των οχημάτων με αποτέλεσμα να παραχθεί εσφαλμένος συναγερμός. Μία συμβιβαστική λύση, όπως φαίνεται και στο Δ' σενάριο, είναι η χρήση ανιχνευτών που ενεργοποιούνται σε μία μέση τιμή ποσοστού κάλυψης καπνού ανά μέτρο (6.5%/m) που όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα παρουσιάζουν καλή απόκριση σχετικά κοντά σε αυτή των ευαίσθητων ανιχνευτών (3.28%/m).

Στο διάγραμμα 19 φαίνεται ο χρόνος ενεργοποίησης των ανιχνευτών καπνού για διάφορες τιμές του ποσοστού κάλυψης (Obscuration Threshold):



Διάγραμμα 19. Επίδραση ευαισθησίας των ανιχνευτών καπνού στο χρόνο ανίχνευσης της πυρκαγιάς (Αποτελέσματα Δ' ομάδας προσομοιώσεων)

9.3 Φόρτωση καταστρώματος

Σύστημα ανίχνευσης θερμότητας

Παρατηρήθηκε ότι η ανίχνευση θερμότητας σε συνθήκες πλήρους φόρτωσης οδηγεί σε μεγαλύτερους χρόνους ανίχνευσης (5 έως 16% αύξηση του χρόνου ανίχνευσης). Πλήρως φορτωμένο κατάστρωμα σημαίνει δυσκολότερη διάδοση της θερμότητας στο χώρο, καθώς τα φορτηγά αποτελούν φυσικά εμπόδια στη διάδοση της (απορροφούν ένα ποσό θερμότητας μέσω αγωγής). Έτσι, η θερμοκρασία στο χώρο της οροφής αργεί περισσότερο να αυξηθεί μέχρι τη θερμοκρασία ενεργοποίησης των ανιχνευτών.

Σύστημα ανίχνευσης καπνού

Το σύστημα ανίχνευσης καπνού αποκρίνεται γρηγορότερα σε συνθήκες πλήρους φόρτωσης, καθώς ο καπνός δεν μπορεί να εξέλθει από τα ανοίγματα επειδή τα δεύτερα "κλείνονται" μερικώς από τα φορτηγά. Σε περίπτωση μιας πιο αραιής φόρτωσης του καταστρώματος ο καπνός που θα παραγόταν από κάποιο φορτηγό που καίγεται θα διασκορπιζόταν πιο γρήγορα λόγω περίσσειας ατμοσφαιρικού αέρα και οι ανιχνευτές θα καθυστερούσαν να τον "αντιληφθούν".

9.4 Άνεμος

Σύστημα ανίχνευσης θερμότητας

Η παρουσία ανέμου είναι από τους βασικότερους παράγοντες που επηρεάζουν την ανίχνευση της πυρκαγιάς. Η παρουσία του ανέμου λειτουργεί καταλυτικά στην ανάπτυξη της πυρκαγιάς, αφού αυξάνει την παροχή του οξυγόνου με αποτέλεσμα η αντίδραση της καύσης να επιταχύνεται. Όσον αφορά όμως την ανίχνευση θερμότητας επιδρά αρνητικά σε μεγάλο βαθμό. Συγκεκριμένα, η ανίχνευση θερμότητας προέκυψε 2.5 φορές περίπου πιο αργή στο σενάριο της πειραματικής πυρκαγιάς και έως 5 φορές πιο αργή στο σενάριο της αργής πυρκαγιάς. Η καθυστέρηση αυτή οφείλεται στο ότι ο άνεμος προκαλεί ανάμιξη των θερμών αερίων με μεγάλες ποσότητες φρέσκου αέρα ο οποίος βρίσκεται συγκριτικά σε χαμηλή θερμοκρασία. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η

θερμοκρασία στο χώρο για κάποιο χρονικό διάστημα να διατηρείται χαμηλή και το σύστημα ανίχνευσης θερμότητας να αδυνατεί να ενεργοποιηθεί.

Ακόμη, αξιοσημείωτο είναι ότι οι ανιχνευτές που ενεργοποιήθηκαν σε κάθε σενάριο δεν ήταν οι ίδιοι. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο άνεμος “κατευθύνει” τη ροή θερμότητας με αποτέλεσμα οι ανιχνευτές που ενεργοποιούνται σε περιπτώσεις παρουσίας ανέμου να είναι διαφορετικοί σε σχέση με τα σενάρια χωρίς άνεμο.

Σύστημα ανίχνευσης καπνού

Παρόμοια απόκριση σε συνθήκες ανέμου φαίνεται να έχει και το σύστημα ανίχνευσης καπνού. Για την πειραματική πυρκαγιά οι χρόνοι ανίχνευσης των με άνεμο ήταν από 2 έως 7 φορές μεγαλύτεροι από τις περιπτώσεις χωρίς άνεμο ενώ για αργή πυρκαγιά ο χρόνος ανίχνευσης ήταν δύο φορές μεγαλύτερος.

Ο αέρας λόγω της μεγάλης του ορμής (εξαιτίας της υψηλής ταχύτητας), ωθεί τον καπνό που παράγεται κατά την καύση να εξέρχεται από τα ανοίγματα. Με αυτό τον τρόπο καθυστερεί σημαντικά η ανίχνευση. Αξίζει να σημειωθεί ότι αν τα φορτηγά τοποθετηθούν σε θέσεις κοντά στα ανοίγματα εμποδίζοντας μερικώς την έξοδο του καπνού τότε η απόκριση του συστήματος καπνού βελτιώνεται.

Τέλος, ο άνεμος πέρα από την αλλαγή στη ροή θερμότητας, μεταβάλλει και τη ροή του καπνού, έτσι οι ανιχνευτές που ενεργοποιούνται σε περιπτώσεις ανέμου είναι διαφορετικοί από τις περιπτώσεις χωρίς άνεμο και αυτό διότι η συγκέντρωση του ανέμου αυξάνεται σε διαφορετικά σημεία.

9.5 Soot Yield

Σύστημα ανίχνευσης θερμότητας

Η επίδραση του soot yield στην ανίχνευση θερμότητας είναι μικρή καθώς δε συνδέεται άμεσα με την κατανομή της θερμοκρασίας στο χώρο.

Σύστημα ανίχνευσης καπνού

Η ποσότητα καπνού που παράγεται από την καύση 1gr καύσιμης ύλης αποτελεί κρίσιμο παράγοντα στην ανίχνευση του καπνού. Στις περιπτώσεις όπου το soot yield λάμβανε την τιμή 0.02 η ανίχνευση καπνού καθυστερούσε 1.5 έως 3 φορές περισσότερο από την περίπτωση soot yield:0.06. Ο λόγος είναι προφανής, μεγαλύτερες ποσότητες καπνού στον ίδιο χρόνο συνεπάγονται μικρότερους χρόνους απόκρισης των ανιχνευτών.

9.6 Σύγκριση συστημάτων ανίχνευσης θερμότητας και καπνού

Με βάση τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, παρατηρείται ότι το σύστημα ανίχνευσης θερμότητας καθυστερεί αρκετά περισσότερο σε σχέση με το σύστημα ανίχνευσης καπνού. Η χρήση του όμως είναι σημαντική, καθώς κατά τη διάρκεια της φορτοεκφόρτωσης οι κινητήρες των οχημάτων εκπέμπουν αναθυμιάσεις που ενδέχεται να ενεργοποιήσουν τους ανιχνευτές καπνού χωρίς να υπάρξει πυρκαγιά. Γι' αυτό το λόγο προτιμάται η ταυτόχρονη χρήση του συστήματος ανίχνευσης θερμότητας. Ακόμη, το σύστημα ανίχνευσης θερμότητας παρέχει στο πλήρωμα καλύτερη πληροφορία σχετικά με την ανάπτυξη της πυρκαγιάς αλλά και τη θέση της καθώς οι ανιχνευτές καπνού ενεργοποιούνται μαζικά πολύ γρήγορα. Σε κάθε περίπτωση, ο συνδυασμός των συστημάτων ανίχνευσης καπνού και θερμότητας πρόκειται να λειτουργήσει αποτελεσματικότερα προσφέροντας υψηλότερα επίπεδα ασφαλείας.

