

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
“Αντισεισμική και Ενεργειακή Αναβάθμιση Κατασκευών και
Αειφόρος Ανάπτυξη”

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
«Σχεδιασμός Μεταλλικών Φορέων Έναντι
Πυρκαγιάς Κατά Την Κανονιστική Διάταξη Του
Ευρωκώδικα 3»

ΕΚΤΟΡΑΣ ΜΠΛΑΤΣΗΣ

Επιβλέπων

Γεώργιος Μαγείρου

Αθήνα, Ιουνιος 2018

*Ευχαριστίες για τη στήριξη και την
πολύτιμη βοήθεια του επιβλέποντα
καθηγητή μου κ.Μαγείρου.*

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασία είναι να παρουσιάσει την επίδραση του φαινομένου της πυρκαγιάς στις μεταλλικές – χαλύβδινες κατασκευές, τις αρχές και τους τρόπους σχεδιασμού που εφαρμόζονται με βάση την κανονιστική διάταξη του Ευρωκώδικα 3 ώστε να εξασφαλιστεί η πυροπροστασία αυτών, καθώς επίσης αναφέρεται στις επισκευές και στις ενισχύσεις που θα πρέπει να πραγματοποιηθούν προκειμένου να επανέλθει ο μεταλλικός φορέας της κατασκευής στην πρότερή του κατάσταση και με μεγαλύτερες αντοχές σε σχέση με τις αρχικές, πριν την έκθεσή του στην πυρκαγιά.

Η διπλωματική εργασία περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά στοιχεία της πυρκαγιάς που μπορεί να επηρεάσουν μια κατασκευή, τη συμπεριφορά των διάφορων υλικών σε υψηλές θερμοκρασίες, τις αρχές και βάσεις σχεδιασμού για την πυροπροστασία και τις μεθόδους αποκατάστασης που εφαρμόζονται σε χαλύβδινες κατασκευές.

Λέξεις-κλειδιά: Σχεδιασμός, Μεταλλικά Κτίρια, Πυρκαγιά, Πυροπροστασία, Ευρωκώδικας 3, Επισκευή, Επέμβαση,

Design of steel structures due to fire according to Eurocode 3

Summary

This bachelor's thesis presents the effect of the fire in metal - iron structures, the principles and design models implemented under the regulatory provision of Eurocode 3 in order to ensure their fire protection, and also refers to the repairs and reinforcements that need to be made to restore the metallic o construction to its former state and with bigger durability than the original, before its exposure to the fire.

The bachelor thesis includes the characteristic elements of a fire that can affect a construction, the behavior of various materials at high temperatures, principles and design bases for fire protection and methods of rehabilitation applied to iron structures.

Wo-keys: Design, Metallic buildings, Fire, Fire protection, Eurocode 3, Repair, Intervention

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗσελ. 10

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΝΟΝΙΣΜΩΝ ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑ3σελ. 13
2.1. Ιδιότητες των υλικών κατασκευής σε υψηλές θερμοκρασίες σελ. 13
2.2. Θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια των πυρκαγιών σελ. 16
2.3. Συμπεριφορά δοκών και υποστυλωμάτων σε δοκιμασίες φούρνου σελ. 20
2.4. Μέθοδοι προστασίας έναντι φωτιάς σελ. 22
2.5. Απλός σχεδιασμός μελών από χάλυβα κατά τον Ευρωκώδικα..... σελ. 25
2.6. Ιδιότητες του υλικού σελ. 28
2.7. Κατάταξη διατομών σελ. 33
2.8. Κρίσιμη θερμοκρασία σελ. 35
2.9. Αντοχή εφελκυσόμενων μελών σελ. 36
2.10. Αντοχή πλευρικά στηριζόμενων δοκών σελ. 36
2.11. Στρεπτοκαμπτικός λυγισμός σελ. 37
2.12. Αντοχή των θλιβόμενων μελών σελ. 38
2.13. Δείκτης πυραντίστασης μη προστατευμένων μελών από χάλυβα..... σελ. 39
2.14. Δείκτης πυραντίστασης προστατευόμενων μελών από χάλυβα σελ. 42

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΑ ΚΑΙ ΠΑΘΗΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΥΡΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ.....	σελ. 44
------------------------------------------------------------------	----------------

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΒΛΑΒΕΣ ΑΠΟ ΠΥΡΚΑΓΙΑ	σελ. 47
4.1. Βλάβες μελών από πυρκαγιά.....	σελ. 47
4.1.1. Τοπικός λυγισμός	σελ. 48
4.1.2. Σύνθλιψης κεφαλής υποστυλώματος	σελ. 48
4.1.3. Καθολικός λυγισμός υποστυλώματος	σελ. 49
4.2. Βλάβες συνδέσεων από πυρκαγιά	σελ. 49
4.2.1. Διατμητική αστοχία κοχλιών	σελ. 49

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΥΛΙΚΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ	σελ. 50
5.1. Πυρίμαχες πλάκες	σελ. 51
5.2. Εκτοξευόμενα επιχρίσματα	σελ. 53
5.3. Διογκούμενες βαφές	σελ. 54

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

ΠΥΡΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑ, ΕΠΙΣΚΕΥΕΣ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΠΥΡΚΑΓΙΑ	σελ. 57
--------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ.....	σελ. 65
---------------------------------------	----------------

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑσελ. 71

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9^ο

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑσελ. 73

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. Σκελετός Μεταλλικού Κτιρίου	σελ. 12
Εικόνα 2. Σήματα Διάσωσης.....	σελ. 45
Εικόνα 3. Πυροσβεστήρες.....	σελ. 46
Εικόνα 4. Sprinklers	σελ. 46
Εικόνα 5. Τοπικός λυγισμός	σελ. 48
Εικόνα 6. Σύνθλιψη κεφαλής υποστυλώματος	σελ. 48
Εικόνα 7. Καθολικός λυγισμός υποστυλώματος.....	σελ. 49
Εικόνα 8. Διατμητική αστοχία κοχλιών	σελ. 49
Εικόνα 9. Εφαρμογή πυρίμαχων πλακών	σελ. 52
Εικόνα 10. Πυρίμαχες Πλάκες	σελ. 53
Εικόνα 11. Εφαρμογή εκτοξευόμενου επιχρίσματος	σελ. 54
Εικόνα 12. Εφαρμογή χρώματος πυροπροστασίας σε μεταλλικό στοιχείο.....	σελ. 56
Εικόνα 13. Εφαρμογή χρώματος πυροπροστασίας σε μεταλλικό στέγη	σελ. 56
Εικόνα 14. Spot Heat και Line Heat	σελ. 58
Εικόνα 15. Εφαρμογή ινοπλισμένων πολυμερών	σελ. 59

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. Ελάχιστοι Επιτρεπόμενοι Δείκτες Πυραντίστασης	σελ. 51
Πίνακας 2. Αξιολόγηση ινών με βάση την ανθεκτικότητα.....	σελ. 64

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

- Σχήμα 1.** Μείωση των χαρακτηριστικών μεγεθών του διαγράμματος τάσεων- παραμορφώσεων χάλυβα ποιότητας S275 με τη θερμοκρασία (Καμπύλες EC3) σελ. 15
- Σχήμα 2.** Καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων του EC4 σε διάφορες θερμοκρασίες για συνήθους βάρους και ελαφρά σκυροδέματα σελ. 16
- Σχήμα 3.** Φάσεις φυσικής φωτιάς, συγκρίνοντας τις σχετικές θερμοκρασίες του αέρα με την πρότυπη καμπύλη φωτιάς του ISO83 σελ. 17
- Σχήμα 4.** Θερμοκρασία ατμόσφαιρας κατά την πρότυπη καμπύλη φωτιάς ISO834..... σελ. 18
- Σχήμα 5.** Οι ονομαστικές καμπύλες φωτιάς του EC1 Μέρος 2-2 συγκρινόμενες με παραμετρική φωτιά σελ. 18
- Σχήμα 6.** Ισοδύναμος χρόνος έκθεσης σε φυσικές πυρκαγιές σελ. 20
- Σχήμα 7.** Συνδεόμενη με την πλάκα από σκυροδέμα προστασία έναντι πυρκαγιάς των χαλύβδινων δοκών σελ. 24
- Σχήμα 8.** Μειωτικοί συντελεστές αντοχής κατά τον EC3 για δομικούς χάλυβες (SS) και επεξεργασμένους εν ψυχρώ οπλισμούς (Rft) σε υψηλές θερμοκρασίες σελ. 29
- Σχήμα 9.** Μειωτικοί συντελεστές αντοχής κατά τον EC4 για κανονικού βάρους πυριτικά σκυροδέματα και ελαφρά σκυροδέματα σε υψηλές θερμοκρασίες σελ. 30
- Σχήμα 10.** Μεταβολή των συντελεστών θερμικής διαστολής του χάλυβα και του σκυροδέματος, κατά τους Ευρωκώδικες 3 και 4, με τη θερμοκρασία σελ. 31
- Σχήμα 11.** Παράσταση των προβλέψεων του Ευρωκώδικα 3 για τη μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας του χάλυβα συναρτήσει της θερμοκρασίας σελ. 32
- Σχήμα 12.** Μεταβολή της ειδικής θερμότητας του χάλυβα με τη θερμοκρασίασελ. 33
- Σχήμα 13.** Κρίσιμη θερμοκρασία, συνδεόμενη με το βαθμό αξιοποίησης σελ. 35
- Σχήμα 14.** Μήκη λυγισμού υποστυλωμάτων σε πυρκαγιά σελ. 39
- Σχήμα 15.** Αρχές υπολογισμού του συντελεστή διατομής..... σελ. 41

