



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

**Η ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΙ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ
ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΙΣ ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΑΣΤΙΚΟΥ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΥΣΤΡΑΤΙΟΣ ΜΑΝΤΖΩΡΟΣ

Επιβλέπων : Δημήτριος Μανωλάκος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2023

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS

SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING

SECTION OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**THE BEHAVIOR AND EFFECT OF MODERN BUILDING
MATERIALS ON URBAN FIRES**

THESIS

EFSTRATIOS MANTZOROS

ADVISOR: Dimitrios Manolakos
Professor N.T.U.A.

Athens, June 2023

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η μελέτη του τρόπου με τον οποίο τα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται στις ανθρωπογενείς κατασκευές της εποχής μας αλληλοεπιδρούν και συμπεριφέρονται κατά το φαινόμενο της πυρκαγιάς, καθώς και ο τρόπος με τον οποίο ακόμα και τα ίδια συμμετέχουν στο περίπλοκο αυτό φαινόμενο.

Στην εργασία αυτή θα προσπαθήσουμε να παρουσιάσουμε την συμπεριφορά των σύγχρονων δομικών υλικών σε συνθήκες πυρκαγιάς, ιδίως όπως αυτά χρησιμοποιούνται σήμερα, την μεταξύ τους αλληλεπίδραση και τους κινδύνους που το καθένα εγκυμονεί. Παράλληλα, θα δοθεί έμφαση στην παρουσίαση παραδειγμάτων και κανόνων που μπορούν να βοηθήσουν το έργο του σύγχρονου πυροσβεστικού υπαλλήλου στο πεδίο, μέσω της εφαρμογής της θεωρίας της αντοχής υλικών και της οικοδομικής σε πρακτική βάση και με γνώμονα τις συνθήκες που παρουσιάζονται σε μία αστική πυρκαγιά.

Στα κεφάλαια που ακολουθούν, θα παρουσιάσουμε ορισμένα εισαγωγικά στοιχεία για την καύση των στερεών υλικών, στα οποία και ανήκουν τα δομικά υλικά καθώς και τα στάδια των αστικών πυρκαγιών, καθότι αυτά είναι κρίσιμα για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τις συνθήκες που επικρατούν σε μια αστική πυρκαγιά. Στη συνέχεια θα αναφερθούμε στη συμπεριφορά του οπλισμένου σκυροδέματος, του κατασκευαστικού χάλυβα, της δομικής ξυλείας και των μονωτικών υλικών που αποτελούν και τα ευρέως χρησιμοποιούμενα δομικά υλικά στις ως άνω συνθήκες και θα εμβαθύνουμε περαιτέρω στα χαρακτηριστικά, θετικά και αρνητικά εκάστου. Τέλος, θα συνοψίσουμε τα ευρήματα της εργασίας μας και θα προσπαθήσουμε να δώσουμε κατευθυντήριες γραμμές για περαιτέρω επιστημονική έρευνα.

Θεματική περιοχή: Αντοχή υλικών

Λέξεις-κλειδιά: δομικά υλικά, αστικές πυρκαγιές, πυρόσβεση, αντοχή

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Abstract

The scope of this thesis is the study and analysis of the way materials are used in man-made constructions of the modern world and how these materials behave during an urban fire, as well as to point out their own role in this complicated phenomenon.

Therefore, in this work we will try and present the behavior of modern materials under fire conditions, especially those used in modern structures, the interaction between them as well as the risk that each and every one of the possesses. At the same time, emphasis will be put on presenting real world examples and rules that may assists modern firefighters in field operations, using material and building technology theories adapted for fire environments.

In the following chapters we will present some essential knowledge regarding combustion of solid materials, since building materials fall under this category, as well as present the stages of a modern urban fire, since these basic subjects are essential for drawing conclusions regarding the conditions modern materials face during an urban fire. After that, we will discuss the behavior of reinforced concrete, structural steel, timber and insulation materials, since these are the most widely used materials nowadays in building construction and we will delve into the characteristics, both positive and negative, for each of these. Finally, we will summarize the finding of our work and we will try to provide guidelines for further research.

Topic: Mechanics of materials

Keywords: building materials, urban fires, firefighting, strength

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Ευχαριστίες

Η ιδέα για την παρούσα διπλωματική εργασία βασίστηκε σε πρόταση του συναδέλφου και πυροσβέστη Αριστείδη Κόντου, τον οποίο και ευχαριστώ θερμά τόσο για την ιδέα αυτή καθ' αυτή όσο και για την αμέριστη βοήθεια που μου προσέφερε κατά την εκπόνησή της, το πλούσιο φωτογραφικό υλικό και τις παρατηρήσεις του. Ελπίζω αυτή να αποτελέσει σύμμαχο στην προσπάθειά του.

Βασικός πυλώνας της προσπάθειας μου, η οποία και ολοκληρώνεται με την παρούσα διπλωματική εργασία, αποτελεί η οικογένεια μου, η οποία και στάθηκε αρωγός σε αυτή, παρέχοντας αμέριστη στήριξη, οικονομική και ψυχολογική, στην οποία και αφιερώνω την παρούσα.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους συναδέλφους μου για την ανταλλαγή απόψεων και γνώσεων, τόσο στα πλαίσια της παρούσης όσο και γενικότερα για την αгаστή συνεργασία που είχαμε κατά τη διάρκεια των σπουδών.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. καθηγητή Μανωλάκο Δημήτριο για την επίβλεψη της διπλωματικής μου εργασίας και την βοήθεια του.

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Πίνακας περιεχομένων

1	Εισαγωγή	1
2	Στοιχεία Καύσης και Πυρκαγιάς.....	5
2.1	Η καύση των στερεών υλικών.....	5
2.2	Τα στάδια της πυρκαγιάς	9
2.3	Δείκτες συμπεριφοράς πυρκαγιάς	15
2.4	Παράγοντες και εκτίμηση κινδύνου στις αστικές πυρκαγιές.....	19
3	Οπλισμένο Σκυρόδεμα.....	23
3.1	Εισαγωγή.....	23
3.2	Οι ιδιότητες του οπλισμένου σκυροδέματος.....	24
3.3	Μεταφορά θερμότητας και ιδιότητες.....	26
3.4	Υπολογισμός καμπτικής αντοχής αμφιέριστης δοκού	30
3.5	Ενδείξεις αστοχίας σκυροδέματος σε συνθήκες πυρκαγιάς.....	32
3.6	Συνοψίζοντας για τον πυροσβεστικό υπάλληλο	36
4	Κατασκευαστικός Χάλυβας	39
4.1	Εισαγωγή.....	39
4.2	Οι ιδιότητες του χάλυβα.....	40
4.3	Η συμπεριφορά του δομικού χάλυβα σε κανονικές συνθήκες.....	43
4.4	Η συμπεριφορά του δομικού χάλυβα σε συνθήκες πυρκαγιάς	45
4.5	Μέθοδοι προστασίας έναντι πυρκαγιάς	50
4.6	Ενδείξεις αστοχίας χάλυβα σε συνθήκες πυρκαγιάς.....	52
4.7	Συνοψίζοντας για τον πυροσβεστικό υπάλληλο	56
5	Δομική Ξυλεία.....	59
5.1	Εισαγωγή.....	59
5.2	Η απανθράκωση του ξύλου.....	60

5.3	Υπολογισμός αντοχής σύμφωνα με το μοντέλο μειωμένων ιδιοτήτων	62
5.4	Υπολογισμός αντοχής σύμφωνα με το μοντέλο μειωμένης διατομής	64
5.5	Συνδέσεις και συγκολλητικά υλικά.....	65
5.6	Μέθοδοι προστασίας έναντι πυρκαγιάς	67
5.7	Ενδείξεις αστοχίας δομικής ξυλείας σε συνθήκες πυρκαγιάς.....	69
5.8	Συνοψίζοντας για τον πυροσβεστικό υπάλληλο	71
6	Θερμομονωτικά Υλικά	73
6.1	Εισαγωγή.....	73
6.2	Θερμομονωτικά υλικά.....	75
6.2.1	<i>Θερμομονωτικά υλικά από τσιμεντοκονία.....</i>	<i>75</i>
6.2.2	<i>Θερμομονωτικά υλικά από ορυκτές ίνες</i>	<i>76</i>
6.2.3	<i>Θερμομονωτικά από αφρούς πλαστικού.....</i>	<i>77</i>
6.3	Μηχανισμός καύσης και κίνδυνοι.....	78
6.3.1	<i>Αυτοσυντηρούμενη καύση (οξειδωτική πυρόλυση)</i>	<i>79</i>
6.3.2	<i>Υλικά αφρών πλαστικού</i>	<i>81</i>
6.4	Αέρια της καύσης.....	82
6.5	Παραδείγματα πυρκαγιών εξαιτίας των υλικών αυτών	85
6.6	Συνοψίζοντας για τον πυροσβεστικό υπάλληλο	86
7	Επίλογος.....	89
	Βιβλιογραφία	93

Κατάλογος Σχημάτων

Εικόνα 1: Η καύση στερεού σώματος	6
Εικόνα 2: Όρια ευφλεκτότητας για καύσιμο	8
Εικόνα 3: Στάδια και εξέλιξη πυρκαγιάς με βάση το χρόνο.....	15
Εικόνα 4: Τα φαινόμενα flashover και backdraft	15
Εικόνα 5: Εκτίμηση κινδύνου σε μια αστική πυρκαγιά.....	22
Εικόνα 6: Είδη χάλυβα και αντοχή τους συναρτήσει της θερμοκρασίας	25
Εικόνα 7: Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος με αδρανή πυριτικής φύσης συναρτήσει της θερμοκρασίας.....	25
Εικόνα 8: Χρόνος για να ξεπεραστούν τα κατά ASTM E119 όρια σε έναν τοίχο από σκυρόδεμα συναρτήσει του πάχους αυτού	27
Εικόνα 9: Αντοχή πλάκας επικαλυμμένης με ελαφρά κονία	28
Εικόνα 10: Κατανομή θερμοκρασίας στο εσωτερικό δοκού 250x300mm μετά από 1 και 3 ώρες	29
Εικόνα 11: Αμφιέριστη δοκός με κατανεμημένο φορτίο q	30
Εικόνα 12: Καμπτική ροπή συναρτήσει του μήκους της ράβδου.....	32
Εικόνα 13: Εμφανείς βλάβες σε δομικά στοιχεία εξαιτίας πυρκαγιάς	33
Εικόνα 14: Βλάβη σε δοκό με αποκάλυψη οπλισμού εντός πειραματικής διάταξης	34
Εικόνα 15: Διαφορά μεταξύ σημαντικής και μη αποκόλλησης.....	35
Εικόνα 16: Αποχρωματισμός σκυροδέματος εξαιτίας πυρκαγιάς	36
Εικόνα 17: Ποσοστό μέτρου ελαστικότητας και ορίου διαρροής συναρτήσει της θερμοκρασίας.....	40
Εικόνα 18: Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων για κοινό χάλυβα	41
Εικόνα 19: Σχετική παραμόρφωση συναρτήσει της θερμοκρασίας	42
Εικόνα 20: Πλευρική στρέψη και κάμψη	44
Εικόνα 21: Θερμική παραμόρφωση δοκού.....	46
Εικόνα 22: Μηχανική και θερμική παραμόρφωση.....	47
Εικόνα 23: Η περίπτωση της απλής στήριξης και της ημι-άκαμπτης.....	47
Εικόνα 24: Σύγκριση αντοχής σε φωτιά απλής και ημι-άκαμπτης στήριξης	48
Εικόνα 25: Μοντελοποίηση υποστυλώματος	49
Εικόνα 26: Φορτίο υποστυλώματος συναρτήσει της θερμοκρασίας αυτού	50
Εικόνα 27: Σύστημα ψύξης με νερό των δομικών στοιχείων.....	52

Εικόνα 28: Αστοχία δοκού οροφής σε πλευρική στρέψη και κάμψη	53
Εικόνα 29: Υπερβολικό βέλος κάμψης δοκού	54
Εικόνα 30: Το φαινόμενο plastic hinge	55
Εικόνα 31: Σημάδια αστοχίας υποστυλωμάτων	55
Εικόνα 32: Διατομή ξύλου υπό καύση και ζώνες αυτής [34].....	60
Εικόνα 33: Ζώνες διάσπασης τομής ξύλου.....	61
Εικόνα 34: Χαρακτηριστικά του ξύλου συναρτήσει του βάθους σε συνθήκες πυρκαγιάς	62
Εικόνα 35: Χαρακτηριστική αστοχία μεταλλικού συνδέσμου δομικής ξυλείας	70
Εικόνα 36: Κατάρρευση ξύλινης κατασκευής με ακέραιες δοκούς	71
Εικόνα 37: Αυτόκλειστο κυψελωτό σκυρόδεμα.....	76
Εικόνα 38: Παράδειγμα καύσης πετροβάμβακα σε μόνωση καμινάδας	79
Εικόνα 39: Παραδείγματα πυρόλυσης σε κάρβουνο (αριστερά) και πολυουρεθάνη (δεξιά).....	80
Εικόνα 40: Καύση εξηλασμένης πολυστερίνης.....	81

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Κατηγοριοποίηση πυρκαγιών κατά ISO 19706	10
Πίνακας 2: Δείκτες πυρκαγιάς ανά στάδιο αυτής.....	17
Πίνακας 3: Θερμοκρασία πυραντοχής ανά υλικό ορυκτής ίνας.....	77
Πίνακας 4: Επικίνδυνα αέρια της καύσης ανά συνθήκη και συγκέντρωση τοξικότητας αυτών) 83	
Πίνακας 5: Παραγόμενες ποσότητες επικίνδυνων αερίων σε οξειδωτική πυρόλυση	83
Πίνακας 6: Παραγωγή τοξικών προϊόντων ανά υλικό και συνθήκες καύσης [9].....	84

1

Εισαγωγή

Η πορεία πολλών πολιτισμών μπορεί να αναλυθεί με βάση την κατανόησή τους περί της φωτιάς και της χρήσης αυτής. Για τους αρχαίους πολιτισμούς, η φωτιά ήταν κάτι το μυστηριώδες και ακατανόητο και συνεπώς προκαλούσε τρόμο και ταυτόχρονα θρησκευτική λατρεία. Παράλληλα, όσα μέλη των πολιτισμών αυτών ήλεγχαν κατά κάποιο τρόπο τη φωτιά είχαν αυξημένη ισχύ και δικαιοδοσία. Η τάση αυτή άλλαξε άρδην όταν ο Εμπεδοκλής (490-430 π.Χ.) διατύπωσε την περίφημη άποψή του ότι η φωτιά αποτελεί ένα από τα τέσσερα στοιχεία που αποτελούν όλη την ύλη: γη, ύδωρ, αέρας και φωτιά.

Η άποψη αυτή διατηρήθηκε μέχρι και την Αναγέννηση και την εποχή του διαφωτισμού (15ος – 17ος αιώνας μ.Χ). Κατά την περίοδο αυτή έχουμε ουσιαστικά τις πρώτες επιστημονικές μελέτες της φύσης της ύλης, της ενέργειας αλλά και της καύσης ως φαινομένου. Σημείο αναφοράς αποτελεί ο Carnot, ο οποίος θεωρείται ο «πατέρας» της θερμοδυναμικής και διατύπωσε το 1824 στο βιβλίο του «Σκέψεις επί της κινητήριας δυνάμεως του πυρός» τη βάση για τις θερμικές μηχανές και ουσιαστικά έθεσε τις βάσεις για την περαιτέρω ανάλυση της καύσης ως φαινομένου αλλά και την έλευση της βιομηχανικής επανάστασης.

Σήμερα λοιπόν, τα αποτελέσματα της θεωρίας της καύσης είναι εμφανή παντού γύρω μας και κατά βάση αποτελούν ένα από τα σημεία αναφοράς για το επίπεδο ζωής που απολαμβάνουμε.

Χάρη στην ελεγχόμενη καύση απολαμβάνουμε φθηνή και άμεσα διαθέσιμη ενέργεια, αποτελεσματική και γρήγορη μεταφορά τόσο στην επιφάνεια της γης όσο και κάτω και πάνω από αυτήν, παράγουμε φαγητό και ζεσταίνουμε τα σπίτια μας, παράγουμε αγαθά φθηνότερα και με επιθυμητές ιδιότητες, διαχειριζόμαστε απόβλητα κτλ.

Όμως, πέραν τις ελεγχόμενης καύσης, η οποία αποτελεί θεμέλιο λίθο της σημερινής κοινωνίας, υπάρχει προφανώς και το ζήτημα της μη ελεγχόμενης καύσης. Πράγματι, η φωτιά είναι πολλές φορές δίπλα μας και αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητάς μας, για παράδειγμα όταν μαγειρεύουμε σε μια εστία ή όταν ζεσταινόμαστε στο τζάκι του σπιτιού μας ή σε μία σόμπα, με αποτέλεσμα να εκτιθέμεθα συχνά στους κινδύνους που απορρέουν από αυτή, ενώ παράλληλα η διαρκής αυτή χρήση και αλληλεπίδραση μαζί της έχει προκαλέσει μια πολύ σημαντική εξοικείωση με αποτέλεσμα πολλές να αγνοούμε ή να υποτιμούμε τους κινδύνους αυτής.

Το φαινόμενο αυτό της μη ελεγχόμενης καύσης το ονομάζουμε πυρκαγιά. Η διαφορά μεταξύ πυρκαγιάς και φωτιάς λοιπόν έγκειται στην ταχύτητα εξάπλωσης, στην ένταση και στις συνέπειες του φαινομένου. Οι πυρκαγιές οι οποίες εκδηλώνονται σε κατοικημένες περιοχές και πόλεις ονομάζονται αστικές πυρκαγιές. Κατά το παρελθόν οι αστικές πυρκαγιές προκαλούσαν πολλά θύματα και είχαν ως συνέπεια ακόμα και την ολοκληρωτική καταστροφή μιας πόλης. Σήμερα, μία αστική πυρκαγιά μπορεί να αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά και να περιοριστεί στο κτίριο ή ακόμα και στο χώρο που εκδηλώθηκε. Αυτό οφείλεται στο σύγχρονο κανονιστικό πλαίσιο που περιβάλλει τα δομικά υλικά και τον σχεδιασμό κτιρίων αλλά και στις σύγχρονες πυροσβεστικές τακτικές που έχουν υιοθετηθεί.

Ο όρος δομικά υλικά λοιπόν, ή αλλιώς δομικά προϊόντα, αφορά κάθε υλικό το οποίο παράγεται με στόχο την ενσωμάτωσή του με μόνιμο τρόπο σε κατασκευαστικά έργα, όπως για παράδειγμα ένα κτίριο. Σήμερα όλα τα δομικά υλικά που χρησιμοποιούνται ακολουθούν τις Ευρωπαϊκές Οδηγίες Δομικών Προϊόντων με στόχο την βεβαίωση της καταλληλότητας αυτών με βάση την συμπεριφορά τους ως προς την φωτιά. Επιπροσθέτως, η κείμενη νομοθεσία θέτει απαιτήσεις για τον τρόπο κατασκευής των κτιρίων, κατά τέτοιο τρόπο ώστε αυτά να καθίστανται ασφαλή έναντι πυρκαγιάς, τόσο δομικά όσο και για τους ίδιους τους χρήστες του κτιρίου αλλά και για τα παρακείμενα κτίρια, μέσω του Κανονισμού Πυροπροστασίας Κτιρίων και των προτύπων που υιοθετεί. Εκτενέστερη ανάλυση του σύγχρονου κανονιστικού πλαισίου θα γίνει σε επόμενο κεφάλαιο.

Είναι λοιπόν προφανές ότι η επιλογή των δομικών υλικών και η συμπεριφορά αυτών διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην εξέλιξη μιας πυρκαγιάς. Τα σύγχρονα κτίρια καλούνται να καλύψουν απαιτήσεις όχι μόνο όσον αφορά την συμπεριφορά τους έναντι πυρκαγιάς αλλά και όσον αφορά την ενεργειακή τους συμπεριφορά, την αισθητική, την προστασία έναντι θορύβου, την αντισεισμική συμπεριφορά και άλλα. Έτσι, η τεχνολογία των υλικών εξελίσσεται διαρκώς όπως και ο τρόπος χρήσης τους, με σκοπό τη μείωση του κόστους, της αύξησης της ταχύτητας δόμησης και την αποτελεσματική ικανοποίηση όλων των παραπάνω απαιτήσεων.

Οι παραπάνω συνθήκες δημιουργούν λοιπόν ένα δύσκολο και επικίνδυνο περιβάλλον για τον σύγχρονο πυροσβέστη. Αυτό συμβαίνει διότι ναι μεν μπορούμε να ποσοτικοποιήσουμε και να κατηγοριοποιήσουμε ένα υλικό ανάλογα με το πως αυτό συμπεριφέρεται μεμονωμένα σε μια πυρκαγιά, όμως η συμπεριφορά του σε συνδυασμό με άλλα υλικά, η εκάστοτε υλοποίηση που έχει επιλεγεί για τη χρήση του υλικού αλλά και η κατάσταση στην οποία αυτό μεταβαίνει στην πλήρη εξέλιξη του φαινομένου αποτελούν αστάθμητους παράγοντες σε μία κατάσταση στην οποία ο σύγχρονος πυροσβέστης καλείται να επέμβει και να παράγει έργο, εξασφαλίζοντας την ασφάλεια του ίδιου και των συναδέλφων του αλλά και την ασφάλεια αυτών που καλείται να διασώσει.

Συνεπώς, ο σκοπός της εργασίας αυτής είναι ξεκάθαρος και ουσιαστικός. Θα καταβληθεί μια προσπάθεια να παρουσιαστούν τα βασικά στοιχεία των σύγχρονων δομικών υλικών και του τρόπου που αυτά αλληλοεπιδρούν με τη φωτιά. Στη συνέχεια, με τη χρήση απλών υπολογιστικών εργαλείων και παραδειγμάτων των φαινομένων που εκδηλώνονται στο εκάστοτε υλικό και με βάση τη χρήση που έχει επιλεγεί για αυτό, θα δοθούν στοιχεία και κατευθυντήριες γραμμές για τον τρόπο αλλά και τον χρόνο επέμβασης που έχει στη διάθεσή του το προσωπικό. Τέλος, θα παρουσιαστούν ορισμένα σημάδια στοιχεία που πρέπει να έχει υπόψη του κατά την επέμβαση με γνώμονα την ασφάλεια και την επιτυχία της επιχείρησης.

Η παρούσα εργασία είναι δομημένη σε 5 κεφάλαια. Ακολουθεί μια συνοπτική παρουσίαση των επιμέρους αυτών κεφαλαίων.

- **Κεφάλαιο 1:** Το κεφάλαιο αυτό αποτελεί την εισαγωγή της εργασίας.
- **Κεφάλαιο 2:** Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια εισαγωγή παρουσίαση βασικών εννοιών και γνώσεων που αφορούν την καύση στερεών υλικών καθώς και στην εξέλιξη και τα στάδια των αστικών πυρκαγιών.

- **Κεφάλαιο 3:** Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα στοιχεία που αφορούν τις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα. Γίνεται μια εισαγωγή στις ιδιότητες του οπλισμένου σκυροδέματος, στον τρόπο που αυτές επηρεάζονται εξαιτίας των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας και τέλος παρουσιάζεται ένας συνοπτικός υπολογισμός των αντοχών μιας αμφιέριστης δοκού σε κάμψη υπό συνθήκες πυρκαγιάς.
- **Κεφάλαιο 4:** Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα στοιχεία που αφορούν τις κατασκευές από κατασκευαστικό χάλυβα. Θα παρουσιαστούν οι ιδιότητες αυτού, η συμπεριφορά σε συνθήκες περιβάλλοντος καθώς και σε αντιδιαστολή αυτών υπό συνθήκες πυρκαγιάς και τέλος θα διατυπωθούν μέθοδοι προστασίας του κατασκευαστικού χάλυβα από τις αρνητικές επιπτώσεις της πυρκαγιάς.
- **Κεφάλαιο 5:** Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά στις ιδιότητες και τον τρόπο καύσης της δομικής ξυλείας. Επίσης, παρουσιάζονται τρόποι υπολογισμού των αντοχών αυτού σε συνθήκες πυρκαγιάς, η συμπεριφορά των συνδέσεων που χρησιμοποιούνται κατά τη δόμηση με το υλικό αυτό και τέλος τρόποι προστασίας αυτών και του ιδίου του υλικού.
- **Κεφάλαιο 6:** Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται ανάλυση της επικινδυνότητας των υλικών θερμομόνωσης που χρησιμοποιούνται στο σύγχρονο οικοδομικό περιβάλλον. Γίνεται ανάλυση των κινδύνων που προκύπτουν ακόμα και από τα άκαυστα θερμομονωτικά υλικά αλλά και των φαινομένων της καύσης που τα διέπουν και μπορούν να οδηγήσουν σε ιδιαίτερα επικίνδυνα φαινόμενα.
- **Κεφάλαιο 7:** Το κεφάλαιο αυτό αποτελεί τον επίλογο και τα συμπεράσματα της εργασίας μας.

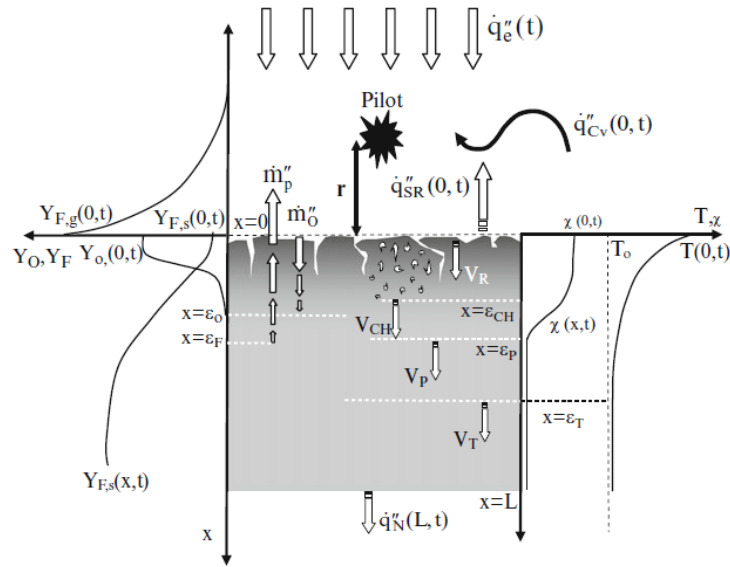
2

Στοιχεία Καύσης και Πυρκαγιάς

2.1 Η καύση των στερεών υλικών

Όπως είναι εύκολα αντιληπτό, το σύνολο των δομικών υλικών είναι στερεά. Αυτό συμβαίνει διότι στόχος είναι η ενσωμάτωσή τους ως στοιχεία μιας κατασκευής, η οποία είναι εξ' ορισμού στέρεα. Συνεπώς κρίνεται σκόπιμο να γίνει μια ανάλυση του τρόπου με τον οποίο τα στερεά υλικά καίγονται, καθώς αυτό θα βοηθήσει να κατανοήσουμε καλύτερα τον τρόπο με τον οποίο συνεισφέρουν σε μια πυρκαγιά αλλά και συμπεριφέρονται και τα ίδια, ιδίως ως προς τις μηχανικές τους αντοχές.

Αρχικά, καθώς το στερεό υλικό το οποίο βρίσκεται σε συνθήκες περιβάλλοντος εκτίθεται σε μια πηγή θερμότητας, η θερμοκρασία του αυξάνεται. Η χρονική στιγμή αυτή θεωρούμε ότι είναι η χρονική στιγμή έναρξης του φαινομένου. Για λόγους απλοποίησης, η περιγραφή των φαινομένων της καύσης θα γίνει για δύο μεταβλητές, μια χρονική t και μια χωρική x κατά τον άξονα του βάθους υλικού. Ως $x = 0$ ορίζουμε την επιφάνεια του υλικού που εκτίθεται στην πηγή θερμότητας. Όλες οι ταχύτητες που θα περιγράψουμε ορίζονται κατά τον άξονα του βάθους. Τα φαινόμενα που εξελίσσονται κατά τις άλλες δύο διευθύνσεις του τρισδιάστατου χώρου και αφορούν την επιφάνεια του υλικού έχουν ιδιαίτερη σημασία αλλά θα αναλυθούν μεταγενέστερα. Τέλος, η διαδικασία θα χωριστεί σε δύο μέρη, ένα μέρος που αφορά την στερεή φάση του υλικού και ένα που αφορά την αέρια φάση, η οποία παράγεται και είναι και αυτή που καίγεται. Τα παραπάνω γίνονται εύκολα αντιληπτά με βάση τα όσα απεικονίζονται στην εικόνα 1 [1].



Εικόνα 1: Η καύση στερεού σώματος

Αρχικά λοιπόν, η θερμοκρασία του στερεού υλικού αυξάνεται, κυρίως κοντά στην επιφάνεια, αλλά λόγω μεταφοράς θερμότητας μέσω αγωγής (συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού) η θερμοκρασία αυξάνεται και στο εσωτερικό του. Συνεπώς, η θερμοκρασία του υλικού ορίζεται ως συνάρτηση τόσο του χρόνου όσο και του βάθους αυτού $T(x,t)$.

Η αύξηση αυτή της θερμοκρασίας οδηγεί στην ανάπτυξη του φαινομένου της πυρόλυσης. Πυρόλυση είναι η διαδικασία κατά την οποία το στερεό μετατρέπεται σε αέριο. Πρόκειται για μια χημική θερμική διεργασία που παράγει κατά κανόνα μικρότερα μόρια, μεταβάλλοντας έτσι τη χημική σύσταση του καυσίμου. Η διαδικασία αυτή αποτελεί και την ειδοποιώ διαφορά ανάμεσα στην καύση στερεών και υγρών καυσίμων, αφού στα υγρά έχουμε απλώς εξάτμιση του καυσίμου και όχι αλλαγή της χημικής του σύστασης, όπως συμβαίνει στην περίπτωση της πυρόλυσης. Η πυρόλυση είναι ενδόθερμη αντίδραση, της οποίας ο ρυθμός εξαρτάται από τη θερμοκρασία και περιγράφει ένα σύνολο από εκατοντάδες πιθανές χημικές αντιδράσεις που συμβαίνουν. Γενικά, η διαδικασία της πυρόλυσης μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά από την παρακάτω εξίσωση [2]:

$$\dot{\omega} = A * Y_O^m * Y_S^n * e^{-E/R*T}$$

Στην παραπάνω εξίσωση, τα A , m και n είναι σταθερές που εξαρτώνται από το καιόμενο υλικό. Οι μεταβλητές Y_O και Y_S αφορούν τα κλάσματα οξυγόνου και καυσίμου αντίστοιχα, ενώ E είναι η ενέργεια ενεργοποίησης. Για ορισμένα καύσιμα που δεν παρουσιάζουν εξάρτηση από τη συγκέντρωση του οξυγόνου κατά το στάδιο της πυρόλυσης, η σταθερά m λαμβάνεται ως 0. Γενικά, οι παραπάνω σταθερές έχουν υπολογιστεί για ελάχιστα υλικά τα οποία συναντώνται σε πυρκαγιές και ιδίως για δομικά υλικά, όπως τα διάφορα θερμομονωτικά και συνεπώς αποτελούν ένα επιστημονικό πεδίο υπό έρευνα [3].

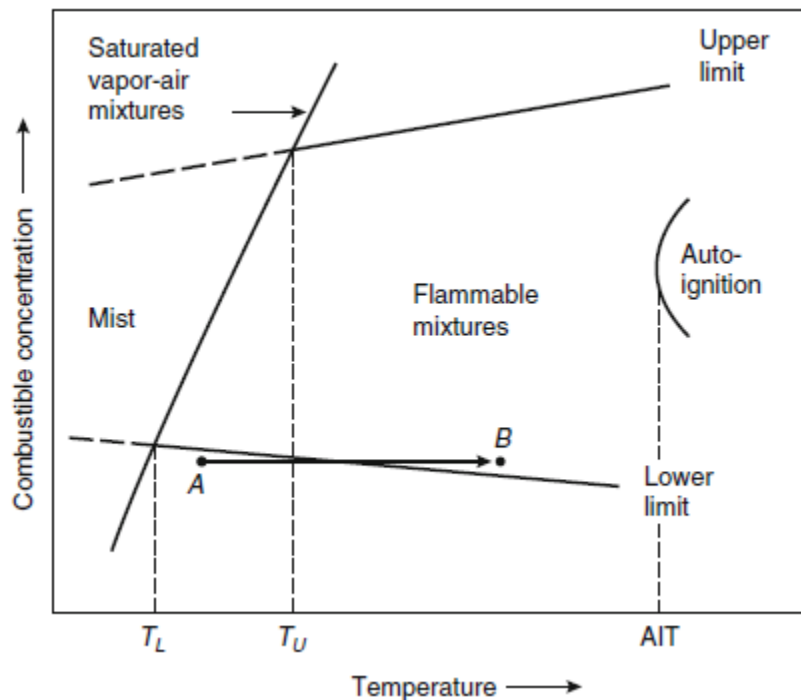
Όπως αναφέρθηκε λοιπόν, προτού συμβεί η καύση ενός στερεού υλικού, πρέπει να παραχθεί μέσω της πυρόλυσης η αέρια φάση αυτού. Όμως, μέσω της πυρόλυσης δεν παράγονται αποκλειστικά καύσιμα αέρια. Τα παραγόμενα αέρια μπορεί να είναι το αποτέλεσμα τόσο της πυρόλυσης όσο και αντιδράσεων οξειδωσης και συνεπώς να περιέχουν διοξείδιο του άνθρακα, μονοξείδιο του άνθρακα ή άλλα αέρια που περιέχουν οξυγόνο. Επίσης υπάρχουν και άλλα παράγωγα όπως οι υδρατμοί και διάφορα άλλα αδρανή και μη αέρια που εκλύονται. Συνεπώς, για τον υπολογισμό του κλάσματος των αερίων που είναι εύφλεκτα απαιτείται η χρήση κατάλληλων πινάκων για κάθε καιόμενο υλικό [4].

Επιπροσθέτως, σε ορισμένα υλικά όπως το ξύλο, η πυρόλυση οδηγεί και στην δημιουργία ενός στρώματος απανθρακωμένου υλικού το οποίο έχει επίδραση τόσο στη μεταφορά θερμότητας όσο και μάζης. Ειδικότερα για το στρώμα απανθράκωσης στο ξύλο και πως αυτό επιδρά στην καύση του θα αναφερθούμε στο αντίστοιχο κεφάλαιο. Γενικά, η πυρόλυση στα υλικά που δημιουργούν το στρώμα αυτό έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή του αέριου καυσίμου και ενός στερεού υπολείμματος, το οποίο κατά κύριο λόγο αποτελείται από άνθρακα. Το στρώμα αυτό υφίσταται περαιτέρω αποικοδόμηση με αποτέλεσμα εν τέλη την παραγωγή αδρανούς τέφρας. Το στρώμα αυτό έχει δύο σημαντικές ιδιότητες. Πρώτον, προστατεύει το υλικό που δεν έχει επηρεαστεί ακόμα από τη φωτιά και δρα ως ένα είδος μονωτικού, μειώνοντας το ρυθμό της καύσης, αφού μειώνει το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας. Δεύτερον, στο στρώμα αυτό αναπτύσσονται πολύ μεγάλες θερμοκρασίες με αποτέλεσμα την ύπαρξη καύσης ακόμα και χωρίς ορατή φλόγα ενώ παράλληλα δρα ως πηγή έναυσης της αέρια φάσης λόγω της αναπτυσσόμενης θερμοκρασίας.

Τέλος, όσον αφορά το σκέλος της στερεάς φάσης του καιόμενου υλικού, κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούμε και στο θερμικό βάθος του υλικού. Η θερμότητα μεταφέρεται διαμέσω του υλικού συναρτήσει του χρόνου. Αρχικά, μία πολύ μικρή περιοχή επηρεάζεται, όμως καθώς ο

χρόνος κυλά, η περιοχή που επηρεάζεται ολοένα και αυξάνει. Συνεπώς, για κάθε δεδομένη στιγμή υπάρχει ένα όριο πέρα από το οποίο η θερμοκρασία ισούται με την αρχική θερμοκρασία του υλικού. Το βάθος αυτό έχει σημασία τόσο για τον υπολογισμό των ιδιοτήτων του υλικού, αφού αυτές στις περισσότερες περιπτώσεις επηρεάζονται από τη θερμοκρασία, όσο και για τον καθορισμό των οριακών συνθηκών στην επίλυση διαφορικών εξισώσεων καύσης [5].