9.7 Σύνοψη και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει στόχο την εξέταση της απόκρισης των συστημάτων ανίχνευσης θερμότητας και καπνού σε κατάστρωμα οχημάτων επιβατηγού/οχηματαγωγού πλοίου. Εξετάστηκαν διάφορα σενάρια πυρκαγιάς, λαμβάνοντας υπ' όψη τις παραμέτρους που επηρεάζουν την πυρανίχνευση. Αυτές ήταν :

- Η φόρτωση του καταστρώματος (100% και 50%)
- Η ποσότητα του καπνού που παράγεται κατά την καύση (παραγωγή αραιού και πυκνού καπνού).
- Η παρουσία ανέμου
- Η ευαισθησία των ανιχνευτών
- Ο ρυθμός ανάπτυξης της πυρκαγιάς (πρότυπο-πειραματικό HRR και αργή “t-squared” πυρκαγιά)

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εκτέλεση των προσομοιώσεων και την μεταξύ τους σύγκριση, προκύπτουν τα εξής βασικά συμπεράσματα:

- Το σύστημα ανίχνευσης καπνού αποκρινόταν αρκετά ταχύτερα από το σύστημα ανίχνευσης θερμότητας
- Ένα πλήρως φορτωμένο κατάστρωμα καθυστερεί την ανίχνευση θερμότητας, ενώ ευνοεί την ανίχνευση του καπνού
- Ο άνεμος και η χαμηλή ευαισθησία των ανιχνευτών καθυστερούν σημαντικά την πυρανίχνευση
- Ο καπνός και η αύξηση της θερμοκρασίας για μία πυρκαγιά που εξελίσσεται με αργό ρυθμό είναι δυσκολότερο να ανιχνευτεί.

Παρ' όλο που αποτελεί ένα πρωταρχικό στάδιο μελέτης, υπάρχουν προοπτικές για τη συνέχεια της καθώς και για μελλοντική έρευνα. Είναι προφανές ότι οι παράμετροι που εξετάστηκαν αποτελούν ένα μικρό ποσοστό των συνολικών παραμέτρων που συνιστούν το πρόβλημα της πυρανίχνευσης.

Σχετικά με το χώρο του καταστρώματος θα μπορούσε να γίνει μελέτη πυρανίχνευσης σε ανοιχτό κατάστρωμα go-go αλλά και σε κλειστό χώρο με χρήση συστήματος εξαερισμού. Σε περιπτώσεις ανοιχτού καταστρώματος η ανίχνευση της πυρκαγιάς μέσω του καπνού και της θερμότητας αναμένεται να καθυστερεί περισσότερο, επομένως θα πρέπει να εξεταστεί το ενδεχόμενο χρήσης επιπλέον συστήματος ανίχνευσης, όπως ανιχνευτές φλόγας ή ανίχνευση μέσω βίντεο. Παράλληλα, σε κλειστούς χώρους go-go με χρήση συστήματος εξαερισμού η χρήση του εξαερισμού πρόκειται να επηρεάσει τη ροή του αέρα με αποτέλεσμα να επηρεαστεί η απόκριση του συστήματος ανίχνευσης καπνού αλλά και της θερμότητας. Τέλος, θα μπορούσαν να εξεταστούν οι διαφορετικές θέσεις έναρξης της πυρκαγιάς με έμφαση τις θέσεις κοντά σε ανοίγματα όπου σε συνδυασμό με την παρουσία ανέμου η ανίχνευση της θερμότητας και του καπνού αναμένεται να καθυστερήσει αρκετά.

Μία ακόμα σημαντική παράμετρος, που μελλοντικά είναι χρήσιμο να εξεταστεί, είναι η επίδραση του συστήματος κατάσβεσης στην εξέλιξη και στον περιορισμό της πυρκαγιάς. Ο τύπος του συστήματος (wet pipe, dry pipe, deluge systems), ο χρόνος ενεργοποίησης, η απόσταση και ο αριθμός ψεκαστήρων, η πυκνότητα και η πίεση νερού παροχής αποτελούν σημεία μελέτης, που πιθανά μπορεί να οδηγήσουν στην αναθεώρηση των κανονισμών με σκοπό της πυρασφάλειας σε χώρους go-go.

Βιβλιογραφία

DNV GL. (2016). *Fires on ro-ro decks*.

EMSA. (2018). *Firesafe II Detection and Decision Final Report version 1.1-December 2018*. European Maritime Safety Agency.

EMSA. (2018). *Firesafe II Detection systems in open ro-ro and weather decks Final Report Version 2.2-December 2018*. European Maritime Safety Agency.

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

IMO. (2007). *FSS code*. International Maritime Organisation (IMO). Fire Safety System (FSS) Code.

NFPA 72 (2013). (National Fire Alarm and Signaling Code- Chapter 3 2013 Edition).

MCA (2020).

IMO (2019). INTERIM GUIDELINES FOR MINIMIZING THE INCIDENCE AND CONSEQUENCES OF FIRES IN RO-RO SPACES AND SPECIAL CATEGORY SPACES OF NEW AND EXISTING RO-RO PASSENGER SHIPS

<https://www.marineinsight.com/marine-safety/basics-of-fire-prevention-on-board-ships/>

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

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

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

Breullard, A., Cassez, A., Kar, A., Patil, S., Grandison, A., Xu, D., et al. (2012), *Probabilistic Framework for Onboard Fire Safety. Benchmarking Of Existing Ships. FIREPROOF project. Deliverable. D3.3*.

https://www.jstage.jst.go.jp/article/fst/24/4/24_4_179/pdf

Richard J. Roby Stephen M. Olenick Wei Zhang Douglas J. Carpenter Michael S. Klassen (2007). "A Smoke Detector Algorithm for Large Eddy Simulation Modeling", Combustion Science & Engineering, Inc.

Heskestad G., Delichatsios (1977). M.A. Environments of Fire Detectors—Phase I: Effect of Fire Size, Ceiling Height and Material, Volume I—Measurements, Volume II—Analysis. Factory Mutual Research Corporation Report 22427

TG Cleary, A Chernovsky, WL Grosshandler, M Anderson (2000), "Particulate entry lag in spot-type smoke detectors:", *Fire Safety Science* 6, 779-790.

NIST (2019) Fire Dynamics Simulator User's Guide

Themelis & Spyrou (2012). "Probabilistic Fire Safety Assessment of Passenger ships", *Journal of Ship Research*, Vol.56, No.4, December 2012.

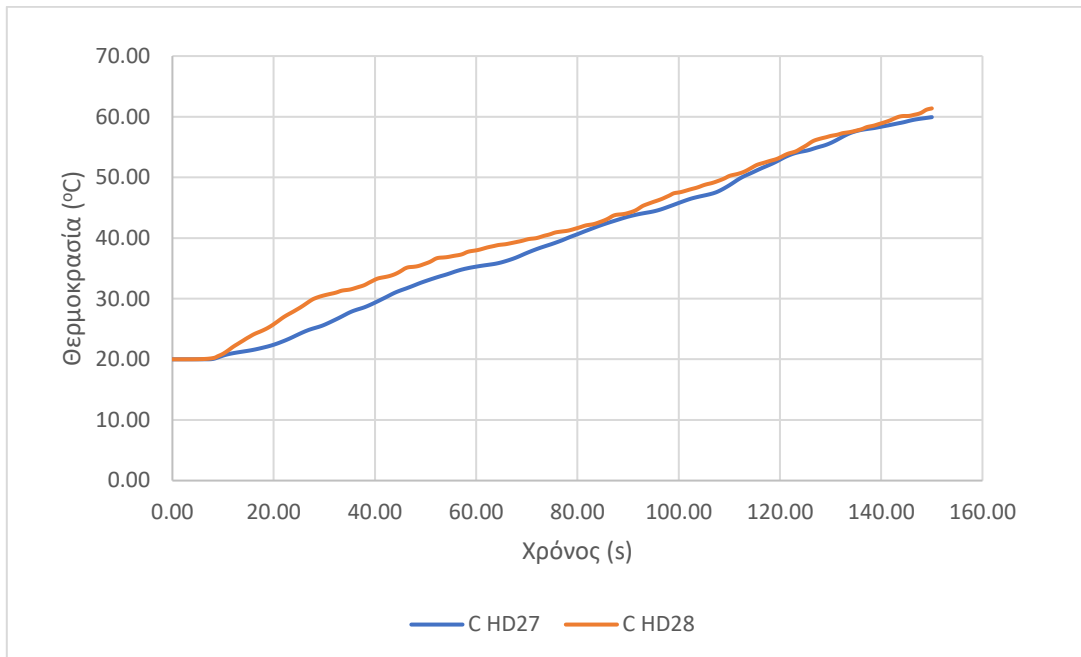
Themelis, N., Pagonis, N., (2021), "An analysis of the parameters affecting the propagation of fire on the vehicle deck of a RoPax ship", Proceedings of the 1st International Conference on the Stability and Safety of Ships and Ocean Vehicles, 7-11 June 2021, Glasgow, Scotland, UK

Cassez, A., & Mindykowski, P., (2021) "A Quantitative Criterion to Assess Early Detection for Fire Safety, Proceedings of the 1st International Conference on the Stability and Safety", Proceedings of the 1st International Conference on the Stability and Safety of Ships and Ocean Vehicles, 7-11 June 2021, Glasgow, Scotland, UK