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κτίρια που στεγάζουν βιομηχανίες ή αποθήκες ή και παραγωγικές ή αθλητικές δραστηριότητες, αποτελούν και στην Ελλάδα, παραδοσιακό και προνομιακό πεδίο εφαρμογής γερόντων οργανισμών από χάλυβα. Τα κτίρια αυτά συνδέονται, κατά κανόνα, με την απουσία ωφέλιμων φορτίων επί της οροφής τους και με τη χρήση ελαφρών υλικών για την επικάλυψη και πλευρική επένδυση τους.

Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα που χαρακτηρίζουν τα κτίρια από χάλυβα είναι :

α) Το σχετικά μικρό βάρος τους το οποίο συνεπάγεται πιο εύκολη θεμελίωση (μικρότερος κίνδυνος καθιζήσεων) σε κακής ποιότητας εδάφη και μικρές σεισμικές δυνάμεις.

β) Η ταχύτητα κατασκευής. Με επαρκή συντονισμό, περιλαμβανομένης της φάσης των μελετών, είναι δυνατή η πραγματοποίηση της βιομηχανικής κατεργασίας των χαλύβδινων στοιχείων κατά τη φάση εκτέλεσης των εκσκαφών, της θεμελίωσης, της επίχωσης και διαμόρφωσης της υπόβασης του δαπέδου, ενώ η εργοταξιακή συναρμολόγηση, που συνήθως εξελίσσεται με ταχείς ρυθμούς, μπορεί να αρχίσει αμέσως μετά.

γ) Το υψηλό ποσοστό βιομηχανικής προκατασκευής του έργου με θετικές συνέπειες και στην ποιότητά του.

δ) Η πολύ ικανοποιητική και ελεγχόμενη απόκρισή τους σε συνθήκες σεισμού, οφειλόμενη κυρίως στη μεγάλη ολκιμότητα του χάλυβα.

ε) Η επισκευασιμότητά τους.

ζ) Η εύκολη ενίσχυση των μεταλλικών κτιρίων για την παραλαβή μεγαλύτερων φορτίων, εφ' όσον απαιτηθεί.

Για να εξασφαλιστούν οι ευνοϊκές επιπτώσεις που απορρέουν από τα παραπάνω πλεονεκτήματα, πρέπει να καταβληθεί αυξημένη μελετητική προσπάθεια, ιδιαίτερα στη φάση της μελέτης εφαρμογής και της διαμόρφωσης των κατασκευαστικών λεπτομερειών και να εγκατασταθεί ένα σύστημα ποιοτικού ελέγχου, κυρίως των συγκολλήσεων αλλά επίσης τυχόν ατελειών των κυρίων μελών του φέροντος οργανισμού, των κοχλιώσεων και της επιφανειακής προστασίας.

(Ι. Βάγιας, Ι. Ερμόπουλος, Γ. Ιωαννίδης, «Σχεδιασμός Δομικών Έργων από Χάλυβα με Παραδείγματα Εφαρμογής», εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2013)

Οι Ευρωκώδικες αποτελούν σειρά κανονισμών αναφερόμενων στο σχεδιασμό δομικών έργων ειδικότητας Πολιτικού Μηχανικού. Στόχος τους είναι η βελτίωση της λειτουργίας της αγοράς στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης στην περιοχή των τεχνικών έργων.

Ο Ευρωκώδικας 3 αναφέρεται ειδικότερα στο σχεδιασμό δομικών έργων από χάλυβα. Οι νέοι κανονισμοί επέφεραν σημαντικές αλλαγές στη φιλοσοφία σχεδιασμού των έργων, με τη μετάβαση από τη μέθοδο των επιτρεπόμενων τάσεων στη μέθοδο των οριακών καταστάσεων. Στον Ευρωκώδικα 3 περιλαμβάνονται και οι αρχές σχεδιασμού των χαλύβδινων κατασκευών έναντι του φαινομένου της πυρκαγιάς

Το φαινόμενο της πυρκαγιάς αποτελεί αναμφισβήτητα πολύ σημαντικό παράγοντα για το σχεδιασμό των κτιρίων, ειδικά αν είναι πολυώροφα, καθώς αυξάνεται η δυσκολία απομάκρυνσης και διαφυγής του κοινού από το κτίριο με αποτέλεσμα τον εγκλωβισμό και την απώλεια ακόμη και ανθρωπίνων ζώων. Αποτελεί φαινόμενο που μπορεί να συμβεί σε ένα οποιοδήποτε κτίριο, οποιαδήποτε στιγμή και με οποιοδήποτε ένταση. Δημιουργείται έτσι η ανάγκη για τον έλεγχο του κτιρίου σε επίπεδο πυρασφάλειας, που οδηγεί στην εφαρμογή της ενεργητικής και της παθητικής πυροπροστασίας. Με τον όρο ενεργητική πυροπροστασία εννοούμε τα μέσα πυροπροστασίας που τοποθετούνται για την έγκαιρη εξακρίβωση και αντιμετώπιση της πυρκαγιάς, όπως είναι παράδειγμα το σύστημα αυτόματων καταιονητήρων. Με τον όρο παθητική πυροπροστασία εννοούμε το σύνολο των μέτρων που πρέπει να ληφθούν για την άμεση διαφυγή του κοινού μετά το ξέσπασμα της πυρκαγιάς, όπως είναι παράδειγμα ο φωτισμός και η χρήση οδεύσεων διαφυγής.



Εικόνα 1. Σκελετός Μεταλλικού Κτιρίου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΝΟΝΙΣΜΩΝ ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑ 3

Στόχοι του τεχνικού μελετητή κατά το σχεδιασμό ενός έργου είναι η ασφάλεια, η οικονομία, η λειτουργικότητα, η ανθεκτικότητα και η αισθητική. Ο τρόπος εκτέλεσης, όπου επηρεάζει σημαντικά το κόστος του έργου, του οποίου βασικό στοιχείο είναι και η απαιτούμενη διάρκεια για την κατασκευή, πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη κατά το σχεδιασμό και να αντιμετωπίζεται από το μελετητή ως μία αλληλουχία φάσεων, σε κάθε μία από τις οποίες (ενδιάμεσες και τελική) θα πρέπει να εξασφαλίζεται η ασφάλεια του φορέα. Γενικότερα, όχι μόνο σε νέα κτίρια, αλλά και σε υφιστάμενα, ή για το σχεδιασμό επισκευών και μετατροπών ή για την εκτίμηση των επιπτώσεων από αλλαγή χρήσης, θα πρέπει να εξετάζεται από το μελετητή κάθε νέα κατάσταση του φορέα, προκειμένου να εξασφαλίζεται το απαιτούμενο επίπεδο ασφαλείας και λειτουργικότητας.

Αρχικό βήμα στη διαδικασία της αποτίμησης μία υφιστάμενης κατασκευής που έχει προσβληθεί από πυρκαγιά είναι η εκτίμηση τόσο των θερμοκρασιών που αναπτύχθηκαν εντός της μάζας των δομικών στοιχείων του φέροντος οργανισμού, όσο και της διάρκειας της πυρκαγιάς. Συνεπώς, προϋποθέτει ότι έχει προηγηθεί η εκτίμηση της θερμοκρασίας των αερίων μέσα στο πυροδιαμέρισμα κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς.

Το βασικότερο κανονιστικό εργαλείο στα χέρια του μελετητή είναι το πλέγμα των Ευρωκωδίκων, μέσω του οποίου καλύπτονται τα περισσότερα από τα θέματα, τα οποία αναφέρονται κατά το σχεδιασμό (μόρφωση, ανάλυση, διαστασιολόγηση κλπ.) μίας κατασκευής.

(Ι. Βάγιας, Ι. Ερμόπουλος, Γ. Ιωαννίδης, «Σχεδιασμός Δομικών Έργων Από Χάλυβα, Με βάση τα τελικά κείμενα των Ευρωκωδίκων», εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2011)

Στην παρούσα διπλωματική εργασία ο κανονιστικό πλαίσιο που θα μας απασχολήσει είναι ο EN 1993 Ευρωκώδικας 3 : Σχεδιασμός Κατασκευών από Χάλυβα.

