



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών



Τεχνική και Οικονομική Διερεύνηση Μεθόδων Πυροπροστασίας Μεταλλικών Κατασκευών



Διπλωματική Εργασία

Κυριάκος Παρθενίδης

EMK ΔΕ 2023 22

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Καθηγητής

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2023



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών



Τεχνική και Οικονομική Διερεύνηση Μεθόδων Πυροπροστασίας Μεταλλικών Κατασκευών



Διπλωματική Εργασία

Κυριάκος Παρθενίδης

EMK ΔΕ 2023 22

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Καθηγητής

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2023

Copyright © Κυριάκος Παρθενίδης, 2023

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, διανομή, αναπαραγωγή, μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια του συγγραφέα. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Kyriakos Parthenidis, 2023

All Rights Reserved

Neither the whole nor any part of this diploma thesis may be copied, stored in a retrieval system, distributed, reproduced, translated, or transmitted for commercial purposes, in any form or by any means now or hereafter known, electronic or mechanical, without the written permission from the author. Reproducing, storing and distributing this thesis for non-profitable, educational or research purposes is allowed, without prejudice to reference to its source and to inclusion of the present text. Any queries in relation to the use of the present thesis for commercial purposes must be addressed to its author.

Approval of this diploma thesis by the School of Civil Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA) does not constitute in any way an acceptance of the views of the author contained herein by the said academic organisation (L. 5343/1932, art. 202).

Κυριάκος Παρθενίδης (2023)

Τεχνική και Οικονομική Διερεύνηση Μεθόδων Πυροπροστασίας Μεταλλικών Κατασκευών
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2023 22
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Kyriakos Parthenidis (2023)

Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2023 22
Technical and Economic Investigation of Fire Protection Methods for Steel Structures
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα θα ήθελα να ευχαριστώ τον επιβλέποντά μου κύριο Χάρη Γαντέ για όλη την κατανόηση και καθοδήγηση που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια της συγγραφής της διπλωματικής μου εργασίας. Ευχαριστώ επίσης θερμά τους συμφοιτητές μου, για την συμπαράσταση, τη βοήθεια και την συνεργασία τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Δεν θα είχα φτάσει τόσο γρήγορα ως εδώ χωρίς αυτούς. Τέλος, ευχαριστώ τους γονείς μου για όλη την οικονομική και συναισθηματική στήριξη που μου προσέφεραν κατά τα ακαδημαϊκά μου χρόνια, καθώς και για την καθοδήγηση τους στην επιλογή των σπουδών μου.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΜΚ ΔΕ 2023 22

**Τεχνική και Οικονομική Διερεύνηση Μεθόδων Πυροπροστασίας
Μεταλλικών Κατασκευών
Κυριάκος Παρθενίδης**

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Καθηγητής

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η πυρκαγιά αποτελεί ένα από τα πιο επικίνδυνα και περίπλοκα φαινόμενα, από τα οποία καλούμαστε να προστατεύσουμε τις κατασκευές μας, έχοντας απασχολήσει τους μηχανικούς για αρκετούς αιώνες. Η εξέλιξη στον τομέα αυτό, που ξεκίνησε με ραγδαίους ρυθμούς κατά την βιομηχανική επανάσταση, είχε ως αποτέλεσμα την σταδιακή ανάπτυξη και την δημιουργία πλήθους μεθόδων πυροπροστασίας και πυροπροστατευτικών υλικών για τις σύγχρονες κατασκευές.

Η πρόβλεψη εφαρμογής κατάλληλων μέσων πυροπροστασίας, αποτελεί θεσμοθετημένη υποχρέωση, αλλά και προαπαιτούμενο για την αδειοδότηση οποιασδήποτε σύγχρονης κατασκευής. Χρρίζει, μάλιστα, ιδιαίτερης σημασίας, όταν αναφερόμαστε σε μεταλλικά κτήρια. Για διευκόλυνση της εφαρμογής παθητικής πυροπροστασίας σε συνήθεις μεταλλικές κατασκευές, συγκεντρώθηκαν τα απαραίτητα μέρη των χρησιμοποιούμενων κανονιστικών πλαισίων. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται εκτενώς οι διατάξεις του ανανεωμένου ελληνικού κανονισμού πυροπροστασίας, αλλά και των αναθεωρημένων μερών 1-2 του Ευρωκώδικα 1 και του Ευρωκώδικα 3.

Λόγω πρόσφατων αλλαγών του ελληνικού κανονισμού πυροπροστασίας στις απαιτήσεις πυραντίστασης, η χρήση του χάλυβα καθίσταται, πλέον, ιδιαίτερα αντισυμβατική. Το υψηλό κόστος της εφαρμογής παθητικής πυροπροστασίας, σε συνδυασμό με το ήδη υψηλό κόστος του χάλυβα, συνεπάγεται να μην προτιμάται ως υλικό κατασκευής συμβατικών κτηρίων στην Ελλάδα. Με αφορμή τα παραπάνω και σε συνδυασμό με την επερχόμενη ανανέωση των Ευρωκώδικων, επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί τεχνική και οικονομική διερεύνηση και σύγκριση, μεταξύ των διαφόρων προτεινόμενων μεθόδων και των συνηθέστερων υλικών παθητικής πυροπροστασίας. Μελετήθηκε διαστασιολογημένο βιομηχανικό κτήριο αποθήκης χρησιμοποιώντας τρία πυροπροστατευτικά υλικά: τη διογκούμενη βαφή SteelMaster 1200WF, πυράντοχες γυψοσανίδες Fireline και το εκτοξευόμενο επίχρισμα βερμικουλίτη SLV. Επίσης, εξετάστηκε η συνεισφορά πάχυνσης των ελασμάτων των διατομών και η ενδεχόμενη εγκατάσταση αυτόματου συστήματος καταιονισμού ύδατος, στην οικονομικότητα της κατασκευής.

Για το εξεταζόμενο κτήριο προέκυψε ότι, με διαφορά, πιο οικονομικό υλικό παθητικής πυροπροστασίας, είναι το εκτοξευόμενο επίχρισμα βερμικουλίτη. Αν, όμως, με γνώμονα την τελική αισθητική της κατασκευής, η επιλογή εκτοξευόμενων επιχρισμάτων αποκλειστεί, οικονομικότερη επιλογή αποτελεί ο συνδυασμός του αυτόματου συστήματος καταιονισμού ύδατος, με τη διογκούμενη βαφή. Τέλος, παρατηρήθηκε ότι η πάχυνση των ελασμάτων των διατομών δεν ωφελεί οικονομικά, στον συγκεκριμένο τύπο κτηρίου.



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF
ATHENS
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF STEEL STRUCTURES



DIPLOMA THESIS
EMK ΔΕ 2023 22

Technical and Economic Investigation of Fire Protection Methods for Steel Structures

Kyriakos Parthenidis

Supervisor: Charis Gantes, Professor

ABSTRACT

Fire is one of the most dangerous and complex phenomena, from which we should protect our constructions, and it has occupied engineers for several centuries. Development in this field, which began at a rapid pace during the industrial revolution, resulted in the gradual creation of a variety of fire protection methods and insulating materials, available in modern constructions.

The provision for the application of appropriate fire protection methods is a statutory obligation and a prerequisite for the approval of any modern construction design. In fact, it requires special importance when we refer to steel structures. To facilitate the application of passive fire protection in common steel structures, the necessary parts of the used regulatory frameworks have been compiled. Specifically, the provisions of the updated Greek fire protection regulation, as well as the revised parts 1-2 of Eurocode 1 and Eurocode 3, are presented in detail.

Due to recent changes in the Greek fire protection regulation to fire resistance requirements, the use of steel is now becoming particularly uneconomical. The high cost of implementing passive fire protection, combined with the already high cost of steel, leads the material to not being preferred for construction of conventional buildings in Greece. Due to the above and in conjunction with the upcoming renewal of the Eurocodes, a technical and economic investigation and comparison between the various proposed methods and the most common passive fire protection materials was carried out. An industrial warehouse building was studied using three fire protection materials: SteelMaster 1200WF: an intumescent paint, Fireline: a fire-resistant plasterboard and SLV: a vermiculite spray render. Also, we examined the contribution of thickening the cross-section plates and the installation of an automatic water sprinkler system, to the economy of the construction.

For the building under consideration, it was found that, by far, the most economical passive fire protection material is the sprayed vermiculite coating. If, in view of the final aesthetics of the construction, the choice of spray coatings is ruled out, a more economical option is the combination of the automatic water sprinkling system with the intumescent paint. Finally, it was observed that the thickening of the cross-section plates is not economically beneficial in this case of study.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Βασικές Αρχές Πυροπροστασίας	3
1.2 Μέθοδοι Πυροπροστασίας Μεταλλικών Κατασκευών	4
1.2.1 Ενεργητικές Μέθοδοι Πυροπροστασίας	5
1.2.2 Παθητικές Μέθοδοι Πυροπροστασίας.....	5
2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΥΠΟ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ	13
2.1 Ελληνικός Κανονισμός Πυροπροστασίας.....	13
2.2 Θερμοκρασιακές Δράσεις Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 1	17
2.2.1 Πρότυπες Καμπύλες Θερμοκρασίας – Χρόνου	17
2.2.2 Παραμετρική Καμπύλη Θερμοκρασίας – Χρόνου	18
2.2.3 Συνδυασμοί Δράσεων σε Συνθήκες Πυρκαγιάς	22
2.3 Φορτία Σχεδιασμού Πυρκαγιάς	24
2.3.1 Θερμικές Ιδιότητες Χάλυβα.....	24
2.3.2 Υπολογισμός Θερμοκρασίας Μη Μονωμένων Μελών	26
2.3.3 Υπολογισμός Θερμοκρασίας Μονωμένων Μελών	29
2.3.4 Μηχανικά Χαρακτηριστικά Χάλυβα κατά την Πυρκαγιά.....	31
2.4 Αντοχή Μεταλλικών Μελών σε Συνθήκες Πυρκαγιάς	32
2.4.1 Κατηγοριοποίηση Διατομών	32
2.4.2 Αντοχή σε Εφελκυσμό.....	35
2.4.3 Αντοχή σε Θλίψη	35
2.4.4 Αντοχή σε Κάμψη	37
2.4.5 Αντοχή σε Διάτμηση	39
2.4.6 Αντοχή σε Συνδυασμό Κάμψης – Αξονική Δύναμης	39
2.4.7 Αντοχή Συνδέσεων	41
3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟ ΚΤΗΡΙΟ.....	43
3.1 Γεωμετρία Φορέα	45
3.2 Χρησιμοποιούμενες Διατομές.....	48
3.3 Στατικές Αναλύσεις.....	49
3.4 Υπολογισμός Κρίσιμων Θερμοκρασιών	50
3.5 Απαιτούμενα Πάχη Μονωτικών Υλικών.....	53
4 ΚΟΣΤΟΛΟΓΗΣΗ ΠΥΡΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ	61
4.1 Κόστος Πυροπροστασίας.....	61
4.1.1 Κόστος Παθητικής Πυροπροστασίας.....	61

4.1.2	Κόστος Ενεργητικής Πυροπροστασίας	64
4.2	Σύγκριση Αποτελεσμάτων	64
4.2.1	Σύγκριση Οικονομικότητας Μεθόδων Παθητικής Πυροπροστασίας.....	65
4.2.2	Σύγκριση Οικονομικότητας των Φορέων 1 & 2.....	68
4.2.3	Διερεύνηση της Συνεισφοράς Εγκατάστασης Ενεργητικής Πυροπροστασίας	72
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	77
5.1	Συμπεράσματα	77
5.2	Προτάσεις.....	79
6	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	81
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΠΙΝΑΚΕΣ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΩΝ ΠΑΧΩΝ ΤΗΣ ΒΑΦΗΣ STEELMASTER1200 WF		83
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΚΟΣΤΟΛΟΓΗΣΗ ΠΑΘΗΤΙΚΗΣ ΠΥΡΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΑΝΑ ΔΙΑΤΟΜΗ.....		91
6.1	Κοστολόγηση Παθητικής Πυροπροστασίας Φορέα 1.....	91
6.2	Κοστολόγηση Παθητικής Πυροπροστασίας Φορέα 2.....	101

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η πυροπροστασία κτηρίων αποτελεί, εδώ και αρκετούς αιώνες, παρακλάδι της δομικής μηχανικής και αφορά την πρακτική εφαρμογή επιστημονικών και εμπειριστατωμένων γνώσεων, σχετικά με το φαινόμενο της πυρκαγιάς, στην κατασκευή [8219]. Βασικό μέλημά της, είναι η προστασία της ανθρώπινης ζωής και περιουσίας από καταστροφικές φωτιές. Οι τεχνικές πυροπροστασίας εξελίχθηκαν μέσα στα χρόνια, προσπαθώντας να ανταπεξέλθουν στις ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις αντοχής των κατασκευών [9], ενώ παράλληλα, έγινε πιο αντιληπτό το μέγεθος του κινδύνου που ελλοχεύει μία πυρκαγιά. Ορισμένες ιστορικές πυρκαγιές αποτέλεσαν αφορμή ανάπτυξης νέων τεχνικών στην κατασκευή, που χρησιμοποιούνται από την εποχή της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας έως και σήμερα.

Όταν η Ρώμη καταστράφηκε σχεδόν ολοσχερώς κατά την Μεγάλη πυρκαγιά της Ρώμης (Εικόνα 1-1), το 64 μ.Χ., ο αυτοκράτορας Νέρωνας διέταξε, κατά την ανακατασκευή της, την εγκατάσταση πυράντοχων υλικών στις τοιχοποιίες των κατοικιών. Έτσι, συνειδητοποιώντας ότι κύρια αιτία της καταστροφής υπήρξε η ανεμπόδιστη εξάπλωση της πυρκαγιάς στις γειτονικές κατασκευές, έθεσε σε εφαρμογή μία πρώιμη μορφή παθητικής πυροπροστασίας [4]. Η μέθοδος αυτή, πλέον ονομαζόμενη πυροδιαμερισματοποίηση, αποτελεί έως σήμερα θεμελιώδη τεχνική αντιπυρικής προστασίας και εφαρμόζεται υποχρεωτικά, σύμφωνα με όλους τους σύγχρονους κτηριοδομικούς κανονισμούς.



Εικόνα 1-1: «Η Πυρκαγιά της Ρώμης» του Hubert Robert (www.efsyn.gr).

Άλλη μία ιστορικά κρίσιμη πυρκαγιά, αποτελεί η Μεγάλη πυρκαγιά του Λονδίνου [5], το 1666 μ.Χ. (Εικόνα 1-2). Η πυρκαγιά, που έπληξε την αγγλική πρωτεύουσα για 4 μέρες, κατέστρεψε περί το 75% της πόλης, αφήνοντας άστεγους δεκάδες χιλιάδες κατοίκους. Μετά την καταστροφή του Λονδίνου, υιοθετήθηκαν οικοδομικοί κανονισμοί, με υποχρέωση κατασκευής πυράντοχων διαχωριστικών τοίχων και εγκατάσταση ενεργητικών μέσων πυροπροστασίας, μία πρώτη μορφή εξοπλισμού πυρόσβεσης [19] [10]. Λίγο αργότερα, με αφορμή την καταστροφική αυτή πυρκαγιά, ιδρύθηκε από τον Nicholas Barbon η πρώτη ασφαλιστική εταιρεία του Λονδίνου, ίσως και του κόσμου, με όνομα "Fire Office", κάνοντας το πρώτο βήμα προς την σύγχρονη αυτή βιομηχανία δισεκατομμυρίων [2121] [22].



Εικόνα 1-2: «Η Μεγάλη Πυρκαγιά του Λονδίνου» αγνώστου καλλιτέχνη (www.moneyreview.gr) [21].

Η ανάγκη ανάπτυξης αποτελεσματικότερων μεθόδων περιορισμού της πυρκαγιάς έγινε ακόμα εντονότερη κατά την βιομηχανική επανάσταση. Λόγω των πολλαπλών εργοστασίων που κτίζονταν εκείνη την εποχή και της ολοένα αυξανόμενης ανάγκης για περισσότερους και μεγαλύτερους αποθηκευτικούς χώρους, ο κίνδυνος εκδήλωσης πυρκαγιάς ήταν πλέον μεγαλύτερος από ποτέ. Είχε γίνει ξεκάθαρο, ότι η ικανότητα ταχείας κατάσβεσης της φωτιάς, στην περίπτωση εκδήλωσής της, ήταν απαραίτητη προϋπόθεση για την διασφάλιση της ανθρώπινης ζωής και περιουσίας σε μεγάλα εργοστασιακά συγκροτήματα. Αυτό οδήγησε στην δημιουργία των πρώτων, χειροκίνητων, μέσων ενεργητικής προστασίας, με την μορφή συστήματος διάτρητων σωληνώσεων, στις οροφές των βιομηχανικών κτηρίων.

Κατά τον 19^ο και 20^ο αιώνα, η ασφάλιση κτηρίων έναντι πυρκαγιάς, έγινε συνήθης τακτική και οι μηχανικοί αναγκάστηκαν να αναζητήσουν νέους τρόπους καταστολής της, καθώς, επίσης, να αναπτύξουν καλύτερους τρόπους περιορισμού του φαινομένου. Κανονισμοί και πρότυπα σχετικά με την πυροπροστασία άρχισαν να εντάσσονται στους κτηριοδομικούς κανονισμούς των περισσότερων χωρών, δίνοντας κίνητρο σε ερευνητές να εμβαθύνουν ακόμα περισσότερο στην ανάπτυξη νέων συστημάτων αντιπυρικής προστασίας. Τα νέα συστήματα αυτά (ανιχνευτές καπνού, καταιονιστήρες ύδατος, ειδικά μονωτικά υλικά κ.α.) χρησιμοποιούνται πλέον ευρέως, και πολλές φορές υποχρεωτικά, σε παγκόσμια κλίμακα.

Συνηθέστερη μέθοδο πιστοποίησης των μέσων αντιπυρικής προστασίας, έως και σήμερα, αποτελούν οι πειραματικές δοκιμές. Μετά από πολυάριθμα πειράματα και στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων, εμπειρικές σχέσεις, τύποι και πίνακες έχουν ενταχθεί στα κανονιστικά πρότυπα μελέτης κατασκευών έναντι πυρκαγιάς, διευκολύνοντας ακόμα περισσότερο τους μηχανικούς. Ταυτόχρονα, η τεχνολογία στις μέρες μας, με την ραγδαία εξέλιξη των υπολογιστών και των λογισμικών προσομοίωσης, δίνει την δυνατότητα ελέγχου των κατασκευών έναντι πυρκαγιάς με μεγαλύτερη ακρίβεια και ευκολία από ποτέ. Ωστόσο, επειδή η πυρκαγιά είναι ένα πολυπαραγοντικό φαινόμενο, υπάρχει πάντα περιθώριο για αναθεώρηση των υφιστάμενων κανονισμών και προτύπων μετά από νέες έρευνες και πειραματικές μελέτες. Η τελευταία αναθεωρημένη έκδοση του Ευρωκώδικα 3 [15], που αφορά τον σχεδιασμό μεταλλικών κατασκευών και αναμένεται να ισχύσει τα επόμενα χρόνια, καθώς και η ανανέωση του ελληνικού κανονισμού πυροπροστασίας [7], έγιναν αφορμές για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Μεγάλη προσοχή στον σχεδιασμό έναντι πυρκαγιάς, απαιτείται για τα χαλύβδινα κτήρια και τις μεταλλικές κατασκευές γενικότερα. Ως ένα πολύ θερμικά αγωγίμο υλικό, ο χάλυβας είναι ιδιαίτερα ευπαθής στην φωτιά, συγκριτικά π.χ. με κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος, και επομένως, η συμπεριφορά του σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες χρήζει ειδικής αντιμετώπισης. Οι κανονισμοί αντιπυρικής προστασίας είναι σημαντικά πιο αυστηροί για τις μεταλλικές κατασκευές και έχουν ως αποτέλεσμα αυξημένες απαιτήσεις κατά τον σχεδιασμό. Το γεγονός αυτό, ταυτόχρονα με τις υψηλές απαιτήσεις πυραντίστασης του ελληνικού κτηριοδομικού κανονισμού και την αύξηση κόστους του χάλυβα, έχει οδηγήσει, τα τελευταία χρόνια, σε κατακόρυφη αύξηση του κόστους των μεταλλικών κατασκευών [25] [26]. Ως αποτέλεσμα, η χρήση δομικού χάλυβα καθίσταται, πλέον, σχεδόν απαγορευτική, για κατασκευή οικονομικών κατασκευών στην Ελλάδα, τουλάχιστον όσον αναφορά τις περισσότερες κατηγορίες κτηρίων. Στην εργασία αυτή, λοιπόν, θα δοθεί μεγάλη έμφαση στον οικονομικό παράγοντα του σχεδιασμού μεταλλικών κατασκευών έναντι πυρκαγιάς.

Ειδικότερα, στην παρούσα διπλωματική εργασία θα αναφερθούν, με αφορμή τα παραπάνω, τα εξής: οι γενικές αρχές πυροπροστασίας κτηρίων, διάφορες μέθοδοι προστασίας μεταλλικών κατασκευών από την πυρκαγιά (ενεργητικές και παθητικές), τα συνήθη υλικά παθητικής πυροπροστασίας και οι ιδιότητές τους, οι ισχύοντες κτηριοδομικοί κανονισμοί και πρότυπα που σχετίζονται με τον αντιπυρικό σχεδιασμό στην Ελλάδα, και τέλος, θα ακολουθήσει παράδειγμα μελέτης παθητικής πυροπροστασίας βιομηχανικού κτηρίου και οικονομοτεχνική διερεύνηση των εναλλακτικών μεθόδων παθητικής πυροπροστασίας.

1.1 Βασικές Αρχές Πυροπροστασίας

Με την έννοια «πυροπροστασία», νοείται η λήψη προληπτικών και δραστικών μέτρων, με σκοπό την άμεση αντιμετώπιση μίας πυρκαγιάς, κατά την εκδήλωσή της [2] [3]. Όπως ήδη αναφέρθηκε, κύριο μέλημα της πυροπροστασίας των κατασκευών, είναι η αποφυγή ανθρώπινου τραυματισμού, απώλειας ζωής και καταστροφής περιουσίας, κατά την διάρκεια μίας πυρκαγιάς. Στους κανονισμούς πυροπροστασίας εντάσσονται όμως, επιπλέον, οι παρακάτω στόχοι [9]:

- Αποφυγή διακοπής εργασιών, ή παρενόχλησης των κατοίκων
- Αποφυγή καταστροφής του οικοδομήματος
- Αποφυγή κατάρρευσης του κτηρίου
- Διευκόλυνση της δράσης των πυροσβεστών και διασφάλιση της ακεραιότητάς τους
- Αποφυγή καταστροφής του περιβάλλοντος

Σημειώνεται, ωστόσο, ότι η διασφάλιση όλων των παραπάνω, δεν είναι πάντοτε επιτεύξιμη για το ίδιο χρονικό διάστημα. Χαρακτηριστικά, ένα κτήριο μπορεί να μην καταρρεύσει ακόμα και μετά από

πολύωρη πυρκαγιά, ενώ η ανθρώπινη ζωή και περιουσία κινδυνεύει σημαντικά μετά από ελάχιστη έκθεση στην φωτιά.

Κανονιστικά, βασική και καθοριστική παράμετρο της πυροπροστασίας αποτελεί η έννοια του δείκτη πυραντίστασης. Ως δείκτης πυραντίστασης, ορίζεται ο χρόνος, μετρούμενος από την έναρξη της πυρκαγιάς, που απαιτείται για την αστοχία των μελών της κατασκευής. Συνήθως ο δείκτης πυραντίστασης δίνεται σε πολλαπλάσια των 15 ή των 30 λεπτών, και συμβολίζεται ως R30, R60 κ.λπ., καθορίζοντας το χρονικό διάστημα, για το οποίο η κατασκευή καλείται να διατηρήσει την αντοχή της [13]. Επίτευξη του απαιτούμενου δείκτη πυραντίστασης πραγματοποιείται, όταν για τα διάφορα δομικά (φέροντα και μη) μέλη της κατασκευής, ικανοποιούνται ορισμένα εκ των τριών ακόλουθων κριτηρίων :

- R: Ευστάθεια (load bearing function), η ικανότητα ενός μέλους να αναλάβει τα προβλεπόμενα από τον κανονισμό φορτία σε συνθήκες πυρκαγιάς
- E: Ακεραιότητα (integrity separation function), η ικανότητα ενός μέλους να παρεμποδίσει την διόδο φλόγας και θερμών αερίων, καθώς και την ανάφλεξη στην μη εκτιθέμενη σε φωτιά πλευρά του
- I: Αντίσταση στη διόδο της θερμότητας (thermal insulating separation function), η ικανότητα ενός μέλους να παρεμποδίσει την αύξηση της θερμοκρασίας στην μη εκτιθέμενη σε φωτιά πλευρά του

Ανάλογα με το είδος του δομικού στοιχείου (τοιχίο, υποσύλωμα δοκάρι κ.λπ.), απαιτείται διαφορετική επίδοση στα παραπάνω κριτήρια, και επομένως, δεν χρειάζεται να πληρούνται, και τα τρία, πάντοτε ταυτόχρονα. Το κριτήριο της ευστάθειας πρέπει να ικανοποιείται για κάθε φέρον μέλος της κατασκευής, εξαιρουμένου δευτερευόντων μελών, όπως τεγίδες και μηκίδες, τα οποία δεν δέχονται φορτία στη διάρκεια μίας πυρκαγιάς. Τα κριτήρια της ακεραιότητας και της αντίστασης στη διόδο της θερμότητας, ζητείται να ικανοποιούνται, κυρίως, για διαχωριστικά στοιχεία, όπως πλάκες, τοιχοποιίες και κουφώματα, που οριοθετούν ένα πυροδιαμέρισμα.

Εκτός της ικανοποίησης του δείκτη πυραντίστασης, που αφορά, κυρίως, την στατική μελέτη της κατασκευής, για την επίτευξη της ασφάλειας και την αποφυγή ταχείας εξάπλωσης της πυρκαγιάς, υπεισέρχονται, επίσης, οι βασικές έννοιες της πυροδιαμερισματοποίησης και της χάραξης οδεύσεων διαφυγής. Ως πυροδιαμερισματοποίηση, ορίζεται ο διαχωρισμός ενός κτηρίου σε μικρότερα κατάλληλα μονωμένα τμήματα, τα οποία καλούνται να περιορίσουν την εξάπλωση της φωτιάς σε διπλανά πυροδιαμερίσματα ή/και κατασκευές. Ο πυροδιαχωρισμός των κτηρίων αφορά, πρακτικά, την ικανοποίηση των κριτηρίων ακεραιότητας και αντίστασης στην θερμότητα. Η χάραξη των οδεύσεων διαφυγής, κομμάτι του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού, στοχεύει στην σχεδίαση ασφαλών διαδρομών εξόδου από το κτήριο, σε περίπτωση πυρκαγιάς, και είναι ένα από τα σημαντικότερα προληπτικά μέτρα για την ασφάλεια της ανθρώπινης ζωής. Εκτενέστερη αναφορά στις οδεύσεις διαφυγής γίνεται στην παράγραφο **Error! Reference source not found.** του παρόντος. Σημειώνεται ότι ο πυροδιαχωρισμός και η σωστή σχεδίαση των οδεύσεων διαφυγής μπορούν να θεωρηθούν μέθοδοι παθητικής πυροπροστασίας, όπως αναφέρεται και στην συνέχεια.

1.2 Μέθοδοι Πυροπροστασίας Μεταλλικών Κατασκευών

Με σκοπό την προστασία από τις καταστροφικές συνέπειες μίας πυρκαγιάς, χρησιμοποιείται πλήθος διαφορετικών «μεθόδων πυροπροστασίας». Σκοπός των μεθόδων ή μέτρων αυτών, είναι η αποφυγή εκδήλωσης πυρκαγιάς, η ταχεία καταστολή της και ο περιορισμός διασποράς της φωτιάς, του καπνού και των τοξικών αερίων. Οι διατιθέμενες μέθοδοι πυροπροστασίας, μπορούν να διακριθούν, έτσι, σε δύο μεγάλες υποκατηγορίες: τις ενεργητικές και τις παθητικές [3] [18] [19].

1.2.1 Ενεργητικές Μέθοδοι Πυροπροστασίας

Με τον όρο «ενεργητικές μέθοδοι πυροπροστασίας», αναφερόμαστε στα μέσα ανίχνευσης και καταστολής της φωτιάς και τους τρόπους ειδοποίησης των παρόντων κατοίκων, εργαζομένων κ.λπ. ή και της αρμόδιας υπηρεσίας (πυροσβεστική), σχετικά με την έναρξη μίας πυρκαγιάς, στο εξεταζόμενο κτήριο [3]. Συγκεκριμένα, στα μέσα ενεργητικής πυροπροστασίας μπορούμε να συμπεριλάβουμε τα κάτωθι:

- Συστήματα ανίχνευσης καπνού
- Σειρήνες και φώτα ειδοποίησης
- Χειροκίνητη ή αυτόματη αναγγελία πυρκαγιάς και ειδοποίηση της Πυροσβεστικής Υπηρεσίας
- Εγκαταστάσεις πυροσβεστικού υδροδοτικού συστήματος (πυροσβεστικοί κρουνοί, πυροσβεστικές φωλιές)
- Εγκατάσταση φορητών πυροσβεστήρων και άλλων μέσων χειροκίνητης κατάσβεσης (αντιπυρικές κουβέρτες ή άμμος)
- Αυτόματα συστήματα κατάσβεσης (καταιονισμού ύδατος, κατάκλισης με αφρό ή με σκόνες, έκκληση αδρανών αερίων)
- Φώτα σήμανσης των οδών διαφυγής

Ανάλογα με την χρήση και το μέγεθος του κτηρίου, η εγκατάσταση ενός ή παραπάνω εκ των ανωτέρω είναι υποχρεωτική για την αδειοδότηση κατασκευής και λειτουργίας του κτηρίου από την Πυροσβεστική Υπηρεσία. Η εγκατάσταση των περισσότερων ενεργητικών μέσων πυροπροστασίας υπάγεται στο αντικείμενο του ηλεκτρομηχανολογικού σχεδιασμού, και επομένως, δεν αφορά τις μελέτες πολιτικού μηχανικού.



Εικόνα 1-3: Ενεργητικά Μέσα Πυροπροστασίας (www.cityengineering.gr).

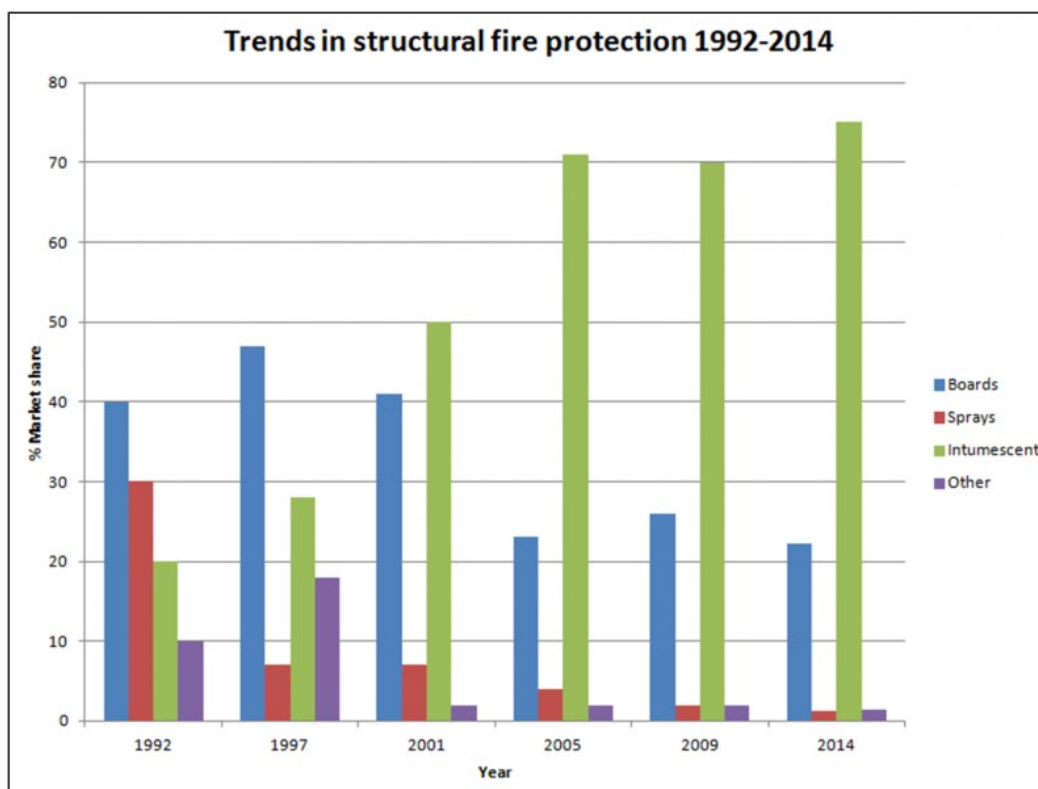
1.2.2 Παθητικές Μέθοδοι Πυροπροστασίας

Με τον όρο «παθητικές μέθοδοι πυροπροστασίας», αναφερόμαστε σε μέτρα που έχουν ληφθεί κατά τον αρχιτεκτονικό και στατικό σχεδιασμό, με σκοπό την αποφυγή διασποράς της φωτιάς, της εκλυόμενης θερμότητας και των αερίων, την διασφάλιση της αντοχής της κατασκευής και της ασφαλούς διαφυγής από το κτήριο [3] [1918]. Οι παθητικές μέθοδοι πυροπροστασίας αποτελούν «τμήματα» της κατασκευής

και δεν απαιτούν κάποια ανθρώπινη παρέμβαση ή ηλεκτρονικό σύστημα για την ενεργοποίηση και την λειτουργία τους. Όπως προαναφέρθηκε η πυροδιαμερισματοποίηση και ο σχεδιασμός των οδεύσεων διαφυγής, μπορούν να θεωρηθούν παθητικές μέθοδοι πυροπροστασίας. Πρακτικά, υλοποιούνται με την χρήση πυράντοχων κουφωμάτων μεταξύ των πυροδιαμερισμάτων, την εξασφάλιση της ακεραιότητας των κλιμακοστασίων, την εγκατάσταση πυροφραγμών στις διόδους του κτηρίου, στους αεραγωγούς και στους αναβατήρες, την πρόβλεψη κρεμαστών μονωτικών οροφών κ.α.. Βασικότερο στοιχείο της παθητικής πυροπροστασίας, και κεντρικό θέμα της εργασίας, αποτελεί ο πυροπροστατευτικός σχεδιασμός των μελών της κατασκευής. Δηλαδή, η εγκατάσταση κατάλληλων συστημάτων μόνωσης στα φέροντα δομικά μέλη του κτηρίου, με σκοπό την αποφυγή πρόωρης αστοχίας ή/και κατάρρευσής του [6]. Οι συνηθέστεροι τρόποι μόνωσης μεταλλικών μελών μπορούν να διακριθούν στις εξής κατηγορίες [16] [28]:

- Βαφή με διογκούμενα χρώματα
- Πυράντοχες μονωτικές πλάκες
- Εκτοξευόμενα επιχρίσματα
- Εύκαμπτες πυράντοχες κουβέρτες
- Επικάλυψη μελών με σκυρόδεμα

Κάθε μία από τις παραπάνω μεθόδους προσφέρεται για διαφορετικές εφαρμογές, ανάλογα με την φύση του έργου και το είδος της κατασκευής. Σημαντικό παράγοντα επιλογής του μονωτικού υλικού, αποτελεί η ευκολία της τοποθέτησης του και το προσφερόμενο τελικό αισθητικό αποτέλεσμα. Καθοριστικός παράγοντας επιλογής είναι, ωστόσο, σε συνδυασμό με τα παραπάνω, το κόστος εγκατάστασης και συντήρησής του. Όπως απεικονίζεται και στο σχήμα της Εικόνα 1-4, από τα παραπάνω, τα τρία πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα μονωτικά υλικά είναι τα διογκούμενα χρώματα, οι μονωτικές πλάκες και τα εκτοξευόμενα επιχρίσματα.



Εικόνα 1-4: Διάγραμμα απεικόνισης των συνηθέστερα χρησιμοποιούμενων μονωτικών υλικών, από το 1992 έως το 2014 (www.steelconstruction.info) [16].

Διογκούμενα χρώματα

Συνηθέστερη μέθοδος μόνωσης είναι, πλέον, η βαφή με διογκούμενα χρώματα. Οι διογκούμενες βαφές προσφέρουν με διαφορά το καλύτερο τελικό αισθητικό αποτέλεσμα, με δυνατότητα εφαρμογής στο εργοστάσιο ή επιτόπου στο έργο (Εικόνα 1-5). Η εργοστασιακή βαφή είναι η πιο συμφέρουσα οικονομικά λύση, αλλά δεν είναι πάντοτε εφικτή καθώς διατρέχεται κίνδυνος τραυματισμού του μέλους και φθοράς της βαφής κατά την μεταφορά.



(α)

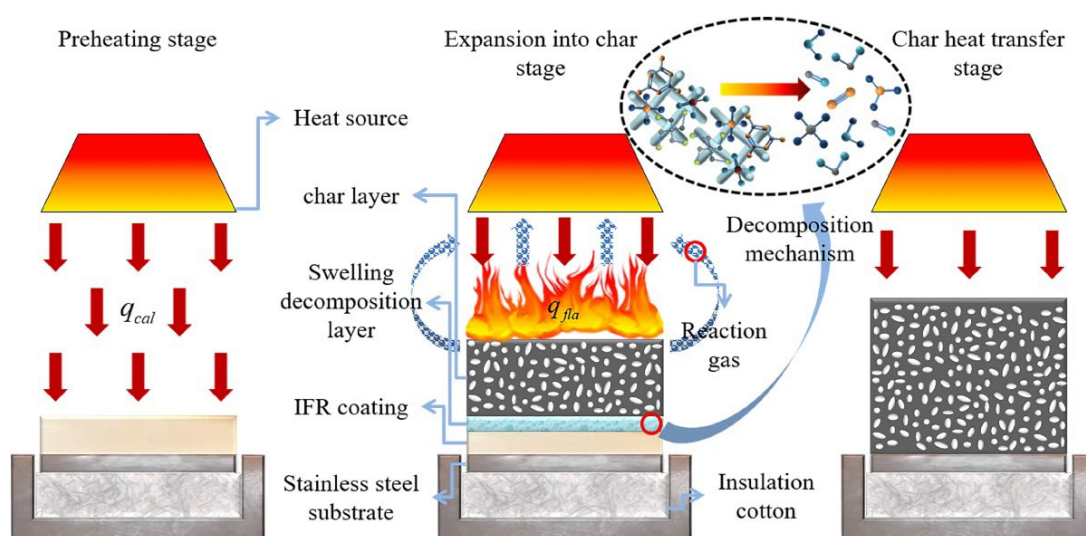


(β)

Εικόνα 1-5: (α) Βαφή μελών στο εργοστάσιο (www.steelconstruction.info) [16].

(β) Βαφή μελών επί τόπου στο έργο (theconstructor.org) [28].

Οι διογκούμενες βαφές παρασκευάζονται με κατάλληλη χημική επεξεργασία, ως συνδυασμών τριών, συνήθως, ουσιών: ενός ανόργανου οξέος, μίας πολυϋδρικής ένωσης πλούσιας σε άνθρακα και ενός παράγοντα διόγκωσης [18] [29]. Η χημική ένωση που προκύπτει παραμένει ανενεργή σε φυσιολογικές θερμοκρασίες, ενώ με την αύξηση στους 200-250 °C αρχίζει να διογκώνεται, φτάνοντας πάχη μέχρι και 100 φορές του αρχικού. Ταυτόχρονα, ένα στρώμα απανθρακωμένου πλέον υλικού, σχηματίζεται στην εκτιθέμενη επιφάνεια της βαφής, δημιουργώντας μία ολοένα και παχύτερη μονωτική στρώση. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι την πλήρη απανθράκωση της βαφής, όπου παρατηρείται και η μέγιστη μονωτική ικανότητα, η οποία, όμως, ξεκινάει σταδιακά να φθίνει. Η διαδικασία αναπαρίσταται στην Εικόνα 1-6.



Εικόνα 1-6: Διαδικασία διόγκωσης μονωτικών χρωμάτων (www.sciencedirect.com) [29].

Οι βαφές χωρίζονται σε δύο είδη: με λεπτή και με παχιά μεμβράνη (ή φιλμ). Τα χρώματα λεπτού φιλμ [11] χρησιμοποιούνται για την πυροπροστασία συνήθων κτηρίων, ενώ χρώματα με παχύ φιλμ, συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται σε παράκτιες και υπεράκτιες κατασκευές και σε βιομηχανίες υδρογονανθράκων, όπου οι απαιτήσεις είναι μεγαλύτερες. Και τα δύο είδη προσφέρονται σε ποικιλία χρωμάτων και έτσι, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ακόμη και ως η τελευταία στρώση βαφής στα μεταλλικά μέλη (Εικόνα 1-7).



Εικόνα 1-7: Μεταλλικοί φορείς περίπλοκης γεωμετρίας, προστατευόμενοι από διογκούμενες βαφές (bauforumstahl.de) [17].

Μετά την επέλαση μίας πυρκαγιάς, οι απανθρακωμένες βαφές πρέπει να αφαιρούνται και να αντικαθίστανται, διαδικασία που υλοποιείται σχετικά εύκολα και χωρίς φθορά των μεταλλικών μελών. Επίσης, επειδή τα διογκούμενα χρώματα εφαρμόζονται συνήθως με χρήση ψεκαστήρων ή πινέλων, είναι εύκολο να εφαρμοστούν σε μέλη και φορείς περίπλοκης γεωμετρίας, χωρίς ιδιαίτερη επιβάρυνση στο κόστος των εργασιών.

Ωστόσο, η χρήση διογκούμενων χρωμάτων, περιορίζεται στην περίπτωση υψηλών απαιτήσεων πυραντίστασης, καθώς, τα περισσότερα διογκούμενα χρώματα του εμπορίου, διατίθενται για χρόνους πυραντίστασης έως 90 με 120 λεπτά [17]. Σημειώνεται όμως, ότι παράγονται πλέον και βαφές, με ικανότητα αντίστασης στη φωτιά 3 και 4 ώρες, συνεπαγόμενες βέβαια, μεγάλη αύξηση στο κόστος του υλικού. Επειδή, κατά την εφαρμογή της μεθόδου, τα χρώματα βρίσκονται σε υγρή μορφή, η βαφή πρέπει να υλοποιείται σε ξεχωριστό χρόνο από τις υπόλοιπες εργασίες. Επίσης, είναι σημαντικό να αφήνεται κατάλληλο περιθώριο για να στεγνώσουν τα χρώματα, πριν την χρήση του χώρου από άλλα συνεργεία. Μετά την ολοκλήρωση της βαφής πρέπει, επιπλέον, να γίνεται έλεγχος του εφαρμοζόμενου πάχους για πιστοποίηση της τελικής αντοχής. Σε συνδυασμό με την προετοιμασία που χρειάζονται τα μέλη πριν και μετά την εφαρμογή των βαφών (καθαρισμός, στρώση ασταριού και τελική επίστρωση), της συχνής συντήρησης που απαιτείται, καθώς και το γεγονός ότι μετά από μία πυρκαγιά δεν μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν, τα διογκούμενα χρώματα είναι συχνά η πιο αντιοικονομική λύση. Ταυτόχρονα, για μεγάλες τιμές του δείκτη πυραντίστασης, το κόστος τους αυξάνεται ακόμα περισσότερο, σε σύγκριση με τα υπόλοιπα μονωτικά υλικά.

Πυράντοχες Μονωτικές Πλάκες

Δεύτερη συνηθέστερη λύση μόνωσης, μετά τα διογκούμενα χρώματα, αποτελεί η χρήση μονωτικών πλακών. Οι μονωτικές πλάκες παράγονται εργοστασιακά και προσφέρονται για άμεση τοποθέτηση, προσδίδοντας αντίσταση έως και 4 ώρες στη φωτιά [28]. Παρασκευάζονται, συνήθως, από γύψο,

τσιμέντο, περλίτη, ορυκτοβάμβακα ή άλλες ορυκτές ίνες και εμφανίζουν πολύ καλή μονωτική ικανότητα. Τα παραπάνω υλικά είναι άκαυστα, δεν εκλύουν τοξικά αέρια ή καπνό και μπορούν, υπό συνθήκες, να διατηρήσουν ικανοποιητική μονωτική ικανότητα μετά την έκθεση σε πυρκαγιά [16].

Στο εμπόριο διατίθενται δύο κατηγορίες μονωτικών πλακών: βαριές και ελαφριές. Οι βαρύτερες, και ακριβότερες, προσφέρονται για διακοσμητικό φινιρίσμα, ενώ οι ελαφρύτερες και πιο οικονομικές δεν χρησιμοποιούνται όπου υπάρχουν ιδιαίτερες αισθητικές απαιτήσεις. Γενικά, η εγκατάσταση μονωτικών πλακών δεν απαιτεί την διακοπή άλλων εργασιών και μπορεί να επιτευχθεί ακόμη και σε άβαφτα μέλη. Οι μονωτικές πλάκες παράγονται σε συγκεκριμένα πάχη, και επομένως, δεν απαιτείται κάποιος ιδιαίτερος έλεγχος μετά την εφαρμογή τους. Επίσης, εμφανίζουν καλή αντοχή σε χτυπήματα, προστατεύοντας τα μέλη από τραυματισμούς. Η εγκατάσταση, όμως, των πυράντοχων πλακών, σε αντίθεση με το κόστος προμήθειάς τους, είναι ιδιαίτερα κοστοβόρα. Για την τοποθέτηση τους, απαιτείται, πολλές φορές, η τοποθέτηση βοηθητικού σκελετού ξηρής δόμησης (ελαφριά μεταλλικά μέλη) και κοπή των πλακών στα κατάλληλα μεγέθη (Εικόνα 1-8), δύο πολύ χρονοβόρες διαδικασίες. Επίσης, εξαιτίας της τυποποιημένης γεωμετρίας στην οποία διατίθενται, ο εγκιβωτισμός μελών περίπλοκης γεωμετρίας, με μονωτικές πλάκες, μπορεί να είναι ιδιαίτερα επίπονος. Γενικά, σε σύγκριση με τις περισσότερες μεθόδους μόνωσης μεταλλικών κατασκευών, η χρήση μονωτικών πλακών, απαιτεί την πιο χρονοβόρα εργασία.