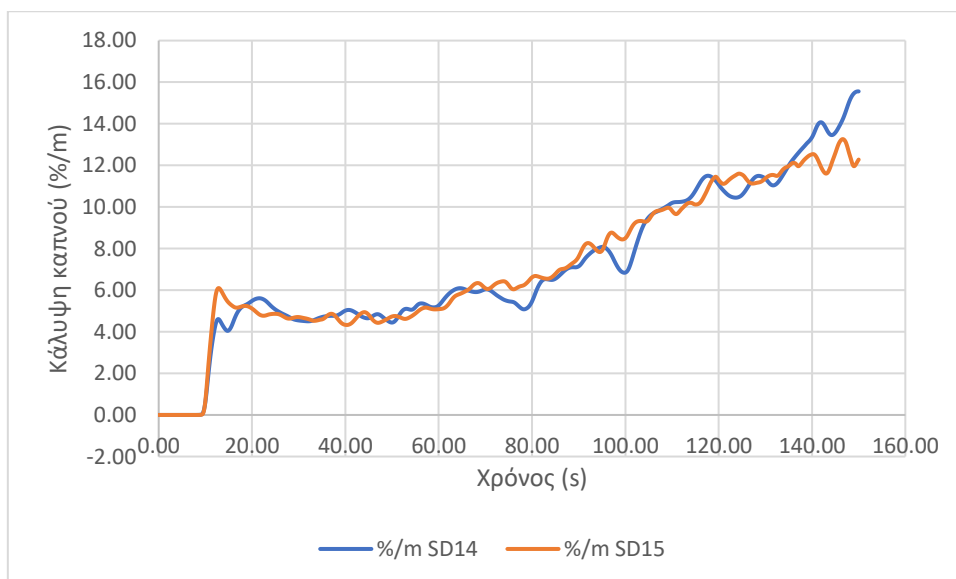
Koromila, Pouangare & Spyrou (2021) "An analysis of the parameters affecting the propagation of fire on the vehicle deck of RoPax ship. ", Proceedings of the 1st International Conference on the Stability and Safety of Ships and Ocean Vehicles, 7-11 June 2021, Glasgow, Scotland, UK

Παράρτημα-Αποτελέσματα ομάδων προσομοιώσεων στο PyroSim Α' Ομάδα προσομοιώσεων

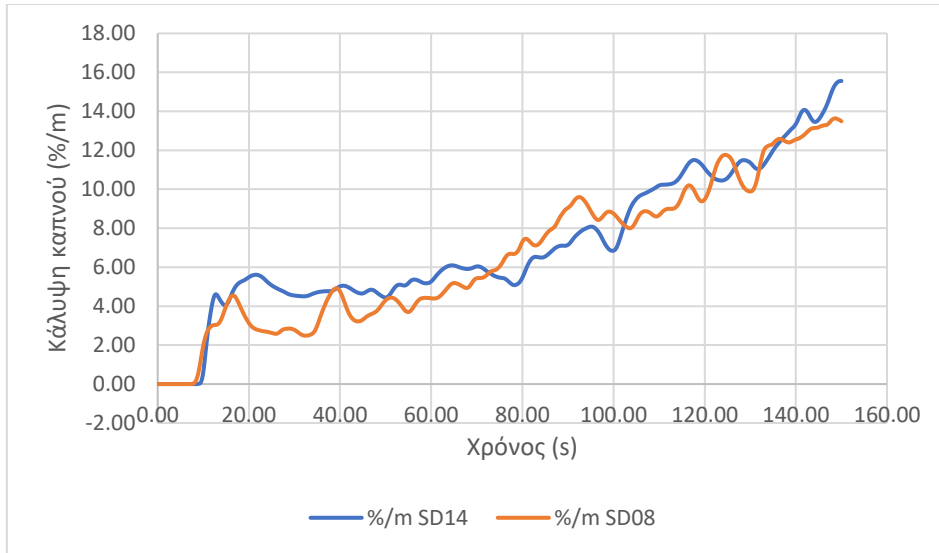
A1.



Διάγραμμα 20. Απόκριση πρώτου ζεύγους ανιχνευτών θερμότητας.

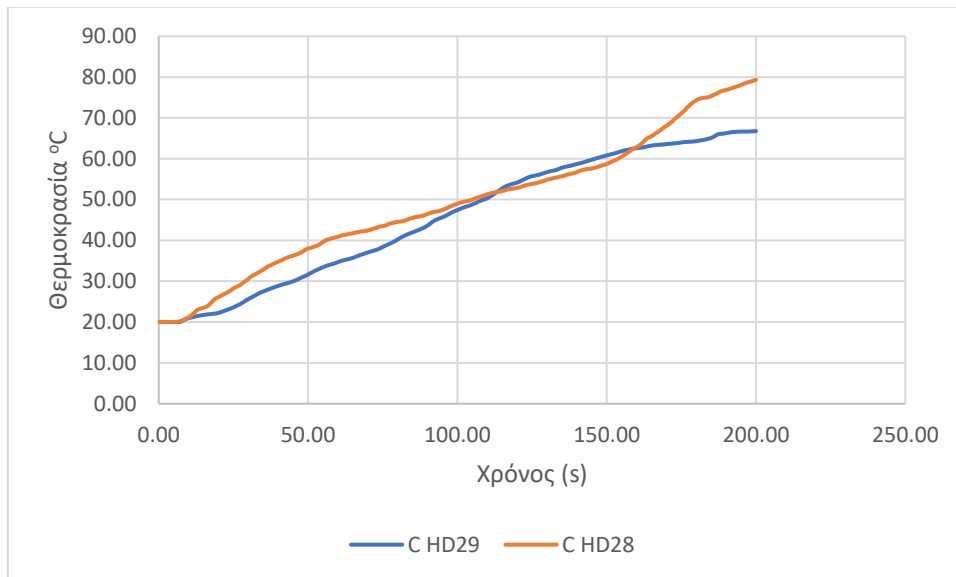


Διάγραμμα 21. Απόκριση πρώτου ζεύγους ανιχνευτών καπνού που ήταν ρυθμισμένοι να ενεργοποιούνται για obscuration threshold 3.28%/m.

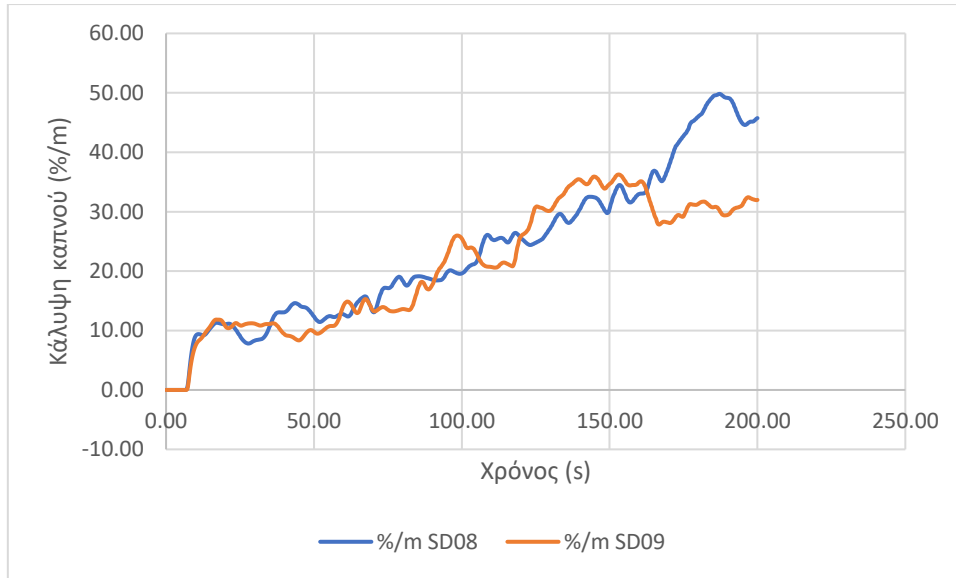


Διάγραμμα 22. Απόκριση πρώτου ζεύγους ανιχνευτών καπνού που ήταν ρυθμισμένοι να ενεργοποιούνται για *obscuration threshold* 11.5%/m.

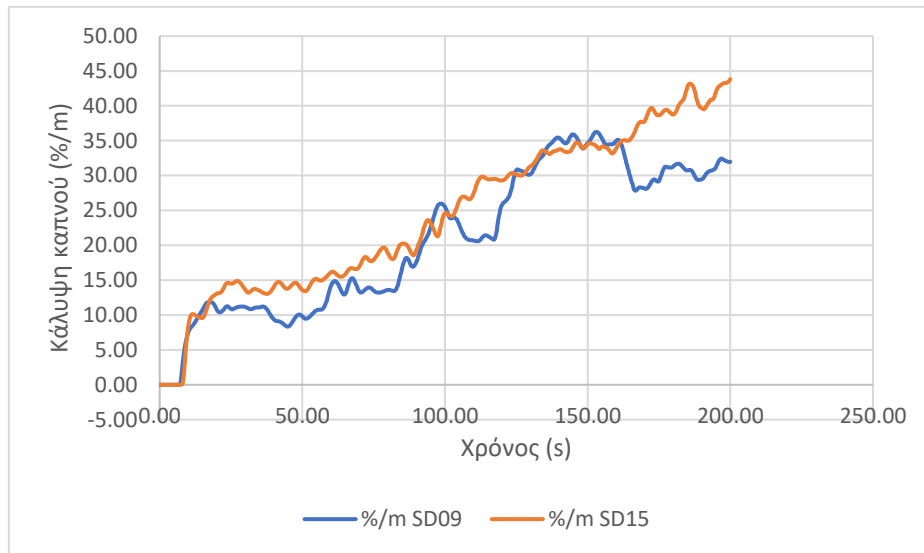
A2.