2.1. Ιδιότητες των υλικών κατασκευής σε υψηλές θερμοκρασίες

Χάλυβας

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα του χάλυβα, τα οποία προσδίδουν το χαρακτηρισμό του πλέον ευέλικτου και ίσως του καλύτερου σήμερα δομικού υλικού, είναι τα εξής:

- Μεγάλη αντοχή ή μεγάλος λόγος αντοχής προς ίδιο βάρος. Αυτό οδηγεί σε λεπτές διατομές, μείωση των ιδίων βαρών του φέροντα οργανισμού, οικονομία χώρου και υλικού, ζεύξη μεγάλων ανοιγμάτων χωρίς ενδιάμεση υποστήλωση.
- Ομογένεια υλικού. Τα χαρακτηριστικά του είναι σταθερά σε κάθε σημείο της μάζας του υλικού, γεγονός που εξασφαλίζει την ακρίβεια των παραδοχών ανάλυσης και των ελέγχων αντοχής.
- Μονιμότητα. Τα χαρακτηριστικά του είναι αμετάβλητα στο χρόνο, εφόσον παρέχεται η κατάλληλη συντήρηση, εξασφαλίζεται απεριόριστη διάρκεια ζωής της κατασκευής.
- Ελαστικότητα. Ο χάλυβας συμπεριφέρεται ελαστικά έως και σχετικά υψηλές τάσεις, τα σε γεωμετρικά και αδρανειακά χαρακτηριστικά του προσδιορίζονται με μεγάλη ακρίβεια.
- Ολκιμότητα. Είναι η ικανότητα του χάλυβα να υπόκειται σε μεγάλες παραμορφώσεις χωρίς να αστοχεί.
- Η ταχύτητα εκτέλεσης.
- Βιομηχανικό κατά το μεγαλύτερο μέρος του προϊόν με ελεγχόμενη εκ τούτου ποιότητα.
- Το σχετικά μικρό βάρος των χαλύβδινων κατασκευών συνεπάγεται μικρότερες αδρανειακές σεισμικές δυνάμεις.

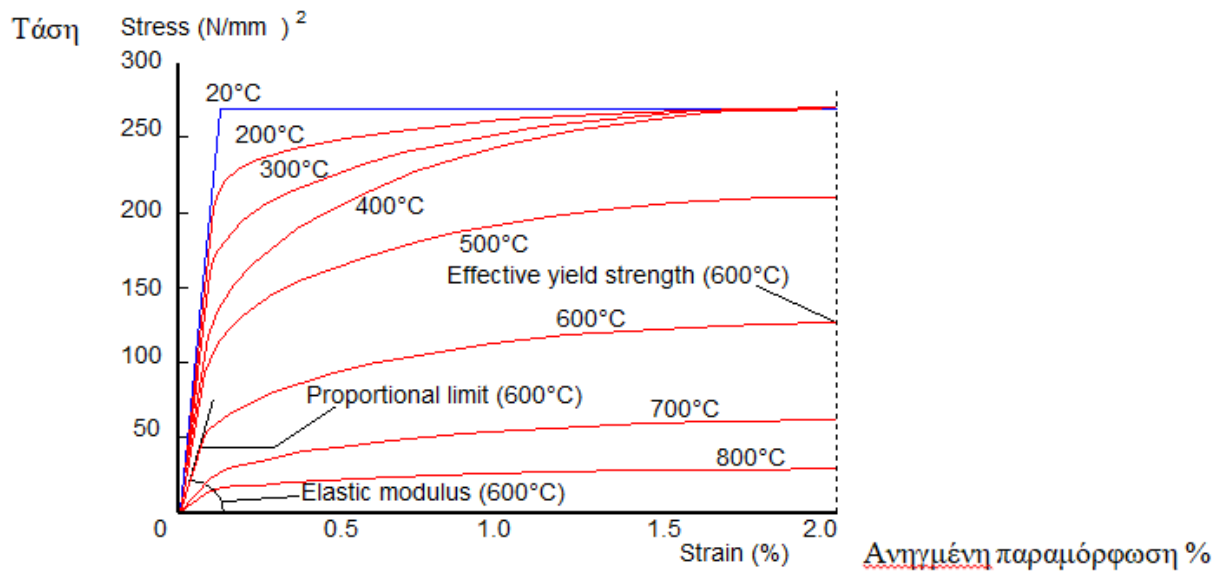
Στα μειονεκτήματα του υλικού συγκαταλέγονται :

- Η ευαισθησία σε υψηλές θερμοκρασίες (οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται σε περίπτωση πυρκαγιάς, προκαλούν έντονη απομείωση της αντοχής του χάλυβα) και η ανάγκη λήψης μέτρων πυροπροστασίας.

- Η ευαισθησία σε φαινόμενα αστάθειας, το φαινόμενο του λυγισμού.
- Η ευαισθησία έναντι κόπωσης.

Τα περισσότερα δομικά υλικά υφίστανται προοδευτική απώλεια αντοχής και δυσκαμψίας καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία τους. Για το χάλυβα γίνεται εμφανής η αλλαγή για θερμοκρασίες άνω των 300 °C. Ο χάλυβας σαν υλικό δεν παρουσιάζει την ίδια καλή συμπεριφορά με το σκυρόδεμα σε υψηλές θερμοκρασίες. Για θερμοκρασίες πάνω από 100 °C, η καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων είναι έντονα μη γραμμική, χωρίς σαφές και συγκεκριμένο όριο διαρροής. Ο χάλυβας με την έκθεσή του σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες έχει ως αποτέλεσμα το όριο διαρροής, η εφελκυστική αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας του να μειώνονται, ενώ ο ρυθμός μείωσης φτάνει το μέγιστο για θερμοκρασίες από 450°C έως 550°C. Σε αυτές τις θερμοκρασίες, είναι πολύ πιθανό να εμφανιστεί το φαινόμενο του ερπυσμού, το οποίο οδηγεί σε αστοχία τα δομικά στοιχεία από χάλυβα για τάσεις μικρότερες από το όριο διαρροής, όταν εκτίθεται το υλικό σε υψηλές θερμοκρασίες. Σε συνέχεια, εμφανίζεται το φαινόμενο της χαλάρωσης και της μεταβολής της μικροδομής της διατομής του δομικού στοιχείου από χάλυβα. Βασικοί παράγοντες που επιδρούν στη συμπεριφορά του χάλυβα είναι η θερμοκρασία αλλά και ο χρόνος της έκθεσης στην φωτιά και η σύσταση και η μέθοδος παραγωγής του χάλυβα. Για το υλικό του χάλυβα, η αλλαγή φαίνεται στις καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων των Ευρωκωδίκων 3 και 4 (Σχήμα 1) σε θερμοκρασία 300°C. Παρά το γεγονός ότι δε συμβαίνει τήξη μέχρι περίπου τους 1500°C, μόνο το 23% της αντοχής του χάλυβα σε συνηθισμένη θερμοκρασία παραμένει στους 700°C. Σε θερμοκρασία 800°C το ποσοστό της αντοχής του χάλυβα μειώνεται στο 11% και σε θερμοκρασία 900°C στο 6%.

(Ι. Βάγιας, Ι. Ερμόπουλος, Γ. Ιωαννίδης, «Σχεδιασμός Δομικών Έργων από Χάλυβα με Παραδείγματα Εφαρμογής», εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2013)



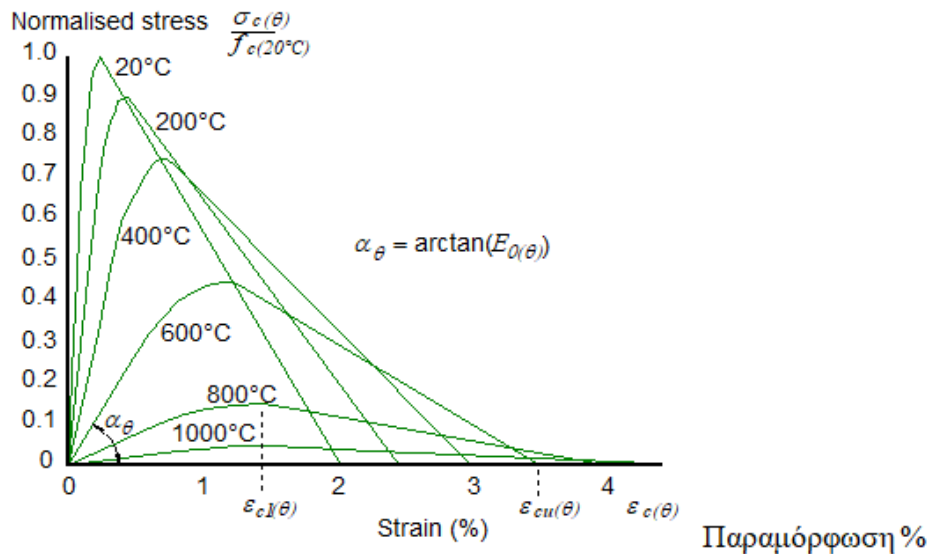
Σχήμα 1. Μείωση των χαρακτηριστικών μεγεθών του διαγράμματος τάσεων-παραμορφώσεων χάλυβα ποιότητας S275 με τη θερμοκρασία (Καμπύλες EC3)