Έτσι λοιπόν, τώρα έχουμε πάνω από το στερεό υλικό την ανάπτυξη μιας ποσότητας αερίου καυσίμου. Ο ρυθμός έκλυσης των αερίων αυτών εξαρτάται από το χρόνο, δηλαδή αρχικά παράγονται μικρές ποσότητες και εν συνεχεία μεγαλύτερες. Το αναδύομενο καύσιμο συναντά και αναμιγνύεται με το οξειδωτικό μέσο (οξυγόνο στον ατμοσφαιρικό αέρα) και εφόσον η συγκέντρωση είναι εντός κατάλληλων ορίων τότε έχουμε ένα εύφλεκτο μίγμα το οποίο μπορεί να αναφλεγεί εφόσον υπάρχει κατάλληλη πηγή θερμότητας ή εφόσον το μίγμα αυτό φθάσει στην θερμοκρασία αυτανάφλεξής του. Η περιοχή αυτή συγκέντρωσης στην οποία το καύσιμο είναι εύφλεκτο εξαρτάται από τη θερμοκρασία και το είδος του καυσίμου, όπως χαρακτηριστικά αποτυπώνεται στην εικόνα 2 [6].



Εικόνα 2: Όρια ευφλεκτότητας για καύσιμο

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι μετά την έναυση του μίγματος, η φλόγα επεκτείνεται και στην υπόλοιπη περιοχή όπου το μίγμα είναι μέσα στα επιτρεπτά όρια ευφλεκτότητας. Όμως, το εάν θα διατηρηθεί η φλόγα ή θα σβήσει εξαρτάται από το ρυθμό παραγωγής καυσίμου. Εάν ο ρυθμός πυρόλυσης δεν είναι επαρκής, η φλόγα θα σβήσει και η διαδικασία θα επαναληφθεί όταν το επιτρέψουν ξανά οι συνθήκες. Το φαινόμενο αυτό είναι εμφανές ως γλώσσες φωτιάς στην επιφάνεια του υλικού συνήθως [7].

2.2 Τα στάδια της πυρκαγιάς

Για την επιτυχή μελέτη των φαινομένων που σχετίζονται με την πυρκαγιά, κρίνεται σκόπιμο να μελετήσουμε τα διάφορα στάδια που την απαρτίζουν, καθώς οι συνθήκες που επικρατούν στο χώρο και τις οποίες καλούνται να αντιμετωπίσουν τα υλικά και το προσωπικό διαφέρουν σημαντικά. Έτσι λοιπόν, για την ανάλυση των σταδίων της πυρκαγιάς θα χρησιμοποιήσουμε την κατηγοριοποίησή τους κατά το πρότυπο ISO 19706 [8], όπως φαίνεται στον πίνακα 1.

Στάδιο πυρκαγιάς	Θερμότητα [kw/m ²]	Μέγιστη Θερμοκρασία [°C]		Οξυγόνο [%]		Λόγος ισοδυναμίας φ	V _{CO} /V _{CO2}	Απόδοση καύσης [%]
		Καύσιμο	Καπνός	Είσοδος	Εξοδος			
Δίχως φλόγα								
1α. Αυτοσυντηρούμενη / smoldering	-	450 - 800	25 - 85	0 - 20	0 - 20	-	0.1 - 1	50 - 90
1β. Οξείδωση, εξωτερική ακτινοβολία	-	300 - 600	-	20	20	-	-	-
1γ. Αναερόβια, εξωτερική ακτινοβολία	-	100 - 500	-	0	0	-	-	-
Καλά αεριζόμενη με φλόγες								
2. Καλά αεριζόμενη με φλόγες	0 - 60	350 - 650	50 - 500	~20	0 - 20	< 1	< 0.05	> 95
Υποαεριζόμενη με φλόγες								
3α. Υποαεριζόμενη πυρκαγιά δωματίου	0 - 30	300 - 600	50 - 500	15 - 20	5 - 10	> 1	0.2 - 0.4	70 - 80
3β. Μετά το flashback/backdraft	50 - 150	350 - 650	> 600	< 15	< 5	> 1	0.1 - 0.4	70 - 90

Πίνακας 1: Κατηγοριοποίηση πυρκαγιών κατά ISO 19706

Με βάση τον παραπάνω πίνακα, είναι εμφανές ότι ένα πολύ σημαντικό κριτήριο διαχωρισμού αποτελεί η ύπαρξη ή μη φλόγας κατά την καύση. Η παρουσία φλόγας εξαρτάται από τη συγκέντρωση του οξειδωτικού μέσου στο χώρο, τη συγκέντρωση και το είδος του καυσίμου καθώς και τον ρυθμό της αντίδρασης.

Όσον αφορά τις πυρκαγιές δίχως φλόγα, αυτές αποτελούν κύριο χαρακτηριστικό κατά το πρώτο καθώς και τελευταίο στάδιο μιας πυρκαγιάς και αφορούν σχεδόν αποκλειστικά στερεά καύσιμα. Το σημαντικότερο και επικρατέστερο είδος αυτής της κατηγορίας είναι η καύση υπό τη μορφή πυρακτωμάτων (smoldering). Κατ' ουσία, πρόκειται για είδος φωτιάς το οποίο κινείται με πολύ αργό ρυθμό, μέσω μηχανισμών έρπυσης, επιφανειακά ή ακόμα και σε βάθος αν το επιτρέπει το είδος του καυσίμου, παράγοντας πολύ έντονο καπνό χαμηλής θερμοκρασίας ο οποίος είναι πλούσιος σε αιθάλη, άκαυστα δηλαδή σωματίδια, μονοξείδιο του άνθρακα,

προϊόντα ατελούς καύσης καθώς και πολλά τοξικά παράγωγα. Ο ρυθμός εκλυόμενης ενέργειας είναι σχετικά μικρός.

Στις αστικές πυρκαγιές, το στάδιο αυτό είναι εξαιρετικά επικίνδυνο καθώς είναι υπεύθυνο για την μέγιστη παραγωγή τοξικών προϊόντων καύσης και, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι αποτελεί φαινόμενο που παρατηρείται αρχικά και συνεπώς σε στάδιο που η πυρκαγιά δεν έχει γίνει αντιληπτή από του χρήστες ενός κτιρίου, μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρές επιπτώσεις για την υγεία αυτών. Οι κατηγορίες που αφορούν εξωτερική ακτινοβολία εμφανίζονται και αυτές κατά το στάδιο της έναρξης της πυρκαγιάς (ιδίως η κατηγορία 1β κατά την οποία υπάρχει διαθέσιμο οξυγόνο) και συνεισφέρουν στην πυρκαγιά μέσω της διαδικασίας της πυρόλυσης και της παραγωγής αερίων καυσίμων στο χώρο.

Προτού αναφερθούμε στην επόμενη κατηγορία, κρίνεται σκόπιμο να αναλύσουμε τον όρο υποαεριζόμενη και καλά αεριζόμενη πυρκαγιά. Σε κάθε αντίδραση καύσης και για κάθε συνδυασμό καυσίμου και οξειδωτικού μέσου, υπάρχει μια πολύ συγκεκριμένη ποσότητα οξειδωτικού μέσου που απαιτείται για να έχουμε την πλήρη καύση μιας δεδομένης, έστω μοναδιαίας, ποσότητας καυσίμου. Εν προκειμένω, καθότι το οξειδωτικό μέσο των αστικών πυρκαγιών είναι το οξυγόνο του ατμοσφαιρικού αέρα, η ποσότητα αυτή ονομάζεται στοιχειομετρικός λόγος αέρα καύσης. Όμως, στην πραγματικότητα, ο διαθέσιμος αέρας και, κατά συνέπεια, το διαθέσιμο οξυγόνο σε μια πυρκαγιά μπορεί να είναι μεγαλύτερο ή μικρότερο από αυτό που απαιτεί η στοιχειομετρία της αντίδρασης. Η παράμετρος αυτή είναι πάρα πολύ σημαντική και για την ποσοτικοποίησή της ορίζουμε τον λόγο καυσίμου-αέρα φ ή σε ορισμένες περιπτώσεις τον λόγο αέρα-καυσίμου λ , ο οποίος είναι κατ' ουσία το αντίστροφο του λόγου καυσίμου-αέρα. Ο λόγος αυτός ορίζεται ως εξής:

$$\varphi = \frac{\text{πραγματικός λόγος καυσίμου προς αέρα}}{\text{στοιχειομετρικός λόγος καυσίμου προς αέρα}}$$

Έτσι λοιπόν, για όταν ο λόγος αυτός ισούται με την μονάδα λέμε ότι έχουμε στοιχειομετρική καύση, δηλαδή, ο αέρας που υπάρχει είναι ακριβώς τόσος όσος απαιτείται από την στοιχειομετρία για την καύση του καιόμενου υλικού. Για λόγους μεγαλύτερους της μονάδας

λέμε ότι έχουμε πυρκαγιά πλούσια σε καύσιμο και για λόγους μικρότερους της μονάδας λέμε ότι έχουμε πυρκαγιά πτωχή σε καύσιμο.

Είναι εύκολα αντιληπτό ότι κάθε αστική πυρκαγιά, η οποία εκδηλώνεται σε έναν δεδομένο όγκο (ο χώρος του συμβάντος), έχει δεδομένη ποσότητα οξυγόνου και καυσίμου διαθέσιμη και κατά τα πρώτα στάδια της η ποσότητα του οξυγόνου θα είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτή που απαιτείται για την εκάστοτε διαδικασία καύσης που επιτελείται, συνεπώς η πυρκαγιά είναι καλά αεριζόμενη. Το φαινόμενο της καύσης είναι σταδιακό και σε κάθε χρονική στιγμή καίγεται δεδομένη επιφάνεια και συνεπώς μάζα υλικού. Εάν δεν υπάρχουν ανοίγματα στο χώρο ή αν έστω αυτά δεν επαρκούν τόσο για την τροφοδότηση με οξυγόνο του φαινομένου όσο και για την εκτόνωση των παραγόμενων αερίων, υπάρχει δεδομένη στιγμή η οποία θα οδηγήσει το λόγο καυσίμου-αέρα σε μια περιοχή μικρότερη της μονάδας, με αποτέλεσμα η πυρκαγιά να καταστεί υποαεριζόμενη.

Έτσι λοιπόν, το επόμενο στάδιο μιας πυρκαγιάς το οποίο ακολουθεί την φάση της καύσης πυρακτωμάτων είναι αυτό της καλά αεριζόμενης με φλόγες. Το στάδιο αυτό χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα μεγάλη αύξηση του πυροθερμικού φορτίου του χώρου. Τα αέρια της πυρόλυσης και ο πλούσιος σε αιθάλη καπνός του προηγούμενου σταδίου πλέον καίγονται με σταθερό ρυθμό, με αποτέλεσμα η πυρκαγιά να επεκτείνεται σε περισσότερες περιοχές του χώρου. Η πυρκαγιά στην φάση αυτή, παρά την ταχεία εξάπλωσή της δεν χαρακτηρίζεται από επικίνδυνα μεταβατικά φαινόμενα αλλά ακολουθεί μια προβλέψιμη και σταθερή εξέλιξη. Ο καπνός που παράγεται είναι μεν έντονος, λόγω της ποσότητας των καιόμενων υλικών και ιδιαίτερα θερμός, είναι όμως πτωχός σε αιθάλη, μονοξειδίο και τοξικά παράγωγα εξαιτίας της αποδοτικής καύσης που επιβάλλεται αφενός από την περίσσεια οξυγόνου και αφετέρου από την σταθερή εξέλιξη του φαινομένου στο χώρο. Όμως, μια σημαντική αρνητική επίπτωση της φάσης αυτής είναι η θέρμανση και ανάπτυξη υψηλής θερμοκρασίας στο χώρο της πυρκαγιάς αλλά και σε χώρους που μπορεί να επικοινωνούν με τον εν λόγω χώρο, κάτι το οποίο οδηγεί σε πυρόλυση και μεταφορά της πυρκαγιάς σε άλλους χώρους.

Το στάδιο της καλά αεριζόμενης πυρκαγιάς με φλόγες χαρακτηρίζεται και ως το στάδιο της ανάπτυξης της πυρκαγιάς. Το στάδιο αυτό όπως αναφέρθηκε χαρακτηρίζεται από την σταδιακή εξάπλωση αυτής σε περισσότερα μέρη του χώρου. Όμως, εξαιτίας της ταχείας ανάπτυξης της θερμοκρασίας του χώρου, μέσω της ακτινοβολίας τόσο από την ίδια την πυρκαγιά όσο και από τον παραγόμενο καπνό, η θερμοκρασία των καυσίμων σε όλο το χώρο ξεπερνά το

σημείο αυτανάφλεξης αυτών. Τούτο έχει ως αποτέλεσμα την καθολική ανάφλεξη όλων υλικών του χώρου σχεδόν ακαριαία, ως ένα φαινόμενο χιονοστιβάδας. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται flashover. Πρόκειται για ένα πολύ επικίνδυνο μεταβατικό φαινόμενο το οποίο συνδέει το στάδιο της ανάπτυξης της πυρκαγιάς, που είναι ένα στάδιο με περίσσεια αέρα με αυτό της σταθερής κατάστασης, που χαρακτηρίζεται από έλλειμμα αέρα. Στην φάση αυτή έχουμε μεγάλη ανάπτυξη του πυροθερμικού φορτίου και συνεπώς της θερμότητας, ανάπτυξη φλογών σε όλη την έκταση του χώρου καθώς επίσης και παραγωγή τοξικού καπνού εξαιτίας της χαμηλής απόδοσης της καύσης.

Εάν για κάποιο λόγο το οξυγόνο πλέον δεν επαρκεί για τη συντήρηση της καύσης, οδηγούμαστε σε υποαεριζόμενη πυρκαγιά. Αυτό μπορεί να συμβεί με δύο τρόπους. Πρώτον, το φαινόμενο εξελίσσεται με τόση ένταση και σε τέτοια έκταση που δημιουργούνται ζώνες εντός της πυρκαγιάς οι οποίες δεν τροφοδοτούνται με επαρκή ποσότητα αέρα. Δεύτερον, και κυριότερο, καθώς αυτή αποτελεί την πιο επικίνδυνη περίπτωση που θα αναλύσουμε, χώρος δε διαθέτει επαρκή ανοίγματα για την τροφοδοσία με αέρα και εκτόνωση των αερίων της πυρκαγιάς. Χαρακτηριστικά των υποαεριζόμενων πυρκαγιών αποτελούν η ατελής καύση, με όλα τα επακόλουθα που έχουν αναφερθεί, όπως η αιθάλη και τα τοξικά παράγωγα, ο περιορισμός του πυροθερμικού φορτίου και η φαινομενική στασιμότητα του φαινομένου. Το πυροθερμικό φορτίο μπορεί να σταθεροποιηθεί ή να μειωθεί σημαντικά, σε συνάρτηση με το οξυγόνο που παρέχεται, δίνοντας μια εντύπωση ότι το φαινόμενο έχει ολοκληρωθεί. Όμως, η ποσότητα καυσίμου, τόσο σε στερεή όσο και αέρια μορφή εντός του χώρου είναι σημαντική. Η φάση αυτή αποτελεί την σταθερή κατάσταση του φαινομένου και καταλαμβάνει χρονικά το μεγαλύτερο ποσοστό της διάρκειας εξέλιξης αυτού.

Στην περίπτωση αυτή, υπάρχουν δύο δυνατότητες για την περαιτέρω εξέλιξη της πυρκαγιάς. Εφόσον η παρεχόμενη μάζα αέρα είναι μηδενική, δηλαδή ο χώρος είναι ερμητικά κλειστός, η πυρκαγιά θα ολοκληρωθεί όταν καταναλώσει πλήρως το οξυγόνο, όμως το σενάριο αυτό δεν είναι ρεαλιστικό για συνήθεις αστικές πυρκαγιές. Αυτό μπορούμε να το παρατηρήσουμε σε κλειστούς χώρους που συνήθως προστατεύονται και από συστήματα ολικής κατάκλισης, που ίδια η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στην ιδιαιτερότητα αυτή. Εφόσον όμως υπάρχει παροχή οξυγόνου, το φαινόμενο θα συνεχίσει να εξελίσσεται. Εάν δεν έχουμε εισαγωγή μεγάλης ποσότητας αέρα, το φαινόμενο ολοκληρώνεται με την κατανάλωση όλου του διαθέσιμου καυσίμου στο χώρο. Όμως, αυτό που συνήθως συμβαίνει, είναι η δημιουργία κάποιου ανοίγματος

στο χώρο, είτε από την ίδια την πυρκαγιά (λχ. καύση στοιχείου ανοίγματος, αστοχία λόγω υπερπίεσης) είτε από κάποιον τρίτο (λχ. πυροσβεστικός υπάλληλος που διενεργεί κατάσβεση ή έρευνα και διάσωση στο χώρο). Στην περίπτωση αυτή, μπορούν να συμβούν δύο πολύ επικίνδυνα μεταβατικά φαινόμενα.

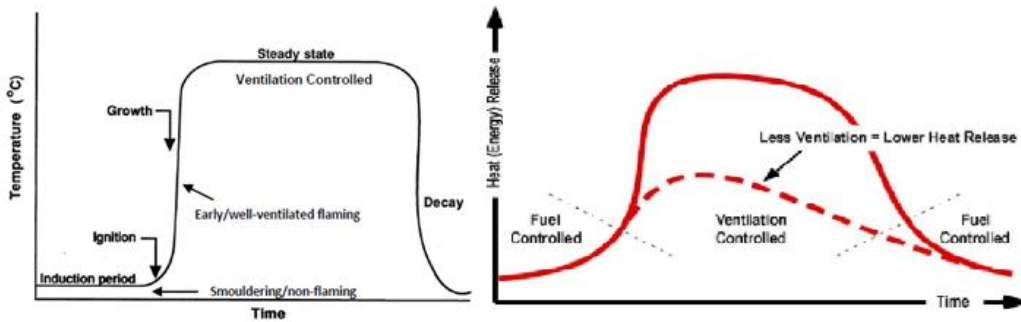
Η εισαγωγή αέρα σε χώρο υποαεριζόμενης πυρκαγιάς μπορεί να οδηγήσει σε δύο διακριτά μεταβατικά φαινόμενα, αυτό του backdraft και αυτό του flashback. Πρόκειται για φαινόμενα ακραίας συμπεριφοράς της πυρκαγιάς και η διάκριση μεταξύ της ανάπτυξής τους επαφίεται στη θερμοκρασία του καυσίμου και των αερίων της πυρόλυσης. Όταν η θερμοκρασία του καυσίμου σε στερεή και αέρια κατάσταση στο χώρο είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία αυτανάφλεξης αυτών, τότε η εισαγωγή αέρα στο χώρο με μη ελεγχόμενο τρόπο θα οδηγήσει στο φαινόμενο backdraft. Στο φαινόμενο αυτό έχουμε ουσιαστικά εκρηκτική καύση σχεδόν όλης της μάζας του καυσίμου, ιδίως της αέριας, με αποτέλεσμα την στιγμιαία παραγωγή τεράστιου πυροθερμικού φορτίου και μάζας καυσαερίων.

Αντίστοιχα, εφόσον η θερμοκρασία του καυσίμου σε στερεή και αέρια κατάσταση εντός του υποαεριζόμενου χώρου είναι μικρότερη από τη θερμοκρασία αυτανάφλεξης αυτών, τότε η ανεξέλεγκτη εισαγωγή αέρα στο χώρο οδηγεί στην ανάπτυξη του φαινομένου του flashback. Το φαινόμενο flashback είναι κατ' ουσία η ολική κατάκαυση εντός του χώρου, δηλαδή η ανάπτυξη καύσης σε όλη την έκταση αυτού. Δεν παρατηρείται η ανάπτυξη πίεσης και μάζας καυσαερίων του φαινομένου του backdraft, όμως το φαινόμενο οδηγεί σε πολύ μεγάλο πυροθερμικό φορτίο και απότομη αύξηση της θερμοκρασίας. Είναι μια ήπια και παρατεταμένη μορφή backdraft, δίχως το εκρηκτικό φαινόμενο που το συνοδεύει. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι μπορεί να υπάρξει flashback και δίχως την εισαγωγή οξυγόνου στο χώρο, κατά τη φυσική εξέλιξη της πυρκαγιάς, όπως αυτό θα είναι ήπιο και θα περιορισθεί σχεδόν άμεσα όταν θα καταναλωθεί η μεγαλύτερη μάζα του διαθέσιμου αέρα καύσης εντός αυτού.

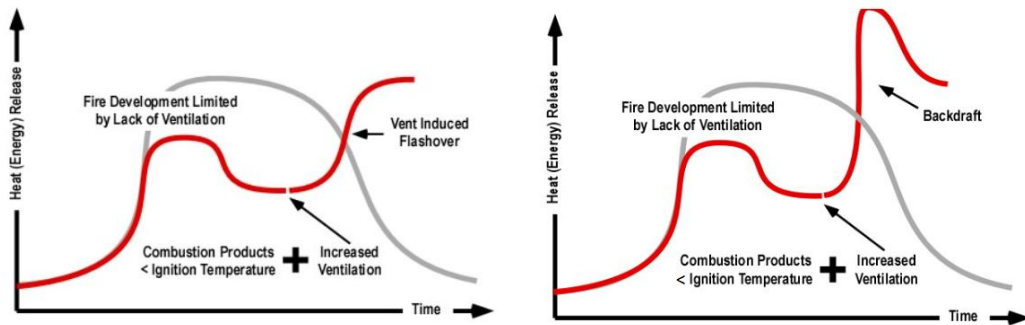
Μετά την εμφάνιση των flashback και backdraft, η πυρκαγιά συνεχίζει να είναι υποαεριζόμενη, καθώς είναι σχεδόν αδύνατο να της παρασχεθεί η απαιτούμενη ποσότητα αέρα για την πλήρη συνέχιση του φαινομένου, στη συντριπτική πλειονότητα των περιπτώσεων πυρκαγιών σε εσωτερικό χώρο. Το πυροθερμικό φορτίο είναι αυξημένο, όπως και η παραγωγή τοξικών παραγώγων καύσης.

Στις εικόνες που ακολουθούν, παρουσιάζεται συνοπτικά η φυσική εξέλιξη μιας αστικής πυρκαγιάς σε εσωτερικό χώρο συναρτήσει του χρόνου, ως προς το πυροθερμικό της φορτίο,

καθώς και δύο γραφήματα που αφορούν την αντίστοιχη εξέλιξη σε περίπτωση ανάπτυξης των προαναφερθέντων φαινομένων.



Εικόνα 3: Στάδια και εξέλιξη πυρκαγιάς με βάση το χρόνο



Εικόνα 4: Τα φαινόμενα flashover και backdraft

2.3 Δείκτες συμπεριφοράς πυρκαγιάς

Για την διάκριση ανάμεσα στα προαναφερθέντα στάδια, τα οποία αναλύσαμε εκτενώς, ο πυροσβεστικός υπάλληλος μπορεί να χρησιμοποιήσει ορισμένους δείκτες κατά τη διάρκεια των πυροσβεστικών επιχειρήσεων. Οι δείκτες αυτοί είναι εύκολα αντιληπτοί και ταυτόχρονα ιδιαίτερα σημαντικοί. Η επιτυχής αναγνώριση αυτών μας δίδει τη δυνατότητα να εντοπίσουμε και το στάδιο στο οποίο βρίσκεται τη δεδομένη χρονική στιγμή η πυρκαγιά, ούτως ώστε να προετοιμάσουμε καλύτερα το σχέδιο δράσης μας καθώς επίσης να λάβουμε και τις κατάλληλες προφυλάξεις.

Οι εν λόγω δείκτες συνοψίζονται στις εξής κατηγορίες: κτίριο, καπνός, ροή αέρα, θερμότητα και φλόγα. Ορισμένοι εξ' αυτών, όπως για παράδειγμα το κτίριο στο οποίο διεξάγεται η πυροσβεστική επιχείρηση, χαρακτηρίζονται από σταθερότητα, όμως άλλοι είναι δυναμικά μεταβαλλόμενοι και αλλάζουν έντονα με βάση το στάδιο και την εξέλιξη της πυρκαγιάς.

Το κτίριο αποτελεί το μοναδικό δείκτη τον οποίο μπορεί ο πυροσβεστικός υπάλληλος να μελετήσει εκ των προτέρων. Ιδιαίτερα για τα κτίρια μεγάλης επικινδυνότητας και σημασίας, πρέπει να υπάρχουν εκ των προτέρων σχέδια επέμβασης και μελέτη των πιθανών κινδύνων. Αλλά ακόμα και σε κτίρια για τα οποία δεν έχει εκπονηθεί κάποιο σχέδιο, είναι σημαντικό ο πυροσβεστικός υπάλληλος να αναγνωρίσει το χώρο στον οποίο καλείται να επέμβει. Ένας γρήγορος έλεγχος της περιμέτρου του κτιρίου και, ήτοι δυνατό, μια σύντομη ενημέρωση από κάποιον χρήστη του κτιρίου συνίσταται να αποτελούν μία από τις πρώτες ενέργειες κατά την επέμβαση. Σημαντικές παράμετροι είναι τα ανοίγματα, η διαμόρφωση του κτιρίου, το υλικό κατασκευής, η χρήση, τα υλικά στο εσωτερικό και η χωροθέτηση της πυρκαγιάς από το εξωτερικό.

Ο καπνός και η ροή του αέρα, η οποία συμπεριλαμβάνει και την ροή του καπνού εσωτερικά και εξωτερικά του κτιρίου, αποτελούν δύο από τους κυριότερους παράγοντες. Η τοποθεσία εμφάνισης του καπνού μπορεί να δώσει πληροφορίες για την εστία της πυρκαγιάς, το χρώμα και ταχύτητα αυτού για τις συνθήκες καύσεις (αεριζόμενη ή υποαεριζόμενη πυρκαγιά) καθώς και για το στάδιο αυτής. Η ανάλυση των συνθηκών ροής και της κατάστασης του καπνού δεν πρέπει να περιορίζεται μόνο στο εξωτερικό, αλλά είναι μια διαδικασία που πρέπει να συνεχίζεται και κατά την επέμβαση στο εσωτερικό, καθώς αλλαγές σε κάποιον εκ των δύο αυτών δεικτών μπορούν να έχουν πολύ σημαντικές επιπτώσεις.

Η θερμότητα είναι ένα μέγεθος το οποίο δεν μπορεί κάποιος να το παρατηρήσει άμεσα, πλην όμως είναι εύκολα αντιληπτή εξαιτίας των συνεπειών της, όπως το ράγισμα των παραθύρων, η αίσθηση στον πυροσβέστη, η θερμοκρασία σε μία πόρτα αλλά ακόμα και η ταχύτητα του καπνού και η άνωση αυτού καθώς εξέρχεται από το κτίριο. Επίσης, μια θερμική κάμερα είναι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο οπτικοποίησης του θερμοκρασιακού προφίλ ενός χώρου. Δεν πρέπει όμως να ξεχάμε ότι ο προστατευτικός εξοπλισμός του πυροσβέστη είναι κατ' ουσία ένα είδος ισχυρής θερμομόνωσης και συνεπώς, όταν νιώσουμε θερμοκρασιακές μεταβολές αυτό σημαίνει ότι αυτές είναι πολύ έντονες και ίσως πλέον αποτελεί μια πολύ καθυστερημένη αντίληψη των αλλαγών στις συνθήκες του χώρου.

Τέλος, η φλόγα της καύσης αποτελεί ίσως τον πιο προφανή δείκτη μιας πυρκαγιάς, καθώς είναι εμφανής και εύκολα αντιληπτός. Για αυτό το λόγο όμως δε θα πρέπει να επικεντρωνόμαστε μόνο σε αυτών αλλά και στους άλλους δείκτες. Το χρώμα της φλόγας μπορεί να μας αποκαλύψει τα υλικά τα οποία καίγονται στο χώρο αλλά και τις θερμοκρασίες καύσεις ενώ η ίδια η παρουσία της μας βοηθά να χωροθετήσουμε την καύση.

Στον πίνακα 2 βλέπουμε τους παραπάνω δείκτες, μαζί με μια συνοπτική παρουσίαση της κατάστασής τους κατά το έκαστο στάδιο μιας πυρκαγιάς.

	Κτίριο	Καπνός	Ροή αέρα	Θερμότητα	Φλόγες
Έναρξη (πυρακτώματα)	Μέγεθος, διαμόρφωση, περιεχόμενα, αερισμός, πυροπροστασία	Περιορισμένος, δίχως καλή διαστρωμάτωση, ανοιχτόχρωμος και δίχως μεγάλη άνωση	Ήπια εκτόνωση καπνού προς τα έξω αλλά και αναρρόφηση αέρα σε χώρους κοντά στην εστία	Χαμηλή θερμοκρασία, πιθανότητα συμπυκνωμάτων στα παράθυρα, σημαντική η θερμομόνωση	Μικρή εστία, χαμηλές φλόγες
Ανάπτυξη (καλά αεριζόμενη)	Μέγεθος, πυροθερμικό φορτίο, αερισμός	Διαστρωμάτωση, πιθανή μεταφορά σε άλλους χώρους	Έαν υπάρχει μοναδικό άνοιγμα δύο διακριτές ροές σε αυτό, δίνουν στίγμα για την ένταση, σημαντικό το προφίλ αερισμού, εντονότερη στο χώρο κοντά στην πυρκαγιά	Αύξηση θερμοκρασίας, απουσία συμπυκνωμάτων, σκουρόχρωμοι λεκέδες πυρόλυσης, ρωγμές υαλοπινάκων και θερμοκρασία στις πόρτες	Εμφανείς και μακριά από την εστία, οριζόντιες κινήσεις
Flashover	Πυροθερμικό φορτίο, αερισμός, θερμική συμπεριφορά	Σκουρόχρωμος, χαμηλός, θερμός	Εναλλασσόμενη ροή, μεγάλη ταχύτητα, συναγωγή	Εξωτερικά μεγάλη ταχύτητα αερίων, εσωτερικά αύξηση θερμοκρασίας και εμφανή σημάδια εξελισσόμενης πυρόλυσης	Απομονωμένες φλόγες στο στρώμα αερίων, rollover
Σταθερή κατάσταση (υποαεριζόμενη)	Πυροθερμικό φορτίο, αερισμός, θερμική συμπεριφορά	Έντονα σκουρόχρωμος έως μαύρος, πυκνός, φτάνει έως το πάτωμα	Διακριτή ροή σε μοναδικό άνοιγμα, υψηλές ταχύτητες, τύρβη	Μαύρα παράθυρα, υψηλές θερμοκρασίες στα ανοίγματα, θερμότητα αισθητή έντονα στο χώρο	Ορατές φλόγες, ορατές από έξω

Πίνακας 2: Δείκτες πυρκαγιάς ανά στάδιο αυτής

Ας αναλύσουμε λοιπόν ενδελεχώς τους δείκτες αυτούς για κάθε στάδιο της πυρκαγιάς ξεχωριστά. Αρχικά, όσον αφορά το στάδιο της έναρξης της πυρκαγιάς, το κτίριο διαμορφώνει τις βάσεις για τη μετέπειτα εξέλιξη αυτής. Το μέγεθος και οι δυνατότητες αερισμού, καθώς και τυχόν στοιχεία ενεργητικής πυροπροστασίας διαμορφώνουν το πόσο γρήγορα μπορεί να κινηθεί η πυρκαγιά εντός αυτού. Η διαμόρφωση του είναι σημαντική για τις δυνατότητες επέμβασης. Ο καπνός αρχικά θα είναι περιορισμένος, ιδιαίτερα εξωτερικά του κτιρίου ίσως και ανύπαρκτος. Δεν υπάρχει καλή διαστρωμάτωση του καπνού εσωτερικά, εξαιτίας της μικρής θερμοκρασίας αυτού, και συνεπώς φαίνεται να διαχέεται στο χώρο. Αν βγαίνει εκτός του κτιρίου θα είναι ανοιχτόχρωμος και με πολύ περιορισμένη άνωση, δηλαδή κινείται κατά βάση οριζοντίως.

Η ροή του αέρα δεν είναι σημαντικός παράγοντας κατά το στάδιο αυτό, διότι η φωτιά έχει περίσσεια οξυγόνου που αρκεί για την τροφοδοσία της και η εσωτερική πίεση είναι χαμηλή, τόσο λόγω χαμηλής παραγωγής μάζας καπνού όσο και λόγω χαμηλής θερμοκρασίας αυτού. Όμως, μπορεί να παρατηρηθεί πολύ ήπια κινητικότητα αέρα και καπνού σε ανοίγματα πολύ κοντά στο χώρο της εστίας της πυρκαγιάς. Η δε παραγόμενη θερμότητα είναι ήπια, με θερμοκρασίες κοντά σε αυτές του περιβάλλοντος και ίσως ελαφρά παρουσία συμπτωμάτων υδρατμού στους υαλοπίνακες. Τέλος, οι φλόγες στο χώρο είναι περιορισμένες, εάν υπάρχουν, κυρίως κοντά στην περιοχή έναυσης και χαμηλές.

Κατά το στάδιο της ανάπτυξης της πυρκαγιάς, έχουμε συνθήκες καλά αεριζόμενης πυρκαγιάς. Η διαμόρφωση του κτιρίου καθορίζει τις δυνατότητες εξάπλωσης αυτής. Ο καπνός έχει πλέον έντονη διαστρωμάτωση με την ανάπτυξη ουδέτερου επιπέδου σχετικά ψηλά και αρκετά καλή ορατότητα κάτω από αυτό. Εάν υπάρχουν ανοίγματα και ο καπνός δεν περιορίζεται, θα μεταφέρεται πλέον με ευκολία και σε άλλους χώρους του κτιρίου. Ο καπνός είναι πλέον πιθανότατα ορατός και από το εξωτερικό του κτιρίου.

Η ροή του αέρα εξαρτάται από τη διαμόρφωση των ανοιγμάτων και τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Εάν υπάρχει ένα μόνο άνοιγμα, έχουμε δύο διακριτές ροές σε αυτό. Στο άνω μέρος υπάρχει μια εξερχόμενη ροή καπνού και στο κάτω μέρος αυτού υπάρχει μια εισερχόμενη ροή αέρα. Όσο η φωτιά επεκτείνεται, τόσο αυξάνεται η ταχύτητα και άρα η παροχή μάζας στις δύο αυτές επιφάνειες. Επίσης, σε ανοίγματα κοντά στην εστία της πυρκαγιάς η ταχύτητα των ροών θα είναι πιθανότατα μεγαλύτερη.

Η θερμότητα πλέον αρχίζει και αυξάνει τη θερμοκρασία τόσο στο χώρο της πυρκαγιάς όσο και σε άλλους παρακείμενους χώρους. Δεν υπάρχουν πλέον συμπτωμάτα στα παράθυρα ενώ ίσως υπάρχουν σημάδια καφέ χρώματος στα παράθυρα από τα προϊόντα της πυρόλυσης. Η θερμοκρασία στο πάνω μέρος των ανοιγμάτων του χώρου είναι αυξημένη ενώ μπορεί να παρατηρηθεί ράγισμα υαλοπινάκων εξαιτίας της θερμοκρασιακής αυτής διαφοράς. Φλόγες παρατηρούνται πλέον και σε άλλες περιοχές πέραν της εστίας, οι οποίες είναι πλήρους ανάπτυξης μέχρι την οροφή και πιθανών να επεκτείνονται και οριζοντίως. Μεμονωμένες φλόγες σε αέριες μάζες μπορεί να κάνουν την εμφάνισή τους.

Κατά το στάδιο του flashover, ο παράγων κτίριο δεν διαδραματίζει ρόλο πέραν του χρόνου που θα απαιτηθεί για την ανάπτυξή του. Ο καπνός πλέον έχει αρχίσει και κατεβαίνει προς το πάτωμα, είναι έντονος και το χρώμα του γίνεται ολόενα και πιο σκούρο. Η αύξηση της έντασης

των ταχυτήτων εισόδου αέρα και εξόδου καπνού αποτελεί ένα σημαντικό δείκτη επικείμενου flashover. Αν το άνοιγμα εισόδου αέρα είναι μοναδικό, παρατηρείται εναλλαγή ανάμεσα σε είσοδο αέρα και έξοδο καπνού.