(α)



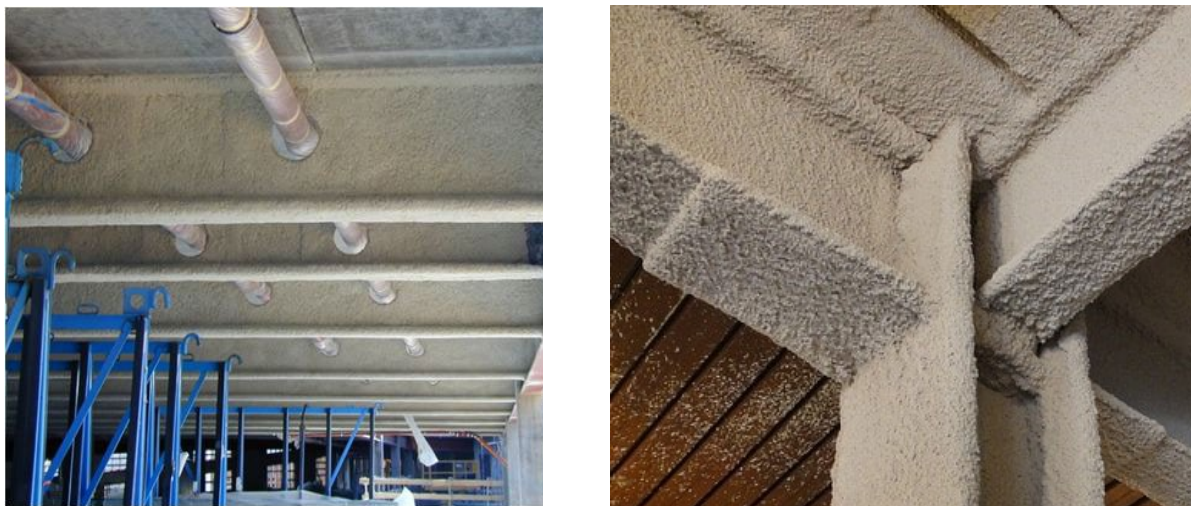
(β)

Εικόνα 1-8: (α) Σκελετός ξηρής δόμησης σε μεταλλικό μέλος, για τοποθέτηση μονωτικών πλακών. (β) Καλαίσθητο αποτέλεσμα χρήσης μονωτικών πλακών, σε μεταλλικό κτήριο (theconstructor.org) [28].

Εκτοξευόμενα Επιχρίσματα

Η χρήση εκτοξευόμενων επιχρισμάτων είναι συνήθης σε χώρους κτηρίων χωρίς ιδιαίτερες αισθητικές απαιτήσεις. Τα επιχρίσματα είναι μίγματα, έχοντας συνήθως βάση τις ορυκτές ίνες (περλίτη, βερμικουλίτη), και μπορούν να προσφέρουν πολύ καλή αντίσταση στην φωτιά (έως και 4 ώρες) [16] [28]. Όπως και οι διογκούμενες βαφές, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μόνωση μεταλλικών φορέων περίπλοκης γεωμετρίας (Εικόνα 1-9). Επίσης, είναι μία από τις φθηνότερες μεθόδους παθητικής πυροπροστασίας, καθώς το κόστος των υλικών είναι αισθητά χαμηλό. Μάλιστα, τα εκτοξευόμενα επιχρίσματα, προσφέρονται τόσο για εσωτερική, όσο και για εξωτερική χρήση.

Όμως, όπως προαναφέρθηκε, το τελικό αισθητικό αποτέλεσμα, μετά την χρήση επιχρισμάτων, δεν είναι καλό, και επομένως, δεν αποτελεί προτιμητέα λύση, στις περισσότερες περιπτώσεις. Επίσης, κατά τον ψεκασμό, το μίγμα των επιχρισμάτων βρίσκεται σε υγρή μορφή και λερώνει σημαντικά. Για τον λόγο αυτό, υπάρχουν συχνά καθυστερήσεις στις υπόλοιπες εργασίες. Τέλος, η απαιτούμενη στρώση είναι σχετικά μεγάλη, επιβαρύνοντας τα μέλη, χωρίς να προσφέρει αντοχή σε χτυπήματα, ενώ το πάχος της πρέπει να ελέγχεται μετά την εφαρμογή, με κατάλληλη μη καταστρεπτική μέθοδο.



Εικόνα 1-9: Μονωμένα μεταλλικά μέλη με εκτοξευόμενα επιχρίσματα
(www.steelconstruction.info [16], theconstructor.org [28]).

Εύκαμπτες Πυράντοχες Κουβέρτες

Η φθηνότερη, αλλά και χειρότερη αισθητικά λύση μόνωσης, είναι η χρήση εύκαμπτων πυράντοχων κουβερτών. Προσφέρεται για χρήση σε μέλη με απαίτηση πυραντίστασης έως και 4 ώρες και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε φορείς περίπλοκης γεωμετρίας [20]. Αποτελεί την φθηνότερη λύση και δεν απαιτείται διακοπή άλλων εργασιών κατά την τοποθέτηση. Στην Εικόνα 1-10: (α) Εφαρμογή συστήματος εύκαμπτων κουβερτών σε μεταλλικό δικτύωμα (www.steelconstruction.info) [16]. (β) Τελική εμφάνιση μετά την εφαρμογή www.worldscientificnews.com [20]. Εικόνα 1-10 απεικονίζεται η διαδικασία της τοποθέτησης και το τελικό οπτικό αποτέλεσμα του φορέα.



(α)



(β)

Εικόνα 1-10: (α) Εφαρμογή συστήματος εύκαμπτων κουβερτών σε μεταλλικό δικτύωμα
(www.steelconstruction.info) [16]. (β) Τελική εμφάνιση μετά την εφαρμογή (www.worldscientificnews.com) [20].

Επικάλυψη μελών με σκυρόδεμα

Παλαιότερη μέθοδος πυροπροστασίας μεταλλικών κατασκευών, είναι η επικάλυψη των μελών με σκυρόδεμα. Η μέθοδος χρησιμοποιούταν ευρέως μέχρι και την δεκαετία του 1970, καθώς οι υπόλοιπες μέθοδοι δεν είχαν ακόμη αναπτυχθεί αρκετά, ούτε παράγονταν μαζικά στις βιομηχανίες. Η προσθήκη του σκυροδέματος, εξωτερικά των μεταλλικών μελών, προσφέρει μεγάλη αύξηση στην αντοχή και προστατεύει από την έκθεση στη φωτιά, την διάβρωση και την φθορά των μελών από καιρικές ή περιβαλλοντικές συνθήκες [16]. Η τελική εμφάνιση προσομοιάζει αυτήν των συμμίκτων μελών και μπορεί να προσφέρει καλά αισθητικά αποτελέσματα.

Ωστόσο, η προσθήκη σκυροδέματος προσθέτει περιττό βάρος σε έναν μεταλλικό φορέα, κατασκευασμένο εξ' ορισμού με σκοπό να είναι ελαφρύς, και καταλαμβάνει πολύ χώρο περιμετρικά των μελών. Αποτελεί, έτσι, μία πολύ ακριβή μέθοδο πυροπροστασίας. Πλέον, χρησιμοποιείται μόνο σε πολύ ειδικές περιπτώσεις, καθώς οι αντιδιαβρωτικές και πυράντοχες βαφές, τα συστήματα μονωτικών πλακών και τα εκτοξευόμενα επιχρίσματα προσφέρουν πολύ καλύτερη αντίσταση στη φωτιά και την διάβρωση, με μηδαμινή αύξηση στο βάρος του φέροντα οργανισμού.

2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΥΠΟ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ

Για την στατική μελέτη και σχεδίαση των μεταλλικών κατασκευών σε συνθήκες πυρκαγιάς, γίνεται εφαρμογή των διατάξεων του Ευρωκώδικα 1 & 3 (prEN-1991-1-2 και prEN-1993-1-2). Οι παραπάνω καλύπτουν το κριτήριο ευστάθειας του δείκτη πυραντίστασης (R: loadbearing function).

- Ο Ευρωκώδικας 1 στο μέρος 1-2, εμπεριέχει μεθοδολογίες για τον υπολογισμό των δράσεων λόγω πυρκαγιάς χρησιμοποιώντας καμπύλες θερμοκρασίας - χρόνου.
- Ο Ευρωκώδικας 3 στο μέρος 1-2 εμπεριέχει, μεθοδολογίες και τρόπους υπολογισμού των αντοχών μεταλλικών μελών, καθώς και της αναπτυσσόμενης θερμοκρασίας αυτών, σε συνθήκες πυρκαγιάς.

Στα κείμενα του Ευρωκώδικα, αναφέρεται επανειλημμένα, πώς για τον υπολογισμό του απαιτούμενου δείκτη πυραντίστασης, καθώς και για τα υπόλοιπα μέτρα πυρασφάλειας, που απαιτούνται ανά κατηγορία κτηρίου, πρέπει να χρησιμοποιείται το Εθνικό Προσάρτημα κάθε χώρας. Σε περίπτωση που δεν υπάρχει σχετικό κανονιστικό πλαίσιο, στο Εθνικό Προσάρτημα, ενδεικτικές τιμές δίνονται στον Ευρωκώδικα. Στην Ελλάδα ο δείκτης πυραντίστασης, το μέγεθος και ο αριθμός των πυροδιαμερισμάτων, η σχεδίαση των οδεύσεων διαφυγής και άλλες κατασκευαστικές οδηγίες σχετιζόμενες με την αντιπυρική προστασία κτηρίων, καθορίζονται από το Προεδρικό Διάταγμα Π.Δ. 41/2018 (ΦΕΚ-7825-80-2018).

2.1 Ελληνικός Κανονισμός Πυροπροστασίας

Στον Κανονισμό Πυροπροστασίας (Π.Δ. 41/2018) του ελληνικού Εθνικού Προσαρτήματος, καθορίζονται, όπως προαναφέρθηκε, κατασκευαστικές διατάξεις για την προστασία των κτηρίων από την πυρκαγιά. Ο κανονισμός χωρίζεται σε δύο επιμέρους κεφάλαια: Κεφάλαιο Α', που περιέχει τις γενικές διατάξεις πυροπροστασίας, οι οποίες πρέπει να εφαρμόζονται ανεξαρτήτως, σε όλους τους τύπους κτηρίων και Κεφάλαιο Β', που περιλαμβάνει ειδικές διατάξεις, συμπληρωματικές αυτών του Κεφαλαίου Α', οι οποίες εφαρμόζονται ανάλογα με την χρήση του εκάστοτε κτηρίου. Στο Π.Δ. 41/2018 ορίζονται οι εξής χρήσεις κτηρίων: Α: Κατοικία, Β: Προσωρινή Διαμονή, Γ: Συνάθροιση Κοινού, Δ: Εκπαίδευση, Ε: Υγεία και Κοινωνική Πρόνοια, Ζ: Σωφρονισμός, Η: Εμπόριο, Θ: Γραφεία, Ι: Βιομηχανία – Βιοτεχνία, Κ: Αποθήκευση, Λ: Στάθμευση αυτοκινήτων και πρατήρια. Εκτενέστερη αναφορά, στην παρούσα διπλωματική εργασία, θα γίνει στο Κεφάλαιο Α', και ειδικότερα, στον υπολογισμό του δείκτη πυραντίστασης, των παροχών οδεύσεων διαφυγής και των εμβαδών των πυροδιαμερισμάτων.

Αρχικά, για να θεωρηθεί ότι ένα κτήριο έχει τον ζητούμενο δείκτη πυραντίστασης, δηλαδή αντοχή για ορισμένο χρονικό διάστημα σε συνθήκες πυρκαγιάς, είναι υποχρεωτικό να πληρούνται συγκεκριμένα από τα κριτήρια πυραντίστασης (ευστάθεια, ακεραιότητα, αντίσταση στη δίοδο της θερμότητας) για κάθε κατηγορία δομικού στοιχείου [7]. Τα ελάχιστα κριτήρια επίδοσης σε πυρκαγιά ανά κατηγορία δομικού μέλους, όπως ορίστηκαν στο κεφάλαιο 1 του παρόντος, δίνονται στον Πίνακας 2.1. Ο δείκτης πυραντίστασης, στην Ελλάδα, καθορίζεται από το Προεδρικό Διάταγμα ανάλογα με την χρήση του κτηρίου, καθώς και τον αριθμό υπέργειων και υπόγειων ορόφων της κατασκευής (**Error! Reference source not found.**). Ωστόσο, αν το κτήριο προσφέρεται για περισσότερες των ενός χρήσεων, ο δείκτης πυραντίστασης, λαμβάνοντας υπόψιν τις πολλαπλές χρήσεις, δίνεται από τον

. Σημειώνεται, ότι αν υπάρχει εγκατάσταση αυτομάτου συστήματος πυρόσβεσης (καταιονιστήρες), εντός του πυροδιαμερισματος, επιτρέπεται να γίνει μείωση του απαιτούμενου δείκτη πυραντίστασης κατά 60 λεπτά, με ελάχιστη τιμή τα 60 λεπτά.

Πίνακας 2.1: Ελάχιστα κριτήρια επιδόσεων ανά κατηγορία δομικών μελών (www.ggb.gr) [7].

Δομικά στοιχεία	Ελάχιστα κριτήρια επιδόσεων
Φέρουσα Τοιχοποιία (εξωτερική και εσωτερική)	REI
Εξωτερική μη φέρουσα τοιχοποιία	EI
Φέροντα κατακόρυφα στοιχεία (υποστυλώματα, τοιχεία, συστήματα πλαισίων κλπ)	R
Πυράντοχες πόρτες, παράθυρα και παραθ/φυλλα	EI
Εξωτερική μη φέρουσα τοιχοποιία, τοίχοι πυροπροστατευμένων οδεύσεων και τοίχοι πυροδιαμερισμάτων	EI
Διαχωριστικά δομικά στοιχεία ορόφων - πυροφραγμοί (Πλάκες και δοκοί)	REI
Τοίχοι κλιμακοστασίων	EI
Φέροντα στοιχεία κλιμακοστασίων	R
Αυτοφερόμενες επικαλύψεις στέγης (πάνελ κλπ)	REI

Εκτός της απαιτούμενης αντοχής των μελών υπό συνθήκες πυρκαγιάς, που καθορίζεται κυρίως από τον δείκτη πυραντίστασης, στο Π.Δ. 41/2018 δίνονται, επίσης, η απαιτούμενη παροχή των οδεύσεων διαφυγής και τα μέγιστα εμβαδά των πυροδιαμερισμάτων [7], που αφορούν την ασφαλή εκκένωση του κτηρίου και τον περιορισμό εξάπλωσης της πυρκαγιάς. Τα δύο παραπάνω αφορούν, κυρίως, τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό, μπορούν όμως να έχουν σημαντικές επιπτώσεις και στην στατική ανάλυση και επομένως αναφέρονται στο παρόν. Με τον όρο όδευση διαφυγής, νοείται η συνεχόμενη και ανεμπόδιστη διαδρομή προς ασφαλή, συνήθως, υπαίθριο χώρο, που διανύεται από ορισμένο σημείο του κτηρίου, με σκοπό την εκκένωσή του, στην περίπτωση πυρκαγιάς. Ως παροχή της όδευσης διαφυγής, ορίζεται ο αριθμός ατόμων που μπορούν να κινηθούν με ασφάλεια, ανά μονάδα πλάτους όδευσης διαφυγής, σε όλο το μήκος της όδευσης. Μονάδα πλάτους της όδευσης διαφυγής, ορίζεται το 0.6 του μέτρου. Σύμφωνα με το Εθνικό Προσάρτημα το ελάχιστο πλάτος της όδευσης, που δεν πρέπει να μειώνεται σε κανένα σημείο, καθ' όλο το μήκος της, είναι 0.7 m. Τιμές των απαιτούμενων παροχών των οδεύσεων διαφυγής φαίνονται στον **Error! Reference source not found.**. Το μέγιστο εμβαδό των πυροδιαμερισμάτων υπολογίζεται, ανάλογα με την χρήση του κτηρίου και τον αριθμό των ορόφων, όπως και ο δείκτης πυραντίστασης, και μπορεί να λαμβάνεται από τον **Error! Reference source not found.**. Συμπληρωματικοί κανόνες πυροδιαμερισματοποίησης περιέχονται στην παρ. 5 του άρθρου 6 του Π.Δ. 41/2018 (Κεφάλαιο Α').

Πίνακας 2.2: Ελάχιστοι δείκτες πυραντίστασης ανά κατηγορία κτηρίου και αριθμό ορόφων (www.ggb.gr) [7].

ΕΛΑΧΙΣΤΟΙ ΕΠΙΤΡΕΠΟΜΕΝΟΙ ΔΕΙΚΤΕΣ ΠΥΡΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ								
Κατ/ρία	Χρήση	Υποκ/ρία	Ελάχιστος δείκτης πυραντίστασης (λεπτά της ώρας)					
			Υπόγειοι όροφοι			Υπέργειοι όροφοι		
			ύψους > 10 μ. *	ύψους ≤ 10 μ. *	έως 2 ορόφ. και ≤ 5 μ. (ανώτατη στάθμη δαπέδου)	από 3 έως 6 οροφ. και ≤ 15 μ. *	από 7 έως 10 οροφ. και ≤ 27 μ. *	> 27 μ.
A	Κατοικία		90	60	30	60	90	120
B	Προσωρινή Διαμονή		90	60	30	60	90	120
Γ	Χώροι Συνάθροισης Κοινού		120	90	60	90	120	180
Δ	Εκπαίδευση		90	60	30	60	90	120
E	Υγεία και Κοινωνική Πρόνοια		120	90	60	90	120	180
Z	Σωφρονισμός		120	90	60	90	120	180
H	Εμπόριο		120	90	60	90	120	180
Θ	Γραφεία		90	60	30	60	90	120
I	Βιομηχανία - Βιοτεχνία**	Z1	120	90	60	90	120	
		Z2	180	120	90	120	180	
		Z3	240	180	90	180	240	
K	Αποθήκευση**	Z1	120	90	90	120	180	
		Z2	240	180	120	180	240	
		Z3	240		180	240		
Λ	Στάθμευση και πρατήρια υγρών καυσίμων***	Λ ₁ , Λ ₂ ανοικτά	-	-	30	60	90	
		Λ ₁ , Λ ₂ , Λ ₃ , Λ ₄ κλειστά και Λ ₄	120	90	60	90	120	180

* Αφορά στη στάθμη δαπέδου του κατώτατου ορόφου για τα υπόγεια, ή του ανώτατου ορόφου για τα υπέργεια τμήματα από τον όροφο εκκένωσης.

** Η κατηγοριοποίηση Z1, Z2 και Z3 αναλύεται στα άρθρα 9 και 10 του Κεφαλαίου Β.

*** Η κατηγοριοποίηση Λ₁, Λ₂, Λ₃ και Λ₄ αναλύεται στο άρθρο 11 του Κεφαλαίου Β.

Πίνακας 2.3: Ελάχιστοι δείκτες πυραντίστασης για κτήρια πολλαπλών χρήσεων (www.ggb.gr) [7].

ΧΡΗΣΗ	ΚΑΤΟΙΚΙΕΣ	ΠΡΟΣΩΡΙΝΗ ΔΙΑΜΟΝΗ	ΧΩΡΟΙ ΣΥΝΑΘΡΟΙΣΗΣ ΚΟΙΝΟΥ	ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ	ΥΓΕΙΑ ΚΑΙ ΚΟΙΝΩΝΙΚΗ ΠΡΟΝΟΙΑ	ΣΩΦΡΟΝΙΣΜΟΣ	ΕΜΠΟΡΙΟ	ΓΡΑΦΕΙΑ	ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ (Z1-Z2)	ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ (Z3)	ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ (Z1-Z2)	ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ (Z3)	ΣΤΑΘΜΕΥΣΗ
ΚΑΤΟΙΚΙΕΣ	-	60	120	90	120	120	120	90	120	180	120	180	120
ΠΡΟΣΩΡΙΝΗ ΔΙΑΜΟΝΗ		-	120	120	120	120	120	90	120	180	120	180	120
ΧΩΡΟΙ ΣΥΝΑΘΡΟΙΣΗΣ ΚΟΙΝΟΥ			-	120	120	120	120	60	120	180	120	180	120
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ				-	120	120	120	90	180	180	180	180	120
ΥΓΕΙΑ ΚΑΙ ΚΟΙΝΩΝΙΚΗ ΠΡΟΝΟΙΑ					-	120	120	60	120	120	120	120	120
ΣΩΦΡΟΝΙΣΜΟΣ						-	120	120	120	120	120	120	120
ΕΜΠΟΡΙΟ							-	90	120	180	120	180	120
ΓΡΑΦΕΙΑ								-	120	180	120	180	120
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ (Z1-Z2)									-	90	60	90	90
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ (Z3)										-	90	60	90
ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ (Z1-Z2)											-	90	90
ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ (Z3)												-	90
ΣΤΑΘΜΕΥΣΗ													-

Πίνακας 2.4: Παροχή οδεύσεων διαφυγής ανά μονάδα πλάτους (0,6 m) (www.ggb.gr) [7].

Κατ.	Χρήση	Οριζόντιες οδεύσεις (άτομα)	Κατακόρυφες οδεύσεις (άτομα)
A	Κατοικία	100	60
B	Προσωρινή Διαμονή	υπέργειοι όροφοι	60
		υπόγεια	30
Γ	Χώροι Συνάθροισης Κοινού	υπέργειοι όροφοι	60
		υπόγεια	30
Δ	Εκπαίδευση	υπέργειοι όροφοι	60
		υπόγεια	30
E	Υγεία και Κοινωνική Πρόνοια	50	30
Z	Σωφρονισμός	100	60
H	Εμπόριο	υπέργειοι όροφοι	60
		υπόγεια	30
Θ	Γραφεία	100	60
I	Βιομηχανία - Βιοτεχνία	100	60
K	Αποθήκευση	100	60
Λ	Στάθμευση - Πρατήρια υγρών καυσίμων	100	60

Πίνακας 2.5: Μέγιστα επιτρεπόμενα εμβαδά πυροδιαμερισμάτων (www.ggb.gr) [7].

ΜΕΓΙΣΤΟ ΕΜΒΑΔΟΝ ΠΥΡΟΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑΤΩΝ						
Κατ/ρία	Χρήση		Μέγιστο εμβαδόν πυροδιαμερισμάτων (τ.μ.)			
			Υπόγεια	Μονώροφο κτίριο	Πολυώροφο κτίριο	Προσαύξηση λόγω εγκατάστασης αυτόματου συστήματος πυρόσβεσης με νερό (καταιονισμού ύδατος)
A	Κατοικία		500	χωρίς απαίτηση	1000	2
B	Προσωρινή Διαμονή		500	2000	1000	2
Γ	Χώροι Συνάθροισης Κοινού	Γενικά	500	4000	2000	2
		Αεροδρόμια	500	4000		
		Χώροι αγωνιστικοί και θεατών σε Αθλητικές Εγκαταστάσεις	500	10000		
Δ	Εκπαίδευση		500	2000	1000	2
E	Υγεία		500	2000	1000	2
	Κοινωνική Πρόνοια		500	2000	1000	2
Z	Σωφρονισμός		500	1500	750	2
H	Εμπόριο	Γενικά	500	2000	1000	2
		Αίθρια εμπορικών κέντρων	500	4000	2000	2
Θ	Γραφεία		500	2000	1000	2
I	Βιομηχανία - Βιοτεχνία	Z1	1000	10000	3000	2
		Z2	1000	5000	2000	2
		Z3	1000	4000	1500	2
K	Αποθήκευση	Z1	1000	5000	2000	2
		Z2	750	4000	1500	2
		Z3	500	3000	1000	2
Λ	Στάθμευση - Πλυντήρια αυτοκινήτων		500	2000	1000	2

Τέλος, εκτός των παραπάνω, ο Κανονισμός Πυροπροστασίας περιλαμβάνει στα άρθρα 5 και 6 του Κεφαλαίου Α' λοιπές διατάξεις, όπως απαιτήσεις για κατασκευή ανελκυστήρων και κλιμακοστασίων πυροσβεστών, τυπικές μεθόδους πυροδιαμερισμού, ελάχιστες απαιτήσεις αντίδρασης στην φωτιά κ.α.. Στο άρθρο 7 του Κεφαλαίου Α' περιλαμβάνονται κανονισμοί για την χρήση ενεργητικών μεθόδων πυροπροστασίας, ενώ στο άρθρο 8, γίνεται αναφορά των προτύπων και των τεχνικών προδιαγραφών, που πρέπει να πληρούνται για την νόμιμη χρήση των δομικών και μη πυροπροστατευτικών υλικών. Οι ειδικές διατάξεις ανά κατηγορία χρήσης περιλαμβάνονται, όπως προαναφέρθηκε, στο Κεφάλαιο Β' και πρέπει να λαμβάνονται πάντοτε υπόψιν, ωστόσο δεν θα γίνει λεπτομερέστερη αναφορά στο παρόν κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας.

2.2 Θερμοκρασιακές Δράσεις Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 1

Πρώτο βήμα για την στατική μελέτη κατασκευών σε συνθήκες πυρκαγιάς, αποτελεί ο υπολογισμός των εντατικών μεγεθών που προκύπτουν λόγω της αυξημένης θερμοκρασίας των μελών. Ωστόσο, επειδή κάθε δομικό υλικό εμφανίζει διαφορετική μονωτική ικανότητα, πρώτο βήμα αποτελεί ο υπολογισμός της θερμοκρασίας του πυροδιαμερισματος και στη συνέχεια η εύρεση της ανεπτυγμένης θερμοκρασίας στα μέλη. Στο μέρος 1-2 του Ευρωκώδικα 1 (prEN-1991-1-2), παρατίθενται 3 εναλλακτικές μέθοδοι για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας εντός ενός πυροδιαμερισματος, καθώς και τρόποι συνδυασμού των δράσεων σε συνθήκες πυρκαγιάς, για τον τελικό έλεγχο των μελών. Η πρώτη εκ των τριών μεθόδων, περιλαμβάνει απλοποιητικούς τύπους, με μοναδικό παράγοντα τον χρόνο. Η δεύτερη εμπεριέχει, επιπρόσθετα, τις συνθήκες αερισμού, αλλά και τις ιδιότητες των υλικών πυροπροστασίας που χρησιμοποιούνται. Τέλος, η τρίτη, λαμβάνει υπόψιν, επιπλέον των παραπάνω, τις ιδιότητες των αερίων και συναρτήσεις μεταφοράς μάζας και ενέργειας εντός του πυροδιαμερισματος. Στην παρούσα εργασία θα παρουσιαστούν αναλυτικά οι δύο πρώτες, που είναι και οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες, αλλά και οι ευκολότερα εφαρμόσιμες με χρήση απλών υπολογιστικών εργαλείων.

2.2.1 Πρότυπες Καμπύλες Θερμοκρασίας – Χρόνου

Απλούστερη μέθοδος υπολογισμού της θερμοκρασίας ενός πυροδιαμερισματος, αποτελεί η χρήση των πρότυπων καμπυλών θερμοκρασίας – χρόνου [13]. Οι καμπύλες, που εκφράζονται με αναλυτικές σχέσεις, είναι 3. Κάθε μία εκ των τριών εφαρμόζεται ανάλογα με τις συνθήκες της πυρκαγιάς. Οι πρότυπες καμπύλες είναι ιδιαίτερα χρήσιμες καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κάθε κατηγορία κτηρίου, όταν δεν διατίθενται περισσότερα δεδομένα σχετικά με τον αερισμό, τα μονωτικά υλικά ή το περιεχόμενο των πυροδιαμερισμάτων του κτηρίου. Και οι τρεις σχέσεις περιγράφουν την αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα εντός ενός πυροδιαμερισματος θ_g [°C] συναρτήσει του χρόνου t [h], για ένα ιδεατό κρίσιμο σενάριο φωτιάς.

Η τυπική πρότυπη καμπύλη πυρκαγιάς (standard fire curve), που χρησιμοποιείται στις περισσότερες περιπτώσεις, περιγράφεται από την Εξ. (2-16).

$$\theta_g = 20 + 345 \cdot \log_{10}(8 \cdot t + 1) \quad (2-1)$$

Για την μελέτη εξωτερικών μελών του κτηρίου, χρησιμοποιείται η εξωτερική καμπύλη πυρκαγιάς (external fire curve), που περιγράφεται από την Εξ. (2-2).

$$\theta_g = 660 \cdot (1 - 0,687 \cdot e^{-0,32 \cdot t} - 0,313 \cdot e^{-3,8 \cdot t}) + 20 \quad (2-2)$$

Τέλος, για φωτιές σε κτήρια λόγω καύσης υδρογονανθράκων, εφαρμόζεται η καμπύλη που περιγράφεται από την Εξ. (2-3) (hydrocarbon fire curve).

$$\theta_g = 660 \cdot (1 - 0,687 \cdot e^{-0,32 \cdot t} - 0,313 \cdot e^{-3,8 \cdot t}) + 20 \quad (2-3)$$

Όπου:

- Θ_g Η θερμοκρασία των αερίων στο πυροδιαμέρισμα [°C]
- t Ο χρόνος μετρούμενος από την έναρξη της πυρκαγιάς [min]

2.2.2 Παραμετρική Καμπύλη Θερμοκρασίας – Χρόνου

Ο υπολογισμός της θερμοκρασίας του αέρα, εντός ενός πυροδιαμερίσματος, μπορεί να γίνει ακριβέστερα, συγκριτικά με τις πρότυπες καμπύλες, αν είναι γνωστά ορισμένα πρόσθετα δεδομένα για το πυροδιαμέρισμα. Χρήση της παραμετρικής καμπύλης θερμοκρασίας - χρόνου μπορεί να γίνει, ωστόσο, μόνο για πυροδιαμερίσματα μέγιστου εμβαδού 500 m² και μέγιστου ύψους 4 m [13]. Η παραμετρική καμπύλη θερμοκρασίας, σε αντίθεση με τις πρότυπες καμπύλες, περιγράφεται από δίκλαδη συνάρτηση, με ανοδικό κλάδο (φάση θέρμανσης) και πτωτικό κλάδο (φάση ψύξης).

Τρεις είναι οι βασικές παράμετροι που επηρεάζουν τον ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας και τη μέγιστη τιμή της, οι οποίες χρειάζεται να είναι γνωστές, για την χρήση της παραμετρικής καμπύλης.

- Η πυκνότητα του πυροθερμικού φορτίου: $q_{f,d}$
- Ο συντελεστής αερισμού του πυροδιαμερίσματος: O
- Και η μονωτική ικανότητα του περιβλήματός του: b

Πυκνότητα Πυροθερμικού Φορτίου

Ως πυκνότητα του πυροθερμικού φορτίου $q_{f,d}$, ορίζεται η ποσότητα ενέργειας που εκλύεται από την πλήρη καύση όλων των περιεχομένων ενός πυροδιαμερίσματος, ανά μονάδα επιφάνειας, μετρούμενη σε [MJ/m²]. Η τιμή της υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψιν τα υλικά εντός του πυροδιαμερίσματος, του κινδύνου έναρξης πυρκαγιάς, των διαθέσιμων μεθόδων ενεργητικής πυροπροστασίας και της κατηγορίας συνεπειών του κτηρίου [13]. Η διαδικασία δίνεται αναλυτικά στο Παράρτημα Ε του prEN-1991-1-2. Ενδεικτικές χαρακτηριστικές τιμές του πυροθερμικού φορτίου $q_{f,k}$ δίνονται στον

Πίνακας 2.6.

Πίνακας 2.6: Χαρακτηριστικές τιμές πυροθερμικού φορτίου [13].

Occupancy	Average	80% Fractile
Dwelling	780	948
Hospital (room)	230	280
Hotel (room)	310	377
Library, Archives	1500	1824
Densely loaded offices (open space office with limited combustible furniture, paperless office without archives)	744	905
Office	420	511
Sparsely loaded office (open space office with limited combustible furniture, paperless office without archives)	206	250

Occupancy	Average	80% Fractile
Classroom of a school	285	347
Commercial area	600	730
Theatre (cinema)	300	365
Public space (circulation areas, walkways)	100	122

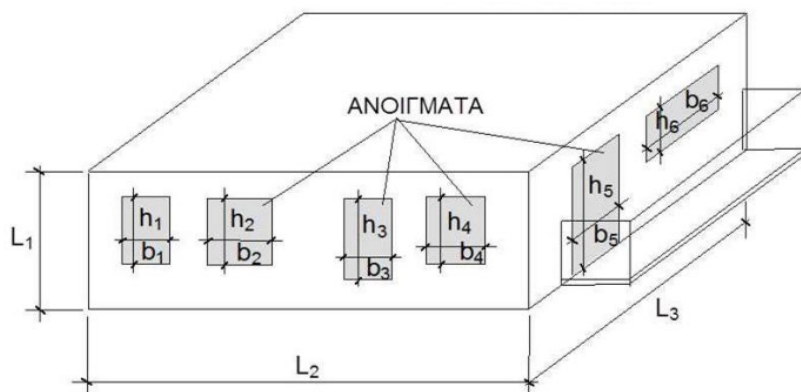
Συντελεστής Αερισμού

Ο συντελεστής αερισμού ενός πυροδιαμερίσματος, υπολογίζεται από την Εξίσωση (2-4) και εκφράζει την συνολική επιφάνεια των ανοιγμάτων προς την εξωτερική επιφάνεια του πυροδιαμερίσματος. Στην Εικόνα 2-1 δίνεται η γεωμετρία τυχαίου πυροδιαμερίσματος, για υπολογισμό του συντελεστή αερισμού του.

$$O = \frac{A_w \cdot \sqrt{h_{eq}}}{A_t} \quad (2-4)$$

Όπου:

- $A_w = \sum_1^n h_i \cdot b_i$ Η συνολική επιφάνεια ανοιγμάτων στο πυροδιαμέρισμα [m²]
- $h_{eq} = \frac{1}{A_w} \cdot \sum_1^n h_i^2 \cdot b_i$ Το μέσο ύψος των ανοιγμάτων [m]
- $A_t = 2(L_1 \cdot L_2 + L_2 \cdot L_3 + L_1 \cdot L_3)$ Εξωτερική επιφάνεια πυροδιαμερίσματος [m²]
- L_1 Ύψος πυροδιαμερίσματος [m]
- L_2 Πλάτος πυροδιαμερίσματος [m]
- L_3 Μήκος πυροδιαμερίσματος [m]
- h_i Ύψος ανοίγματος i [m]
- b_i Πλάτος ανοίγματος i [m]
- O Συντελεστής αερισμού [m^{1/2}]



Εικόνα 2-1: Απεικόνιση υπολογισμού συντελεστή αερισμού [13].

Μονωτική Ικανότητα Περιβλήματος – Συντελεστής Θερμικής Απορροφητικότητας

Τέλος, η μονωτική ικανότητα περιβλήματος του πυροδιαμερίσματος, εκφράζει την δυσκολία διέλευσης της θερμότητας μέσω αυτού. Λαμβάνεται υπόψιν, μέσω του συντελεστή θερμικής απορροφητικότητας του περιβλήματος b , που δίνεται από την Εξίσωση (2-5) αν το περίβλημα του πυροδιαμερίσματος αποτελείται από ένα υλικό.

$$b = \sqrt{(\rho \cdot c \cdot l)} \quad (2-5)$$

Αν το περίβλημα είναι πολύστρωτο, ο συντελεστής θερμικής απορροφητικότητας υπολογίζεται εκ νέου σύμφωνα με τα ακόλουθα:

- Αν $b_1 < b_2$, $b = b_1$
- Αν $b_1 > b_2$, τότε υπολογίζεται το οριακό πάχος s_{lim} για το εκτιθέμενο στη φωτιά υλικό $s_{lim} = \sqrt{\frac{3600 \cdot t_{max} \cdot \lambda_1}{c_1 \cdot \rho_1}}$ [m], όπου το t_{max} δίνεται από την Εξίσωση (2-7).

$s_1 >$	s_{lim} , $b = b_1$
$s_1 <$	s_{lim} , $b = \frac{s_1}{s_{lim}} \cdot b_1 + (1 - \frac{s_1}{s_{lim}}) \cdot b_2$

Όπου:

- s_i Το πάχος της στρώσης i [m]
- b_i Ο συντελεστής θερμικής απορροφητικότητας του στρώματος i [$J/m^2 \cdot s^{1/2} \cdot K$]
- ρ_i Η πυκνότητα του υλικού του στρώματος i [kg/m^3]
- c_i Η ειδική θερμότητα του υλικού του στρώματος i [$J/kg \cdot K$]
- λ_i Η θερμική αγωγιμότητα του υλικού του στρώματος i [$W/(m \cdot K)$]

Ο δείκτης 1 υποδηλώνει το άμεσα εκτεθειμένο σε φωτιά στρώμα υλικού, ενώ ο δείκτης 2 το αμέσως επόμενο κ.ο.κ.

Ανοδικός Κλάδος Παραμετρικής Καμπύλης

Η θερμοκρασία των αερίων, στην φάση θέρμανσης του πυροδιαμερίσματος, υπολογίζεται για γνωστό συντελεστή αερισμού και μονωτική ικανότητα περιβλήματος, από την Εξίσωση (2-6).

$$\theta_g = 20 + 1325 \cdot (1 - 0,324 \cdot e^{-0,2 \cdot t^*} - 0,204 \cdot e^{-1,7 \cdot t^*} - 0,472 \cdot e^{-19 \cdot t^*}) \quad (2-6)$$

Όπου:

- θ_g Η θερμοκρασία του αέρα στο πυροδιαμέρισμα [$^{\circ}C$]
- t^* Όπου: $t^* = t \cdot \Gamma$ [h]
- t Ο χρόνος από την έναρξη της πυρκαγιάς [h]
- Γ Αδιάστατος συντελεστής ίσος με: $\Gamma = (0/b)^2 / (0,04/1160)^2$ [-]

- b Ο συντελεστής θερμικής απορροφητικότητας, όπως υπολογίστηκε παραπάνω (σχέση (2-1), αλλά με όρια: $100 \leq b \leq 2200$) [J/m²·s^{1/2}·K]
- O Ο συντελεστής αερισμού, όπως υπολογίστηκε παραπάνω (σχέση (2-4), αλλά με όρια: $0,02 \leq b \leq 0,20$) [m^{1/2}]

Η θερμοκρασία των αερίων παρουσιάζει μέγιστη τιμή, που υπολογίζεται αναλυτικά και χρησιμοποιείται στον πτωτικό κλάδο της παραμετρικής καμπύλης. Η μέγιστη αυτή θερμοκρασία $\theta_{g,max}$ επιτυγχάνεται σε χρόνο $t^* = t^*_{max}$ σύμφωνα με τις Εξισώσεις (2-7) και (2-8).

$$t^*_{max} = t_{max} \cdot \Gamma \quad (2-7)$$

$$t_{max} = \max [0,2 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d}/O; t_{lim}] \quad (2-8)$$

Όπου:

- $q_{t,d}$ Η πυκνότητα του πυροθερμικού φορτίου σχεδιασμού ανηγμένη στην εξωτερική επιφάνεια του περιβλήματος A_t , ως εξής: $q_{t,d} = q_{f,d} \cdot A_f / A_t$, όπου $50 \leq q_{t,d} \leq 1000$ [M·J/m²]
- $q_{f,d}$ Η πυκνότητα του πυροθερμικού φορτίου σχεδιασμού, σύμφωνα με το Παράρτημα Ε του prEN-1991-1-2 [M·J/m²]
- A_f Το εμβαδό του πυροδιαμερίσματος [m²]
- A_t Η εξωτερική επιφάνεια του περιβλήματος όπως ορίστηκε για χρήση στον τύπο (2-4) [m²]

Με το t_{lim} να δίνεται ως:

$$t_{lim} \begin{cases} 25min & \text{για αργή ταχύτητα εξάπλωση της πυρκαγιάς} \\ 20min & \text{για μέτρια ταχύτητα εξάπλωση της πυρκαγιάς} \\ 15min & \text{για γρήγορη ταχύτητα εξάπλωση της πυρκαγιάς} \end{cases}$$

Αν $t_{max} = t_{lim}$ ΤΟΤΕ:

$$O = 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d} / t_{lim} \quad (2-9)$$

Και αν $O > 0,04$ και $q_{t,d} < 75$ και $b < 1160$, το Γ στην Εξίσωση (2-7) πρέπει να πολλαπλασιαστεί με τον συντελεστή k :

$$k = 1 + \left(\frac{O - 0,04}{0,04} \right) \left(\frac{q_{t,d} - 75}{75} \right) \left(\frac{1160 - b}{1160} \right) \quad (2-10)$$

Πτωτικός Κλάδος Παραμετρικής Καμπύλης

Ο πτωτικός κλάδος της παραμετρικής καμπύλης δίνεται σε μορφή τρίκλαδης συνάρτησης του χρόνου t^*_{max} [h] σύμφωνα με τις εξισώσεις (2-11), (2-12) και (2-13).

$$\theta_g = \theta_{max} - 625 \cdot (t^* - t_{max}^* \cdot x) \text{ [}^\circ\text{C]} \quad \text{για } t_{max}^* \leq 0,5 \quad (2-11)$$

$$\theta_g = \theta_{max} - 250 \cdot (3 - t_{max}^*) \cdot (t^* - t_{max}^* \cdot x) \text{ [}^\circ\text{C]} \quad \text{για } 0,5 < t_{max}^* < 2 \quad (2-12)$$

$$\theta_g = \theta_{max} - 250 \cdot (t^* - t_{max}^* \cdot x) \text{ [}^\circ\text{C]} \quad \text{για } 2 \leq t_{max}^* \quad (2-13)$$

Όπου:

$$- t^* = t\Gamma \quad [\text{h}]$$

$$- t_{max}^* = (0,2 * 10^{-3} q_{t,d}/O)\Gamma \quad [\text{h}]$$

$$- \Gamma \quad \text{Αδιάστατος συντελεστής ίσος με:} \quad [-]$$

$$\Gamma = (O/b)^2 / (0,04/1160)^2$$

$$- x \quad \text{Αδιάστατος συντελεστής που:} \quad [-]$$

$$x = 1,0 \text{ αν } t_{max} > t_{lim} \text{ και}$$

$$x = t_{lim} \Gamma / t_{max} \text{ αν } t_{max} = t_{lim}$$

2.2.3 Συνδυασμοί Δράσεων σε Συνθήκες Πυρκαγιάς

Η αύξηση της θερμοκρασίας κατά την πυρκαγιά προκαλεί έμμεσες δράσεις, λόγω παραμόρφωσης και διόγκωσης των μελών. Ο υπολογισμός τους διαφέρει για κάθε δομικό υλικό, αλλά πρέπει να λαμβάνονται πάντοτε στον σχεδιασμό, εκτός των περιπτώσεων που είναι ευνοϊκές ή αμελητέες. Οι δράσεις αυτές λόγω πυρκαγιάς, θεωρούνται τυχηματικές, και επομένως, κατά την στατική ανάλυση, πρέπει να χρησιμοποιούνται διαφορετικοί συνδυασμοί φόρτισης, από τους συνήθεις συνδυασμούς της Οριακής Κατάστασης Αστοχίας (ΟΚΑ). Καμία άλλη τυχηματική δράση δεν πρέπει να λαμβάνεται ταυτόχρονα με την πυρκαγιά (σεισμός, άνεμος). Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 1, τα φορτία σχεδιασμού πυρκαγιάς, προκύπτουν σύμφωνα με την Εξίσωση (2-14) [13]. Για όλες τις μεταβλητές δράσεις λαμβάνεται η οιονεί μόνιμη τιμή $\psi_{2,i}$ Q_i , εκτός αν στο Εθνικό Προσάρτημα επισημαίνεται να χρησιμοποιηθεί η συχνή τιμή $\psi_{1,i}$ Q_i . Οι συντελεστές για τους οιονεί μόνιμους και συχνούς συνδυασμούς ψ_2 και ψ_1 [12] των δράσεων αντίστοιχα, παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.7.

$$E_{f,i,d,t} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + A_{ind,d} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (2-14)$$

Όπου:

- $G_{k,j}$ Η τιμή της μόνιμης δράσης j
- $A_{ind,d}$ Η έμμεση δράση λόγω θερμοκρασιακής μεταβολής του μέλους
- $Q_{k,i}$ Η τιμή της μεταβλητής δράσης i
- ψ_2 Ο συντελεστής για τον οιονεί μόνιμο συνδυασμό της μεταβλητής δράσης i

Πίνακας 2.7: Συντελεστές ψ για συνδυασμό δράσεων σε συνθήκες πυρκαγιάς [12].

Action	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Imposed loads in buildings, category (see EN 1991-1-1)			
Category A : domestic, residential areas	0,7	0,5	0,3
Category B : office areas	0,7	0,5	0,3
Category C : congregation areas	0,7	0,7	0,6
Category D : shopping areas	0,7	0,7	0,6
Category E : storage areas	1,0	0,9	0,8
Category F : traffic area, vehicle weight $\leq 30\text{kN}$	0,7	0,7	0,6
Category G : traffic area, $30\text{kN} < \text{vehicle weight} \leq 160\text{kN}$	0,7	0,5	0,3
Category H : roofs	0	0	0
Snow loads on buildings (see EN 1991-1-3)*			
Finland, Iceland, Norway, Sweden	0,70	0,50	0,20
Remainder of CEN Member States, for sites located at altitude $H > 1000$ m a.s.l.	0,70	0,50	0,20
Remainder of CEN Member States, for sites located at altitude $H \leq 1000$ m a.s.l.	0,50	0,20	0
Wind loads on buildings (see EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Temperature (non-fire) in buildings (see EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0
NOTE The ψ values may be set by the National annex.			
* For countries not mentioned below, see relevant local conditions.			