Διάγραμμα 23. Απόκριση πρώτου ζεύγους ανιχνευτών θερμότητας.

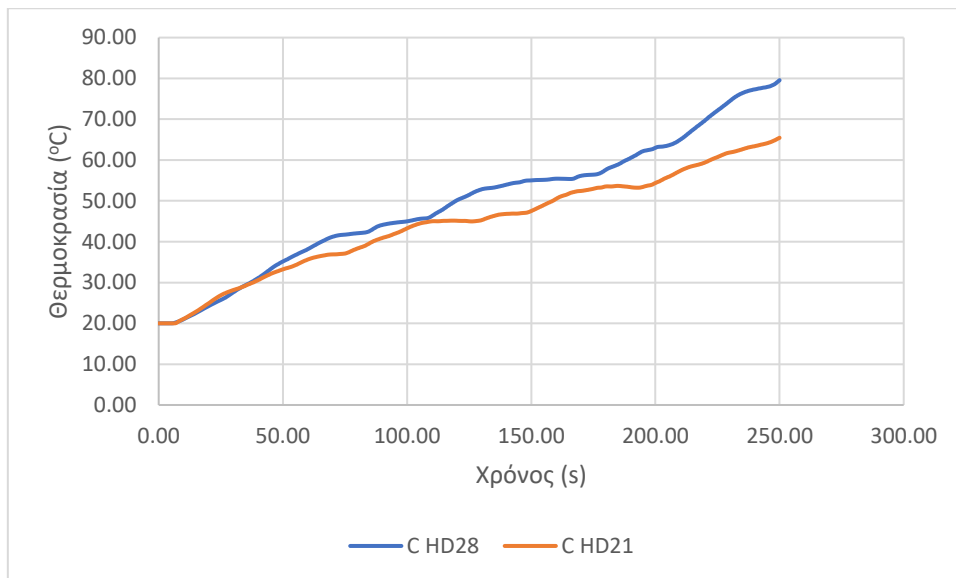


Διάγραμμα 24.Απόκριση πρώτου ζεύγους ανιχνευτών καπνού που ήταν ρυθμισμένοι να ενεργοποιούνται για *obscuratation threshold* 3.28%/m.

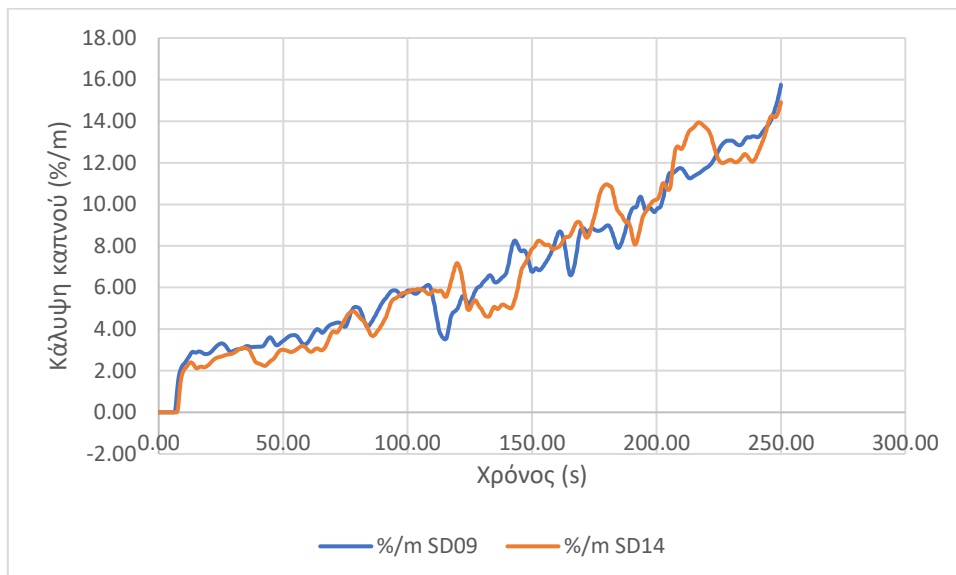


Διάγραμμα 25.Απόκριση πρώτου ζεύγους ανιχνευτών καπνού που ήταν ρυθμισμένοι να ενεργοποιούνται για *obscuratation threshold* 11.5%/m.

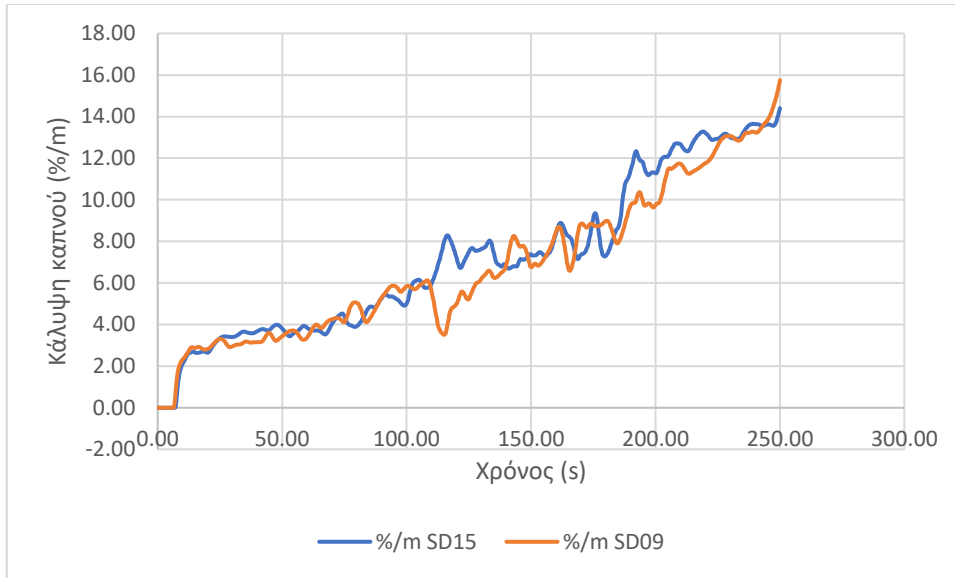
A3.



Διάγραμμα 26. Απόκριση πρώτου ζεύγους ανιχνευτών θερμότητας.

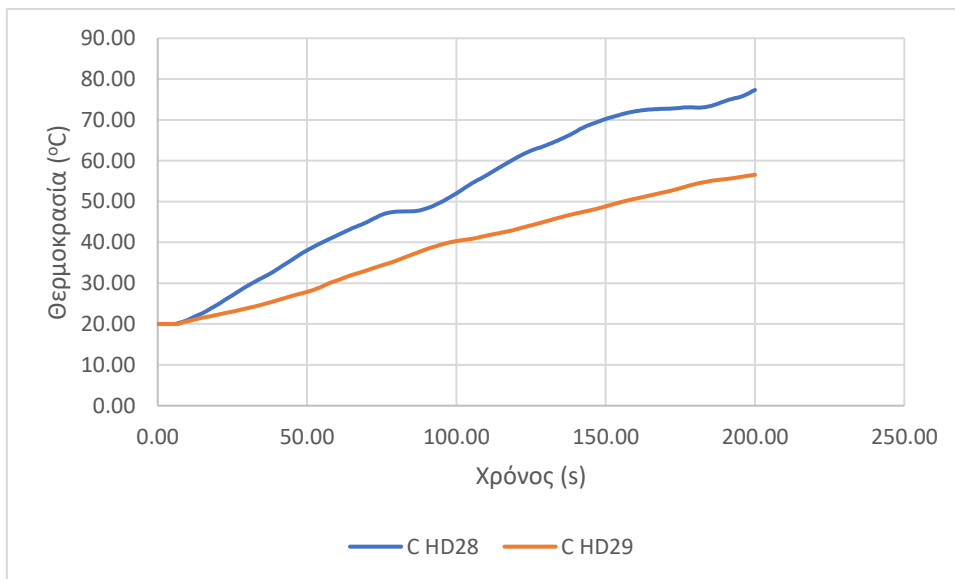


Διάγραμμα 27. Απόκριση πρώτου ζεύγους ανιχνευτών καπνού που ήταν ρυθμισμένοι να ενεργοποιούνται για obscuration threshold 3.28%/m.