(Ευρωκώδικας 3 Μέρος 1-2, 3.2, Σχήμα 3.1)

Σκυρόδεμα

Το σκυρόδεμα επίσης χάνει το ποσοστό της αντοχής του καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία του, έχει όμως χαμηλότερη θερμική αγωγιμότητα από τον χάλυβα και συνεπώς είναι σχετικά καλό μονωτικό υλικό για τους χαλύβδινους οπλισμούς, αν και πολλοί παράγοντες επηρεάζουν τα σχετικά χαρακτηριστικά κάθε στοιχείου από σκυρόδεμα στην υφιστάμενη κατασκευή.

Ανηγγεμένη τάση



Σχήμα 2. Καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων του EC4 σε διάφορες θερμοκρασίες για συνήθους βάρους και ελαφρά σκυροδέματα

(Ευρωκώδικας 4, Μέρος 1-2)

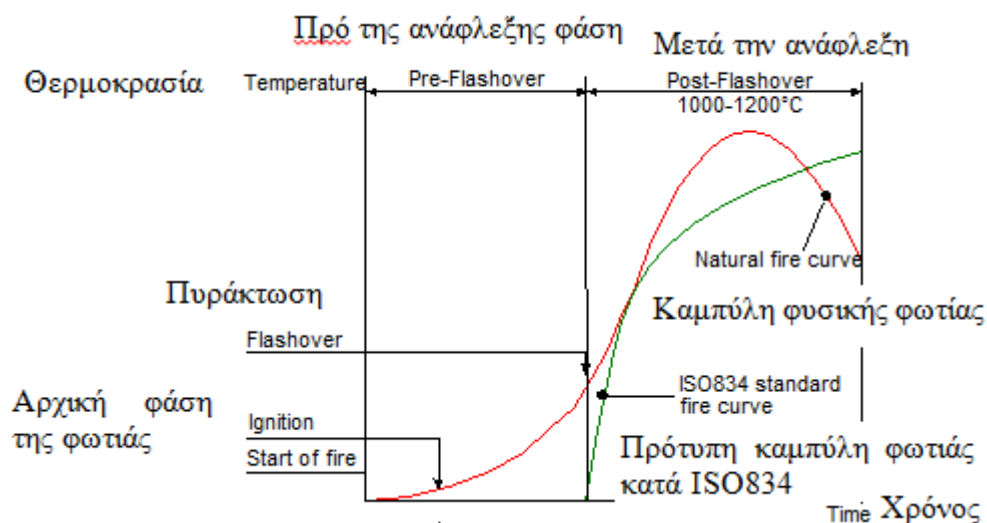
Η αντοχή έναντι πυρκαγιάς μελών από οπλισμένο σκυρόδεμα τείνει να βασίζεται στη μείωση της αντοχής των χαλύβδινων οπλισμών, η οποία επηρεάζεται σημαντικά από την καθοριζόμενη επικάλυψη. Το σκυρόδεμα επηρεάζεται από επιφανειακή αποκόλληση τμημάτων του τα οποία προοδευτικά εκτινάσσονται από την εκτεθειμένη στη φωτιά επιφάνεια, όπου η μεταβολή της θερμοκρασίας είναι μεγάλη και αυτό μπορεί να οδηγήσει στην έκθεση του οπλισμού στη φωτιά. Η συμπεριφορά του σε υψηλές θερμοκρασίες εξαρτάται πολύ από τον χρησιμοποιούμενο τύπο αδρανών. Πυριτικής προέλευσης αδρανή (αμμοχάλικο, γρανίτης) προκαλούν στο σκυρόδεμα τις παραπάνω αποκολλήσεις-εκτοξεύσεις ευκολότερα από ότι ασβεστικά αδρανή (ασβεστόλιθος). Τα ελαφρά σκυροδέματα διαθέτουν καλύτερες μονωτικές ιδιότητες από τα κανονικού βάρους σκυροδέματα.

(Ι. Βάγιας, Ι. Ερμόπουλος, Γ. Ιωαννίδης, «Σχεδιασμός Δομικών Έργων από Χάλυβα με Παραδείγματα Εφαρμογής», εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2013)

2.2. Θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια των πυρκαγιών

Μία πραγματική φωτιά σε ένα κτίριο αναπτύσσεται και φθίνει σύμφωνα με το ισοζύγιο μάζας και ενέργειας που υπάρχει στο πυροδιαμέρισμα μέσα στο οποίο αυτή προκαλείται. Η απελευθερούμενη ενέργεια που προκαλείται, εξαρτάται από τον τύπο

και την ποσότητα του υλικού που διατίθεται προς καύση και από τις συνθήκες αερισμού.



Σχήμα 3. Φάσεις φυσικής φωτιάς, συγκρίνοντας τις σχετικές θερμοκρασίες του αέρα με την πρότυπη καμπύλη φωτιάς του ISO834

(Ευρωκώδικας 1, Μέρος 2-2)

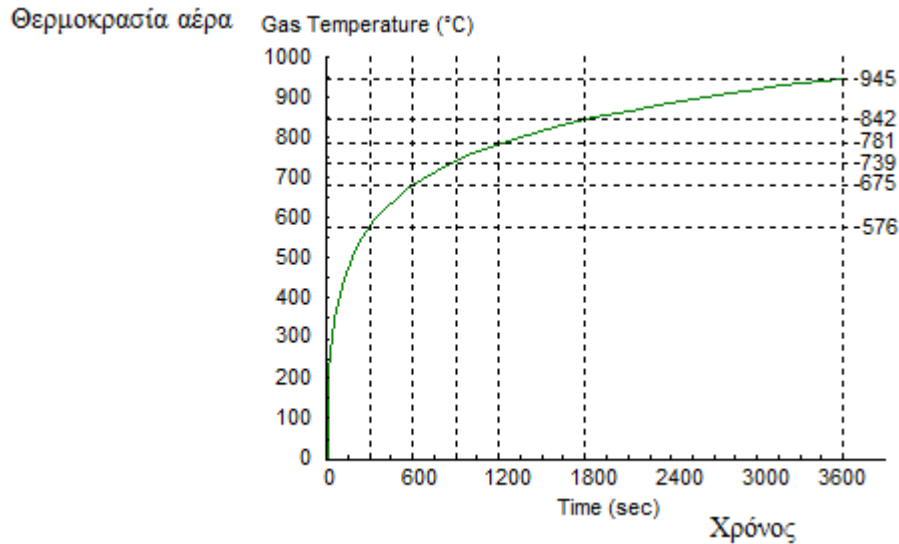
Μία πραγματική φωτιά ακολουθεί τρεις φάσεις, οι οποίες μπορούν να οριστούν ως η γένεση, η πλήρης ανάπτυξη και η εκτόνωση. Η αύξηση της θερμοκρασίας επιταχύνεται κατά την περίοδο της πυράκτωσης, όπου όλα τα οργανικά υλικά του πυροδιαμερίσματος καίγονται.

Οι απαιτούμενοι δείκτες πυραντίστασης που ορίζονται στους εθνικούς κανονισμούς κτιρίων συνοδεύονται με την εκτέλεση δοκιμαστικής εφαρμογής, κατά την οποία τα υλικά θερμαίνονται σύμφωνα με μία διεθνώς αναγνωρισμένη συνάρτηση θερμοκρασίας - χρόνου που καθορίζεται στο ISO834 (ή τον Ευρωκώδικα 1, Μέρος 2-2), η οποία δεν παριστάνει κανέναν τύπο φυσικής φωτιάς σε υφιστάμενο κτίριο. Χαρακτηρίζεται από τη θερμοκρασία αέρα στο πυροδιαμέρισμα, η οποία αυξάνεται συνεχώς σε σχέση με το χρόνο, αλλά με επιβραδυνόμενο ρυθμό. Η συνάρτηση αυτή έχει οριστεί ως η πρότυπη καμπύλη σχεδιασμού, η οποία χρησιμοποιείται σε δοκιμασίες εφαρμογής φούρνου των στοιχείων της μεταλλικής κατασκευής. Συνεπώς, ο αναφερόμενος, με βάση την καμπύλη αυτή, δείκτης πυραντίστασης, δε δείχνει τον πραγματικό χρόνο κατά τον οποίο ένα μεταλλικό στοιχείο θα επιζήσει σε μία πυρκαγιά υφιστάμενου κτιρίου, αλλά αποτελεί συγκριτική ένδειξη της πιθανότητας ενός μεταλλικού στοιχείου να επιβιώσει σε μία πολύ σοβαρή πυρκαγιά.