Εξωτερικά του κτιρίου η θερμοκρασία δεν είναι εμφανής. Όμως, εσωτερικά η σταδιακώς αυξανόμενη θερμοκρασία με ταχύ ρυθμό και δείκτες έντασης αυτής, όπως για παράδειγμα η έντονη έκλυση αερίων πυρόλυσης από καύσιμα υλικά που δεν εκτίθενται άμεσα στην πυρκαγιά είναι πολύ σημαντικά σημάδια. Φλόγες στο στρώμα καπνού, ορατές με γυμνό μάτι ή με τη χρήση της θερμικής κάμερας όπως επίσης και κατά μήκος του ταβανιού (rollover) προμηνύουν την εκδήλωση του φαινομένου. Η θερμική κάμερα αποτελεί πολύ σημαντικό εργαλείο στην περίπτωση αυτή. Πρέπει να σημειωθεί ότι η εμφάνιση φαινομένου έντονων φλογών στην οροφή σημαίνει ότι ίσως είναι ακόμα και αργά για την εκκένωση του χώρου πριν το flashover.

Τέλος, κατά το στάδιο της πλήρους ανάπτυξης που έχουμε τη σταθερή κατάσταση, η πυρκαγιά πλέον είναι ελεγχόμενη από τον αέρα. Το κτίριο ελέγχει πλέον την εξέλιξή της μέσω του διαμορφωθέντος προφίλ αερισμού. Ο καπνός γίνεται ολοένα και πιο σκούρος, ακόμα και μαύρος, αλλά εξαρτάται σημαντικά από το είδος των καιόμενων υλικών. Ο όγκος και η ταχύτητα αυτού φανερώνουν το ρυθμό καύσης και το πόσο περιορισμένη είναι η πυρκαγιά. Το στρώμα θερμών αερίων φτάνει έως το πάτωμα. Η ροή του αέρα εξαρτάται από τον αερισμό του κτιρίου. Γενικά, πλέον η ροή είναι πλήρως διαμορφωμένη και δύσκολα μεταβάλλεται. Ο καπνός είναι έντονα τυρβώδης και εξέρχεται με βιαιότητα από το πάνω μέρος του ανοίγματος.

Η παραγόμενη θερμότητα είναι έντονη, με μαύρους, θρυμματισμένους υαλοπίνακες, θερμές επιφάνειες όπως πόρτες και η έντονη θερμοκρασία αντιληπτή ακόμα και με τον προστατευτικό εξοπλισμό. Οι φλόγες είναι ορατές και φανερώνουν το χώρο πυρκαγιάς και τον τρόπο κίνησης αυτής.

2.4 Παράγοντες και εκτίμηση κινδύνου στις αστικές πυρκαγιές

Σε μια αστική πυρκαγιά, οι κίνδυνοι για τους χρήστες ενός κτιρίου είναι πολλαπλοί. Φυσικά υπάρχει το ζήτημα της δομικής ακεραιότητας, το οποίο είναι εύκολα αντιληπτό. Η πυρκαγιά δεν πρέπει να επηρεάσει την στατικότητα του κτιρίου για επαρκή χρόνο, ούτως ώστε να καταστεί η εκκένωσή του ασφαλής δίχως την πρόκληση πανικού. Όμως αυτό δεν αρκεί. Υπάρχουν πολλοί ακόμη παράγοντες που μπορούν να προκαλέσουν επιπτώσεις στην υγεία των ανθρώπων

σε μια πυρκαγιά. Η ταχύτητα διάδοσης αυτής είναι επίσης σημαντικό στοιχείο. Ο καπνός και τα παράγωγα αυτού, που δυσχεραίνουν την ορατότητα, αλλά και η τοξικότητα αυτών είναι ίσως ο σημαντικότερος παράγοντας, καθώς έχει αποδειχθεί ότι προκαλεί τους περισσότερους θανάτους σε μια αστική πυρκαγιά.

Αρχικά λοιπόν, κρίνεται σκόπιμο να αναλύσουμε το θεσμικό πλαίσιο που περιβάλλει την συμπεριφορά των δομικών υλικών στις πυρκαγιές. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, η Οδηγία Δομικών Προϊόντων (CPD) 106/1989 και ο Κανονισμός Δομικών Προϊόντων (CPR) 305/2011 καθορίζουν μια κοινή ευρωπαϊκή μεθοδολογία για την συγκριτική αξιολόγηση της συμπεριφοράς των δομικών προϊόντων σε συνθήκες φωτιάς, με σκοπό τον εναρμονισμό των εθνικών προτύπων και την ελεύθερη κυκλοφορία των δομικών υλικών στην ευρωπαϊκή αγορά.

Στο ευρωπαϊκό σύστημα, η καταλληλότητα των δομικών προϊόντων πιστοποιείται μέσω δύο παραμέτρων της συμπεριφοράς τους, αυτή της αντίδρασης στη φωτιά (reaction to fire) και αυτή της πυραντίστασης (fire resistance). Η αντίδραση στη φωτιά αφορά το πώς τα υλικά αλληλοεπιδρούν με αυτή, ιδίως κατά τα αρχικά στάδιά της, προκειμένου να περιορισθεί η ταχύτητα εξάπλωσης αυτής. Το στοιχείο αυτό αφορά δομικά προϊόντα που αναμένεται να εκτεθούν πρώτα στην πυρκαγιά, όπως τα εσωτερικά τελειώματα.

Η πυραντίσταση αφορά τον περιορισμό της φωτιάς στο χώρο που ξεκίνησε και την αποτροπή της δομικής αστοχίας της κατασκευής, αναφέρεται δε στο στάδιο της πλήρους ανάπτυξης. Ο δείκτης αυτός αφορά φέροντα και μη δομικά στοιχεία, όπως και στοιχεία της παθητικής πυροπροστασίας.

Τα δομικά υλικά ταξινομούνται κατά την αντίδρασή τους στη φωτιά με βάση τον κανονισμό 364/2016 και το πρότυπο EN 13501. Υπάρχει δε ένα ολοκληρωμένο θεσμικό πλαίσιο που διέπει τις πρότυπες δοκιμές των υλικών για την πιστοποίηση της αντίδρασης αυτών στη φωτιά. Η αντίδραση στη φωτιά αξιολογείται με βάση την συμβολή στην ανάφλεξη και καύση, την συμβολή στην παραγωγή καπνού και την συμβολή στη παραγωγή φλεγόμενων σωματιδίων.

Όσον αφορά τώρα την πυραντίσταση των δομικών στοιχείων, η κατηγοριοποίηση γίνεται με βάση την απόφαση EC 367/2000 και το πρότυπο EN 13501. Η πυραντίσταση αυτών αναφέρεται στην χρονική διάρκεια τα οποία αυτά υφίστανται μια συγκεκριμένη θερμική και μηχανική φόρτιση και ικανοποιεί ορισμένα κριτήρια θερμικής και μηχανικής συμπεριφοράς. Έτσι

λοιπόν, με βάση τον κανονισμό πυροπροστασίας κτιρίων, ορίζεται ανάλογα με τη χρήση και το κτίριο ελάχιστος δείκτης πυραντίστασης των στοιχείων αυτού.

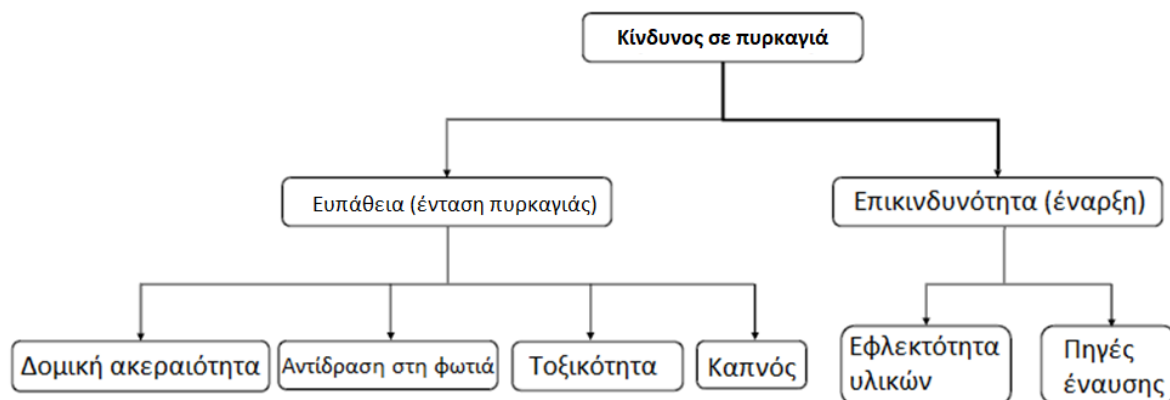
Ο δείκτης πυραντίστασης προσδιορίζεται με βάση ορισμένα κριτήρια. Αυτά είναι η δυνατότητά του να φέρει φορτίο, που αναφέρεται στην ικανότητά του να υποστηρίζει το φορτίο για το οποίο έχει σχεδιασθεί δίχως να καταρρεύσει σε συνθήκες πυρκαγιάς, η δομική ακεραιότητα, που αναφέρεται στην παρεμπόδιση της μεταφοράς φλόγας και θερμών αερίων μέσω αυτού, η θερμομονωτική ικανότητα, που αναφέρεται στον περιορισμό της αναπτυσσόμενης θερμοκρασίας στην μη εκτεθειμένη στην φωτιά επιφάνεια, η ακτινοβολία, που αναφέρεται στην μετάδοση θερμότητας μέσω ακτινοβολίας από το στοιχείο, η μηχανική του δράση, που αφορά την αντίσταση του στοιχείου σε κρούση, η δυνατότητα σφράγισής του που αφορά ανοίγματα που πρέπει να κλείνουν αυτόματα σε συνθήκες πυρκαγιάς και η διαρροή καπνού που αναφέρεται στην μη μεταφορά καπνού διαμέσω του στοιχείου.

Στην ισχύουσα ελληνική νομοθεσία, τα παραπάνω ενσωματώθηκαν με τον νέο κανονισμό πυροπροστασίας κτιρίων του 2018 με το προεδρικό διάταγμα 41. Έτσι, με τον τρόπο αυτό υπήρξε εναρμόνιση του εθνικού κανονιστικού πλαισίου με το αντίστοιχο ευρωπαϊκό και ιδιαίτερα με τις οδηγίες CPD και CPR που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Παραπάνω λοιπόν αναφερθήκαμε σε ποσοτικές μεταβλητές, ήτοι την αντίδραση στη φωτιά και την πυραντίσταση, οι οποίες σχετίζονται άμεσα με τη δομική ακεραιότητα του κτιρίου, το ρυθμό εξάπλωσης μιας πυρκαγιάς σε αυτό και την αναφλεξιμότητα των υλικών που καθορίζει την έναρξη μιας πυρκαγιάς. Ένας άλλος όμως σημαντικός παράγοντας, ίσως ο σημαντικότερος σε μια αστική πυρκαγιά, είναι ο καπνός και η τοξικότητα αυτού. Στο προηγούμενο υποκεφάλαιο έγινε μια πρώτη ανάλυση ανάμεσα στη σχέση παραγωγής καπνού και σταδίου της πυρκαγιάς, η οποία σχετίζεται με την ύπαρξη πλεονάσματος ή ελλείματος αέρα καύσης στο χώρο.

Ο καπνός σε μια αστική πυρκαγιά, πέραν της χρησιμότητάς του ως δείκτη εξέλιξης και πορείας της, αποτελεί και τον βασικότερο κίνδυνο και την αιτία για τους περισσότερους τραυματισμούς και θανάτους σε αυτή. Ο καπνός πέραν του ότι δυσχεραίνει την ορατότητα στο χώρο, είναι πολλές φορές τοξικός ή ερεθιστικός, προκαλεί ασφυξία εξαιτίας του μονοξειδίου του άνθρακα ή της εκτόπισης του ατμοσφαιρικού αέρα που απαιτείται για την αναπνοή και τέλος αποτελεί και ο ίδιος καύσιμο το οποίο μπορεί ανά πάσα στιγμή να αναφλεγεί και να προκαλέσει ανθρώπινες απώλειες και τραυματισμούς.

Θα μπορούσαμε λοιπόν να κατηγοριοποιήσουμε όλους αυτούς τους κινδύνους που αναλύσαμε με κριτήριο την συνεισφορά αυτών στην πυρκαγιά σαν φαινόμενο. Είναι λοιπόν εμφανές ότι η ευφλεκτότητα ενός υλικού και οι πηγές έναυσης σε ένα χώρο καθορίζουν την επικινδυνότητα να συμβεί μια πυρκαγιά, δηλαδή την πιθανότητα που υπάρχει αυτή να εκδηλωθεί. Από την άλλη, η δομική ακεραιότητα, η αντίδραση των υλικών στη φωτιά, ο καπνός και η τοξικότητα αυτού καθορίζουν την ευπάθεια του εξεταζόμενου κτιρίου απέναντι στο φαινόμενο, δηλαδή καθορίζουν την ένταση και την ταχύτητα με την οποία θα εξελιχθεί το φαινόμενο και δυνητικά τις απώλειες. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν φυσικά και τα ενεργητικά και παθητικά συστήματα πυροπροστασίας, πέραν των υλικών που χρησιμοποιούνται, τα οποία και δεν αποτελούν αντικείμενο της παρούσας μελέτης. Τα παραπάνω αποτυπώνονται συνοπτικά στο διάγραμμα της εικόνας 5 [9].



Εικόνα 5: Εκτίμηση κινδύνου σε μια αστική πυρκαγιά

Έτσι λοιπόν, σύμφωνα με το πρότυπο ISO 135713-2012, προκειμένου να εξασφαλισθεί η ασφαλής εκκένωση ενός κτιρίου, οι κίνδυνοι αυτοί κατηγοριοποιούνται και εξετάζονται με βάση τις επιπτώσεις τους, προκειμένου να υπολογισθεί το χρονικό όριο για το οποίο το κτίριο καθίσταται ασφαλές προκειμένου η εκκένωση να πραγματοποιηθεί δίχως πανικό και με ασφάλεια.

3

Οπλισμένο Σκυρόδεμα

3.1 Εισαγωγή

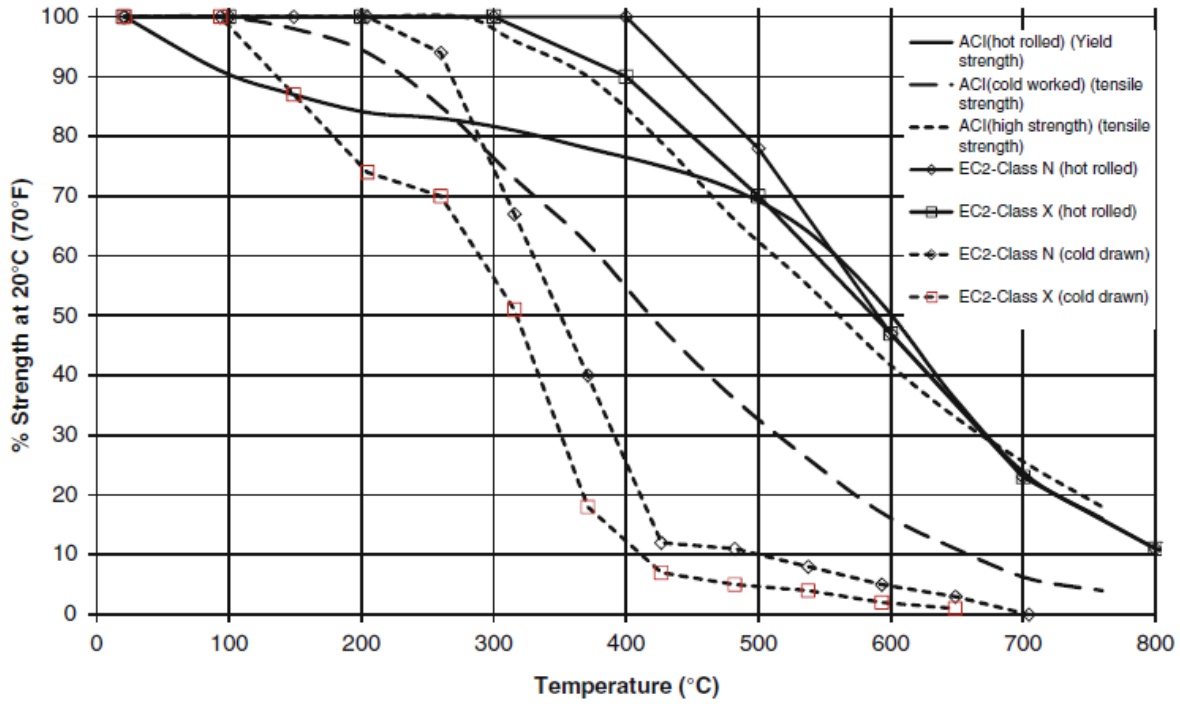
Οι κατασκευές από σκυρόδεμα αποτελούν την συντριπτική πλειονότητα των δομικών κατασκευών στον Ελλαδικό χώρο. Παράλληλα, οι κατασκευές αυτές έχουν εξαιρετική συμπεριφορά απέναντι στις πυρκαγιές. Από τη φύση του το σκυρόδεμα είναι άκαυστο και έχει σχετικά μικρή θερμική αγωγιμότητα. Έτσι, αυτό του δίδει την ικανότητα σε μια πυρκαγιά να προστατεύσει τον πυρήνα του, που διαθέτει και τον οπλισμό, ο οποίος πυρήνας συνεχίζει να φέρει το φορτίο της κατασκευής, αποτρέποντας την καταστροφική αστοχία της [10].

Στην Ευρώπη, η νομοθεσία που διέπει τον σχεδιασμό των κατασκευών απέναντι σε φωτιά συμπεριλαμβάνεται στους Ευρωκώδικες. Για το οπλισμένο σκυρόδεμα, πηγή αποτελεί ο «Ευρωκώδικας 2: Σχεδιασμός των κατασκευών από σκυρόδεμα – Μέρος 1-2: Σχεδιασμός για πυρασφάλεια» [11]. Εκεί δίνονται οι απαιτούμενες διαστάσεις και επικαλύψεις για την επίτευξη του απαιτούμενου δείκτη πυραντίστασης για κάθε είδους δομικό στοιχείο. Επίσης, παρέχονται οι θερμικές και μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος συναρτήσει της θερμοκρασίας. Πέραν των προκαθορισμένων λύσεων, παρέχει δύο μεθοδολογίες υπολογισμού, μια απλή και μία σύνθετη, ανάλογα με την πολυπλοκότητα της κατασκευής η οποία καθορίζει και το βαθμό αλληλεπίδρασης μεταξύ των διαφόρων δομικών στοιχείων. Τέλος, σε περιπτώσεις κατασκευών τόσο από χάλυβα όσο και σκυρόδεμα, χρησιμοποιείται ο «Ευρωκώδικας 4: Σχεδιασμός σύμμεικτων κατασκευών από χάλυβα και σκυρόδεμα».

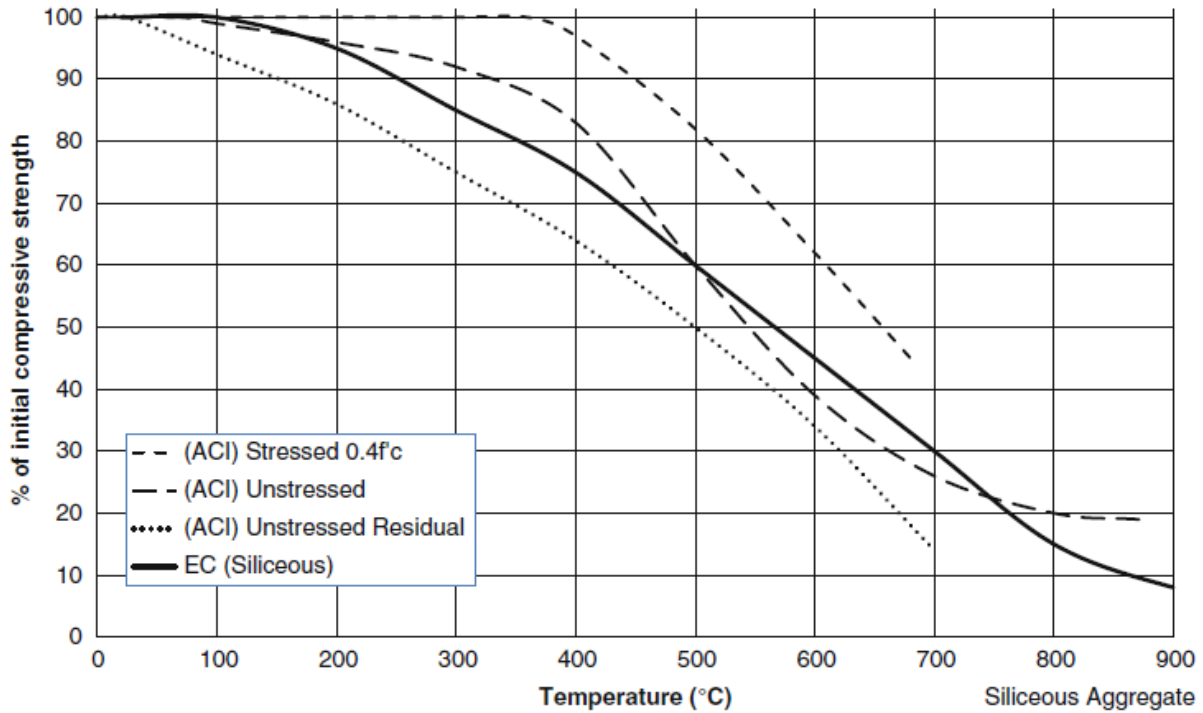
3.2 Οι ιδιότητες του οπλισμένου σκυροδέματος

Κατά την μελέτη των φυσικών και θερμικών ιδιοτήτων του οπλισμένου σκυροδέματος, πρέπει να μελετήσουμε και να λάβουμε υπόψη τις ιδιότητες των δύο επιμέρους στοιχείων που το συγκροτούν, δηλαδή του χάλυβα και του σκυροδέματος. Είναι σημαντικό να διατυπωθεί ρητά ότι, τα είδη των δύο αυτών υλικών που συναντώνται στην αγορά είναι πάρα πολλά και συνεπώς είναι δυνατό η ιδιότητες του τελικού προϊόντος να διαφέρουν σημαντικά. Υπάρχει χάλυβας ψυχρής και θερμής διέλασης καθώς και κράματα υψηλής αντοχής. Το σκυρόδεμα είναι ένα μίγμα του οποίου οι ιδιότητες εξαρτώνται σημαντικά τόσο από την συνδετική κονία (τσιμέντο) που χρησιμοποιήθηκε, τα διάφορα πρόσθετα (λχ. άσβεστος), την σύσταση, κοκκομετρία και ποσοστιαία συνεισφορά των χρησιμοποιηθέντων αδρανών καθώς και τις συνθήκες παρασκευής του.

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια τυπικά διαγράμματα αντοχής σε εφελκυσμό και ορίου διαρροής για χάλυβα, συναρτήσει της θερμοκρασίας. Για το δε σκυρόδεμα, πέραν της θερμοκρασίας, ένας ακόμα παράγοντας που επιδρά στην θλιπτική του αντοχή είναι και το φέρων φορτίο, δυσχεραίνοντας έτσι περαιτέρω τους υπολογισμούς. Τα διαγράμματα αυτά προκύπτουν από τον Ευρωκώδικα 2 και το αντίστοιχο αμερικανικό πρότυπό του «ACI216.1-07 - Code Requirements for Determining Fire resistance of Concrete and Masonry Construction Assemblies» [12]. Λοιπές ιδιότητες, όπως η θερμική αγωγιμότητα και πυκνότητα, είναι και αυτές συνάρτηση της θερμοκρασίας και μπορούν να βρεθούν στις ως άνω πηγές.



Εικόνα 6: Είδη χάλυβα και αντοχή τους συναρτήσει της θερμοκρασίας



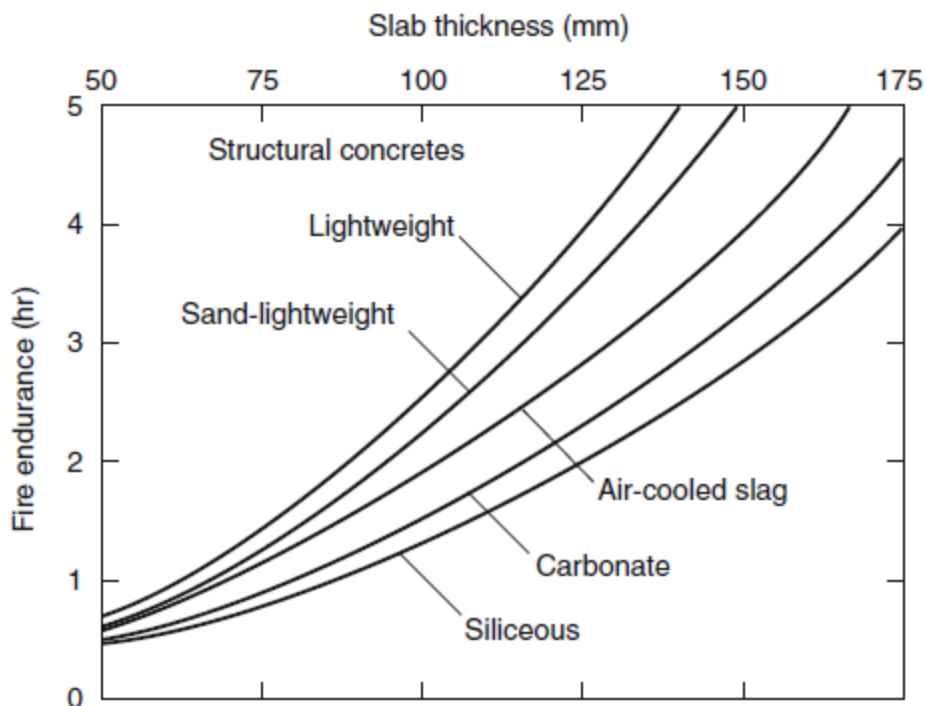
Εικόνα 7: Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος με αδρανή πυριτικής φύσης συναρτήσει της θερμοκρασίας

3.3 Μεταφορά θερμότητας και ιδιότητες

Ένας παράγοντας που πρέπει να μελετηθεί είναι η συμπεριφορά του οπλισμένου σκυροδέματος στην μεταφορά θερμότητας δια μέσου αυτού. Ο λόγος απαιτείται μια τέτοια μελέτη είναι απλός. Ένας σημαντικός τρόπος μετάδοσης της πυρκαγιάς σε ένα κτίριο, όπως αναφέραμε και στην εισαγωγή, πέραν από την μετάδοση μέσω της κίνησης του καπνού, είναι η απευθείας μετάδοση θερμότητας με συναγωγή διαμέσως ενός δομικού στοιχείου, όπως είναι για παράδειγμα μια πλάκα, μεταξύ δύο χώρων. Έτσι, σε μια φλεγόμενη πολυκατοικία, η πυρκαγιά μπορεί να μεταφερθεί από ένα διαμέρισμα σε ένα άλλο, τα οποία δεν επικοινωνούν μέσω του καπνού, μέσο της θερμοκρασίας που θα αναπτυχθεί λχ. σε έναν κοινό τοίχο ο οποίος είναι εκτεθειμένος σε φλόγες ή μέσω της κοινής πλάκας που λειτουργεί ως ταβάνι και πάτωμα για διαμερίσματα δύο διαδοχικών ορόφων, ιδίως δε αν αναλογιστεί κάποιος ότι η θερμοκρασία σε ένα φλεγόμενο χώρο είναι μέγιστη στο ψηλότερο του σημείο.

Προκειμένου λοιπόν να αποφευχθεί η ανάφλεξη υλικών στη μη εκτεθειμένη πλευρά ενός δομικού στοιχείου της κατασκευής, πρέπει να περιοριστεί η θερμοκρασία που αναπτύσσεται σε αυτήν. Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM E119 η μέση θερμοκρασία πρέπει να είναι έως 121 °C ενώ η μέγιστη μετρούμενη σε κάποιο σημείο της έως 163 °C. Το πρότυπο ASTM E119 καθώς και το ISO 834, που θέτει παρόμοια πρότυπα, καθορίζουν την πειραματική μεθοδολογία για την αντοχή έναντι πυρκαγιάς ενός κτιρίου.

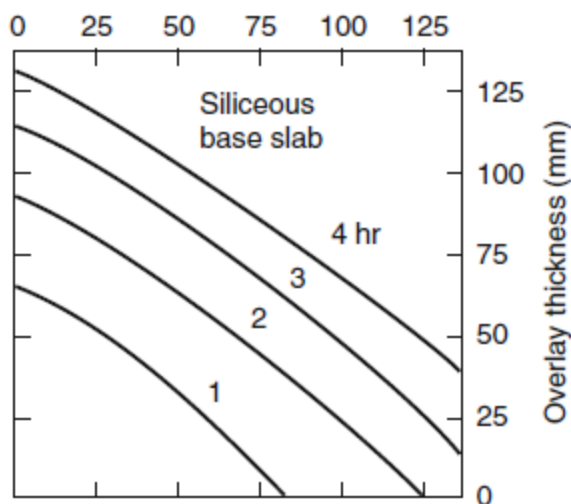
Έτσι λοιπόν, σύμφωνα με τα παραπάνω, από πειράματα προκύπτει ότι η θερμοκρασία που προκύπτει στην μη εκτεθειμένη πλευρά του δομικού στοιχείου εξαιτίας της αγωγής είναι συνάρτηση τόσο του πάχους του στοιχείου όσο και της κοκκομετρίας των αδρανών που έχουν χρησιμοποιηθεί κατά την κατασκευή του. Στην εικόνα 8 φαίνεται η αντοχή έναντι πυρκαγιάς συναρτήσει της θερμοκρασίας, δηλαδή, ο χρόνος που απαιτείται προκειμένου να ξεπεραστούν τα όρια που θέτει ο κανονισμός και για τις δεδομένες συνθήκες πυρκαγιάς που εξετάζονται σε αυτόν [13]. Άλλοι παράγοντες που επιδρούν στην θερμική αγωγιμότητα του σκυροδέματος και, κατ' επέκταση, στην αντοχή έναντι πυρκαγιάς είναι το ποσοστό αέρα, η περιεχόμενη υγρασία, το σχετικό βάρος και η ηλικία του σκυροδέματος [14]. Παρ' όλα αυτά, πειραματικά προέκυψε ότι οι παράγοντες αυτοί έχουν ελάχιστη συνεισφορά συγκριτικά με το πάχος του στοιχείου και την κοκκομετρία των αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν [13].



Εικόνα 8: Χρόνος για να ξεπεραστούν τα κατά ASTM E119 όρια σε έναν τοίχο από σκυρόδεμα συναρτήσει του πάχους αυτού

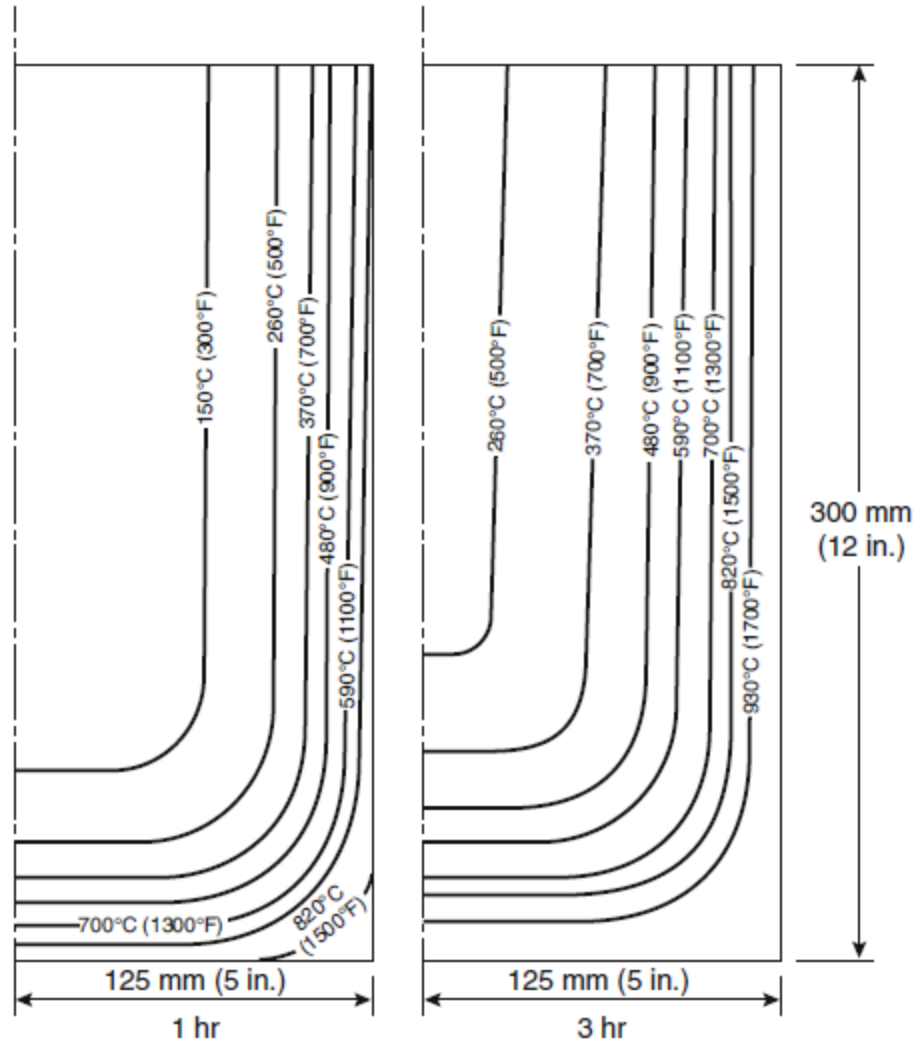
Όπως αναφέρθηκε, σημαντικό είναι να εξεταστεί και η συμπεριφορά του δομικού στοιχείου της πλάκας ενός κτιρίου έναντι πυρκαγιάς. Τα στοιχεία αυτά είναι αυτά που συνήθως εκτίθενται στη μέγιστη θερμική ισχύ σε μια πυρκαγιά και μπορούν λοιπόν να προκαλέσουν την μετάδοση της φωτιάς μεταξύ δύο εντελώς ανεξάρτητων χώρων. Συνήθως, οι οροφές και τα πατώματα αποτελούνται από πληθώρα υλικών τα οποία χρησιμοποιούνται ως επικάλυψη του σκυροδέματος, όπως για παράδειγμα κεραμικά πλακάκια, ελαφρές κονίες, γυψοσανίδες, μονωτικά υλικά, ρητίνες κ.α. Στο διάγραμμα της εικόνας 9 αποτυπώνονται οι χρόνοι συναρτήσει του πάχους για μια πλάκα που αποτελείται από σκυρόδεμα και είναι επικαλυμμένη στην μη εκτεθειμένη της πλευρά με ελαφρά κονία [15].