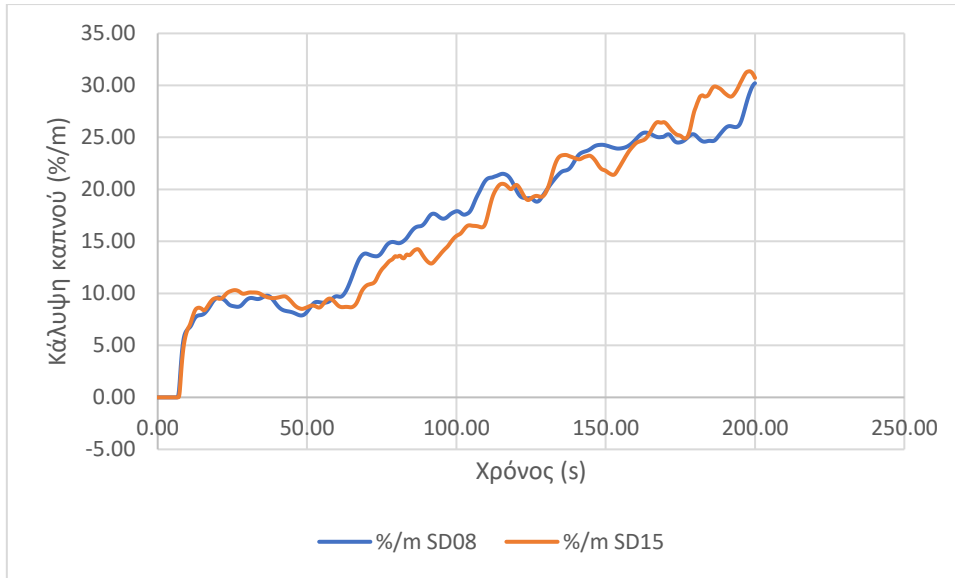


Διάγραμμα 28. Απόκριση πρώτου ζεύγους ανιχνευτών καπνού που ήταν ρυθμισμένοι να ενεργοποιούνται για *obscuration threshold* 11.5%/m.

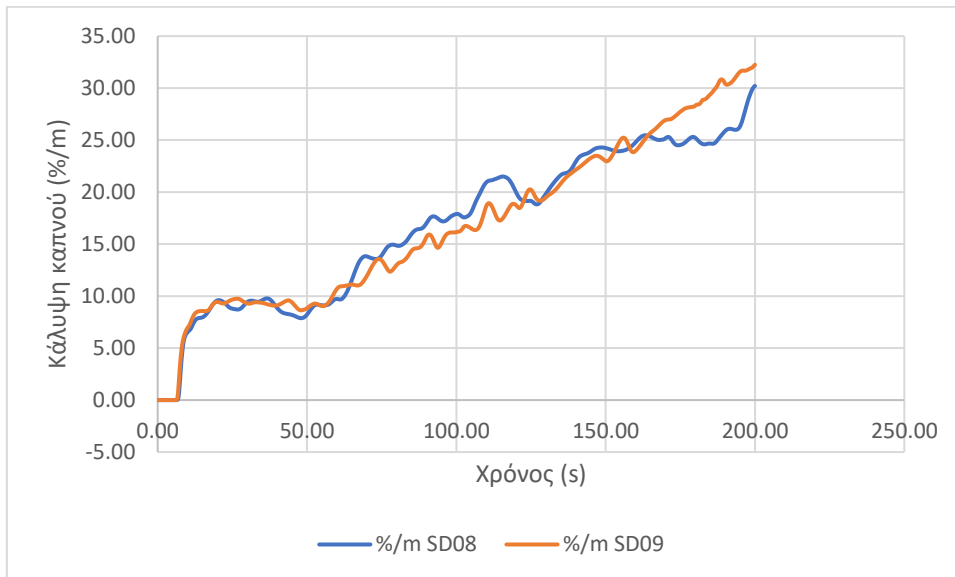
A4.



Διάγραμμα 29. Απόκριση πρώτου ζεύγους ανιχνευτών θερμότητας.



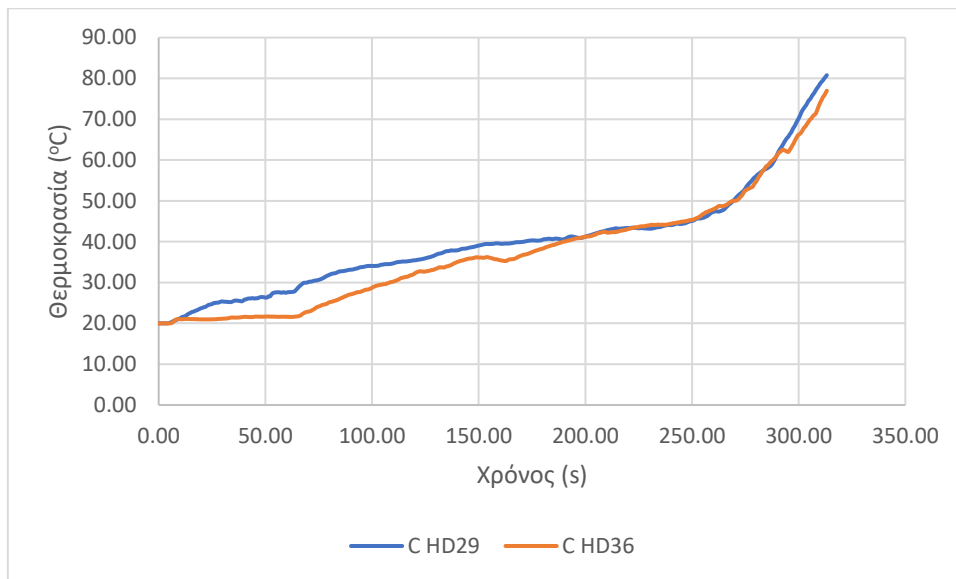
Διάγραμμα 30. Απόκριση πρώτου ζεύγους ανιχνευτών καπνού που ήταν ρυθμισμένοι να ενεργοποιούνται για *obscuration threshold* 3.28%/m.



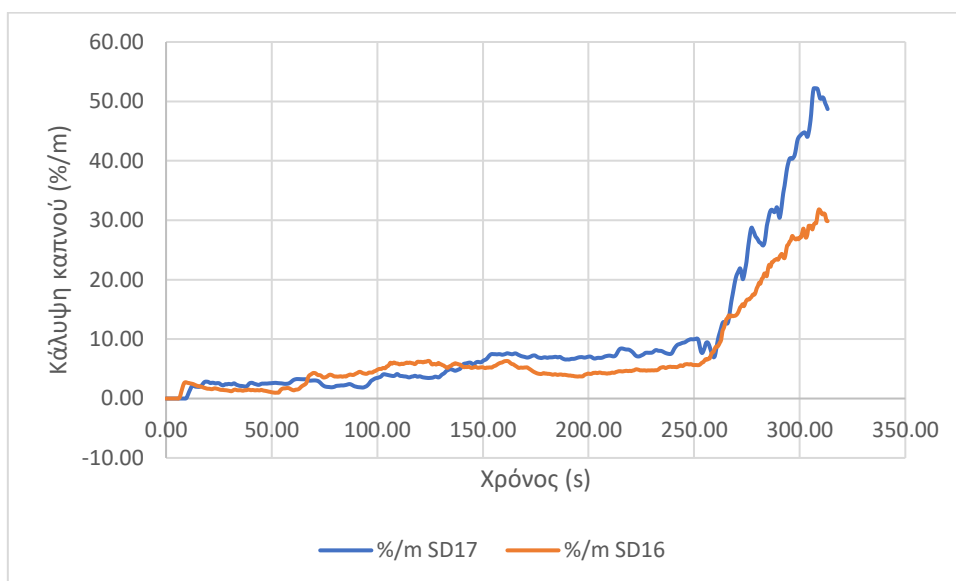
Διάγραμμα 31. Απόκριση πρώτου ζεύγους ανιχνευτών καπνού που ήταν ρυθμισμένοι να ενεργοποιούνται για *obscuration threshold* 11.5%/m.

Β' Ομάδα προσομοιώσεων

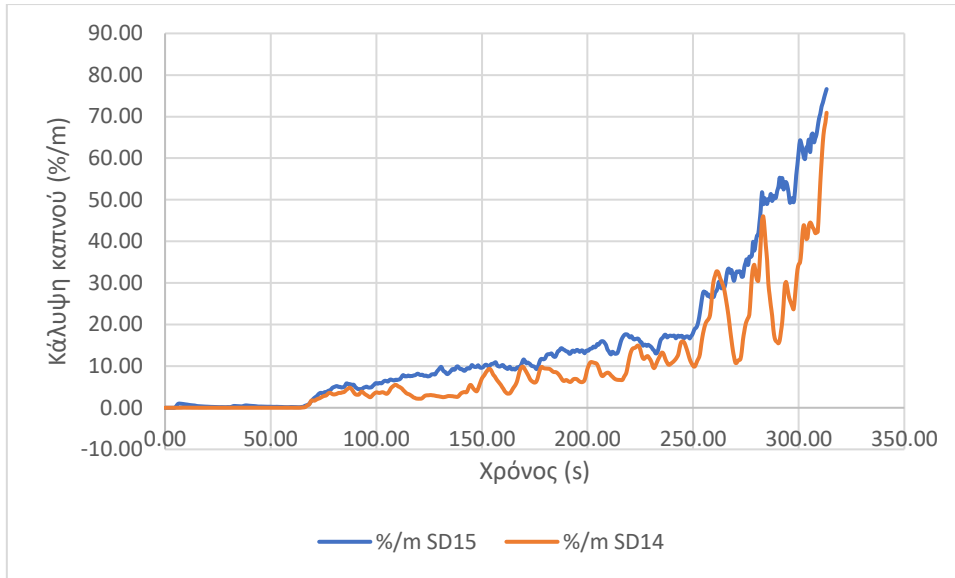
B1.