Στην παράγραφο 6.3.2 του prEN 1991-1-2 δίνεται απλοποιημένη μέθοδος για τον υπολογισμό των δράσεων, σε συνθήκες πυρκαγιάς. Ο υπολογισμός γίνεται απομειώνοντας τις δράσεις σχεδιασμού του θεμελιώδους συνδυασμού φόρτισης σε φυσιολογική θερμοκρασία, με έναν μειωτικό συντελεστή n_{fi} σύμφωνα με την Εξίσωση (2-15). Ο μειωτικός συντελεστής n_{fi} υπολογίζεται από την Εξίσωση (2-16).

$$E_{fi,d,t} = E_{fi,d} = n_{fi} \cdot E_d \quad (2-15)$$

$$n_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} \cdot Q_{k,1}}{\gamma_G \cdot G_k + \gamma_{Q_1} \cdot Q_{k,1}} \quad (2-16)$$

Όπου:

- E_d Η τιμή των εντατικών μεγεθών από τον θεμελιώδη συνδυασμό δράσεων
- $E_{fi,d}$ Η τιμή των εντατικών μεγεθών σε συνθήκες πυρκαγιάς, θεωρούμενη σταθερή στον χρόνο
- γ_G Ο συντελεστής για τις μόνιμες δράσεις, συνήθως ίσος με 1.35
- γ_Q Ο συντελεστής για την τυχηματική δράση Q_1 , συνήθως ίσος με 1.5
- G_k Η χαρακτηριστική τιμή των μόνιμων δράσεων

- $Q_{k,1}$ Η χαρακτηριστική τιμή της μεταβλητής δράσης 1
- n_{fi} Ο μειωτικός συντελεστής για δράσεις σε συνθήκες πυρκαγιάς
- ψ_{fi} Ο οιονεί μόνιμος ή συχνός συντελεστής συνδυασμού τυχωματικών δράσεων

2.3 Φορτία Σχεδιασμού Πυρκαγιάς

Αφού ολοκληρωθεί ο υπολογισμός της θερμοκρασίας του πυροδιαμερίσματος, σύμφωνα με την παράγραφο **Error! Reference source not found.**, για την εύρεση των θερμοκρασιακών εντατικών μεγεθών σε μέλη μεταλλικών κατασκευών, εφαρμόζεται η μέθοδος του μέρους 1-2 του Ευρωκώδικα 3 [13]. Τα εντατικά μεγέθη σχεδιασμού της πυρκαγιάς μεταβάλλονται κατά την διάρκειά της, καθώς εξαρτώνται άμεσα από τον χρόνο έκθεσης στην φωτιά και την μονωτική ικανότητα του μέλους. Η διαδικασία υπολογισμού είναι επαναληπτική και διαφοροποιείται για μονωμένα και μη μονωμένα μέλη. Στις παραγράφους 4.7, 4.8 και 4.9 του prEN-1993-1-2 επισημαίνονται τα εξής για την ανάλυση μεταλλικών κατασκευών σε πυρκαγιά:

- Επιρροές της διαφοράς θερμοκρασίας καθ' ύψος των διατομών (gradients) και οι επιρροές της θερμικής διαστολής των μελών λόγω της ομοιόμορφης αύξησης θερμοκρασίας των διατομών πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν.
- Όλες οι δράσεις σχεδιασμού (εκτός των έμμεσων δράσεων της πυρκαγιάς) καθορίζονται για χρόνο $t = 0$ και θεωρούνται σταθερές σε όλη τη διάρκεια της πυρκαγιάς.
- Απλοποιητικά ο συντελεστής n_{fi} των εξισώσεων (2-15) και (2-16) μπορεί να λαμβάνεται ίσος με $n_{fi} = 0,65$, εξαιρουμένου φορτίσεων σε κτήρια κατηγορίας E του **Error! Reference source not found.**, όπου μπορεί να λαμβάνεται ίσος με $n_{fi} = 0,7$.
- Οι στηρίξεις και οι συνοριακές συνθήκες των μελών, που καθορίζονται για χρόνο $t = 0$, δεν θεωρείται ότι επηρεάζονται από την εξέλιξη της φωτιάς.
- Εκτός των αναπτυσσόμενων εντατικών μεγεθών, λόγω υψηλών θερμοκρασιών, κατά τον σχεδιασμό πρέπει να συνυπολογίζεται και η απομείωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του χάλυβα.

2.3.1 Θερμικές Ιδιότητες Χάλυβα

Σε κάθε βήμα της επαναληπτικής διαδικασίας, τόσο στα μονωμένα όσο και στα μη μονωμένα μέλη, πρέπει να υπολογίζονται οι ακόλουθες ποσότητες, εξαρτώμενες από την θερμοκρασία: ροή θερμότητας (heat flux) και ειδική θερμότητα χάλυβα (specific heat of steel). Οι σχέσεις υπολογισμού των δύο αυτών μεγεθών δίνονται στον Ευρωκώδικα 1 (παρ. 5 του μέρους 1-2) και στον Ευρωκώδικα 3 (παρ. 5.2.1.3 του μέρους 1-2).

Ροή Θερμότητας

Η ροή θερμότητας \dot{h}_{net} [W/m²] εκφράζει την ενέργεια που μεταφέρεται ανά μονάδα επιφάνειας σε ένα μεταλλικό μέλος και υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση (2-17).

$$\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r} \quad (2-17)$$

Όπου:

- $\dot{h}_{net,c}$ Η καθαρή ροή θερμότητας λόγω μεταγωγής

- $\dot{h}_{net,r}$ Η καθαρή ροή θερμότητας λόγω ακτινοβολίας

Η ροή θερμότητας λόγω μεταγωγής υπολογίζεται από την Εξίσωση (2-18).

$$\dot{h}_{net,c} = a_c \cdot (\theta_g - \theta_m) \quad (2-18)$$

Όπου:

- a_c Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με μεταγωγή [W/(m²·K)]
- θ_g Η θερμοκρασία των αερίων του πυροδιαμερίσματος, κοντά στο μέλος [°C]
- θ_m Η θερμοκρασία στην επιφάνεια του μέλους [°C]

Ο συντελεστής a_c παίρνει τις τιμές:

- $a_c = 25$ (W/(m²K)), όταν χρησιμοποιούνται οι πρότυπες καμπύλες των σχέσεων (2-1), (2-2)
- $a_c = 50$ (W/(m²K)), όταν χρησιμοποιείται η πρότυπη καμπύλη της σχέσης (2-3)
- $a_c = 35$ (W/(m²K)), όταν χρησιμοποιείται η παραμετρική καμπύλη θερμοκρασίας χρόνου

Η ροή θερμότητας λόγω ακτινοβολίας υπολογίζεται από την Εξίσωση (2-19).

$$\dot{h}_{net,c} = \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad (2-19)$$

Όπου:

- Φ Ο συντελεστής διαμόρφωσης που λαμβάνεται ίσος με 1,0 [-]
- ε_m Η επιφανειακή εκπομπή θερμότητας του μέλους, που πρέπει να λαμβάνεται ίση με 0,7 για τυπικούς χάλυβες άνθρακα [-]
- ε_f Η εκπομπή θερμότητας της φωτιάς, που πρέπει να λαμβάνεται ίση με 1,0 [-]
- σ Η σταθερά Stephan Boltzmann, ίση με $5,67 \cdot 10^{-8}$ W/(m²K⁴) [W/(m²·K⁴)]
- θ_r Η ενεργή θερμότητα λόγω ακτινοβολίας της φωτιάς, που μπορεί να λαμβάνεται ίση με την θερμοκρασία των αερίων του πυροδιαμερίσματος θ_g [°C]
- θ_m Η θερμοκρασία στην επιφάνεια του μέλους [°C]

Η θερμοκρασία των αερίων του πυροδιαμερίσματος θ_g μπορεί να υπολογίζεται από οποιαδήποτε Εξίσωση των παραγράφων 2.2.1 και 2.2.2 (δηλαδή μέσω των πρότυπων ή παραμετρικών καμπυλών θερμοκρασίας – χρόνου).

Ειδική Θερμότητα Χάλυβα

Ως ειδική θερμότητα του χάλυβα c_s , ορίζεται η ποσότητα της θερμότητας που απαιτείται, για να ανέβει κατά έναν βαθμό η θερμοκρασία μίας μονάδας μάζας του υλικού. Η ειδική θερμότητα είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας θ_s [°C] του χάλυβα, με τέσσερις κλάδους και δίνεται από τις εξισώσεις (2-20), (2-21), (2-22) και (2-23).

Για $600\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 735\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$c_a = 425 + 7,73 \cdot 10^{-1} \cdot \theta_a - 1,69 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_a^2 + 2,22 \cdot 10^{-6} \cdot \theta_a^3 \text{ J/kg} \cdot \text{K} \quad (2-20)$$

Για $600\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 735\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a} \text{ J/kg} \cdot \text{K} \quad (2-21)$$

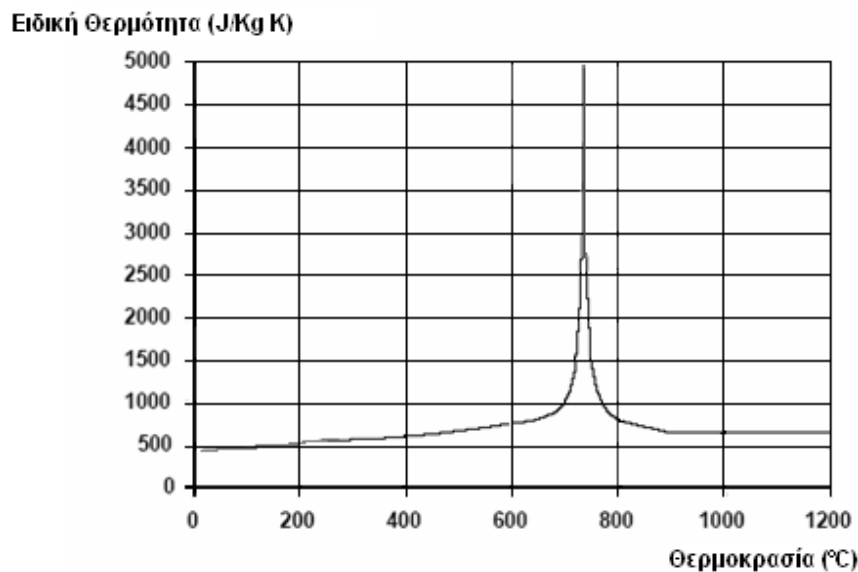
Για $735\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 900\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731} \text{ J/kg} \cdot \text{K} \quad (2-22)$$

Για $900\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$c_a = 650 \text{ J/kg} \cdot \text{K} \quad (2-23)$$

Στο διάγραμμα της Εικόνα 2-2 αναπαρίστανται γραφικά και οι τέσσερις παραπάνω σχέσεις.



Εικόνα 2-2: Ειδική Θερμότητα Χάλυβα Συναρτήσεως της Θερμοκρασίας [1].

2.3.2 Υπολογισμός Θερμοκρασίας Μη Μονωμένων Μελών

Στα μη μονωμένα μέλη, η μεταβολή της θερμοκρασίας $\Delta\theta_{a,t}$ [$^{\circ}\text{C}$] υπολογίζεται από την Εξίσωση (2-24), για χρονικό διάστημα Δt , κατά το οποίο η θερμοκρασία του περιβάλλοντος χώρου θεωρείται αμετάβλητη.

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \cdot \frac{A_m/V}{c_a \cdot \rho_a} \cdot \dot{h}_{net,d} \cdot \Delta t \quad (2-24)$$

Όπου:

- k_{sh} Διορθωτικός συντελεστής για την επιρροή της σκιάς [-]
- A_m/V Ο συντελεστής διατομής για μη μονωμένα μέλη [m^{-1}]
- A_m Η εκτιθέμενη στη φωτιά επιφάνεια του μέλους ανά τρέχον μέτρο [m^2/m]
- V Ο όγκος του μέλους ανά τρέχον μέτρο [m^3/m]
- c_a Η ειδική θερμότητα του χάλυβα (βλέπε Παρ. 2.3.1) [J/kg·K]
- ρ_a Η πυκνότητα του χάλυβα, σταθερή και ίση με 7850 kg/ m³ [kg/m^3]
- $\dot{h}_{net,d}$ Η καθαρή ροή θερμότητας τις εξίσωσης (2-17) [W/m^2]
- Δt Το χρονικό διάστημα που δεν πρέπει να λαμβάνεται μεγαλύτερο από 5 s [s]

Ο διορθωτικός συντελεστής k_{sh} για διατομές-I δίνεται από την Εξίσωση (2-25).

$$k_{sh} = 0,9 \cdot [A_m/V]_b / [A_m/V] \quad (2-25)$$

Όπου:

- $[A_m/V]_b$ Η τιμή του συντελεστή διατομής, θεωρώντας ως εκτιθέμενη στη φωτιά επιφάνεια, ένα νοητό πλαίσιο περιμετρικά της διατομής, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.8. [m^{-1}]

Πίνακας 2.8: Συντελεστής Σχήματος Νοητού Πλαισίου Διατομής [13].

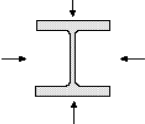
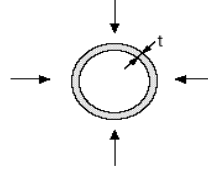
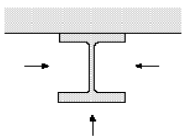
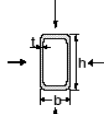
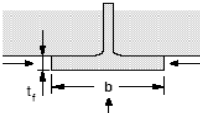
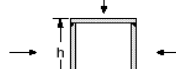
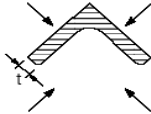
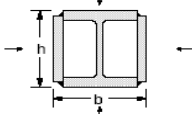
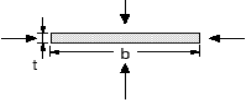
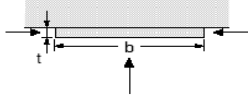
Sketch	Section factor $[A_m / V]_b$
	$\frac{2(b+h)}{\text{steel cross - section area}}$
	$\frac{b+2h}{\text{steel cross - section area}}$
	$\frac{\text{box perimeter}}{\text{steel cross - section area}}$

Ο διορθωτικός συντελεστής k_{sh} για όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις δίνεται από την Εξίσωση (2-26). Ωστόσο, για κοίλες μόνο διατομές περικυκλωμένες από την φωτιά, πρέπει να λαμβάνεται $k_{sh} = 1,0$. Αν αγνοηθεί η απομείωση λόγω σκιάς ($k_{sh} = 1,0$) η εξίσωση (2-24) δίνει συντηρητικά αποτελέσματα.

$$k_{sh} = [A_m/V]_b/[A_m/V] \quad (2-26)$$

Ο συντελεστής διατομής A_m/V είναι η σημαντικότερη παράμετρος που επηρεάζει τον ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας σε ένα μεταλλικό μέλος. Είναι μεγαλύτερος στις λεπτότοιχες διατομές, ενώ μικραίνει στις βαρύτερες και πιο συμπαγείς διατομές. Ως εκ τούτου, πολλές φορές κρίσιμα μέλη στην μελέτη της αντιπυρικής προστασίας προκύπτουν δευτερεύοντα μέλη, με υποστηρικτικό ρόλο, έναντι των κύριων φερουσών μελών. Ακόμη και μη μονωμένα μέλη μπορεί να εμφανίσουν σημαντική αντοχή στην φωτιά, αν ο συντελεστής σχήματος τους είναι επαρκώς μικρός. Για τις συνήθεις διατομές, παραδείγματα υπολογισμού του συντελεστή διατομής παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.9.

Πίνακας 2.9: Συντελεστής Διατομής Μη Μονωμένων Διατομών [13].

<p>Ανοικτή διατομή εκτεθειμένη σε πυρκαγιά και από τις τέσσερις πλευρές:</p> $\frac{A_m}{V} = \frac{\text{περίμετρος}}{\text{εμβαδόν διατομής}}$ 	<p>Σωληνωτή διατομή εκτεθειμένη σε πυρκαγιά από όλες τις πλευρές: $A_m/V = 1/t$</p> 
<p>Ανοικτή διατομή εκτεθειμένη από τρεις πλευρές:</p> $\frac{A_m}{V} = \frac{\text{επιφάνεια εκτεθειμένη στην πυρκαγιά}}{\text{εμβαδόν διατομής}}$ 	<p>Κοίλη διατομή (ή συγκολλητή κιβωτοειδής διατομή ενιαίου πάχους) εκτεθειμένη από όλες τις πλευρές:</p> <p>Εάν $t \ll b$: $A_m/V \approx 1/t$</p> 
<p>Διατομή διπλού ταυ με πέλιμα εκτεθειμένο από τρεις πλευρές:</p> $A_m/V = (b + 2t_f)/(bt_f)$ <p>Εάν $t \ll b$: $A_m/V \approx 1/t_f$</p> 	<p>Συγκολλητή κιβωτοειδής διατομή εκτεθειμένη στην πυρκαγιά από όλες τις πλευρές:</p> $\frac{A_m}{V} = \frac{2(b+h)}{\text{εμβαδόν διατομής}}$ <p>Εάν $t \ll b$: $A_m/V \approx 1/t$</p> 
<p>Διατομή γωνιακού εκτεθειμένη από όλες τις πλευρές:</p> $A_m/V = 2/t$ 	<p>Διατομή διπλού ταυ με κιβωτοειδή ενίσχυση εκτεθειμένη από όλες τις πλευρές:</p> $\frac{A_m}{V} = \frac{2(b+h)}{\text{εμβαδόν διατομής}}$ 
<p>Επίπεδο έλασμα εκτεθειμένο από όλες τις πλευρές:</p> $A_m/V = 2(b+t)/(bt)$ <p>Εάν $t \ll b$: $A_m/V \approx 2/t$</p> 	<p>Επίπεδο έλασμα εκτεθειμένο από τρεις πλευρές:</p> $A_m/V = (b + 2t)/(bt)$ <p>Εάν $t \ll b$: $A_m/V \approx 1/t$</p> 

2.3.3 Υπολογισμός Θερμοκρασίας Μονωμένων Μελών

Στα μονωμένα μέλη, η μεταβολή της θερμοκρασίας $\Delta\theta_{a,t}$ υπολογίζεται από την Εξίσωση (2-27), για χρονικό διάστημα Δt , κατά το οποίο η θερμοκρασία του περιβάλλοντος χώρου, επίσης, μεταβάλλεται.

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p \cdot A_m / V}{d_p \cdot c_a \cdot \rho_a} \cdot \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{(1 + \varphi/3)} \cdot \Delta t - (e^{\varphi/10} - 1) \cdot \Delta\theta_{g,t} \quad (2-27)$$

με

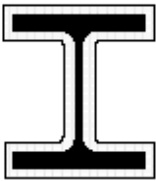
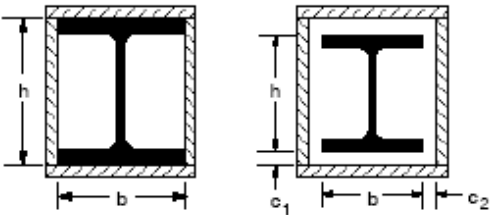
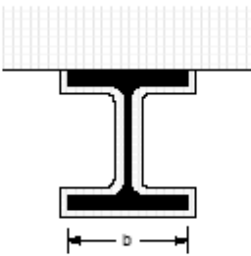
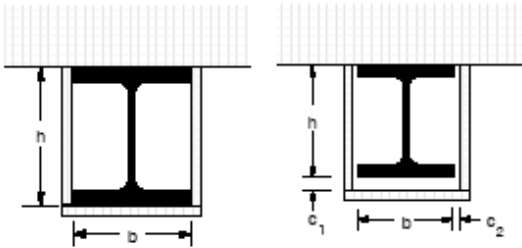
$$\varphi = \frac{c_p \cdot \rho_p}{c_a \cdot \rho_a} \cdot d_p \cdot A_p / V \quad (2-28)$$

Όπου:

- A_m/V Ο συντελεστής διατομής για μονωμένα μέλη [m⁻¹]
- A_m Η εκτιθέμενη στη φωτιά επιφάνεια του μέλους ανά τρέχον μέτρο [m²/m]
- V Ο όγκος του μέλους ανά τρέχον μέτρο [m³/m]
- c_a Η ειδική θερμότητα του χάλυβα (βλέπε Παρ. 2.3.1) [J/kg·K]
- c_p Η ανεξάρτητη από την θερμοκρασία ειδική θερμότητα του μονωτικού υλικού [J/kg·K]
- d_p Το πάχος του μονωτικού υλικού [m]
- ρ_a Η πυκνότητα του χάλυβα, σταθερή και ίση με 7850 kg/ m³ [kg/m³]
- ρ_p Η πυκνότητα του μονωτικού υλικού [kg/m³]
- $\theta_{a,t}$ Η θερμοκρασία του χάλυβα σε χρόνο t [°C]
- $\theta_{g,t}$ Η θερμοκρασία του αέρα στο πυροδιαμέρισμα σε χρόνο t [°C]
- $\Delta\theta_{g,t}$ Η μεταβολή της θερμοκρασίας του αέρα στο πυροδιαμέρισμα στο χρονικό διάστημα Δt [°C]
- λ_p Η θερμική αγωγιμότητα του μονωτικού υλικού [W/(m·K)]
- Δt Το χρονικό διάστημα που δεν πρέπει να λαμβάνεται μεγαλύτερο από 30 s [s]

Οι τιμές των c_p , ρ_p και λ_p πρέπει να πιστοποιούνται, για κάθε μονωτικό υλικό, σύμφωνα με τα σχετικά μέρη του EN 13381. Ο συντελεστής διατομής μονωμένων μελών υπολογίζεται κατ' αναλογία με αυτών των μη μονωμένων μελών. Στον Πίνακα 2.10: Συντελεστής Διατομής για Μονωμένα Μέλη παρουσιάζονται ορισμένα παραδείγματα υπολογισμού.

Πίνακας 2.10: Συντελεστής Διατομής για Μονωμένα Μέλη [13].

Σχήμα	Περιγραφή	Συντελεστής διατομής (A_p/V)
	Περιμετρικό περίβλημα σταθερού πάχους	$\frac{\text{Περίμετρος χάλυβα}}{\text{Εμβαδόν διατομής χάλυβα}}$
	Ορθογωνικός εγκιβωτισμός ενιαίου πάχους) ¹	$\frac{2(b + h)}{\text{Εμβαδόν διατομής χάλυβα}}$
	Περιμετρικό περίβλημα ενιαίου πάχους εκτεθειμένο στην πυρκαγιά από τρεις πλευρές	$\frac{\text{Περίμετρος χάλυβα} - b}{\text{εμβαδόν διατομής χάλυβα}}$
	Ορθογωνικός εγκιβωτισμός ενιαίου πάχους εκτεθειμένος από τρεις πλευρές) ¹	$\frac{2h + b}{\text{εμβαδόν διατομής χάλυβα}}$
¹ Οι αποστάσεις c_1 και c_2 δεν πρέπει κανονικά να υπερβαίνουν το $h/4$		

2.3.4 Μηχανικά Χαρακτηριστικά Χάλυβα κατά την Πυρκαγιά

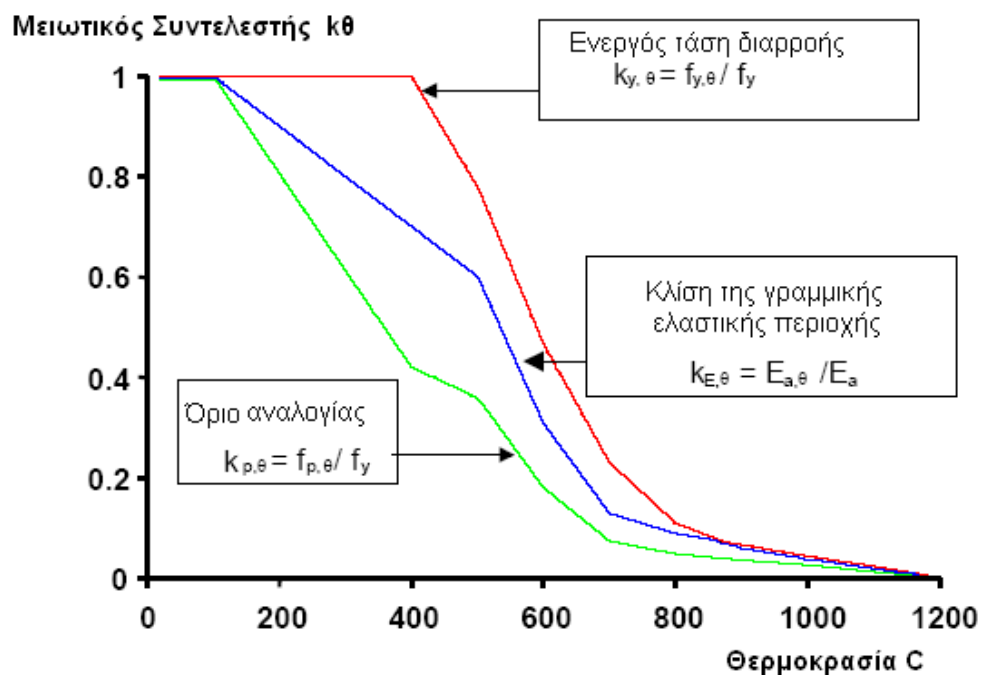
Η απομείωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του χάλυβα στις υψηλές θερμοκρασίες, αποτελεί την μεγαλύτερη επιρροή της πυρκαγιάς στα μεταλλικά κτήρια, καθιστώντας τα ιδιαίτερα ευαίσθητα στο συγκεκριμένο φαινόμενο. Έχει βρεθεί πειραματικά ότι η τάση διαρροής, το όριο αναλογίας και το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα φθίνουν, σε διαφορετικούς ρυθμούς, με την αύξηση της θερμοκρασίας και μηδενίζονται ταυτόχρονα περί τους 1200 °C. Στον Ευρωκώδικα 3, δίνεται ο Πίνακας 2.11: Μειωτικοί Συντελεστές Μηχανικών Χαρακτηριστικών Χάλυβα για Διάφορες Τιμές της Θερμοκρασίας, με τους μειωτικούς συντελεστές $k_{y,\theta}$, $k_{r,\theta}$, $k_{E,\theta}$ για τη τάση διαρροής, το όριο αναλογίας και το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα αντίστοιχα [1]. Όπως σημειώνεται, για ενδιάμεσες τιμές της θερμοκρασίας, μπορεί να εφαρμοστεί γραμμική παρεμβολή μεταξύ των τιμών του πίνακα.

Πίνακας 2.11: Μειωτικοί Συντελεστές Μηχανικών Χαρακτηριστικών Χάλυβα για Διάφορες Τιμές της Θερμοκρασίας του Χάλυβα [1].

Θερμοκρασία χάλυβα θ_a	Μειωτικοί συντελεστές σε θερμοκρασία θ_a ως προς την τιμή της f_y ή του E_a σε 20 °C		
	Μειωτικός συντελεστής (ως προς την f_y) για την ενεργό τάση διαρροής $k_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$	Μειωτικός συντελεστής (ως προς την f_y) για το όριο αναλογίας $k_{r,\theta} = f_{r,\theta}/f_y$	Μειωτικός συντελεστής (ως προς το E_a) για την κλίση της γραμμικής ελαστικής περιοχής $k_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E_a$
20 °C	1,000	1,000	1,000
100 °C	1,000	1,000	1,000
200 °C	1,000	0,807	0,900
300 °C	1,000	0,613	0,800
400 °C	1,000	0,420	0,700
500 °C	0,780	0,360	0,600
600 °C	0,470	0,180	0,310
700 °C	0,230	0,075	0,130
800 °C	0,110	0,050	0,090
900 °C	0,060	0,0375	0,0675
1000 °C	0,040	0,0250	0,0450
1100 °C	0,020	0,0125	0,0225
1200 °C	0,000	0,0000	0,0000

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για ενδιάμεσες τιμές της θερμοκρασίας του χάλυβα, μπορεί να χρησιμοποιείται γραμμική παρεμβολή.

Οι τρεις ανωτέρω συντελεστές, συναρτήσει της θερμοκρασίας, παρουσιάζονται για εποπτικούς λόγους και στην Εικόνα 2-3.



Εικόνα 2-3: Μειωτικοί Συντελεστές των Μηχανικών Χαρακτηριστικών Χάλυβα Συναρτήσει της Θερμοκρασίας του Χάλυβα [1].

Οι μειωτικοί συντελεστές $k_{y,\theta}$, $k_{p,\theta}$ και $k_{E,\theta}$ χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της αντοχής των χαλύβδινων μελών σε διάφορες εντατικές καταστάσεις.

2.4 Αντοχή Μεταλλικών Μελών σε Συνθήκες Πυρκαγιάς

Η μεθοδολογία του Ευρωκώδικα 3 για τον υπολογισμό της αντοχής των μελών κατά την πυρκαγιά διαφοροποιείται, όπως και για φυσιολογική θερμοκρασία, ανάλογα με την εντατική κατάσταση του μέλους. Εξετάζονται ξεχωριστά οι τέσσερις γενικές φορτιστικές καταστάσεις των μελών: καθαρός εφελκυσμός, καθαρή θλίψη, κάμψη και διάτμηση. Για συνδυασμούς των ανωτέρω η αντοχή υπολογίζεται από συνδυαστικές εξισώσεις, όπως στο prEN 1993-1-1:2020.

2.4.1 Κατηγοριοποίηση Διατομών

Όπως και στον συνήθη σχεδιασμό μεταλλικών κατασκευών [14], στον σχεδιασμό υπό συνθήκες πυρκαγιάς, τα θλιβόμενα ή καμπτόμενα μεταλλικά μέλη κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την λυγρηρότητά τους στις γνωστές κατηγορίες 1, 2, 3 και 4. Μοναδική διαφοροποίηση στην κατηγοριοποίηση των διατομών, αποτελεί η τιμή του ε που, σύμφωνα με το μέρος 1-2 του Ευρωκώδικα 3, λαμβάνεται από την Εξίσωση (2-29), ελαφρώς απομειωμένη, λαμβάνοντας υπόψιν τις επιρροές των αυξημένων θερμοκρασιών [15].

$$\varepsilon = 0,85 \cdot \sqrt{235/f_y} \quad (2-29)$$

Όπου:

- f_y Η τάση διαρροής το χάλυβα στους 20 °C [MPa]

Η κατηγοριοποίηση πραγματοποιείται όπως και στο prEN 1993-1-1:2020, σύμφωνα με τους Πίνακες 2.12, Πίνακας 2.13, Πίνακας 2.14 και Πίνακας 2.15.

Πίνακας 2.12: Κατάταξη Εσωτερικών Ελασμάτων [14].

Εσωτερικά θλιβόμενα τμήματα (α)						
				Άξονας κάμψης		
				Άξονας Κάμψης		
Κατηγορία	Τμήμα που υπόκειται σε κάμψη	Τμήμα που υπόκειται σε θλίψη	Τμήμα που υπόκειται σε κάμψη και θλίψη			
Κατανομή τάσεων στα τμήματα (θλίψη θετική)						
1	$c/t \leq 72 \cdot \epsilon$	$c/t \leq 28 \cdot \epsilon$	όταν $a > 0,5$: $c/t \leq \frac{126 \cdot \epsilon}{5,5 \cdot a - 1}$ όταν $a \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{36 \cdot \epsilon}{a}$			
2	$c/t \leq 83 \cdot \epsilon$	$c/t \leq 34 \cdot \epsilon$	όταν $a > 0,5$: $c/t \leq \frac{188 \cdot \epsilon}{6,53 \cdot a - 1}$ όταν $a \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{41,5 \cdot \epsilon}{a}$			
Κατανομή τάσεων στα τμήματα (θλίψη θετική)						
3	$c/t \leq 121 \cdot \epsilon$	$c/t \leq 38 \cdot \epsilon$	$\psi > -1$: $c/t \leq \frac{38 \cdot \epsilon}{0,608 + 0,343 \cdot \psi + 0,049 \cdot \psi^2}$ $\psi \leq -1^{(β)}$: $c/t \leq 60,5 \cdot \epsilon \cdot (1 - \psi)$			
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

(α) Για κοίλες ορθογωνικές διατομές λαμβάνεται: $c = b - 3 \cdot t$ ή $c = h - 3 \cdot t$, ανάλογα τον άξονα κάμψης.

(β) Η τιμή $\psi \leq -1$ και η θλιπτική τάση $\sigma_{com,Ed} = f_y$ εφαρμόζεται όπου η εφελκυστική παραμόρφωση $\epsilon_k > f_y/E$

Πίνακας 2.13: Κατηγοριοποίηση Εξωτερικών Ελασμάτων [14].

Προεξέχοντα πέλματα						
Ελατές διατομές			Συγκολλητές διατομές			
Κατηγορία	Τμήμα που υπόκειται σε θλίψη	Τμήμα που υπόκειται σε κάμψη και θλίψη				
		Άκρο σε θλίψη		Άκρο σε εφελκυσμό		
Κατανομή τάσεων στα τμήματα (θλίψη θετική)						
1	$c/t \leq 9 \cdot \epsilon$	$c/t \leq \frac{9 \cdot \epsilon}{a}$	$c/t \leq \frac{9 \cdot \epsilon}{a \cdot \sqrt{a}}$			
2	$c/t \leq 10 \cdot \epsilon$	$c/t \leq \frac{10 \cdot \epsilon}{a}$	$c/t \leq \frac{10 \cdot \epsilon}{a \cdot \sqrt{a}}$			
Κατανομή τάσεων στα τμήματα (θλίψη θετική)						
3	$c/t \leq 14 \cdot \epsilon$	$c/t \leq 21 \cdot \epsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}$ Για k_σ βλέπε EN 1993-1-5				
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

Πίνακας 2.14: Κατηγοριοποίηση Γωνιακών Ελασμάτων [14].

Γωνιακά	
Αναφορά επίσης στα "Προεξέχοντα πέλματα" (βλέπε Πίν. 5.2β)	
	Δεν ισχύει για γωνιακά σε συνεχή επαφή με άλλα στοιχεία
Κατηγορία	Διατομή σε θλίψη
Κατανομή τάσεων στη διατομή (θλίψη θετική)	
3	$h/t \leq 15 \cdot \epsilon$ και $\frac{b+h}{2 \cdot t} \leq 11,5 \cdot \epsilon$

Πίνακας 2.15: Κατηγοριοποίηση Κοίλων Διατομών [14].

Κοίλες κυκλικές και ελλειπτικές διατομές						
Κατηγορία	Διατομή σε θλίψη	Διατομή σε κάμψη	Διατομή σε κάμψη και θλίψη			
1	$d_e / t \leq 50 \cdot \epsilon^2$	$d_e / t \leq 50 \cdot \epsilon^2$	$d_e / t \leq 50 \cdot \epsilon^2$			
2	$d_e / t \leq 70 \cdot \epsilon^2$	$d_e / t \leq 70 \cdot \epsilon^2$	$d_e / t \leq 70 \cdot \epsilon^2$			
3	$d_e / t \leq 90 \cdot \epsilon^2$	$d_e / t \leq 140 \cdot \epsilon^2$	$d_e / t \leq 2520 \cdot \epsilon^2 / (5 \cdot \psi + 23)$			
ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ: Για διατομές κατηγορίας 4 βλέπε EN 1993-1-6.						
Για κυκλικές διατομές λαμβάνεται $d_e = d$.						
Για ελλειπτικές διατομές ισχύουν ειδικές διατάξεις. Για θλίψη, συντηρητικά λαμβάνεται $d_e = h^2/b$.						
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71
	ϵ^2	1,00	0,85	0,66	0,56	0,51

2.4.2 Αντοχή σε Εφελκυσμό

Η αντοχή εφελκόμενων μελών $N_{fi,\theta,Rd}$ μπορεί να υπολογίζεται θεωρώντας ομοιόμορφη θερμοκρασία θ_a καθ' ύψος της διατομής, ίση με την μέγιστη θερμοκρασία $\theta_{a,max}$ στο μέλος, σύμφωνα με την Εξίσωση (2-30) [15].

$$N_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} \cdot N_{t,Rd} \cdot [\gamma_{M,0}/\gamma_{M,fi}] \quad (2-30)$$

Όπου:

- $k_{y,\theta}$ Ο μειωτικός συντελεστής για την τάση διαρροής του Πίνακας 2.11
- $N_{t,Rd}$ Η τιμή της εφελκυστικής αντοχής του μέλους ίση με $N_{pl,Rd}$ όπως υπολογίζεται στον συνήθη σχεδιασμό μεταλλικών κατασκευών (prEN 1993-1-1:2020)
- $\gamma_{M,0}$ Συντελεστής ασφαλείας για κτήρια ίσος με 1,0
- $\gamma_{M,fi}$ Συντελεστής ασφαλείας για πυρκαγιά ίσος με 1,0

2.4.3 Αντοχή σε Θλίψη

Η αντοχή σε καμπτικό λυγισμό θλιβόμενων μελών $N_{b,fi,t,Rd}$ υπολογίζεται σε χρόνο t για ομοιόμορφη θερμοκρασία θ_a , ίση με την μέγιστη θερμοκρασία του μέλους, καθ' ύψος της διατομής από την Εξίσωση (2-31) για διατομές κατηγορίας 1,2 και 3 και από την Εξίσωση (2-32) για διατομές κατηγορίας 4 [15].

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y / \gamma_{M,fi} \quad (2-31)$$

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} \cdot A_{eff} \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y / \gamma_{M,fi} \quad (2-32)$$

με

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_{\theta} + \sqrt{\varphi_{\theta}^2 - \bar{\lambda}_{\theta}^2}} \quad (2-33)$$

$$\varphi_{\theta} = 0,5 \cdot (1 + \alpha \cdot \bar{\lambda}_{\theta} + \bar{\lambda}_{\theta}^2) \quad (2-34)$$

$$\alpha = 0,65 \cdot \sqrt{235/f_y} \quad (2-35)$$

$$\bar{\lambda}_{\theta} = \bar{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} \quad (2-36)$$

για διατομές κατηγορίας 1,2 και 3:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} \quad (2-37)$$

ενώ για διατομές κατηγορίας 4:

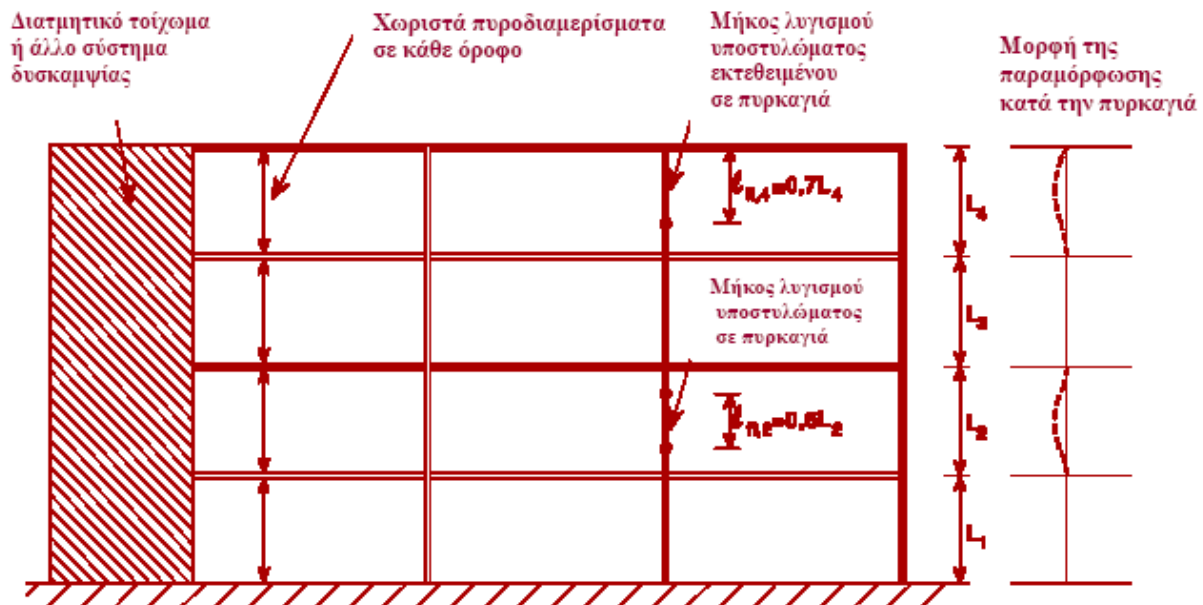
$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_y}{N_{cr}}} \quad (2-38)$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_{cr}^2} \quad (2-39)$$

Όπου:

- $k_{y,\theta}$ Ο μειωτικός συντελεστής για την τάση διαρροής του Πίνακας 2.11
- $k_{E,\theta}$ Ο μειωτικός συντελεστής για το μέτρο ελαστικότητας του Πίνακας 2.11
- $\gamma_{M,\theta}$ Συντελεστής ασφαλείας για πυρκαγιά ίσος με 1,0
- f_y Το όριο διαρροής για φυσιολογική θερμοκρασία σε MPa
- E Το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα για φυσιολογική θερμοκρασία σε MPa
- I Η ροπή αδράνειας για κάμψη περί τον εξεταζόμενο άξονα / διεύθυνση λυγισμού
- A_{eff} Το ενεργό εμβαδό της διατομής για διατομές κατηγορίας 4
- L_{cr} Το κρίσιμο μήκος λυγισμού του μέλους στην εξεταζόμενη διεύθυνση λυγισμού

Η τελική αντοχή θλιβόμενων μελών σε καμπτικό λυγισμό προκύπτει για χ_{fi} ίσο με το ελάχιστο των $\chi_{y,fi}$ και $\chi_{z,fi}$, για λυγισμό περί των δύο αξόνων της διατομής. Το κρίσιμο μήκος λυγισμού L_{cr} υπολογίζεται όπως και για φυσιολογική θερμοκρασία κατά τα γνωστά. Συγκεκριμένα για αμετάθετα πλαίσια, σε πολυώροφα κτήρια, όπου κάθε όροφος ανήκει σε ξεχωριστό πυροδιαμέρισμα, το κρίσιμο μήκος λυγισμού συνεχών υποστυλωμάτων μπορεί να ληφθεί ως $0,5 \cdot L$ σε ενδιάμεσους ορόφους και $0,7 \cdot L$ στον υψηλότερο όροφο. Όπου L είναι το καθαρό ύψος του ορόφου [14].



Εικόνα 2-4: Κρίσιμα Μήκη Λυγισμού Υποστυλωμάτων σε Πολυώροφα Αμετάθετα Πλαίσια [1].

2.4.4 Αντοχή σε Κάμψη

Στο παρόν, θα αναφερθεί μόνο ο υπολογισμός της αντοχής καμπτόμενων μελών διατομών κατηγορίας 1, 2 και 3, που αφορούν τις συνήθεις μεταλλικές κατασκευές. Διατομές κατηγορίας 4 δεν χρησιμοποιούνται συχνά στον φέροντα οργανισμό οικοδομικών έργων, παρά μόνο σε ελαφρές μεταλλικές κατασκευές, χαμηλών απαιτήσεων. Η αντοχή σε ροπή διατομών κατηγορίας 1, 2 και 3 $M_{fi,t,Rd}$ υπολογίζεται από την Εξίσωση (2-40) [15].

$$M_{fi,t,Rd} = k_{y,\theta} \cdot [\gamma_{M,0}/\gamma_{M,fi}] \cdot M_{Rk}/(\kappa_1 \cdot \kappa_2) \quad \text{αλλά} \quad M_{fi,t,Rd} \leq M_{Rk} \quad (2-40)$$

Όπου:

- $k_{y,\theta}$ Ο μειωτικός συντελεστής για την τάση διαρροής του Πίνακα 2.11, υπολογισμένος για την μέγιστη θερμοκρασία στη διατομή
- $\gamma_{M,0}$ Συντελεστής ασφαλείας για κτήρια ίσος με 1,0
- $\gamma_{M,fi}$ Συντελεστής ασφαλείας για πυρκαγιά ίσος με 1,0
- M_{Rk} Η πλαστική ροπή αντοχής $M_{pl,rd}$ για διατομές κατηγορίας 1 & 2 ή η ελαστική ροπή αντοχής $M_{el,rd}$ για διατομές κατηγορίας 3, με κατάλληλη απομείωση για την συνεισφορά της τέννουσας, όπως υπολογίζεται κατά τον συνήθη σχεδιασμό μεταλλικών κατασκευών (prEN 1993-1-1:2020)

- k_1 Συντελεστής προσαρμογής για ανομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας στην διατομή
- k_2 Συντελεστής προσαρμογής για ανομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας στο μέλος

Ο συντελεστής προσαρμογής ανομοιόμορφης κατανομής της θερμοκρασίας στην διατομή k_1 λαμβάνεται ως εξής:

- $k_1 = 1,0$ για μέλη εκτεθειμένα σε φωτιά και στις 4 πλευρές
- $k_1 = 0,85$ για μη μονωμένα μέλη εκτεθειμένα σε φωτιά στις 3 πλευρές με σύμμικτη πλάκα η πλάκα σκυροδέματος στην 4^η
- $k_1 = 0,70$ για μονωμένα μέλη εκτεθειμένα σε φωτιά στις 3 πλευρές με σύμμικτη πλάκα η πλάκα σκυροδέματος στην 4^η

Ο συντελεστής προσαρμογής ανομοιόμορφης κατανομής της θερμοκρασίας στο μέλος k_2 λαμβάνεται ως εξής:

- $k_2 = 0,85$ όταν υπολογίζεται η ροπή αντοχής σε στηρίξεις στατικώς ανεξάρτητων δοκών
- $k_2 = 1,0$ σε όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις

Όσον αναφορά μη πλευρικά εξασφαλισμένα μέλη με διατομές κατηγορίας 1, 2 και 3, υποβαλλόμενα σε κάμψη, ο υπολογισμός της ροπής αντοχής σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό $M_{b,fi,t,Rd}$ γίνεται με χρήση της Εξίσωσης (2-41).