Thickness of normal weight concrete base slab (mm)



Εικόνα 9: Αντοχή πλάκας επικαλυμμένης με ελαφρά κονία

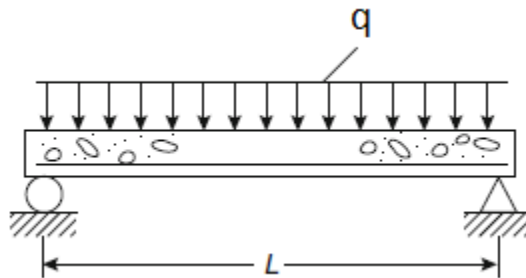
Τέλος, κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούμε στην αναπτυσσόμενη θερμοκρασία στο εσωτερικό των δομικών στοιχείων εξαιτίας της πυρκαγιάς. Ο λόγος για την ανάλυση αυτή είναι ότι όσα αναφέρθηκαν παραπάνω αφορούν στοιχεία τα οποία δεν φέρουν οπλισμό. Ο οπλισμός αφενός επηρεάζει σημαντικά την θερμική αγωγιμότητα του στοιχείου και, κατ' επέκταση, την ανάπτυξη της θερμοκρασίας στην μη εκτεθειμένη πλευρά, αφετέρου επηρεάζεται και ο ίδιος από το αναπτυσσόμενο θερμικό προφίλ. Στην εικόνα 10 απεικονίζεται ενδεικτικά [13] η κατανομή θερμοκρασίας σε μια δοκό από σκυρόδεμα διαστάσεων 250 x 300 mm που υφίσταται θερμικό φορτίο κατά το πρότυπο ASTM E119. Πληθώρα πληροφοριών και διαγραμμάτων παρουσιάζεται και στον Ευρωκώδικα 2 (EN 1992-1-2). Για τον υπολογισμό του θερμοκρασιακού προφίλ σε δομικά στοιχεία χρησιμοποιείται πλέον η ανάλυση μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή με τη χρήση μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων. Παραδείγματα σύγχρονων τέτοιων μοντέλων που χρησιμοποιούνται ευρέως και είναι προσαρμοσμένα στην περίπτωση μας είναι ενδεικτικά τα FIRES T3 [16], TASEF-2 [17] και SAFIR [18].



Εικόνα 10: Κατανομή θερμοκρασίας στο εσωτερικό δοκού 250x300mm μετά από 1 και 3 ώρες

3.4 Υπολογισμός καμπτικής αντοχής αμφιέρειστης δοκού

Προκειμένου να υπολογίσουμε την επίδραση μιας πυρκαγιάς σε ένα δομικό στοιχείο, θα κάνουμε έναν απλό υπολογισμό της καμπτικής αντοχής μιας αμφιέρειστης δοκού, συμπεριλαμβάνοντας όσα αναφέραμε παραπάνω. Έστω λοιπόν η αμφιέρειστη δοκός του σχήματος 11. Η δοκός αυτή φέρει άρθρωση στο ένα της άκρο και κύλιση στο άλλο καθώς επίσης και κατανεμημένο φορτίο μεγέθους q σε όλο το μήκος της L .



Εικόνα 11: Αμφιέρειστη δοκός με κατανεμημένο φορτίο q

Η καμπτική αντοχή της δοκού δίδεται από τον παρακάτω τύπο:

$$M_n = A_s * f_y * \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

Όπου:

A_s = Η επιφάνεια του οπλισμού

f_y = Το όριο ελαστικότητας του οπλισμού

d = Η απόσταση του κέντρου οπλισμού από την τελευταία ίνα που υφίσταται θλίψη

a = Το ισοδύναμο πάχος του στοιχείου, που υπολογίζεται ως:

$$a = \frac{A_s * f_y}{0.85 * f'_c * b}$$

Όπου:

f'_c = Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος

b = Πλάτος της δοκού

Αν τώρα η θλιπτική αντοχή της δοκού σε θερμοκρασία θ ορισθεί ως:

$$M_{n\theta} = A_s * f_{y\theta} * \left(d - \frac{a_{\theta}}{2}\right)$$

Τότε, για θερμοκρασία $\theta = 500$ °C από τα διαγράμματα των εικόνων 5 και 6 έχουμε ότι:

$$f_{y\theta} = 0.7 * f_y$$

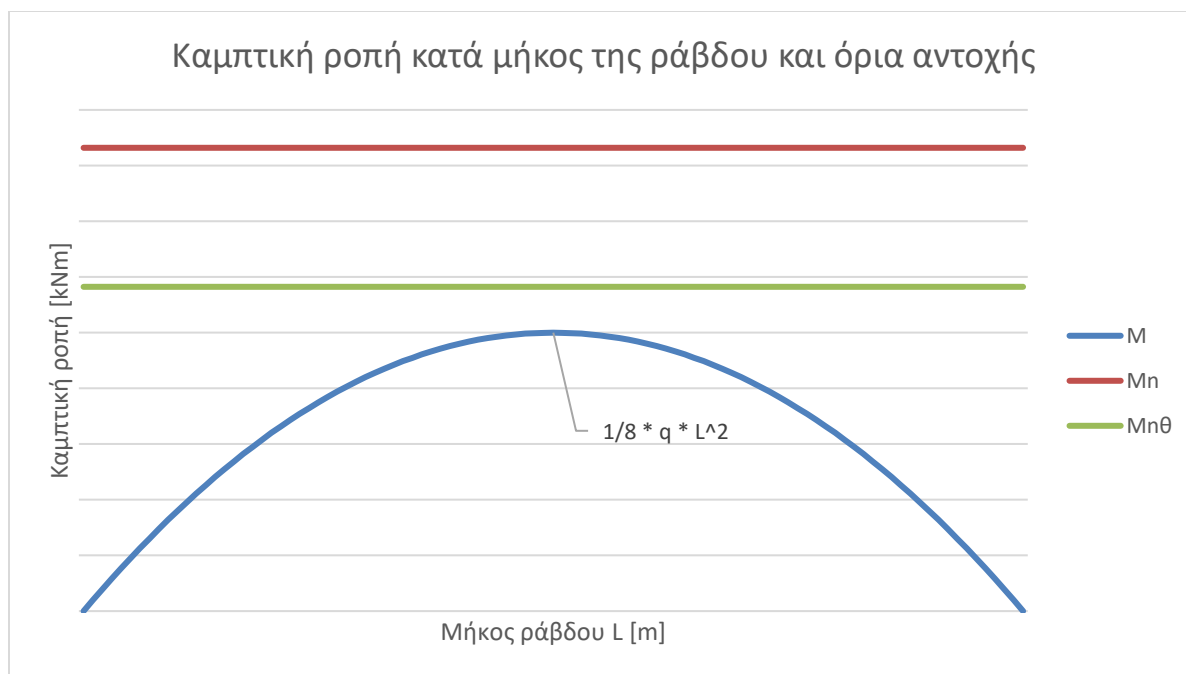
$$f'_{c\theta} = 0.6 * f'_c$$

Φυσικά, πρέπει να λάβουμε υπόψη μας τα εξής. Πρώτον, όπως αναφέρθηκε, το σκυρόδεμα είναι σχετικά κακός αγωγός της θερμότητας, συνεπώς μια θερμοκρασία 500 °C θα ήταν δύσκολο να επιτευχθεί στην μη εκτεθειμένη πλευρά, αν αυτή ήταν που υφίστατο θλίψη, όπως επίσης και στο εσωτερικό της δοκού. Δεύτερον, η ανάπτυξη της θερμοκρασίας εξαρτάται από ποικίλους παράγοντες, όπως το πάχος του στοιχείου, το χρόνο και το θερμικό φορτίο, μεταξύ άλλων και, τέλος, το γεγονός ότι οι αντοχές του σκυροδέματος μειώνονται δραματικά μετά τους 750 °C σημαίνει ότι, το πάχος του σκυροδέματος που είναι εκτεθειμένο σε τέτοιες θερμοκρασίες θα πρέπει, κατά τον κανονισμό, να μην λαμβάνεται καν υπόψη στους υπολογισμούς μας. Όμως, για μια απλή πρώτη προσέγγιση που έχει ως σκοπό να παρουσιάσει την ποιοτική αποτύπωση των παραγόντων αυτών, μπορούμε να θεωρήσουμε ως αντιπροσωπευτικές τις παραδοχές μας.

Έτσι λοιπόν, έχουμε ότι:

$$M_{n\theta} = 0.70 * M_n$$

Και, αν αποτυπώσουμε την καμπτική ροπή συναρτήσει του μήκους και τα αντίστοιχα όρια υπό κανονικές συνθήκες και υπό συνθήκες πυρκαγιάς:



Εικόνα 12: Καμπτική ροπή συναρτήσει του μήκους της ράβδου

Έτσι λοιπόν γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι σε περίπτωση πυρκαγιάς, τα όρια αντοχής της δοκού από οπλισμένο σκυρόδεμα μειώνονται δραματικά και αυτό μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα να μειωθούν είτε τόσο ώστε να έχουμε ακόμα και υπέρβαση των ορίων. Παρ' όλα αυτά, επειδή χρησιμοποιούνται αρκετά μεγάλοι συντελεστές ασφαλείας στις κατασκευές αυτές και το φορτίο είναι υποπολλαπλάσιο της αντοχής, κάτι τέτοιο είναι απίθανο, ιδιαίτερος χάρη στην αντοχή του σκυροδέματος απέναντι στη φωτιά, και συνεπώς αυτός είναι και ο λόγος που δεν υπάρχουν καταρρεύσεις κτιρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα εξαιτίας πυρκαγιάς.

3.5 Ενδείξεις αστοχίας σκυροδέματος σε συνθήκες πυρκαγιάς

Όπως αναφέραμε, είναι πολύ σημαντικό για τον σύγχρονο πυροσβεστικό υπάλληλο να είναι σε θέση να αναμένει, να αναγνωρίζει και να αξιολογεί την κατάσταση στην οποία θα βρεθεί το σκυρόδεμα και τα αντίστοιχα δομικά στοιχεία αποτελούμενα από αυτό, τόσο κατά την εξέλιξη αυτής όσο και μετά την ολοκλήρωση του φαινομένου. Έτσι, πέραν της βασικής θεωρίας και μηχανικής περί αστοχιών για το υλικό, κρίνεται σκόπιμο να παρουσιασθούν ορισμένα παραδείγματα αστοχίας δομικών στοιχείων σκυροδέματος και να σχολιασθούν με βάση τα όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως.

Αρχικά, όπως αναφέρθηκε, η αστοχία του οπλισμένου σκυροδέματος μπορεί να οφείλεται στην μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος αυτού καθ' αυτού καθώς και του οπλισμού, εξαιτίας της αύξησης της θερμοκρασίας. Όμως, εξαιτίας τη αρκετά καλής θερμομονωτικής συμπεριφοράς του σκυροδέματος, κάτι τέτοιο είναι δύσκολο να αποτελέσει αποκλειστικά από μόνο του λόγο αστοχίας της κατασκευής. Αυτό το οποίο οδηγεί σε αστοχία είναι συνήθως η αποκόλληση (spalling) σκυροδέματος από το δομικό στοιχείο, εξαιτίας των μηχανισμών που περιεγράφηκαν. Επομένως, σημαντικός δείκτης που πρέπει να αναζητούμε είναι η αποκόλληση τμημάτων από στοιχεία.



Εικόνα 13: Εμφανείς βλάβες σε δομικά στοιχεία εξαιτίας πυρκαγιάς



Εικόνα 14: Βλάβη σε δοκό με αποκάλυψη οπλισμού εντός πειραματικής διάταξης

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι εικόνες 13 & 14 [19], όπου εξαιτίας της αποκόλλησης σκυροδέματος από τα δομικά στοιχεία έχει αποκαλυφθεί ο οπλισμός αυτών. Κάτι τέτοιο μπορεί να συμβεί σε πολύ έντονες συνθήκες πυρκαγιάς από άποψης πυροθερμικού φορτίου και οι οποίες έχουν ιδιαίτερα μεγάλη διάρκεια, συνήθως άνω των 90 λεπτών. Στην περίπτωση αυτή και ιδιαίτερα εάν το φαινόμενο βρίσκεται ακόμα σε εξέλιξη, υπάρχει σημαντικός κίνδυνος για την ακεραιότητα της κατασκευής, αφού οι αυξημένες θερμοκρασίες πλέον προσβάλουν άμεσα στον οπλισμό και τον πυρήνα του στοιχείου, με αποτέλεσμα η μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων να είναι δραματική. Ακόμα όμως και εάν το φαινόμενο δεν βρίσκεται σε εξέλιξη, κρίνεται σκόπιμο, εάν δεν υπάρχει σημαντικός λόγος που απαιτεί άμεση επέμβαση, να υπάρξει κατάλληλη αντιστήριξη όπως αυτή της εικόνας 13, προτού το προσωπικό επιχειρήσει στο χώρο.



Εικόνα 15: Διαφορά μεταξύ σημαντικής και μη αποκόλλησης

Όμως, δε θα πρέπει να αντιμετωπίζονται όλα τα φαινόμενα αποκόλλησης με τον ίδιο τρόπο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η εικόνα 15. Στο αριστερό μέρος παρατηρούμε την αποκόλληση σκυροδέματος από ένα υποστύλωμα με αποκάλυψη του οπλισμού αυτού. Στο δεξί μέρος, υπάρχει αποκόλληση τμημάτων σκυροδέματος από το άνω μέρος ενός παραθύρου. Η αποκόλληση σκυροδέματος στην περίπτωση αυτή αποτελεί στοιχείο ότι στο σημείο αυτό αναπτύχθηκαν πολύ μεγάλες θερμοκρασίες σε τοπικό επίπεδο και θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως στοιχείο για την διερεύνηση των αιτιών της πυρκαγιάς σε ανακριτικό επίπεδο. Ο μηχανισμός της αποκόλλησης στην περίπτωση αυτή οφείλεται στην εξάτμιση του νερού του σκυροδέματος. Είναι σαφώς πολύ πιο κρίσιμο να εξετάσουμε φέροντα δομικά στοιχεία και ιδιαίτερα δοκούς και υποστυλώματα και δευτερευόντως πλάκες και φέρουσα ή μη τοιχοποιία από σκυρόδεμα.



Εικόνα 16: Αποχρωματισμός σκυροδέματος εξαιτίας πυρκαγιάς

Τέλος, ένα στοιχείο ιδιαίτερα κρίσιμο για το στάδιο μετά την πυρκαγιά αποτελεί η εξέταση των σημείων που έχουν αποκαλυφθεί. Το σκυρόδεμα και τα αδρανή αυτού υφίστανται σημαντικές ορυκτολογικές μεταβολές όταν εκτίθενται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Μέσω λοιπόν της τεχνικής του πετρογραφικού ελέγχου, μπορούμε να εντοπίσουμε σημεία στα οποία το σκυρόδεμα έχει έναν ερυθρόχρωμο ή ροζ αποχρωματισμό. Ο αποχρωματισμός αυτός συμπίπτει με την ανάπτυξη θερμοκρασιών που επιφέρουν πολύ σημαντική μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος και, ακόμα και απουσία άλλων δεικτών, απαιτούν την εξέταση από μηχανικό προκειμένου να διασφαλισθεί ότι το στοιχείο παραμένει ικανό να φέρει το φορτίο του και συνεπώς να κριθεί εάν ο χώρος είναι ασφαλής ή όχι.

3.6 Συνοψίζοντας για τον πυροσβεστικό υπάλληλο

Τα κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα παρουσιάζουν την καλύτερη συμπεριφορά έναντι πυρκαγιάς από όλα τα υλικά που εξετάζουμε. Δίχως κανένα μέτρο πυροπροστασίας είναι σε θέση να επιτύχουν αρκετά υψηλούς δείκτες πυραντίστασης, αρκετών ωρών.

Αυτό δεν σημαίνει βέβαια ότι δεν πρέπει να γνωρίζουμε την συμπεριφορά και τα σημάδια αστοχίας του υλικού αυτού. Σίγουρα, ένας επικεφαλής πυροσβεστικής εξόδου που επεμβαίνει σε ένα κτίριο από οπλισμένο σκυρόδεμα δεν χρειάζεται να εξετάζει διαρκώς την κατάσταση και αντοχή του κτιρίου κατά τη διάρκεια του συμβάντος. Όμως, σε μεγάλα κτίρια αποθηκών ή ξενοδοχείων και κατοικιών, όπου μία φωτιά μπορεί να μαίνεται για ώρες, ένας συντονιστής θα

κληθεί να λάβει υπόψη του τέτοια σημάδια και φυσικά να λάβει την άποψη ειδικών. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, θα είναι σε θέση να προσδιορίσει τα χρονικά πλαίσια που διαθέτει για να λάβει επιπλέον μέτρα.

Τέλος, σίγουρα τα παραπάνω αποτελούν πληροφορία που θέλουμε να διαθέτουμε σε στάδια μεταγενέστερα της πυρκαγιάς. Προτού ένα κτίριο παραδοθεί από την υπηρεσία στους ιδιοκτήτες, θα κληθούμε να ερευνήσουμε και να διεξάγουμε αποκάθαρση για τυχόν άλλες εστίες. Σε κάθε περίπτωση πρέπει να μπορούμε να αντιληφθούμε αν κάποιο δομικό στοιχείο χρήζει ενίσχυσης προτού συνεχίσουμε τις επιχειρήσεις μας και να είμαστε σε θέση να αναγνωρίσουμε τα σημεία που θα χρειαστούμε τη συμβουλή κάποιου ειδικού επιστήμονα.

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

4

Κατασκευαστικός Χάλυβας

4.1 Εισαγωγή

Παρά το γεγονός ότι οι μεταλλικές κατασκευές είναι ιδιαίτερα δημοφιλής, ιδίως στο εξωτερικό, λόγω των προτερημάτων που παρουσιάζουν συγκριτικά με άλλους τύπους υλικών, όπως αυτές από οπλισμένο σκυρόδεμα ή ξύλο, και είναι η αντισεισμική τους συμπεριφορά, το μικρό κόστος και η εξαιρετική αντοχή μεταξύ άλλων, το κομμάτι της πυρομηχανικής για τις κατασκευές αυτές γνωρίζει άνθιση τα σχετικά τελευταία χρόνια.

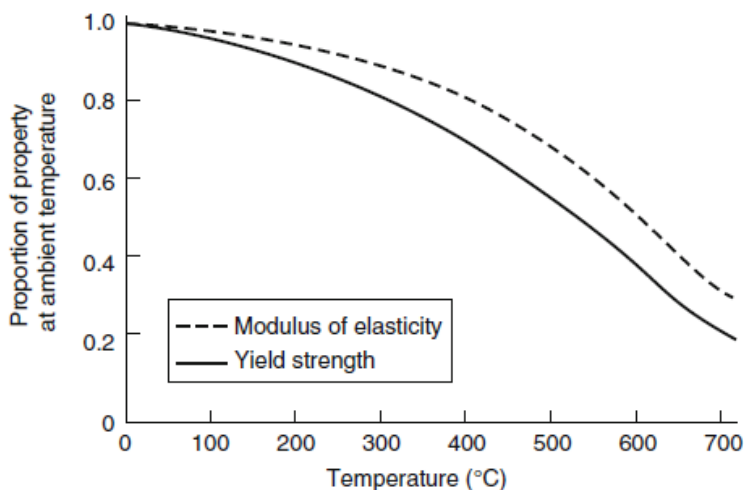
Αυτό βέβαια δε σημαίνει ότι οι μηχανικοί που κατασκεύαζαν κτίρια από χάλυβα κατά το παρελθόν δε λάμβαναν τα αναγκαία μέτρα για προστασία έναντι πυρκαγιάς. Γενικά, ο τρόπος που χρησιμοποιούνταν αλλά και σε μεγάλο βαθμό συνεχίζει να υφίσταται ακόμα και σήμερα είναι μια «κανονιστική προσέγγιση» (prescriptive approach). Η μέθοδος αυτή συνίσταται στην οριοθέτηση μίας κρίσιμης θερμοκρασίας, η οποία στην βιβλιογραφία κυμαίνεται από 450 έως 550°C, και στην ανάπτυξη μεθοδολογίας για την προστασία της κατασκευής σχετικά με το χρόνο που απαιτείται προκειμένου να αναπτυχθεί αυτή η θερμοκρασία στον φέρων οργανισμό αυτής.

Στη σύγχρονη εποχή, η οποία ξεκινά από το 1976, όπου ξεκίνησαν οι πρώτες έρευνες [20], ισχύει η «προσέγγιση απόδοσης» (performance approach). Η διαφορά ανάμεσα στις δύο αυτές μεθόδους είναι σχετικά απλή και ορθή. Αντί να προσπαθούμε να ορίσουμε μία ημιεμπειρική και αυθαίρετη θερμοκρασία που καθιστά την κατασκευή επικίνδυνη, ο μηχανικός θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη του το είδος της κατασκευής, τα φορτία, το είδος της πυρκαγιάς στην οποία εκτίθεται η κατασκευή καθώς και τα δομικά στοιχεία από τα οποία αυτή αποτελείται και τον τρόπο

Ο λόγος ανάπτυξης του κλάδου της πυρομηχανικής στα μεταλλικά κτίρια σήμερα είναι κυρίως η προσπάθεια των εταιριών που παράγουν χάλυβα να καταστήσουν το υλικό ανταγωνιστικό με άλλα εμπορικά υλικά κατασκευής. Το κόστος πυροπροστασίας ενός μεταλλικού κτιρίου ανέρχεται ακόμα και στο 30% της συνολικής κατασκευής [21], με αποτέλεσμα οι μεταλλικές κατασκευές να καθίσταντο οικονομικά μη ανταγωνιστικές με τα κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα, σε μη εξειδικευμένες κατασκευές, το οποίο δε σκυρόδεμα έχει συγκριτικά εξαιρετική συμπεριφορά έναντι πυρκαγιάς.

4.2 Οι ιδιότητες του χάλυβα

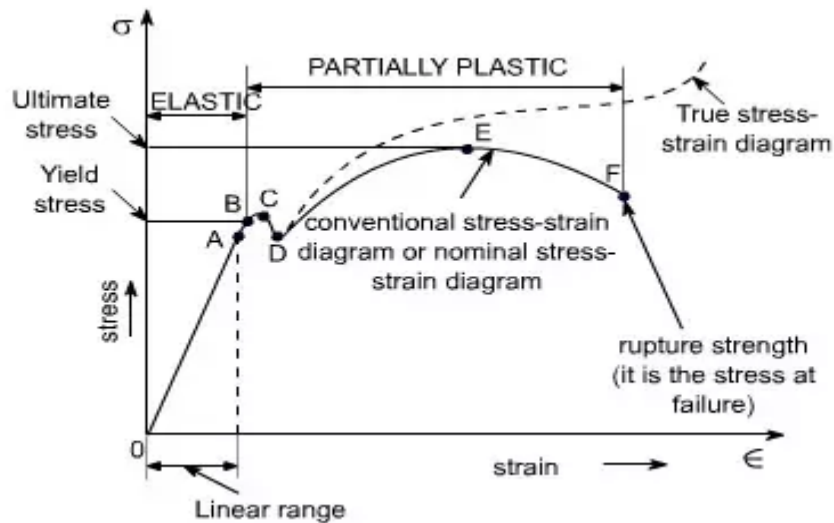
Αρχικά, κρίνεται σκόπιμο να παρουσιασθούν οι μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα και πώς αυτές επηρεάζονται από την αύξηση της θερμοκρασίας. Γενικά, ο χάλυβας είναι ένα υλικό με υψηλό λόγο αντοχής προς βάρος, γεγονός που το καθιστά εξαιρετικό σαν υλικό, πλην όμως οι μηχανικές και θερμικές του ιδιότητες εξαρτώνται ιδιαίτερα από τη θερμοκρασία του. Δύο από τις σημαντικότερες ίσως παραμέτρους είναι το μέτρο ελαστικότητας E και το όριο διαρροής σ_y . Η συμπεριφορά των δύο αυτών παραμέτρων φαίνεται στο διάγραμμα της εικόνας 17 [22].



Εικόνα 17: Ποσοστό μέτρου ελαστικότητας και ορίου διαρροής συναρτήσει της θερμοκρασίας

Είναι σημαντικό να αναλύσουμε λοιπόν πώς η μείωση των δύο ιδιοτήτων αυτών επιδρά στην σχεδιασθείσα αντοχή ενός στοιχείου από χάλυβα. Κατά τη σχεδίαση και τον υπολογισμό του φορτίου ενός στοιχείου, λαμβάνεται υπόψη η λεγόμενη καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων του υλικού, η οποία αποτυπώνεται στην εικόνα 18 και η οποία συνδέει την τάση που επιδρά σε ένα

στοιχείο, ήτοι τη δύναμη ανά μονάδα επιφανείας και την παραμόρφωση που αυτή προκαλεί. Γενικά, όλα τα στοιχεία σχεδιάζονται στην ελαστική περιοχή, και ιδιαίτερα στη γραμμική, η οποία είναι το τμήμα 0Α στο προαναφερθέν διάγραμμα. Στην περιοχή αυτή, οι παραμορφώσεις δεν είναι μόνιμες αλλά μπορούν να αντιστραφούν εάν σταματήσουμε να ασκούμε δύναμη. Η αύξηση της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα τον περιορισμό της περιοχής αυτής, και μάλιστα αναλογικά με τη μείωση του μέτρου ελαστικότητας αφού αποτελεί την κλίση της ευθείας 0Α, με αποτέλεσμα το στοιχείο, για το ίδιο σταθερό φορτίο, να εισέλθει πρόσκαιρα στην πλαστική περιοχή, όπου οι όποιες παραμορφώσεις είναι πλέον μόνιμες. Φυσικά, υπάρχουν και άλλοι παράγοντες, όπως για παράδειγμα οι ανάπτυξη επιπρόσθετων τάσεων εξαιτίας θερμικής παραμόρφωσης, οι οποίοι και επιβαρύνουν το φαινόμενο αυτό.



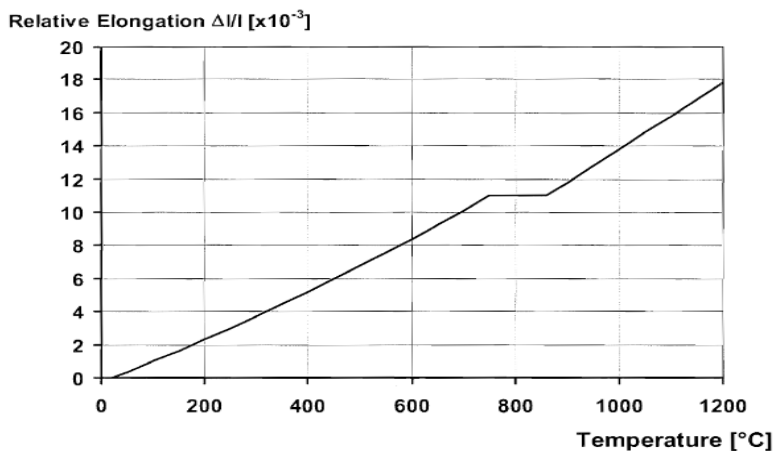
Εικόνα 18: Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων για κοινό χάλυβα

Ανάλογα διαγράμματα και συντελεστές παρέχονται και από τον Ευρωκώδικα 3 [23]. Αξίζει να σημειωθεί ότι για θερμοκρασίες άνω των 650°C υπάρχει μεταβολή και στην κρυσταλλική δομή του χάλυβα, το οποίο και οφείλεται για τη σημαντική μεταβολή των ιδιοτήτων για θερμοκρασίες υψηλότερες από αυτήν, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα. Είναι λοιπόν κατανοητό το γιατί σαν κρίσιμη θερμοκρασία ορίζεται μια θερμοκρασία της τάξης των 500°C.

Μία άλλη πολύ σημαντική ιδιότητα που επηρεάζεται από τη θερμοκρασία είναι ο ερπυσμός, δηλαδή η συνεχής και εξαρτώμενη από το χρόνο παραμόρφωση που υφίσταται ένα στερεό σώμα εξαιτίας μιας δύναμης, παρά το γεγονός ότι η αναπτυσσόμενη σε αυτό τάση είναι

μικρότερη από την τάση διαρροής. Ο ερπυσμός είναι σημαντικός για τον δομικό χάλυβα για θερμοκρασίες άνω των 460°C. Είναι δε χαρακτηριστικό ότι όταν η θερμοκρασία μεταβληθεί από τους 460°C στους 520°C, ο ερπυσμός αυξάνεται 300 φορές [24]. Όμως, ο ερπυσμός είναι μια ιδιότητα η οποία είναι πολύ δύσκολο να αναλυθεί και να καθοριστεί επακριβώς, διότι εξαρτάται από ποικίλους παράγοντες, όπως για παράδειγμα το επίπεδο της καταπόνησης, ο ρυθμός παροχής θερμότητας, η θερμοκρασία κ.α. και για το λόγο αυτό συνήθως συμπεριλαμβάνεται σιωπηρά στις μηχανικές ιδιότητες του υλικού και στους συντελεστές ασφαλείας, προκειμένου να απλοποιηθούν οι υπολογισμοί. Έχει προταθεί σε διάφορες μελέτες ότι ο κύριος λόγος της κατάρρευσης των δίδυμων πύργων κατά τις τρομοκρατικές ενέργειες της 11 Σεπτεμβρίου στις ΗΠΑ ήταν το φαινόμενο του ερπυσμού [25].

Τέλος, μια ακόμα ιδιότητα που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη είναι αυτή της θερμικής επιμήκυνσης εξαιτίας της θερμοκρασίας. Εξαιτίας της αύξησης της θερμοκρασίας, ο χάλυβας υφίσταται παραμόρφωση και ειδικότερα επιμήκυνση, η οποία είναι ανάλογη του αρχικού του μήκους. Αυτό μπορεί να έχει ως συνέπεια την ανάπτυξη τάσεων ή ακόμα και δευτερογενών παραμορφώσεων στο δομικό στοιχείο (κάμψη, στρέψη). Στο διάγραμμα της εικόνας 19 αποτυπώνεται η παραμόρφωση αυτή [23].



Εικόνα 19: Σχετική παραμόρφωση συναρτήσει της θερμοκρασίας

4.3 Η συμπεριφορά του δομικού χάλυβα σε κανονικές συνθήκες

Προτού ασχοληθούμε με την συμπεριφορά του δομικού χάλυβα σε συνθήκες πυρκαγιάς, κρίνεται σκόπιμο να αναλύσουμε την συμπεριφορά αυτού σε φυσιολογικές συνθήκες καθώς και τις σχεδιαστικές επιλογές και απαιτήσεις που υπάρχουν. Αυτό συμβαίνει διότι η συμπεριφορά του χάλυβα σε συνθήκες πυρκαγιάς είναι ουσιαστικά μια περίπλοκη κατάσταση της συμπεριφοράς του σε συνθήκες περιβάλλοντος.

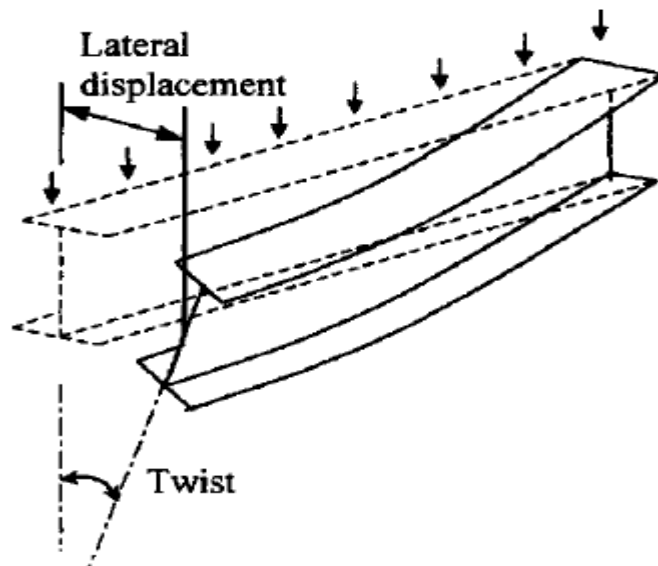
Όπως σε όλους τους δομικούς κανονισμούς, έτσι και στον Ευρωκώδικα η φιλοσοφία σχεδίασης έγκειται στην οριοθέτηση ορισμένων οριακών συνθηκών, δηλαδή συνθηκών οι οποίες δε πρέπει να ξεπεραστούν διότι ειδάλλως η κατασκευή χάνει την επιθυμητή της λειτουργία. Η πιο γνωστή οριακή συνθήκη είναι το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο που μπορεί να φέρει η κατασκευή και η συνθήκη αυτή είναι και η οποία μελετάται σε συνθήκες πυρκαγιάς. Άλλες συνθήκες είναι το βέλος κάμψης δοκών, η κλίση σε κολώνες, η κόπωση και η διάβρωση.

Κατά τους υπολογισμούς των ορίων αντοχής ο μελετητής μηχανικός συναντά πολλές αβεβαιότητες, που σχετίζονται με τα μοντέλα υπολογισμών, τις ακριβείς ιδιότητες του υλικού καθώς και τις πραγματικές συνθήκες φόρτισης. Για να συμπεριληφθούν αυτές οι αβεβαιότητες στη μελέτη και να μειωθεί η πιθανότητα αστοχίας της κατασκευής στα επιθυμητά επίπεδα χρησιμοποιούνται διάφοροι συντελεστές ασφαλείας. Μέσω αυτών των συντελεστών, ο μηχανικός μπορεί να μειώσει τα όρια αντοχής των υλικών ή να αυξήσει τα αναμενόμενα φορτία της κατασκευής. Ο καθορισμός των συντελεστών αυτών ασφαλείας για λόγους απλοποίησης θα παραληφθεί.

Κάθε μεταλλική κατασκευή αποτελείται από δοκούς, υποστυλώματα (κολώνες), μεταλλικά φύλλα και τις αναγκαίες συνδέσεις μεταξύ αυτών. Οι συνδέσεις μεταξύ στοιχείων, εν αντιθέσει με τα όσα ισχύουν για τις μεταλλικές συνδέσεις σε ξύλινα δομικά στοιχεία, σπάνια αποτελούν σημείο αστοχίας σε ένα κτίριο με μεταλλικό φέρων οργανισμό, εφόσον φυσικά έχουν μελετηθεί σωστά για τις κανονικές συνθήκες. Για το λόγο αυτό δεν θα μελετηθεί η συμπεριφορά τους, χωρίς όμως αυτό να σημαίνει ότι δεν απαιτείται η πυροπροστασία με κατάλληλα μέσα και αυτών, όπως και στα άλλα δομικά στοιχεία [26].

Όσον αφορά τις μεταλλικές δοκούς, σε απλή κάμψη, δύο είναι οι κύριοι τρόποι αστοχίας τους. Πρώτον, λόγο υπέρβασης του ορίου (τάσης) διαρροής του υλικού στη θέση που εμφανίζεται η μέγιστη καμπτική δύναμη και δεύτερον λόγο πλευρικής στρέψης και κάμψης, όπως φαίνεται

στην εικόνα 20. Σχετικά με τη δεύτερη περίπτωση, αυτή εμφανίζεται όταν η δοκός φορτίζεται περί τον κύριο άξονά της αλλά η παραμορφώνεται πλευρικά και παράλληλα εμφανίζεται και στρέψη αυτής, λόγω μικρής ακαμψίας κατά τον δευτερεύοντα άξονα. Για την πρόληψη της περίπτωσης αυτής απαιτείται η ενίσχυση με οριζόντιες στηρίξεις της δοκού και με κατάλληλη ενίσχυση στα σημεία που υφίσταται θλιπτικά φορτία. Συνήθως στα κτίρια η ενίσχυση αυτή παρέχεται από τα πατώματα των ορόφων.



Εικόνα 20: Πλευρική στρέψη και κάμψη

Όσον αφορά τα μεταλλικά υποστυλώματα, αυτά υφίστανται θλιπτικά φορτία. Για τον λόγο αυτό αυτές δύνανται να αστοχήσουν με δύο τρόπους. Πρώτον λόγο υπέρβασης του ορίου διαρροής σε θλίψη εξαιτίας του ασκούμενου φορτίου και δεύτερον λόγο απώλειας στήριξης εξαιτίας λυγισμού. Για την εξέταση του δευτέρου φαινομένου πρέπει να συγκρίνεται το ύψος του υποστυλώματος με το πάχος αυτού. Όσο μεγαλύτερο είναι το ύψος μιας κολώνας και όσο μικρότερο το πάχος αυτής, τόσο πιθανότερο είναι αυτή να αστοχήσει σε λυγισμό παρά λόγο διαρροής.

Όσον αφορά τα μεταλλικά φύλλα, αυτά κινδυνεύουν να αστοχήσουν σε λυγισμό εξαιτίας της θλίψης που υφίστανται και του μεγάλου λόγου μήκους προς πάχος. Για την αποφυγή του φαινομένου, αρκεί να υπάρχουν κατάλληλες στηρίξεις κατά μήκος του φύλλου, προκειμένου να μειώνεται το ενεργό μήκος αυτού.