Όταν η μεταλλική κατασκευή, για την οποία θεωρήθηκε ως απαιτούμενος δεδομένος δείκτης πυραντίστασης, και τα μεταλλικά του στοιχεία είναι εξωτερικά και οι

θερμοκρασίες του περιβάλλοντος αέρα είναι χαμηλότερες στην κάθε δεδομένη στιγμή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σχετικά παρόμοια καμπύλη «Εξωτερικής Φωτιάς».

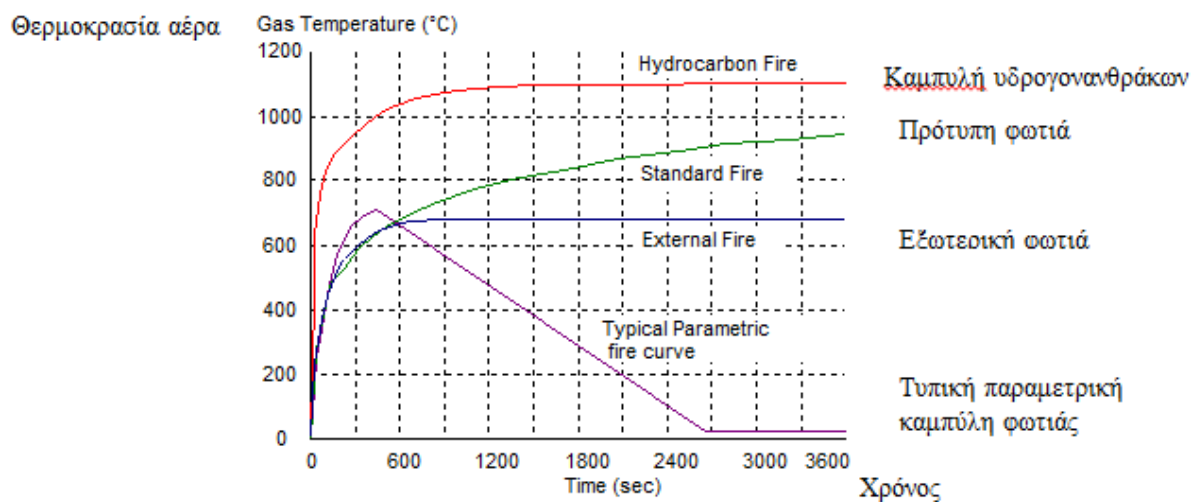
(Ευρωκώδικας 3, Μέρος 1-2 (ΕΛΟΤ EN 1993-01:2002): Γενικοί κανόνες - Σχεδιασμός φορέων σε πυρκαγιά.)



Σχήμα 4. Θερμοκρασία ατμόσφαιρας κατά την πρότυπη καμπύλη φωτιάς ISO834

(Ευρωκώδικας 1, Μέρος 2-2)

Σε περιπτώσεις όπου η αποθήκευση στοιχείων υδρογονανθράκων κάνει τη φωτιά σε σημαντικό βαθμό σοβαρή και επικίνδυνη, δίνεται παρακάτω «Καμπύλη Φωτιάς Υδρογονανθράκων». Οι τρεις αυτές «Ονομαστικές» καμπύλες φωτιάς φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5. Οι ονομαστικές καμπύλες φωτιάς του EC1 Μέρος 2-2 συγκρινόμενες με παραμετρική φωτιά.

(Ευρωκώδικας 1, Μέρος 2-2)

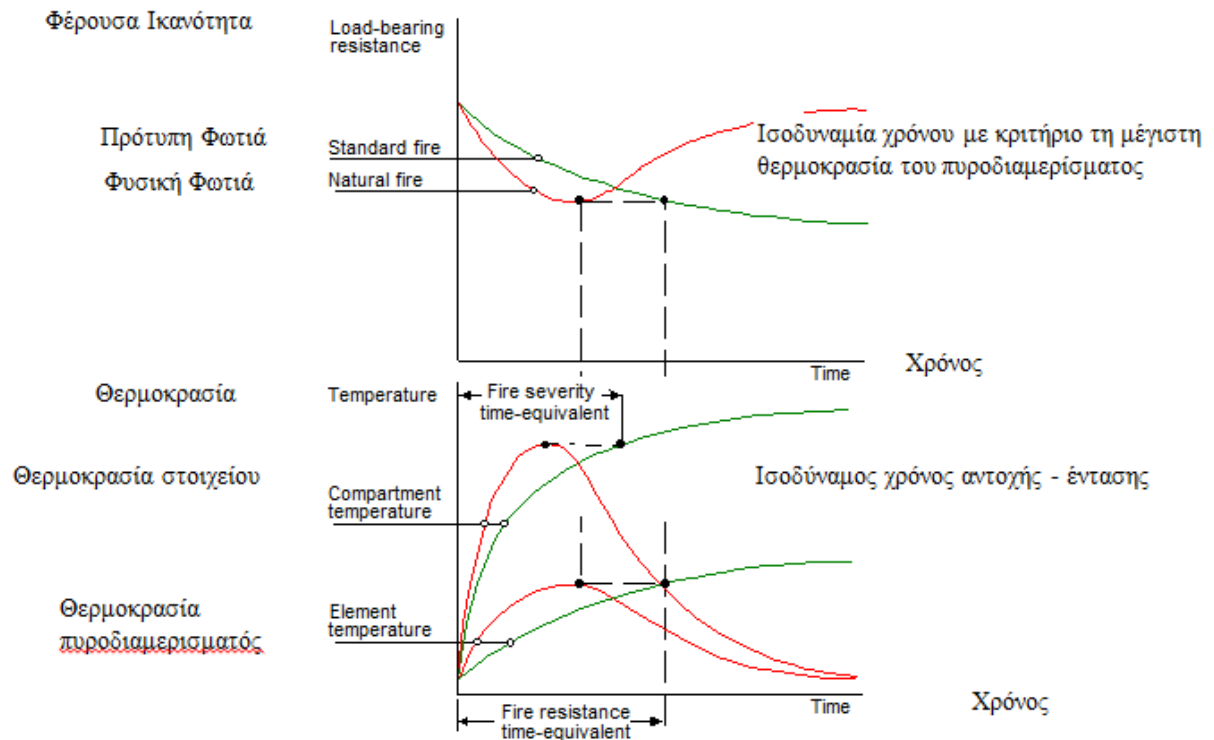
Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε οποιαδήποτε μέσα προσδιορισμού των δεικτών πυραντίστασης, όπως προδιαγεγραμμένους κανόνες, δεδομένα σε πίνακες ή και υπολογιστικά μοντέλα, αντί αυτών των καμπυλών.

Μία εναλλακτική μέθοδος για τη χρήση των δεικτών πυραντίστασης, συνδεδεμένη με τις καμπύλες φωτιάς, είναι, να χρησιμοποιηθούν απ' ευθείας με υπολογιστικά μοντέλα αντοχής σε συνθήκες φωτιάς και να προσπαθήσουμε να προσομοιώσουμε μία φυσική φωτιά χρησιμοποιώντας παράλληλη καμπύλη φωτιάς, για την οποία δίνονται εξισώσεις στον Ευρωκώδικα 1, Μέρος 2-2. Αυτό απλουστεύει την προσομοίωση των θερμοκρασιών της φωτιάς στις φάσεις της θέρμανσης και της ψύξης μετά την πυράκτωση (αμελώντας την αρχική φάση) και προσδιορίζει το χρόνο στον οποίο πραγματοποιείται η μέγιστη θερμοκρασία. Είναι αναγκαίο με βάση και τους διεθνή κανονισμούς να διατίθενται στοιχεία για τις χαρακτηριστικές ιδιότητες των υλικών στο πυροδιαμέρισμα (πυκνότητα, ειδική θερμότητα, θερμική αγωγιμότητα) όπως επίσης και για το πυροθερμικό φορτίο και τις επιφάνειες αερισμού όταν χρησιμοποιούνται αυτές οι εξισώσεις και η εφαρμογή τους περιορίζεται σε διαμερίσματα με εμβαδό μεγαλύτερο από 100m² με πυροθερμικό φορτίο που αποτελείται κυρίως από κελλουλοζικά υλικά (χαρτί, ξύλο κλπ...).