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT,fi} \cdot W_{Rk,y} \cdot k_{y,\theta,com} \cdot f_y / \gamma_{M,fi} \quad (2-41)$$

με

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\varphi_{LT,\theta,com} + \sqrt{\varphi_{LT,\theta,com}^2 - \bar{\lambda}_{LT,\theta,com}^2}} \quad (2-42)$$

$$\varphi_{LT,\theta,com} = 0,5 \cdot (1 + \alpha_{LT} \cdot \bar{\lambda}_{LT,\theta,com} + \bar{\lambda}_{LT,\theta,com}^2) \quad (2-43)$$

$$\alpha_{LT} = 0,65 \cdot \sqrt{235/f_y} \quad (2-44)$$

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com} = \bar{\lambda}_{LT} \cdot \sqrt{\frac{k_{y,\theta,com}}{k_{E,\theta,com}}} \quad (2-45)$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{Rk,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} \quad (2-46)$$

Όπου:

- $k_{y,\theta,com}$ Ο μειωτικός συντελεστής για την τάση διαρροής του Πίνακας 2.11 του θλιβόμενου πέλματος της διατομής
- $k_{E,\theta,com}$ Ο μειωτικός συντελεστής για το μέτρο ελαστικότητας του Πίνακας 2.11 του θλιβόμενου πέλματος της διατομής
- $\gamma_{M,fi}$ Συντελεστής ασφαλείας για πυρκαγιά ίσος με 1,0
- f_y Το όριο διαρροής για φυσιολογική θερμοκρασία σε ΜΡα
- $W_{Rk,y}$ Η πλαστική ροπή αντίστασης της διατομής W_{pl} για διατομές κατηγορίας 1 & 2 ή η ελαστική ροπή αντίστασης της διατομής W_{el} για διατομές κατηγορίας 3
- M_{cr} Η κρίσιμη ελαστική ροπή για στρεπτοκαμπτικό λυγισμό, όπως υπολογίζεται και στον συνήθη σχεδιασμό μεταλλικών κατασκευών (prEN 1993-1-1:2020)

2.4.5 Αντοχή σε Διάτμηση

Η αντοχή σε τέμνουσα διατομών κατηγορίας 1, 2 και 3 υπολογίζεται από την Εξίσωση (2-47) [15].

$$V_{fi,t,Rd} = k_{y,\theta,web} \cdot V_{c,Rd} \cdot [\gamma_{M,0}/\gamma_{M,fi}] \quad (2-47)$$

Όπου:

- $k_{y,\theta,web}$ Ο μειωτικός συντελεστής για την τάση διαρροής του Πίνακας 2.11, για την θερμοκρασία του κορμού
- $V_{c,Rd}$ Η τιμή της αντοχής σε τέμνουσα της διατομής $V_{pl,Rd}$ όπως υπολογίζεται στον συνήθη σχεδιασμό μεταλλικών κατασκευών (prEN 1993-1-1:2020)
- $\gamma_{M,0}$ Συντελεστής ασφαλείας για κτήρια ίσος με 1,0
- $\gamma_{M,fi}$ Συντελεστής ασφαλείας για πυρκαγιά ίσος με 1,0

2.4.6 Αντοχή σε Συνδυασμό Κάμψης – Αξονική Δύναμη

Στις περιπτώσεις συνδυασμένης κάμψης – αξονικής δύναμης, η επάρκεια του μέλους υπό έλεγχο πιστοποιείται όταν επαληθεύονται, ταυτόχρονα, οι Εξισώσεις (2-48) και (2-49).

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{min,fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + k_y \frac{M_{y,fi,Ed}}{W_{c,y} \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + k_z \frac{M_{z,fi,Ed}}{W_{c,z} \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 1,0 \quad (2-48)$$

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + k_{LT} \frac{M_{y,fi,Ed}}{\chi_{LT,fi} \cdot W_{c,y} \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + k_z \frac{M_{z,fi,Ed}}{W_{c,z} \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 1,0 \quad (2-49)$$

Όπου:

- $k_{y,\theta}$ Ο μειωτικός συντελεστής για την τάση διαρροής του Πίνακας 2.11, για την μέγιστη θερμοκρασία στο μέλος
- $N_{fi,Ed}$ Η δρώσα αξονική δύναμη στο μέλος
- $M_{y,fi,Ed}$ Η δρώσα ροπή περί τον ισχυρό άξονα της διατομής
- $M_{z,fi,Ed}$ Η δρώσα ροπή περί τον ασθενή άξονα της διατομής
- $\gamma_{M,fi}$ Συντελεστής ασφαλείας για πυρκαγιά ίσος με 1,0
- A Το εμβαδό της διατομής
- $W_{c,y}$ Η πλαστική ροπή αντίστασης του ισχυρού άξονα της διατομής $W_{pl,y}$ για διατομές κατηγορίας 1 & 2 ή η ελαστική ροπή αντίστασης της διατομής $W_{el,y}$ για διατομές κατηγορίας 3
- $W_{c,z}$ Η πλαστική ροπή αντίστασης του ασθενή άξονα της διατομής $W_{pl,z}$ για διατομές κατηγορίας 1 & 2 ή η ελαστική ροπή αντίστασης της διατομής $W_{el,z}$ για διατομές κατηγορίας 3
- f_y Το όριο διαρροής του χάλυβα σε MPa
- $\chi_{LT,fi}$ Ο μειωτικός συντελεστής στρεπτοκαμπτικού λυγισμού της Εξίσωσης (2-42)
- $\chi_{min,fi}$ Ο ελάχιστος εκ των δύο μειωτικών συντελεστών καμπτικού λυγισμού $\chi_{y,fi}$ και $\chi_{z,fi}$ της Εξίσωσης (2-33)
- $\chi_{z,fi}$ Ο μειωτικός συντελεστής καμπτικού λυγισμού περί τον ασθενή άξονα της διατομής από την Εξίσωση (2-33)

Οι συντελεστές k_{LT} , k_y και k_z υπολογίζονται από τις Εξισώσεις (2-50), (2-52) και (2-54).

$$k_{LT} = 1 - \frac{\mu_{LT} \cdot N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 1,0 \quad (2-50)$$

$$\mu_{LT} = 0,15 \cdot \bar{\lambda}_{z,\theta} \cdot \beta_{M,LT} - 0,15 \leq 0,9 \quad (2-51)$$

$$k_y = 1 - \frac{\mu_y \cdot N_{fi,Ed}}{\chi_{y,fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 3,0 \quad (2-52)$$

$$\mu_y = \min [(2 \cdot \beta_{M,y} - 5) \cdot \bar{\lambda}_{y,\theta} + 0,44 \cdot \beta_{M,y} + 0,29; 0,8] \quad \text{με} \quad \bar{\lambda}_{y,20^\circ\text{C}} \leq 1,1 \quad (2-53)$$

$$k_z = 1 - \frac{\mu_z \cdot N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 3,0 \quad (2-54)$$

$$\mu_z = \min [(1,2 \cdot \beta_{M,z} - 3) \cdot \bar{\lambda}_{z,\theta} + 0,71 \cdot \beta_{M,z} + 0,29; 0,8] \quad (2-55)$$

Οι συντελεστές ισοδύναμης ομοιόμορφης ροπής $\beta_{M,LT}$, $\beta_{M,y}$ και $\beta_{M,z}$, υπολογίζονται ανάλογα με την μορφή του διαγράμματος ροπής, μεταξύ των πλευρικών εξασφαλίσεων του εξεταζόμενου μέλους, σύμφωνα με τον Πίνακα 2.16, ως εξής:

Συντελεστής Ροπής	Άξονας Κάμψης	Διεύθυνση Πλευρικής Εξασφάλισης
$\beta_{M,y}$	γ-γ	z-z
$\beta_{M,z}$	z-z	γ-γ
$\beta_{M,LT}$	γ-γ	γ-γ

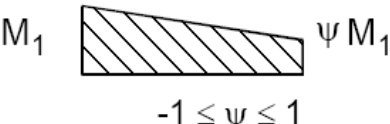
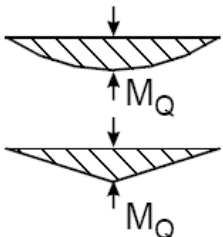
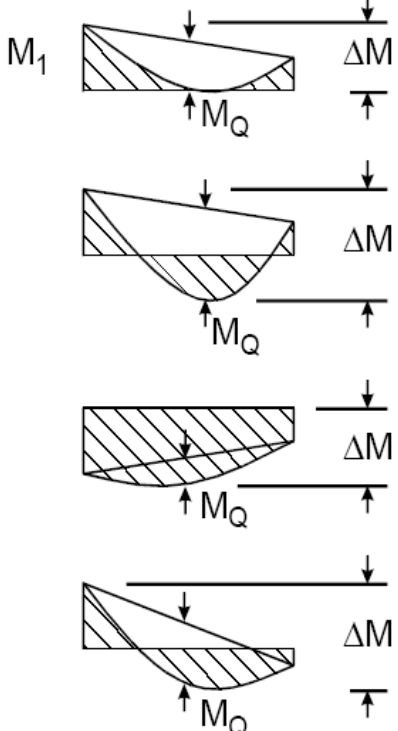
2.4.7 Αντοχή Συνδέσεων

Τέλος, κατά την μελέτη μεταλλικών κατασκευών σε συνθήκες πυρκαγιάς, στο μέρος 1-2 του Ευρωκώδικα 3 [15], αναφέρεται ότι οι συνδέσεις (κοχλιωτές και συγκολλητές), μπορούν να απαλλάσσονται από λεπτομερή έλεγχο αν ισχύουν οι ακόλουθες προϋποθέσεις:

- Η θερμική αντίσταση της σύνδεσης (d_f / λ_f)_c είναι ίση ή μεγαλύτερη της θερμικής αντίστασης όλων των συνδεδεμένων μελών (d_f / λ_f)_m, όπου:
 - d_f Το πάχος του μονωτικού υλικού ($d_f = 0$ για μη μονωμένα μέλη)
 - λ_f Η θερμική αγωγιμότητα του μονωτικού υλικού
- Ο βαθμός αξιοποίησης της σύνδεσης είναι ίσος ή μικρότερος του μέγιστου βαθμού αξιοποίησης όλων των συνδεδεμένων μελών.

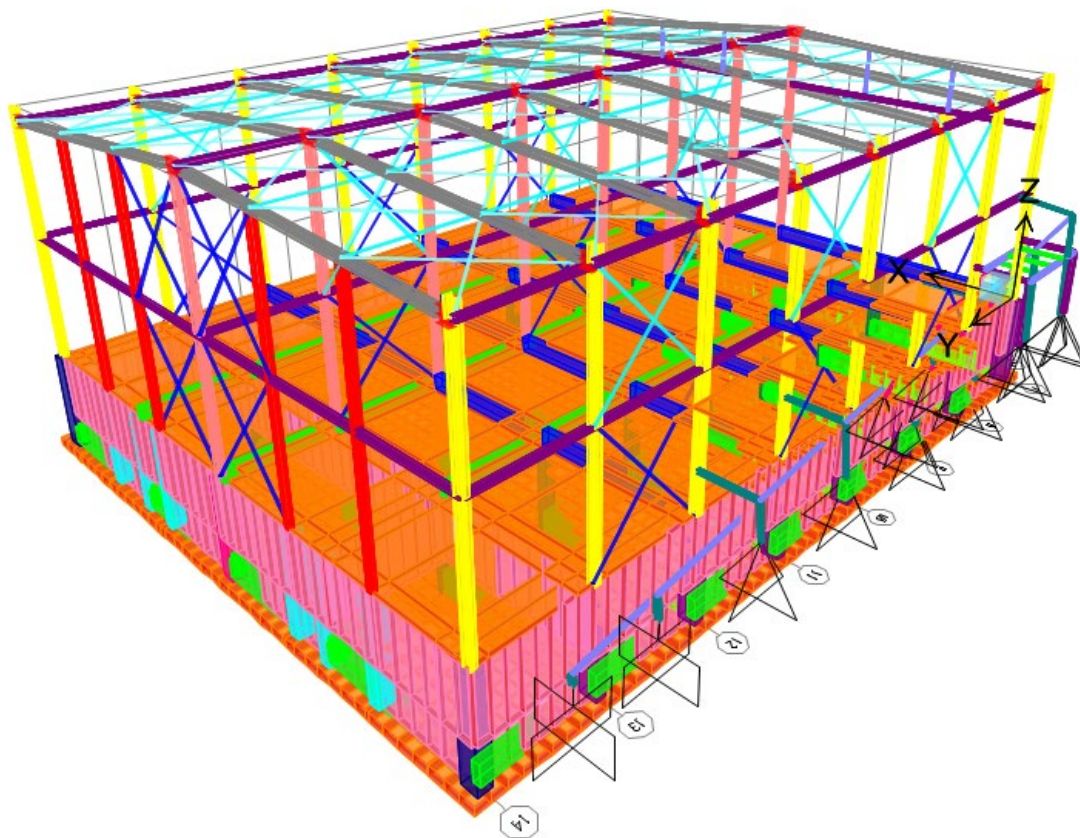
Αν ο μελετητής, παρά την ανωτέρω απλοποίηση, επιθυμεί να εμβαθύνει στον σχεδιασμό και την ανάλυση της σύνδεσης υπό συνθήκες πυρκαγιάς, σχετική μεθοδολογία παρουσιάζεται αναλυτικά στο Παράρτημα D του prEN 1993-1-2. Στα πλαίσια, ωστόσο, του παρόντος, δεν θα δοθεί περισσότερη λεπτομέρεια σχετικά με την διαστασιολόγηση των συνδέσεων.

Πίνακας 2.16: Συντελεστές Ισοδύναμης Ομοιόμορφης Ροπής [1].

Διάγραμμα ροπών	Συντελεστής ισοδύναμης ομοιόμορφης ροπής β_M
<p>Ακραίες ροπές</p>  <p>M_1 ψM_1</p> <p>$-1 \leq \psi \leq 1$</p>	$\beta_{M,\psi} = 1,8 - 0,7 \psi$
<p>Ροπές οφειλόμενες σε εγκάρσια φορτία</p>  <p>M_Q</p> <p>M_Q</p>	$\beta_{M,Q} = 1,3$ $\beta_{M,Q} = 1,4$
<p>Ροπές οφειλόμενες σε εγκάρσια φορτία σε συνδυασμό με ακραίες ροπές</p>  <p>M_1 M_Q ΔM</p> <p>M_Q ΔM</p> <p>M_Q ΔM</p> <p>M_Q ΔM</p>	$\beta_M = \beta_{M,\psi} + \frac{M_Q}{\Delta M} (\beta_{M,Q} - \beta_{M,\psi})$ <p>$M_Q = \max M$ λόγω των εγκάρσιων φορτίων μόνο</p> $\Delta M \begin{cases} \max M & \text{για διάγραμμα ροπών χωρίς αλλαγή προσήμου} \\ \max M + \min M & \text{για διάγραμμα ροπών με αλλαγή προσήμου} \end{cases}$

3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟ ΚΤΗΡΙΟ

Για τον σκοπό της παρούσας διπλωματικής εργασίας, επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί μελέτη πυροπροστασίας, σύμφωνα με τους ανωτέρω ισχύοντες κανονισμούς, σε κτήριο αποθήκης, κατασκευασμένο στην περιοχή του Πειραιά. Το κτήριο αποτελείται από υπόγειο χώρο οπλισμένου σκυροδέματος και μεταλλική μονώροφη ανωδομή (Εικόνα 3-1). Ωστόσο, η μελέτη που θα παρουσιαστεί, αφορά αποκλειστικά τον μεταλλικό φορέα της ανωδομής. Η προσομοίωση του κτηρίου πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα SAP2000.



Εικόνα 3-1: Τρισδιάστατη απεικόνιση προσομοιώματος του προς μελέτη κτηρίου.

Καθώς, κύριο στόχο της εργασίας, αποτελεί η αναζήτηση της οικονομικά βέλτιστης κατασκευαστικής λύσης, η μελέτη πραγματοποιήθηκε δύο φορές. Πρώτα, χρησιμοποιώντας τις διατομές που προέκυψαν από τις στατικές μελέτες, και σε δεύτερο χρόνο, χρησιμοποιώντας παχύτερες και βαρύτερες διατομές, με κατά το δυνατόν μικρές αλλαγές στα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά. Η δεύτερη ανάλυση, πραγματοποιήθηκε ώστε να ελεγχθεί η μεταβολή του λόγου κόστος χάλυβα/κόστος μονωτικού υλικού, σε σύγκριση με την μεταβολή του συντελεστή διατομής A_m/V .

Για κάθε μία από τις προαναφερθέντες αναλύσεις, υπολογίστηκε, με χρήση λογιστικού φύλλου excel και πινάκων του κατασκευαστή, το απαιτούμενο πάχος του μονωτικού υλικού, για κάθε χρησιμοποιούμενη διατομή. Επίσης, για λόγους σύγκρισης της οικονομικότητας των μεθόδων πυροπροστασίας, η διαδικασία επαναλήφθηκε τρεις φορές, με διαφορετικά μονωτικά υλικά, για κάθε διατομή. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για το κρισιμότερο μέλος της κάθε ομάδας, το οποίο προέκυψε από επίλυση του φορέα, με μοναδικό συνδυασμό δράσεων, αυτόν της εξίσωσης (2-14) (Εικόνα 3-2), και στη συνέχεια, έλεγχο των συντελεστών αξιοποίησης των μελών.

Load Combination Data

Load Combination Name (User-Generated)

Notes

Load Combination Type

Options

Define Combination of Load Case Results

Load Case Name	Load Case Type	Scale Factor
DEAD	Linear Static	1,
DEAD	Linear Static	1,
LIVE	Linear Static	0,8
SUPERDEAD	Linear Static	1,
STORAGE	Linear Static	0,8

Εικόνα 3-2: Συνδυασμός δράσεων για πυρκαγιά, όπως ορίστηκε στο προσομοίωμα.

Τα μονωτικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην διαστασιολόγηση και φαίνονται στην , είναι τα εξής:

- Διογκούμενη μονωτική βαφή λεπτής μεμβράνης **SteelMaster 1200 WF** της εταιρείας JOTUN
- Πυράντοχες μονωτικές γυψοσανίδες **Fireline** της εταιρείας Rigips/Saint-Gobain
- Εκτοξευόμενο επίχρισμα βερμικουλίτη **SLV (Sprayed Limpet Vermiculite)** της εταιρείας nestaan (πρώην THERMICA).

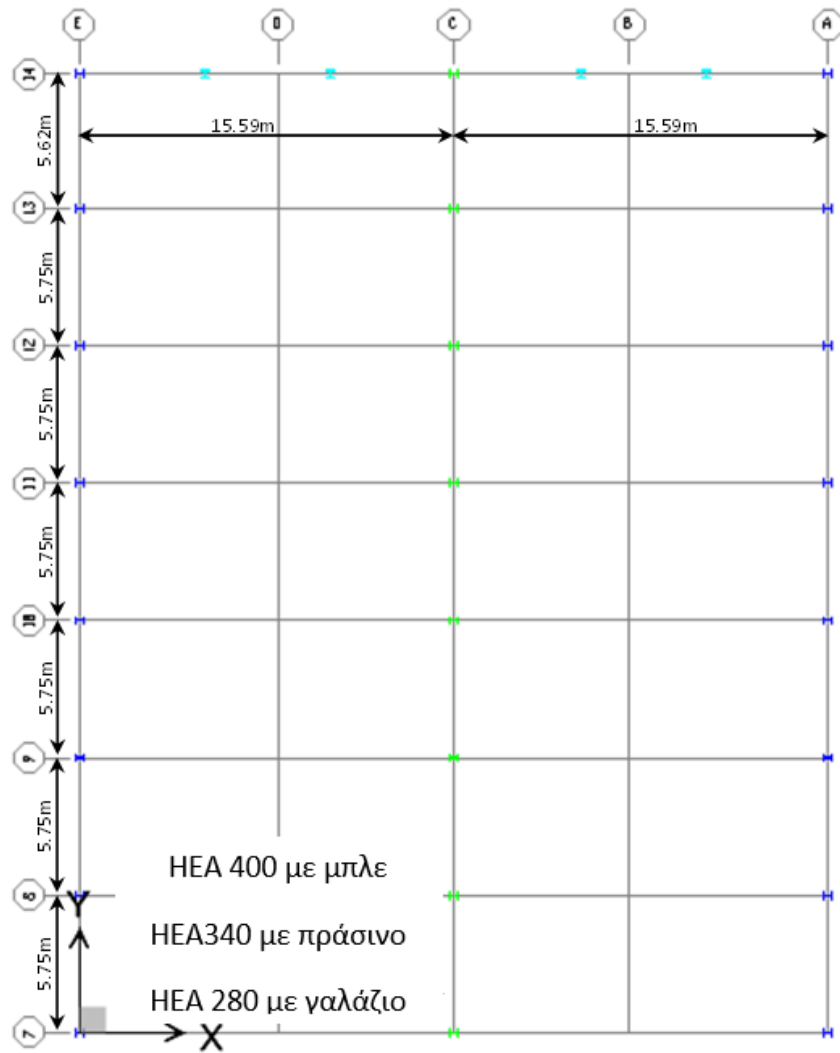


Εικόνα 3-3: Βαφή SteelMaster 1200WF (αριστερά), γυψοσανίδες Fireline (κέντρο) και επίχρισμα SLV (δεξιά)
(www.ultrimaxstore.com, constructs.ro, www.ibslgroup.co.uk).

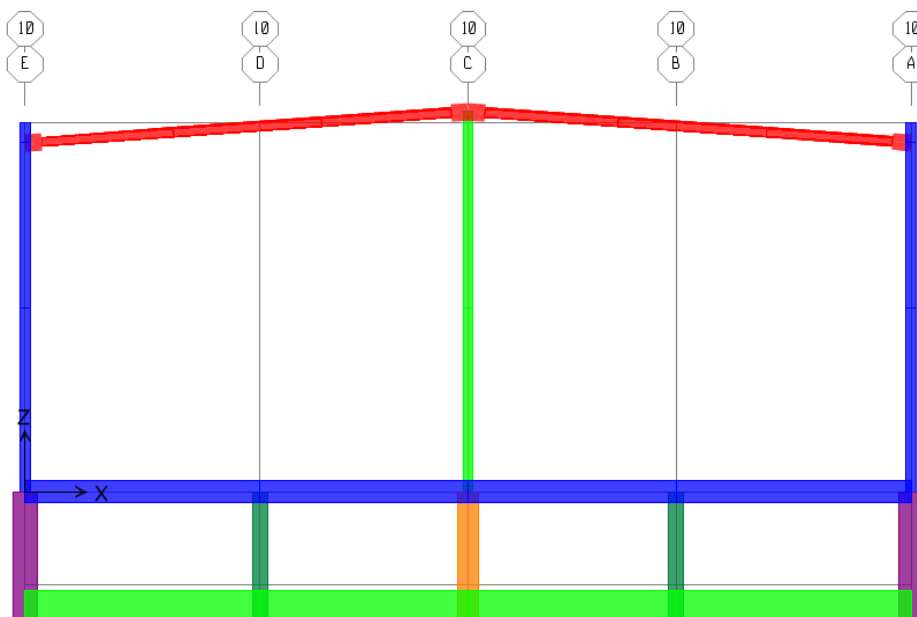
Το υπό μελέτη κτήριο, μπορεί να καταταγεί στην υποκατηγορία κτηρίων αποθήκευσης Z2, σύμφωνα με το Άρθρο 10 του Κεφαλαίου Β' του Π.Δ. 41/2018 [7], καθώς προορίζεται για αποθήκευση χάρτου και ενδυμάτων-υποδημάτων εργασίας. Η αποθήκη είναι ισόγεια, εμβαδού 1310.9 m², ύψους 13 m, χωρίς βατή στέγη, και επομένως, σύμφωνα με τον Πίνακα 2.2, ο απαιτούμενος δείκτης πυραντίστασης ορίζεται στα 120 λεπτά. Εγκατάσταση αυτόματου συστήματος πυρόσβεσης απαιτείται, σύμφωνα με το ισχύον προεδρικό διάταγμα, μόνο για αποθήκες κατηγορίας Z3 και Z2 (με εμβαδό μεγαλύτερο των 2000 m²). Επομένως, το υπό μελέτη κτήριο απαλλάσσεται από υποχρέωση εγκατάστασης αυτόματου συστήματος καταιονισμού ύδατος. Ωστόσο, σε περίπτωση εγκατάστασης, ο απαιτούμενος δείκτης πυραντίστασης μπορεί να μειωθεί στα 60 λεπτά. Έτσι, αποφασίστηκε οι αναλύσεις να πραγματοποιηθούν και για τις δύο πιθανές τιμές του δείκτη πυραντίστασης, για λόγους συγκριτικής κοστολόγησης.

3.1 Γεωμετρία Φορέα

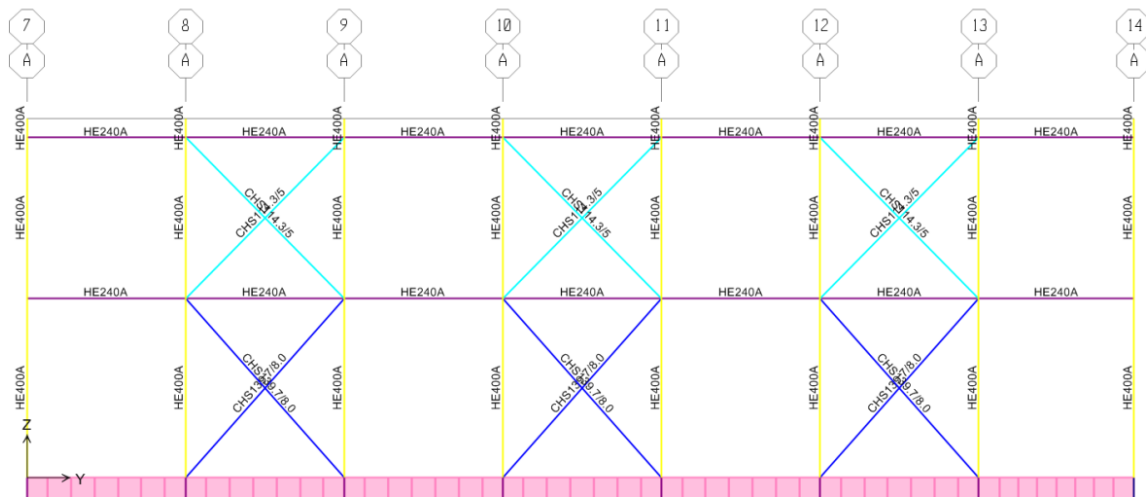
Η αποθήκη έχει πλάτος 32.13 m και συνολικό μήκος 40.80 m (Εικόνα 3-4). Το ύψος της δικλινής, μη βατής στέγης, φτάνει, όπως προαναφέρθηκε, μαζί με τα περιμετρικά στηθαία, τα 13.00 m και διαμορφώνεται με κεκλιμένο ζύγωμα κλίσης 4.0°. Από στατική άποψη, ο φορέας μορφώνεται με επίπεδα 3-στηλα κύρια πλαίσια ροπής κατά την εγκάρσια έννοια (Εικόνα 3-5), για παραλαβή των κατακόρυφων και οριζόντιων εγκάρσιων φορτίων, και με κατακόρυφους κεντρικούς διαγώνιους συνδέσμους δυσκαμψίας στην διαμήκη έννοια (Εικόνα 3-6), για παραλαβή των διαμήκων οριζόντιων φορτίων.



Εικόνα 3-4: Κάτοψη και διατομές των μεταλλικών υποστυλωμάτων.

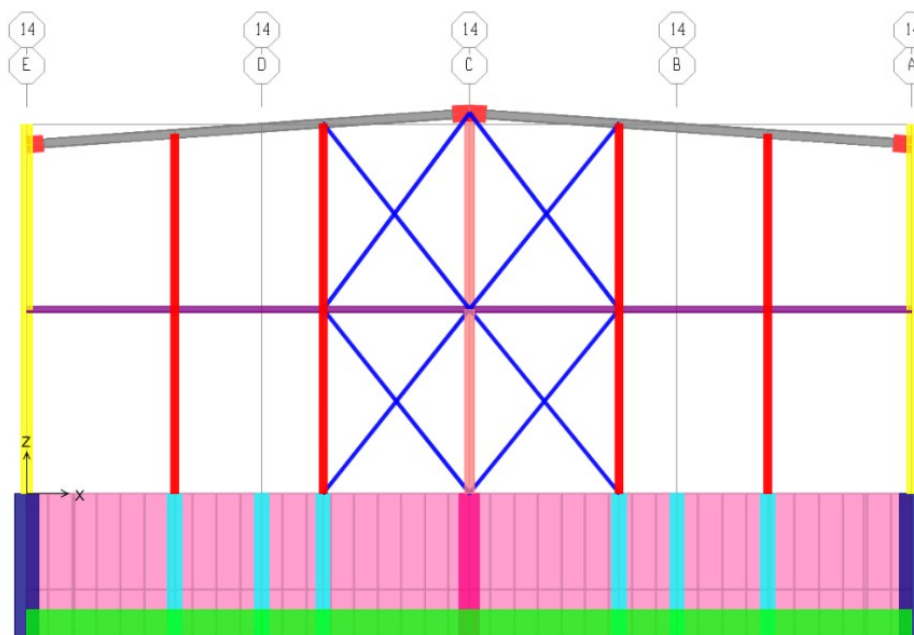


Εικόνα 3-5: Τυπικό 3-στηλο πλαίσιο στην εγκάρσια διεύθυνση.

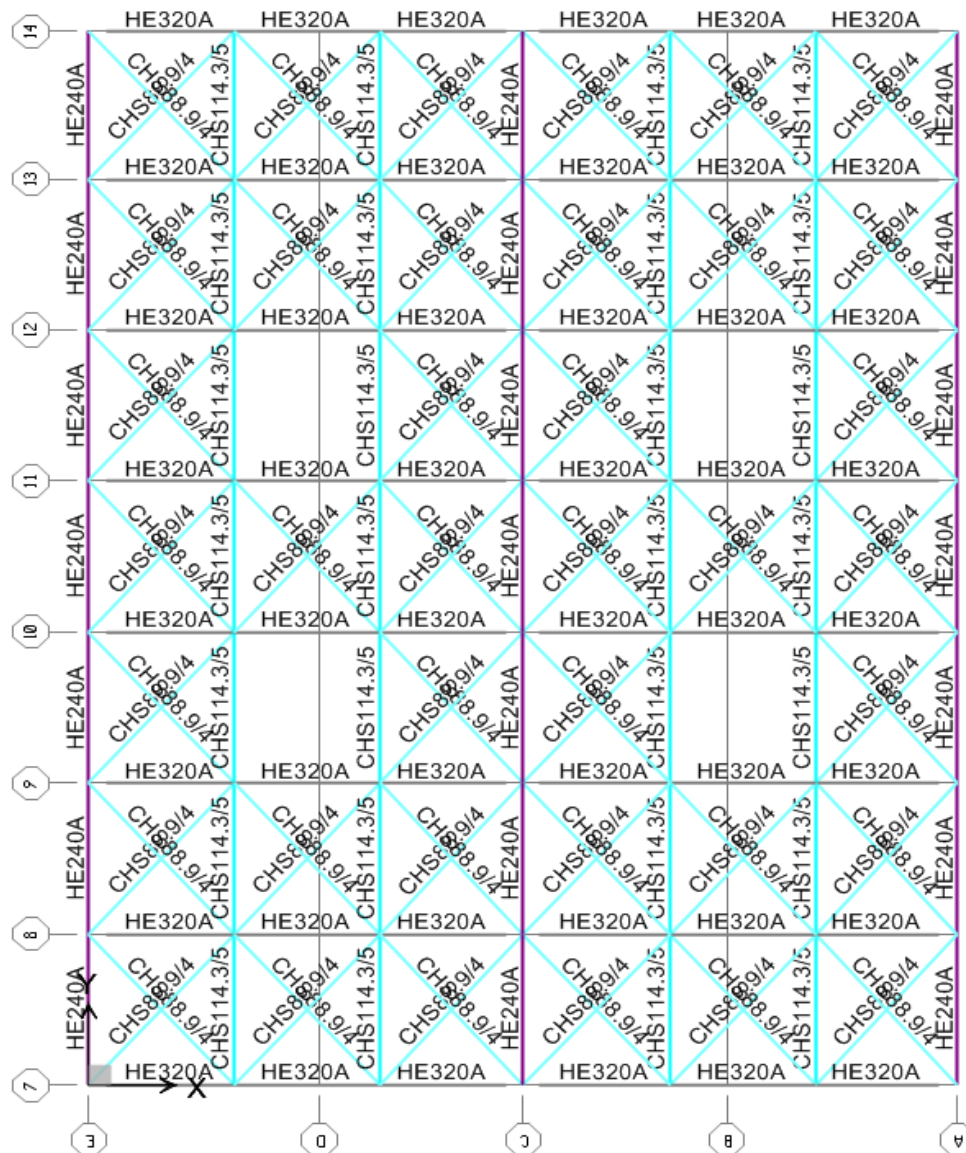


Εικόνα 3-6: Κατακόρυφοι κεντρικοί διαγώνιοι σύνδεσμοι δυσκαμψίας στην διαμήκη διεύθυνση.

Στον άξονα 7 η αποθήκη ενώνεται με στατικά ανεξάρτητο κτήριο γραφείων, ενώ στον άξονα 14 προστίθενται μετωπικά υποστυλώματα, για την τοποθέτηση πλαγιοκαλύψεων και την ανάληψη διαμήκων φορτίων ανέμου (Εικόνα 3-7). Η διαφραγματική λειτουργία της στέγης, εξασφαλίζεται με κεντρικούς διαγώνιους συνδέσμους δυσκαμψίας (“οριζόντιους” χιαστί συνδέσμους), όπως αναπαρίσταται στην Εικόνα 3-8. Για στήριξη των πετασμάτων της στέγης και τοποθέτηση των πλαγιοκαλύψεων, προβλέπονται τεγίδες και μηκίδες αντίστοιχα. Τα επίπεδα πλαίσια έχουν τοποθετηθεί σε αποστάσεις λίγο μικρότερες των 6m, ώστε να βελτιστοποιηθούν οι διατομές και να ελαχιστοποιηθεί η απώλεια χάλυβα, λαμβάνοντας υπόψη τα βιομηχανικώς παραγόμενα μήκη των 12m. Στην μελέτη, δεν θα συμπεριληφθεί διαστασιολόγηση των τεγίδων και των μηκίδων, καθώς δεν φέρουν φορτία κατά την διάρκεια της πυρκαγιάς. Για την ακρίβεια, μοναδικά φορτία είναι το ίδιο βάρος τους και το βάρος των χαλυβδόφυλλων επικάλυψης, που είναι μηδαμινά, σε σχέση με τα φορτία χιονιού και ανέμου, τα οποία είναι σχεδιασμένες να αναλαμβάνουν. Πάραυτα, αν θέλαμε να προστατευθούν οι μηκίδες και οι τεγίδες, δεν θα απαιτούνταν παραπάνω από το ελάχιστο εφαρμόσιμο πάχος μονωτικού υλικού, όπως αποδεικνύεται στη συνέχεια και για πιο κρίσιμα μέλη.



Εικόνα 3-7: Όψη άξονα 14.



Εικόνα 3-8: Κάτοψη στέγης και απεικόνιση της διαφραγματικής λειτουργίας με οριζόντιους χιαστί συνδέσμους δισκαμψίας.

3.2 Χρησιμοποιούμενες Διατομές

Κατά την κατασκευή του κτηρίου, όπως σχεδιάστηκε και τελικά υλοποιήθηκε (Φορέας 1), για τα κύρια μέλη χρησιμοποιήθηκαν πλατύπελμες διατομές διπλού ταυ (HEA) και κοίλες κυκλικές διατομές (CHS). Στον Φορέα 2, οι πλατύπελμες διατομές HEA αντικαταστάθηκαν με τις παχύτερες και βαρύτερες των προηγούμενων διατομές HEB, στοχεύοντας στην μικρότερη δυνατή αύξηση των γεωμετρικών και αδρανειακών χαρακτηριστικών τους. Οι κοίλες κυκλικές διατομές CHS επιλέχθηκε να διατηρηθούν ίδιες σε εξωτερική διάμετρο, μεταβάλλοντας μόνο το πάχος τους. Εξαιρέση αποτελούν οι ορθοστάτες του ζυγώματος του άξονα 7, για τους οποίους και στα δύο προσομοιώματα, επιλέχθηκε να διατηρηθεί η διατομή HEA120, καθώς από την ανάλυση του Φορέα 1 προέκυψε ότι δεν απαιτείται καν εφαρμογή παθητικής πυροπροστασίας στα εν λόγω μέλη. Οι χρησιμοποιούμενες διατομές για τους δύο εξεταζόμενους φορείς συνοψίζονται στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: Χρησιμοποιούμενες διατομές στους Φορείς 1 και 2.

Τύπος μέλους	Διατομή Φορέα 1	Διατομή Φορέα 2
Υποστυλώματα	HEA400 (άξονας A & E) HEA340 (άξονας C)	HEB400 (άξονας A & E) HEB320 (άξονας C)
Ζυγώματα	HEA320	HEB300
Κατακόρυφοι χιαστί σύνδεσμοι δυσκαμψίας	CHS139.7/8, CHS114.3/5	CHS139.7/10, CHS114.3/8
Οριζόντιοι χιαστί σύνδεσμοι δυσκαμψίας	CHS88.9/4	CHS88.9/6
Κεφαλοδοκοί δικλινούς στέγης	HEA240	HEB220
Τεγίδες	IPE140	IPE140
Μηκίδες	UPN80	UPN80
Μετωπικά υποστυλώματα	HEA280	HEB260
Ορθοστάτες	HEA120	HEA120

Τα δευτερεύοντα μέλη (μηκίδες και τεγίδες), όπως προαναφέρθηκε, δεν διαστασιολογήθηκαν για αντοχή σε πυρκαγιά. Επομένως, εύλογα, δεν θεωρήθηκε κάποια αλλαγή στις χρησιμοποιούμενες διατομές τους.

3.3 Στατικές Αναλύσεις

Πραγματοποιήθηκαν 4 στατικές αναλύσεις, 2 για το μελετημένο και κατασκευασμένο φορέα (Φορέας 1) και 2 για αυτόν με τις παχύτερες διατομές (Φορέας 2). Η πρώτη ανάλυση είχε σκοπό τον υπολογισμό των ασκούμενων εντατικών μεγεθών, του συντελεστή C_i , της κρίσιμης ελαστικής ροπής M_{cr} και των συντελεστών ομοιόμορφης ισοδύναμης ροπής του Πίνακας 2.16. Μετά την πρώτη ανάλυση του κάθε φορέα έγινε, επίσης, έλεγχος των συντελεστών αξιοποίησης των μελών (ανά χρησιμοποιούμενη διατομή) για να εκτιμηθεί το δυσμενέστερο μέλος κάθε ομάδας. Η δεύτερη ανάλυση, είχε μοναδικό στόχο, την ακριβή κατηγοριοποίηση των διατομών, που υλοποιήθηκε μεταβάλλοντας το όριο διαρροής του χάλυβα σε $f_y/0,85^2$, ώστε, σύμφωνα με την Εξίσωση (2-29), να προκύψει ο τροποποιημένος συντελεστής ε . Ο συντελεστής ε υπολογίζεται αυτόματα και χρησιμοποιείται, από το πρόγραμμα (SAP200), για την κατηγοριοποίηση των διατομών, λαμβάνοντας ταυτόχρονα υπόψιν, τα ασκούμενα εντατικά μεγέθη.

Ο υπολογισμός της κρίσιμης ελαστικής ροπής και η κατηγοριοποίηση των διατομών, πραγματοποιήθηκαν και σε λογιστικό φύλλο, για λόγους επαλήθευσης. Τα αποτελέσματα των παραπάνω αναλύσεων εισήχθησαν στο λογιστικό φύλλο, της κάθε διατομής, για την εύρεση της κρίσιμης θερμοκρασίας, στην οποία αστοχεί το κάθε μέλος. Στην Εικόνα 3-9 παρουσιάζεται τμήμα του λογιστικού φύλλου, που χρησιμοποιήθηκε για την διαστασιολόγηση των διατομών HEA400.

Γεωμετρικά & Μηχανικά Χαρακτηριστικά HEA 400 [μονάδες σε m και kN]							
b [m]	h [m]	h-2c [m]	t _f [m]	t _w [m]	r [m]	A [m ²]	f _y [kPa]
0.3	0.39	0.298	0.019	0.011	0.027	0.0159	355000
I _y [m ⁴]	I _z [m ⁴]	W _{y,el} [m ³]	W _{z,el} [m ³]	W _{y,pl} [m ³]	W _{z,pl} [m ³]	I _t [m ⁴]	I _w [cm ⁶]
0.0004507	0.0000856	0.00231	0.000571	0.002562	0.000873	0.0000019	0.000002942

Εντακτικά Μεγέθη Μέλους			
N _{ed} [kN]	Med,y [kNm]	Med,z [kNm]	V _{ed,z} [kN]
-111.64	108.5	0.04	15.22

Γεωμετρικά Στοιχεία Μέλους		
Μήκος Μέλους L [m]	Συντελεστής κ ₁	Συντελεστής κ ₂
13	1	0.85

c/t	Κατηγοριοποίηση Διατομών I			Κατηγορία Διατομής
	Εξέχον Πέλαμα σε θλίψη	Κορμός σε θλίψη	Κορμός σε κάμψη	
	6.18	27.09	27.09	1
Όριο για Κατηγορία 1	6.22	19.36	49.79	
Όριο για Κατηγορία 2	6.92	23.51	57.40	
Όριο για Κατηγορία 3	9.68	26.28	83.68	
Κατηγορία Ελάσματος	1	4	1	

Εικόνα 3-9: Εισαγωγή δεδομένων από το μοντέλο SAP2000 στο λογιστικό φύλλο. Με πράσινο χρώμα τα κελιά που χρειάζονται συμπλήρωση από τον χρήστη, ενώ με άσπρο, τα κελιά των οποίων οι τιμές υπολογίζονται αυτόματα.

Η κατηγορία της διατομής στο πράσινο πεδίο, είναι αυτή που λαμβάνεται υπόψιν στους επόμενους υπολογισμούς, η οποία, στις περισσότερες περιπτώσεις, προέκυψε από τους υπολογισμούς του προγράμματος. Ο συντελεστής κ₁ ορίστηκε σταθερός και ίσος με τη μονάδα, θεωρώντας ότι όλα τα μέλη εκτίθενται, στις 4 πλευρές τους, στην φωτιά, αφού δεν υπάρχουν σύμμικτες ή απλές πλάκες σκυροδέματος σε επαφή με καμία διατομή. Ο συντελεστής κ₂ ορίστηκε, στις περισσότερες περιπτώσεις, ίσος με την μονάδα, θεωρώντας έλεγχο μακριά από τις στηρίξεις και σε στατικά ανεξάρτητα μέλη. Η παραπάνω υπόθεση οδηγεί σε ελαφρώς δυσμενέστερα αποτελέσματα (υπέρ της ασφαλείας), δεδομένου ότι οι μέγιστες ροπές στα αμφίπακτα μέλη εμφανίζονται στα άκρα των μελών.

Τα γεωμετρικά και αδρανειακά χαρακτηριστικά κάθε διατομής που χρησιμοποιήθηκε, αποθηκεύτηκαν σε ξεχωριστή σελίδα του λογιστικού φύλλου, αντλούμενα από τους πίνακες εμπορικών μεταλλικών διατομών. Ωστόσο, οι εμπορικοί πίνακες χρησιμοποιούν πληθώρα μονάδων μέτρησης (m, cm, mm) για κάθε υπολογιζόμενο μέγεθος (ροπή αδράνειας, εμβαδό διατομής, ύψος, πλάτος κ.λπ.). Για διευκόλυνση, επομένως, των υπολογισμών, οι τιμές των διαφόρων μεγεθών επιλέχθηκε να μετατραπούν και να αποδοθούν σε m και kN, όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα. Η μετατροπή των μονάδων πραγματοποιείται αυτόματα σε όλες τις σελίδες του λογιστικού φύλλου, στις οποίες ο χρήστης καλείται, απλά, να επικολλήσει τα χαρακτηριστικά της διατομής, στις μονάδες του φυλλαδίου των κατασκευαστών, με κατάλληλη σειρά.

3.4 Υπολογισμός Κρίσιμων Θερμοκρασιών

Για την εύρεση της κρίσιμης θερμοκρασίας των μελών πραγματοποιήθηκαν όλοι οι έλεγχοι που περιγράφονται στην παράγραφο 2.4 του παρόντος. Μάλιστα, χωρίστηκαν σε ελέγχους διατομών (Εικόνα 3-10: Έλεγχος αντοχής της διατομής HEA400 σε θλίψη, κάμψη και διάτμηση. Συμπεριλαμβάνεται η απομείωση της αντοχής σε ροπή, λόγω ταυτόχρονης θλίψης ή/και διάτμησης.) και ελέγχους μελών (Εικόνα 3-11 και Εικόνα 3-12), όπως γίνεται και στις συμβατικές μελέτες μεταλλικών κατασκευών. Σε όλα τα μέλη, κρίσιμοι έλεγχοι αποδείχθηκαν οι έλεγχοι μέλους των εξισώσεων (2-48) και (2-49), που αφορούν τον συνδυασμό διαξονικής κάμψης και θλίψης. Ο υπολογισμός των συντελεστών ισοδύναμης ομοιόμορφης ροπής $\beta_{M,\psi}$ του Πίνακα 2.16, που απαιτείται για τον έλεγχο των εξισώσεων (2-48) και

(2-49), πραγματοποιήθηκε εκτός του λογιστικού φύλλου, καθώς η απαιτούμενη διαδικασία ήταν δύσκολο να αυτοματοποιηθεί, και εντάχθηκε χειροκίνητα στο λογιστικό φύλλο.