Πρέπει όμως να τονισθεί ότι οι μεταλλικές κατασκευές δεν υφίσταται μόνο στατική φόρτιση. Στην πραγματικότητα, υπάρχουν πολλά μεταβαλλόμενα φορτία που τους ασκούνται, τα οποία μεταβάλλονται τόσο σε μέγεθος, διεύθυνση, συχνότητα ή και όλα τα παραπάνω. Η συμπεριφορά των υλικών κάτω από εναλλασσόμενες συνθήκες φόρτισης δεν είναι ίδια με αυτή των ίδιων υλικών υπό στατική φόρτιση. Έχει παρατηρηθεί λοιπόν, εξαιτίας τέτοιων φορτίων, αστοχία σε τάσεις πολύ κάτω από το όριο διαρροής. Συνεπώς, πρέπει να μελετάται και η συμπεριφορά της κατασκευής σε συνθήκες εναλλασσόμενης φόρτισης.

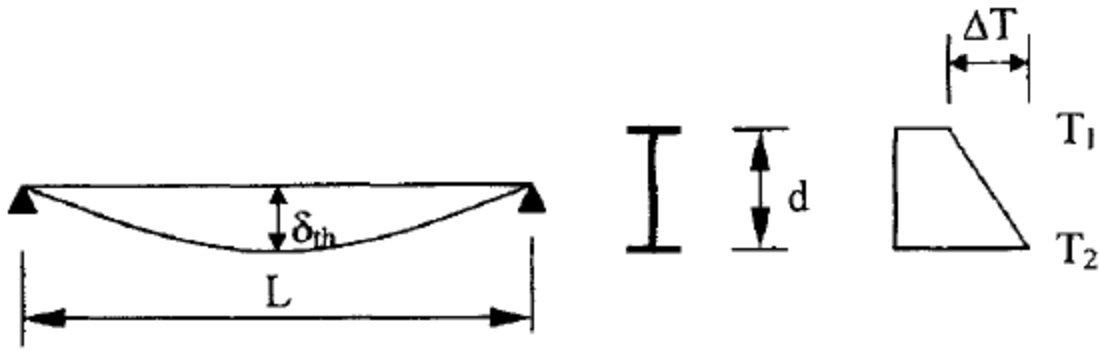
4.4 Η συμπεριφορά του δομικού χάλυβα σε συνθήκες πυρκαγιάς

Όπως αναφέρθηκε κατά την εισαγωγή, οι ιδιότητες των μεταλλικών υλικών και ιδιαίτερα του χάλυβα εξαρτώνται άμεσα από τη θερμοκρασία αυτού. Πέραν όμως της μεταβολής των μηχανικών ιδιοτήτων, υπάρχει και η εισαγωγή τάσεων εξαιτίας της θερμοκρασίας και ιδίως λόγω θερμικής παραμόρφωσης (διαστολής) καθώς και το φαινόμενο του ερπυσμού.

Όσον αφορά τις μεταλλικές δοκούς, υπάρχει σημαντική διαφορά ανάμεσα σε πλευρικά συγκρατημένες και πλευρικά ελεύθερες δοκούς. Όμως, στην συντριπτική πλειονότητα των κατασκευών οι δοκοί έχουν σταθερές πλευρικές στηρίξεις και για τον λόγο αυτό θα αναλύσουμε την περίπτωση αυτή. Αρχικά, πρέπει να μελετήσουμε το φαινόμενο της παραμόρφωσης λόγω της θερμοκρασιακής διαφοράς ανάμεσα στο άνω και κάτω άκρο της δοκού. Η παραμόρφωση αυτή προκύπτει από τον τύπο [27]:

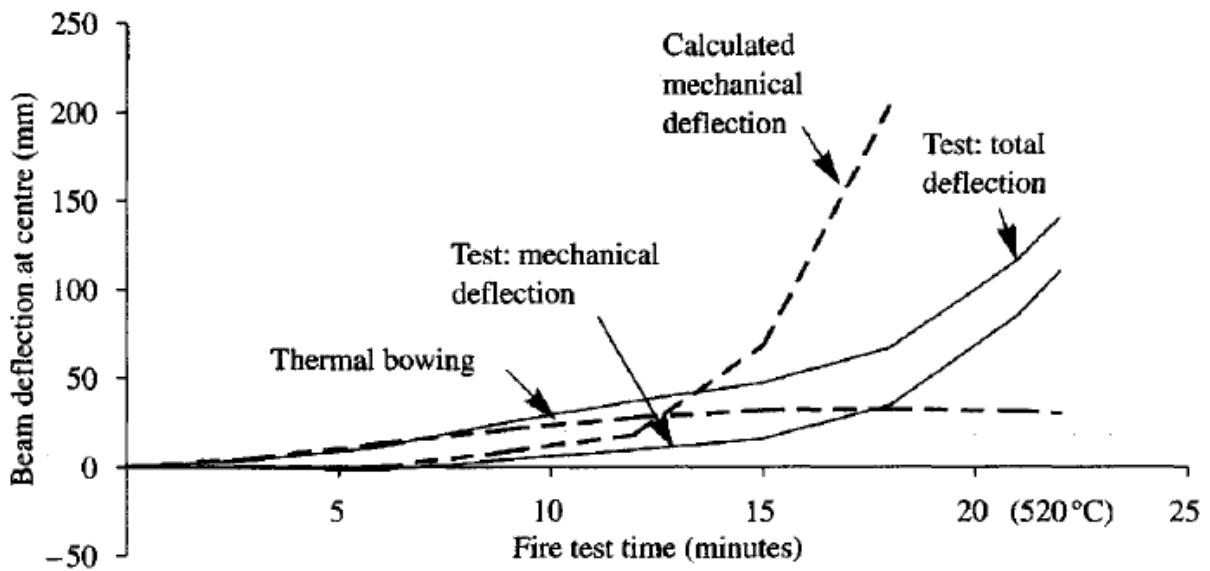
$$\delta_{th} = \frac{\alpha * \Delta T * L^2}{8d}$$

Όπου α ο συντελεστής θερμικής διαστολής του χάλυβα, ΔT η διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στο άνω και κάτω άκρο της δοκού, L το μήκος αυτής και d η απόσταση ανάμεσα στα κέντρα των φλατζών του πάνω και κάτω άκρου, όπως φαίνεται στην εικόνα 21.



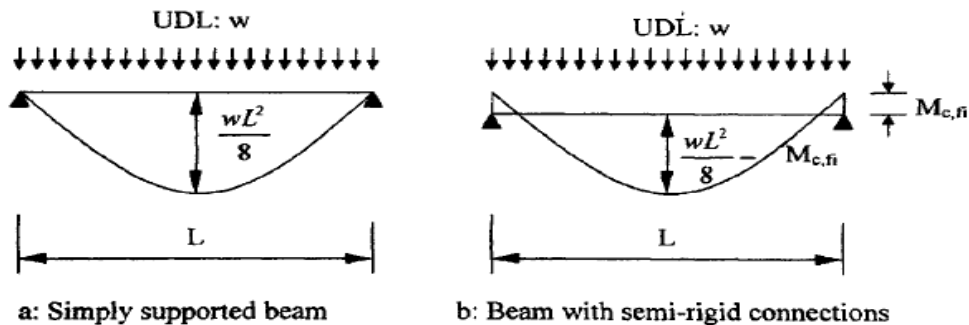
Εικόνα 21: Θερμική παραμόρφωση δοκού

Επιπροσθέτως υπάρχει φυσικά και η μηχανική παραμόρφωση, τόσο λόγω αύξησης της τάσης του φορτίου εξαιτίας της παραμόρφωσης όσο και λόγω της μείωσης της αντοχής της δοκού εξαιτίας της θερμοκρασίας. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 22, αρχικά και περίπου για τα πρώτα 8 λεπτά της δοκιμής μιας δοκού σε φωτιά κατά ASTM E119, με την θερμοκρασία να είναι κάτω των 500°C , η κάμψη της δοκού οφείλεται κυρίως στην θερμική παραμόρφωση. Όσο όμως περνά η ώρα και η θερμοκρασία σταθεροποιείται στη δοκό, τόσο σημαντικότερη είναι και η παραμόρφωση που οφείλεται στη μείωση των αντοχών της δοκού εξαιτίας της θερμοκρασίας, έως όπου επέρχεται η σχεδόν ανεξέλεγκτη παραμόρφωση μετά τα 20 λεπτά. Έτσι, είναι φανερό ότι η πυραντίσταση μιας μεταλλικής δοκού δίχως καμία προστασία είναι περίπου 20 λεπτά, κάτι το οποίο δεν είναι αποδεκτό αφού από τους σχετικούς κανονισμούς το ελάχιστο επιτρεπτό όριο είναι 30 λεπτά. Έτσι, χρειάζεται να ληφθούν μέτρα για την αύξηση του δείκτη πυραντίστασης.

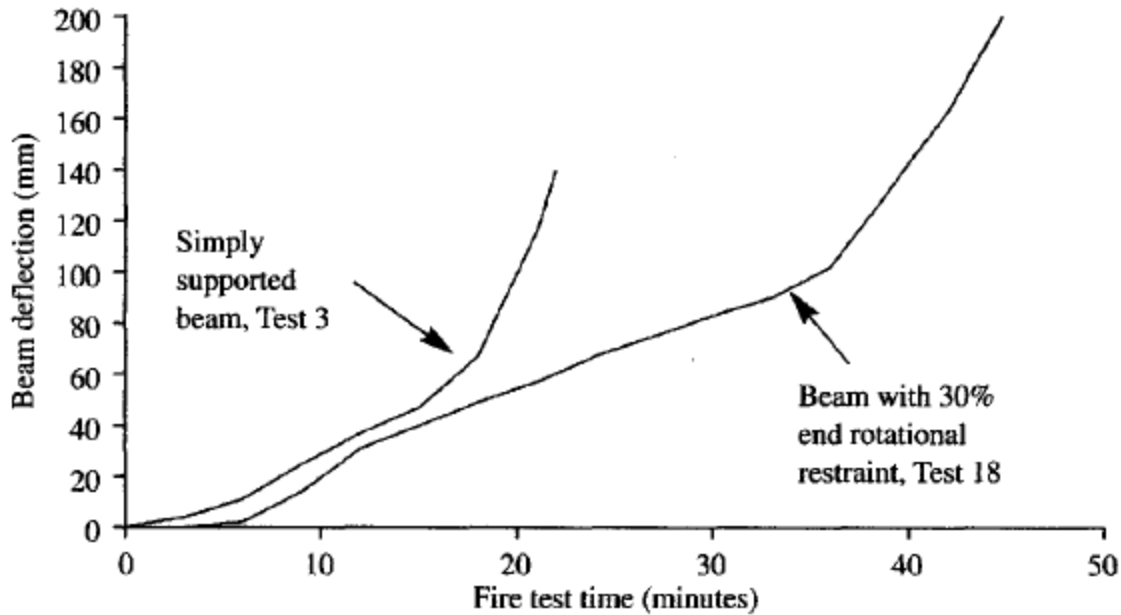


Εικόνα 22: Μηχανική και θερμική παραμόρφωση

Σχετικά με τις δοκούς, μεγάλη σημασία έχει και το είδος των πλευρικών στηρίξεων που συναντάμε. Είναι χαρακτηριστικό ότι η χρήση στηρίξεων που περιορίζουν την στρέψη στα άκρα μειώνει το αναπτυσσόμενο φορτίο κάμψης και μπορεί να αυξήσει το χρόνο πυραντίστασης κατά 50%, όπως φαίνεται και από το διάγραμμα της εικόνας 24. Παρ' όλα αυτά, το χαρακτηριστικό αυτό, το οποίο αποτελεί συνέχεια της περίπτωσης της αστοχίας της πλευρικής στρέψης και κάμψης, δεν έχουν μελετηθεί παρά μόνον ελάχιστα στη διεθνή βιβλιογραφία, ιδιαιτέρως λόγω της πολυπλοκότητας του φαινομένου.



Εικόνα 23: Η περίπτωση της απλής στήριξης και της ημι-άκαμπτης

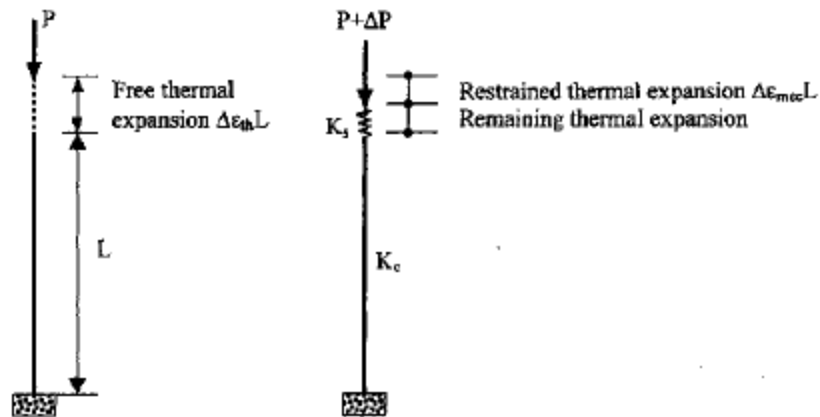


Εικόνα 24: Σύγκριση αντοχής σε φωτιά απλής και ημι-άκαμπτης στήριξης

Όσον αφορά τα υποστυλώματα, θα εξετάσουμε και πάλι την περίπτωση των υποστυλωμάτων που έχουν στηρίξεις στα άκρα τους, καθώς αποτελεί αυτό το οποίο συναντάται στην πράξη. Και στην περίπτωση αυτή λοιπόν, ο κυριότερος λόγος εμφάνισης παραμορφώσεων είναι η θερμική διαστολή του υλικού και η μείωση της αντοχής του. Στην βιβλιογραφία [28] προτείνεται η ακόλουθη εξίσωση:

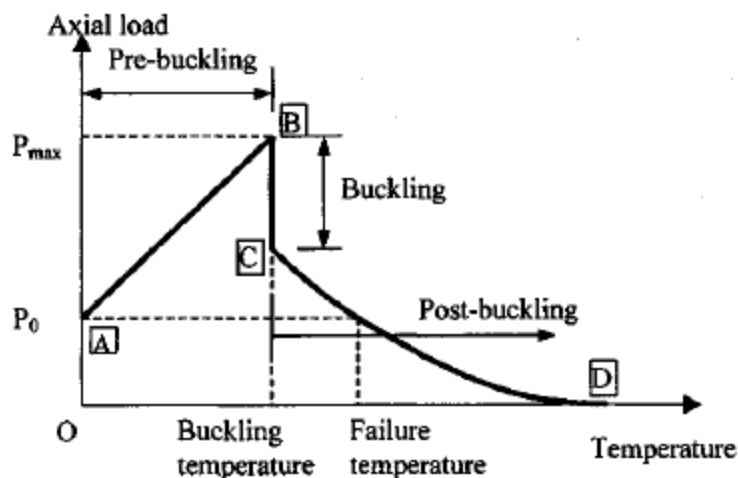
$$\Delta P = \frac{R * K_c}{\frac{K_c}{K_{c0}} + R} * (\Delta \varepsilon_{th} - \Delta \varepsilon_{mech}) * L$$

Όπου ΔP το επιπλέον θλιπτικό φορτίο, K_c η ακαμψία της δοκού στην θερμοκρασία T που μελετάται, K_{c0} η αρχική ακαμψία της δοκού, R είναι ο λόγος της ακαμψίας της στήριξης προς την αρχική ακαμψία της δοκού και λαμβάνεται περίπου 2% για τις συνήθεις κατασκευές, $\Delta \varepsilon_{th}$ και η $\Delta \varepsilon_{mech}$ ανηγμένη παραμόρφωση λόγο του θερμικού φορτίου και της μηχανικής τάσης αντίστοιχα και L το μήκος της κολώνας. Είναι φανερό ότι με βάση τη διαφορά των ανηγμένων παραμορφώσεων, μπορεί να προκύψει αύξηση ή και μείωση του θλιπτικού φορτίου του υποστυλώματος.



Εικόνα 25: Μοντελοποίηση υποστυλώματος

Από την ανάλυση της ως άνω εξίσωσης, είναι φανερό ότι η αναμενόμενη συμπεριφορά είναι η αύξηση του θλιπτικού φορτίου του υποστυλώματος. Όμως, όσο μεγαλύτερη είναι η ακαμψία της στήριξης, τόσο μεγαλύτερο είναι το επιπλέον φορτίο που ασκείται στο υποστυλώμα και μικρότερη η θερμοκρασία για την οποία θα εμφανισθεί λυγισμός. Επιπλέον, μια λεπτή κολώνα έχει μικρότερη ικανότητα να φέρει φορτία και της ασκείται και επιπρόσθετο φορτίο λόγω της μεγαλύτερης θερμικής διαστολής. Πρέπει όμως να παρατηρήσουμε ότι το σημείο αστοχίας του υποστυλώματος δεν είναι η θερμοκρασία που θα εμφανισθεί ο λυγισμός. Η εμφάνιση του λυγισμού θα επιφέρει μείωση του θλιπτικού φορτίου που ασκείται στην κολώνα. Όπως φαίνεται στην εικόνα 25, ως σημείο αστοχίας της θα ορίσουμε το σημείο στο οποίο της ασκείται φορτίο ίσο με το αρχικώς ασκούμενο. Μετά το σημείο αυτό επέρχεται η πλήρης αστοχία της.



Εικόνα 26: Φορτίο υποστηλώματος συναρτήσει της θερμοκρασίας αυτού

4.5 Μέθοδοι προστασίας έναντι πυρκαγιάς

Ο βασικός σκοπός των μεθόδων προστασίας των μεταλλικών δομικών στοιχείων έναντι πυρκαγιάς είναι η μείωση του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας προς αυτά και εν συνεχεία η αύξηση του χρόνου ανάπτυξης της κρίσιμης θερμοκρασίας.

Η βασικότερη μέθοδος προστασίας έναντι πυρκαγιάς είναι με τη χρήση θερμομονωτικών υλικών, τα οποία κατά προτίμηση έχουν ορισμένες ιδιότητες. Πρώτον, είναι άκαυστα και επιπλέον δεν παράγουν τοξικά παράγωγα ή καπνό όταν υπόκεινται σε αυξημένες θερμοκρασίες. Δεύτερον, ευκολία εφαρμογής του υλικού στα δομικά στοιχεία. Τρίτον, αντοχή τόσο κατά το στάδιο της κατασκευής όσο και κατά το στάδιο της χρήσης, ιδιαίτερα απέναντι στις καιρικές συνθήκες και τη διάβρωση.

Στην παραπάνω κατηγορία εμπίπτουν οι γυψοσανίδες, η μόνωση με πετροβάμβακα και υαλοβάμβακα καθώς και η επικάλυψη με ψεκαζόμενο κονίαμα ή επιβραδυντικές βαφές. Τα υλικά αυτά και οι ιδιότητές τους αναλύονται διεξοδικά στο κεφάλαιο που αφορά την πυροπροστασία των ξύλινων κατασκευών, συνεπώς κρίνεται σκόπιμη η μη επανάληψη των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων αυτών.

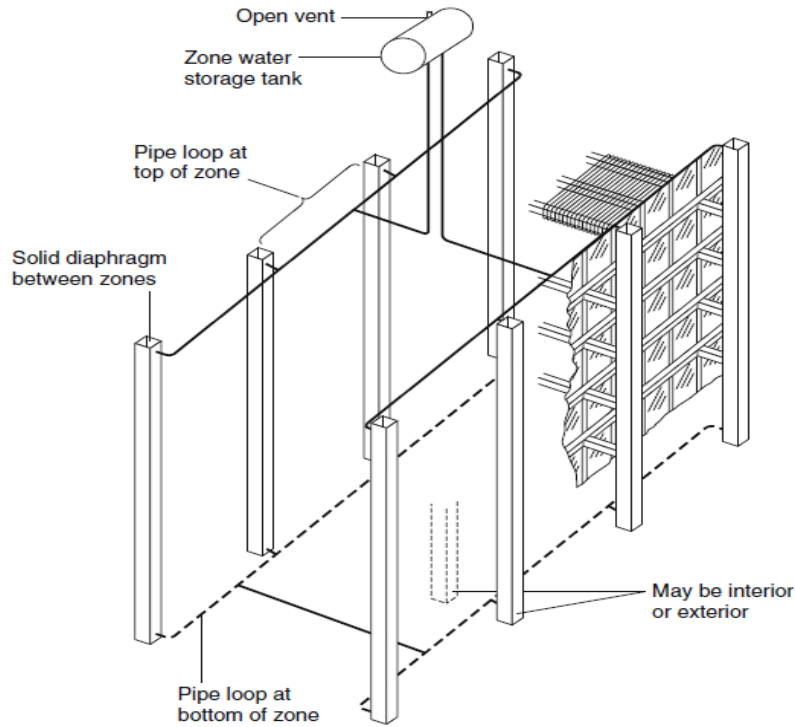
Μια άλλη συνηθισμένη μέθοδος είναι αυτή της χρήσης σκυροδέματος, οπλισμένου ή μη, για την προστασία του μεταλλικού μέλους. Το σκυρόδεμα μπορεί να εφαρμοσθεί εξωτερικά ή εσωτερικά του μέλους, αν αυτό φέρει κοιλότητα. Σε κάθε περίπτωση, το σκυρόδεμα

χρησιμοποιείται ούτως ώστε απλά να προστατέψει το χάλυβα από τη θερμότητα. Εντούτοις, υπάρχουν ορισμένες εμπειρικές συσχετίσεις σχετικά με το φορτίο που φέρει το σκυρόδεμα κατά την πυρκαγιά, βοηθώντας έτσι στην πυραντίσταση της κατασκευής [29]. Σε περίπτωση που το σκυρόδεμα είναι εσωτερικά του μέλους, τότε αυτό δρα ως μια θερμική μάζα που απορροφά θερμότητα και αυξάνει το χρόνο που απαιτείται για να αυξηθεί η θερμοκρασία του μεταλλικού στοιχείου.

Ακόμα, οι ψευδοροφές δρουν και αυτές ως ένα στοιχείο πυροπροστασίας στις μεταλλικές κατασκευές. Επειδή τα στοιχεία των ψευδοροφών αποτελούνται συνήθως από γύψο, περλίτη ή ορυκτές ίνες καθίστανται άκαυστα και προσδίδουν ένα είδος θερμομόνωσης εξαιτίας του κενού με αέρα που μεσολαβεί ανάμεσα στα στοιχεία αυτά και τα δομικά μέλη.

Ένα άλλο στοιχείο που έχει εφαρμοσθεί στο εξωτερικό είναι στοιχεία τα οποία δρουν ως προστατευτικά έναντι της άμεσης επαφής του δομικού στοιχείου με τη φλόγα. Πρόκειται κυρίως για μεταλλικά φύλλα, τα οποία σε περίπτωση πυρκαγιάς παρεμβάλλονται ανάμεσα στο δομικό στοιχείο και τη φλόγα, μειώνοντας έτσι τη θερμική ροή [30].

Τέλος, μια άλλη καινοτόμος μέθοδος που έχει προταθεί είναι η χρήση στοιχείων ψύξης των μεταλλικών δομικών στοιχείων. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, στην κοιλότητα των στοιχείων εισάγεται υγρό, συνήθως νερό με πρόσθετα ενάντια στη διάβρωση, την πήξη και τους μικροοργανισμούς. Με τον τρόπο αυτό, όσο το ψυκτικό μέσο κυκλοφορεί στα μέλη, η θερμοκρασία που αναπτύσσεται στα μέλη δεν οδηγεί σε αρνητικές συνέπειες για την αντοχή τους. Πρόκειται για ένα είδος ενεργητικής προστασίας, το οποίο όμως έχει αυξημένο κόστος και δυσκολία εφαρμογής [30].



Εικόνα 27: Σύστημα ψύξης με νερό των δομικών στοιχείων

4.6 Ενδείξεις αστοχίας χάλυβα σε συνθήκες πυρκαγιάς

Τώρα θα εξετάσουμε μέσω παραδειγμάτων ορισμένα συνήθη και ιδιαίτερα σημαντικά παραδείγματα αστοχίας δομικών στοιχείων από χάλυβα. Γενικά, όπως κατέστη σαφές με βάση τα όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως, υπό συνήθεις συνθήκες πυρκαγιάς ο πυροσβεστικός υπάλληλος θα πρέπει να αναμένει την εμφάνιση φαινομένων αστοχίας σε μεταλλικά δομικά στοιχεία μετά την παρέλευση 20 λεπτών από την έναρξη αυτής, εφόσον τα στοιχεία είναι απροστάτευτα και περίπου μετά τα πρώτα 60 λεπτά εφόσον υπάρχει πυροπροστασία των δομικών μελών σύμφωνα με το ισχύον πλαίσιο και τα εκάστοτε εφαρμοστέα πρότυπα.



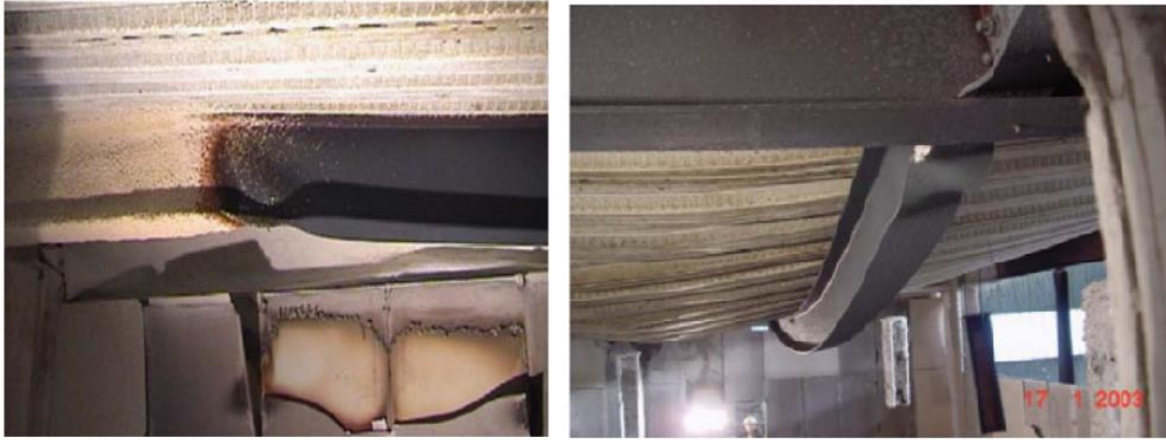
Εικόνα 28: Αστοχία δοκού οροφής σε πλευρική στρέψη και κάμψη

Αρχικά, όπως αναφέρθηκε, υπάρχει το φαινόμενο της πλευρικής στρέψης και κάμψης (LTB), όπως φαίνεται στην εικόνα 28 [31], το οποίο αφορά δοκούς οροφής και οι οποίες δεν περιορίζονται με πλευρικά μέλη ή τουλάχιστον η άνω φλάντζα αυτών δεν είναι πακτωμένη. Γενικά, λόγω του μικρού βάρους που φέρουν υπό συνήθεις περιστάσεις (λαμαρίνες) και τη σχετική ακεραιότητά τους παρά την όποια παραμόρφωση, δεν αποτελούν λόγο άμεσης ανησυχίας. Όμως, μπορούν να αποκαλύψουν το ρυθμό με τον οποίο αναπτύχθηκε η θερμοκρασία στο χώρο, ήτοι αρκετά γρήγορα προκειμένου να υπάρξει η διαφορά θερμοκρασία ανάμεσα στις δύο φλάντζες της δοκού, καθώς επίσης και να μας προϊδεάσουν για άλλες πιθανές αστοχίες στοιχείων της οροφής.



Εικόνα 29: Υπερβολικό βέλος κάμψης δοκού

Ένα σημαντικό στοιχείο το οποίο πρέπει να παρατηρείται είναι το βέλος κάμψης των στοιχείων, δηλαδή το μήκος που αυτά έχουν παραμορφωθεί λόγω κάμψης από την αρχική τους θέση. Όπως τονίστηκε, ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό του χάλυβα είναι ότι δεν αστοχεί απότομα αλλά υφίσταται έντονη παραμόρφωση, η οποία και σαφώς μας προειδοποιεί. Η παραμόρφωση αυτή είναι αποτέλεσμα της μείωσης της μηχανικής αντοχής αυτού εξαιτίας της αύξησης της θερμοκρασίας που έχει ως αποτέλεσμα το στοιχείο, για τη δεδομένη φόρτιση, να εισέλθει στην ελαστική και στη συνέχεια στην πλαστική του περιοχή. Εν προκειμένω, η υπερβολική απόκλιση από την αρχική θέση κρίνεται ως αστοχία, δεδομένου ότι το στοιχείο δεν επιτελεί τον ρόλο για τον οποίο σχεδιάστηκε, όμως παρατηρούμε ότι δεν έχει αστοχήσει καταστροφικά. Εάν παρατηρηθεί η αύξηση του βέλους κάμψης καθώς το φαινόμενο της πυρκαγιάς βρίσκεται σε εξέλιξη τότε πρέπει να απομακρυνθεί το προσωπικό από το χώρο, καθώς πιθανότατα έχουμε εισέλθει στην πλαστική περιοχή του υλικού και πλησιάζουμε είτε το σημείο μέγιστης αντοχής ή ακόμα και αυτό της λύσης συνέχειας του υλικού. Μετά το πέρας της πυρκαγιάς, η παρατήρηση τέτοιων φαινομένων πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη για την εργασία στο χώρο αυτό, καθώς μετατοπίσεις φορτίων μπορούν να οδηγήσουν σε άμεση καταστροφική αστοχία.



Εικόνα 30: Το φαινόμενο plastic hinge

Η τελευταία αστοχία δοκών οφείλεται στο φαινόμενο “plastic hinge”. Πρόκειται για εντοπισμένη αστοχία όπου κατ’ ουσία το υλικό της δοκού στο σημείο αυτό δρα σαν άρθρωση και εμφανίζει μια τοπική περιστροφή. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τοπικά το στοιχείο ξεπέρασε το όριο διαρροής του (κατά το διάγραμμα της εικόνας 26 το σημείο C). Υπό κανονικές συνθήκες, το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται στο σημείο μέγιστης καμπτικής ροπής. Όμως, σε συνθήκες πυρκαγιάς, αυτό αναπτύσσεται εξαιτίας των θερμοκρασιακών διαφορών που υπάρχουν σε σημεία ασυνέχειας της πυροπροστασίας ή κοντά στις στηρίξεις. Ομοίως, όπως και πριν, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή και προτείνεται η άμεση απομάκρυνση των δυνάμεων από το σημείο.



Εικόνα 31: Σημάδια αστοχίας υποστυλωμάτων

Τέλος, θα γίνει αναφορά σε φαινόμενα τα οποία παρατηρούνται σε υποστυλώματα από δομικό χάλυβα. Όπως αναφέρθηκε, το κυριότερο φαινόμενο είναι η εμφάνιση του λυγισμού. Όμως, ο λυγισμός αυτός καθ' αυτός δεν είναι απαραίτητα σημάδι αστοχίας. Πράγματι, όπως αναλύθηκε και σύμφωνα με το διάγραμμα της εικόνας 26, μέχρι ενός σημείου ο λυγισμός είναι ασφαλής καθώς επιτρέπει την εκτόνωση του φορτίου που αναπτύχθηκε εξαιτίας των θερμικών τάσεων λόγω επιμήκυνσης του υλικού και ταυτόχρονα του περιορισμού της επιμήκυνσης αυτής από της στηρίξεις. Αυτό απεικονίζεται στο αριστερό μέρος της εικόνας 31. Όμως, το ποσοστό που ο λυγισμός είναι επιτρεπτός εξαρτάται από ποικίλους παράγοντες. Γενικά, κρίνεται σκόπιμο να ελέγχεται εάν είναι έντονος και σε όλο το μήκος του υποστυλώματος καθώς και αν φαίνεται να έχει αρνητική επίδραση σε άλλα στοιχεία που στηρίζει το υποστυλώμα, όπως δοκοί και τοιχοποιία. Στις περιπτώσεις αυτές, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στο μέσον της εικόνας 31 πρέπει να λαμβάνονται μέτρα ασφαλείας καθώς πλέον έχουμε αστοχία του υποστυλώματος. Επίσης, πρέπει να τονισθεί ότι η αστοχία των υποστυλωμάτων είναι πολύ πιο γρήγορη από αυτή των δοκών, εφόσον γίνει υπέρβαση της πρώτης ζώνης λυγισμού και συνεπώς η ύπαρξη ακόμα και ήπιου φαινομένου πρέπει να θέτει τον επικεφαλής σε εγρήγορση. Τέλος, όπως φαίνεται στο δεξί μέρος της εικόνας 31 υπάρχουν και, σπανιότερα, ορισμένα τοπικά φαινόμενα κάμψης που οφείλονται σε θερμοκρασιακές διαφορές σε τοπικό επίπεδο, τα οποία όμως και είναι σαφώς επικίνδυνα καθώς επηρεάζουν την ακεραιότητα όλου του στοιχείου. Εάν τέτοια φαινόμενα είναι ιδιαίτερα έντονα, για παράδειγμα με εμφανή αποκόλληση φλαντζών, τότε θα πρέπει να υποτίθεται ότι όλο το στοιχείο έχει αστοχήσει πλήρως.

4.7 Συνοψίζοντας για τον πυροσβεστικό υπάλληλο

Σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα αλλά και το εθνικό νομοθετικό πλαίσιο (λχ. Κανονισμός Πυροπροστασίας Κτιρίων) τα μεταλλικά στοιχεία χαρακτηρίζονται ως μηδενικού δείκτη πυραντίστασης όταν είναι απροστάτευτα. Αυτό έρχεται σε αντιδιαστολή με όλα τα άλλα δομικά υλικά, ακόμα και με το ξύλο το οποίο είναι καυστό, όπως θα δούμε, και συνεπώς φανερώνει τις απαιτήσεις για πυροπροστασία του υλικού αυτού.

Όπως χαρακτηριστικά διατυπώσαμε, τα μεταλλικά δομικά στοιχεία υφίστανται άμεσα παραμόρφωση εξαιτίας της πυρκαγιάς (θερμική παραμόρφωση) και εντός 15 έως 20 λεπτών επέρχεται τελικά το σημείο μη επιστροφής όσον αφορά την αντοχή του δομικού στοιχείου.

Βέβαια, εξαιτίας του νομοθετικού πλαισίου πυροπροστασίας, δεν θα κληθούμε να αντιμετωπίσουμε τέτοιες καταστάσεις. Όλα τα κτίρια καλούνται να διαθέτουν δείκτη πυραντίστασης τουλάχιστον 30 λεπτών, και αναλόγως της χρήσης και της κατασκευής, έως και 180 λεπτών, συνεπώς υιοθετούνται κατάλληλα μέτρα πυροπροστασίας.

Αυτό το οποίο οφείλουμε να συγκρατήσουμε είναι τους μηχανισμούς αστοχίας των διαφόρων δομικών στοιχείων, όπως αναπτύχθηκαν προηγουμένως και κυρίως στην προηγούμενη παράγραφο. Έτσι, θα είμαστε σε θέση να αναγνωρίσουμε τα σημάδια αστοχίας και την βαρύτητα αυτών για τα διάφορα δομικά στοιχεία. Ένα σημαντικό εργαλείο που οφείλουμε να χρησιμοποιήσουμε και διατίθεται πλέον σε κάθε πυροσβεστική έξοδο είναι η θερμική κάμερα. Η χρήση θερμικής κάμερας θα μας βοηθήσει να αναγνωρίσουμε άμεσα τη μορφή και την θερμοκρασία των μεταλλικών δομικών στοιχείων σε μία κατάσταση όπου υπάρχει καπνός, φλόγες και σκοτάδι και θα μας καθοδηγήσει στην λήψη αποφάσεων.

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

5

Δομική Ξυλεία

5.1 Εισαγωγή

Το ξύλο αποτελεί ένα από τα αρχαιότερα δομικά υλικά που χρησιμοποιεί ο άνθρωπος. Παρ' όλα αυτά, χάρης αφενός της αφθονίας του και κατά συνέπεια του μικρού του κόστους και αφετέρου της ευκολίας χρήσης του που έχει ως αποτέλεσμα την ταχύτατη ανάπτυξη κατασκευών από αυτό, χρησιμοποιείται ευρέως ως δομικό υλικό ακόμα και σήμερα, ιδιαίτερα στην κεντρική και βόρεια Ευρώπη. Ακόμα, το ξύλο δεν χρησιμοποιείται μόνο ως δομικό υλικό (δομική ξυλεία) αλλά και στην επιπλοποιία αλλά και την διακόσμηση. Έτσι, χάρη στην τεράστια ζήτηση που υπάρχει για αυτό έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι επεξεργασίας του, διάφορα είδη αλλά και πρόσθετα. Όλα αυτά καθιστούν ιδιαίτερα δύσκολη την μελέτη του ξύλου ως προς την συμπεριφορά του στις αστικές πυρκαγιές.