Διάγραμμα 32. Απόκριση πρώτου ζεύγους ανιχνευτών θερμότητας.

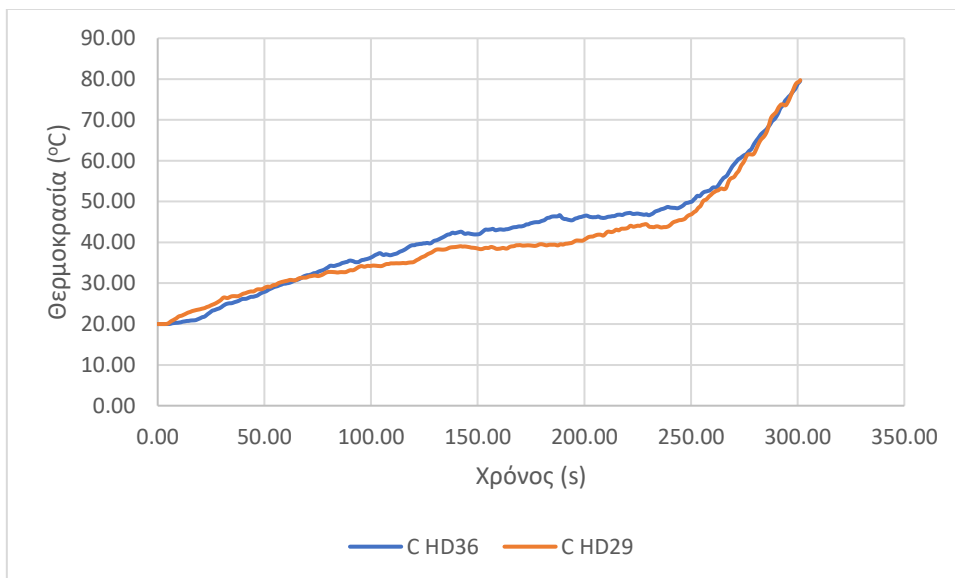


Διάγραμμα 33. Απόκριση πρώτου ζεύγους ανιχνευτών καπνού που ήταν ρυθμισμένοι να ενεργοποιούνται για *obscuration threshold* 3.28%/m.

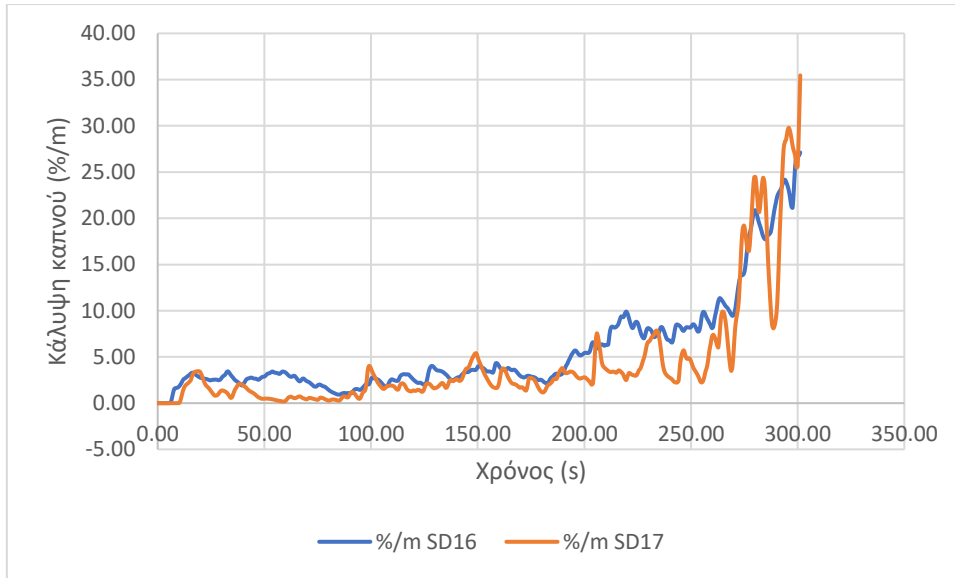


Διάγραμμα 34. Απόκριση πρώτου ζεύγους ανιχνευτών καπνού που ήταν ρυθμισμένοι να ενεργοποιούνται για *obscuratation threshold* 11.5%/m.

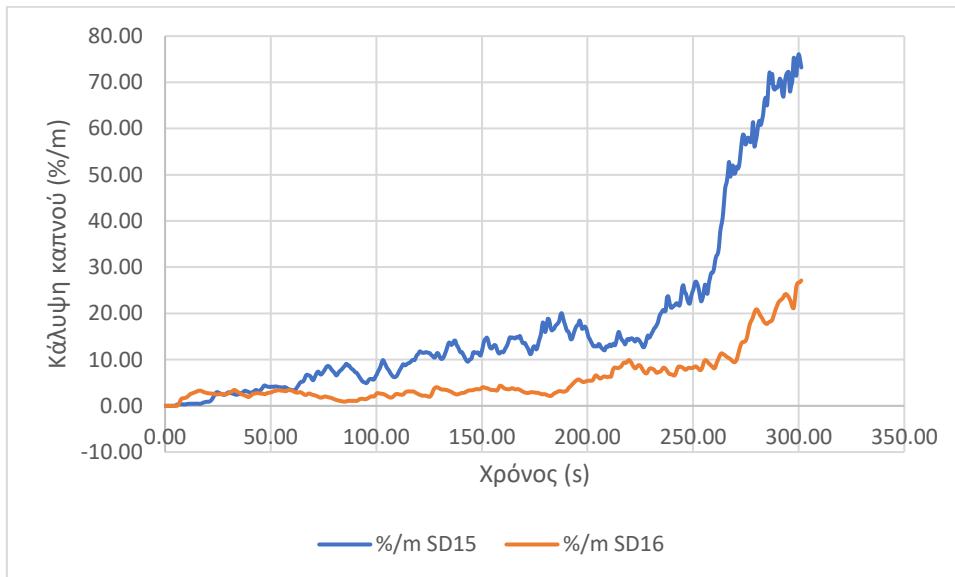
B2.



Διάγραμμα 35. Απόκριση πρώτου ζεύγους ανιχνευτών θερμότητας.



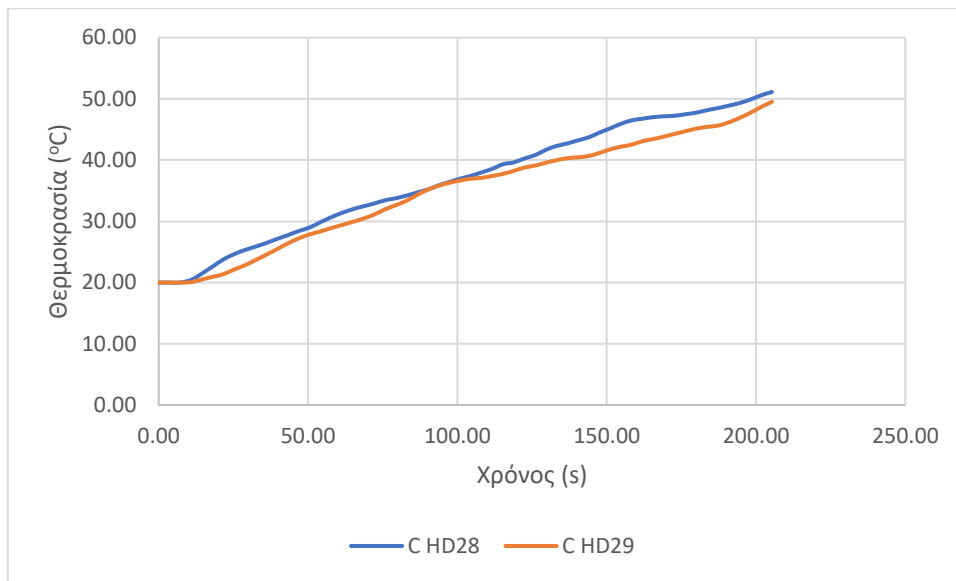
Διάγραμμα 36. Απόκριση πρώτου ζεύγους ανιχνευτών καπνού που ήταν ρυθμισμένοι να ενεργοποιούνται για *obscuration threshold* 3.28%/m.