Έλεγχος Διατομής					
Αντοχή σε Αξονική Καταπόνηση		Αντοχή σε Ροπή Κάμψης		Αντοχή σε Τέμνουσα	
$N_{fi,\theta,Rd}$ [kN]	1677.55	$M_{y,fi,\theta,Rd}$ [kNm]	318.01	$V_{z,fi,\theta,Rd}$ [kNm]	349.34
Μειωτικός συντελεστής για την M_y	1.00	$M_{z,fi,\theta,Rd}$ [kNm]	108.36	Μειωτικός Συντελεστής ρ	1.00
Μειωτικός συντελεστής για την M_z	1.00	Έλεγχος	OK	Έλεγχος	OK
Έλεγχος	OK				

Εικόνα 3-10: Έλεγχος αντοχής της διατομής HEA400 σε θλίψη, κάμψη και διάτμηση. Συμπεριλαμβάνεται η απομείωση της αντοχής σε ροπή, λόγω ταυτόχρονης θλίψης ή/και διάτμησης.

Αντοχή σε Καμπτικό Λυγισμό				Αντοχή σε Στρεπτοκαμπτικό Λυγισμό	
Λυγισμός περί τον άξονα yy		Λυγισμός περί τον άξονα zz		Λυγισμός περί τον άξονα yy	
$L_{cr,z}$ [m]	22.750	$L_{cr,y}$ [m]	6.500	$L_{cr,y} = L_{cr,LT}$ [m]	6.500
N_{cr} [kN]	1804.861	N_{cr} [kN]	4199.195	C1 (για $k=1$)	1.879
λ_{bar}	1.768	λ_{bar}	1.159	M_{cr} (SAP) [kNm]	1900.000
$\lambda_{\theta,bar}$	2.270	$\lambda_{\theta,bar}$	1.488	$k = L_{cr,LT}/L$	0.5
α	0.529	α	0.529	M_{cr} [kNm]	1678.281
ϕ_{θ}	3.676	ϕ_{θ}	2.001	WRK_y [m ³]	0.00256
$\chi_{fi,y}$	0.152	$\chi_{fi,z}$	0.300	WRK_z [m ³]	0.00087
$N_{b,fi,Rd}$ [kN]		255.40		$\lambda_{bar,LT}$	0.736
Utility		0.44		$\lambda_{bar,\theta,LT,com}$	0.945
Έλεγχος		OK		α_{LT}	0.529
				$\phi_{\theta,LT}$	1.196
				$\chi_{fi,LT}$	0.518
				$M_{b,fi,Rd}$ [kNm]	140.06
				Utility	0.77
				Έλεγχος	OK

Εικόνα 3-11: Έλεγχος αντοχής του δυσμενέστερου μέλους διατομής HEA400 σε καμπτικό και στρεπτοκαμπτικό λυγισμό.

Αντοχή σε Διαξονική Κάμψη & Αξονική					
Διάγραμμα ροπής M_{yy} μεταξύ των εξασφαλίσεων στον άξονα zz		Διάγραμμα ροπής M_{zz} μεταξύ των εξασφαλίσεων στον άξονα yy		Διάγραμμα ροπής M_{yy} μεταξύ των εξασφαλίσεων στον άξονα yy	
$\beta_{M,y}$	2.3070	$\beta_{M,z}$	1.9340	$\beta_{M,LT}$	1.6710
μ_y	0.4289	μ_z	0.6524	μ_{LT}	0.2230
k_y	1.0001	k_z	1.0001	k_{LT}	1.0000
Utility		0.839		Utility	0.997
Έλεγχος Εξίσωσης (2-48)		OK		Έλεγχος Εξίσωσης (2-49)	OK

Εικόνα 3-12: Έλεγχος αντοχής της διατομής του δυσμενέστερου μέλους διατομής HEA400 σε διαξονική κάμψη και θλίψη.

Η κρίσιμη θερμοκρασία υπολογίστηκε, τελικά, με επαναληπτική διαδικασία δοκιμών. Με διαδοχικές αλλαγές στην τιμή της θερμοκρασίας του μέλους, πραγματοποιήθηκε, μέσω του λογιστικού φύλλου, προσέγγιση της κρίσιμης θερμοκρασίας, έτσι ώστε να επαληθεύονται οριακά όλοι οι παραπάνω έλεγχοι. Αυτό επιτεύχθηκε διαβάζοντας, σε κάθε δοκιμή, την τιμή του συντελεστή αξιοποίησης (Utility), ο οποίος, για βέλτιστο οικονομικό αποτέλεσμα, έπρεπε να βρίσκεται όσο το δυνατόν πλησιέστερα στην μονάδα. Η διαδικασία απλοποιήθηκε ώστε η μοναδική απαραίτητη χειροκίνητη αλλαγή να είναι αυτή της

θερμοκρασίας των μελών. Οι μειωτικοί συντελεστές του Πίνακα 2.11 για το όριο διαρροής, το όριο αναλογίας και το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα, που απαιτούνταν για τους ελέγχους των μελών υπολογίζονταν για κάθε θερμοκρασία αυτόματα (Εικόνα 3-13: Γραμμική παρεμβολή στον πίνακα των μειωτικών συντελεστών $k_{y,\theta}$, $k_{p,\theta}$ και $k_{E,\theta}$), χρησιμοποιώντας γραμμική παρεμβολή.

θ_a [°C]	$k_{y,\theta} = (f_{y,\theta}/f_y)$	$k_{p,\theta} = (f_{p,\theta}/f_y)$	$k_{E,\theta} = (E_{a,\theta}/E_a)$
20	1.000	1.000	1.000
100	1.000	1.000	1.000
200	1.000	0.8070	0.9000
300	1	0.613	0.8
400	1	0.42	0.7
500	0.78	0.36	0.6
600	0.47	0.18	0.31
700	0.23	0.075	0.13
800	0.11	0.05	0.09
900	0.06	0.0375	0.0675
1000	0.04	0.025	0.045
1100	0.02	0.0125	0.0225
1200	0	0	0

θ_a [°C]	$k_{y,\theta} = (f_{y,\theta}/f_y)$	$k_{p,\theta} = (f_{p,\theta}/f_y)$	$k_{E,\theta} = (E_{a,\theta}/E_a)$
672	0.2972	0.1044	0.1804

Εικόνα 3-13: Γραμμική παρεμβολή στον πίνακα των μειωτικών συντελεστών $k_{y,\theta}$, $k_{p,\theta}$ και $k_{E,\theta}$ για την θερμοκρασία που ορίζει ο χρήστης στο πράσινο κελί.

Η ανωτέρω διαδικασία επαναλήφθηκε για κάθε ομάδα δομικών μελών, που χρησιμοποιήθηκε στο κτήριο, και για τους δύο φορείς. Οι τιμές των κρίσιμων θερμοκρασιών που προέκυψαν, παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 3.2. Όπως φαίνεται, πιο κρίσιμα μέλη αποτελούν τα υποστυλώματα των αξόνων Α και Ε και τα ζυγώματα της στέγης. Και οι δύο ομάδες μελών υποβάλλονται ταυτόχρονα σε θλίψη και κάμψη, φέροντας το ίδιο βάρος του φορέα, λόγω της πλαισιακής του λειτουργίας.

Πίνακας 3.2: Κρίσιμες θερμοκρασίες των μελών.

Φορέας 1		Φορέας 2	
Διατομή Μέλους	Κρίσιμη Θερμοκρασία [°C]	Διατομή Μέλους	Κρίσιμη Θερμοκρασία [°C]
HEA 400	672	HEB 400	693
HEA 340	815	HEB 320	860
HEA 320	623	HEB 300	657
HEA 280	950	HEB 260	970
HEA 240	1020	HEB 220	880
HEA 120	1035	HEA 120	1035
CHS 139.7/8	840	CHS 139.7/10	885
CHS 114.3/5	770	CHS 114.3/8	785
CHS 88.9/4	800	CHS 88.9/6	820

3.5 Απαιτούμενα Πάχη Μονωτικών Υλικών

Η μελέτη πυροπροστασίας ολοκληρώθηκε με τον υπολογισμό του πάχους μονωτικού υλικού που απαιτείται για την μόνωση κάθε μέλους. Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε με χρήση λογιστικού φύλλου για μόνωση με τις γυψοσανίδες Fireline και με επίχρισμα βερμικουλίτη SLV, ενώ για μόνωση με την πυροδιογκούμενη βαφή SteelMaster 1200 WF χρησιμοποιήθηκαν τα φυλλάδια του κατασκευαστή. Στόχος προγραμματισμού της διαδικασίας στο excel ήταν ο ακριβής υπολογισμός του απαιτούμενου πάχους, όπως προκύπτει από την εφαρμογή της Εξίσωσης (2-27) του Ευρωκώδικα 3, για μονωμένα χαλύβδινα μέλη. Για την εφαρμογή, ωστόσο, της παραπάνω εξίσωσης, ήταν απαραίτητο να είναι γνωστές οι εξής ποσότητες: η θερμική αγωγιμότητα, η ειδική θερμότητα και η πυκνότητα του κάθε πυροπροστατευτικού υλικού. Η εύρεση των τιμών αυτών, αποδείχθηκε ιδιαίτερα επίπονη διαδικασία, καθώς ελάχιστοι κατασκευαστές διαθέτουν στο κοινό τις πληροφορίες αυτές. Οι γυψοσανίδες Fireline και το επίχρισμα SLV επιλέχθηκαν, καθώς, και για τα δύο, ήταν γνωστά και τα τρία ζητούμενα μεγέθη (Πίνακας 3.3) [23] [24] [27], ενώ για την βαφή SteelMaster 1200 WF, που δεν γινόταν χρήση του λογιστικού φύλλου, υπήρχε διαθέσιμος ο πιο αναλυτικός πίνακας παχών - κρίσιμης θερμοκρασίας.

Πίνακας 3.3: Τεχνικά χαρακτηριστικά της γυψοσανίδας Fireline και του επιχρίσματος SLV

Χαρακτηριστικά Γυψοσανίδας Fireline της Rigips Saint-Gobain		
Σύμβολο	Επεξήγηση	Τιμή
c_p [J/(kgK)]	Ειδική Θερμότητα	950
d_p [m]	Πάχος Μόνωσης	0.02
λ_p [W/(mK)]	Θερμική Αγωγιμότητα	0.21
ρ_p [kg/m ³]	Πυκνότητα	850
Κόστος [€/m ³]	Λιανική Τιμή Εμπορίου	433.3

Χαρακτηριστικά Επιχρίσματος Sprayed Limpet Vermiculite (SLV) της THERMICA		
Σύμβολο	Επεξήγηση	Τιμή
c_p [J/(kgK)]	Ειδική Θερμότητα	925
d_p [m]	Πάχος Μόνωσης	0.02
λ_p [W/(mK)]	Θερμική Αγωγιμότητα	0.09
ρ_p [kg/m ³]	Πυκνότητα	375
Κόστος [€/m ³]	Λιανική Τιμή Εμπορίου	450

Η εφαρμογή της Εξίσωσης (2-27) του Ευρωκώδικα 3, δεν είναι ιδιαίτερα εφαρμόσιμη για μόνωση με διογκούμενα χρώματα. Εξ' ορισμού, οι πυράντοχες βαφές διογκώνονται κατά την εξέλιξη μίας πυρκαγιάς και μάλιστα όχι με τον ίδιο ρυθμό καθ' όλη την διάρκειά της [18] [29]. Επίσης, η θερμική τους αγωγιμότητα μεταβάλλεται ανάλογα με την θερμοκρασία, όπως συμβαίνει και με τον χάλυβα, καθιστώντας πολύ δύσκολους τους υπολογισμούς. Οι τιμές της θερμικής αγωγιμότητας και της ειδικής θερμότητας διογκούμενων χρωμάτων, όπως και οι ρυθμοί μεταβολής τους δεν περιλαμβάνονται σε κανένα φυλλάδιο τεχνικών δεδομένων, καθιστώντας αδύνατη την χρήση της Εξίσωσης (2-27). Παρά ταύτα, έχει γίνει προσπάθεια, στο πλαίσιο ορισμένων μελετών του Ηνωμένου Βασιλείου, να βρεθεί μία ισοδύναμη σταθερή τιμή για την θερμική αγωγιμότητα διογκούμενων βαφών. Γνωρίζοντας την τιμή της ποσότητας αυτής θα ήταν, ίσως, εφικτός ο παραπάνω υπολογισμός. Στην παρούσα περίπτωση, όπου δεν είναι γνωστή, η χρήση πινάκων αποτέλεσε μονόδρομο.

Οι πίνακες των κατασκευαστών έχουν προκύψει από πολυάριθμα πειράματα συναρτήσεως του συντελεστή διατομής και της κρίσιμης θερμοκρασίας. Χρησιμοποιούνται ευρέως στις μελέτες παθητικής πυροπροστασίας, για την εύρεση του απαιτούμενου πάχους μόνωσης, τόσο για μόνωση με χρώματα, όσο και με πλάκες ή επιχρίσματα. Οι τιμές παχών, που δίνονται στους πίνακες, περιορίζονται όμως, συνήθως, σε συγκεκριμένο εύρος κρίσιμων θερμοκρασιών και δεν περιλαμβάνουν τα απαιτούμενα πάχη

υλικού για διατομές με κρίσιμη θερμοκρασία μεγαλύτερη των 800 °C. Έτσι, μπορεί να οδηγούν σε πολύ συντηρητικές τιμές πάχους, για μέλη χωρίς ιδιαίτερες απαιτήσεις ή μέλη ελαφρά φορτισμένα στον συνδυασμό της πυρκαγιάς. Η επιλογή του απαιτούμενου πάχους βαφής SteelMaster 1200WF, υπολογίστηκε βάση τέτοιων πινάκων της εταιρείας Jotun, που παράγει το συγκεκριμένο χρώμα, οι οποίοι περιλαμβάνονται στο Παράρτημα Α: του παρόντος. Τμήμα ενός πίνακα απεικονίζεται ενδεικτικά στην Εικόνα 3-14.

Section Factor up to m ⁻¹	Thickness (mm) Required for a Design Temperature of									
	350°C	400°C	450°C	500°C	550°C	600°C	620°C	650°C	700°C	750°C
30	0.430	0.299	0.278	0.278	0.278	0.278	0.278	0.278	0.278	0.278
35	0.498	0.337	0.294	0.278	0.278	0.278	0.278	0.278	0.278	0.278
40	0.566	0.376	0.317	0.278	0.278	0.278	0.278	0.278	0.278	0.278
45	0.634	0.414	0.341	0.295	0.278	0.278	0.278	0.278	0.278	0.278
50	0.702	0.452	0.364	0.315	0.278	0.278	0.278	0.278	0.278	0.278
55	0.770	0.491	0.388	0.335	0.285	0.278	0.278	0.278	0.278	0.278
60	0.838	0.529	0.411	0.356	0.303	0.278	0.278	0.278	0.278	0.278
65	0.906	0.568	0.435	0.376	0.321	0.278	0.278	0.278	0.278	0.278
70	0.975	0.606	0.458	0.396	0.338	0.282	0.278	0.278	0.278	0.278
75	1.035	0.644	0.482	0.416	0.356	0.298	0.278	0.278	0.278	0.278
80	1.078	0.683	0.505	0.436	0.374	0.313	0.288	0.278	0.278	0.278
85	1.122	0.721	0.529	0.456	0.391	0.329	0.303	0.278	0.278	0.278
90	1.166	0.760	0.552	0.477	0.409	0.344	0.317	0.278	0.278	0.278
95	1.209	0.798	0.576	0.497	0.427	0.359	0.332	0.287	0.278	0.278
100	1.253	0.836	0.599	0.517	0.444	0.375	0.346	0.301	0.278	0.278
105	1.296	0.875	0.623	0.537	0.462	0.390	0.361	0.314	0.278	0.278
110	1.340	0.913	0.646	0.557	0.480	0.405	0.376	0.328	0.278	0.278
115	1.383	0.952	0.670	0.578	0.497	0.421	0.390	0.341	0.278	0.278
120	1.427	0.990	0.693	0.598	0.515	0.436	0.405	0.355	0.278	0.278
125	1.471	1.028	0.717	0.618	0.533	0.452	0.419	0.368	0.278	0.278
130	1.514	1.065	0.740	0.638	0.550	0.467	0.434	0.382	0.278	0.278
135	1.558	1.102	0.764	0.658	0.568	0.482	0.448	0.395	0.286	0.278
140	1.601	1.139	0.787	0.678	0.585	0.498	0.463	0.409	0.299	0.278
145	1.645	1.176	0.811	0.699	0.603	0.513	0.477	0.423	0.311	0.278
150	1.688	1.213	0.834	0.719	0.621	0.529	0.492	0.436	0.324	0.278
155	1.732	1.250	0.858	0.739	0.638	0.544	0.506	0.450	0.337	0.278
160	1.776	1.286	0.881	0.759	0.656	0.559	0.521	0.463	0.350	0.278
165	1.819	1.323	0.905	0.779	0.674	0.575	0.535	0.477	0.363	0.278
170	1.863	1.360	0.928	0.799	0.691	0.590	0.550	0.490	0.376	0.278
175	1.906	1.397	0.952	0.820	0.709	0.605	0.564	0.504	0.389	0.278
180	1.950	1.434	0.975	0.840	0.727	0.621	0.579	0.517	0.402	0.279
185	1.993	1.471	0.999	0.860	0.744	0.636	0.594	0.531	0.415	0.291
190	2.037	1.508	1.023	0.880	0.762	0.652	0.608	0.545	0.428	0.303
195	2.081	1.545	1.061	0.900	0.780	0.667	0.623	0.558	0.440	0.315

Εικόνα 3-14: Τμήμα του φυλλαδίου τεχνικών δεδομένων της βαφής SteelMaster 1200WF (www.ultrimaxstore.com/paint/intumescent-paint-for-steel/jotun-steelmaster)

Όσον αναφορά τις πλάκες και τα επιχρίσματα, στο λογιστικό φύλλο, προγραμματίστηκε αναλυτική επαναληπτική διαδικασία για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας μονωμένων μελών, ανάλογα με το πάχος της μόνωσης, τις ιδιότητες του μονωτικού υλικού και τα χαρακτηριστικά του μέλους. Όπως αναγράφεται και στην παράγραφο 2.3.3, η μεταβολή της θερμοκρασίας στα μονωμένα μέλη πρέπει να υπολογίζεται ανά μέγιστα χρονικά διαστήματα των 30 δευτερολέπτων, όπως και πραγματοποιήθηκε. Ο χρήστης, στην συγκεκριμένη σελίδα του λογιστικού φύλλου, που παρουσιάζεται στην Εικόνα 3-15, καλείται να συμπληρώσει μόνο τα πράσινα κελιά, που αφορούν τα χαρακτηριστικά του μονωτικού υλικού και να επιλέξει μεταξύ των επιλογών που δίνονται στα μπλε κελιά, που αφορούν στον τύπο της διατομής, το είδος του μέλους και τον τύπο του μονωτικού υλικού. Οι διαθέσιμες επιλογές των μπλε κελιών

σχετίζονται με τον υπολογισμό του συντελεστή διατομής και του μειωτικού συντελεστή για την επιρροή της σκιάς και επεξηγούνται πιο αναλυτικά στην Εικόνα 3-16.

Όνομα Διατομής Ελέγχου	Τύπος Διατομής Ελέγχου	Πλευρές σε Επαφή με τη φωτιά	Τύπος Υλικού Πυροπροστασία
HEA 400	I	4	COATING
α_c [W/(m ² K)]	[Am/V]c [m ⁻¹]	[Am/V]b [m ⁻¹]	ksh
25	120.23	86.79	0.65
			Am/V [m ⁻¹]
			120.23

Χαρακτηριστικά Μονωτικού Υλικού		
Σύμβολο	Επεξήγηση	Τιμή
c_p [J/(kgK)]	Ειδική Θερμότητα	925
d_p [m]	Πάχος Μόνωσης	0.02
λ_p [W/(mK)]	Θερμική Αγωγιμότητα	0.09
ρ_p [kg/m ³]	Πυκνότητα	375

t [s]	t [min]	θ_b [°C]	θ_a [°C]	c_a [J/(kgK)]	$(\lambda_p A_p / V \Delta t) / [d_p]$	ϕ [-]
0	0.0	20.0	20.0	439.8	$*c_a * \rho_a * (1 + \phi/3)$	0.24055
30	0.5	261.1	20.0	439.8	0.00437	0.24055
60	1.0	349.2	20.0	439.8	0.00437	0.24055
90	1.5	404.3	20.1	439.9	0.00437	0.24051
120	2.0	444.5	20.8	440.4	0.00437	0.24024
150	2.5	476.2	21.9	441.1	0.00437	0.23983
180	3.0	502.3	23.2	442.1	0.00436	0.23932
.
.
.
.
3480	58.0	940.3	290.2	561.2	0.00349	0.18850
3510	58.5	941.6	292.4	562.0	0.00348	0.18823
3540	59.0	942.8	294.6	562.8	0.00348	0.18797
3570	59.5	944.1	296.9	563.6	0.00347	0.18770
3600	60.0	945.3	299.1	564.4	0.00347	0.18744
.
.
.
.
7080	118.0	1046.5	515.8	678.7	0.00291	0.15587
7110	118.5	1047.2	517.3	680.0	0.00291	0.15559
7140	119.0	1047.8	518.9	681.2	0.00290	0.15530
7170	119.5	1048.4	520.4	682.4	0.00290	0.15502
7200	120.0	1049.0	521.9	683.7	0.00289	0.15474

Εικόνα 3-15: Τμήμα του λογιστικού φύλλου για τον υπολογισμό της αναπτυσσόμενης θερμοκρασίας σε μονωμένα μέλη.

Τύπος Διατομής Ελέγχου	
I	Διατομές διπλού ταύ
O	Κοίλες Διατομές
A	Όλες οι υπόλοιπες
Πλευρές σε Επαφή με τη φωτιά	
3	Πλάκα Σκυροδέματος ή Σύμμικτη πλάκα σε μία πλευρά
4	Πλήρης έκθεση στην φωτιά από όλες τις πλευρές
Τύπος Υλικού Πυροπροστασίας	
BOARD	Μονωτικές Πλάκες
COATING	Επιχρίσματα ή διογκούμενα χρώματα

Εικόνα 3-16: Επιλογές χρήστη κατά το πάτημα των μπλε κελιών της Εικόνα 3-15.

Για τον υπολογισμό του απαιτούμενου πάχους, χρησιμοποιήθηκε η επιλογή What-If Analysis της καρτέλας ανάλυσης δεδομένων του excel. Στοχεύοντας οι τιμές της θερμοκρασίας, για τον ζητούμενο δείκτη πυραντίστασης, να συμπίπτουν με την κρίσιμη θερμοκρασία του εξεταζόμενου μέλους, και με

αλλαγή του πάχους του υλικού, το πρόγραμμα συμπληρώνει αυτόματα το κελί του απαιτούμενου πάχους μόνωσης d_p στον πίνακα χαρακτηριστικών του μονωτικού της Εικόνα 3-15: Τμήμα του λογιστικού φύλλου για τον υπολογισμό της αναπτυσσόμενης θερμοκρασίας σε μονωμένα μέλη. Οι τιμές απαιτούμενων παχών, που προέκυψαν στα περισσότερα μέλη, ήταν μικρότερες από τα ελάχιστα εφαρμόσιμα πάχη του κάθε μονωτικού υλικού. Επομένως, σε πολλές ομάδες μελών, επιλέχθηκε αναγκαστικά να τοποθετηθεί το ελάχιστο δυνατό πάχος μόνωσης της κάθε μεθόδου. Για μόνωση με γυψοσανίδες Fireline, τα διαθέσιμα βιομηχανικά παραγόμενα πάχη γυψοσανίδων είναι 10 mm, 12.5 mm και 15 mm. Όσο για το επίχρισμα SLV, η ελάχιστη στρώση που εφαρμόζεται είναι 10 mm.

Εξαιρέση αποτελεί η μόνωση με την επιλεγμένη πυροδιογκούμενη βαφή της Jotun. Για μέλη με κρίσιμη θερμοκρασία μεγαλύτερη των 750 °C, που είναι η μέγιστη τιμή κρίσιμης θερμοκρασίας στο φυλλάδιο τεχνικών δεδομένων του συγκεκριμένου χρώματος, επιλέχθηκε να τοποθετηθεί πάχος ίσο με το ελάχιστο απαιτούμενο για τον συγκεκριμένο συντελεστή διατομής και δείκτη πυραντίστασης. Για παράδειγμα, για διατομή-I με συντελεστή διατομής $A_m/V = 185 \text{ m}^{-1}$, κρίσιμη θερμοκρασία $\theta_{cr} = 1000 \text{ °C}$ και δείκτη πυραντίστασης R60, από το τμήμα του πίνακα που φαίνεται στην Εικόνα 3-14, θα επιλέγονταν πάχος μόνωσης $d_p = 0.291 \text{ μm}$. Η παραπάνω απλουστευμένη λογική, η οποία είναι φυσικά υπέρ της ασφαλείας, έχει το μειονέκτημα ότι οδηγεί σε αρκετά συντηρητικές τιμές παχών. Ταυτόχρονα με το γεγονός ότι τα διογκούμενα χρώματα έχουν το υψηλότερο κόστος πρώτης ύλης, οδηγούμαστε σε μεγάλη αύξηση του συνολικού κόστους της μόνωσης. Ωστόσο, αφού στους πίνακες δεν διατίθενται τιμές απαιτούμενων παχών για τόσο υψηλές κρίσιμες θερμοκρασίες, δεν είναι εφικτή κάποια ακριβέστερη εκτίμηση.

Η διαδικασία που περιεγράφηκε παραπάνω, επαναλήφθηκε για κάθε ομάδα μελών και στους δύο εξεταζόμενους φορείς. Όπως προαναφέρθηκε, εξετάστηκαν δύο τιμές του δείκτη πυραντίστασης: R60 θεωρώντας εγκατάσταση αυτόματου συστήματος καταιονισμού ύδατος, και R120 όπως προκύπτει κανονικά για το υπό εξέταση κτήριο, σύμφωνα με τον ελληνικό κανονισμό πυροπροστασίας κτηρίων. Τα αποτελέσματα για τον Φορέα 1 παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.4 και τα αποτελέσματα για τον Φορέα 2 στον Πίνακα 3.5. Στους πίνακες αναγράφονται τα υπολογισμένα, αλλά και τα υλοποιήσιμα πάχη μονωτικού υλικού, ανά ομάδα μελών, μονωτικό υλικό και δείκτη πυραντίστασης. Τα μέλη του Φορέα 1 με διατομή HEA120, δεν διαφοροποιήθηκαν στον Φορέα 2 και επομένως διαστασιολογήθηκαν με τα δυσμενέστερα εντατικά μεγέθη, που προέκυψαν από το προσομοίωμα του Φορέα 2.

Πίνακας 3.4: Απαιτούμενα πάχη μονωτικών υλικών στα μέλη του Φορέα 1.

Διατομή Μέλους	HEA 400							
	Μονωτικό Υλικό		SteelMaster 1200WF		Fireline		SLV	
Δείκτης Πυραντίστασης [min]	60	120	60	120	60	120	60	120
Κρίσιμη Θερμοκρασία [°C]	672							
Θεωρητικό Απαιτούμενο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000355	0.001355	0.0080	0.0191	0.0049	0.0121		
Εφαρμόσιμο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000355	0.001355	0.0100	0.0200	0.0100	0.0130		

Διατομή Μέλους	HEA 340							
	Μονωτικό Υλικό		SteelMaster 1200WF		Fireline		SLV	
Δείκτης Πυραντίστασης [min]	60	120	60	120	60	120	60	120
Κρίσιμη Θερμοκρασία [°C]	815							
Θεωρητικό Απαιτούμενο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000278	0.000799	0.0037	0.0108	0.0023	0.0068		
Εφαρμόσιμο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000278	0.000799	0.0100	0.0125	0.0100	0.0100		

Διατομή Μέλους	HEA 320					
Μονωτικό Υλικό	SteelMaster 1200WF		Fireline		SLV	
Δείκτης Πυραντίστασης [min]	60	120	60	120	60	120
Κρίσιμη Θερμοκρασία [°C]	623					
Θεωρητικό Απαιτούμενο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000463	0.001715	0.0108	0.0245	0.0069	0.0166
Εφαρμόσιμο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000463	0.001715	0.0125	0.0250	0.0100	0.0170

Διατομή Μέλους	HEA 280					
Μονωτικό Υλικό	SteelMaster 1200WF		Fireline		SLV	
Δείκτης Πυραντίστασης [min]	60	120	60	120	60	120
Κρίσιμη Θερμοκρασία [°C]	950					
Θεωρητικό Απαιτούμενο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000278	0.00095	0.0001	0.0082	0.0000	0.0053
Εφαρμόσιμο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000278	0.00095	0.0100	0.0100	0.0100	0.0100

Διατομή Μέλους	HEA 240					
Μονωτικό Υλικό	SteelMaster 1200WF		Fireline		SLV	
Δείκτης Πυραντίστασης [min]	60	120	60	120	60	120
Κρίσιμη Θερμοκρασία [°C]	1020					
Θεωρητικό Απαιτούμενο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000278	0.001001	0.0001	0.0050	0.0000	0.0032
Εφαρμόσιμο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000278	0.001001	0.0100	0.0100	0.0100	0.0100

Διατομή Μέλους	CHS 139.7/8					
Μονωτικό Υλικό	SteelMaster 1200WF		Fireline		SLV	
Δείκτης Πυραντίστασης [min]	60	120	60	120	60	120
Κρίσιμη Θερμοκρασία [°C]	840					
Θεωρητικό Απαιτούμενο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000726	0.001549	0.0060	0.0174	0.0019	0.0059
Εφαρμόσιμο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000726	0.001549	0.0100	0.0200	0.0100	0.0100

Διατομή Μέλους	CHS 114.3/5					
Μονωτικό Υλικό	SteelMaster 1200WF		Fireline		SLV	
Δείκτης Πυραντίστασης [min]	60	120	60	120	60	120
Κρίσιμη Θερμοκρασία [°C]	770					
Θεωρητικό Απαιτούμενο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000726	0.002344	0.0112	0.0269	0.0068	0.0113
Εφαρμόσιμο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000726	0.002344	0.0125	0.0300	0.0100	0.0120

Διατομή Μέλους	CHS 88.9/4					
Μονωτικό Υλικό	SteelMaster 1200WF		Fireline		SLV	
Δείκτης Πυραντίστασης [min]	60	120	60	120	60	120
Κρίσιμη Θερμοκρασία [°C]	800					
Θεωρητικό Απαιτούμενο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000726	0.002728	0.0119	0.0282	0.0044	0.0126
Εφαρμόσιμο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000726	0.002728	0.0125	0.0300	0.0100	0.0130

Πίνακας 3.5: Απαιτούμενα πάχη μονωτικών υλικών στα μέλη του Φορέα 2.

Διατομή Μέλους	HEB 400					
	SteelMaster		Fireline		SLV	
Μονωτικό Υλικό	60	120	60	120	60	120
Δείκτης Πυραντίστασης [min]	60	120	60	120	60	120
Κρίσιμη Θερμοκρασία [°C]	693					
Θεωρητικό Απαιτούμενο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000301	0.000829	0.0060	0.0149	0.0036	0.0092
Εφαρμόσιμο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000301	0.000829	0.0100	0.0150	0.0100	0.0100

Διατομή Μέλους	HEB 320					
	SteelMaster		Fireline		SLV	
Μονωτικό Υλικό	60	120	60	120	60	120
Δείκτης Πυραντίστασης [min]	60	120	60	120	60	120
Κρίσιμη Θερμοκρασία [°C]	860					
Θεωρητικό Απαιτούμενο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000278	0.000673	0.0024	0.0079	0.0015	0.0049
Εφαρμόσιμο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000278	0.000673	0.0100	0.0100	0.0100	0.0100

Διατομή Μέλους	HEB 300					
	SteelMaster		Fireline		SLV	
Μονωτικό Υλικό	60	120	60	120	60	120
Δείκτης Πυραντίστασης [min]	60	120	60	120	60	120
Κρίσιμη Θερμοκρασία [°C]	657					
Θεωρητικό Απαιτούμενο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000278	0.000946	0.0079	0.0189	0.0050	0.0124
Εφαρμόσιμο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000278	0.000946	0.0100	0.0200	0.0100	0.0130

Διατομή Μέλους	HEB 260					
	SteelMaster		Fireline		SLV	
Μονωτικό Υλικό	60	120	60	120	60	120
Δείκτης Πυραντίστασης [min]	60	120	60	120	60	120
Κρίσιμη Θερμοκρασία [°C]	970					
Θεωρητικό Απαιτούμενο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000278	0.000748	0.0000	0.0059	0.0000	0.0037
Εφαρμόσιμο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000278	0.000748	0.0100	0.0100	0.0100	0.0100

Διατομή Μέλους	HEB 220					
	SteelMaster		Fireline		SLV	
Μονωτικό Υλικό	60	120	60	120	60	120
Δείκτης Πυραντίστασης [min]	60	120	60	120	60	120
Κρίσιμη Θερμοκρασία [°C]	880					
Θεωρητικό Απαιτούμενο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000278	0.000824	0.0027	0.0092	0.0017	0.0058
Εφαρμόσιμο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000278	0.000824	0.0100	0.0100	0.0100	0.0100

Διατομή Μέλους	CHS 139.7/10					
	SteelMaster		Fireline		SLV	
Μονωτικό Υλικό	60	120	60	120	60	120
Δείκτης Πυραντίστασης [min]	60	120	60	120	60	120
Κρίσιμη Θερμοκρασία [°C]	885					
Θεωρητικό Απαιτούμενο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000726	0.001328	0.0044	0.0134	0.0014	0.0045
Εφαρμόσιμο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000726	0.001328	0.0100	0.0150	0.0100	0.0100

Διατομή Μέλους	CHS 114.3/8					
Μονωτικό Υλικό	SteelMaster		Fireline		SLV	
Δείκτης Πυραντίστασης [min]	60	120	60	120	60	120
Κρίσιμη Θερμοκρασία [°C]	785					
Θεωρητικό Απαιτούμενο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000726	0.001549	0.0073	0.0193	0.0024	0.0069
Εφαρμόσιμο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000726	0.001549	0.0100	0.0200	0.0100	0.0100

Διατομή Μέλους	CHS 88.9/6					
Μονωτικό Υλικό	SteelMaster		Fireline		SLV	
Δείκτης Πυραντίστασης [min]	60	120	60	120	60	120
Κρίσιμη Θερμοκρασία [°C]	820					
Θεωρητικό Απαιτούμενο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000726	0.001901	0.0081	0.0217	0.0027	0.0082
Εφαρμόσιμο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000726	0.001901	0.0100	0.0250	0.0100	0.0100

Διατομή Μέλους	HEA 120					
Μονωτικό Υλικό	SteelMaster		Fireline		SLV	
Δείκτης Πυραντίστασης [min]	60	120	60	120	60	120
Κρίσιμη Θερμοκρασία [°C]	1035					
Θεωρητικό Απαιτούμενο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000496	0.001974	0.0000	0.0008	0.0000	0.0011
Εφαρμόσιμο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000496	0.001974	0.0100	0.0100	0.0100	0.0100

4 ΚΟΣΤΟΛΟΓΗΣΗ ΠΥΡΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Αφού ολοκληρώθηκε η μελέτη παθητικής πυροπροστασίας, πραγματοποιήθηκε μεταξύ των διαφόρων μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν, μία ανάλυση κόστους - οφέλους. Σκοπός της διαδικασίας ήταν η εύρεση της οικονομικά βέλτιστης λύσης παθητικής πυροπροστασίας, για το εξεταζόμενο κτήριο αποθήκης. Για να επιτευχθεί η σύγκριση αυτή, έπρεπε πρώτα να βρεθούν οι τιμές εμπορίου των χρησιμοποιούμενων υλικών, καθώς και τα κόστη εργασίας για την εγκατάσταση των μονωτικών. Τα κόστη των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν, βρέθηκαν σε ιστοσελίδες εμπόρων, που διανέμουν τα συγκεκριμένα υλικά στην Ελλάδα ή σε άλλες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Για τα κόστη εργασίας χρησιμοποιήθηκε ένα εύρος τιμών (μέγιστες και ελάχιστες τιμές), που δόθηκε από ειδικό στην κοστολόγηση και εκτίμηση προϋπολογισμού έργων. Τέλος, για την πλήρη κοστολόγηση των συστημάτων παθητικής πυροπροστασίας, εκτιμήθηκαν κάποια τυπικά ποσοστά απώλειας των μονωτικών υλικών κατά την διαδικασία της εγκατάστασης, που αναμένεται να αυξήσουν, ελαφρώς, το εκτιμώμενο κόστος.

Τα κόστη υπολογίστηκαν ανά τρέχον μέτρο μέλους, για την κάθε ομάδα μελών, ξεχωρίζοντας το κόστος του υλικού (μαζί με τις απώλειες), το κόστος της εργασίας και το κόστος του χάλυβα. Έτσι, μπόρεσαν να γίνουν πολυεπίπεδες συγκρίσεις μεταξύ των μεθόδων. Οι τελικές συγκρίσεις έγιναν χρησιμοποιώντας τις μέσες τιμές από τα εύρη που προαναφέρθηκαν για τα κόστη εργασίας και τις εκτιμώμενες απώλειες. Τέλος, για την εκτίμηση του συνολικού κόστους παθητικής πυροπροστασίας, το κόστος κάθε ομάδας μελών απλώς πολλαπλασιάστηκε με το συνολικό μήκος όλων των μελών της ομάδας, ενώ επίσης συνεκτιμήθηκε και το κόστος εγκατάστασης αυτόματου συστήματος καταιονισμού ύδατος, στην περίπτωση που είναι επιθυμητή η μείωση του δείκτη πυραντίστασης στα 60 λεπτά.

4.1 Κόστος Πυροπροστασίας

4.1.1 Κόστος Παθητικής Πυροπροστασίας

Οι τιμές των μονωτικών υλικών υπολογίστηκαν σε ευρώ ανά κυβικό μέτρο, και για τα τρία χρησιμοποιούμενα υλικά. Η αναγωγή στις συγκεκριμένες μονάδες έγινε για λόγους απλούστευσης των υπολογισμών στο χρησιμοποιούμενο λογιστικό φύλλο, ενώ κανονικά, η κοστολόγηση διαφοροποιείται για κάθε υλικό. Οι μονωτικές πλάκες κοστολογούνται, συνήθως, πολλαπλασιάζοντας τον απαραίτητο αριθμό των βιομηχανικώς παραγόμενων πλακών (διατίθενται σε τυποποιημένες διαστάσεις), που χρειάζονται για την επικάλυψη της ζητούμενης επιφάνειας, με την τιμή μονάδας μίας τέτοιας πλάκας. Για

διαφορετικά πάχη μονωτικών πλακών η τιμή μονάδας προφανώς διαφέρει. Στην παρούσα εργασία η τιμή υπολογίστηκε βάση του κόστους μίας πλάκας διαστάσεων 2.000 * 1.200 * 12.5mm¹.

Τυπικά, για την κοστολόγηση βαφής με διογκούμενα χρώματα ή επιχρίσματα διατίθεται, από τον παραγωγό, πίνακας με το απαιτούμενο βάρος υλικού ανά τετραγωνικό μέτρο κάλυψης για κάθε συντελεστή διατομής, το οποίο πολλαπλασιάζεται τελικώς με την συνολική επιφάνεια που χρειάζεται παθητική πυροπροστασία. Στην παρούσα περίπτωση δεν ήταν γνωστό το συγκεκριμένο δεδομένο και η τιμή υπολογίστηκε καθαρά βάσει των απαιτούμενων παχών και του κόστους ανά τενεκέ χρώματος / επιχρίσματος με μικρή προσαύξηση της τιμής².

Όπως προαναφέρθηκε, εκτίμηση του κόστους των εργασιών προέκυψε από ειδικό στον προϋπολογισμό έργων, αλλά και σύντομης έρευνας στο διαδίκτυο. Οι τιμές που, τελικά, χρησιμοποιήθηκαν (πρώτη ύλη και εργασία) συνοψίζονται, και για τα τρία υλικά, στον Πίνακα 4.1: Κόστη υλικών και εργασιών των εξεταζόμενων μονωτικών υλικών.. Για τον χάλυβα θεωρήθηκε κόστος 2 €/kg.

Πίνακας 4.1: Κόστη υλικών και εργασιών των εξεταζόμενων μονωτικών υλικών.

Χαρακτηριστικά Jotun SteelMaster 1200WF (Intumescent Coating)		
Κόστος [€/m³]	Λιανική Τιμή Εμπορίου	21081.08
Εκτιμώμενο Ποσοστό Απώλειας Υλικού [%]	min – max	20-30%
Εκτιμώμενο Κόστος Εργασίας [€/m²]	min - max	30-50
Ελάχιστο Κόστος [€/m³]	Λιανική Τιμή + Απώλειες	25297.30
Μέγιστο Κόστος [€/m³]	Λιανική Τιμή + Απώλειες	27405.41
Μέσο Κόστος [€/m³]	Λιανική Τιμή + Απώλειες	26351.35

Χαρακτηριστικά Rigips Saint-Gobain Fireline (Γυψοσανίδα)		
Κόστος [€/m³]	Λιανική Τιμή Εμπορίου	433.3
Εκτιμώμενο Ποσοστό Απώλειας Υλικού [%]	min - max	5-10%
Εκτιμώμενο Κόστος Εργασίας [€/m²]	min - max	70-90
Ελάχιστο Κόστος [€/m³]	Λιανική Τιμή + Απώλειες	455.00
Μέγιστο Κόστος [€/m³]	Λιανική Τιμή + Απώλειες	476.67
Μέσο Κόστος [€/m³]	Λιανική Τιμή + Απώλειες	465.83

¹ Για την τιμή των γυψοσανίδων Fireline χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές από την ιστοσελίδα <https://monotikashop.gr/product/gypsosanida-pyrantoxi-rigips-2000x1200x12-5/> (Αύγουστος 2023)

² Για την τιμή του χρώματος SteelMaster 1200WF και του επιχρίσματος Βερμικουλίτη SLV χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές από τις ιστοσελίδες <https://www.indiamart.com/proddetail/cafco-300-fireproof-coating-13275063388.html> και <https://www.ultrimaxstore.com/paint/intumescent-paint-for-steel/jotun-steelmaster-1200wf-white.ipf215> αντίστοιχα.

Χαρακτηριστικά Sprayed Limpet Vermiculite - SLV (Sprayed Coating)		
Κόστος [€/m ³]	Λιανική Τιμή Εμπορίου	450
Εκτιμώμενο Ποσοστό Απώλειας Υλικού [%]	min - max	10-20%
Εκτιμώμενο Κόστος Εργασίας [€/m ²]	min - max	30-50
Ελάχιστο Κόστος [€/m ³]	Λιανική Τιμή + Απώλειες	495.00
Μέγιστο Κόστος [€/m ³]	Λιανική Τιμή + Απώλειες	540.00
Μέσο Κόστος [€/m ³]	Λιανική Τιμή + Απώλειες	517.50

Με τα δεδομένα των Πίνακας 3.4, Πίνακας 3.5 και Πίνακας 4.1 και για κάθε συνδυασμό των μεθόδων πυροπροστασίας, προέκυψαν αναλυτικοί πίνακες κοστολόγησης για όλες τις κατηγορίες διατομών των Φορέων 1 και 2, οι οποίοι συμπεριλαμβάνονται στο Παράρτημα Β: . Ενδεικτικά, στον Πίνακας 4.2 παρουσιάζεται αναλυτικά η κοστολόγηση παθητικής πυροπροστασίας των μελών διατομής HEA400 του Φορέα 1.

Πίνακας 4.2: Κοστολόγηση παθητικής πυροπροστασίας διατομής HEA400 με εναλλακτικές μεθόδους.

Διατομή Μέλους	HEA 400					
	SteelMaster 1200WF		Fireline		SLV	
Μονωτικό Υλικό						
Δείκτης Πυραντίστασης [min]	60	120	60	120	60	120
Κρίσιμη Θερμοκρασία [°C]	672					
Θεωρητικό Απαιτούμενο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000355	0.001355	0.0080	0.0191	0.0049	0.0121
Εφαρμόσιμο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000355	0.001355	0.0100	0.0200	0.0100	0.0130
Βάρος Χάλυβα ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [kg/m]	125					
Επιφάνεια Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [m ² /m]	1.91		1.38		1.91	
Κόστος Χάλυβα [€/kg]	2					
Κόστος Χάλυβα ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	250					
Κόστος Πυροπροστατευτικού Υλικού [€/m ³]	21000		433.3		450	
Ελάχιστες Απώλειες Μονωτικού Υλικού	20%		5%		10%	
Μέγιστες Απώλειες Μονωτικού Υλικού	30%		10%		20%	
Ελάχιστο Κόστος Εργασίας και Εξοπλισμού Εγκατάστασης [€/m ²]	30.00		70.00		30.00	
Μέγιστο Κόστος Εργασίας και Εξοπλισμού Εγκατάστασης [€/m ²]	50.00		90.00		50.00	
Ελάχιστο Κόστος Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	17.09	65.22	6.28	12.56	9.45	12.29
Μέγιστο Κόστος Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	18.51	70.65	6.58	13.15	10.31	13.41
Ελάχιστο Κόστος Εργασίας ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	57.3		96.6		57.3	
Μέγιστο Κόστος Εργασίας ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	95.5		124.2		95.5	
Συνολικό Ελάχιστο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	324.39	372.52	352.88	359.16	316.75	319.59
Συνολικό Μέγιστο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	364.01	416.15	380.78	387.35	355.81	358.91
Συνολικό Μέσο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	344.20	394.34	366.83	373.26	336.28	339.25

Από την παραπάνω εικόνα μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι το κόστος των εργασιών υπερಿಸχύνει σημαντικά αυτού της πρώτης ύλης και για τις τρεις μεθόδους πυροπροστασίας. Καθώς οι συγκεκριμένες εργασίες απαιτούν εξειδικευμένο προσωπικό και ειδικό εξοπλισμό, κάτι τέτοιο είναι αναμενόμενο. Δεν θα μπορούσαμε να παραλείψουμε, λοιπόν, το κόστος των εργασιών κατά την κοστολόγηση της παθητικής πυροπροστασίας, αφού με αυτόν τον τρόπο θα αγνοούσαμε μεγάλο μέρος του προϋπολογισμού.