Είναι σημαντικό να τονισθεί, και να αναλυθεί εκτενέστερα παρακάτω, ότι το ξύλο καίγεται ανά στρώσεις μέσω της απανθράκωσης. Αυτό σημαίνει ότι κάθε χρονική στιγμή, η εξωτερική στιβάδα του στοιχείου που μελετάται υφίσταται πυρόλυση, εκλύοντας αέρια τα οποία και στη συνέχεια καίγονται, αφήνοντας πίσω μια στρώση από κάρβουνο. Οι συνθήκες καύσης επιδρούν καθοριστικά στην διαδικασία αυτή. Έτσι, το εσωτερικό του ξύλου παραμένει άθικτο και συνεχίζει να φέρει τα φορτία για τα οποία και προοριζότανε.

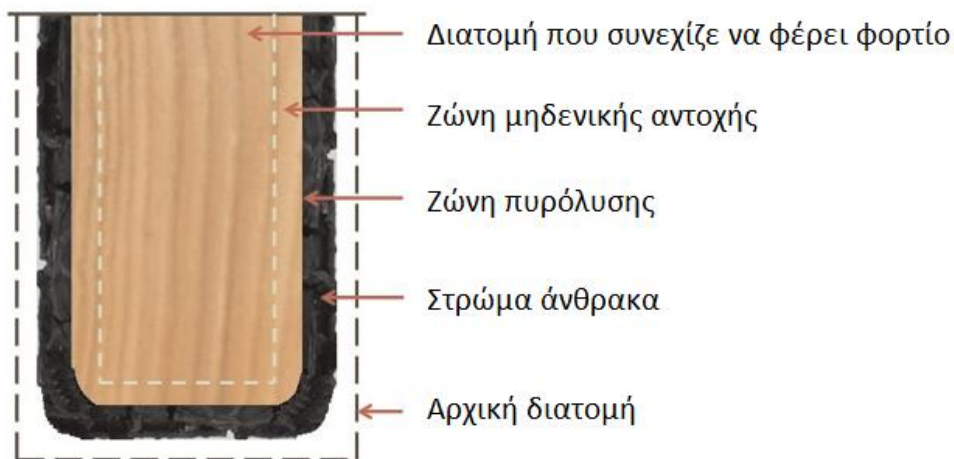
Η καύση του ξύλου εκλύει διάφορα αέρια ενώ συνεισφέρει και το ίδιο στην πυρκαγιά. Έτσι λοιπόν, σε μια αστική πυρκαγιά ο κίνδυνος δεν προέρχεται αποκλειστικά και μόνο από την επίδραση που έχει στη δομική ακεραιότητα του κτιρίου, αλλά και από την τοξικότητα του καπνού

καθώς και το πυροθερμικό φορτίο που αναπτύσσεται. Όσον αφορά τα παραγόμενα αέρια, αυτά εξαρτώνται τόσο από το είδος του ξύλου, τα διάφορα πρόσθετα που έχει αυτό καθώς και τις συνθήκες της καύσης.

Τέλος, η συμπεριφορά του ξύλου στην πυρκαγιά καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τα στοιχεία που προαναφέρθηκαν. Έτσι, η ταχύτητα εξάπλωσης της πυρκαγιάς καθώς και τα μήκη φλόγας που μπορούν να αναπτυχθούν είναι σε μεγάλο βαθμό μεταβλητά και πρέπει να αναλυθούν ανά περίπτωση.

5.2 Η απανθράκωση του ξύλου

Η καύση του ξύλου επιτυγχάνεται μέσω της διαδικασίας της πυρόλυσης. Εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών, το εξωτερικό στρώμα του ξύλου μετατρέπεται σε άνθρακα και απελευθερώνονται αέρια. Τα αέρια αυτά, εν συνεχεία, αναμιγνύονται με το οξυγόνο και καίγονται, παράγοντας τις ορατές φλόγες που παρατηρούμε κατά την καύση του ξύλου. Το στρώμα άνθρακα που έχει αναπτυχθεί στο ξύλο αποτρέπει την περαιτέρω πυρόλυση του ξύλου. Όμως, όταν η θερμοκρασία βρεθεί πάνω από τους 200-300 °C, τότε με την εισαγωγή οξυγόνου το στρώμα αυτό από άνθρακα καίγεται μέσω εξώθερμων αντιδράσεων που παράγουν ελάχιστες ή καθόλου ορατές φλόγες. Έτσι, το στρώμα αυτό μετατρέπεται σε στάχτη και απομακρύνεται και έτσι επαναλαμβάνεται ο κύκλος [32] [33].

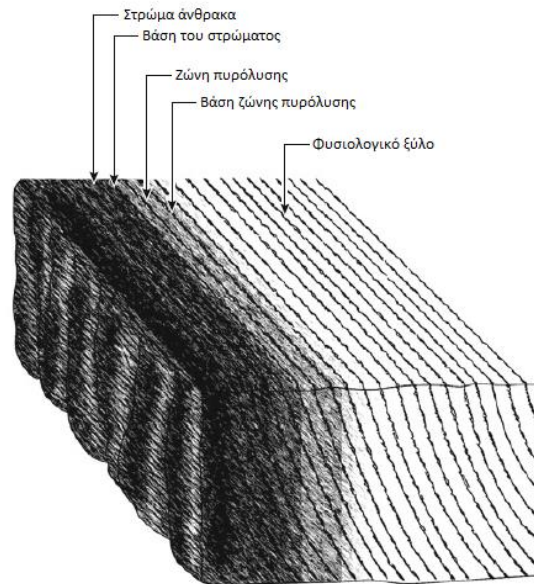


Εικόνα 32: Διατομή ξύλου υπό καύση και ζώνες αυτής [34]

Το φαινόμενο αυτό έχει μελετηθεί εκτενώς [35] [36] και προκειμένου να μελετηθεί η ικανότητα του ξύλου να φέρει φορτίο σε μια πυρκαγιά, έχουν διατυπωθεί διάφοροι τύποι. Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 5 – Σχεδιασμός ξύλινων κατασκευών, το μήκος απανθράκωσης δίδεται από τον τύπο:

$$d_{char} = \beta * t$$

Όπου β είναι ο ρυθμός απανθράκωσης και t είναι ο χρόνος καύσης. Ο ρυθμός απανθράκωσης β εξαρτάται από ποικίλους παράγοντες. Γενικά, επηρεάζεται από το αν το ξύλο καίγεται παράλληλα ή κάθετα συγκριτικά με τα νερά του, το είδος του ξύλου, την πυκνότητα του και την περιεχόμενη υγρασία. Επίσης, εξαρτάται και από το χρόνο που καίγεται το ξύλο, καθώς όπως αναφέρθηκε η διαδικασία αυτή δημιουργεί ένα στρώμα που εμποδίζει την περαιτέρω απανθράκωση και αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο αρχικός ρυθμός να είναι μικρότερος από αυτόν της σταθερής κατάστασης. Γενικά, στα περισσότερα μοντέλα θεωρείται μια σταθερή τιμή της τάξης των 0.5-0.65 mm/min.

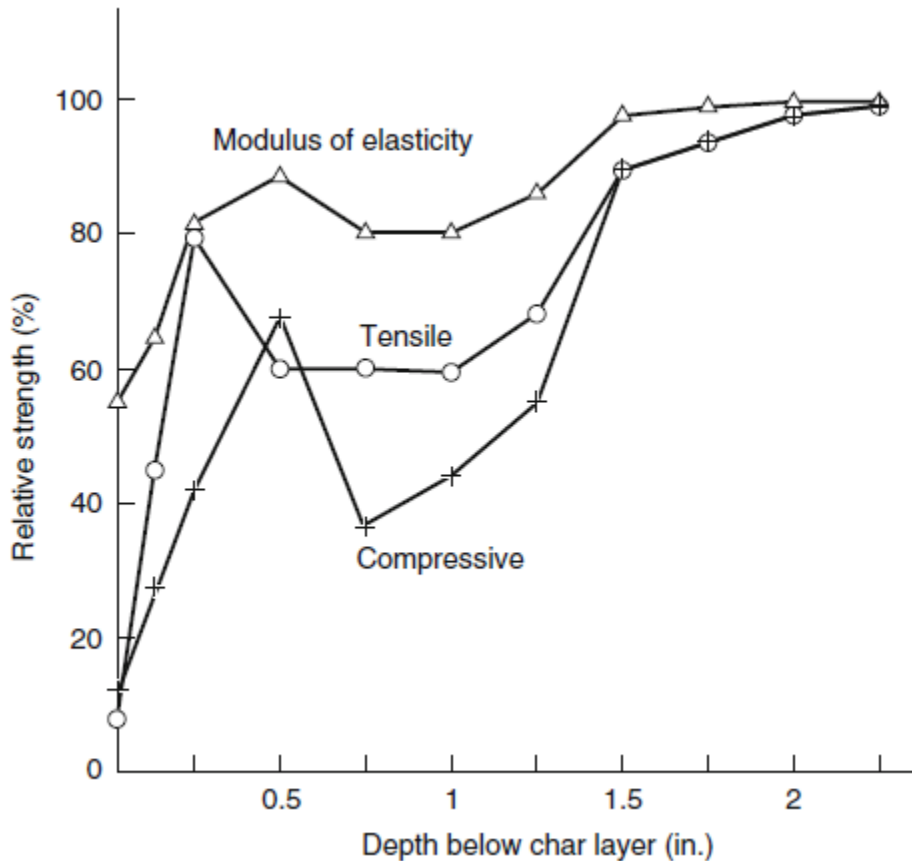


Εικόνα 33: Ζώνες διάσπασης τομής ξύλου

Στη ζώνη αυτή μπορούμε να μελετήσουμε πολλές σημαντικές παραμέτρους, όπως το προφίλ της θερμοκρασίας κατά μήκος του ξύλου καθώς και την αντοχή του ξύλου στην περιοχή αυτή. Γενικά, μέσω ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων και λόγω της μικρής θερμικής αγωγιμότητας του ξύλου, η θερμοκρασία μπορεί να υπολογιστεί ως [37] [38] [39]:

$$T(x) = 20 + 180 * \left(\frac{\beta t}{x}\right)^{0.025*t+1.75}$$

Όπου T(x) η θερμοκρασία στο βάθος που μας ενδιαφέρει και t ο χρόνος σε λεπτά. Για της δε ιδιότητες του ξύλου, υπό συνθήκες πυρκαγιάς, υπάρχει το διάγραμμα της εικόνας 34:



Εικόνα 34: Χαρακτηριστικά του ξύλου συναρτήσει του βάθους σε συνθήκες πυρκαγιάς

5.3 Υπολογισμός αντοχής σύμφωνα με το μοντέλο μειωμένων

ιδιοτήτων

Ένας τρόπος υπολογισμού της αντοχής ενός στοιχείου από ξύλο, σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 5, σε συνθήκες πυρκαγιάς είναι με βάση το μοντέλο των μειωμένων ιδιοτήτων. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, οι ιδιότητες του ξύλου και η αντίστοιχη απώλεια αντοχής

υπολογίζονται ως ένα ποσοστό των αρχικών ιδιοτήτων αυτού, για την περιοχή που παραμένει άκαυστη.

Για παράδειγμα, η αντοχή σε κάμψη μιας δοκού υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο [40]:

$$M = S(t) * \alpha * \sigma_0$$

Όπου:

M = Το φορτίο σχεδιασμού για κάμψη

α = Συντελεστής μείωσης ιδιοτήτων

$S(t)$ = Συντελεστής άκαυστης διατομής συναρτήσει του χρόνου

σ_0 = Η τάση αντοχής σε κανονικές συνθήκες

Με την υπόθεση ότι η διατομή της δοκού είναι ορθογωνική, ο συντελεστής $S(t)$ μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$S(t) = \frac{1}{6} * [(B - 2 * C_1 * t) * (D - j * C_2 * t)^2]$$

Όπου:

B = Το αρχικό πλάτος της διατομής της δοκού

D = Το αρχικό μήκος της διατομής (με μήκος > πλάτος)

C_1 = Ο ρυθμός απανθράκωσης κατά το πλάτος της διατομής

C_2 = Ο ρυθμός απανθράκωσης κατά το μήκος της διατομής

j = 1 για έκθεση σε φωτιά τριών πλευρών, 2 για έκθεση τεσσάρων πλευρών (στο 2 – διάστατο επίπεδο)

Προτεινόμενες τιμές για τον συντελεστή α είναι από 0.5 (Νέα Ζηλανδία) έως 0.83 (Γαλλία) [41] και για μεγάλα μέλη. Για μικρότερα δομικά στοιχεία, ο συντελεστής α λαμβάνει μικρότερες τιμές.. Επιπροσθέτως, κατ' αντιστοιχία της παραπάνω εξίσωσης για κάμψη υπάρχουν αντίστοιχες για δοκούς που υφίστανται θλιπτικά φορτία καθώς και για μέλη υπό εφελκυσμό [42] καθώς επίσης και αντίστοιχες εξισώσεις που υπολογίζουν την οριακή διατομή για αντοχή σε πυρκαγιά και τον χρόνο που απαιτείται για να ξεπεραστεί αυτή. Ειδικότερα, έχουμε [43]:

$$\left(\frac{k}{\alpha}\right) * \frac{\frac{B}{D}}{\left[\frac{d}{D} - \left(1 - \frac{B}{D}\right)\right]} = \left(\frac{d}{D}\right)^2$$

Για έκθεση σε πυρκαγιά τριών πλευρών και αντίστοιχα:

$$\frac{k}{\alpha} \frac{\frac{B}{D}}{\left[\frac{B}{D} - 2 * \left(1 - \frac{d}{D}\right)\right]} = \left(\frac{d}{D}\right)^2$$

Για έκθεση και των τεσσάρων πλευρών στο δισδιάστατο επίπεδο, όπου:

k = Το φορτίο, ως ποσοστό της απόλυτης αντοχής του αρχικού μέλους

d = Το κρίσιμο βάθος της άκαυστης διατομής

Ενώ ο βαθμός πυραντίστασης του μέλους είναι ίσος με το χρόνο που απαιτείται για να επέλθει το κρίσιμο βάθος, δηλαδή:

$$t = \frac{D - d}{j * C}$$

5.4 Υπολογισμός αντοχής σύμφωνα με το μοντέλο μειωμένης

διατομής

Μία άλλη μεθοδολογία που υπάρχει και αναφέρεται και στον Ευρωκώδικα 5 είναι αυτή της μειωμένης διατομής. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, που είναι και πιο συχνά εφαρμοζόμενο, η μεθοδολογία είναι η υπόθεση ενός στρώματος μηδενικής αντοχής, δ , και στη συνέχεια ο υπολογισμός της αντοχής της διατομής σύμφωνα με τη συνήθη μεθοδολογία για συνθήκες δωματίου για το υπόλοιπο της διατομής. Το συνολικό στρώμα που δεν συμμετέχει στους υπολογισμούς είναι το στρώμα μηδενικής αντοχής και το βάθος ανθράκωσης β_i , κατά τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω [44].

Όσον αφορά τον υπολογισμό του πάχους του στρώματος μηδενικής αντοχής, υπάρχουν διάφορες μεθοδολογίες και αναφορές [45]. Ο Ευρωκώδικας 5 αναφέρει ότι το δ είναι το γραμμικό κλάσμα των 7 mm για τα πρώτα 20 λεπτά της έκθεσης σε πυρκαγιά και ακριβώς 7 mm για χρόνο άνω των 20 λεπτών. Στην αντίστοιχη αμερικανική νομοθεσία (NDS – National Design Specification for Wood Construction) [46] προκειμένου να συμπεριληφθεί στους υπολογισμούς το πάχος της ζώνης αυτής, προσαυξάνεται ο ρυθμός απανθράκωσης κατά 20% σε όλους τους υπολογισμούς.

Παρ' όλα αυτά, κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί ότι στην βιβλιογραφία υπάρχουν διάφορα πειράματα σχετικά με αυτή τη ζώνη και το πάχος που αυτή καταλαμβάνει. Έτσι, σύμφωνα με έρευνες των Klippel et al. [47] και Williamson [48] σε περιπτώσεις θλίψης πρέπει να λαμβάνεται πάχος μεγαλύτερο από 7 mm κατά προτίμηση ενώ σε εφελκυσμό 16 mm. Σημαντικός παράγοντας για την αντοχή είναι βέβαια και το ποσοστό του φορτίου που φέρει η κατασκευή προς το αντίστοιχο μέγιστο που μπορεί να υποστηρίξει. Στον Ευρωκώδικα 5 το φορτίο σχεδίασης είναι το 20% της μέγιστης αντοχής του μέλους, γεγονός που επιτρέπει στην κατασκευή να έχει καλύτερη στατική συμπεριφορά σε περιπτώσεις πυρκαγιάς.

5.5 Συνδέσεις και συγκολλητικά υλικά

Ως γνωστόν, όπως μία αλυσίδα είναι τόσο δυνατή όσο ο πιο αδύναμος της κρίκος, έτσι και μια κατασκευή έχει την αντοχή που έχει το πιο αδύναμο μέλος της. Στην περίπτωση των κτιρίων με φέρων οργανισμό από ξύλο, χρησιμοποιούνται ευρέως για την σύνδεση των μελών, πέραν των συνδέσεων ξύλου με ξύλου, και άλλοι τύποι όπως κοχλίες, ήλοι, βίδες, γωνιές κτλ. καθώς και διάφορα συγκολλητικά υλικά, δηλαδή κόλλες και ρητίνες. Για το λόγο αυτό πρέπει να μελετήσουμε και τη συμπεριφορά αυτών των στοιχείων σε μια πυρκαγιά.

Σχετικά με την πυραντίσταση των συνδέσμων, ο Ευρωκώδικας 5 αναφέρει ότι αυτή πρέπει να λαμβάνεται ως 15 λεπτά εφόσον αυτοί δεν είναι προστατευμένοι και υπό ορισμένες προϋποθέσεις (λχ. αύξηση του πάχους των πλευρικών στοιχείων) αυτός ο χρόνος μπορεί να αυξηθεί στα 30 λεπτά. Για την επίτευξη λοιπόν των δεικτών πυραντίστασης που απαιτούνται από την κείμενη νομοθεσία πυρασφάλειας, ήτοι κατ' ελάχιστον 30 λεπτά για όλες τις κατηγορίες και συνήθως τουλάχιστον μία ώρα για συνήθεις εφαρμογές, απαιτείται η χρήση προστασίας.

Οι λόγοι [49] που οδηγούν σε αστοχία την σύνδεση ξύλινων στοιχείων με μεταλλικούς συνδέσμους είναι πολλοί. Πρώτον, η ύπαρξη μεταλλικών συνδέσμων μεταβάλλει τις ιδιότητες μεταφοράς θερμότητας στην περιοχή επαφής. Αυτό έχει ως συνέπεια τόσο την ταχύτερη θέρμανση της επιφάνειας του ξύλου στο σημείο αυτό όσο και την μεταβολή του θερμοκρασιακού προφίλ κατά την διάσταση της οπής. Η μεταφορά αυτή θερμότητας προς το εσωτερικό του ξύλου μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένες αντοχές του δομικού στοιχείου, αφού αυτές είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας αυτού, ιδίως δε αναλογιζόμενοι ότι ο πυρήνας του στοιχείου είναι και αυτός που φέρει το φορτίο κατά κύριο λόγο. Επιπροσθέτως, η αυξημένη αυτή ροή θερμότητας μπορεί να αυξήσει το ρυθμό διείσδυσης της ζώνης πυρόλυσης, αφού όπως είπαμε η ζώνη απανθράκωσης δρα ως μονωτής σε περαιτέρω μεταφορά θερμότητας προς το εσωτερικό του ξύλου μέχρι να προσβληθεί.

Τέλος, η μηχανική τάση που επιβάλλεται σε έναν σύνδεσμο μπορεί να οδηγήσει στην ταχύτερη απομάκρυνση του απανθρακωμένου στρώματος [50]. Ο όγκος του στρώματος αυτού είναι μεγαλύτερος από τον αρχικό όγκο που καταλάμβανε το ξύλο που προϋπήρχε με αποτέλεσμα την ανάπτυξη δυνάμεων ανάμεσα στον σύνδεσμο και το στρώμα και, σε συνδυασμό με την δύναμη που ασκεί ο σύνδεσμος για την συγκράτηση των μελών, μπορεί να οδηγήσει στη μηχανική απομάκρυνση του στρώματος αυτού, λόγω θλίψης, ταχύτερα από ότι ο φυσικός τρόπος καύσης. Το αποτέλεσμα θα είναι η τελική αύξηση του ρυθμού απανθράκωσης και η μείωση της πυραντίστασης του στοιχείου.

Σχετικώς με τους συνδέσμους που χρησιμοποιούν κόλλα και την αντοχή τους έναντι πυρκαγιάς δεν υπάρχουν πολλά στοιχεία στην διεθνή βιβλιογραφία [51], καθώς δεν είναι συνήθης η κατασκευή δομικών στοιχείων με χρήση κόλλας αλλά κατά βάση με τη χρήση μεταλλικών συνδέσμων, ιδίως δε για λόγους ταχύτητας και μείωσης της εργασίας που απαιτείται. Παρ' όλα αυτά, σύμφωνα με έρευνες η αντοχή των συγκολλημένων στοιχείων είναι καλύτερη. Ειδικότερα, οι κόλλες που χρησιμοποιούνται στη συγκόλληση δομικής ξυλείας έχουν σημαντική αντίσταση στην προσβολή από την πυρκαγιά με αποτέλεσμα να διατηρούν της ιδιότητές τους για αρκετά μεγάλο διάστημα [52]. Οι κόλλες αυτές έχουν ως βάση τη φαινόλη και την ρεσορκινόλη κυρίως και σε ορισμένες περιπτώσεις την καζεΐνη. Οι κόλλες με βάση εποξειδικές ρητίνες πρέπει να αποφεύγονται, καθώς έχουν πολύ κακή συμπεριφορά έναντι πυρκαγιάς, παρουσιάζοντας αστοχία σε διάτμηση ακόμα και σε θερμοκρασίες κάτω των 170 βαθμών κελσίου.

Σε κάθε περίπτωση, για την προστασία των συνδέσμων προτείνονται διάφοροι τρόποι, τόσο από τον Ευρωκώδικα 5 όσο και από την διεθνή βιβλιογραφία [53]. Ένας τρόπος που προτείνεται είναι η τοποθέτησή τους σε μια μικρή εσοχή του στοιχείου και η επικάλυψή τους με κάποιο άλλο υλικό, κατά προτίμηση γυψοσανίδα ή ακόμα και ένα κομμάτι ξύλου, αρκεί να είναι ικανοποιητικού πάχους ούτως ώστε να προσφέρει την επιθυμητή πυραντίσταση. Στην περίπτωση αυτή, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η περίμετρος που καλύπτεται και πρέπει να είναι τουλάχιστον 6 φορές τη διάμετρο του στοιχείου σύνδεσης. Ακόμα, ένας άλλος τρόπος που προτείνεται, ιδίως για μεταλλικά ελάσματα που ενώνουν στοιχεία, είναι η χρήση λωρίδων ξύλου που θα τοποθετηθούν με χρήση κόλλας στο διάκενο ένωσης των δομικών στοιχείων. Για μεγάλους μεταλλικούς συνδέσμους, όπως είναι οι γωνιές, προτείνεται η χρήση ειδικής βαφής που αυξάνει το δείκτη πυραντίστασης των μεταλλικών αυτών στοιχείων.

5.6 Μέθοδοι προστασίας έναντι πυρκαγιάς

Το ξύλο όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή έχει ως βασικό μειονέκτημα, συγκριτικά με άλλα δομικά υλικά, ότι είναι καυστό. Το γεγονός αυτό έχει ως συνέπεια οι ιδιότητες του να μεταβάλλονται σημαντικά με την πάροδο του χρόνου σε συνθήκες πυρκαγιάς, όχι μόνο λόγω της αναπτυσσόμενης θερμοκρασίας αλλά και λόγω της προσβολής του από την φωτιά. Παράλληλα, η συμμετοχή του στην πυρκαγιά δεν περιορίζεται αποκλειστικά και μόνο στην προσβολή του από αυτή.

Το ξύλο μπορεί να συμμετάσχει και το ίδιο καθοριστικά στην εξέλιξη της πυρκαγιάς ενός κτιρίου, όταν αυτό χρησιμοποιείται ως μέρος του φέροντος οργανισμού. Η ανάπτυξη φλόγας στην επιφάνειά του και η καύση του μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την μεταφορά της πυρκαγιάς σε χώρους οι οποίοι αρχικά δεν είχαν προσβληθεί από αυτήν. Επίσης, συμμετέχει στην ταχύτητα εξάπλωσής της, ιδίως όταν υπάρχουν στοιχεία με εύφλεκτες επικαλύψεις (λχ. βερνίκια) για λόγους διακόσμησης και εμφάνισης, τα οποία έχουν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη μεγάλου μήκους φλόγας και ταχυτήτων διάδοσης αυτής στην επιφάνεια, καθότι τα υλικά αυτά καίγονται ταχύτατα συγκριτικά με το ξύλο. Τέλος, το ξύλο συμμετέχει στην πυρκαγιά όπως αναφέρθηκε και το ίδιο συνεισφέροντας στο πυροθερμικό φορτίο του χώρου και παράγοντας αέρια τα οποία μπορεί να είναι από εύφλεκτα έως τοξικά.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, σημαντική είναι και η επίδραση των συνδέσμων που έχουν χρησιμοποιηθεί για την σύνδεση των διαφόρων μελών του ξύλινου φέροντος οργανισμού στην αντοχή αυτού. Ο Ευρωκώδικας αναφέρει ότι η αντοχή των ακάλυπτων μεταλλικών στοιχείων είναι περίπου 15 λεπτά και κάτι τέτοιο υποστηρίζεται και από πειραματικά δεδομένα [49]. Συνεπώς, η εφαρμογή μεθόδων προστασίας έναντι πυρκαγιάς του ξύλινου φέροντος οργανισμού μπορεί να είναι επιβεβλημένη σε ορισμένες περιπτώσεις.

Μια πολύ διαδομένη μέθοδος που χρησιμοποιείται για την προστασία των ξύλινων κατασκευών έναντι πυρκαγιάς είναι η επικάλυψη των δομικών στοιχείων με επιβραδυντικές βαφές [54]. Το βασικό χαρακτηριστικό αυτών των υλικών είναι ότι δημιουργούν ένα στρώμα κρούστας, πάχους συνήθως 2-3 mm για αποτελεσματική συμπεριφορά, πάνω στο δομικό στοιχείο και το οποίο όταν η θερμοκρασία ξεπεράσει ένα συγκεκριμένο όριο, αναλόγως το υλικό περί τους 100-150°C, τότε αυτό διαστέλλεται αρκετά και δρα ως μονωτικό υλικό ανάμεσα στην πυρκαγιά και το στοιχείο, ενώ το ίδιο είναι σχετικά άκαυστο. Τα πειραματικά αποτελέσματα από τα υλικά αυτά είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικά, καθώς ο χρόνος πυραντίστασης διπλασιάζεται ή ακόμα και τριπλασιάζεται σε ορισμένες περιπτώσεις [55] [56], ο ρυθμός παραγωγής καπνού και μονοξειδίου του άνθρακα μειώνεται δραματικά όπως επίσης μειώνεται αρκετά και ο μέγιστος ρυθμός έκλυσης θερμότητας.

Μια άλλη συνηθισμένη εφαρμογή είναι η χρήση γυψοσανίδων για την επικάλυψη των ξύλινων δομικών στοιχείων [57]. Το πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι το αισθητικά καλύτερο αποτέλεσμα συγκριτικά με τις επιβραδυντικές βαφές. Οι γυψοσανίδες είναι κατασκευασμένες από άκαυστα υλικά συνεπώς δεν διαδίδονται φλόγες στην επιφάνειά τους ενώ παρέχουν επαρκή θερμομόνωση ανάμεσα στην φωτιά και στα ξύλινα δομικά στοιχεία. Για την επίτευξη του επιθυμητού δείκτη πυραντίστασης συνήθως 10 έως 40 mm αρκούν. Αυτό που πρέπει να ληφθεί υπόψη στην περίπτωση αυτή είναι η μηχανική αντοχή της επικάλυψης με σωστή πάκτωση η οποία δεν θα είναι άμεσα εκτεθειμένη στην πυρκαγιά αλλά θα καλύπτεται από κατάλληλο πυράντοχο γύψο. Αξίζει να σημειωθεί ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί και απλώς επικάλυψη με γύψο αντί για γυψοσανίδα, ιδίως για μικρές επιφάνειες, αλλά θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η ανάγκη για χρήση κατάλληλου υλικού προκειμένου αυτός να μην αποκολληθεί (λχ. δίχτυ από σύρμα).

Ακόμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ψεκαζόμενο κονίαμα το οποίο περιέχει ίνες από πετροβάμβακα ή υαλοβάμβακα και τσιμέντο [49]. Το κονίαμα αυτό ψεκάζεται στα δομικά στοιχεία που θέλουμε να προσδώσουμε πυραντίσταση σε λεπτές στρώσεις, έως ότου επιτύχουμε

το επιθυμητό πάχος (10 έως 30 mm). Τα ορυκτά υλικά του κονιάματος αυτού του προσδίδουν εξαιρετική θερμομόνωση και το καθιστούν άκαυστο, με αποτέλεσμα την αποτελεσματική προστασία. Όμως, η εφαρμογή αυτή διαθέτει ορισμένα μειονεκτήματα. Πρέπει να ληφθεί υπόψη η χαμηλή μηχανική αντοχή της επίστρωσης και η ψαθυρότητα που τη διακρίνει. Ακόμα, απαιτείται κατάλληλη προετοιμασία της επιφάνειας πριν την εφαρμογή (αφαίρεση ελαίων, κατάλληλη τραχύτητα) και πρέπει να γίνει σε κατάλληλες συνθήκες περιβάλλοντος, ήτοι σε θερμοκρασίες πάνω από 0°C. Συνήθως χρησιμοποιείται σε δομικά στοιχεία χώρων που δεν υπάρχει συχνή ανθρώπινη δραστηριότητα.

Τέλος, συχνά χρησιμοποιείται και η απλή αλλά σχολαστική επικάλυψη με άκαυστα θερμομονωτικά υλικά, όπως ο πετροβάμβακας και ο υαλοβάμβακας σε μορφή ρολού ή κομματιών διαφόρων μεγεθών [58]. Για τη στερέωσή τους χρησιμοποιούνται συνήθως μεταλλικοί σύνδεσμοι και για αυτό πρέπει να γίνει σωστή εφαρμογή προκειμένου η χρήση αυτών να μην καθιστά την εφαρμογή τρωτή. Σε περίπτωση που απαιτείται προστασία έναντι μηχανικής φθοράς, υπάρχουν ειδικές λύσεις (λχ. υαλοβάμβακες με εξωτερική επίστρωση από φύλλα αλουμινίου) που πρέπει να υιοθετηθούν.

5.7 Ενδείξεις αστοχίας δομικής ξυλείας σε συνθήκες πυρκαγιάς

Όπως αναφέραμε πολλές φορές στο παρόν κεφάλαιο, το σημαντικότερο σημείο αστοχίας σε στοιχεία από δομική ξυλεία εντοπίζεται στο σημείο των μεταλλικών ενώσεων. Γενικότερα, το ξύλο συμπεριφέρεται αρκετά καλά έναντι της πυρκαγιάς, ιδιαίτερα δε αν ληφθεί υπόψη ότι σε αντίθεση με το χάλυβα, δεν επηρεάζεται όλη η κατασκευή άμεσα αλλά μόνο μεμονωμένα στοιχεία αυτής καθώς η πυρκαγιά επεκτείνεται. Όμως, οι μεταλλικές ενώσεις αποτελούν ένα τρωτό σημείο αυτής, όπως επίσης και ορισμένα στοιχεία θλίψης ή ακόμα και η χρήση άλλων μορφών ξυλείας, όπως το κόντρα πλακέ, αντί της δομικής σε ορισμένα σημεία της κατασκευής.



Εικόνα 35: Χαρακτηριστική αστοχία μεταλλικού συνδέσμου δομικής ξυλείας

Αυτό που αποτυπώνεται στην εικόνα 35 είναι η αστοχία της δομικής ξυλείας στο σημείο που έχει εφαρμοσθεί ένας μεταλλικός σύνδεσμος. Οι μεταλλικοί σύνδεσμοι μεταφέρουν τη θερμότητα προς το εσωτερικό-πυρήνα της ξυλείας ενώ ταυτόχρονα απομακρύνουν ταχύτερα το προστατευτικό στρώμα απανθράκωσης. Αποτελούν λοιπόν το πρώτο σημείο το οποίο πρέπει να ελέγχει ο πυροσβεστικός υπάλληλος. Για τον λόγο αυτό θα πρέπει επίσης να αναμένει ότι σημείο κατάρρευσης θα αποτελέσει το σημείο που γίνεται η σύνδεση μελών και όχι το σημείο μέγιστης φόρτισης, όπως αναμένει σε μια μεταλλική δοκό για παράδειγμα. Η δομική ξυλεία δεν εμφανίζει εμφανή παραμόρφωση και αστοχεί σχεδόν ακαριαία και ολοκληρωτικά. Συνεπώς, σε περίπτωση παρατήρησης απροστάτευτων μεταλλικών συνδέσεων, ο μέγιστος χρόνος που πρέπει να υπολογίζει είναι το μέγιστο 15 έως 20 λεπτά. Πέραν τούτου, η παραμονή στο χώρο θα πρέπει να θεωρείται επισφαλής, ακόμα και αν δεν υπάρχουν ενδείξεις επικείμενης αστοχίας. Χαρακτηριστικά αποτυπώνεται στην εικόνα 36 η κατάρρευση μιας ξύλινης κατασκευής με ακέραια τα οριζόντια και κάθετα δομικά στοιχεία, λόγο αστοχίας των συνδέσμων αυτών.



Εικόνα 36: Κατάρρευση ξύλινης κατασκευής με ακέραιες δοκούς

Τέλος, θα πρέπει να τονισθεί ιδιαίτερα ότι η δομική ξυλεία είναι εμποτισμένη με χημικά πρόσθετα τα οποία έχουν όσο στόχο αυτής την προστασία από μικροοργανισμούς και έντομα, τις καιρικές συνθήκες ή ακόμα και την ίδια τη φωτιά. Μετά το πέρας λοιπόν του φαινομένου η κατασκευή δε θα πρέπει να θεωρείται ασφαλής, ακόμα και αν δομικά είναι τέτοια, καθώς οι ενώσεις αυτές απελευθερώνονται κατά την καύση και είναι ιδιαίτερα επιβλαβείς για την ανθρώπινη υγεία.

5.8 Συνοψίζοντας για τον πυροσβεστικό υπάλληλο

Η επικρατούσα αντίληψη είναι ότι το ξύλο είναι ένα ιδιαίτερα επικίνδυνο δομικό υλικό. Αφενός, υπάρχει η άδικη σύγκριση με το οπλισμένο σκυρόδεμα, το οποίο είναι το κυρίαρχο δομικό υλικό, αφετέρου όμως όλοι σκεφτόμαστε αμέσως παραδείγματα από την καθημερινή μας ζωή όπου το ξύλο καίγεται σε τζάκια, σόμπες κτλ.