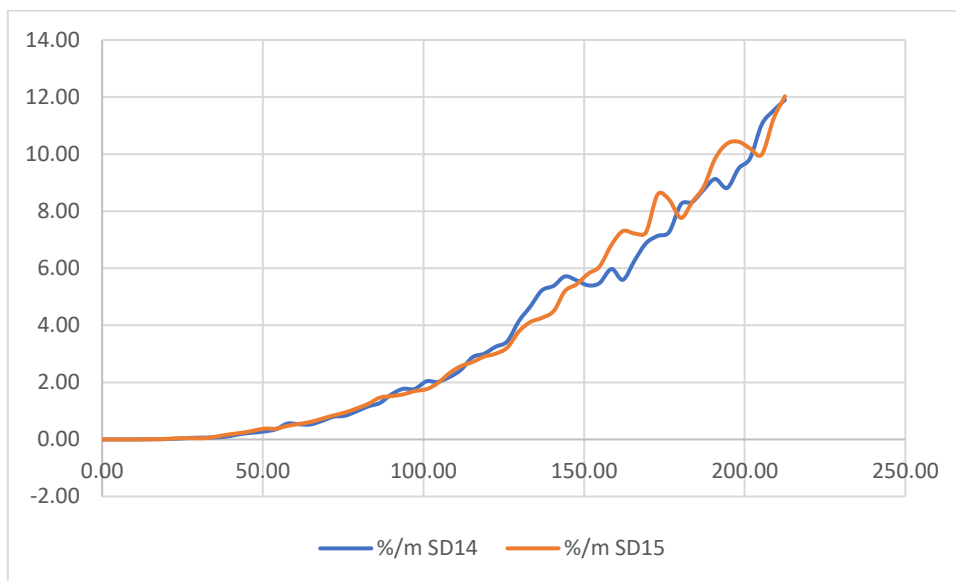
Διάγραμμα 37. Απόκριση πρώτου ζεύγους ανιχνευτών καπνού που ήταν ρυθμισμένοι να ενεργοποιούνται για *obscuration threshold* 11.5%/m.

Γ' Ομάδα προσομοιώσεων

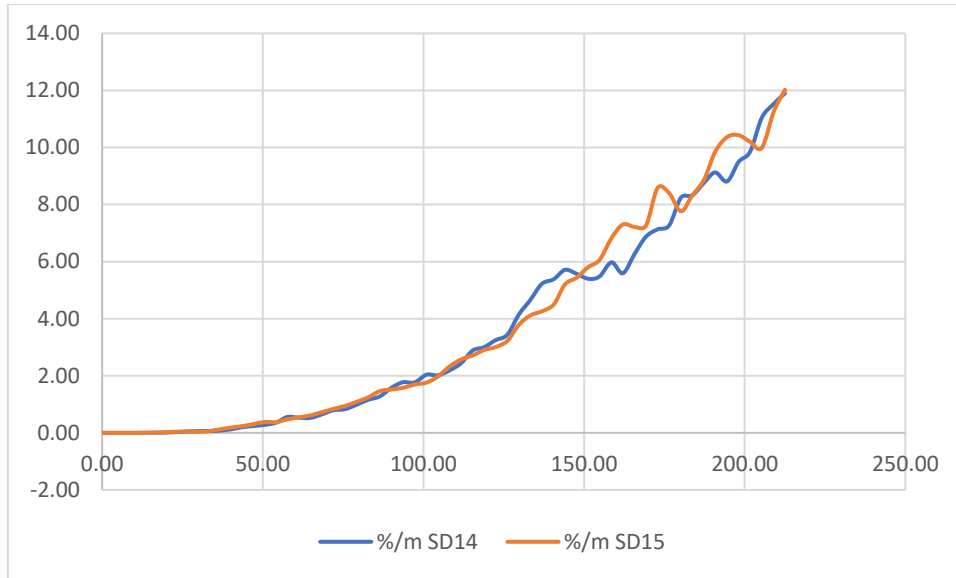
Γ1.



Διάγραμμα 38. Απόκριση πρώτου ζεύγους ανιχνευτών θερμότητας.

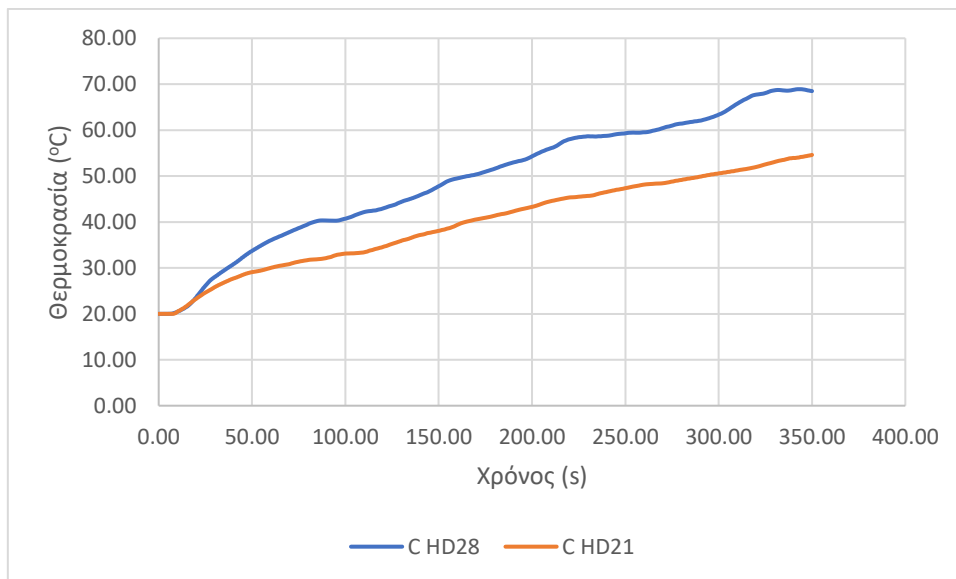


Διάγραμμα 39. Απόκριση πρώτου ζεύγους ανιχνευτών καπνού που ήταν ρυθμισμένοι να ενεργοποιούνται για obscuration threshold 3.28%/m.

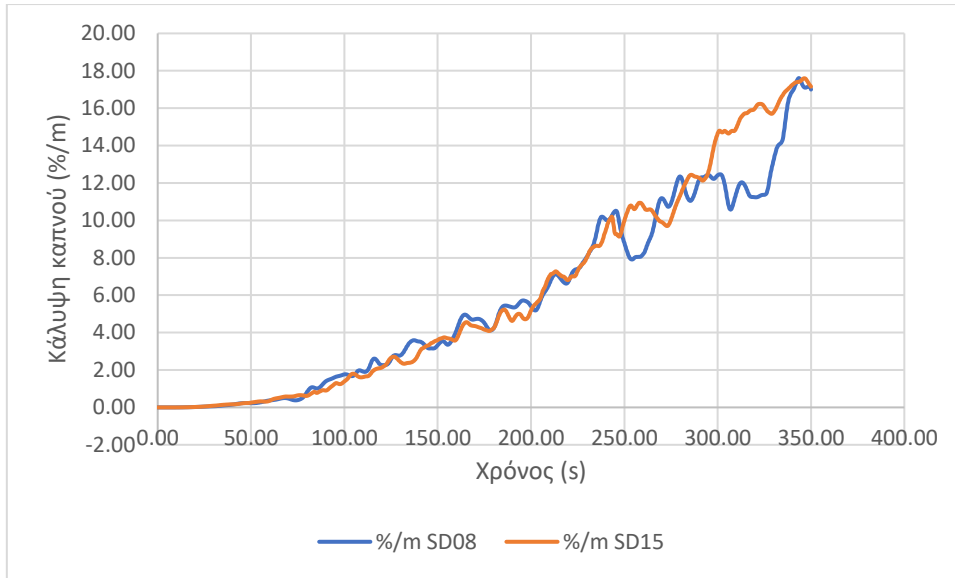


Διάγραμμα 40. Απόκριση πρώτου ζεύγους ανιχνευτών καπνού που ήταν ρυθμισμένοι να ενεργοποιούνται για *obscuratation threshold* 11.5%/m.

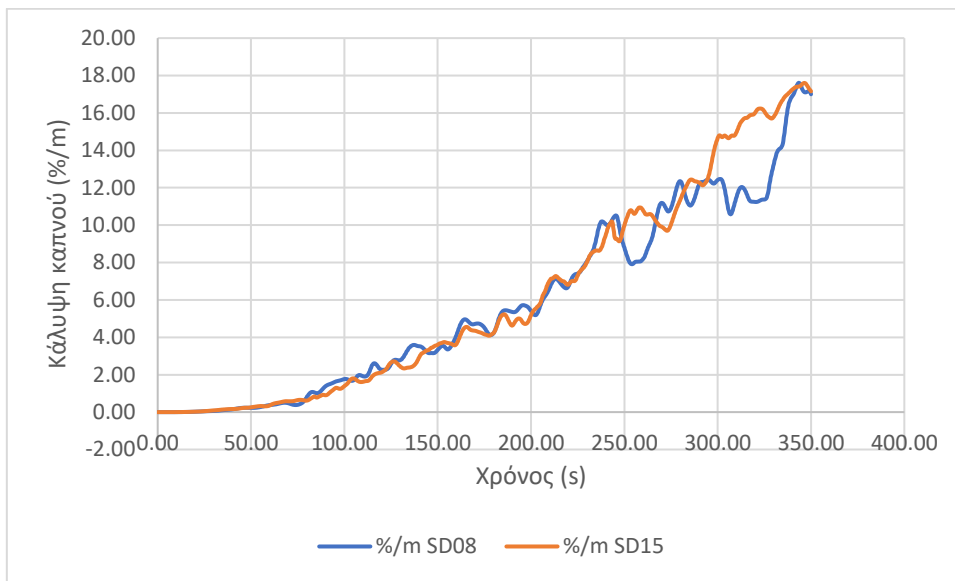
Γ2.