4.1.2 Κόστος Ενεργητικής Πυροπροστασίας

Ωστόσο, εκτός του κόστους μόνωσης των μελών (παθητική πυροπροστασία), χρειάζεται να υπολογισθεί και το κόστος του συστήματος καταιονισμού ύδατος (ενεργητική πυροπροστασία). Για να διερευνηθεί αν η εγκατάσταση συστήματος καταιονισμού ύδατος, η οποία συνεπάγεται μείωση του δείκτη πυραντίστασης κατά μία ώρα, σύμφωνα με τον ελληνικό κανονισμό πυ είναι οικονομικά συμφέρουσα, χρειάστηκε μια εκτίμηση για το κόστος εγκατάστασής του. Έτσι, από μηχανικό που ειδικεύεται σε συστήματα πυροπροστασίας δόθηκε μία τυπική τιμή για εγκατάσταση καταιονητήρων στον συγκεκριμένο τύπο κτηρίου (βιομηχανικό κτήριο αποθήκης), που συνοψίζεται αναλυτικά στον Πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.3: Κόστος ενεργητικής πυροπροστασίας βιομηχανικού κτηρίου.

Σύστημα Καταιονισμού Ύδατος	
Κόστος [€/sprinkler]	100
Καλυπτότητα Καταιονητήρα [m ² /sprinkler]	12
Τυπική Προσαύξηση Κόστους	20%

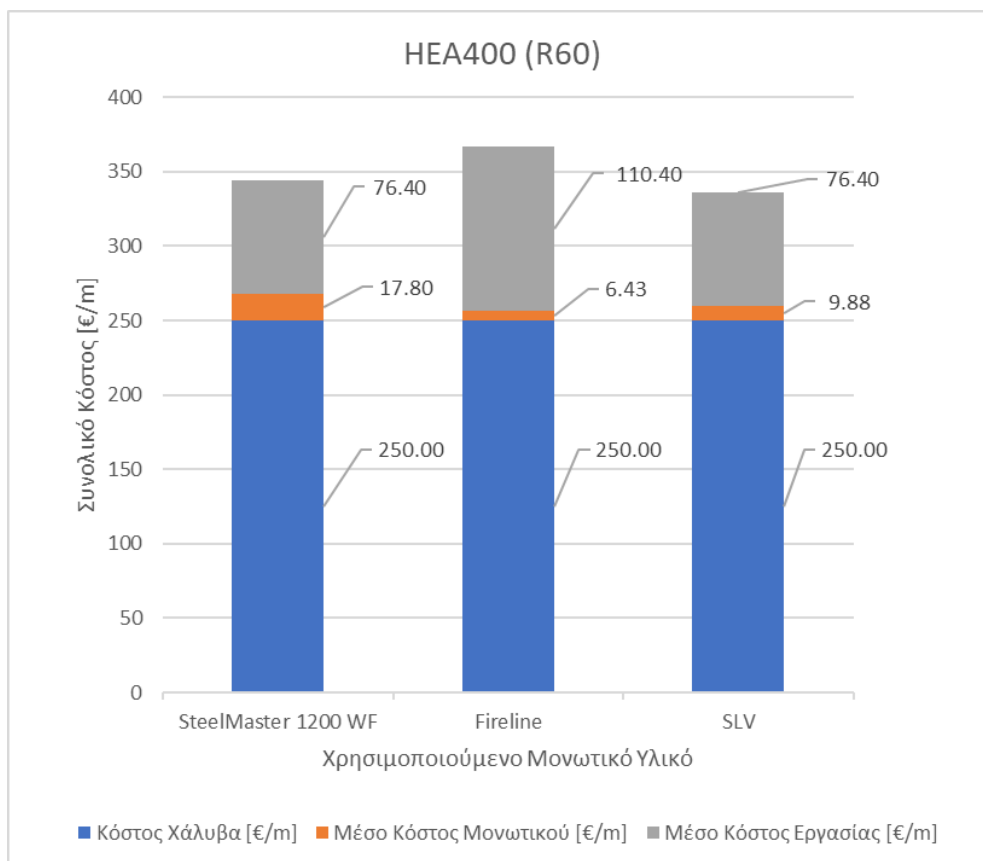
4.2 Σύγκριση Αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις διαδικασίες που περιεγράφηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια συγκροτούν μεγάλο όγκο δεδομένων, και επομένως, ήταν επιθυμητή μια μορφή κατηγοριοποίησης-ομαδοποίησής τους πριν την επί μέρους σύγκρισή τους. Η σύγκριση έγινε σε πολλά διαφορετικά επίπεδα, ξεκινώντας από σύγκριση της οικονομικότητας των τριών μεθόδων παθητικής πυροπροστασίας (διογκούμενες βαφές, πυράντοχες πλάκες και εκτοξευόμενα επιχρίσματα) για τις δύο ενδεχόμενες τιμές του δείκτη πυραντίστασης. Στη συνέχεια, συγκρίθηκαν οι δύο ενδεχόμενοι φορείς και η επιρροή της μεταβολής του πάχους των διατομών στην οικονομικότητα της κατασκευής, ενώ τέλος, υπολογίστηκε αθροιστικά το συνολικό κόστος πυροπροστασίας των δύο φορέων και για τους δύο πιθανούς δείκτες πυραντίστασης. Στον υπολογισμό του κόστους, για μειωμένο δείκτη πυραντίστασης (από 120 σε 60 λεπτά) συμπεριλήφθηκε το κόστος εγκατάστασης συστήματος καταιονισμού ύδατος.

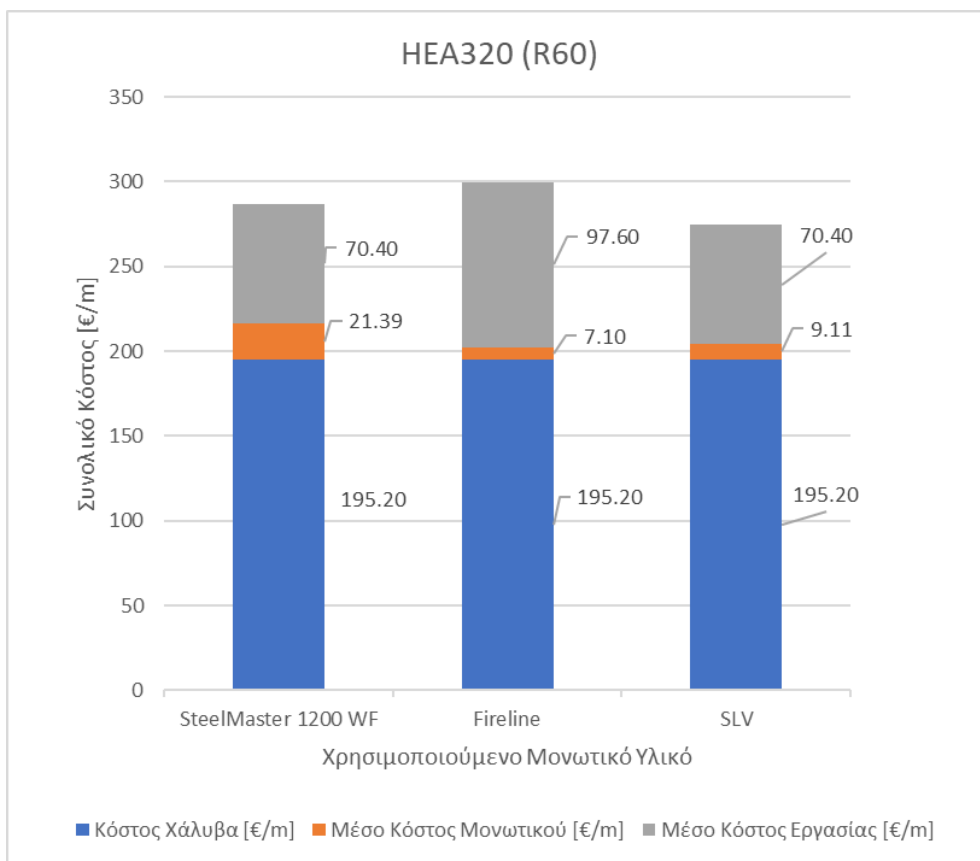
Για πιο εποπτική σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτών, τυπώθηκαν πολλαπλά διαγράμματα (bar-charts) στα οποία απεικονίζονται, πιο καθαρά, οι διακυμάνσεις του κόστους πυροπροστασίας ανάλογα με τα υλικά και τις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν. Επιλέχθηκε να σχεδιαστούν διαγράμματα μόνο για τις κρίσιμότερες ομάδες διατομών, καθώς όπως φαίνεται και στον Πίνακα 3.2, μόνον λίγες ομάδες έχουν χαμηλές τιμές κρίσιμης θερμοκρασίας, και ως εκ τούτου, αυξημένες απαιτήσεις μόνωσης. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα για τα μέλη με διατομές HEA400-HEB400, HEA320-HEB300 και CHS114.3/5-CHS114.3/8. Οι διατομές HEA400, HEB400, HEA320 και HEB300 είναι οι πιο κρίσιμες από άποψη απαιτήσεως παθητικής πυροπροστασίας από τις διατομές διπλού ταυ, ενώ οι CHS114.3/5 και CHS114.3/8 είναι οι κρίσιμότερες από τις κοίλες κυκλικές διατομές.

4.2.1 Σύγκριση Οικονομικότητας Μεθόδων Παθητικής Πυροπροστασίας

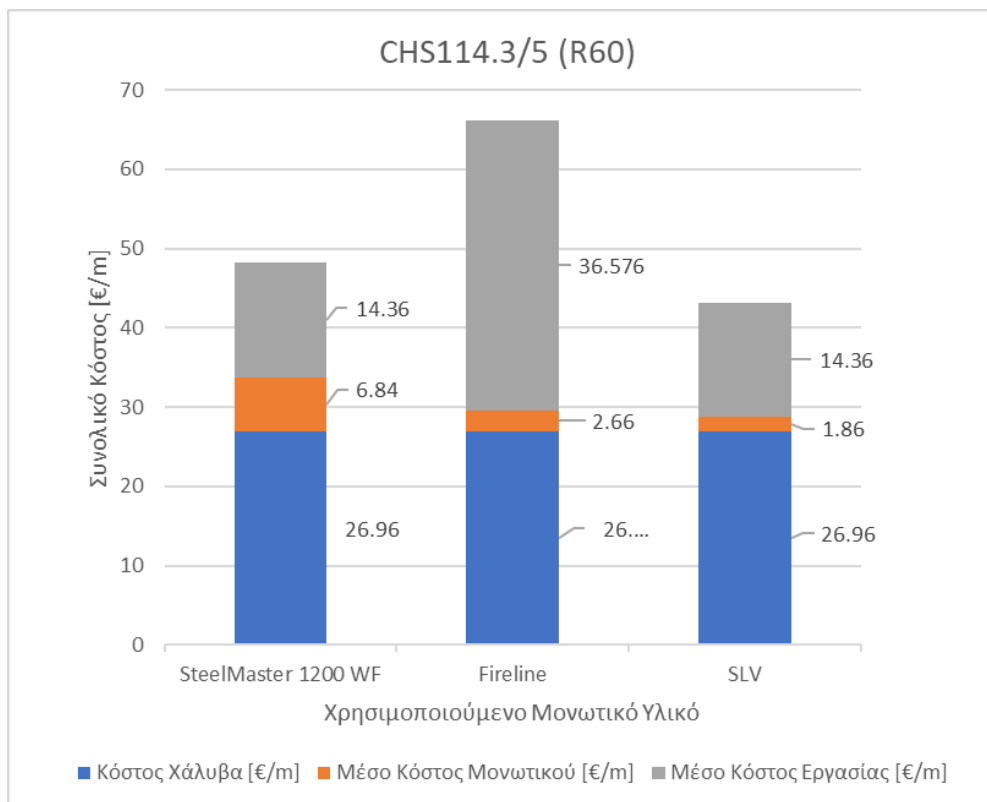
Οι πρώτες συγκρίσεις πραγματοποιήθηκαν μεταξύ των τριών μονωτικών υλικών για διαφορετικές διατομές και χρόνους πυραντίστασης. Οι τιμές για τα κόστη των υλικών και των εργασιών, που απεικονίζονται στα διαγράμματα, έχουν προκύψει από τις μέσες τιμές του Πίνακα 4.1: Κόστη υλικών και εργασιών των εξεταζόμενων μονωτικών υλικών.. Όπως προαναφέρθηκε, θα παρουσιαστούν διαγράμματα μόνο για τις πιο κρίσιμες ομάδες διατομών. Στις Εικόνα 4-1, Εικόνα 4-2 και Εικόνα 4-3 απεικονίζεται η κοστολόγηση της παθητικής πυροπροστασίας με χρήση των τριών μεθόδων, για τις κρίσιμότερες διατομές του Φορέα 1 και για δείκτη πυραντίστασης R60, ενώ στις Εικόνα 4-4, Εικόνα 4-5 και Εικόνα 4-6, η κοστολόγηση παθητικής πυροπροστασίας για τις κρίσιμότερες διατομές του Φορέα 1 και για δείκτη πυραντίστασης R120.



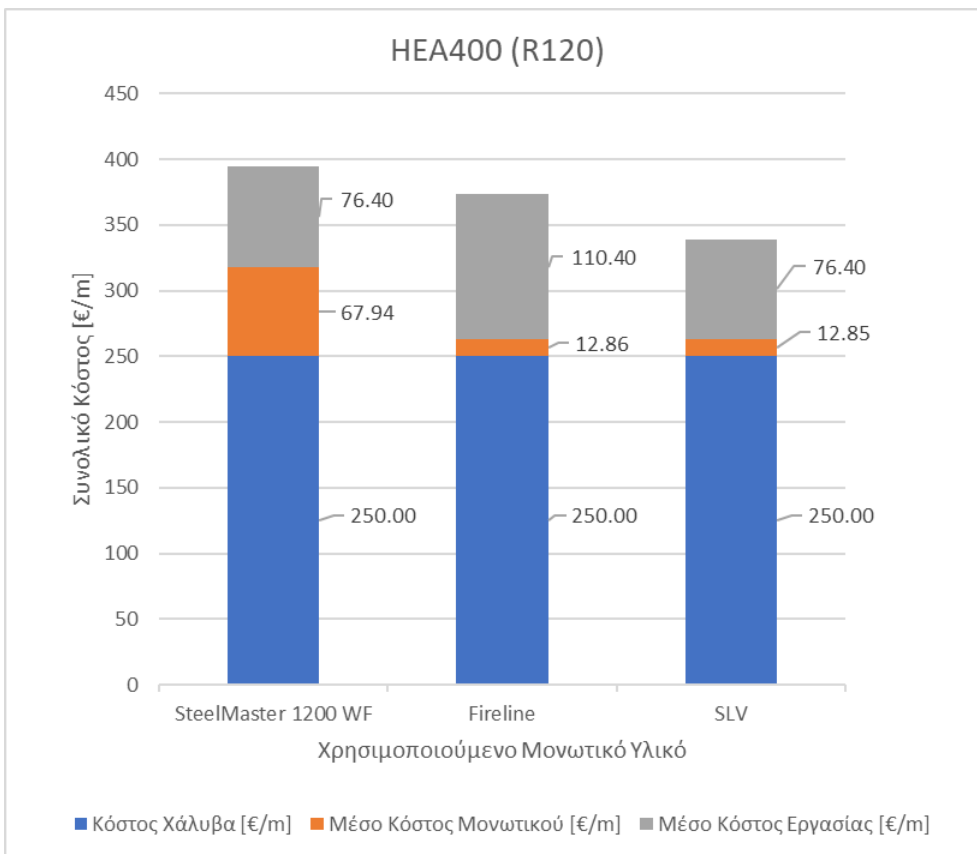
Εικόνα 4-1: Κοστολόγηση παθητικής πυροπροστασίας των HEA400 για δείκτη πυραντίστασης R60.



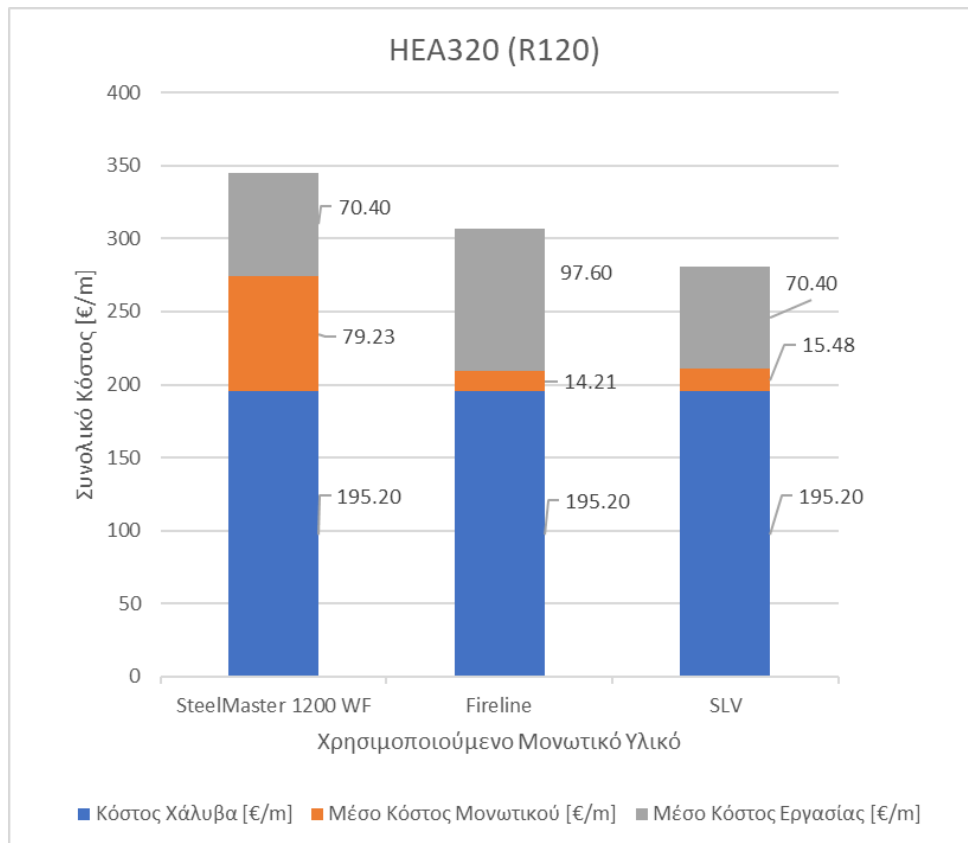
Εικόνα 4-2: Κοστολόγηση παθητικής πυροπροστασίας των HEA4320 για δείκτη πυραντίστασης R60.



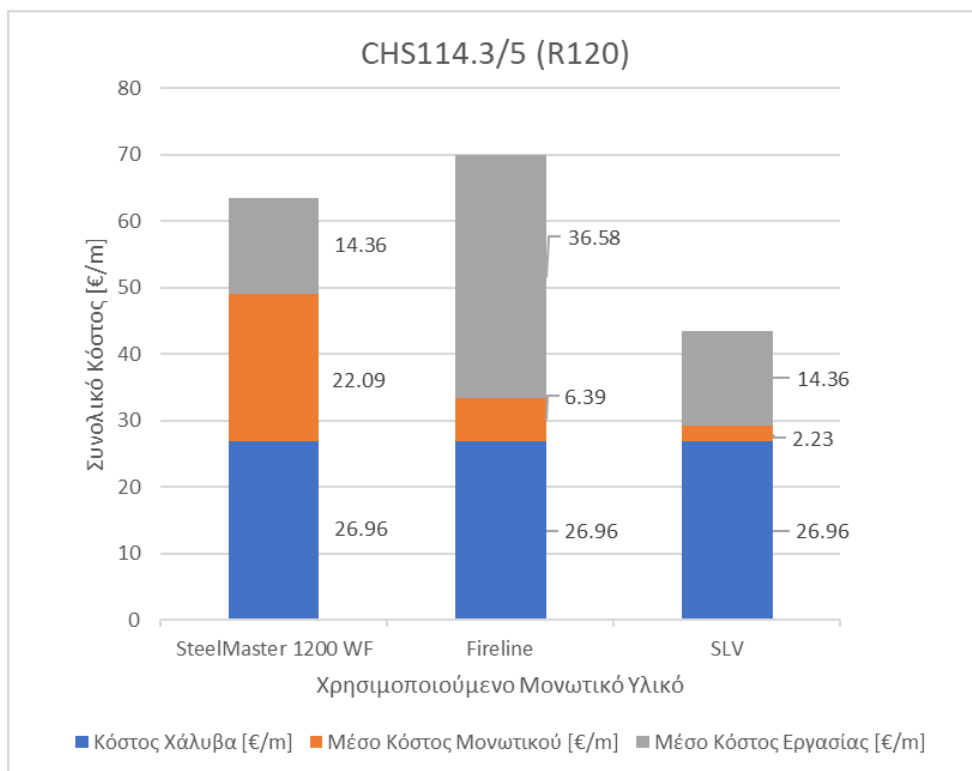
Εικόνα 4-3: Κοστολόγηση παθητικής πυροπροστασίας των CHS114.3/5 για δείκτη πυραντίστασης R60.



Εικόνα 4-4: Κοστολόγηση παθητικής πυροπροστασίας των HEA400 για δείκτη πυραντίστασης R120.



Εικόνα 4-5: Κοστολόγηση παθητικής πυροπροστασίας των HEA320 για δείκτη πυραντίστασης R120.



Εικόνα 4-6: Κοστολόγηση παθητικής πυροπροστασίας των CHS114.3/5 για δείκτη πυραντίστασης R120.

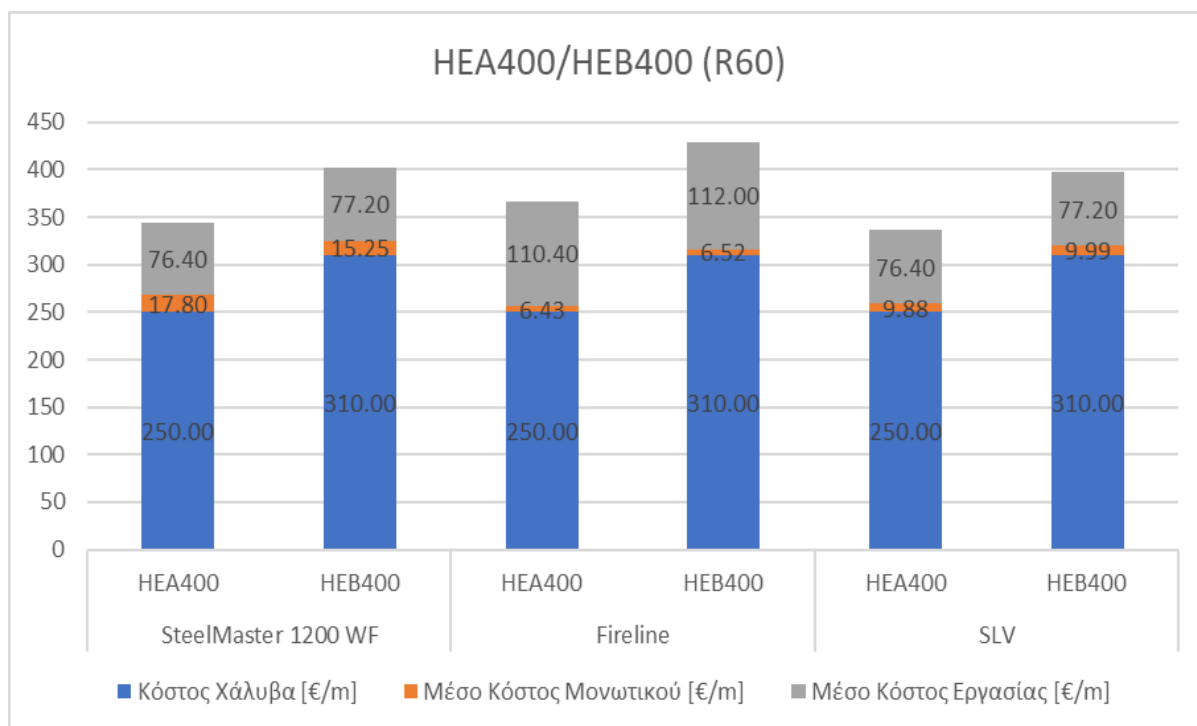
Όπως ήταν αναμενόμενο, σε όλες τις περιπτώσεις, οικονομικότερη λύση αποτελεί η χρήση του εκτοξευόμενου επιχρίσματος βερμικουλίτη SLV. Τόσο το κόστος του υλικού, όσο και το κόστος εγκατάστασής του, είναι τα χαμηλότερα εκ των τριών, ενώ παράλληλα, η υψηλή μονωτική ικανότητά του δεν οδηγεί σε μεγάλα πάχη κατά την διαστασιολόγηση.

Μεγαλύτερο ενδιαφέρον αποτελεί, ωστόσο, η σύγκριση της διογκούμενης βαφής SteelMaster 1200WF με τις μονωτικές γυψοσανίδες Fireline. Τα δύο αυτά υλικά θα αποτελούσαν, ενδεχομένως, πιο προτιμητέες λύσεις μόνωσης, λόγω του καλύτερου αισθητικού αποτελέσματος που προσφέρουν, και επομένως, θα ήταν πιο ανταγωνιστικά μεταξύ τους στην αγορά. Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι για χαμηλές τιμές του δείκτη πυραντίστασης (R60), η χρήση διογκούμενων βαφών φαίνεται να είναι πιο οικονομική και για τις τρεις κρίσιμες διατομές. Αυτό προκύπτει λόγω του, συγκριτικά, υψηλού κόστους εγκατάστασης των γυψοσανίδων, που υπερτερεί τις διαφορές στα κόστη των υλικών για τις συγκεκριμένες τιμές του δείκτη πυραντίστασης. Ωστόσο, για μεγαλύτερες τιμές του δείκτη πυραντίστασης (R120), δεν είναι εμφανές ποια είναι η οικονομικότερη μέθοδος εκ των δύο. Για διατομές διπλού ταυ, όπως οι HEA400 και HEA320, οικονομικότερη λύση αποτελεί οι χρήση των γυψοσανίδων Fireline, ενώ για κοίλες κυκλικές διατομές, όπως η CHS114.3/5, οικονομικότερη λύση αποτελεί η χρήση της βαφής SteelMaster 1200WF. Η διαφοροποίηση αυτή οφείλεται στην επιφάνεια που καλύπτει κάθε μονωτικό υλικό και στην σχέση κόστους υλικού - κόστους εγκατάστασης της κάθε μεθόδου. Στις διατομές διπλού ταυ η χρήση γυψοσανίδων συνεπάγεται μικρότερη επιφάνεια μονωτικού ανά τρέχον μέτρο μέλους, σε αντίθεση με τις κοίλες κυκλικές διατομές, όπου συνεπάγεται μεγαλύτερη επιφάνεια μονωτικού ανά τρέχον μέτρο, σε σύγκριση με χρήση διογκούμενων χρωμάτων στις ίδιες διατομές.

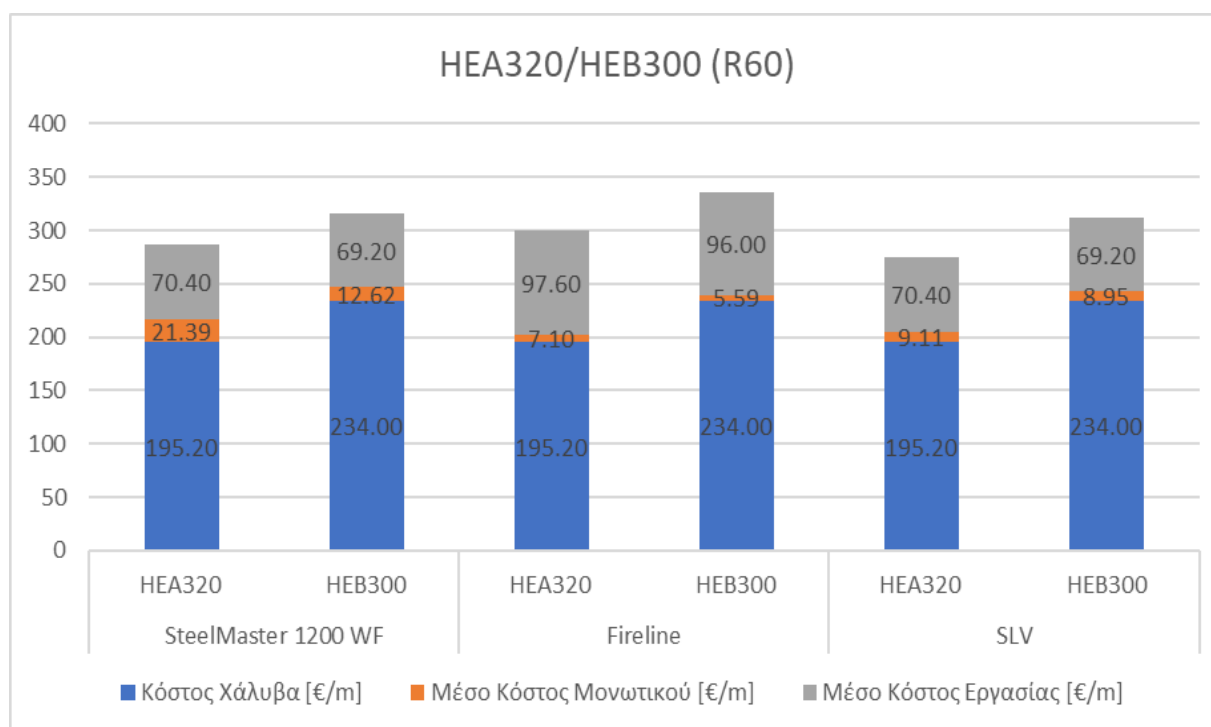
4.2.2 Σύγκριση Οικονομικότητας των Φορέων 1 & 2

Με σκοπό να εξετάσουμε την επιρροή της αύξησης του πάχους των διατομών στην οικονομικότητα της κατασκευής, στα διαγράμματα των Εικόνα 4-1 έως Εικόνα 4-6 προστέθηκαν οι τιμές που προκύπτουν για τα μέλη, αν επιλεγεί ο Φορέας 2. Στις Εικόνα 4-7, Εικόνα 4-8 και Εικόνα 4-9 απεικονίζεται η κοστολόγηση της παθητικής πυροπροστασίας με χρήση των τριών μεθόδων, για τις κρίσιμότερες

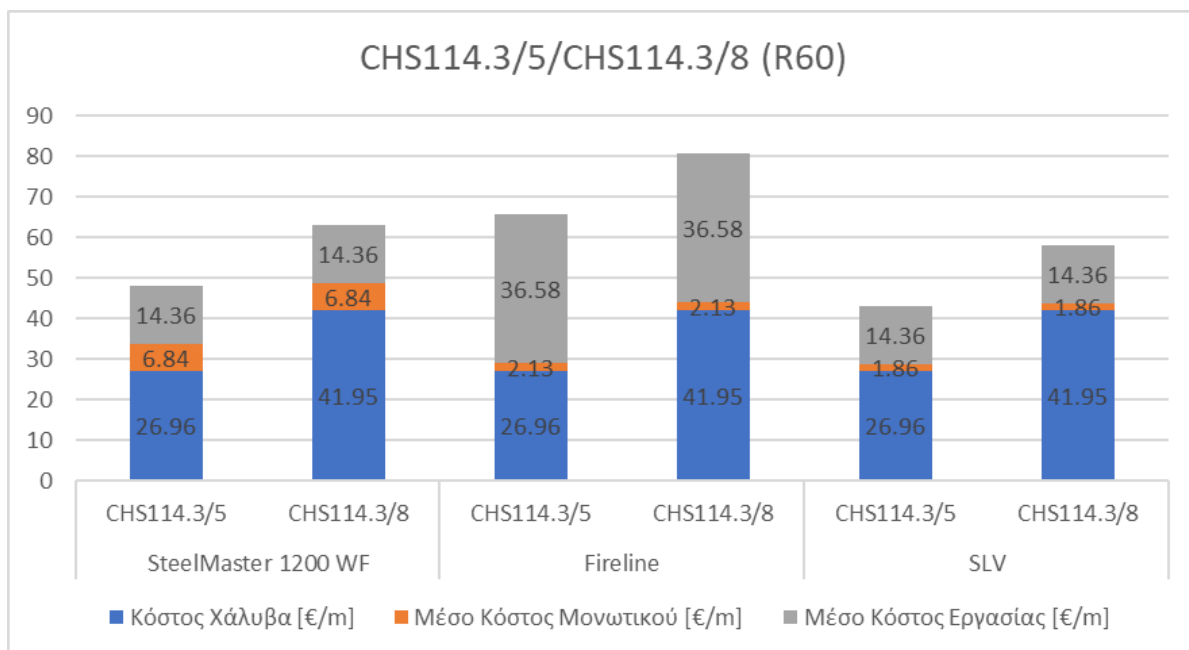
διατομές και για δείκτη πυραντίστασης R60, ενώ στις Εικόνα 4-10, Εικόνα 4-11 και Εικόνα 4-12, η κοστολόγηση παθητικής πυροπροστασίας για τις κρισιμότερες διατομές και για δείκτη πυραντίστασης R120. Στα διαγράμματα είναι ευδιάκριτη η μεταβολή της τιμής των μελών ανά μέτρο μήκους, με μοναδική αλλαγή, αυτήν στα πάχη των ελασμάτων.



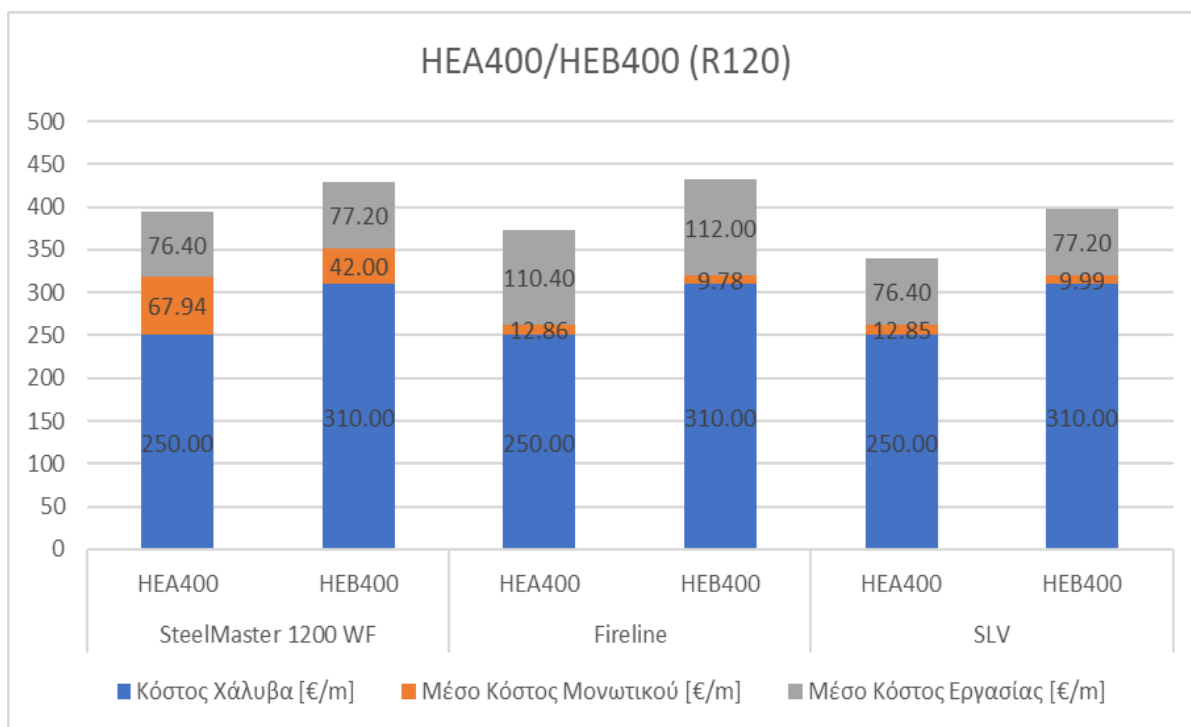
Εικόνα 4-7: Κοστολόγηση παθητικής πυροπροστασίας των HEA400 & HEB400 για δείκτη πυραντίστασης R60.



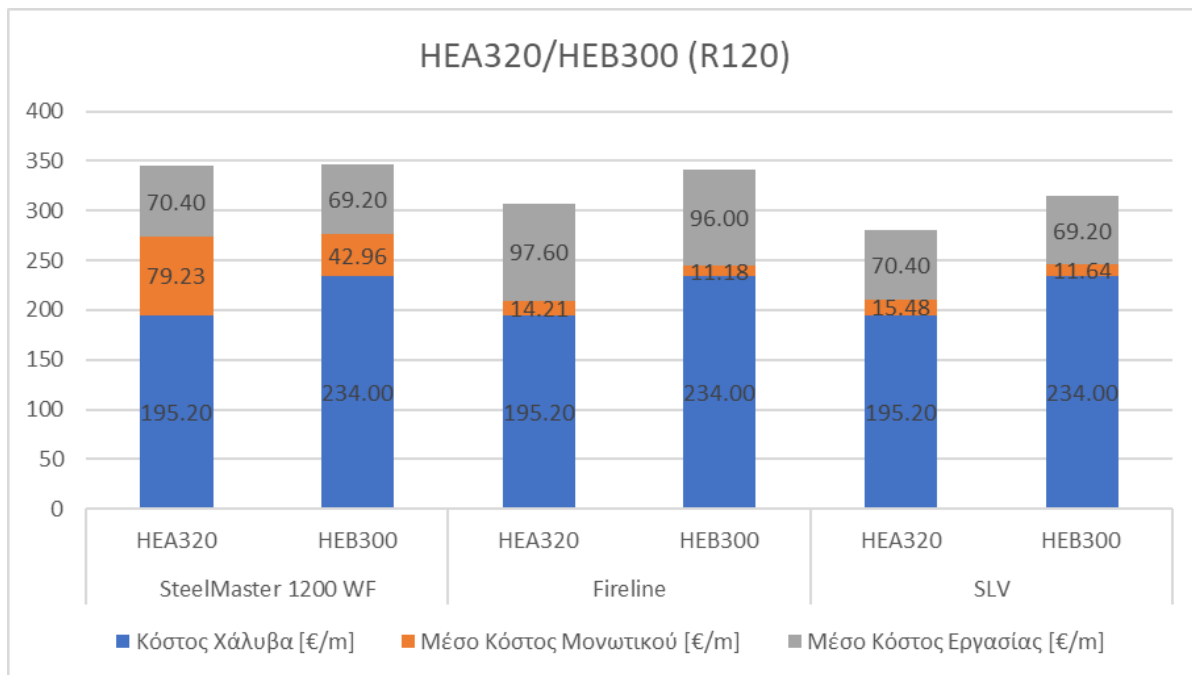
Εικόνα 4-8: Κοστολόγηση παθητικής πυροπροστασίας των HEA320 & HEB300 για δείκτη πυραντίστασης R60.



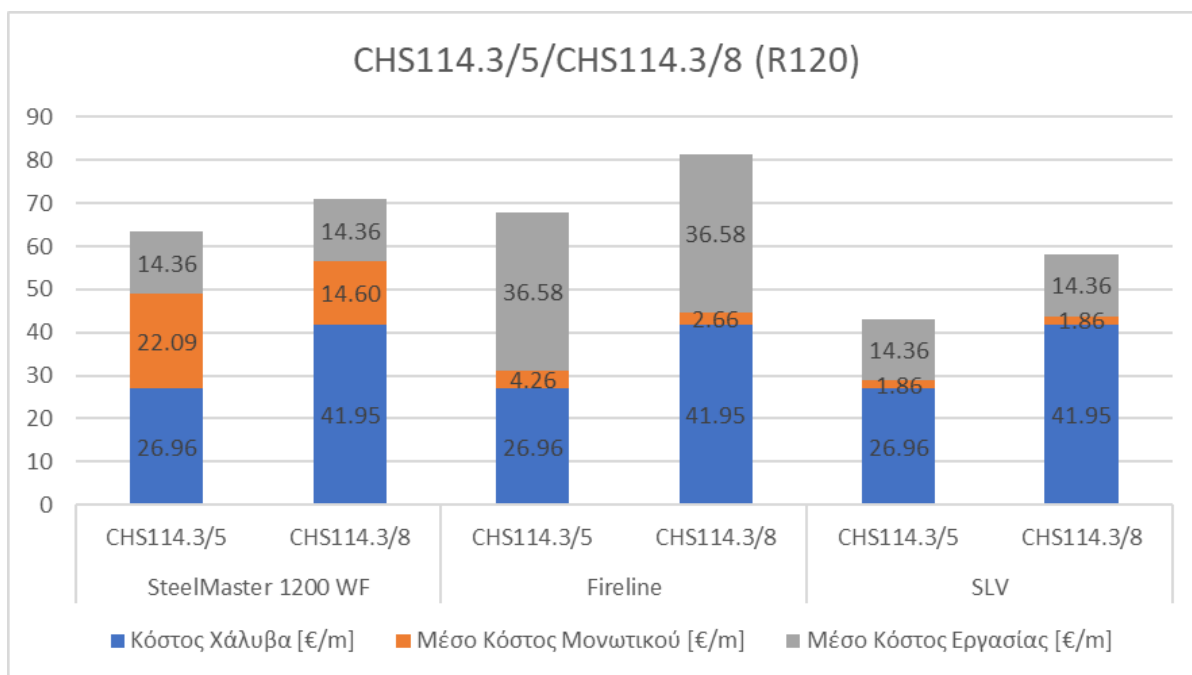
Εικόνα 4-9: Κοστολόγηση παθητικής πυροπροστασίας των CHS114.3/5 & CHS114.3/8 για δείκτη πυραντίστασης R60.



Εικόνα 4-10: Κοστολόγηση παθητικής πυροπροστασίας των HEA400 & HEB400 για δείκτη πυραντίστασης R120.



Εικόνα 4-11: Κοστολόγηση παθητικής πυροπροστασίας των HEA320 & HEB300 για δείκτη πυραντίστασης R120.



Εικόνα 4-12: Κοστολόγηση παθητικής πυροπροστασίας των CHS114.3/5 & Η CHS114.3/8 για δείκτη πυραντίστασης R120.

Σε όλες τις παραπάνω εικόνες γίνεται ξεκάθαρο ότι, τουλάχιστον για τον εξεταζόμενο φορέα, με τις συγκεκριμένες συνθήκες φόρτισης, η πάχυνση των διατομών δεν έχει κανένα ευνοϊκό αποτέλεσμα στην οικονομικότητα της παθητικής πυροπροστασίας της κατασκευής. Αίτιο του αποτελέσματος αυτού, είναι οι υψηλές τιμές κρίσιμων θερμοκρασιών των μελών, που προκύπτουν από τον συνδυασμό δράσεων της πυρκαγιάς σχεδιασμού. Τα κρίσιμα φορτία του συνδυασμού της πυρκαγιάς είναι υποπολλαπλάσια αυτών για τα οποία σχεδιάστηκαν τα μέλη και έτσι το υλικό παθητικής πυροπροστασίας και ο συντελεστής διατομής δεν αποτελούν τόσο σημαντικούς παράγοντες κόστους. Στον συνδυασμό πυρκαγιάς δεν συμπεριλαμβάνονται φορτία από άνεμο, χιόνι ή σεισμό, που είναι τα πλέον κρίσιμα, αλλά ούτε και τα

φορτία αποθήκευσης, τα οποία μεταβιβάζονται στην υποκείμενη κατασκευή σκυροδέματος. Επομένως, τα φορτία που εντείνουν τον φορέα κατά την διάρκεια της πυρκαγιάς, είναι σημαντικά απομειωμένα, συγκριτικά με αυτά που έχουν χρησιμοποιηθεί για την αρχική διαστασιολόγηση. Αν εξετάζαμε φορέα πολυώροφου κτηρίου όπου τα κινητά φορτία και τα φορτία αποθήκευσης θεωρείται ότι εντείνουν τον μεταλλικό φορέα κατά την πυρκαγιά, ίσως διαπιστωνόταν κάποια ευνοϊκή συνεισφορά της πάχυνσης των διατομών στο κόστος της πυροπροστασίας.

4.2.3 Διερεύνηση της Συνεισφοράς Εγκατάστασης Ενεργητικής Πυροπροστασίας

Τέλος, για να εκτιμήσουμε την συνεισφορά της εγκατάστασης συστήματος καταιονισμού ύδατος, στο τελικό κόστος της κατασκευής, υπολογίστηκε το συνολικό κόστος του φορέα, με χρήση των τριών μονωτικών υλικών. Το κόστος υπολογίστηκε πρώτα για δείκτη πυραντίστασης R120, χωρίς την εγκατάσταση του συστήματος καταιονισμού και σε δεύτερο χρόνο για δείκτη πυραντίστασης R60 συνυπολογίζοντας την εγκατάστασή του.

Κόστος Φορέα για Δείκτη Πυραντίστασης R120

Τα αποτελέσματα για δείκτη πυραντίστασης R120 και χωρίς την εγκατάσταση του συστήματος καταιονισμού παρουσιάζονται στους Πίνακες 4.4, Πίνακας 4.5 και Πίνακας 4.6.

Πίνακας 4.4: Κοστολόγηση Φορέα για Δείκτη Πυραντίστασης R120, με Χρήση της Βαφής SteelMaster 1200WF.