Η αλήθεια όμως είναι ότι κάθε υλικό έχει τα δικά του πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και δεν πρέπει να είμαστε απόλυτοι στους ισχυρισμούς μας. Στο κομμάτι της πυρόσβεσης και της πυραντοχής ενός υλικού τώρα, το ξύλο παρουσιάζει μία σχετικά καλή έως πολύ καλή

συμπεριφορά. Το μεγάλο του αρνητικό στοιχείο είναι το γεγονός ότι είναι καυστό υλικό και συνεισφέρει στην εξάπλωση της πυρκαγιάς και στο πυροθερμικό της φορτίο. Εντούτοις, η αντοχή του είναι επαρκής για μία κατασκευή και μπορεί εύκολα να εναρμονιστεί με τους θεσμοθετημένους δείκτες πυραντίστασης της κείμενης νομοθεσίας για την εκάστοτε κατηγορία κτηρίου με κατάλληλους τρόπους πυροπροστασίας. Αυτό οφείλεται στην προστατευτική στρώση άνθρακα που δημιουργείται κατά την καύση του και προστατεύει το εσωτερικό της ξυλείας από τις υψηλές θερμοκρασίες και την εξάπλωση της φωτιάς σε όλο του το πάχος.

Τα σημεία που πρέπει να επικεντρώσουμε την προσοχή μας σε περίπτωση επέμβασης σε ένα τέτοιο κτίριο είναι πρωτίστως οι μεταλλικοί σύνδεσμοι. Εκτεθειμένοι μεταλλικοί σύνδεσμοι με ταυτόχρονη ύπαρξη πυρκαγιάς αποτελούν ένα σαφές σημάδι για επικείμενη αστοχία σε μικρό χρονικό διάστημα, το μέγιστο 15 έως 20 λεπτών, τουλάχιστον για το επηρεαζόμενο δομικό στοιχείο.

Εφόσον τα δομικά στοιχεία προστατεύονται από επιβραδυντικές ή αντιπυρικές βαφές, γυψοσανίδα ή κάποιο μονωτικό υλικό, το κτίριο παρέχει τις ικανές συνθήκες για να επέμβουμε με ασφάλεια και τότε θα πρέπει να λογίζεται ως ένα ασφαλές κτίριο. Δεν πρέπει φυσικά να υπάρχει εφησυχασμός, αφού δεν πρέπει να αποκλείουμε τεχνικές ατασθαλίες.

Σαφής ένδειξη για την πυροπροστασία των δομικών στοιχείων αποτελεί η επιφανειακή εξάπλωση της πυρκαγιάς. Επιφανειακή εξάπλωση σε δομικά στοιχεία τα οποία δεν φέρουν κάποια εμφανή εύφλεκτη επικάλυψη (λχ. ταπετσαρίες, μοκέτες) είναι σαφείς ενδείξεις έλλειψης πυροπροστατευτικών μέσων.

Τέλος, η ύπαρξη μαυρισμένων δομικών στοιχείων δεν είναι μονοσήμαντος δείκτης. Όπως είδαμε χαρακτηριστικά στο διάγραμμα της εικόνας 34, το ξύλο σε πάχος 40 mm περίπου από την καμένη επιφάνεια διατηρεί όλες του τις μηχανικές ιδιότητες. Τα δομικά αυτά στοιχεία υπερδιαστασιολογούντε κατάλληλα και συνεπώς δεν αποτελεί ένδειξη επικείμενης αστοχίας. Φυσικά, καμένα δομικά στοιχεία και εμφανής βλάβες σε αυτά (κάμψη δοκού, λυγισμός υποστλωμάτων, εμφανής αποδόμηση των ινών του ξύλου κτλ.) αποτελούν ενδείξεις που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη διάρκεια του συμβάντος και να συνυπολογίζονται παράλληλα με άλλους δείκτες (λχ. δείκτες εξέλιξης πυρκαγιάς, σημασία δομικού στοιχείου για την ακεραιότητα του συνόλου της κατασκευής, χρόνος πυρκαγιάς, άλλες εμφανείς βλάβες) για τη λήψη αποφάσεων.

6

Θερμομονωτικά Υλικά

6.1 Εισαγωγή

Η ιστορία των θερμομονωτικών υλικών δεν είναι τόσο εκτενής όσο αυτή άλλων δομικών υλικών, πλην όμως τα τελευταία χρόνια η κατηγορία αυτή υλικών γνωρίζει πολύ μεγάλη ανάπτυξη και έχει πολύ μεγάλη αξία στις σύγχρονες κατασκευές.

Τα θερμομονωτικά υλικά δεν αποτελούν δομικά υλικά τα οποία φέρουν φορτία, κατά κανόνα. Αντιθέτως, πρόκειται στη συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων για υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται επικουρικά προκειμένου να βελτιώσουν την θερμική συμπεριφορά μιας κατασκευής. Με τον όρο θερμική συμπεριφορά αναφερόμαστε στην ικανότητα του κτιρίου να αντιστέκεται στις θερμοκρασιακές μεταβολές και να διατηρεί την εσωτερική του θερμοκρασία στα επιθυμητά επίπεδα με την ελάχιστη ή τουλάχιστον την μέγιστη επιτρεπτή εκ του νόμου δαπάνη ενέργειας.

Όλα τα κτίρια απαιτείται να διατηρούν την εσωτερική τους θερμοκρασία και υγρασία σε ανεκτά επίπεδα για τους χρήστες αυτών. Η ανάγκη όμως αυτή έρχεται συνήθως σε σύγκρουση με τις εξωτερικές συνθήκες περιβάλλοντος που επικρατούν. Έτσι, αναπτύσσεται μια ροή ενέργειας, η κατεύθυνση της οποίας εξαρτάται από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος. Κατά συνέπεια, για να διατηρηθεί η εσωτερική θερμοκρασία απαιτείται να εξισορροπηθεί η ροή αυτή ενέργειας με μία αντίθετη ροή που παρέχουμε εμείς. Έτσι, προκαλείται μια δαπάνη ενέργειας, η οποία και εν τέλη έχει ως συνέπεια την εκπομπή ρύπων για να την παραγωγή της. Για το λόγο αυτό, η ενεργειακή συμπεριφορά των κτιρίων ρυθμίζεται

μέσω ενός νομικού πλαισίου, το οποίο στη χώρα μας είναι ο Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (Κ.Εν.Α.Κ.), κατ' επιταγή Ευρωπαϊκών Κανονισμών.

Οι άνθρωποι όμως αντιλήφθηκαν την αξία των θερμομονωτικών υλικών και εν γένει της θερμικής συμπεριφοράς των κτιρίων από πολύ παλαιότερα. Οι προϊστορικοί άνθρωποι κατοικούσαν σε σπήλαια, τα οποία προσέφεραν τεράστια θερμική μάζα και συνεπώς η εσωτερική τους θερμοκρασία άλλαζε πολύ αργά. Παράλληλα, επικάλυπταν το χώρο που ζούσαν με δέρματα ζώων ή προϊόντα φυτών, καθότι προσέφεραν θερμική άνεση.

Σε μεταγενέστερες εποχές, οι άνθρωποι προσάρμοσαν τα δομικά υλικά τους ώστε να επιτύχουν την θερμική άνεση. Η χρήση μεγάλων όγκων πηλού, για αύξηση της θερμοχωρητικότητας, η χρήση αχύρου ως πρόσμικτο ή ως υλικό πλήρωσης ανάμεσα σε τοιχοποιίες, η χρήση του φελλού από τους Ρωμαίους για την μόνωση των σκεπών τους, η χρήση του άσβεστου από τους αρχαίους Έλληνες αποτελούν παραδείγματα προσαρμογής των κοινωνιών σε μια ιδιαίτερη μη αντιληπτή ανάγκη, αυτή της εξοικονόμησης ενέργειας.

Στις σύγχρονες κοινωνίες, τα θερμομονωτικά υλικά αναπτύχθηκαν τον 20^ο αιώνα προκειμένου να υπάρξει μείωση της σπατάλης ενέργειας και των εκπομπών ρύπων. Τα σύγχρονα θερμομονωτικά υλικά είναι κυρίως τεχνητά υλικά και όχι φυσικά όπως στις παλαιότερες εποχές. Τα τεχνητά υλικά διαθέτουν άριστες θερμομονωτικές ιδιότητες και χαμηλό κόστος και για το λόγο αυτό έχουν επικρατήσει, κατέχοντας το 95% της αγοράς.

Σύμφωνα με όσα αναφέραμε λοιπόν στην αρχή της παραγράφου αυτής, τα θερμομονωτικά υλικά στην πλειονότητα των περιπτώσεων δεν φέρουν φορτία και δεν αποτελούν συστατικά του φέροντος οργανισμού του κτιρίου. Για ποιο λόγο λοιπόν κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική η μελέτη τους από την σκοπιά του πυροσβεστικού υπαλλήλου; Υπάρχουν δύο λόγοι και μάλιστα ιδιαίτερα σημαντικοί. Αρχικά, ο τρόπος καύσης τους είναι ιδιόζων και διαφέρει σημαντικά από τα υπόλοιπα υλικά. Εξαιτίας του τρόπου καύσης τους, επιδρούν σημαντικά στο φαινόμενο ολικής κατάκαυσης (flash fire), το οποίο είναι το πλέον επικίνδυνο για το σύγχρονο πυροσβέστη. Επιπροσθέτως, ο τρόπος καύσης τους έχει σημαντικό αντίκτυπο στον τρόπο διάδοσης της πυρκαγιάς, όπως θα αναλύσουμε. Ο δεύτερος λόγος, είναι η παραγωγή ιδιαίτερα τοξικών αερίων και πολύ έντονου καπνού, τα οποία ακόμα και σε φαινομενικά χαμηλού κινδύνου συμβάντα, μπορούν να αποτελέσουν πολύ μεγάλο πρόβλημα.

Η αξία τους ως προς το σκέλος μελέτης αυτών εξάλλου φανερώνεται και από αρκετά τραγικά συμβάντα τα οποία έχουν συμβεί τα τελευταία χρόνια, ιδίως σε ψηλά κτίρια. Παραδείγματα αποτελούν η φωτιά στον πύργο Grenfell στο Ηνωμένο Βασίλειο, στο ξενοδοχείο The Address Downtown στα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα και η φωτιά του 2018 στο Σάο Πάολο της Βραζιλίας.

6.2 Θερμομονωτικά υλικά

Στην παράγραφο αυτή θα αναφερθούμε στα διάφορα θερμομονωτικά υλικά τα οποία συναντώνται στις σύγχρονες κατασκευές [59]. Η αναφορά είναι ενδεικτική και επικεντρώνεται κυρίως στα υλικά τα οποία είναι καυστά και συνεπώς αποτελούν αντικείμενο ενδιαφέροντος για έναν πυροσβεστικό υπάλληλο, λόγω αφενός της τεράστιας ποικιλίας υλικών στην αγορά αφετέρου και στη συνεχή ανακάλυψη νέων υλικών.

6.2.1 Θερμομονωτικά υλικά από τσιμεντοκονία

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής αναφερθήκαμε εκτενώς σε προηγούμενο κεφάλαιο στο σκυρόδεμα και ιδίως το οπλισμένο σκυρόδεμα που χρησιμοποιείται ως υλικό φέροντος οργανισμού σε σύγχρονες κατασκευές. Κύριο συστατικό αυτού αποτελεί το τσιμέντο όπως αναφέρθηκε. Αν και το σκυρόδεμα δεν διαθέτει βέλτιστες ιδιότητες από άποψη μεταφοράς θερμότητας, εν τούτοις με συγκεκριμένες τεχνικές μπορεί να αποτελέσει θερμομονωτικό υλικό.

Προκειμένου να δημιουργηθεί υλικό με επιθυμητές ιδιότητες, γίνεται μια μίξη του τσιμεντοκονιάματος και των αδρανών που χρησιμοποιούνται με ουσίες οι οποίες προκαλούν την εισαγωγή αέρα στο μείγμα και την κατακράτησή του. Ο αέρας αποτελεί άριστο υλικό θερμομόνωσης, εφόσον δεν είναι δυνατή η κυκλοφορία του εντός του υλικού. Αυτό επιτυγχάνεται δημιουργώντας πολλές και μικρές κυψελίδες αέρα στο εσωτερικό του μείγματος που δεν επικοινωνούν μεταξύ τους.

Παραδείγματα τέτοιων προϊόντων είναι το αυτόκλειστο κυψελωτό σκυρόδεμα και το αφρομετόν. Το αυτόκλειστο κυψελωτό σκυρόδεμα χρησιμοποιείται και ως υλικό που φέρει φορτία σε ορισμένες περιπτώσεις αλλά κυρίως η χρήση του αφορά την πλήρωση τοιχοποιίας. Το αφρομετόν χρησιμοποιείται για επικαλύψεις δομικών στοιχείων και για επικαλύψεις δαπέδων.

Τα προϊόντα της κατηγορίας αυτής είναι άκαυστα και συνεπώς δεν συμβάλλουν στο φαινόμενο των αστικών πυρκαγιών. Επηρεάζονται όμως από την πυρκαγιά και μάλιστα σε μεγαλύτερο βαθμό από το οπλισμένο σκυρόδεμα, όμως το γεγονός ότι δεν αποτελούν μέρος του φέροντος οργανισμού του κτιρίου τα καθιστά σχετικά ακίνδυνα σε συνήθη συμβάντα.



Εικόνα 37: Αυτόκλειστο κυψελωτό σκυρόδεμα

6.2.2 Θερμομονωτικά υλικά από ορυκτές ίνες

Μία πολύ μεγάλη κατηγορία θερμομονωτικών υλικών είναι αυτά από ορυκτές ίνες . Εδώ, η επιθυμητή πρόσμιξη του αέρα στο υλικό επιτυγχάνεται μέσω της διέλασης του υλικού σε μικρές ίνες και την δημιουργία στρώσεων.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία των υλικών αυτών είναι το γυαλί, διάφορα πετρώματα ή ακόμα και παραπροϊόντα άλλων διεργασιών, όπως είναι η επεξεργασία του χάλυβα. Τα υλικά αυτά θερμαίνονται πάνω από το σημείο τήξης και μέσω περιστροφής ή διέλασης παράγονται ίνες αυτών. Οι ίνες αυτές τοποθετούνται σε στρώσεις και λόγω της πολύ μεγάλης επιφάνειάς τους έχουν την ιδιότητα να παγιδεύουν μόρια αέρα ανάμεσα τους μέσω φυσικών δυνάμεων. Έτσι, εάν χρησιμοποιείται πυρίτιο έχουμε παραγωγή υαλοβάμβακα ή αν έχουμε χρήση πετρωμάτων πετροβάμβακα.

Μέσω της διεργασίας αυτής παράγονται υλικά με ιδιαίτερα επιθυμητές θερμομονωτικά ιδιότητες, παρόλο που τα αρχικά υλικά είναι ιδιαίτερα καλοί αγωγοί της θερμότητας. Έχουν δε επιθυμητές ιδιότητες ως προς το σκέλος της συμπεριφοράς τους στη φωτιά. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι τα υλικά αυτά ναι μεν είναι άκαυστα, πλην όμως δεν είναι εντελώς ανεπηρέαστα από την φωτιά, καθώς έχουν δεδομένο σημείο τήξης και αυτό σημαίνει ότι σε μεγάλες θερμοκρασίες μπορεί να λιώσουν, εκθέτοντας το στοιχείο που προστατεύουν και προκαλώντας δυνητικά κίνδυνο για οτιδήποτε βρίσκεται κάτω από αυτά.

Υλικό	Θερμοκρασία
Υαλοβάμβακας	230–260 °C
Πετροβάμβακας	700–850 °C
Ίνες κεραμικού υλικού	1200 °C

Πίνακας 3: Θερμοκρασία πυραντοχής ανά υλικό ορυκτής ίνας

Οι ορυκτές ίνες παρουσιάζουν ποικιλία στον τρόπο εφαρμογής τους. Διατίθενται σε ρολά εύκαμπτου υλικού, ενίοτε με πρόσθετες επιστρώσεις, όπως λχ. φύλλο αλουμινίου, σε συμπαγείς πλάκες, σε υλικά για επίστρωση, ως πρόσθετα για διάφορα μείγματα, όπως ρητίνες ή κονίες, αλλά και σε μορφή κατάλληλη για εφαρμογή με μορφή πετάσματος.

Εξαιτίας των άριστων θερμομονωτικών αλλά και ακουστικομονωτικών ιδιοτήτων τους, του χαμηλού κόστους, της ευκολίας εγκατάστασης και της εναρμόνισης με τις απαιτήσεις πυροπροστασίας, οι ορυκτές ίνες αποτελούν το 55% της αγοράς θερμομονωτικών υλικών.

6.2.3 Θερμομονωτικά από αφρούς πλαστικού

Τα πλαστικά σε μορφή αφρού εμφανίστηκαν τη δεκαετία του 1940 και ουσιαστικά άλλαξαν την αγορά μονωτικών υλικών. Μετά την πετρελαϊκή κρίση του 1970, το πολυστυρένιο και η πολυουρεθάνη ως αφροί πλαστικού αποτελούν το δεύτερο σημαντικότερο τεχνητό θερμομονωτικό υλικό με το 45% της συνολικής αγοράς θερμομονωτικών υλικών [59].

Τα υλικά από αφρό πολυστερίνης εντάσσονται σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με τον τρόπο παρασκευής τους και ειδικότερα με το προωθητικό αέριο που χρησιμοποιείται για την διόγκωση του αφρού. Η χρήση χλωριομένων υδρογονανθράκων, όπως το χλωρομεθάνιο, οδηγεί στην παραγωγή υλικών με την εμπορική ονομασία Styrofoam ενώ η χρήση πεντανίου και ατμού οδηγεί σε υλικά με την εμπορική ονομασία Styropor.

Το πολυστυρένιο δεν χρησιμοποιείται αποκλειστικά για μόνωση αλλά και ως υλικό συσκευασίας, λόγω του χαμηλού του κόστους, του μικρού βάρους, της αντοχής του και της ικανότητας θερμομόνωσής του. Το τελικό προϊόν αποτελείται από 98% κατά βάρος αέρα και μόλις 2% κατά βάρος στυρένιο. Το χρώμα είναι συνήθως λευκό, το οποίο είναι και το φυσικό του χρώμα ή ακόμα και μπλε, με την προσθήκη χρωστικών ουσιών. Τα τελευταία χρόνια, και ιδιαίτερα για εξωτερικές θερμοπροσώψεις, γίνεται προσθήκη επιπλέον ουσιών, όπως ο άνθρακας, που

βελτιώνουν την ικανότητα του υλικού να ανακλά την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, με αποτέλεσμα τα υλικά αυτά να διατίθενται σε αποχρώσεις του γκρι.

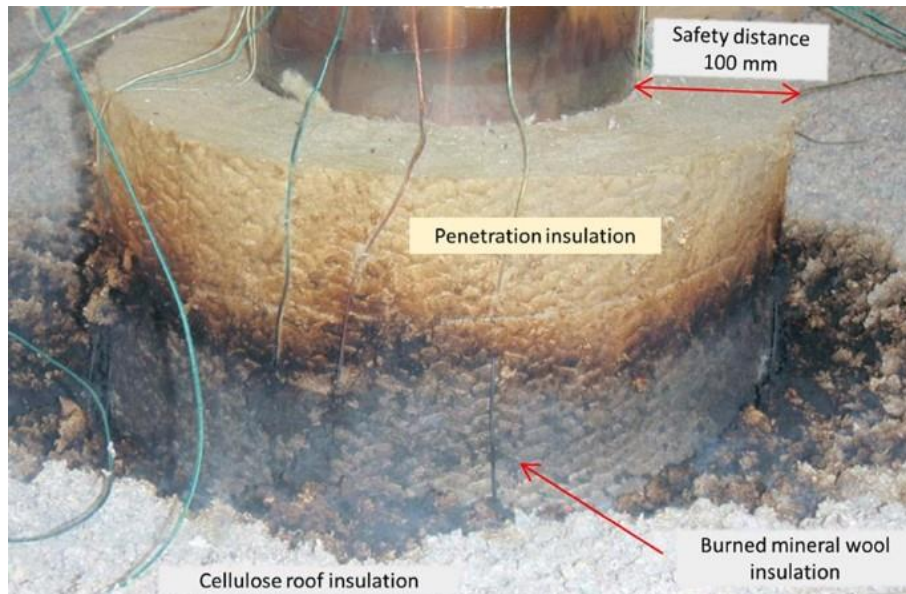
Η πολυουρεθάνη χρησιμοποιήθηκε αρχικά ως επικάλυψη για πολεμικά αεροσκάφη του 2^{ου} παγκοσμίου πολέμου. Από τη δεκαετία του 1950 προκρίθηκε η χρήση της ως θερμομονωτικό υλικό. Η χρήση σε μορφή πάνελ είναι σπάνια. Η πολυουρεθάνη έχει την ιδιαίτερη ικανότητα να μπορεί να λάβει πολύ εύκολα το επιθυμητό σχήμα και συνεπώς χρησιμοποιείται κυρίως ως θερμομονωτικό υλικό πλήρωσης διαφόρων κατασκευαστικών υλικών (λχ. θερμοπροσώψεις τύπου σάντουιτς, οροφές πάνελ, κουφώματα κτλ) και ως αφρός για χρήση σε κατασκευές. Πέραν αυτών, διατίθεται για ποικιλία χρήσεων στην αγορά, όπως ως υλικό επικάλυψης, μόνωση καλωδίων, ρητίνες συγκόλλησης κ.α.

Σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα, όπως το DIN 4102, και επιμέρους κανονισμούς, τα θερμομονωτικά υλικά της κατηγορίας αυτής κρίνονται ως εύκολα αναφλέξιμα και για το λόγο αυτό απαγορεύεται να είναι εκτεθειμένα και απαιτείται η επικάλυψή τους με άκαυστα υλικά (λχ. γυψοσανίδες) ή με επιβραδυντικές ουσίες ως επικάλυψη, προκειμένου να επιτυγχάνεται ο απαιτούμενος κατά περίπτωση δείκτης πυραντίστασης του δομικού στοιχείου.

6.3 Μηχανισμός καύσης και κίνδυνοι

Καταρχάς, όσον αφορά τα θερμομονωτικά υλικά από ορυκτές ίνες, όπως αναφέραμε αυτά επηρεάζονται από την φωτιά, όπως και τα υλικά με τσιμεντοκονία που μελετήσαμε. Τα υλικά από ορυκτές ίνες ανήκουν στην κατηγορία A1 του Ευρωπαϊκού Κανονισμού καθώς και στην κατηγορία άκαυστων υλικών κατά το πρότυπο EN 13501-1. Παρ' όλα αυτά, όπως αναφέραμε, τα υλικά αυτά είναι δυνατό να υποστούν τήξη, σε θερμοκρασίες σύμφωνα με τον πίνακα 3.

Το μεγαλύτερο όμως πρόβλημα που υπάρχει είναι το γεγονός ότι στα υλικά αυτά χρησιμοποιούνται συνδετικές κονίες και άλλα υλικά, όπως σκόνη, τα οποία είναι οργανικής προέλευσης. Σύμφωνα με έρευνες που έχουν διεξαχθεί [60], η ύπαρξη των υλικών αυτών μπορεί να οδηγήσει σε φωτιά αυτοσυντηρούμενου τύπου (smoldering), η οποία αφενός εκλύει επικίνδυνα αέρια αφετέρου όμως αυξάνει τη θερμοκρασία του υλικού, ακόμα και κατά 100°C, το οποίο είναι ιδιαίτερα επικίνδυνο αναλογιζομένου και του γεγονότος ότι οι μονώσεις αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται κοντά σε καυστά υλικά. Δεν υπάρχει πρόβλεψη στους Ευρωπαϊκούς Κανονισμούς σχετικά με το φαινόμενο αυτό.

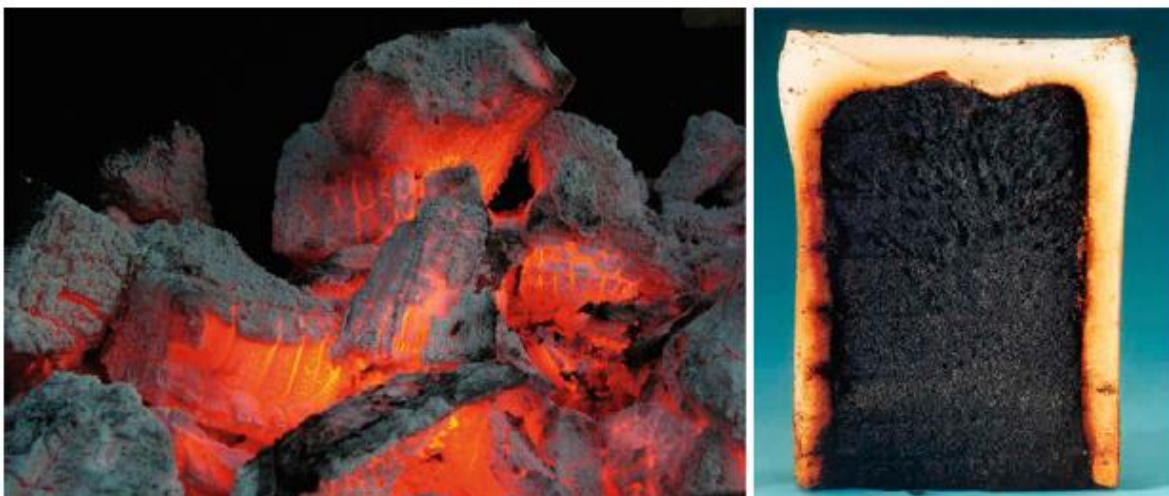


Εικόνα 38: Παράδειγμα καύσης πετροβάμβακα σε μόνωση καμινάδας

Το μεγαλύτερο όμως πρόβλημα αποτελούν τα υλικά αφρών πλαστικού. Πρόκειται για υλικά που χρησιμοποιούνται κατά κόρον στην πράξη και αποτελούν υλικά τα οποία έχουν μια πολύ επικίνδυνη συμπεριφορά στις αστικές πυρκαγιές. Αυτό οφείλεται στο μηχανισμό της καύσης τους.

6.3.1 Αυτοσυντηρούμενη καύση (οξειδωτική πυρόλυση)

Η αυτοσυντηρούμενη καύση είναι μια μορφή καύσης η οποία χαρακτηρίζεται από έλλειψη ορατής φλόγας και πολύ αργό ρυθμό αντίδρασης. Η αλυσιδωτή αντίδραση συντηρείται από τη θερμότητα που εκλύεται από την αντίδραση του οξυγόνου στην επιφάνεια του υλικού με αυτό. Έτσι λοιπόν, το βασικό της χαρακτηριστικό είναι ότι η μορφή αυτή συμβαίνει στην ακριβώς στην επιφάνεια του υλικού που καίγεται και όχι στην αέρια φάση που εκλύεται από την πυρόλυση [1].



Εικόνα 39: Παραδείγματα πυρόλυσης σε κάρβουνο (αριστερά) και πολυουρεθάνη (δεξιά)

Θα μπορούσαμε λοιπόν να πούμε ότι η αυτοσυντηρούμενη καύση είναι ένα επιφανειακό φαινόμενο. Συμβαίνει κατά κόρον σε πορώδη υλικά, όπως ο άνθρακας για παράδειγμα. Οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται και ο ρυθμός έκλυσης ενέργειας, συγκριτικά με μία κοινή καύση, είναι περίπου στο μισό, ήτοι περίπου 450-700°C (αν και σε ορισμένα υλικά, όπως ο άνθρακας, μπορεί να προσεγγίσει και τους 1000°C), συγκριτικά με τους περίπου 1500°C που είναι μία τυπική θερμοκρασία καύσης. Η ενεργειακή απόδοση της αυτοσυντηρούμενης καύσης κυμαίνεται στα 6-12 kJ/g περίπου, συγκριτικά με τα 16-30 kJ/g, ενώ η ένταση της εκλυόμενης θερμότητας είναι περίπου 10-30 kW/m².

Ένα πάρα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό είναι ο τρόπος διάδοσης αυτής. Εξαιτίας των ως άνω χαρακτηριστικών και παρά τους διαφορετικούς τύπους καυσίμων, η αυτοσυντηρούμενη καύση διαδίδεται επιφανειακά με μηχανισμούς έρπυσης και ταχύτητες της τάξης του 0.1 έως 1 mm/min, δύο με τρεις τάξεις μεγέθους χαμηλότερο ρυθμό από τις ταχύτητες διάδοσης τυπικής φλόγας.

Εν αντιθέσει με όσα θα μπορούσαν να προκύψουν από τα παραπάνω, που εμφανίζουν μια ασθενή καύση, η αυτοσυντηρούμενη καύση είναι ένα ιδιαίτερα επικίνδυνο φαινόμενο. Καταρχάς, τα παραπάνω καταδεικνύουν ότι μπορεί να έχουμε έναρξη του φαινομένου από πολύ ασθενής πηγές θερμότητας οι οποίες δεν είναι ικανές να προκαλέσουν μια έντονη καύση, όπως είναι ένα τσιγάρο, ένα θερμό ρεύμα αέρα ή ακόμα και έντονη ακτινοβολία. Τα στατιστικά στοιχεία δείχνουν ότι οι πυρκαγιές αυτού του τύπου είναι υπεύθυνες για το 25% των θανάτων στην Αμερική.

Επιπροσθέτως, η καύση αυτή μπορεί να διαρκεί πάρα πολλές ώρες δίχως να γίνει εύκολα αντιληπτή, καθώς έχει πολύ μικρό ρυθμό διάδοσης. Πρόκειται δε για ατελή καύση, που εκλύει επικίνδυνους ρύπους, όπως για παράδειγμα πολύ μεγάλες ποσότητες μονοξειδίου του άνθρακα (CO), πέραν άλλων πιθανών τοξικών ρύπων. Τέλος, ένας μεγάλος κίνδυνος είναι η μετεξέλιξη της αυτοσυντηρούμενης καύσης σε πλήρη πυρκαγιά. Η μετάβαση αυτή συμβαίνει με την σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας (λχ. αν το υλικό βρίσκεται σε κλειστό χώρο) πάνω από το όριο έναυσης αυτού. Όταν συμβεί αυτό έχουμε συνήθως μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα πλήρη έναυση σε όλη τη μάζα του υλικού καθώς και των ατμών του χώρου, ένα φαινόμενο που ονομάζεται flashover.

6.3.2 Υλικά αφρών πλαστικού

Τα υλικά αφρών πλαστικού είναι ιδιαίτερα επικίνδυνα ως προς τη συμπεριφορά τους σε συνθήκες καύσης. Ο μηχανισμός της αυτοσυντηρούμενης καύσης, ο οποίος αναλύθηκε προηγουμένως, αποτελεί το βασικό μηχανισμό καύσης αυτών.



Εικόνα 40: Καύση εξηλασμένης πολυστερίνης

Η θερμοκρασία ανάφλεξης της πολυστερίνης κυμαίνεται περίπου στους 480°C, ενώ για θερμομονώσεις πολυουρεθάνης η θερμοκρασία ανάφλεξης είναι περίπου 415°C. Η θερμοκρασίες αυτές είναι φαινομενικά αρκετά υψηλές, ιδίως αν αναλογιστούμε ότι η θερμοκρασία ανάφλεξης του ξύλου είναι λιγότερο από 400°C. Το γεγονός αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ιδιαίτερα εσφαλμένα συμπεράσματα σχετικά με την επικινδυνότητα των υλικών αυτών.

Σύμφωνα με έρευνες και πειράματα [61] η θερμοκρασία για έναρξη αυτοσυντηρούμενης καύσης δίχως φλόγες σε υλικά πολυουρεθάνης είναι ακόμα και κάτω από 300°C ενώ η απαιτούμενη ροή θερμότητας είναι μόλις το 1/3 της απαιτούμενης για έναρξη καύσης στα υλικά αυτά. Οι δε αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες είναι σε αρκετές περιπτώσεις στο εύρος των θερμοκρασιών για ανάφλεξη. Έτσι, ο βασικός κίνδυνος στα υλικά αυτά είναι η έναρξη καύσης δίχως φλόγα.

Σε μια τέτοια περίπτωση, μπορεί να υπάρξει καύση για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα η οποία δε θα γίνει αντιληπτή. Επίσης, ένας ακόμη μεγάλος κίνδυνος είναι η καύση να επεκταθεί με μηχανισμούς έρπυσης ή αερίων σε άλλους χώρους πέραν αυτών που η φωτιά ξεκίνησε. Τα παραγόμενα αέρια είναι πλούσια σε εύφλεκτες ουσίες ενώ ο καπνός ιδιαίτερα έντονος.

Τέλος, η αυτοσυντηρούμενη καύση, σε περίπτωση επέλευσης της θερμοκρασίας ανάφλεξης, μπορεί να οδηγήσει σε φαινόμενα ολικής κατάκαυσης, τόσο για το υλικό όπως φαίνεται στην εικόνα 40 όσο και για τον χώρο στον οποίο βρίσκεται εξαιτίας συσσώρευσης θερμών, εύφλεκτων αερίων. Το φαινόμενο που παρατηρείται στην εικόνα 40, ήτοι η μετατροπή της αυτοσυντηρούμενης καύσης σε πλήρη έναυση έχει διάρκεια λιγότερο από 60 δευτερόλεπτα.

6.4 Αέρια της καύσης

Ένα βασικό σημείο στο οποίο πρέπει να γίνει αναφορά είναι αυτό των αερίων που παράγονται κατά την καύση των υλικών αυτών. Τα αέρια δεν αφορούν μόνο τα θερμομονωτικά από πλαστικό αλλά και αυτά από ορυκτές πρώτες ύλες, όπως ο πετροβάμβακας, εξαιτίας του περιεχομένου τους σε οργανικά συνδετικά υλικά. Γενικά, οι κίνδυνοι από τα αέρια αυτά εμπίπτουν σε δύο κατηγορίες, στην τοξικότητα των αερίων και στην ποιότητα του καπνού αυτών.

Αρχικά, όσον αφορά τον καπνό, ιδιαίτερα τα πλαστικά αφρών εξαιτίας του τρόπου καύσης τους αλλά και λόγω της χρήσης τους σε χώρους με περιορισμένη παροχή αέρα, όπως λχ. ψευδοροφές, που οδηγεί σε συνθήκες υποαερισμού, οδηγούν σε παραγωγή καπνού πλούσιου σε μονοξείδιο του άνθρακα, το οποίο είναι τοξικό και ιδιαίτερα εύφλεκτο αέριο, καθώς σε και σε παραγωγή αιθάλης και μικροσωματιδίων. Έτσι, ο καπνός που παράγεται είναι ιδιαίτερα σκουρόχρωμος και δυσχεραίνει την ορατότητα, καθώς επίσης και ιδιαίτερα εύφλεκτος. Έτσι, σε περίπτωση επαφής του με πηγές ανάφλεξης, μπορούμε να έχουμε έναρξη πυρκαγιάς σε

παρακείμενους χώρους, στους οποίους ο καπνός έχει μεταφερθεί, οδηγώντας σε επικίνδυνες συνθήκες τόσο για τους πυροσβέστες όσο και για τους χρήστες του κτηρίου.

Για το λόγο αυτό λοιπόν, θα πρέπει να υπάρχει ιδιαίτερη προσοχή κατά τον αερισμό ή ακόμα και την πρόσβαση σε χώρους που καίγονται τέτοια υλικά. Η προσθήκη οξυγόνου σε χώρους πλούσιους σε εύφλεκτα αέρια υψηλής θερμοκρασίας μπορεί να οδηγήσει σε φαινόμενα flashover τα οποία και είναι ιδιαίτερα επικίνδυνα.

Όσον αφορά την τοξικότητα, τα αέρια που μας ενδιαφέρουν, η συγκέντρωση LC₅₀ αυτών καθώς και η συμπεριφορά τους ανάλογος των συνθηκών αερισμού φαίνονται στον πίνακα 4 [9] που ακολουθεί.