Αποτελεί πλεονέκτημα για το μελετητή να χρησιμοποιήσει παραμετρικές καμπύλες σε περιπτώσεις όπου το ποσοστό πυκνότητας των εύφλεκτων υλικών είναι χαμηλό, ενώ αν χρησιμοποιήσει την πρότυπη καμπύλη φωτιάς, θα ήταν χωρίς λόγο συντηρητικό.

Κατά τη χρήση παραμετρικής καμπύλης ο όρος του ισοδύναμου χρόνου έκθεσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για να αξιολογηθεί η σοβαρότητα της φωτιάς, όσο και για τη σύγκριση των δεικτών πυραντίστασης των δομικών στοιχείων που αντιστοιχούν σε μία πραγματική και μία φαινομενική πρότυπη φωτιά.

(X. K. Μπανιωτόπουλος, X. T. Τσαλίκης, O. Vassart, B. Zhao, «Χαλύβδινες Κατασκευές σε Πυρκαγιά και Σχεδιασμός Σύμμικτης Πλάκας», ISBN10 9604563785, εκδόσεις Ζήτη, 2013)



Σχήμα 6. Ισοδύναμος χρόνος έκθεσης σε φυσικές πυρκαγιές
(Ευρωκώδικας 1, Μέρος 2-2)

Οι παραπάνω καμπύλες είναι χρήσιμες κατά την εφαρμογή υπολογιστικών μοντέλων που βασίζονται στην πρότυπη καμπύλη θέρμανσης, ότι παρουσιάζουν μία πραγματική δοκιμασία της αντοχής έναντι πυρκαγιάς, συγκρίνοντας την πραγματοποιούμενη μέγιστη θερμοκρασία με την κρίσιμη θερμοκρασία, και όχι απλώς μία εκτίμηση της συμπεριφοράς της μεταλλικής κατασκευής αν μπορεί να υποβληθεί στην πρότυπη καμπύλη θερμοκρασίας - χρόνου που βασίζεται σε δοκιμασία φούρνου.

2.3. Συμπεριφορά δοκών και υποστυλωμάτων σε δοκιμασίες φούρνου

Ο παραδοσιακός τρόπος εκτίμησης της συμπεριφοράς πλαισιωτών στοιχείων σε συνθήκες φωτιάς είναι με δοκιμές φούρνου με τη χρήση της πρότυπης καμπύλης θερμοκρασίας-χρόνου, είναι προφανείς οι δυσκολίες διεξαγωγής δοκιμών φούρνου σε χαρακτηριστικά δομικά στοιχεία σε 1:1 κλίμακα υπό τα αντίστοιχα φορτία. Το μέγεθος των φούρνων περιορίζει το μέγεθος των δοκιμαζομένων μελών, συνήθως σε μήκος μικρότερο από 5m, και εάν απαιτείται να εξεταστεί μία περιοχή σταθμών

φόρτισης, τότε είναι απαραίτητο ξεχωριστό δείγμα για κάθε μία από αυτές. Δοκιμές σε μικρού μεγέθους μέλη μπορεί να μην είναι αντιπροσωπευτικές των συμπεριφορών μεγαλύτερων μελών.

Ένα ακόμη σοβαρό πρόβλημα με τη χρήση των δοκιμασιών φούρνου σε σχέση με τη συμπεριφορά παρόμοιων στοιχείων σε δομικά πλαίσια είναι ότι η μόνη αξιόπιστη συνθήκη στηρίζεως μέλους σε δοκιμή φούρνου είναι η απλή έδραση με ελευθερία του μέλους να επιμηκυνθεί αξονικά. Όταν ένα μέλος αποτελεί τμήμα πυροδιαμερίσματος το οποίο περιστοιχίζεται από προσκείμενες κατασκευές μη προσβαλλόμενες από τη φωτιά, η θερμική του διαστολή περιορίζεται από τις περιβάλλουσες κατασκευές.

Αυτό είναι το μοναδικό πρόβλημα για τις συνθήκες πυρκαγιάς, επειδή σε συνθήκες θερμοκρασίες περιβάλλοντος οι παραμορφώσεις είναι τόσο μικρές που σπάνια οι αξονικές δεσμεύσεις αποκτούν σημασία. Η αξονική δέσμευση μπορεί να λειτουργήσει κατά διαφορετικούς τρόπους σε διάφορες φάσεις της πυρκαγιάς. Στις αρχικές φάσεις, η παρεμποδιζόμενη θερμική διαστολή κυριαρχεί και αναπτύσσονται πολύ υψηλές θλιπτικές τάσεις, αλλά στις μεταγενέστερες φάσεις, όταν η εξασθένηση του υλικού είναι μεγάλη, η δέσμευση μπορεί να αρχίσει να αποτελεί στήριγμα ή εξασφάλιση για το μέλος. Δοκιμές φούρνου που επιτρέπουν αξονικές κινήσεις δεν μπορούν καθόλου να αναπαραγάγουν αυτές τις συνθήκες δέσμευσης. Ειδικά στις τελευταίες φάσεις της δοκιμής παρατηρείται πλήρης κατάρρευση, εκτός αν εφαρμοστεί ένα κριτήριο ασφαλείας διακοπής της δοκιμής. Στην ουσία η δοκιμασία φούρνου μιας δοκού καταλήγει πάντοτε σε παραμόρφωση όχι μεγαλύτερη από το εικοστό του ανοίγματος.

Στις μέρες μας έχει γίνει σημαντικός αριθμός πειραμάτων φωτιάς σε πυροδιαμερίσματα εντεταγμένα σε ευρύτερες κατασκευές. Πρέπει να περάσουν μερικά χρόνια πριν αποκτήσουν αυτά τα αληθούς κλίμακας πειράματα πραγματική επιρροή στους κώδικες σχεδιασμού των έργων. Οι πλήρους κλίμακας δοκιμές είναι αρκετά ακριβές και δεν υπάρχει μεγάλος αριθμός αποτελεσμάτων τέτοιων δοκιμών, και αυτές που υπάρχουν έχουν ως κύρια λειτουργία την αξιολόγηση αριθμητικών μοντέλων στα οποία θα βασίζονται οι μελλοντικές εξελίξεις των κανόνων σχεδιασμού. Μέχρι σήμερα, οι Ευρωκώδικες 3 και 4 επιτρέπουν τη εφαρμογή προχωρημένων υπολογιστικών μοντέλων, αλλά οι βασικές τους διαδικασίες για τρέχουσα χρήση κατά το σχεδιασμό σε συνθήκες πυρκαγιάς, βρίσκονται ακόμη σε όρους μεμονωμένων μελών και η αντοχή έναντι της φωτιάς εκφράζεται κυρίως σε όρους πραγματικής ή εξομοιωμένης δοκιμασίας φούρνου.

(Ευρωκώδικας 3, Μέρος 1-4 (ΕΛΟΤ EN 1993-1-4:2006): Γενικοί κανόνες - Συμπληρωματικοί κανόνες για ανοξείδωτους χάλυβες.)

2.4. Μέθοδοι προστασίας έναντι φωτιάς

Η παραδοσιακή προσέγγιση για την επίτευξη αντοχής των χαλύβδινων κατασκευών έναντι πυρκαγιάς είναι η επένδυση των μελών με μονωτικά υλικά. Αυτό γίνεται με διάφορους εναλλακτικούς τρόπους που παρουσιάζονται παρακάτω:

- Χρήση σταθερής επένδυσης (γυψοσανίδες ή περισσότερο εξειδικευμένα συστήματα βασιζόμενα σε ορυκτές ίνες) γύρω από τα τμήματα των χαλύβδινων μελών που είναι εκτεθειμένα. Αυτή η μέθοδος είναι εύκολο να εφαρμοστεί και δημιουργεί μία εξωτερική διατομή η οποία είναι καλαίσθητη και αποδεκτή, αλλά είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθεί γύρω από σύνθετες λεπτομέρειες όπως είναι οι συνδέσεις. Σε μερικές περιπτώσεις, μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάλυψη με κεραμικές ίνες, ως πλέον εύκαμπτος τρόπος μονώσεως.
- Χρήση εκτοξευόμενων υλικών, όπου δημιουργούν επένδυση προδιαγεγραμμένου πάχους γύρω από τα μέλη της κατασκευής. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως βερμικουλίτης ή ορυκτές ίνες με συνδετικό υλικό το τσιμέντο ή το γύψο. Η εφαρμογή επί τόπου γίνεται με ταχύς ρυθμούς και δεν αντιμετωπίζει προβλήματα δυσκαμψίας γύρω από ενδεχόμενες σύνθετες κατασκευαστικές λεπτομέρειες. Αν και το τελείωμα που προκύπτει από αυτή την εφαρμογή δεν είναι συνήθως αποδεκτό σε δημόσιους χώρους κτιρίων, τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται συνήθως σε περιοχές που δεν είναι ορατές, όπως για παράδειγμα δοκοί και συνδέσεις πάνω από ψευδοροφές.
- Χρήση πυράντοχων διογκούμενων βαφών, οι οποίες δημιουργούν καλαίσθητο και ομοιόμορφο τελείωμα στο κτίριο, παράγοντας μονωτικό μανδύα 50 φορές παχύτερο από τον αρχικό υμένα, αλλά καπνίζουν και μυρίζουν όταν θερμαίνονται. Εφαρμόζονται με βούρτσα, εκτόξευση ή ρολό, και πρέπει να αποκτήσουν συγκεκριμένο πάχος, το οποίο προκύπτει με βάση τον επιθυμητό δείκτη πυραντίστασης, το συντελεστή διατομής και το βαθμό αξιοποίησης της διατομής.