Διάγραμμα 41. Απόκριση πρώτου ζεύγους ανιχνευτών θερμότητας.



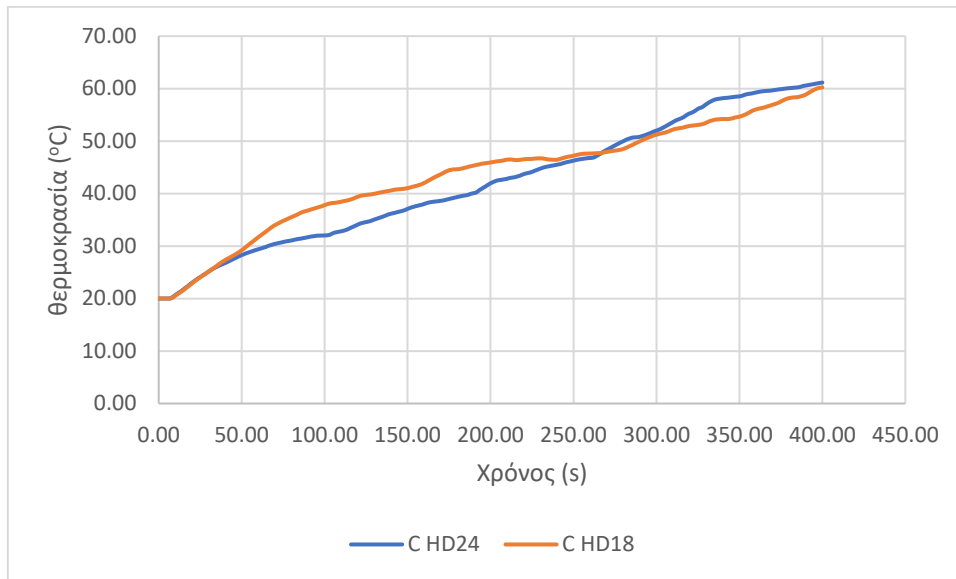
Διάγραμμα 42. Απόκριση πρώτου ζεύγους ανιχνευτών καπνού που ήταν ρυθμισμένοι να ενεργοποιούνται για obscuration threshold 3.28%/m.



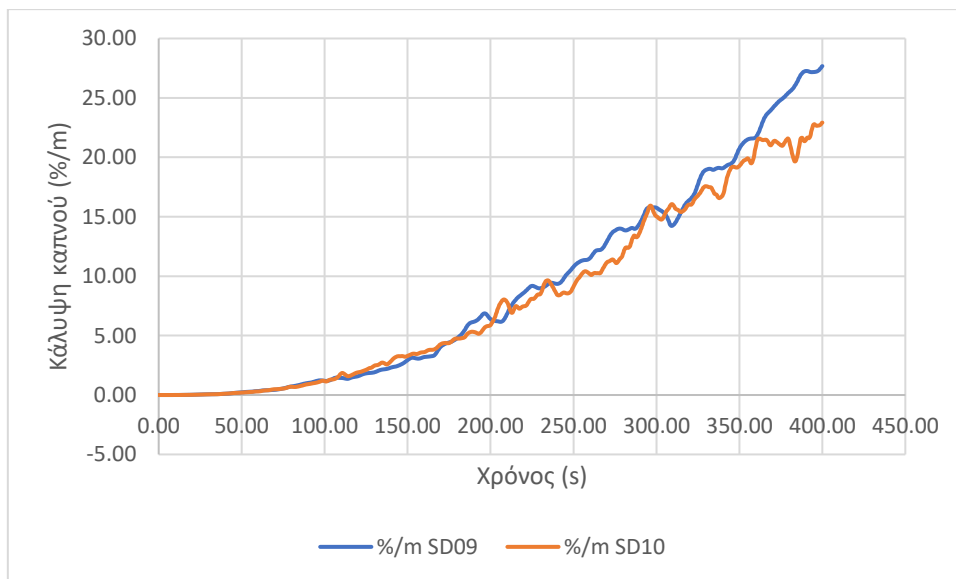
Διάγραμμα 43. Απόκριση πρώτου ζεύγους ανιχνευτών καπνού που ήταν ρυθμισμένοι να ενεργοποιούνται για obscuration threshold 11.5%/m.

Δ' Ομάδα Προσομοιώσεων

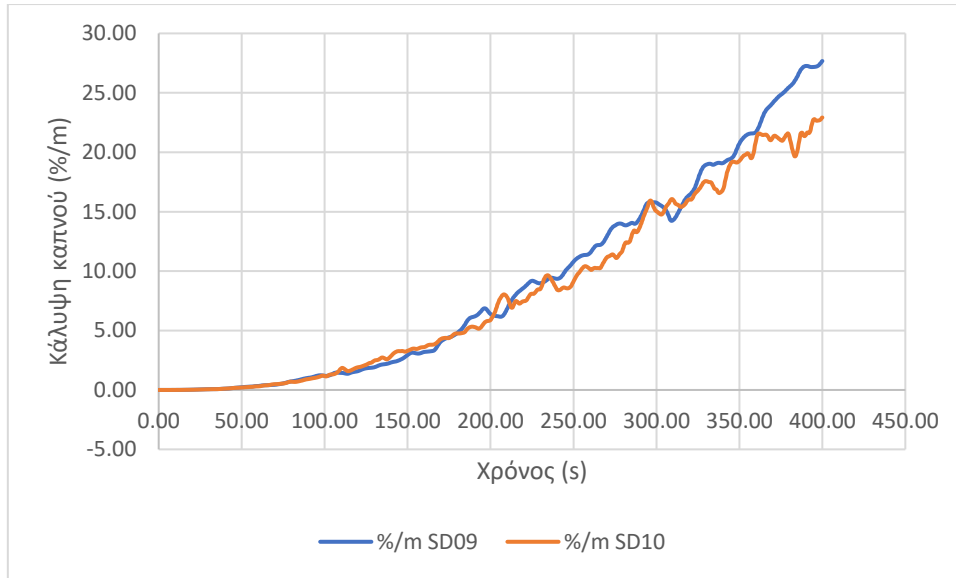
Δ.



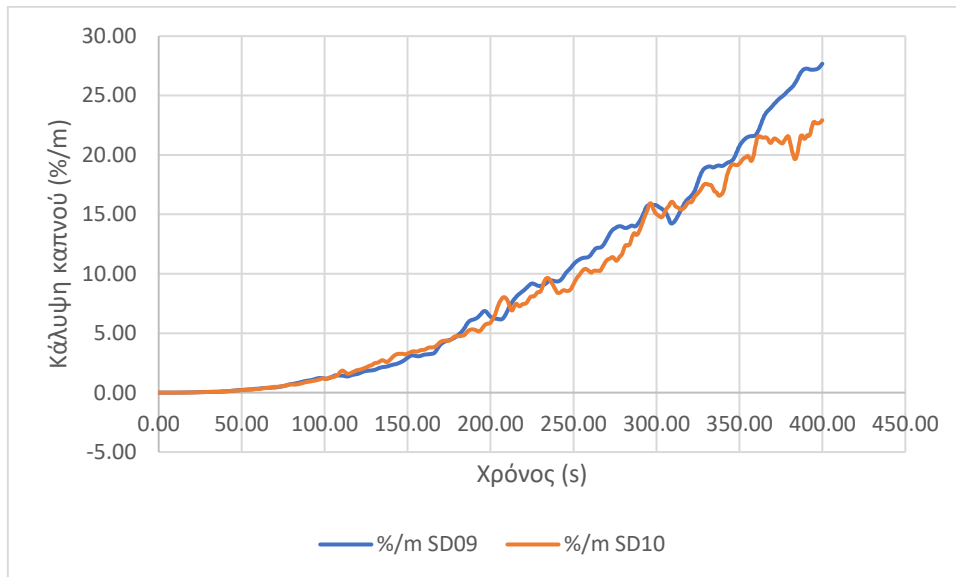
Διάγραμμα 44. Απόκριση πρώτου ζεύγους ανιχνευτών θερμότητας.



Διάγραμμα 45. Απόκριση πρώτου ζεύγους ανιχνευτών καπνού που ήταν ρυθμισμένοι να ενεργοποιούνται για *obscuration threshold* 3.28%/m.



Διάγραμμα 46. Απόκριση πρώτου ζεύγους ανιχνευτών καπνού που ήταν ρυθμισμένοι να ενεργοποιούνται για *obscuration threshold* 11.5%/m.



Διάγραμμα 47. Απόκριση πρώτου ζεύγους ανιχνευτών καπνού που ήταν ρυθμισμένοι να ενεργοποιούνται για *obscuration threshold* 6.5%/m.