Παραγωγή ανεξάρτητη των συνθηκών	Παραγωγή αυξάνει με αερισμό	Παραγωγή μειώνεται με αερισμό
HF (2900 ppm)	CO ₂ (ασφυξιογόνο)	CO (5700 ppm)
HCl (3800 ppm)	NO ₂ (250 ppm)	HCN (165 ppm)
HBr (3800 ppm)	SO ₂ (1400 ppm)	Acrolein (150 ppm) Formaldehyde (750 ppm) Αρωματικές ενώσεις κτλ

Πίνακας 4: Επικίνδυνα αέρια της καύσης ανά συνθήκη και συγκέντρωση τοξικότητας αυτών

Έτσι λοιπόν, σε συνθήκες οξειδωτικής πυρόλυσης, οι παραγόμενες των παραπάνω αερίων ανά γραμμάριο καίομενης ουσίας παρουσιάζονται στον πίνακα 5 [9] που ακολουθεί. Όπως παρατηρούμε, τα δύο υλικά τα οποία θεωρούνται άκαυστα παράγουν σημαντικές ποσότητες επικίνδυνων αερίων, ακόμα μεγαλύτερες και από υλικά τα οποία θεωρητικά θεωρούνται ιδιαίτερα επικίνδυνα λόγω της χημικής τους σύστασης, όπως η πολυουρεθάνη.

Υλικό	Παραγόμενη ποσότητα σε αυτοσυντηρούμενη καύση δίχως φλόγα [mg/g]					
	CO ₂	CO	HCN	NO ₂	HCl	HBr
Υαλοβάμβακας	7.594	1.753	0.392	0.885	0.471	ND
Πετροβάμβακας	5.687	0.573	0.067	0.429	0.635	ND
Φαινόλη	35.743	11.063	0.232	0.685	ND	ND
Εξηλασμένη πολυστερίνη	ND	ND	0.003	ND	1.078	ND
Πολυουρεθάνη	19.324	1.672	0.056	0.673	2.368	ND
Πολυισοκυανουρικός αφρός	25.390	2.171	0.083	0.328	2.277	ND

Πίνακας 5: Παραγόμενες ποσότητες επικίνδυνων αερίων σε οξειδωτική πυρόλυση

Τέλος, για να γίνει αντιληπτή η επικινδυνότητα των υλικών αυτών, όσον αφορά την παραγωγή τοξικών αερίων, και για την σημασία της χρήσης αναπνευστικής συσκευής, στον πίνακα 6 που ακολουθεί παρουσιάζονται αφενός η παραγωγή αερίων σύμφωνα με τις συνθήκες καύσης αφετέρου η απαιτούμενη ποσότητα υλικού σε γραμμάρια που πρέπει να καεί ούτως ώστε σε 1 m³ αέρα να επιτευχθεί η συγκέντρωση LC₅₀.

Υλικό	Συνθήκες πυρκαγιάς	Λόγος αέρα (Φ)	LC ₅₀ [g/m ³]
Υαλοβάμβακας	Οξειδωτική πυρόλυση	—	163.6
	T=825°C δίχως φλόγα	—	129.5
Πετροβάμβακας	Οξειδωτική πυρόλυση	—	388.1
	T=850°C δίχως φλόγα	—	172.1
Φαινόλη	Οξειδωτική πυρόλυση	—	186.3
	Καλά αερισμένη	0.64	43.3
	Υποαερισμένη	1.29	22.3
	Υποαερισμένη	1.84	21.0
Εξηλασμένη πολυστερίνη	Οξειδωτική πυρόλυση	—	5648.5
	Καλά αερισμένη	0.80	28.4
	Υποαερισμένη	1.16	27.9
	Υποαερισμένη	1.75	27.6
Πολυουρεθάνη	Οξειδωτική πυρόλυση	—	337.2
	Καλά αερισμένη	0.69	15.7
	Υποαερισμένη	1.24	10.3
	Υποαερισμένη	2.00	11.4
Πολυισοκυανουρικός αφρός	Οξειδωτική πυρόλυση	—	498.4
	Καλά αερισμένη	0.75	16.5
	Υποαερισμένη	1.34	10.7
	Υποαερισμένη	1.97	8.3

Πίνακας 6: Παραγωγή τοξικών προϊόντων ανά υλικό και συνθήκες καύσης [9]

Έτσι, σύμφωνα με τον πίνακα 6, παρατηρούμε ότι η καύση μόλις 8 γραμμάρια πολυισοκυανουρικού αφρού σε συνθήκες υποαερισμού αρκεί να οδηγήσει σε συγκέντρωση LC₅₀ σε 1 κυβικό μέτρο αέρα. Επιπροσθέτως, από τον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε και την παραγωγή τοξικών αερίων από τα διάφορα υλικά, ακόμα και για θεωρητικά αδρανή, όπως ο υαλοβάμβακας, καθώς όπως προαναφέραμε περιέχει οργανικές συγκολλητικές ουσίες.

6.5 Παραδείγματα πυρκαγιών εξαιτίας των υλικών αυτών

Τα τελευταία χρόνια, και ιδιαίτερα προκειμένου να επιτευχθούν οι αυστηροί στόχοι για την εξοικονόμηση ενέργειας σε κτίρια, υπάρχει μια έντονη χρήση των θερμομονωτικών υλικών σε προσόψεις παλαιότερων κτιρίων. Οι θερμοπροσόψεις όπως είναι γνωστές στην αγορά αποτελούν μια ελκυστική επιλογή για τους ιδιοκτήτες παλαιότερων κυρίως αλλά και ορισμένων νέων κτιρίων, δεδομένου ότι αγενώς επιδοτούνται από το κράτος, λχ. στην Ελλάδα με το πρόγραμμα «εξοικονομώ κατ' οίκων», και αφετέρου προσφέρουν χειροπιαστά αποτελέσματα ως προς το σκέλος της μείωσης του κόστους θέρμανσης και ψύξης ενός κτιρίου.

Εντούτοις, με βάση τα όσα αναφέραμε για την συμπεριφορά των δημοφιλών υλικών θερμομόνωσης, η τεχνολογία αυτή μπορεί δυνητικά να γίνει επικίνδυνη σε περίπτωση πυρκαγιάς. Αρχικά, τα υλικά αυτά πρέπει να είναι πιστοποιημένα έναντι πυρκαγιάς και να μην επηρεάζουν τους απαιτούμενους δείκτες πυραντίστασης του κτιρίου. Επιπροσθέτως, πρέπει να εγκαθίστανται κατά τέτοιο τρόπο από εξειδικευμένο υλικό ούτως ώστε να μπορέσουν να πληρούν τις προδιαγραφές αυτές για τις οποίες πιστοποιούνται και να μην επιτρέπουν την διάδοση της πυρκαγιάς καθ' ύψος.

Έτσι, σε πολλές περιπτώσεις κτιρίων του εξωτερικού, η χρήση ακατάλληλων υλικών ή ακόμα και πιστοποιημένων υλικών από μη διαπιστευμένους τεχνίτες έχει οδηγήσει σε καταστροφικά αποτελέσματα. Ένα τέτοιο χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο πύργος Grenfell στο Ηνωμένο Βασίλειο στις 14 Ιουνίου του 2017 [62]. Η πυρκαγιά αυτή οδήγησε σε 72 θανάτους και 70 τραυματίες σε ένα 24όροφο κτίριο κατοικιών. Η φωτιά ξεκίνησε από ένα ηλεκτρικό βραχυκύκλωμα σε έναν ψυγειοκαταψύκτη ενός διαμερίσματος και γρήγορα πήρε ανεξέλεγκτες διαστάσεις.

Σύμφωνα με την έρευνα που ακολούθησε, η βασική αιτία της πυρκαγιάς ήταν η χρήση ακατάλληλων υλικών για την εξωτερική θερμομόνωση του κτιρίου, τα οποία δεν ήταν σύμφωνα με τον κανονισμό πυροπροστασίας. Η ύπαρξη διακένου ανάμεσα στην θερμοπρόσοψη και το κέλυφος του κτιρίου οδήγησε στο φαινόμενο της καμινάδας, μεταφέροντας τον καπνό και τις φλόγες ταχύτατα σε όλους τους υπερκείμενους ορόφους του κτιρίου. Η κατάσβεσή της διήρκεσε περισσότερο από 60 ώρες και χρειάστηκαν ισχυρές πυροσβεστικές δυνάμεις.

Παρόμοια συμβάντα μικρότερης κλίμακας έχουν υπάρξει την τελευταία δεκαετία σε πολλές χώρες. Στα ΗΑΕ, όπου η χρήση τέτοιων υλικών είναι ιδιαίτερα επιθυμητή για αρχιτεκτονικούς λόγους, το 2012 είχε καταστραφεί ο πύργος Al Tayer εξαιτίας ενός ακατάλληλου πάνελ αλουμινίου με πυρήνα από θερμοπλαστικό ενώ το 2017 είχε καταστραφεί μερικώς το κτίριο The Marina Torch από παρόμοια αιτία. Στην Ευρώπη το 2012 η φωτιά στο Mermoz Tower οδήγησε σε έναν θάνατο και 6 τραυματίες.

6.6 Συνοψίζοντας για τον πυροσβεστικό υπάλληλο

Αρχικά, με βάση τα όσα αναφέραμε, ο επικεφαλής του συμβάντος θα πρέπει να λάβει υπόψη του την περίπτωση ύπαρξης θερμοπρόσοψης στο κτίριο το οποίο επηρεάζεται. Η ύπαρξη θερμοπρόσοψης μπορεί να οδηγήσει αφενός σε ταχύτατη εξάπλωση της πυρκαγιάς σε όλους τους υπερκείμενους ορόφους, δυσχεραίνοντας το έργο της κατάσβεσης και θέτοντας σε κίνδυνο χρήστες του κτιρίου που βρίσκονται σε φαινομενικά ασφαλή σημεία, αφετέρου μπορεί να προκαλέσει τον τραυματισμό πυροσβεστικών υπαλλήλων που εμπλέκονται.

Έτσι, διακρίνονται δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση, ακατάλληλες θερμοπροσόψεις με εκτεθειμένα καυστά υλικά άνευ διακένου ανάμεσα στο υλικό αυτό και στο κέλυφος μπορεί να οδηγήσουν σε πυρκαγιά στην πρόσοψη του κτιρίου, η οποία όμως θα έχει έναν σχετικά αργό ρυθμό εξάπλωσης. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να επιλέγεται η αφαίρεσή της με εργαλεία, καθώς τα υλικά αυτά είναι κολλημένα σχετικά χαλαρά στο κέλυφος, είτε εναλλακτικά η χρήση νερού στο κέλυφος, ακόμα και προληπτικά.

Στην δεύτερη περίπτωση θερμοπροσόψεων οι οποίες διαθέτουν διάκενο ανάμεσα στο υλικό θερμομόνωσης και στο κέλυφος του κτιρίου, σε περίπτωση ανάφλεξης αυτών η πυρκαγιά θα εξαπλωθεί με ταχύτατους ρυθμούς καθώς δημιουργείται το φαινόμενο της καμινάδας. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να γίνεται χρήση νερού από την οροφή του κτιρίου προς το διάκενο προκειμένου να μειωθεί ο ρυθμός εξάπλωσης, αν είναι δυνατόν. Οι πυρκαγιές αυτές είναι πολύ επικίνδυνες και η αντιμετώπισή τους είναι αδύνατη αν εξελιχθούν προτού καταφθάσουν ισχυρές δυνάμεις.

Ένας άλλος βασικός κίνδυνος είναι, στην περίπτωση της χρήσης αυτών των υλικών σε εσωτερικούς χώρους, η διάδοση της φωτιάς σε χώρους όπου δεν αναμένεται καθώς και η ύπαρξη φωτιάς δίχως εμφανή σημάδια. Η ύπαρξη ψευδοροφών αποτελεί το σημαντικότερο κίνδυνο. Σε

περίπτωση πυρκαγιάς σε τέτοια κτίρια θα πρέπει να ελέγχονται σχολαστικά οι ψευδοροφές για καπνό και φωτιά άνευ φλόγας με τη χρήση θερμικής κάμερας, μετά το πέρας του συμβάντος, καθώς μπορεί η φωτιά να έρπει στην οροφή.

Όταν η πυρκαγιά βρίσκεται σε εξέλιξη, θα πρέπει να θεωρείται δεδομένο ότι κανένας χώρος του κτιρίου δεν είναι ασφαλής, καθώς τόσο ο ίδιος ο καπνός, που αποτελείται από θερμά, εύφλεκτα αέρια, διεισδύει σε όλους τους χώρους μέσω της οροφής, αλλά και σε περίπτωση θερμομόνωσης στην οροφή, υπάρχει το ενδεχόμενο η φωτιά να εξαπλωθεί διαμέσω αυτής σε παρακείμενους χώρους, οδηγώντας σε εγκλωβισμό.

Τέλος, όπως αναφέρθηκε, όλα αυτά τα υλικά είναι ιδιαίτερα τοξικά, ακόμα και σε ιδιαίτερα μικρές ποσότητες. Ακόμα και μετά το πέρας του συμβάντος, κατά το στάδιο της αποκάθαρσης, θα πρέπει να γίνεται σχολαστικός αερισμός και χρήση αναπνευστικής συσκευής. Η μη ύπαρξη ορατού καπνού δεν αποτελεί ένδειξη για την ασφάλεια του χώρου από τα τοξικά αέρια παράγωγα της καύσης των υλικών αυτών και σε καμία περίπτωση δε θα πρέπει να υποτιμάται η επικινδυνότητά τους.

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

7

Επίλογος

Ολοκληρώνοντας λοιπόν την παρούσα εργασία, καταλήγουμε σε ορισμένα συμπεράσματα, τα οποία θα προσπαθήσουμε τα συνοψίσουμε στις ακόλουθες παραγράφους της ενότητας αυτής.

Αρχικά, όσον αφορά τα επιμέρους υλικά, μπορούμε να πούμε καταρχάς για το οπλισμένο σκυρόδεμα ότι παρέχει την καλύτερη αντοχή σε συνθήκες πυρκαγιάς. Αυτό οφείλεται στην σχετικά χαμηλή του θερμική αγωγιμότητα και στην πολύ μεγάλη θερμική του μάζα. Μέσω του μηχανισμού αυτού προστατεύει επαρκώς τον οπλισμό που βρίσκεται στον πυρήνα του και διατηρεί τις αντοχές του σε μεγάλο ποσοστό και για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Συνεπώς, η επίτευξη των επιθυμητών δεικτών πυραντίστασης είναι σχετικά εύκολη και ανέξοδη. Το οπλισμένο σκυρόδεμα είναι άκαυστο και όπως αναφέρθηκε κακός αγωγός της θερμότητας, συνεπώς η διάδοση της πυρκαγιάς στις κατασκευές αυτές είναι δύσκολη και γίνεται μόνο μέσω του καπνού και της εξάπλωσης των φλογών.

Όσον αφορά την αστοχία του, το οπλισμένο σκυρόδεμα αποτελείται από δύο συστατικά με δύο διαφορετικούς μηχανισμούς αστοχίας. Από τη μία, η ψαθυρή συνδετική κονία (τσιμέντο) και τα αδρανή υλικά και από την άλλη ο όγκιμος οπλισμός. Η επαρκής προστασία του όγκιμου πυρήνα καθιστά την αστοχία του οπλισμένου σκυροδέματος σε συνθήκες πυρκαγιάς προβλέψιμη και εμφανή. Δομικά στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα δεν αστοχούν δίχως να προειδοποιήσουν για την επικείμενη καταστροφή. Το φαινόμενο του spalling είναι μια πολύ σημαντική ένδειξη των συνθηκών τις οποίες αντιμετωπίζει το σκυρόδεμα κάθε χρονική στιγμή και ένας πολύ καλός

δείκτης διερεύνησης πυρκαγιών, αφού μας φανερώνει τα σημεία στα οποία αναπτύχθηκαν υψηλές θερμοκρασίες.

Στη συνέχεια, μελετήσαμε τον κατασκευαστικό χάλυβα. Για την επίτευξη των δεικτών πυραντίστασης που απαιτούνται από την κείμενη νομοθεσία επιβάλλεται η προστασία του με μέσα παθητικής πυροπροστασίας. Αυτό σημαίνει ότι στην πράξη ακάλυπτα δομικά στοιχεία από χάλυβα μπορούν να φέρουν αποτελεσματικά φορτία για τα πρώτα 20 λεπτά μιας πυρκαγιάς. Πέραν του χρονικού σημείου αυτού, απαιτείται διαρκής επανεκτίμηση της κατάστασης, καθώς οι συνθήκες του χώρου, οι φόρτιση των στοιχείων και οι στηρίξεις αυτών διαδραματίζουν καταλυτικό ρόλο στην αντοχή αυτών συν το χρόνο. Συνήθειες και αποτελεσματική τρόποι προστασίας αποτελούν η πυράντοχη βαφή και η επένδυση με γυψοσανίδες. Σε τέτοιες περιπτώσεις, χρόνοι έως και 60 λεπτών μπορούν να θεωρηθούν ασφαλείς για επέμβαση, κρίνοντας πάντα φυσικά με βάση τις υπάρχουσες συνθήκες της πυροσβεστικής επιχείρησης.

Τα στοιχεία από χάλυβα αστοχούν με συγκεκριμένους μηχανισμούς. Όπως αναφέρθηκε, ο λυγισμός για τα υποστυλώματα, ενώ για δοκούς το φαινόμενο της κάμψης, του “plastic hinge” καθώς και της πλάγιας στρέψης και κάμψης για δοκούς οροφής και άλλες αφόρτιστες γενικά δοκούς αποτελούν τα σημεία αναφοράς για τον επιχειρησιακό αξιωματικό. Η αστοχία μέσω αυτών των μηχανισμών δεν είναι ακαριαία, όπως και στην περίπτωση του σκυροδέματος, αλλά δίνει εμφανή οπτικά σημάδια για την εξέλιξη του εκάστοτε φαινομένου.

Τέλος, όσον αφορά το ξύλο, όπως αναφέρθηκε το βασικό μειονέκτημα εν συγκρίσει με τα υπόλοιπα υλικά είναι η προσβολή του από την ίδια την φωτιά και η συνεισφορά του σε αυτή. Η διάδοση μέσω των στοιχείων της δομικής ξυλείας είναι ένα σαφές ενδεχόμενο. Η συμπεριφορά του σε συνθήκες πυρκαγιάς, παρά την ευρέως διαδεδομένη άποψη, είναι αρκετά καλή και οφείλεται τόσο στην επιφανειακή του καύση, ακόμα και σε συνθήκες καθολικής ανάφλεξης, όσο και στην πολύ μικρή του θερμική αγωγιμότητα. Παρ’ όλα αυτά, και για τους λόγους που αναφέρθηκαν εκτενώς, το σημείο αναφοράς είναι οι μεταλλικές συνδέσεις των στοιχείων του φέροντος οργανισμού. Τα σημεία αυτά αποτελούν τα κρίσιμα σημεία για αστοχία, καθώς προσβάλλουν τον πυρήνα του ξύλου τόσο μέσω διάδοσης θερμότητας σε όλο το βάθος του ξύλου όσο και προσβολής του στρώματος απανθράκωσης. Χαρακτηριστικό είναι ότι σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 5, δεν πρέπει να αναμένουμε πυραντίσταση άνω των 15 έως 30 λεπτών για εκτεθειμένες μεταλλικές συνδέσεις. Τέλος, η αστοχία των δομικών στοιχείων από ξύλο είναι

ακαριαία και δίχως προειδοποίηση, καθώς όταν το πάχος του στοιχείου μειωθεί αρκετά αυτό δεν μπορεί πλέον να φέρει φορτία και αστοχεί καταστροφικά.

Σε κάθε περίπτωση, κατέστη σαφές ότι η επαρκής προστασία των δομικών στοιχείων, σύμφωνα με τα κανονιστικά πρότυπα, εξασφαλίζει ασφάλεια στο προσωπικό κατά τα αρχικά στάδια της πυρκαγιάς, τα οποία και είναι και τα κρισιμότερα από πλευράς επέμβασης, ιδίως για επιχειρήσεις έρευνας και διάσωσης. Μετά το πέρας του φαινομένου της πυρκαγιάς, η ασφάλεια του κτιρίου δύναται να εκτιμηθεί από ειδικούς μηχανικούς, αφού οι συνθήκες δεν επιβάλλουν την επιχείρηση εντός του χώρου.

Με βάση τα όσα αναφέραμε, υπάρχουν ορισμένα σημεία τα οποία κρίνεται σκόπιμο να μελετηθούν περαιτέρω από μεταγενέστερες έρευνες. Αρχικώς, ένα τέτοιο σημείο αποτελεί το φαινόμενο της πλάγιας στρέψης και κάμψης στις μεταλλικές δοκούς. Πρόκειται για ένα πολύ σύνθετο φαινόμενο το οποίο υπολογιστικά είναι πολύ δύσκολο να εκτιμηθεί, ενώ πειραματικά απαιτεί εξειδικευμένο εξοπλισμό και προσωπικό. Για τους λόγους αυτούς, οι αναφορές στη διεθνή βιβλιογραφία είναι ελάχιστες. Όμως, είναι ένα φαινόμενο το οποίο αντιμετωπίζεται στην πράξη, σε μέλη κτιρίων τα οποία δε δέχονται ιδιαίτερες φορτίσεις. Αυτό όμως δε τα καθιστά ακίνδυνα. Αντιθέτως, υποεκτιμάτε η συμπεριφορά αυτή λόγω απουσίας φόρτισης και πιθανώς να προκύψουν συμβάντα που η μη αναμενόμενη αστοχία μέσω ενός τέτοιου μηχανισμού μπορεί να οδηγήσει σε σειρά γεγονότων με δυσμενείς συνέπειες.

Ένα άλλο στοιχείο που απαιτεί μελέτη είναι η συμπεριφορά των μεταλλικών συνδέσεων ανάλογα με την προστασία που έχει επιλεγεί σε ξύλινες κατασκευές. Η βιβλιογραφία προτείνει απλώς την προστασία με έναν από τους γνωστούς τρόπους προστασίας και των δομικών τμημάτων. Παρ' όλα αυτά, ενώ έχει μελετηθεί η επίδραση καθενός εκ των μεθόδων αυτών στα δομικά στοιχεία και της ικανότητάς τους να παρέχουν πυροπροστασία, δεν υπάρχει αντίστοιχη έρευνα στο πεδίο των μεταλλικών συνδέσεων και της προστασίας τους.

Ακόμα, σημαντικό θα ήταν να μελετηθεί για το ξύλο αλλά και για άλλα υλικά η παραγωγή καπνού και τοξικών προϊόντων. Οι περισσότερες ανθρώπινες απώλειες από πυρκαγιά οφείλονται στον καπνό και στα παράγωγα αυτού. Συνεπώς, για τα σύγχρονα δομικά υλικά είναι σημαντικό να μειωθεί η εκπομπή καπνού και τοξικών παραγώγων, ιδίως κατά τα πρώτα στάδια της πυρκαγιάς.

Επιπροσθέτως, είναι πολύ σημαντικό να τονισθεί ότι το μεγαλύτερο μέρος της εργασίας αυτής βασίστηκε σε επιστημονικό υλικό και πειραματικές δοκιμές και όχι πραγματικά περιστατικά, για τις οποίες δοκιμές και δεδομένα χρησιμοποιήθηκε κατά κανόνα το πρότυπο πυρκαγιάς ASTM E119 ή αντίστοιχα το ISO 10295. Φυσικά και πρόκειται για διεθνώς επιστημονικά αποδεκτή μεθοδολογία, είναι δεν προφανές ότι η προτυποποίηση είναι απαραίτητη για να υπάρχει κοινό έδαφος σε διεθνές επίπεδο για το ερευνητικό έργο και τα δομικά προϊόντα που κυκλοφορούν στην αγορά. Όμως, ο σύγχρονος πυροσβεστικός υπάλληλος καλείται να αντιμετωπίσει πυρκαγιές που ξεφεύγουν πολλές φορές από το σύνηθες, εξαιτίας της διαρκούς εξέλιξης των υλικών που υπάρχουν στις σύγχρονες κατοικίες και κτίρια αλλά και άλλων απρόβλεπτων παραγόντων. Συνεπώς, κρίνεται σκόπιμο να διεξαχθεί μια μελέτη περιπτώσεων και ιδιαίτερα μια σειρά πειραμάτων υπό πραγματικές συνθήκες και όχι εργαστηριακές, προκειμένου να συμπεράνουμε κατά πόσο οι χρόνοι, οι θερμοκρασίες και τα αντίστοιχα αποτελέσματα που αναφέραμε έχουν απόλυτη εφαρμογή στο σύγχρονο, διαρκώς μεταβαλλόμενο εργασιακό και επιχειρησιακό περιβάλλον, και να γίνουν οι κατάλληλες επισημάνσεις και προσθήκες στην παρούσα εργασία.

Τέλος, κρίνεται σκόπιμο να μελετηθεί η επίδραση των θερμομονωτικών υλικών στις αστικές πυρκαγιές. Τα τελευταία χρόνια έχουμε γίνει μάρτυρες δύο πολύ δυσάρεστων συμβάντων, σε Ηνωμένο Βασίλειο και Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα, στα οποία δύο κτίρια υπέστησαν σοβαρές και ταχύτατα διαδιδόμενες πυρκαγιές εξαιτίας θερμοπροσώψεων και θερμομονωτικών υλικών αυτών. Αναλογιζόμενοι ότι στη χώρα μας τα τελευταία χρόνια αφενός η ανάγκη για μείωση της πραγματικά υπέρμετρης ενεργειακής κατανάλωσης των κτιρίων και αφετέρου λόγω παροχής κινήτρων από το κράτος μέσω επιχορηγήσεων, έχει οδηγήσει στην εφαρμογή τέτοιων συστημάτων από μη πιστοποιημένα άτομα και με αμφιβόλου ποιότητας υλικά σε πληθώρα κτιρίων και κατά κόρων, είναι σαφές ότι προκύπτει πραγματικός κίνδυνος για αστικές πυρκαγιές με ασύμμετρη συμπεριφορά στην εξέλιξη και διάδοσή τους.

Βιβλιογραφία

- [1] M. Hurley, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering 5th edition, Springer, 2016.
- [2] Di Blasi, C., «Modeling and Simulation of Combustion Processes of Charring and Non-Charring Solid Fuels,» *Progress in Energy and Combustion Science*, αρ. 19, pp. 71-104, 1993.
- [3] Ohlemiller, T.J., «Modeling of Smoldering Combustion Propagation,» *Progress in Energy and Combustion Science*, αρ. 11, pp. 277-310, 1986.
- [4] Bal, N., «Uncertainty and complexity in pyrolysis modelling,» PhD Dissertation, University of Edinburgh, Edinburgh, 2012.
- [5] Williams, F.A., Combustion Theory, 2nd Edition, Addison-Wesley Publishing Company, 1985.
- [6] M.G. Zabetakis, «Bulletin No. 627,» U.S. Bureau of Mines, Washington, DC, 1965.
- [7] Atreya, A., «Ignition of Fires,» *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, αρ. 356, p. 2787–2813, 1998.
- [8] ISO 13571: 2007, «Life-threatening components of fire - Guidelines for the estimation of time available for escape using fire data,» 2007.
- [9] Stec, Anna A and Hull, T Richard, «Assessment of the fire toxicity of building insulation,» *Energy and Buildings*, τόμ. 43, pp. 498-506, 2011.
- [10] A.H. Buchanan, Structural Design for Fire Safety, Chichester, UK: John Wiley and Sons, 2001.
- [11] EN1992-1-2:2004, Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design, Brussels, Belgium: European Committee for Standardisation, 2004.
- [12] American Concrete Institute, ACI 216.1-07/TMS-0216-07 – Code Requirements for Determining Fire Resistance of Concrete and Masonry Construction Assemblies, USA, 2007.
- [13] Reinforced Concrete Fire Resistance, Chicago: Concrete Reinforcing Steel Institute, 1980.
- [14] Κ. Κολοβός, Σημειώσεις μαθήματος: Τεχνολογία Δομικών Υλικών, Αθήνα: Πυροσβεστική Ακαδημία, 2018.

- [15] M.S. Abrams and A.H. Gustaferro, «Fire Endurance of Two-Course Floors and Roofs,» *Journal of American Concrete Institute*, αρ. 66, π. 2, 1969.
- [16] R.H. Iding, Z. Nizamuddin, and B. Bresler, «FIRES T3, A Computer Program for the Fire Response of Structures—Thermal-Three-Dimensional Version,» University of California, Berkeley, 1996.
- [17] U. Wickström, «TASEF-2—A Computer Program for Temperature Analysis of Structures Exposed to Fire,» Lund Institute of Technology, Lund, 1979.
- [18] J.-M. Franssen, V.K.R. Kodur, and J. Mason, «User's Manual for SAFIR 2002: A Computer Program for Analysis of Structures Subjected to Fire,» University of Lie`ge, Belgium, 2002.
- [19] Hogg P., «PREDICTION OF THE FAILURE TIME OF GFRP-RC BEAMS UNDER FIRE CONDITIONS,» *Journal of Composites for Construction*, 2005.
- [20] Petterson, O., Magnusson, S.E. and Thor, J., *Fire Engineering Design of Steel Structures*, Publication 50, Swedish Institute of Steel Construction, 1976.
- [21] Robinson, J.T. and Latham, D.J., «Fire resistant steel design—the future challenge,» *Design of Structures Against Fire*, pp. 225-236, 1986.
- [22] T.T. Lie (ed.), «Structural Fire Protection,» American Society of Civil Engineers, New York, 1992.
- [23] «Eurocode 3: Design of Steel Structures—Part 1-2: General Rules—Structural Fire Design,» European Committee for Standardization (CEN), Brussels, 1995.
- [24] H.L. Malhotra, «Design of Fire-Resisting Structures,» Chapman and Hall, New York, 1982.
- [25] J.L. Gross and T.P. McAllister, «Structural Fire Response and Probable Collapse Sequence of the World Trade Center Towers,» National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, 2005.
- [26] Y. C. Yong, *Steel and composite structures - Behaviour and design for fire safety*, London: Spon Press, 2002.
- [27] Wainman, D.E. and Kirby, B.R., «Compendium of UK Standard Fire Test Data, Unprotected Structural Steel,» British Steel Corporation, Rotherham, 1988.
- [28] Wang, Y.C. and Moore, D.B., «Fire resistance of steel frames,» *Structural Design for Hazardous Loads, The Role of Physical Testing*, London, 1992.
- [29] V.K.R. Kodur and T.T. Lie, «Fire Performance of Concrete-Filled Hollow Steel Columns,» *Journal of Fire Protection Engineering*, τόμ. 7, αρ. 3, pp. 89-98, 1995.

- [30] L.G. Seigel, «Designing for Fire Safety with Exposed Steel,» *Fire Technology*, τόμ. 6, αρ. 4, pp. 269-278, 1970.
- [31] B.R. Kirby, «Large Scale Fire Tests: the British Steel European Collaborative Research Programme on the BRE 8-Storey Frame,» σε *FIRE SAFETY SCIENCE-PROCEEDINGS OF THE FIFTH INTERNATIONAL SYMPOSIUM*.
- [32] D. Drysdale, *An Introduction to Fire Dynamics*, 2nd Edition, Chichester, UK: John Wiley and Sons, 1998.
- [33] International Union of Pure and Applied Chemistry, *Compendium of Chemical Terminology*, 2009.
- [34] R.H. White; M.A. Dietenberger, «Wood Products: Thermal Degradation and Fire,» *Encyclopedia of materials : science and technology*, pp. 9712-9716, 2001.
- [35] G.S. Hall, R.G. Saunders, R.T. Allcorn, P.E. Jackman, M.W. Hickey, and R. Fitt, *Fire Performance of Timber—A Literature Survey*, High Wycombe, UK: Timber Research and Development Association, 1971.
- [36] S. Hadvig, *Charring of Wood in Building Fires*, Lyngby: Technical University of Denmark, 1981.
- [37] X.A. Frangi and M. Fontana, «Charring Rates and Temperature Profiles of Wood Sections,» *Fire and Materials*, αρ. 27, p. 91, 2003.
- [38] E.L. Schaffer, *Structural Fire Design: Wood*, Madison: Research Paper FPL 450, USDA Forest Service, 1984.
- [39] M.L. Janssens and R.H. White, «Short Communication: Temperature Profiles in Wood Members Exposed to Fire,» *Fire and Materials*, αρ. 18, p. 263, 1994.
- [40] E.L. Schaffer, «Structural Fire Design: Wood,» USDA Forest Service, Forest Product Laboratory, Madison, 1984.
- [41] P.W.C. Lau and J.D. Barrett, «Factors Affecting Reliability of Light-Framing Wood Members Exposed to Fire—A Critical Review,» *Fire and Materials*, αρ. 18, p. 339, 1994.
- [42] K. Odeen, «Fire Resistance of Glued Laminated Timber Structures,» Her Majesty's Stationery Office, London, 1970.
- [43] C. Imaizumi, «Stability in Fire of Protected and Unprotected Glued Laminated Beams,» *Norsk Skogind*, αρ. 16, p. 140, 1962.

- [44] J. Schmid, J. König, and A. Just, «The Reduced Cross-Section Method for the Design of Timber Structures Exposed to Fire - Background, Limitations, and New Developments,» *Structural Engineering International*, τόμ. 4, αρ. 22, p. 514, 2012.
- [45] K. Odeen, «Fire Resistance of Wood Structures,» *Fire Technology*, αρ. 21, p. 34, 1985.
- [46] American Wood Council, «Calculating the Fire Resistance of Exposed Wood Members,» American Forest & Paper Association, Washington, 2003.
- [47] M. Klippel, J. Schmid, and A. Frangi, «The Reduced Cross-Section Method for Timber Members Subjected to Compression, Tension and Bending in Fire,» σε *Proc. CIB-18 Meeting 45, Paper 45-15-1. Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen*, Karlsruhe, 2012.
- [48] T.G. Williamson, «Rehabilitation of Fire-Damaged Timber—The Filene Center,» American Society of Civil Engineers, New York, 1982.
- [49] O. Carling, «“Fire Resistance of Joint Details in Loadbearing Timber Construction—A Literature Survey,» Building Research Association of New Zealand , Judgeford, 1989.
- [50] American Wood Council, «Calculating the Fire Resistance of Exposed Wood Members,» American Forest & Paper Association, Washington, 2003.
- [51] B. Källander and P. Lind, «Strength Properties of Wood Adhesives After Exposure to Fire,» σε *Proceedings of Wood Adhesives 2005*, Madison, 2006.
- [52] A. Frangi, M. Fontana, and A. Mischler, «Shear Behavior of Bond Lines in Glued Laminated Timber Beams at High Temperatures,» *Wood Sci Technol.*, αρ. 38, p. 119, 2004.
- [53] P. Moss, A. Buchanan, M. Fragiaco, and, «Experimental Testing and Analytical Prediction of the Behavior of Timber Bolted Connections Subjected to Fire,» *Fire Technology*, αρ. 46, p. 129, 2010.
- [54] D. Kasymov, M. Agafontsev, «Studying the effect of fire retardant coating on the fire hazard characteristics of wood using infrared thermography,» σε *EPJ Web Conf. Volume 159*, 2017.
- [55] F. Wang, Z. Zhang, Q. Wang και J. Tang, «Fire-retardant and smoke-suppressant performance of an intumescent waterborne amino-resin fire-retardant coating for wood,» *Frontiers of Forestry in China*, τόμ. 3, αρ. 4, pp. 487-492, 2008.
- [56] Y. Tsapko, V. Kyrycyok, A. Tsapko, O. Bondarenko, S. Guzii, G. Vatulia, A. Plugin και O. Darenskyi, «Increase of fire resistance of coating wood with adding mineral fillers,» *MATEC Web of Conferences*, τόμ. 230, p. 2034, 2018.

- [57] L. R. Richardson, «Thoughts and observations on fire-endurance tests of wood-frame assemblies protected by gypsum board,» *Fire and Materials*, τόμ. 25, αρ. 6, pp. 223-239, 2002.
- [58] A. Just, «Post protection behaviour of wooden wall and floor structures completely filled with glass wool,» Michigan State University, Michiham, 2010.
- [59] Dávid Bozsaky, «The historical development of thermal insulation materials,» *periodica polytechnica*, τόμ. 2, αρ. 41, pp. 49-56, 2010.
- [60] Mikko Malaska, «Experimental Study on the Smouldering Combustion of Mineral Wool Insulation in Chimney Penetrations,» *Fire Technology*, αρ. 55, p. 2171–2194, 2019.
- [61] Hadden R., «Radiant Ignition of Polyurethane Foam: The Effect of Sample Size,» *Fire Technology*, αρ. 50, p. 673–691, 2014.
- [62] BBC News, 21 May 2018. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.bbc.com/news/uk-44200041>. [Πρόσβαση 10 09 2020].