Οι παραπάνω μέθοδοι εφαρμόζονται συνήθως στο εργοτάξιο, μετά την ανέγερση του φέροντος οργανισμού του μεταλλικού κτιρίου. Αυτοί οι έλεγχοι μπορεί να προκαλέσουν σημαντική καθυστέρηση στη διαδικασία της κατασκευής, με αποτέλεσμα να αυξάνεται το κόστος για τον πελάτη. Η μόνη εξαίρεση είναι ορισμένα πρόσφατα συστήματα που έχουν δημιουργηθεί, κατά τα οποία το διογκούμενο χρώμα εφαρμόζεται στη μεταλλική κατασκευή στο εργοστάσιο, οπότε αποφεύγεται η εργασία στο εργοτάξιο. Όμως, σε παρόμοια συστήματα υπάρχει προφανώς ανάγκη υψηλότερου βαθμού αντίστασης σε προσκρούσεις και αποξέσεις.

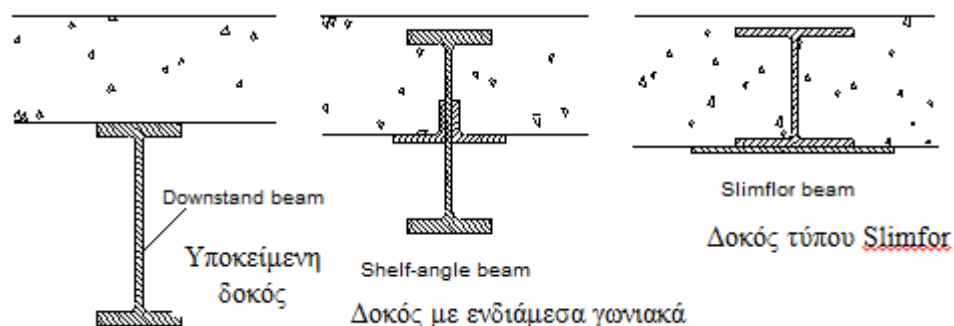
Οι παραπάνω μέθοδοι προσφέρουν κάθε απαιτούμενο βαθμό προστασίας των χαλύβδινων κατασκευών έναντι της θέρμανσης από φωτιά, και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μέρος της τεχνολογίας έναντι πυρκαγιάς. Το πάχος των υμένων προστασίας βασίζεται στα δεδομένα των χαρακτηριστικών που έχουν δώσει οι κατασκευαστές των υλικών, που στοχεύουν στο κριτήριο του περιορισμού της θερμοκρασίας του χάλυβα σε λιγότερο από 550°C στον απαιτούμενο χρόνο αντοχής κατά την πρότυπη φωτιά ISO834. Τα υλικά προστασίας συνήθως ελέγχονται για τη μονωτική τους ικανότητα, την ακεραιότητα και την αντοχή σε δοκιμασία φούρνου κατά το ISO834. Οι ιδιότητες του υλικού για το σχεδιασμό προσδιορίζονται από τα αποτελέσματα ημι-εμπειρικών μεθόδων.

Πλήρης ή μερικώς εγκιβωτισμός ανοικτών διατομών από χάλυβα μέσα στο σκυρόδεμα χρησιμοποιείται περιστασιακά ως μέθοδος προστασίας έναντι πυρκαγιάς, ειδικά στην περίπτωση υποστυλωμάτων στα οποία η αντοχή του σκυροδέματος, οπλισμένου ή μη, μπορεί να συμβάλλει στην αντοχή σε συνθήκη θερμοκρασία. Στην περίπτωση κοίλων διατομών από χάλυβα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σκυρόδεμα για να γεμίσει τη διατομή, πάλι με ή χωρίς οπλισμούς. Στη διαδικασία της πυρκαγιάς, το σκυρόδεμα ενεργεί ως δεξαμενή θερμότητας, η οποία επιβραδύνει τη διαδικασία θέρμανσης της χαλύβδινης διατομής. Σε ορισμένα κτίρια, υποστυλώματα με κοίλες διατομές συνδέονται μεταξύ τους ως σύστημα προστασίας έναντι πυρκαγιάς και γεμίζουν με νερό από μία δεξαμενή βαρύτητας. Το σύστημα αυτό μπορεί προφανώς να απορροφήσει τεράστιες ποσότητες θερμότητας, αλλά με σχετικά υψηλό κόστος, τόσο για την κατασκευή όσο και για τη συντήρηση.

Οι πιο πρόσφατοι κανόνες σχεδιασμού βασίζονται στο γεγονός ότι η αντοχή του υλικού των μελών της μεταλλικής κατασκευής σε συνθήκες φωτιάς εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τη στάθμη φορτίσεώς του κατά τη διάρκεια της φωτιάς και από το ότι η φόρτιση σε συνθήκες φωτιάς έχει μεγάλες πιθανότητες να είναι πολύ μικρότερη από τα προσαυξημένα φορτία, για τα οποία έχει γίνει ο σχεδιασμός αντοχής. Μία άλλη επιλογή προσφέρεται στους μελετητές, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνη ή σε συνδυασμό με άλλα μέτρα. Μείωση της στάθμης φόρτισης με την επιλογή χαλύβδινων μελών με μεγαλύτερες διατομές από αυτές που χρειάζονται συνήθως για την εξασφάλιση της απαιτούμενης αντοχής σε κανονικές συνθήκες, μπορεί να αυξήσει την αντοχή σε πυρκαγιά, ειδικά των στοιχείων των δοκών. Αυτό επιτρέπει να χρησιμοποιηθούν μη προστατευμένες ή μερικώς προστατευμένες δοκοί.

Η επιρροή της μείωσης της στάθμης φορτίσεων είναι ιδιαίτερα χρήσιμη όταν συνδυάζεται με μείωση της εκτεθειμένης περιμέτρου κάνοντας χρήση της προστασίας και της επιρροής της θερμοχωρητικότητας της υποβασταζόμενης πλάκας από σκυρόδεμα. Η παραδοσιακή υποκείμενη δοκός έχει κάποιο πλεονέκτημα έναντι της πλήρους εκθέσεως, καθώς έχει την ανώτερη επιφάνεια του πάνω πέλματός της ολικά προστατευμένη από την πλάκα. Η υποστήριξη της πλάκας με γωνιακά συγκολλημένα

στον κορμό, διατηρεί το ανώτερο τμήμα του κορμού και ολόκληρο το άνω πέλμα ψυχρό, πράγμα το οποίο παρέχει μεγαλύτερη αύξηση της αντοχής.



Σχήμα 7. Συνδεδεμένη με την πλάκα από σκυρόδεμα προστασία έναντι πυρκαγιάς των χαλύβδινων δοκών

(Ευρωκώδικας 3, Μέρος 1-2)

Η πρόσφατη καινοτομία των δοκών «Slimflor», στις οποίες χρησιμοποιείται μικρού ύψους διατομή και η πλάκα στηρίζεται στο κατώτερο πέλμα, είτε με την συγκόλληση μιας πλάκας στο πέλμα αυτό είτε με τη χρησιμοποίηση ασύμμετρης διατομής, αφήνει εκτεθειμένη μόνο την κάτω επιφάνεια του κάτω πέλματος.

Οι Ευρωκώδικες ενθαρρύνουν τους μελετητές να χρησιμοποιήσουν προχωρημένα υπολογιστικά μοντέλα για τη συμπεριφορά ολόκληρης της κατασκευής ή τμημάτων της. Η προφανής συνέπεια αυτού είναι ότι, σχεδιασμοί που δείχνουν ότι η συνολική αντοχή εξασφαλίζεται με εναλλακτικές τροχιές των φορτίων όταν φέροντα μέλη του πυροδιαμερίσματος έχουν χάσει την αντοχή τους, είναι απολύτως ισχυροί υπό τις διατάξεις αυτών των κωδίκων. Αυτό αποτελεί απόκλιση από την παραδοσιακή προσέγγιση που βασίζεται στην αντοχή καθενός επί μέρους μέλους. Στο προοίμιό του ο Ευρωκώδικας 3 - Μέρος 1.2 ενθαρρύνει επίσης τη χρησιμοποίηση ολοκληρωμένων στρατηγικών έναντι της πυρκαγιάς, συμπεριλαμβανομένης της χρήσης συνδυασμών ενεργητικής (καταιονιστήρες) και παθητικής προστασίας, αν και αναγνωρίζεται ότι η χρήση συστημάτων καταιονιστήρων στο σχεδιασμό αντοχής στη φωτιά είναι προς το παρόν θέμα των εθνικών Κτιριοδομικών Κανονισμών.