Κοστολόγηση Φορέα για R120 και SteelMaster 1200WF									
Διατομή	HEA400	HEA340	HEA320	HEA280	HEA240	HEA120	CHS139.7/8	CHS114.3/5	CHS88.9/4
Πλήθος και Μήκος Μελών [αριθμός * μήκος]	16x13m	8x13.42m	16x15.67m	2x13.05m 2x12.68m	6x5.62m 18x5.75m 12x5.20m	2x2.95m 2x2.58m	18x8.68m	12x8.17m 6x9.00m	8x7.69m 4x7.64m 40x7.78m 24x7.74m
Συνολικό Μήκος [m]	208	107.36	250.72	51.46	199.62	11.06	156.24	152.04	589.04
Μέσο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο [€/m]	394.34	319.14	344.83	256.70	211.40	65.42	87.38	63.41	47.89
Συνολικό Κόστος Μελών [€]	82021.95	34263.19	86456.53	13209.78	42199.36	723.51	13651.83	9640.27	28209.77
Κόστος Ενεργητικής Πυροπροστασίας [€]	0.00								
Συνολικό Κόστος Φορέα [€]	310376.20								

Πίνακας 4.5: Κοστολόγηση Φορέα για Δείκτη Πυραντίστασης R120, με Χρήση των Πλακών Fireline.

Κοστολόγηση Φορέα για R120 και Fireline									
Διατομή	HEA400	HEA340	HEA320	HEA280	HEA240	HEA120	CHS139.7/8	CHS114.3/5	CHS88.9/4
Πλήθος και Μήκος Μελών [αριθμός * μήκος]	16x13m	8x13.42m	16x15.67m	2x13.05m 2x12.68m	6x5.62m 18x5.75m 12x5.20m	2x2.95m 2x2.58m	18x8.68m	12x8.17m 6x9.00m	8x7.69m 4x7.64m 40x7.78m 24x7.74m
Συνολικό Μήκος [m]	208	107.36	250.72	51.46	199.62	11.06	156.24	152.04	589.04
Μέσο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο [€/m]	373.26	318.14	307.01	245.92	200.18	78.74	101.88	69.92	50.17
Συνολικό Κόστος Μελών [€]	77637.25	34155.11	76972.75	12655.24	39959.63	870.89	15917.22	10630.91	29551.56
Κόστος Ενεργητικής Πυροπροστασίας [€]	0.00								
Συνολικό Κόστος Φορέα [€]	298350.57								

Πίνακας 4.6: Κοστολόγηση Φορέα για Δείκτη Πυραντίστασης R120, με Χρήση Επιχρίσματος SLV.

Κοστολόγηση Φορέα για R120 και SLV									
Διατομή	HEA400	HEA340	HEA320	HEA280	HEA240	HEA120	CHS139.7/8	CHS114.3/5	CHS88.9/4
Πλήθος και Μήκος Μελών [αριθμός * μήκος]	16x13m	8x13.42m	16x15.67m	2x13.05m 2x12.68m	6x5.62m 18x5.75m 12x5.20m	2x2.95m 2x2.58m	18x8.68m	12x8.17m 6x9.00m	8x7.69m 4x7.64m 40x7.78m 24x7.74m
Συνολικό Μήκος [m]	208	107.36	250.72	51.46	199.62	11.06	156.24	152.04	589.04
Μέσο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο [€/m]	339.25	290.86	281.08	225.08	182.49	52.40	71.80	43.55	29.79
Συνολικό Κόστος Μελών [€]	70563.90	31227.08	70473.28	11582.62	36428.60	579.59	11217.85	6620.78	17546.84
Κόστος Ενεργητικής Πυροπροστασίας [€]	0.00								
Συνολικό Κόστος Φορέα [€]	256240.53								

Κόστος Φορέα για Δείκτη Πυραντίστασης R60

Τα αποτελέσματα για δείκτη πυραντίστασης R60 και με την εγκατάσταση του συστήματος καταιονισμού παρουσιάζονται στους Πίνακας 4.7, Πίνακας 4.8 και Πίνακας 4.9.

Πίνακας 4.7: Κοστολόγηση Φορέα για Δείκτη Πυραντίστασης R60, με Χρήση της Βαφής SteelMaster 1200WF.

Κοστολόγηση Φορέα για R60 και SteelMaster 1200WF									
Διατομή	HEA400	HEA340	HEA320	HEA280	HEA240	HEA120	CHS139.7/8	CHS114.3/5	CHS88.9/4
Πλήθος και Μήκος Μελών [αριθμός * μήκος]	16x13m	8x13.42m	16x15.67m	2x13.05m 2x12.68m	6x5.62m 18x5.75m 12x5.20m	2x2.95m 2x2.58m	18x8.68m	12x8.17m 6x9.00m	8x7.69m 4x7.64m 40x7.78m 24x7.74m
Συνολικό Μήκος [m]	208	107.36	250.72	51.46	199.62	11.06	156.24	152.04	589.04
Μέσο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο [€/m]	344.20	294.66	286.99	228.48	185.40	54.59	77.89	48.16	33.23
Συνολικό Κόστος Μελών [€]	71593.35	31634.97	71954.28	11757.37	37009.06	603.79	12170.04	7322.02	19573.18
Κόστος Ενεργητικής Πυροπροστασίας [€]	12545.52								
Συνολικό Κόστος Φορέα [€]	276163.60								

Πίνακας 4.8: Κοστολόγηση Φορέα για Δείκτη Πυραντίστασης R60, με Χρήση των Πλακών Fireline.

Κοστολόγηση Φορέα για R60 και Fireline									
Διατομή	HEA400	HEA340	HEA320	HEA280	HEA240	HEA120	CHS139.7/8	CHS114.3/5	CHS88.9/4
Πλήθος και Μήκος Μελών [αριθμός * μήκος]	16x13m	8x13.42m	16x15.67m	2x13.05m 2x12.68m	6x5.62m 18x5.75m 12x5.20m	2x2.95m 2x2.58m	18x8.68m	12x8.17m 6x9.00m	8x7.69m 4x7.64m 40x7.78m 24x7.74m
Συνολικό Μήκος [m]	208	107.36	250.72	51.46	199.62	11.06	156.24	152.04	589.04
Μέσο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο [€/m]	366.83	316.67	299.90	245.92	200.18	78.74	99.27	66.19	47.27
Συνολικό Κόστος Μελών [€]	76300.23	33997.59	75191.78	12655.24	39959.63	870.89	15510.55	10064.28	27844.14
Κόστος Ενεργητικής Πυροπροστασίας [€]	12545.52								
Συνολικό Κόστος Φορέα [€]	304939.85								

Πίνακας 4.9: Κοστολόγηση Φορέα για Δείκτη Πυραντίστασης R60, με Χρήση Επιχρίσματος SLV.

Κοστολόγηση Φορέα για R60 και SteelMaster SLV									
Διατομή	HEA400	HEA340	HEA320	HEA280	HEA240	HEA120	CHS139.7/8	CHS114.3/5	CHS88.9/4
Πλήθος και Μήκος Μελών [αριθμός * μήκος]	16x13m	8x13.42m	16x15.67m	2x13.05m 2x12.68m	6x5.62m 18x5.75m 12x5.20m	2x2.95m 2x2.58m	18x8.68m	12x8.17m 6x9.00m	8x7.69m 4x7.64m 40x7.78m 24x7.74m
Συνολικό Μήκος [m]	208	107.36	250.72	51.46	199.62	11.06	156.24	152.04	589.04
Μέσο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο [€/m]	336.28	290.86	274.71	225.08	182.49	52.40	71.80	43.17	29.36
Συνολικό Κόστος Μελών [€]	69947.12	31227.08	68874.79	11582.62	36428.60	579.59	11217.85	6564.29	17291.70
Κόστος Ενεργητικής Πυροπροστασίας [€]	12545.52								
Συνολικό Κόστος Φορέα [€]	266259.15								

Τα αποτελέσματα, και σε αυτήν την περίπτωση, δεν οδηγούν σε συγκεκριμένο κανόνα, όσον αναφορά την συνεισφορά της εγκατάστασης του συστήματος καταιονισμού ύδατος στο τελικό κόστος της κατασκευής. Ωστόσο, η χρήση εκτοξευόμενου επιχρίσματος χωρίς την εγκατάσταση του συστήματος καταιονισμού, φαίνεται, με βεβαιότητα, να αποτελεί την οικονομικότερη μέθοδο πυροπροστασίας μεταξύ όλων των συνδυασμών που εξετάστηκαν. Η εγκατάσταση συστήματος καταιονισμού ύδατος, μαζί με την χρήση εκτοξευόμενου επιχρίσματος δεν φαίνεται να αυξάνει την οικονομικότητα της κατασκευής, καθώς η θερμική αγωγιμότητα που εμφανίζει το μίγμα βερμικουλίτη επαρκεί για προστασία πολλών ωρών, χωρίς απότομη μεταβολή στα απαιτούμενα πάχη, και επομένως, χωρίς μεγάλες αυξήσεις στο κόστος του υλικού.

Όμως, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενες παραγράφους, η χρήση εκτοξευόμενου επιχρίσματος, παρά την οικονομικότητά της, δεν αποτελεί συχνά προτιμητέα λύση παθητικής πυροπροστασίας, λόγω του τελικού αισθητικού αποτελέσματός της. Για αυτόν τον λόγο, και σε αυτήν την παράγραφο, θα συγκρίνουμε, με μεγαλύτερη λεπτομέρεια, τα διογκούμενα χρώματα με τις πυράντοχες πλάκες, που μπορούν να προσφέρουν εξίσου καλά αισθητικά αποτελέσματα. Υπενθυμίζεται ότι, στην παράγραφο 4.2.1, δεν είχε γίνει σαφές ποια είναι η οικονομικότερη εκ των δύο μεθόδων.

Εκ των τεσσάρων διαθέσιμων συνδυασμών: διογκούμενη βαφή με ή χωρίς σύστημα καταιονισμού και πυράντοχες πλάκες με ή χωρίς σύστημα καταιονισμού, συμπεραίνουμε ότι πιο συμφέρουσα οικονομικά λύση αποτελεί η χρήση της διογκούμενης βαφής SteelMaster 1200WF της Jotun με ταυτόχρονη εγκατάσταση αυτόματου συστήματος πυρόσβεσης. Είχε ήδη παρατηρηθεί ότι, λόγω του υψηλού κόστους εγκατάστασης των πυράντοχων πλακών και για χαμηλές τιμές του δείκτη πυραντίστασης, ήταν πιο οικονομική η χρήση διογκούμενης βαφής. Η διαφορά, μάλιστα, φαίνεται να είναι τόσο σημαντική όταν υπολογίζεται το συνολικό κόστος για ολόκληρο τον φορέα, που αξίζει περισσότερο να εγκατασταθεί αυτόματο σύστημα πυρόσβεσης στο κτήριο, παρά να αυξηθούν λίγο τα πάχη του μονωτικού υλικού.

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

5.1 Συμπεράσματα

Η εφαρμογή κατάλληλων μέτρων πυροπροστασίας στις κατασκευές αποτελεί, εδώ και αιώνες, επιτακτική ανάγκη για την διασφάλιση της ανθρώπινης ζωής και περιουσίας. Ήδη από την εποχή της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας, αλλά έως και σήμερα, γίνεται αντιληπτό ότι η εκδήλωση και η ανεξέλεγκτη εξάπλωση μίας πυρκαγιάς μπορεί να αποβεί ένα από τα πιο ολέθρια και καταστροφικά φαινόμενα για τον άνθρωπο και τον ανθρώπινο πολιτισμό, ιδιαίτερα όταν αναφερόμαστε στις αστικές πυρκαγιές. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας διατίθενται, πλέον, ισχυρά μέτρα πρόληψης αλλά και καταστολής του φαινομένου, ικανά να προφυλάξουν επαρκώς από την εκδήλωση και την εξάπλωσή του, όταν εφαρμοστούν καταλλήλως. Τόσο τα ενεργητικά όσο και τα παθητικά μέσα πυροπροστασίας είναι απαραίτητο να εφαρμόζονται σε όλες τις κατηγορίες κτηρίων, όπως προβλέπεται καταναγκαστικά από όλους τους σύγχρονους κτηριοδομικούς κανονισμούς. Για την Ελλάδα ισχύουν, και πρέπει να εφαρμόζονται, οι διατάξεις του Προεδρικού Διατάγματος 41/2018 (ΦΕΚ-7825-80-2018) του Εθνικού Προσαρτήματος, καθώς και τα μέρη 1-2 των Ευρωκωδίκων 1 και 3 (prEN-1991-1-2 και prEN-1993-1-2).

Στην εργασία, κύριο αντικείμενο αποτέλεσε η μελέτη παθητικής πυροπροστασίας κτηρίων και η κοστολόγηση της εφαρμογής της σε πραγματικές κατασκευές. Παρατηρείται ότι η μελέτη παθητικής πυροπροστασίας, αν εφαρμοστεί όπως προβλέπεται στους ανωτέρω κανονισμούς, αποτελεί μία πολυσύνθετη και δύσκολα εφαρμόσιμη διαδικασία. Δεδομένου ότι η εξέλιξη μίας πυρκαγιάς επηρεάζεται από πάρα πολλές ανεξάρτητες και αλληλένδετες μεταξύ τους παραμέτρους, που δύσκολα εκτιμώνται με ακρίβεια, είναι αναμενόμενο ότι η δυσκολία στην ρεαλιστική προσομοίωση του φαινομένου, είναι εξαιρετικά υψηλή. Στα κείμενα του Ευρωκώδικα, περιλαμβάνεται πληθώρα μεθόδων για την διερεύνηση της καταπόνησης που υφίσταται μία κατασκευή, κατά την εξέλιξη μίας πυρκαγιάς, με τις ακριβέστερες εκ των οποίων να προϋποθέτουν πρόσβαση σε πολύ εξειδικευμένα προγράμματα προσομοίωσης, ώστε να προσεγγιστεί ρεαλιστικά η πραγματική φορτιστική κατάσταση του φορέα. Επίσης, ορισμένες εκ των προτεινόμενων αυτών μεθόδων, βρίσκουν εφαρμογή μόνο σε κτήρια με πυροδιαμερίσματα συγκεκριμένων διαστάσεων, καθιστώντας αδύνατη την εφαρμογή τους σε πλήθος κατασκευών. Λόγω των προαναφερθέντων, συμπεραίνεται ότι η λεπτομερής προσομοίωση μίας πυρκαγιάς και η μελέτη της εξέλιξής της, είναι ιδιαίτερα δύσκολη, πιθανότατα πολύ κοστοβόρα και μη προσοδοφόρα διαδικασία, τουλάχιστον όσον αναφορά τις περισσότερες κατασκευές, εξαιρουμένου κτηρίων υψηλής σημασίας και επικινδυνότητας, όπως διυλιστήρια ή εργοστάσια παραγωγής ενέργειας. Επομένως, όπως είναι λογικό, για συμβατικές κατασκευές, επικρατεί να προτιμάται η απλούστερη, πιο οικονομική και πιο εύχρηστη

μέθοδος ανάλυσης μεταβολής της θερμοκρασίας, δηλαδή με χρήση των πρότυπων καμπυλών θερμοκρασίας – χρόνου.

Στο υπό εξέταση κτήριο, ενώ αρχικά ήταν επιθυμητή η κατά το δυνατόν λεπτομερέστερη ανάλυση και η εισαγωγή πολλαπλών παραμέτρων για την εύρεση της αναπτυσσόμενης θερμοκρασίας του πυροδοαμερίσματος και των μελών της κατασκευής, η χρήση των πρότυπων καμπυλών, δυστυχώς, αποτέλεσε τελικά μονόδρομο. Βασική, αλλά και πολύ απλουστευτική παραδοχή της μεθόδου, είναι η θεώρηση ότι η πυρκαγιά εκτυλίσσεται ομοιόμορφα σε όλον τον όγκο του πυροδοαμερίσματος, καθώς και ότι η θερμοκρασία συνεχίζει να αυξάνει, ανεξάρτητα αν, υπό ρεαλιστικές συνθήκες, δεν υπάρχει καύσιμη ύλη ή αρκετό οξυγόνο στον χώρο. Το γεγονός αυτό, συνεπάγεται ότι η θερμοκρασία των μελών ξεκινά να αυξάνεται ταυτόχρονα σε όλο το πυροδοαμέρισμα, χωρίς ποτέ να μειώνεται, παρά τείνει απλά να σταθεροποιηθεί, μετά από άπειρο χρόνο. Προφανώς, κάτι τέτοιο δεν μπορεί να ισχύει σχεδόν ποτέ σε πραγματικές συνθήκες, αποτελώντας υπεραπλούστευση του φαινομένου και πολύ συντηρητική παραδοχή για τις αναλύσεις. Τα μεγέθη που προκύπτουν είναι λίγο έως και πολύ επαυξημένα, οδηγώντας σε μεγαλύτερα πάχη μονωτικών υλικών, και ενώ έτσι επιτυγχάνεται σχεδιασμός υπέρ της ασφαλείας, η παθητική πυροπροστασία αποβαίνει σημαντικά πιο κοστοβόρα.

Άλλο ένα μεγάλο πρόβλημα που προέκυψε κατά την διάρκεια της μελέτης, αποτέλεσε η δυσκολία εύρεσης των τεχνικών χαρακτηριστικών και των θερμικών ιδιοτήτων των διαφόρων μονωτικών υλικών. Προτού οριστικοποιηθεί η χρήση της πυροδιογκούμενης βαφής SteelMaster 1200WF, της πυράντοχης γυψοσανίδας Fireline και του επιχρίσματος βερμικουλίτη SLV για τους σκοπούς της εργασίας, αναζητήθηκαν αρκετά παρεμφερή θερμομονωτικά υλικά. Ελάχιστα εκ των υλικών που εξετάστηκαν, περιλάμβαναν, στο φυλλάδιο τεχνικών προδιαγραφών τους, όλα τα θερμικά χαρακτηριστικά που χρειάζονται για την εφαρμογή των εξισώσεων του Ευρωκώδικα 3, καθιστώντας ακόμα δυσκολότερη την επιθυμητή πορεία μελέτης. Ακόμα και για τα υλικά που τελικώς χρησιμοποιήθηκαν, χρειάστηκε αναζήτηση σε πολλαπλές πηγές, ώστε να συλλεχθούν όλα τα ζητούμενα δεδομένα. Συγκεκριμένα, οι θερμικές ιδιότητες των διογκούμενων χρωμάτων, συμπεράθηκε ότι υποβάλλονται σε τόσο έντονες μεταβολές συναρτήσει της θερμοκρασίας, που αν δεν δίνονται αναλυτικές σχέσεις που να τις περιγράφουν, η χρήση των εξισώσεων του Ευρωκώδικα 3 για τον υπολογισμό της αναπτυσσόμενης θερμοκρασίας μεταλλικών μελών, μονωμένων με πυροδιογκούμενα χρώματα, είναι πρακτικά αδύνατη. Το τελικό συμπέρασμα είναι ότι η ευκολότερη και ασφαλέστερη μέθοδος υπολογισμού της απαιτούμενης μόνωσης, πραγματοποιείται με χρήση πινακοποιημένων δεδομένων, που διατίθενται από όλους τους κατασκευαστές μονωτικών και πυροπροστατευτικών υλικών. Η χρήση πινάκων οδηγεί σε ελαφρώς συντηρητικές τιμές παχών, αλλά βασίζεται σε πειραματικές δοκιμές των υλικών, πιστοποιείται με τα κατάλληλα ευρωπαϊκά πρότυπα και είναι, γενικά, υπέρ της ασφαλείας. Επίσης, καθώς η εργασία που καλείται να καταβάλει ο μελετητής με αυτήν την διαδικασία είναι ελάχιστη, εκμηδενίζονται, ταυτόχρονα, και τυχόν υπολογιστικά λάθη.

Όσον αναφορά την σύγκριση των μονωτικών υλικών, αλλά και του συνδυασμού των μεθόδων παθητικής και ενεργητικής πυροπροστασίας, από πλευράς οικονομικότητας, μπορούμε να καταλήξουμε στα κάτωθι:

- Πιο οικονομικά, εύχρηστα και ανθεκτικά θερμομονωτικά υλικά, εκ των τριών συνηθέστερων χρησιμοποιούμενων κατηγοριών, αποτελούν τα εκτοξευόμενα επιχρίσματα. Η χαμηλή θερμική αγωγιμότητά τους, καθιστά δυνατή την χρήση τους σε κατασκευές με πολύ μεγάλους δείκτες πυραντίστασης, χωρίς να επιφέρει δυσανάλογη αύξηση στο κόστος.
- Οι πυράντοχες πλάκες, ενώ μπορούν, επίσης, να προσφέρουν ικανοποιητική πυροπροστασία για υψηλούς δείκτες πυραντίστασης, αλλά και σαφώς πιο αισθητικό φινίρισμα από τα εκτοξευόμενα επιχρίσματα, έχουν αυξημένη δυσκολία στην υλοποίησή τους, ιδιαίτερα σε φορείς περίπλοκης γεωμετρίας. Ενώ το κόστος του υλικού δεν είναι σημαντικά υψηλό, το κόστος κατασκευής καθιστά

την συγκεκριμένη μέθοδο ακριβότερη εκ των τριών, τουλάχιστον όσον αναφορά τον υπό εξέταση φορέα.

- Τα διογκούμενα χρώματα είναι, με διαφορά, η συνηθέστερη λύση πυροπροστασίας σε μεταλλικές κατασκευές. Το καλύτερο αισθητικό αποτέλεσμα και η ευκολία εγκατάστασης τους είναι οι δύο κύριοι λόγοι. Σε συνδυασμό με την πρόβλεψη εγκατάστασης αυτόματου συστήματος καταιονισμού ύδατος, που συνεπάγονται μείωση του δείκτη πυραντίστασης κατά 60 λεπτά, η χρήση διογκούμενων χρωμάτων μπορεί να αποτελέσει μία οικονομικά αποδεκτή λύση.
- Τέλος, η πάχυνση των ελασμάτων των διατομών, δεν φαίνεται να αποφέρει οικονομικά. Το κόστος του χάλυβα είναι αρκετά υψηλό, ακόμα και σε σύγκριση με τα κόστη των μονωτικών υλικών και της εγκατάστασής τους, καθιστώντας την τακτική αυτή ιδιαίτερα αντιοικονομική. Μάλιστα, η εύρεση τυποποιημένων διατομών με την μικρότερη δυνατή αύξηση στα γεωμετρικά και αδρανειακά χαρακτηριστικά δεν είναι πάντοτε εύκολη και γρήγορη διαδικασία.

5.2 Προτάσεις

Σε συνέχεια της παρούσας έρευνας, προτείνεται αντίστοιχη οικονομοτεχνική μελέτη σε περισσότερες και διαφορετικές κατηγορίες κτηρίων. Τα συμπεράσματα αυτής της διπλωματικής εργασίας, αφορούν, συγκεκριμένα, κτήρια αποθήκευσης με φορέα επαναλαμβανόμενων πλαισίων ροπής. Το κτήριο που εξετάστηκε λειτουργεί ως στέγαστρο του χώρου, και επομένως, τα φορτία που καταπονούν τον φορέα στην μελέτη παθητικής πυροπροστασίας, αποτελούν πολύ μικρό ποσοστό αυτών για τα οποία έχει αρχικά σχεδιαστεί. Ενδεχομένως, αν πραγματοποιούνταν αντίστοιχες αναλύσεις σε πολυώροφες κατασκευές, τα τελικά συμπεράσματα μπορεί να διέφεραν σημαντικά. Ακόμα και η πάχυνση των διατομών, που στην παρούσα περίπτωση απορρίφθηκε ως λύση, θα μπορούσε να αποβεί οικονομική. Επίσης, αξίζει να διερευνηθεί η μεταβολή του κόστους της παθητικής πυροπροστασίας, αν προβλεφθεί αυτόματο σύστημα καταιονισμού ύδατος, σε κτήρια με δείκτη πυραντίστασης R180 και μεγαλύτερο, όπου το κόστος των μονωτικών υλικών μπορεί να προκύψει πολύ πιο κρίσιμο. Τέλος, θα ήταν ενδιαφέρον, ο υπολογισμός του ρυθμού αύξησης της θερμοκρασίας, και δευτερευόντως ο υπολογισμός των απαιτούμενων παχών των μονωτικών υλικών, να πραγματοποιηθεί με περισσότερες από μία μεθόδους. Έτσι, καθίσταται δυνατή η σύγκριση του λόγου ακρίβειας/οικονομικότητάς των μεθόδων αυτών. Αυτό φυσικά προϋποθέτει, ότι οι μέθοδοι είναι εφαρμόσιμες στον εξεταζόμενο φορέα, αλλά και ότι, τα θερμικά χαρακτηριστικά των επιλεγμένων υλικών πυροπροστασίας είναι γνωστά.

6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Αλεξάκης Β., Καρατσιώρη Β.Κ. (2006). "Εναλλακτικές Μέθοδοι Παθητικής Πυροπροστασίας Μεταλλικών Κατασκευών" (Αδημοσίευτη Διπλωματική Εργασία). Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
2. Γεωργίου Κ. (2018). "Αριθμητική Προσομοίωση Της Μεταφοράς Θερμότητας Σε Μεταλλική Δοκό Με Και Χωρίς Πυροπροστασία" (Αδημοσίευτη Διπλωματική Εργασία). Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος.
3. Λέκκας Γ.Π. (2007). "Ενεργητική και Παθητική Πυροπροστασία Μεταλλικών Κατασκευών". (Αδημοσίευτη Διπλωματική Εργασία). Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
4. Μεγάλη πυρκαγιά της Ρώμης. (2022). Στη Βικιπαίδεια: <https://el.wikipedia.org/w/index.php?title=%CE%9C%CE%B5%CE%B3%CE%AC%CE%BB%CE%B7%CF%80%CF%85%CF%81%CE%BA%CE%B1%CE%B3%CE%B9%CE%AC%CF%84%CE%B7%CF%82%CF%A1%CF%8E%CE%BC%CE%B7%CF%82&oldid=9322172>
5. Μεγάλη πυρκαγιά του Λονδίνου. (2023). Στη Βικιπαίδεια: <https://el.wikipedia.org/w/index.php?title=%CE%9C%CE%B5%CE%B3%CE%AC%CE%BB%CE%B7%CF%80%CF%85%CF%81%CE%BA%CE%B1%CE%B3%CE%B9%CE%AC%CF%84%CE%BF%CF%85%CE%9B%CE%BF%CE%BD%CE%B4%CE%AF%CE%BD%CE%BF%CF%85&oldid=9874325>
6. "Μέθοδοι και Υλικά Πυροπροστασίας Μεταλλικών Κατασκευών". (χ.χ.). Ανακτήθηκε 15 Οκτώβριος 2023, από <https://www.firesecurity.gr/bibliothiki/metalkat.htm>
7. Π.Δ. 41/2018 (ΦΕΚ 80/Α` 7.5.2018) | ΕΛΙΝΥΑΕ. (χ.χ.). Ανακτήθηκε 15 Οκτώβριος 2023, από <https://www.elinyae.gr/ethniki-nomothesia/pd-412018-fek-80a-752018>
8. Anderson, C. E., Ketchum, D. E., & Mountain, W. P. (1988). "Thermal Conductivity of Intumescent Chars. Journal of Fire Sciences", 6(6), 390–410. <https://doi.org/10.1177/073490418800600602>
9. Bennetts, I. D., & Thomas, I. R. (2002). "Design of steel structures under fire conditions". Progress in Structural Engineering and Materials, 4(1), 6–17. <https://doi.org/10.1002/pse.100>
10. Carlson, J. A. (2005). "The Economics of Fire Protection: From the Great Fire of London To Rural/Metro. Economic Affairs", 25(3), 39–44. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0270.2005.00570.x>
11. Davesne, A.-L., Jimenez, M., Samyn, F., & Bourbigot, S. (2021). "Thin coatings for fire protection: An overview of the existing strategies, with an emphasis on layer-by-layer surface treatments and promising new solutions". Progress in Organic Coatings, 154, 106217. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106217>
12. European Committee for Standardization (CEN), "Eurocode 0: Basis of structural design", EN 1990, December 2005.

13. European Committee for Standardization (CEN), "Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire", EN 1991-1-2, September 2021.
14. European Committee for Standardization (CEN), "Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings", EN 1993-1-1, December 2003.
15. European Committee for Standardization (CEN), "Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design", EN 1993-1-2, March 2022.
16. "Fire protecting structural steelwork". (χ.χ.). Steelconstruction.Info. Ανακτήθηκε 15 Οκτώβριος 2023, από https://steelconstruction.info/Fire_protecting_structural_steelwork
17. "Fire Protection Coatings for Structural Steelwork" (2014, December). Ανακτήθηκε στις 12 Ιουνίου 2023 από:
<https://bauforumstahl.de/upload/publications/IGSB%20INFO%201%20EN%20online.pdf>.
18. Li, G.-Q., Han, J., Lou, G.-B., & Wang, Y. C. (2016). "Predicting intumescent coating protected steel temperature in fire using constant thermal conductivity". *Thin-Walled Structures*, 98, 177–184.
<https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.03.008>
19. Lucherini A. (2015-2016). "Experimental study of the behaviour of steel structures protected by different intumescent coatings and exposed to various fire scenarios" (Non-Published Master Thesis). Technical University of Denmark, Lyngby.
20. Mofizul Islam Md., Rubieyat B.A. (2018). "Fire Protection of Steel Structure: An Overall Review". *World Scientific News: An International Scientific Journal* (131-145). Ανακτήθηκε 15 Μαΐου 2023 από:
<http://www.worldscientificnews.com/wp-content/uploads/2018/04/WSN-102-2018-131-145.pdf>
21. Newsroom. (2021, Αύγουστος 2). Όταν κάηκε το 80% του Λονδίνου και γεννήθηκε μία βιομηχανία δισεκατομμυρίων | Moneyreview.gr. <https://www.moneyreview.gr/like-today/45357/otan-kaike-to-80-toy-londinoy-kai-gennithike-mia-viomichania-disekatommyrion/>
22. "Nicholas Barbon | Insurance Hall of Fame". (χ.χ.). Ανακτήθηκε 13 Ιουλίου 2023, από:
<https://www.insurancehalloffame.org/nicholas-barbon-simple>
23. "Sprayed Limpet Vermiculite (SLV)". (χ.χ.). IBSL. Ανακτήθηκε 20 Ιουνίου 2023, από:
<https://www.ibslgroup.co.uk/product/sprayed-limpet-vermiculite-slv/>
24. Tari, A. (2003). "The Specific Heat of Matter At Low Temperatures". London: World Scientific.
25. Thomas, I. R., & Bennetts, I. D. (1992). "Developments in the design of steel structures for fire". *Journal of Constructional Steel Research*, 23(1), 295–312. [https://doi.org/10.1016/0143-974X\(92\)90048-J](https://doi.org/10.1016/0143-974X(92)90048-J).
26. Van Coile R., Lucherini A., Chaudhary R. K., Ni S., Unobe D. (2023), "Economic Impact of Fire: Cost and Impact of Fire Protection in Buildings". Ανακτήθηκε 15 Μαΐου 2023 από: <https://www.nfpa.org/-/media/Files/News-and-Research/Fire-statistics-and-reports/US-Fire-Problem/RFEconomicImpact.ashx>.
27. "Vermiculite Spray | Cafco 300 ® Fire Spray | Beams & Columns". (χ.χ.). Progressive Materials. Ανακτήθηκε 15 Οκτώβριος 2023, από: <https://www.progressivematerials.com.au/product/passive-fire-protection/sprays-coatings/cafco-300/>
28. "What are Common Fire Protection Systems for Steel Structures?" (χ.χ.). Ανακτήθηκε 15 Οκτώβριος 2023, από:
<https://theconstructor.org/structural-engg/fire-protection-systems-steel-structures/19615/>
29. Zhu, Y., Zhang, F., Xing, L., Xie, W., & Cheng, Y. (2022). Construction and verification of a heat transfer model for intumescent coatings. *Progress in Organic Coatings*, 167, 106868.
<https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2022.106868>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΠΙΝΑΚΕΣ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΩΝ ΠΑΧΩΝ ΤΗΣ ΒΑΦΗΣ STEELMASTER1200 WF

Στο Παράρτημα Α παρουσιάζονται όλοι οι πίνακες από το φυλλάδιο τεχνικών προδιαγραφών της βαφής SteelMaster 1200WF της Jotun για τον υπολογισμό των απαιτούμενων παχών μόνωσης με το συγκεκριμένο διογκούμενο χρώμα.

SteelMaster 1200WF

Table 3: I/H-Section Columns 60 Minutes										
Section Factor up to m ⁻¹	Thickness (mm) Required for a Design Temperature of									
	350°C	400°C	450°C	500°C	550°C	600°C	620°C	650°C	700°C	750°C
30	0.430	0.299	0.278	0.278	0.278	0.278	0.278	0.278	0.278	0.278
35	0.498	0.337	0.294	0.278	0.278	0.278	0.278	0.278	0.278	0.278
40	0.566	0.376	0.317	0.278	0.278	0.278	0.278	0.278	0.278	0.278
45	0.634	0.414	0.341	0.295	0.278	0.278	0.278	0.278	0.278	0.278
50	0.702	0.452	0.364	0.315	0.278	0.278	0.278	0.278	0.278	0.278
55	0.770	0.491	0.388	0.335	0.285	0.278	0.278	0.278	0.278	0.278
60	0.838	0.529	0.411	0.356	0.303	0.278	0.278	0.278	0.278	0.278
65	0.906	0.568	0.435	0.376	0.321	0.278	0.278	0.278	0.278	0.278
70	0.975	0.606	0.458	0.396	0.338	0.282	0.278	0.278	0.278	0.278
75	1.035	0.644	0.482	0.416	0.356	0.298	0.278	0.278	0.278	0.278
80	1.078	0.683	0.505	0.436	0.374	0.313	0.288	0.278	0.278	0.278
85	1.122	0.721	0.529	0.456	0.391	0.329	0.303	0.278	0.278	0.278
90	1.166	0.760	0.552	0.477	0.409	0.344	0.317	0.278	0.278	0.278
95	1.209	0.798	0.576	0.497	0.427	0.359	0.332	0.287	0.278	0.278
100	1.253	0.836	0.599	0.517	0.444	0.375	0.346	0.301	0.278	0.278
105	1.296	0.875	0.623	0.537	0.462	0.390	0.361	0.314	0.278	0.278
110	1.340	0.913	0.646	0.557	0.480	0.405	0.376	0.328	0.278	0.278
115	1.383	0.952	0.670	0.578	0.497	0.421	0.390	0.341	0.278	0.278
120	1.427	0.990	0.693	0.598	0.515	0.436	0.405	0.355	0.278	0.278
125	1.471	1.028	0.717	0.618	0.533	0.452	0.419	0.368	0.278	0.278
130	1.514	1.065	0.740	0.638	0.550	0.467	0.434	0.382	0.278	0.278
135	1.558	1.102	0.764	0.658	0.568	0.482	0.448	0.395	0.286	0.278
140	1.601	1.139	0.787	0.678	0.585	0.498	0.463	0.409	0.299	0.278
145	1.645	1.176	0.811	0.699	0.603	0.513	0.477	0.423	0.311	0.278
150	1.688	1.213	0.834	0.719	0.621	0.529	0.492	0.436	0.324	0.278
155	1.732	1.250	0.858	0.739	0.638	0.544	0.506	0.450	0.337	0.278
160	1.776	1.286	0.881	0.759	0.656	0.559	0.521	0.463	0.350	0.278
165	1.819	1.323	0.905	0.779	0.674	0.575	0.535	0.477	0.363	0.278
170	1.863	1.360	0.928	0.799	0.691	0.590	0.550	0.490	0.376	0.278
175	1.906	1.397	0.952	0.820	0.709	0.605	0.564	0.504	0.389	0.278
180	1.950	1.434	0.975	0.840	0.727	0.621	0.579	0.517	0.402	0.279
185	1.993	1.471	0.999	0.860	0.744	0.636	0.594	0.531	0.415	0.291
190	2.037	1.508	1.023	0.880	0.762	0.652	0.608	0.545	0.428	0.303
195	2.081	1.545	1.061	0.900	0.780	0.667	0.623	0.558	0.440	0.315

Thickness is intumescent only.

Results also apply to I/H section beams with 4 sides fire exposure subject to a maximum DFT of 4.455mm.

Εικόνα Α-1: Προτεινόμενα Πάχη για Διατομές Διπλού Ταυ και Δείκτη Πυραντίστασης R60 (α)

SteelMaster 1200WF

Table 3: I/H-Section Columns 60 Minutes (continued)										
Section Factor up to m ⁻¹	Thickness (mm) Required for a Design Temperature of									
	350°C	400°C	450°C	500°C	550°C	600°C	620°C	650°C	700°C	750°C
200	2.124	1.582	1.099	0.920	0.797	0.682	0.637	0.572	0.453	0.327
205	2.168	1.619	1.137	0.941	0.815	0.698	0.652	0.585	0.466	0.339
210	2.211	1.656	1.175	0.961	0.833	0.713	0.666	0.599	0.479	0.351
215	2.255	1.692	1.213	0.981	0.850	0.729	0.681	0.612	0.492	0.363
220	2.298	1.729	1.251	1.001	0.868	0.744	0.695	0.626	0.505	0.375
225	2.342	1.766	1.289	1.022	0.886	0.759	0.710	0.640	0.518	0.387
230	2.385	1.803	1.327	1.058	0.903	0.775	0.724	0.653	0.531	0.399
235	2.429	1.840	1.365	1.093	0.921	0.790	0.739	0.667	0.544	0.411
240	2.473	1.877	1.404	1.129	0.938	0.805	0.753	0.680	0.557	0.423
245	2.516	1.914	1.442	1.165	0.956	0.821	0.768	0.694	0.569	0.435
250	2.551	1.951	1.480	1.201	0.974	0.836	0.782	0.707	0.582	0.448
255	2.587	1.988	1.518	1.237	0.991	0.852	0.797	0.721	0.595	0.460
260	2.623	2.025	1.556	1.273	1.009	0.867	0.812	0.734	0.608	0.472
265	2.659	2.062	1.594	1.309	1.032	0.882	0.826	0.748	0.621	0.484
270	2.694	2.099	1.632	1.345	1.066	0.898	0.841	0.762	0.634	0.496
275	2.730	2.135	1.670	1.381	1.100	0.913	0.855	0.775	0.647	0.508
280	2.766	2.172	1.708	1.417	1.134	0.929	0.870	0.789	0.660	0.520
285	2.801	2.209	1.746	1.453	1.168	0.944	0.884	0.802	0.673	0.532
290	2.837	2.246	1.784	1.489	1.202	0.959	0.899	0.816	0.686	0.544
295	2.873	2.283	1.822	1.525	1.235	0.975	0.913	0.829	0.698	0.556
300	2.909	2.320	1.860	1.561	1.269	0.990	0.928	0.843	0.711	0.568
305	2.944	2.357	1.898	1.597	1.303	1.005	0.942	0.856	0.724	0.580
310	2.980	2.394	1.936	1.633	1.337	1.021	0.957	0.870	0.737	0.592
315	3.016	2.431	1.974	1.668	1.371	1.053	0.971	0.884	0.750	0.604
320	3.052	2.468	2.013	1.704	1.405	1.085	0.986	0.897	0.763	0.616
325	3.087	2.505	2.051	1.740	1.439	1.118	1.000	0.911	0.776	0.628
330	3.123	2.543	2.089	1.776	1.473	1.150	1.015	0.924	0.789	0.640
335	3.159	2.582	2.127	1.812	1.507	1.182	1.040	0.938	0.802	0.652
340	3.194	2.621	2.165	1.848	1.541	1.215	1.072	0.951	0.815	0.664
345	3.230	2.660	2.203	1.884	1.575	1.247	1.104	0.965	0.827	0.676
350	3.266	2.699	2.241	1.920	1.609	1.279	1.136	0.978	0.840	0.688
355	3.302	2.738	2.279	1.956	1.642	1.312	1.168	0.992	0.853	0.700
360	3.337	2.776	2.317	1.992	1.676	1.344	1.200	1.006	0.866	0.712
365	3.373	2.815	2.355	2.028	1.710	1.376	1.232	1.019	0.879	0.724
370	3.409	2.854	2.393	2.064	1.744	1.409	1.264	1.048	0.892	0.736
375	3.445	2.893	2.431	2.100	1.778	1.441	1.296	1.079	0.905	0.748
380	3.480	2.932	2.469	2.136	1.812	1.473	1.328	1.111	0.918	0.760
385	3.516	2.971	2.507	2.172	1.846	1.506	1.360	1.142	0.931	0.772
390	3.552	3.010	2.548	2.207	1.880	1.538	1.392	1.173	0.944	0.784

Thickness is intumescent only.

Results also apply to I/H section beams with 4 sides fire exposure subject to a maximum DFT of 4.455mm.

Εικόνα A-2: Προτεινόμενα Πάχη για Διατομές Διπλού Ταυ και Δείκτη Πυραντίστασης R60 (b)

SteelMaster 1200WF

Table 6: I/H-Section Columns 120 Minutes										
Section Factor up to m ⁻¹	Thickness (mm) Required for a Design Temperature of									
	350°C	400°C	450°C	500°C	550°C	600°C	620°C	650°C	700°C	750°C
30	2.457	1.547	0.991	0.789	0.630	0.495	0.443	0.356	0.284	0.278
35	2.660	1.869	1.205	0.900	0.720	0.569	0.511	0.414	0.323	0.294
40	2.863	2.192	1.419	1.010	0.809	0.643	0.578	0.473	0.362	0.320
45	3.066	2.513	1.632	1.129	0.899	0.716	0.646	0.532	0.401	0.345
50	3.269	2.638	1.846	1.249	0.988	0.790	0.714	0.590	0.440	0.370
55	3.472	2.762	2.059	1.368	1.058	0.864	0.782	0.649	0.479	0.395
60	3.675	2.887	2.273	1.488	1.117	0.938	0.849	0.708	0.518	0.420
65	3.878	3.011	2.487	1.608	1.176	1.012	0.917	0.766	0.557	0.446
70	4.058	3.136	2.580	1.728	1.235	1.068	0.985	0.825	0.596	0.471
75	4.163	3.261	2.656	1.848	1.294	1.121	1.045	0.884	0.634	0.496
80	4.269	3.385	2.732	1.967	1.353	1.175	1.097	0.942	0.673	0.521
85	4.374	3.510	2.808	2.087	1.412	1.228	1.148	1.001	0.712	0.547
90	4.480	3.634	2.884	2.207	1.471	1.282	1.200	1.054	0.751	0.572
95	4.586	3.759	2.960	2.327	1.530	1.335	1.251	1.104	0.790	0.597
100	4.691	3.883	3.036	2.446	1.589	1.389	1.303	1.154	0.829	0.622
105	4.797	4.008	3.111	2.545	1.648	1.442	1.354	1.204	0.868	0.647
110	4.902	4.083	3.187	2.617	1.707	1.495	1.406	1.254	0.907	0.673
115	5.008	4.144	3.263	2.689	1.766	1.549	1.457	1.304	0.946	0.698
120	5.114	4.206	3.339	2.761	1.825	1.602	1.509	1.355	0.985	0.723
125	5.219	4.268	3.415	2.833	1.884	1.656	1.560	1.405	1.025	0.748
130	5.325	4.330	3.491	2.905	1.943	1.709	1.612	1.455	1.075	0.773
135	5.430	4.392	3.567	2.977	2.002	1.763	1.664	1.505	1.125	0.799
140	5.536	4.454	3.643	3.049	2.060	1.816	1.715	1.555	1.174	0.824
145	5.641	4.516	3.719	3.121	2.119	1.870	1.767	1.605	1.224	0.849
150	5.747	4.578	3.795	3.193	2.178	1.923	1.818	1.655	1.274	0.874
155	-	4.640	3.871	3.265	2.237	1.976	1.870	1.705	1.324	0.900
160	-	4.702	3.947	3.337	2.296	2.030	1.921	1.755	1.374	0.925
165	-	4.764	4.023	3.409	2.355	2.083	1.973	1.805	1.424	0.950
170	-	4.826	4.072	3.481	2.414	2.137	2.024	1.855	1.474	0.975
175	-	4.888	4.117	3.553	2.473	2.190	2.076	1.905	1.524	1.000
180	-	4.950	4.162	3.625	2.542	2.244	2.127	1.955	1.574	1.031
185	-	5.012	4.207	3.697	2.633	2.297	2.179	2.005	1.624	1.083
190	-	5.073	4.251	3.769	2.724	2.351	2.230	2.055	1.674	1.135
195	-	5.135	4.296	3.841	2.815	2.404	2.282	2.106	1.724	1.188

Thickness is intumescent only.

Results also apply to I/H section beams with 4 sides fire exposure subject to a maximum DFT of 4.455mm.

Εικόνα Α-3: Προτεινόμενα Πάχη για Διατομές Διπλού Ταυ και Δείκτη Πυραντίστασης R120 (α)

SteelMaster 1200WF

Table 6: I/H-Section Columns 120 Minutes (continued)										
Section Factor up to m ⁻¹	Thickness (mm) Required for a Design Temperature of									
	350°C	400°C	450°C	500°C	550°C	600°C	620°C	650°C	700°C	750°C
200	-	5.197	4.341	3.913	2.906	2.457	2.333	2.156	1.773	1.240
205	-	5.259	4.386	3.985	2.997	2.511	2.385	2.206	1.823	1.293
210	-	5.321	4.431	4.047	3.088	2.564	2.437	2.256	1.873	1.345
215	-	5.383	4.476	4.090	3.179	2.617	2.488	2.306	1.923	1.397
220	-	5.445	4.520	4.133	3.269	2.670	2.539	2.356	1.973	1.450
225	-	5.507	4.565	4.176	3.360	2.723	2.590	2.406	2.023	1.502
230	-	5.569	4.610	4.219	3.451	2.776	2.640	2.456	2.073	1.555
235	-	5.631	4.655	4.261	3.542	2.829	2.691	2.506	2.123	1.607
240	-	5.693	4.700	4.304	3.633	2.882	2.742	2.556	2.173	1.659
245	-	-	4.744	4.347	3.724	2.935	2.792	2.607	2.223	1.712
250	-	-	4.789	4.390	3.815	2.988	2.843	2.657	2.273	1.764
255	-	-	4.834	4.433	3.906	3.041	2.894	2.708	2.323	1.817
260	-	-	4.879	4.476	3.997	3.094	2.944	2.758	2.372	1.869
265	-	-	4.924	4.518	4.063	3.147	2.995	2.808	2.422	1.921
270	-	-	4.969	4.561	4.112	3.199	3.046	2.859	2.472	1.974
275	-	-	5.013	4.604	4.162	3.252	3.096	2.909	2.522	2.026
280	-	-	5.058	4.647	4.212	3.305	3.147	2.960	2.573	2.079
285	-	-	5.103	4.690	4.262	3.358	3.197	3.010	2.624	2.131
290	-	-	5.148	4.732	4.311	3.411	3.248	3.060	2.675	2.183
295	-	-	5.193	4.775	4.361	3.464	3.299	3.111	2.725	2.236
300	-	-	5.238	4.818	4.411	3.517	3.349	3.161	2.776	2.288
305	-	-	5.282	4.861	4.461	3.570	3.400	3.212	2.827	2.341
310	-	-	5.327	4.904	4.510	3.623	3.451	3.262	2.877	2.393
315	-	-	5.372	4.947	4.560	3.676	3.501	3.312	2.928	2.445
320	-	-	5.417	4.989	4.610	3.729	3.552	3.363	2.979	2.498
325	-	-	5.462	5.032	4.659	3.782	3.603	3.413	3.029	2.550
330	-	-	5.507	5.075	4.709	3.835	3.653	3.464	3.080	2.602
335	-	-	5.551	5.118	4.759	3.888	3.704	3.514	3.131	2.654
340	-	-	5.596	5.161	4.809	3.941	3.755	3.564	3.182	2.706
345	-	-	5.641	5.203	4.858	3.994	3.805	3.615	3.232	2.757
350	-	-	5.686	5.246	4.908	4.054	3.856	3.665	3.283	2.809
355	-	-	5.731	5.289	4.958	4.132	3.906	3.716	3.334	2.861
360	-	-	5.775	5.332	5.008	4.210	3.957	3.766	3.384	2.913
365	-	-	5.820	5.375	5.057	4.289	4.008	3.816	3.435	2.965
370	-	-	-	5.417	5.107	4.367	4.074	3.867	3.486	3.017
375	-	-	-	5.460	5.157	4.445	4.157	3.917	3.537	3.069
380	-	-	-	5.503	5.206	4.524	4.240	3.968	3.587	3.121
385	-	-	-	5.546	5.256	4.602	4.322	4.018	3.638	3.173
390	-	-	-	5.589	5.306	4.680	4.405	4.089	3.689	3.225

Thickness is intumescent only.

Results also apply to I/H section beams with 4 sides fire exposure subject to a maximum DFT of 4.455mm.

Εικόνα Α-4: Προτεινόμενα Πάχη για Διατομές Διπλού Ταυ και Δείκτη Πυραντίστασης R120 (b)

SteelMaster 1200WF

Section Factor up to m^{-1}	Thickness (mm) Required for a Design Temperature of									
	350°C	400°C	450°C	500°C	520°C	550°C	600°C	650°C	700°C	750°C
50	1.211	1.035	0.903	0.791	0.734	0.726	0.726	0.726	0.726	0.726
55	1.262	1.078	0.938	0.824	0.766	0.726	0.726	0.726	0.726	0.726
60	1.312	1.121	0.974	0.857	0.798	0.726	0.726	0.726	0.726	0.726
65	1.363	1.164	1.009	0.889	0.830	0.726	0.726	0.726	0.726	0.726
70	1.414	1.207	1.045	0.922	0.862	0.752	0.726	0.726	0.726	0.726
75	1.464	1.249	1.080	0.955	0.894	0.784	0.726	0.726	0.726	0.726
80	1.515	1.292	1.116	0.987	0.926	0.816	0.726	0.726	0.726	0.726
85	1.565	1.335	1.151	1.020	0.958	0.848	0.726	0.726	0.726	0.726
90	1.616	1.378	1.187	1.053	0.991	0.879	0.726	0.726	0.726	0.726
95	1.667	1.421	1.222	1.085	1.023	0.911	0.726	0.726	0.726	0.726
100	1.717	1.464	1.258	1.118	1.055	0.943	0.726	0.726	0.726	0.726
105	1.768	1.507	1.293	1.151	1.087	0.975	0.726	0.726	0.726	0.726
110	1.818	1.550	1.329	1.183	1.119	1.007	0.726	0.726	0.726	0.726
115	1.869	1.593	1.364	1.216	1.151	1.038	0.756	0.726	0.726	0.726
120	1.920	1.636	1.400	1.249	1.183	1.070	0.789	0.726	0.726	0.726
125	1.970	1.678	1.435	1.281	1.215	1.102	0.823	0.726	0.726	0.726
130	2.021	1.721	1.471	1.314	1.247	1.134	0.857	0.726	0.726	0.726
135	2.093	1.764	1.506	1.347	1.279	1.166	0.891	0.726	0.726	0.726
140	2.169	1.807	1.542	1.379	1.312	1.198	0.924	0.726	0.726	0.726
145	2.246	1.850	1.577	1.412	1.344	1.229	0.958	0.726	0.726	0.726
150	2.322	1.893	1.612	1.445	1.376	1.261	0.992	0.726	0.726	0.726
155	2.398	1.936	1.648	1.477	1.408	1.293	1.025	0.726	0.726	0.726
160	2.475	1.979	1.683	1.510	1.440	1.325	1.059	0.749	0.726	0.726
165	2.551	2.022	1.719	1.543	1.472	1.357	1.093	0.785	0.726	0.726
170	2.627	2.096	1.754	1.575	1.504	1.388	1.127	0.821	0.726	0.726
175	2.704	2.178	1.790	1.608	1.536	1.420	1.160	0.856	0.726	0.726
180	2.780	2.259	1.825	1.641	1.568	1.452	1.194	0.892	0.743	0.726
185	2.856	2.340	1.861	1.673	1.600	1.484	1.228	0.927	0.775	0.726
190	2.933	2.421	1.896	1.706	1.633	1.516	1.261	0.963	0.806	0.726
195	3.009	2.502	1.932	1.739	1.665	1.548	1.295	0.998	0.837	0.726
200	3.086	2.584	1.967	1.772	1.697	1.579	1.329	1.034	0.869	0.726
205	3.162	2.665	2.003	1.804	1.729	1.611	1.363	1.069	0.900	0.726
210	3.238	2.746	2.053	1.837	1.761	1.643	1.396	1.105	0.931	0.726
215	3.360	2.827	2.146	1.870	1.793	1.675	1.430	1.140	0.963	0.726
220	3.483	2.909	2.239	1.902	1.825	1.707	1.464	1.176	0.994	0.726
225	3.606	2.990	2.332	1.935	1.857	1.738	1.497	1.211	1.025	0.726

Thickness is intumescent only.

Εικόνα Α-5: Προτεινόμενα Πάχη για Κοίλες Κυκλικές Διατομές και Δείκτη Πυραντίστασης R60 (α)

SteelMaster 1200WF

Table 30: Circular Hollow Columns 120 Minutes										
Section Factor up to m^{-1}	Thickness (mm) Required for a Design Temperature of									
	350°C	400°C	450°C	500°C	520°C	550°C	600°C	650°C	700°C	750°C
50	2.663	2.325	1.788	1.599	1.530	1.432	1.282	1.126	1.010	0.887
55	3.299	2.668	1.896	1.689	1.614	1.508	1.346	1.181	1.059	0.931
60	3.866	3.198	2.003	1.779	1.698	1.584	1.410	1.236	1.108	0.975
65	4.646	3.548	2.291	1.869	1.782	1.660	1.474	1.291	1.157	1.019
70	5.268	3.883	2.635	1.960	1.867	1.735	1.537	1.346	1.206	1.063
75	5.779	4.217	2.980	2.077	1.951	1.811	1.601	1.401	1.255	1.108
80	5.942	4.559	3.321	2.284	2.041	1.887	1.665	1.456	1.304	1.152
85	6.104	4.972	3.654	2.491	2.211	1.962	1.729	1.511	1.353	1.196
90	6.267	5.386	3.986	2.698	2.380	2.045	1.793	1.566	1.402	1.240
95	6.429	5.758	4.319	2.904	2.549	2.177	1.857	1.621	1.450	1.284
100	6.592	5.883	4.624	3.111	2.718	2.308	1.921	1.676	1.499	1.328
105	6.754	6.008	4.888	3.374	2.887	2.440	1.985	1.732	1.548	1.372
110	6.917	6.133	5.151	3.728	3.056	2.572	2.064	1.787	1.597	1.416
115	7.079	6.258	5.415	4.082	3.225	2.703	2.175	1.842	1.646	1.460
120	7.242	6.384	5.678	4.436	3.582	2.835	2.287	1.897	1.695	1.505
125	7.404	6.509	5.810	4.629	3.956	2.967	2.399	1.952	1.744	1.549
130	7.566	6.634	5.902	4.772	4.331	3.098	2.511	2.007	1.793	1.593
135	7.729	6.759	5.994	4.914	4.573	3.230	2.623	2.082	1.842	1.637
140	7.891	6.884	6.085	5.057	4.681	3.432	2.735	2.170	1.891	1.681
145	8.054	7.009	6.177	5.200	4.788	3.640	2.846	2.258	1.940	1.725
150	-	7.134	6.269	5.342	4.896	3.848	2.958	2.346	1.989	1.769
155	-	7.259	6.360	5.485	5.004	4.056	3.070	2.435	2.044	1.813
160	-	7.385	6.452	5.627	5.111	4.264	3.182	2.523	2.124	1.857
165	-	7.510	6.544	5.765	5.219	4.472	3.294	2.611	2.204	1.901
170	-	7.635	6.635	5.883	5.326	4.615	3.407	2.699	2.285	1.946
175	-	7.760	6.727	6.001	5.434	4.739	3.520	2.788	2.365	1.990
180	-	7.885	6.819	6.119	5.541	4.862	3.633	2.876	2.445	2.037
185	-	8.010	6.910	6.237	5.649	4.986	3.746	2.964	2.526	2.114
190	-	-	7.002	6.355	5.766	5.109	3.859	3.052	2.606	2.191
195	-	-	7.094	6.473	5.935	5.233	3.971	3.140	2.686	2.268
200	-	-	7.185	6.591	6.105	5.356	4.084	3.229	2.767	2.344
205	-	-	7.277	6.709	6.274	5.480	4.197	3.376	2.847	2.421
210	-	-	7.369	6.827	6.444	5.603	4.310	3.531	2.927	2.498
215	-	-	7.461	6.945	6.613	5.727	4.423	3.687	3.007	2.575
220	-	-	7.552	7.063	6.783	5.979	4.571	3.843	3.088	2.652
225	-	-	7.644	7.181	6.952	6.248	4.934	3.999	3.168	2.728

Thickness is intumescent only.

Εικόνα Α-6: Προτεινόμενα Πάχη για Κοίλες Κυκλικές Διατομές και Δείκτη Πυραντίστασης R120 (b)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΚΟΣΤΟΛΟΓΗΣΗ ΠΑΘΗΤΙΚΗΣ ΠΥΡΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΑΝΑ ΔΙΑΤΟΜΗ

6.1 Κοστολόγηση Παθητικής Πυροπροστασίας Φορέα 1

Παρουσιάζονται οι πίνακες κοστολόγησης των μελών του Φορέα 1 για τα τρία μονωτικά υλικά και τους δύο ενδεχόμενους δείκτες πυραντίστασης.

Διατομή Μέλους	HEA 400					
	SteelMaster 1200WF		Fireline		SLV	
Μονωτικό Υλικό						
Δείκτης Πυραντίστασης [min]	60	120	60	120	60	120
Κρίσιμη Θερμοκρασία [°C]	672					
Θεωρητικό Απαιτούμενο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000355	0.001355	0.0080	0.0191	0.0049	0.0121
Εφαρμόσιμο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000355	0.001355	0.0100	0.0200	0.0100	0.0130
Βάρος Χάλυβα ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [kg/m]	125					
Επιφάνεια Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [m ² /m]	1.91		1.38		1.91	
Κόστος Χάλυβα [€/kg]	2					
Κόστος Χάλυβα ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	250					
Κόστος Πυροπροστατευτικού Υλικού [€/m ³]	21000		433.3		450	
Ελάχιστες Απώλειες Μονωτικού Υλικού	20%		5%		10%	
Μέγιστες Απώλειες Μονωτικού Υλικού	30%		10%		20%	
Ελάχιστο Κόστος Εργασίας και Εξοπλισμού Εγκατάστασης [€/m ²]	30.00		70.00		30.00	
Μέγιστο Κόστος Εργασίας και Εξοπλισμού Εγκατάστασης [€/m ²]	50.00		90.00		50.00	
Ελάχιστο Κόστος Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	17.09	65.22	6.28	12.56	9.45	12.29
Μέγιστο Κόστος Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	18.51	70.65	6.58	13.15	10.31	13.41
Ελάχιστο Κόστος Εργασίας ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	57.3		96.6		57.3	
Μέγιστο Κόστος Εργασίας ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	95.5		124.2		95.5	
Συνολικό Ελάχιστο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	324.39	372.52	352.88	359.16	316.75	319.59
Συνολικό Μέγιστο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	364.01	416.15	380.78	387.35	355.81	358.91
Συνολικό Μέσο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	344.20	394.34	366.83	373.26	336.28	339.25

Εικόνα Β-1: Κοστολόγηση Μελών Διατομής HEA 400

Διατομή Μέλους Μονωτικό Υλικό	HEA 340					
	SteelMaster 1200WF		Fireline		SLV	
Δείκτης Πυραντίστασης [min]	60	120	60	120	60	120
Κρίσιμη Θερμοκρασία [°C]	815					
Θεωρητικό Απαιτούμενο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000278	0.000799	0.0037	0.0108	0.0023	0.0068
Εφαρμόσιμο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000278	0.000799	0.0100	0.0125	0.0100	0.0100
Βάρος Χάλυβα ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [kg/m]	105					
Επιφάνεια Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [m ² /m]	1.79		1.26		1.79	
Κόστος Χάλυβα [€/kg]	2					
Κόστος Χάλυβα ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	210					
Κόστος Πυροπροστατευτικού Υλικού [€/m ³]	21000		433.3		450	
Ελάχιστες Απώλειες Μονωτικού Υλικού	20%		5%		10%	
Μέγιστες Απώλειες Μονωτικού Υλικού	30%		10%		20%	
Ελάχιστο Κόστος Εργασίας και Εξοπλισμού Εγκατάστασης [€/m ²]	30.00		70.00		30.00	
Μέγιστο Κόστος Εργασίας και Εξοπλισμού Εγκατάστασης [€/m ²]	50.00		90.00		50.00	
Ελάχιστο Κόστος Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	12.54	36.04	5.73	7.17	8.86	8.86
Μέγιστο Κόστος Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	13.59	39.04	6.01	7.51	9.67	9.67
Ελάχιστο Κόστος Εργασίας ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	53.7		88.2		53.7	
Μέγιστο Κόστος Εργασίας ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	89.5		113.4		89.5	
Συνολικό Ελάχιστο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	276.24	299.74	303.93	305.37	272.56	272.56
Συνολικό Μέγιστο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	313.09	338.54	329.41	330.91	309.17	309.17
Συνολικό Μέσο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	294.66	319.14	316.67	318.14	290.86	290.86

Εικόνα Β-2: Κοστολόγηση Μελών Διατομής HEA 340

Διατομή Μέλους	HEA 320					
	SteelMaster 1200WF		Fireline		SLV	
Μονωτικό Υλικό						
Δείκτης Πυραντίστασης [min]	60	120	60	120	60	120
Κρίσιμη Θερμοκρασία [°C]	623					
Θεωρητικό Απαιτούμενο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.00046	0.001715	0.0108	0.0245	0.0069	0.0166
Εφαρμόσιμο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.00046	0.001715	0.0125	0.0250	0.0100	0.0170
Βάρος Χάλυβα ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [kg/m]	97.6					
Επιφάνεια Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [m ² /m]	1.76		1.22		1.76	
Κόστος Χάλυβα [€/kg]	2					
Κόστος Χάλυβα ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	195.2					
Κόστος Πυροπροστατευτικού Υλικού [€/m ³]	21000		433.3		450	
Ελάχιστες Απώλειες Μονωτικού Υλικού	20%		5%		10%	
Μέγιστες Απώλειες Μονωτικού Υλικού	30%		10%		20%	
Ελάχιστο Κόστος Εργασίας και Εξοπλισμού Εγκατάστασης [€/m ²]	30.00		70.00		30.00	
Μέγιστο Κόστος Εργασίας και Εξοπλισμού Εγκατάστασης [€/m ²]	50.00		90.00		50.00	
Ελάχιστο Κόστος Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	20.53	76.06	6.94	13.88	8.71	14.81
Μέγιστο Κόστος Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	22.25	82.40	7.27	14.54	9.50	16.16
Ελάχιστο Κόστος Εργασίας ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	52.8		85.4		52.8	
Μέγιστο Κόστος Εργασίας ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	88		109.8		88	
Συνολικό Ελάχιστο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	268.53	324.06	287.54	294.48	256.71	262.81
Συνολικό Μέγιστο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	305.45	365.60	312.27	319.54	292.70	299.36
Συνολικό Μέσο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	286.99	344.83	299.90	307.01	274.71	281.08

Εικόνα Β-3: Κοστολόγηση Μελών Διατομής HEA 320

Διατομή Μέλους Μονωτικό Υλικό	HEA 280					
	SteelMaster		Fireline		SLV	
Δείκτης Πυραντίστασης [min]	60	120	60	120	60	120
Κρίσιμη Θερμοκρασία [°C]	950					
Θεωρητικό Απαιτούμενο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000278	0.00095	0.0001	0.0082	0.0000	0.0053
Εφαρμόσιμο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000278	0.00095	0.0100	0.0100	0.0100	0.0100
Βάρος Χάλυβα ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [kg/m]	76.4					
Επιφάνεια Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [m ² /m]	1.6		1.1		1.6	
Κόστος Χάλυβα [€/kg]	2					
Κόστος Χάλυβα ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	152.8					
Κόστος Πυροπροστατευτικού Υλικού [€/m ³]	21000		433.3		450	
Ίσως Απώλειες Μονωτικού Υλικού	20%		5%		10%	
Μέγιστες Απώλειες Μονωτικού Υλικού	30%		10%		20%	
Ελάχιστο Κόστος Εργασίας και Εξοπλισμού Εγκατάστασης [€/m ²]	30.00		70.00		30.00	
Μέγιστο Κόστος Εργασίας και Εξοπλισμού Εγκατάστασης [€/m ²]	50.00		90.00		50.00	
Ελάχιστο Κόστος Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	11.21	38.30	5.00	5.00	7.92	7.92
Μέγιστο Κόστος Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	12.14	41.50	5.24	5.24	8.64	8.64
Ελάχιστο Κόστος Εργασίας ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	48		77		48	
Μέγιστο Κόστος Εργασίας ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	80		99		80	
Συνολικό Ελάχιστο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	212.01	239.10	234.80	234.80	208.72	208.72
Συνολικό Μέγιστο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	244.94	274.30	257.04	257.04	241.44	241.44
Συνολικό Μέσο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	228.48	256.70	245.92	245.92	225.08	225.08

Εικόνα Β-4: Κοστολόγηση Μελών Διατομής HEA 280

Διατομή Μέλους	HEA 240					
	SteelMaster		Fireline		SLV	
Μονωτικό Υλικό	60	120	60	120	60	120
Δείκτης Πυραντίστασης [min]	60	120	60	120	60	120
Κρίσιμη Θερμοκρασία [°C]	1020					
Θεωρητικό Απαιτούμενο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.00028	0.001001	0.0001	0.0050	0.0000	0.0032
Εφαρμόσιμο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.00028	0.001001	0.0100	0.0100	0.0100	0.0100
Βάρος Χάλυβα ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [kg/m]	60.3					
Επιφάνεια Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [m ² /m]	1.37		0.94		1.37	
Κόστος Χάλυβα [€/kg]	2					
Κόστος Χάλυβα ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	120.6					
Κόστος Πυροπροστατευτικού Υλικού [€/m ³]	21000		433.3		450	
Μικρότερες Απώλειες Μονωτικού Υλικού	20%		5%		10%	
Μέγιστες Απώλειες Μονωτικού Υλικού	30%		10%		20%	
Ελάχιστο Κόστος Εργασίας και Εξοπλισμού Εγκατάστασης [€/m ²]	30.00		70.00		30.00	
Μέγιστο Κόστος Εργασίας και Εξοπλισμού Εγκατάστασης [€/m ²]	50.00		90.00		50.00	
Ελάχιστο Κόστος Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	9.60	34.56	4.28	4.28	6.78	6.78
Μέγιστο Κόστος Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	10.40	37.44	4.48	4.48	7.40	7.40
Ελάχιστο Κόστος Εργασίας ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	41.1		65.8		41.1	
Μέγιστο Κόστος Εργασίας ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	68.5		84.6		68.5	
Συνολικό Ελάχιστο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	171.30	196.26	190.68	190.68	168.48	168.48
Συνολικό Μέγιστο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	199.50	226.54	209.68	209.68	196.50	196.50
Συνολικό Μέσο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	185.40	211.40	200.18	200.18	182.49	182.49

Εικόνα Β-5: Κοστολόγηση Μελών Διατομής HEA 240

Διατομή Μέλους Μονωτικό Υλικό	CHS 139.7/8					
	SteelMaster 1200WF		Fireline		SLV	
Δείκτης Πυραντίστασης [min]	60	120	60	120	60	120
Κρίσιμη Θερμοκρασία [°C]	840					
Θεωρητικό Απαιτούμενο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000726	0.001549	0.0060	0.0174	0.0019	0.0059
Εφαρμόσιμο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000726	0.001549	0.0100	0.0200	0.0100	0.0100
Βάρος Χάλυβα ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [kg/m]	25.9835					
Επιφάνεια Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [m ² /m]	0.439		0.5588		0.439	
Κόστος Χάλυβα [€/kg]	2					
Κόστος Χάλυβα ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	51.967					
Κόστος Πυροπροστατευτικού Υλικού [€/m ³]	21000		433.3		450	
ιστες Απώλειες Μονωτικού Υλικού	20%		5%		10%	
Μέγιστες Απώλειες Μονωτικού Υλικού	30%		10%		20%	
Ελάχιστο Κόστος Εργασίας και Εξοπλισμού Εγκατάστασης [€/m ²]	30.00		70.00		30.00	
Μέγιστο Κόστος Εργασίας και Εξοπλισμού Εγκατάστασης [€/m ²]	50.00		90.00		50.00	
Ελάχιστο Κόστος Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	8.03	17.14	2.54	5.08	2.17	2.17
Μέγιστο Κόστος Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	8.70	18.56	2.66	5.33	2.37	2.37
Ελάχιστο Κόστος Εργασίας ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	13.17		39.116		13.17	
Μέγιστο Κόστος Εργασίας ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	21.95		50.292		21.95	
Συνολικό Ελάχιστο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	73.17	82.27	93.63	96.17	67.31	67.31
Συνολικό Μέγιστο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	82.62	92.48	104.92	107.59	76.29	76.29
Συνολικό Μέσο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	77.89	87.38	99.27	101.88	71.80	71.80

Εικόνα Β-6: Κοστολόγηση Μελών Διατομής CHS 139.7/8

Διατομή Μέλους	CHS 114.3/5					
	Μονωτικό Υλικό		Fireline		SLV	
Μονωτικό Υλικό	SteelMaster 1200WF		Fireline		SLV	
Δείκτης Πυραντίστασης [min]	60	120	60	120	60	120
Κρίσιμη Θερμοκρασία [°C]	770					
Θεωρητικό Απαιτούμενο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000726	0.00234	0.0112	0.0269	0.0068	0.0113
Εφαρμόσιμο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000726	0.00234	0.0125	0.0300	0.0100	0.0120
Βάρος Χάλυβα ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [kg/m]	13.47845					
Επιφάνεια Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [m ² /m]	0.359		0.4572		0.359	
Κόστος Χάλυβα [€/kg]	2					
Κόστος Χάλυβα ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	26.9569					
Κόστος Πυροπροστατευτικού Υλικού [€/m ³]	21000		433.3		450	
Ίσως Απώλειες Μονωτικού Υλικού	20%		5%		10%	
Μέγιστες Απώλειες Μονωτικού Υλικού	30%		10%		20%	
Ελάχιστο Κόστος Εργασίας και Εξοπλισμού Εγκατάστασης [€/m ²]	30.00		70.00		30.00	
Μέγιστο Κόστος Εργασίας και Εξοπλισμού Εγκατάστασης [€/m ²]	50.00		90.00		50.00	
Ελάχιστο Κόστος Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	6.57	21.21	2.60	6.24	1.78	2.13
Μέγιστο Κόστος Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	7.12	22.97	2.72	6.54	1.94	2.33
Ελάχιστο Κόστος Εργασίας ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	10.77		32.004		10.77	
Μέγιστο Κόστος Εργασίας ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	17.95		41.148		17.95	
Συνολικό Ελάχιστο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	44.29	58.93	61.56	65.20	39.50	39.86
Συνολικό Μέγιστο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	52.02	67.88	70.83	74.64	46.85	47.23
Συνολικό Μέσο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	48.16	63.41	66.19	69.92	43.17	43.55

Εικόνα Β-7: Κοστολόγηση Μελών Διατομής CHS 114.3/5

Διατομή Μέλους Μονωτικό Υλικό	CHS 88.9/4					
	SteelMaster		Fireline		SLV	
Δείκτης Πυραντίστασης [min]	60	120	60	120	60	120
Κρίσιμη Θερμοκρασία [°C]	800					
Θεωρητικό Απαιτούμενο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.00073	0.00273	0.0119	0.0282	0.0044	0.0126
Εφαρμόσιμο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.00073	0.00273	0.0125	0.0300	0.0100	0.0130
Βάρος Χάλυβα ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [kg/m]	8.37595					
Επιφάνεια Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [m ² /m]	0.279		0.3556		0.279	
Κόστος Χάλυβα [€/kg]	2					
Κόστος Χάλυβα ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	16.7519					
Κόστος Πυροπροστατευτικού Υλικού [€/m ³]	21000		433.3		450	
Ελάχιστες Απώλειες Μονωτικού Υλικού	20%		5%		10%	
Μέγιστες Απώλειες Μονωτικού Υλικού	30%		10%		20%	
Ελάχιστο Κόστος Εργασίας και Εξοπλισμού Εγκατάστασης [€/m ²]	30.00		70.00		30.00	
Μέγιστο Κόστος Εργασίας και Εξοπλισμού Εγκατάστασης [€/m ²]	50.00		90.00		50.00	
Ελάχιστο Κόστος Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	5.10	19.18	2.02	4.85	1.38	1.80
Μέγιστο Κόστος Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	5.53	20.78	2.12	5.08	1.51	1.96
Ελάχιστο Κόστος Εργασίας ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	8.37		24.892		8.37	
Μέγιστο Κόστος Εργασίας ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	13.95		32.004		13.95	
Συνολικό Ελάχιστο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	30.23	44.30	43.67	46.50	26.50	26.92
Συνολικό Μέγιστο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	36.23	51.48	50.87	53.84	32.21	32.66
Συνολικό Μέσο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	33.23	47.89	47.27	50.17	29.36	29.79

Εικόνα Β-8: Κοστολόγηση Μελών Διατομής CHS 88.9/4

Διατομή Μέλους	HEA 120					
	SteelMaster		Fireline		SLV	
Μονωτικό Υλικό						
Δείκτης Πυραντίστασης [min]	60	120	60	120	60	120
Κρίσιμη Θερμοκρασία [°C]	1035					
Θεωρητικό Απαιτούμενο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.0005	0.00197	0.0000	0.0008	0.0000	0.0011
Εφαρμόσιμο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.0005	0.00197	0.0100	0.0100	0.0100	0.0100
Βάρος Χάλυβα ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [kg/m]	19.9					
Επιφάνεια Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [m ² /m]	0.279		0.46		0.279	
Κόστος Χάλυβα [€/kg]	2					
Κόστος Χάλυβα ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	39.8					
Κόστος Πυροπροστατευτικού Υλικού [€/m ³]	21000		433.3		450	
Ελάχιστες Απώλειες Μονωτικού Υλικού	20%		5%		10%	
Μέγιστες Απώλειες Μονωτικού Υλικού	30%		10%		20%	
Ελάχιστο Κόστος Εργασίας και Εξοπλισμού Εγκατάστασης [€/m ²]	30.00		70.00		30.00	
Μέγιστο Κόστος Εργασίας και Εξοπλισμού Εγκατάστασης [€/m ²]	50.00		90.00		50.00	
Ελάχιστο Κόστος Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	3.49	13.88	2.09	2.09	1.38	1.38
Μέγιστο Κόστος Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	3.78	15.04	2.19	2.19	1.51	1.51
Ελάχιστο Κόστος Εργασίας ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	8.37		32.2		8.37	
Μέγιστο Κόστος Εργασίας ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	13.95		41.4		13.95	
Συνολικό Ελάχιστο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	51.66	62.05	74.09	74.09	49.55	49.55
Συνολικό Μέγιστο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	57.53	68.79	83.39	83.39	55.26	55.26
Συνολικό Μέσο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	54.59	65.42	78.74	78.74	52.40	52.40

Εικόνα Β-9: Κοστολόγηση Μελών Διατομής HEA 120

6.2 Κοστολόγηση Παθητικής Πυροπροστασίας Φορέα 2

Παρουσιάζονται οι πίνακες κοστολόγησης των μελών του Φορέα 2 για τα τρία μονωτικά υλικά και τους δύο ενδεχόμενους δείκτες πυραντίστασης.

Διατομή Μέλους	HEB 400					
	SteelMaster 1200WF		Fireline		SLV	
Μονωτικό Υλικό						
Δείκτης Πυραντίστασης [min]	60	120	60	120	60	120
Κρίσιμη Θερμοκρασία [°C]	693					
Θεωρητικό Απαιτούμενο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000301	0.000829	0.0060	0.0149	0.0036	0.0092
Εφαρμόσιμο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000301	0.000829	0.0100	0.0150	0.0100	0.0100
Βάρος Χάλυβα ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [kg/m]	155					
Επιφάνεια Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [m ² /m]	1.93		1.4		1.93	
Κόστος Χάλυβα [€/kg]	2					
Κόστος Χάλυβα ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	310					
Κόστος Πυροπροστατευτικού Υλικού [€/m ³]	21000		433.3		450	
Ελάχιστες Απώλειες Μονωτικού Υλικού	20%		5%		10%	
Μέγιστες Απώλειες Μονωτικού Υλικού	30%		10%		20%	
Ελάχιστο Κόστος Εργασίας και Εξοπλισμού Εγκατάστασης [€/m ²]	30.00		70.00		30.00	
Μέγιστο Κόστος Εργασίας και Εξοπλισμού Εγκατάστασης [€/m ²]	50.00		90.00		50.00	
Ελάχιστο Κόστος Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	14.64	40.32	6.37	9.55	9.55	9.55
Μέγιστο Κόστος Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	15.86	43.68	6.67	10.01	10.42	10.42
Ελάχιστο Κόστος Εργασίας ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	57.9		98		57.9	
Μέγιστο Κόστος Εργασίας ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	96.5		126		96.5	
Συνολικό Ελάχιστο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	382.54	408.22	414.37	417.55	377.45	377.45
Συνολικό Μέγιστο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	422.36	450.18	442.67	446.01	416.92	416.92
Συνολικό Μέσο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	402.45	429.20	428.52	431.78	397.19	397.19

Εικόνα Β-10: Κοστολόγηση Μελών Διατομής HEB 400

Διατομή Μέλους	HEB 320					
	SteelMaster 1200WF		Fireline		SLV	
Μονωτικό Υλικό						
Δείκτης Πυραντίστασης [min]	60	120	60	120	60	120
Κρίσιμη Θερμοκρασία [°C]	860					
Θεωρητικό Απαιτούμενο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000278	0.000673	0.0024	0.0079	0.0015	0.0049
Εφαρμόσιμο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000278	0.000673	0.0100	0.0100	0.0100	0.0100
Βάρος Χάλυβα ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [kg/m]	127					
Επιφάνεια Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [m ² /m]	1.77		1.24		1.77	
Κόστος Χάλυβα [€/kg]	2					
Κόστος Χάλυβα ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	254					
Κόστος Πυροπροστατευτικού Υλικού [€/m ³]	21000		433.3		450	
Ελάχιστες Απώλειες Μονωτικού Υλικού	20%		5%		10%	
Μέγιστες Απώλειες Μονωτικού Υλικού	30%		10%		20%	
Ελάχιστο Κόστος Εργασίας και Εξοπλισμού Εγκατάστασης [€/m ²]	30.00		70.00		30.00	
Μέγιστο Κόστος Εργασίας και Εξοπλισμού Εγκατάστασης [€/m ²]	50.00		90.00		50.00	
Ελάχιστο Κόστος Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	12.40	30.02	5.64	5.64	8.76	8.76
Μέγιστο Κόστος Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	13.43	32.52	5.91	5.91	9.56	9.56
Ελάχιστο Κόστος Εργασίας ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	53.1		86.8		53.1	
Μέγιστο Κόστος Εργασίας ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	88.5		111.6		88.5	
Συνολικό Ελάχιστο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	319.50	337.12	346.44	346.44	315.86	315.86
Συνολικό Μέγιστο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	355.93	375.02	371.51	371.51	352.06	352.06
Συνολικό Μέσο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	337.72	356.07	358.98	358.98	333.96	333.96

Εικόνα Β-11: Κοστολόγηση Μελών Διατομής HEB 320

Διατομή Μέλους	HEB 300					
	SteelMaster 1200WF		Fireline		SLV	
Μονωτικό Υλικό						
Δείκτης Πυραντίστασης [min]	60	120	60	120	60	120
Κρίσιμη Θερμοκρασία [°C]	657					
Θεωρητικό Απαιτούμενο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.00028	0.000946	0.0079	0.0189	0.0050	0.0124
Εφαρμόσιμο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.00028	0.000946	0.0100	0.0200	0.0100	0.0130
Βάρος Χάλυβα ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [kg/m]	117					
Επιφάνεια Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [m ² /m]	1.73		1.2		1.73	
Κόστος Χάλυβα [€/kg]	2					
Κόστος Χάλυβα ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	234					
Κόστος Πυροπροστατευτικού Υλικού [€/m ³]	21000		433.3		450	
Ελάχιστες Απώλειες Μονωτικού Υλικού	20%		5%		10%	
Μέγιστες Απώλειες Μονωτικού Υλικού	30%		10%		20%	
Ελάχιστο Κόστος Εργασίας και Εξοπλισμού Εγκατάστασης [€/m ²]	30.00		70.00		30.00	
Μέγιστο Κόστος Εργασίας και Εξοπλισμού Εγκατάστασης [€/m ²]	50.00		90.00		50.00	
Ελάχιστο Κόστος Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	12.12	41.24	5.46	10.92	8.56	11.13
Μέγιστο Κόστος Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	13.13	44.68	5.72	11.44	9.34	12.14
Ελάχιστο Κόστος Εργασίας ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	51.9		84		51.9	
Μέγιστο Κόστος Εργασίας ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	86.5		108		86.5	
Συνολικό Ελάχιστο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	298.02	327.14	323.46	328.92	294.46	297.03
Συνολικό Μέγιστο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	333.63	365.18	347.72	353.44	329.84	332.64
Συνολικό Μέσο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	315.82	346.16	335.59	341.18	312.15	314.84

Εικόνα Β-12: Κοστολόγηση Μελών Διατομής HEB 300

Διατομή Μέλους	HEB 260					
Μονωτικό Υλικό	SteelMaster 1200WF		Fireline		SLV	
ΐκτης Πυραντίστασης [min]	60	120	60	120	60	120
Κρίσιμη Θερμοκρασία [°C]	970					
Θεωρητικό Απαιτούμενο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000278	0.00075	0.0000	0.0059	0.0000	0.0037
Εφαρμόσιμο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000278	0.00075	0.0100	0.0100	0.0100	0.0100
Βάρος Χάλυβα ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [kg/m]	93					
Επιφάνεια Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [m ² /m]	1.5		1.04		1.5	
Κόστος Χάλυβα [€/kg]	2					
Κόστος Χάλυβα ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	186					
Κόστος Πυροπροστατευτικού Υλικού [€/m ³]	21000		433.3		450	
τες Απώλειες Μονωτικού Υλικού	20%		5%		10%	
Μέγιστες Απώλειες Μονωτικού Υλικού	30%		10%		20%	
Ελάχιστο Κόστος Εργασίας και Εξοπλισμού Εγκατάστασης [€/m ²]	30.00		70.00		30.00	
Μέγιστο Κόστος Εργασίας και Εξοπλισμού Εγκατάστασης [€/m ²]	50.00		90.00		50.00	
Ελάχιστο Κόστος Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	10.51	28.27	4.73	4.73	7.43	7.43
Μέγιστο Κόστος Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	11.38	30.63	4.96	4.96	8.10	8.10
Ελάχιστο Κόστος Εργασίας ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	45		72.8		45	
Μέγιστο Κόστος Εργασίας ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	75		93.6		75	
Συνολικό Ελάχιστο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	241.51	259.27	263.53	263.53	238.43	238.43
Συνολικό Μέγιστο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	272.38	291.63	284.56	284.56	269.10	269.10
Συνολικό Μέσο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	256.95	275.45	274.04	274.04	253.76	253.76

Εικόνα Β-13: Κοστολόγηση Μελών Διατομής HEB 260

Διατομή Μέλους	HEB 220					
Μονωτικό Υλικό	SteelMaster 1200WF		Fireline		SLV	
Ώρα Πυραντίστασης [min]	60	120	60	120	60	120
Κρίσιμη Θερμοκρασία [°C]	880					
Θεωρητικό Απαιτούμενο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.00028	0.000824	0.0027	0.0092	0.0017	0.0058
Εφαρμόσιμο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.00028	0.000824	0.0100	0.0100	0.0100	0.0100
Βάρος Χάλυβα ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [kg/m]	71.5					
Επιφάνεια Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [m ² /m]	1.27		0.88		1.27	
Κόστος Χάλυβα [€/kg]	2					
Κόστος Χάλυβα ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	143					
Κόστος Πυροπροστατευτικού Υλικού [€/m ³]	21000		433.3		450	
Ποσοστά Απώλειες Μονωτικού Υλικού	20%		5%		10%	
Μέγιστες Απώλειες Μονωτικού Υλικού	30%		10%		20%	
Ελάχιστο Κόστος Εργασίας και Εξοπλισμού Εγκατάστασης [€/m ²]	30.00		70.00		30.00	
Μέγιστο Κόστος Εργασίας και Εξοπλισμού Εγκατάστασης [€/m ²]	50.00		90.00		50.00	
Ελάχιστο Κόστος Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	8.90	26.37	4.00	4.00	6.29	6.29
Μέγιστο Κόστος Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	9.64	28.57	4.19	4.19	6.86	6.86
Ελάχιστο Κόστος Εργασίας ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	38.1		61.6		38.1	
Μέγιστο Κόστος Εργασίας ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	63.5		79.2		63.5	
Συνολικό Ελάχιστο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	190.00	207.47	208.60	208.60	187.39	187.39
Συνολικό Μέγιστο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	216.14	235.07	226.39	226.39	213.36	213.36
Συνολικό Μέσο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	203.07	221.27	217.50	217.50	200.37	200.37

Εικόνα Β-14: Κοστολόγηση Μελών Διατομής HEB 220

Διατομή Μέλους	CHS 139.7/10					
Μονωτικό Υλικό	SteelMaster 1200WF		Fireline		SLV	
Δείκτης Πυραντίστασης [min]	60	120	60	120	60	120
Κρίσιμη Θερμοκρασία [°C]	885					
Θεωρητικό Απαιτούμενο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000726	0.001328	0.0044	0.0134	0.0014	0.0045
Εφαρμόσιμο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000726	0.001328	0.0100	0.0150	0.0100	0.0100
Βάρος Χάλυβα ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [kg/m]	31.98875					
Επιφάνεια Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [m ² /m]	0.439		0.5588		0.439	
Κόστος Χάλυβα [€/kg]	2					
Κόστος Χάλυβα ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	63.9775					
Κόστος Πυροπροστατευτικού Υλικού [€/m ³]	21000		433.3		450	
Ελάχιστες Απώλειες Μονωτικού Υλικού	20%		5%		10%	
Μέγιστες Απώλειες Μονωτικού Υλικού	30%		10%		20%	
Ελάχιστο Κόστος Εργασίας και Εξοπλισμού Εγκατάστασης [€/m ²]	30.00		70.00		30.00	
Μέγιστο Κόστος Εργασίας και Εξοπλισμού Εγκατάστασης [€/m ²]	50.00		90.00		50.00	
Ελάχιστο Κόστος Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	8.03	14.69	2.54	3.81	2.17	2.17
Μέγιστο Κόστος Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	8.70	15.92	2.66	4.00	2.37	2.37
Ελάχιστο Κόστος Εργασίας ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	13.17		39.116		13.17	
Μέγιστο Κόστος Εργασίας ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	21.95		50.292		21.95	
Συνολικό Ελάχιστο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	85.18	91.84	105.64	106.91	79.32	79.32
Συνολικό Μέγιστο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	94.63	101.84	116.93	118.26	88.30	88.30
Συνολικό Μέσο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	89.90	96.84	111.28	112.59	83.81	83.81

Εικόνα Β-15: Κοστολόγηση Μελών Διατομής CHS 139.7/10

Διατομή Μέλους	CHS 114.3/8					
Μονωτικό Υλικό	SteelMaster 1200WF		Fireline		SLV	
Δείκτης Πυραντίστασης [min]	60	120	60	120	60	120
Κρίσιμη Θερμοκρασία [°C]	785					
Θεωρητικό Απαιτούμενο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000726	0.00155	0.0073	0.0193	0.0024	0.0069
Εφαρμόσιμο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.000726	0.00155	0.0100	0.0200	0.0100	0.0100
Βάρος Χάλυβα ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [kg/m]	20.9752					
Επιφάνεια Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [m ² /m]	0.359		0.4572		0.359	
Κόστος Χάλυβα [€/kg]	2					
Κόστος Χάλυβα ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	41.9504					
Κόστος Πυροπροστατευτικού Υλικού [€/m ³]	21000		433.3		450	
Ελάχιστες Απώλειες Μονωτικού Υλικού	20%		5%		10%	
Μέγιστες Απώλειες Μονωτικού Υλικού	30%		10%		20%	
Ελάχιστο Κόστος Εργασίας και Εξοπλισμού Εγκατάστασης [€/m ²]	30.00		70.00		30.00	
Μέγιστο Κόστος Εργασίας και Εξοπλισμού Εγκατάστασης [€/m ²]	50.00		90.00		50.00	
Ελάχιστο Κόστος Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	6.57	14.01	2.08	4.16	1.78	1.78
Μέγιστο Κόστος Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	7.12	15.18	2.18	4.36	1.94	1.94
Ελάχιστο Κόστος Εργασίας ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	10.77		32.004		10.77	
Μέγιστο Κόστος Εργασίας ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	17.95		41.148		17.95	
Συνολικό Ελάχιστο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	59.29	66.73	76.03	78.11	54.50	54.50
Συνολικό Μέγιστο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	67.02	75.08	85.28	87.46	61.84	61.84
Συνολικό Μέσο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	63.15	70.91	80.66	82.79	58.17	58.17

Εικόνα Β-16: Κοστολόγηση Μελών Διατομής CHS 114.3/8

Διατομή Μέλους	CHS 88.9/6					
Μονωτικό Υλικό	SteelMaster 1200WF		Fireline		SLV	
Δείκτης Πυραντίστασης [min]	60	120	60	120	60	120
Κρίσιμη Θερμοκρασία [°C]	820					
Θεωρητικό Απαιτούμενο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.00073	0.0019	0.0081	0.0217	0.0027	0.0082
Εφαρμόσιμο Πάχος Μονωτικού Υλικού [m]	0.00073	0.0019	0.0100	0.0250	0.0100	0.0100
Βάρος Χάλυβα ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [kg/m]	12.246					
Επιφάνεια Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [m ² /m]	0.279		0.3556		0.279	
Κόστος Χάλυβα [€/kg]	2					
Κόστος Χάλυβα ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	24.492					
Κόστος Πυροπροστατευτικού Υλικού [€/m ³]	21000		433.3		450	
Ελάχιστες Απώλειες Μονωτικού Υλικού	20%		5%		10%	
Μέγιστες Απώλειες Μονωτικού Υλικού	30%		10%		20%	
Ελάχιστο Κόστος Εργασίας και Εξοπλισμού Εγκατάστασης [€/m ²]	30.00		70.00		30.00	
Μέγιστο Κόστος Εργασίας και Εξοπλισμού Εγκατάστασης [€/m ²]	50.00		90.00		50.00	
Ελάχιστο Κόστος Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	5.10	13.37	1.62	4.04	1.38	1.38
Μέγιστο Κόστος Μονωτικού ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	5.53	14.48	1.69	4.24	1.51	1.51
Ελάχιστο Κόστος Εργασίας ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	8.37		24.892		8.37	
Μέγιστο Κόστος Εργασίας ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	13.95		32.004		13.95	
Συνολικό Ελάχιστο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	37.97	46.23	51.00	53.43	34.24	34.24
Συνολικό Μέγιστο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	43.97	52.92	58.19	60.73	39.95	39.95
Συνολικό Μέσο Κόστος ανά Τρέχον Μέτρο Μέλους [€/m]	40.97	49.57	54.60	57.08	37.10	37.10

Εικόνα Β-17: Κοστολόγηση Μελών Διατομής CHS 88.9/6