(Ευρωκώδικας 3, Μέρος 1-4 (ΕΛΟΤ EN 1993-1-4:2006): Γενικοί κανόνες - Συμπληρωματικοί κανόνες για ανοξείδωτους χάλυβες.)

2.5. Απλός σχεδιασμός μελών από χάλυβα κατά τον Ευρωκώδικα

Ο γενικός στόχος των μέτρων πυροπροστασίας είναι να περιορίσει τον κίνδυνο, σε περίπτωση πυρκαγιάς, για τα πρόσωπα, την απευθείας εκτεθειμένη ιδιοκτησία, την γειτονική ιδιοκτησία και το περιβάλλον. Το πρότυπο EN 1993-1-2 σε συνδυασμό με τα υπόλοιπα μέρη των Ευρωκωδίκων τα σχετικά με τη πυρκαγιά, (π.χ. το EN 1991-1-2 για τον προσδιορισμό των θερμικών και μηχανικών δράσεων επί της κατασκευής) και πραγματεύεται το σχεδιασμό δομικών έργων από χάλυβα για την τυχηματική κατάσταση έκθεσης σε πυρκαγιά και δίνει λεπτομερείς πληροφορίες για το σχεδιασμό των μελών αυτών, προκειμένου να εξασφαλίζεται επαρκής φέρουσα ικανότητα και περιορισμός της διάδοσης της πυρκαγιάς.

Το πρότυπο EN 1993-1-2 περιλαμβάνει μόνο παθητικές μεθόδους πυροπροστασίας, εφαρμόζεται σε δομικά έργα από χάλυβα τα οποία απαιτείται να διαθέτουν φέρουσα ικανότητα κατά την έκθεση στην πυρκαγιά ώστε να αποφευχθεί πρόωρη κατάρρευση της κατασκευής, περιέχει δε μόνο διαφορές ή συμπληρώματα σε σχέση με το σχεδιασμό για συνήθη θερμοκρασία, παραπέμποντας στο βασικό EN 1993-1-1. Οι μέθοδοι που δίνονται εφαρμόζονται σε δομικούς χάλυβες ποιότητας S235, S275 και S355 κατά το EN 10025, αλλά και σε κάθε ποιότητα χάλυβα για την οποία διατίθενται οι ιδιότητες του υλικού σε υψηλές θερμοκρασίες και βασίζεται σε εναρμονισμένα ευρωπαϊκά πρότυπα. Επίσης εφαρμόζονται σε μέλη από λεπτές διατομές εν ψυχρώ και σε χαλύβδινα φύλλα, σε συνδυασμό με το πρότυπο EN 1993-1-3, καθώς και σε μέλη από ανοξείδωτους χάλυβες και χαλυβδόφυλλα σε συνδυασμό με το πρότυπο EN 1993-1-4

Η βασική απαίτηση για τον περιορισμό του κινδύνου σε περίπτωση πυρκαγιάς είναι η ακόλουθη:

Οι εργασίες κατασκευής πρέπει να σχεδιάζονται και να εκτελούνται κατά τέτοιο τρόπο ώστε σε περίπτωση εκδήλωσης πυρκαγιάς:

- Να εξασφαλίζεται η φέρουσα ικανότητα της κατασκευής για μια προκαθορισμένη χρονική περίοδο.
- Να περιορίζεται η πρόκληση και διάδοση φωτιάς και καπνού μέσα στο έργο.
- Να περιορίζεται η διάδοση της πυρκαγιάς στη γειτονική κατασκευή.
- Οι χρήστες του έργου να μπορούν να το εγκαταλείψουν εγκαίρως.

- Να λαμβάνεται υπόψη η ασφάλεια των ομάδων διάσωσης.

Για να ικανοποιηθεί η ανωτέρω βασική απαίτηση, οριοθετούνται διάφορες στρατηγικές ασφαλείας έναντι πυρκαγιάς, όπως συμβατικά σενάρια πυρκαγιάς ή φυσικά σενάρια πυρκαγιάς, περιλαμβανομένων παθητικών και ενεργητικών μέτρων πυροπροστασίας. Η φέρουσα ικανότητα θεωρείται ότι εξασφαλίζεται όταν η κατάρρευση προλαμβάνεται κατά την πλήρη διάρκεια της πυρκαγιάς, περιλαμβανόμενης της φάσεως πτώσης της θερμοκρασίας ή κατά τη διάρκεια μίας απαιτούμενης χρονικής περιόδου.

(I. Βάγιας, I. Ερμόπουλος, Γ. Ιωαννίδης, «Σχεδιασμός Δομικών Έργων Από Χάλυβα, Με βάση τα τελικά κείμενα των Ευρωκωδίκων», εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2011)

Οι Ευρωκώδικες χρησιμοποιούν πολύ συστηματικό συμβολισμό, κατά τον οποίο τα διάφορα σύμβολα χρησιμοποιούνται για γενικές και ειδικές εκδοχές των διάφορων παραμέτρων. Για παράδειγμα, το «αποτέλεσμα δράσεως» συμβολίζεται γενικά ως E . Δείκτες που συμβολίζουν διαφορετικές ιδιότητες μιας παραμέτρου ομαδοποιούνται, με τη χρησιμοποίηση τελειών προς διαχωρισμό, όπως στο $E_{fi.d.t}$, που συμβολίζει την τιμή σχεδιασμού του αποτελέσματος μιας δράσεως σε συνθήκες φωτιάς κατά τον απαιτούμενο χρόνο αντοχής. Τρέχοντες συμβολισμοί για τα μέρη σχεδιασμού σε συνθήκες φωτιάς των Ευρωκωδίκων 1, 3 και 4 είναι:

$E =$	αποτέλεσμα των δράσεων
$G =$	μόνιμη δράση
$Q =$	μεταβλητή δράση
$R_{fi} =$	φέρουσα ικανότητα
$t_{fi} =$	δείκτης πυραντίστασης ενός μέλους
$t_{fi.requ} =$	απαιτούμενος δείκτης πυραντίστασης
$q =$	θερμοκρασία
$q_{cr} =$	κρίσιμη θερμοκρασία ενός μέλους
$g =$	επιμέρους συντελεστής ασφαλείας
$y =$	συντελεστής συνδυασμού των φορτίων

Οι ακόλουθοι δείκτες μπορούν να χρησιμοποιούνται μόνοι ή σε συνδυασμό:

$A =$	τυχηματική κατάσταση σχεδιασμού
$cr =$	κρίσιμη τιμή
$fi =$	αναφερόμενο στο σχεδιασμό σε συνθήκες φωτιάς
$d =$	τιμή σχεδιασμού
$q =$	συνδεόμενο με κάποια θερμοκρασία (πιθανώς αντικαθιστάμενος με μία τιμή)

$k =$		χαρακτηριστική τιμή
$t =$		αναφερόμενος σε ορισμένη χρονική στιγμή της έκθεσης στη φωτιά (πιθανώς αντικαθιστάμενος από μία τιμή)
$1, 2 .. =$		σειρά κατατάξεως των μεταβλητών δράσεων

Φορτίσεις

Ο Ευρωκώδικας 1 Μέρος 2-2 παρουσιάζει βασικούς κανόνες για τον υπολογισμό των δράσεων σχεδιασμού, τις φορτίσεις, σε συνθήκες πυρκαγιάς και με την αναγνώριση της χαμηλής πιθανότητας συνύπαρξης μεγάλης φωτιάς με υψηλές τιμές των φορτίων. Η κατάταξη των φορτίων είναι σε μόνιμα και σε μεταβλητά. Σε συνθήκες πυρκαγιάς, οι χαρακτηριστικές μόνιμες δράσεις (νεκρά φορτία) χρησιμοποιούνται χωρίς προσαύξηση ($G_A=1,0$), ενώ η κύρια χαρακτηριστική μεταβλητή δράση (επιβεβλημένο φορτίο) υποβαθμίζεται μέσω ενός συντελεστή συνδυασμού *1.1 η τιμή του οποίου είναι μεταξύ 0,5 και 0,9 ανάλογα με τη χρήση του κτιρίου. Ο «μειωτικός συντελεστής» μπορεί να οριστεί είτε ως :

$\eta_{fi} = \frac{E_{fi}.d.t}{R_d}$ (φόρτιση σε συνθήκες φωτιάς σε σχέση με την αντοχή σχεδιασμού σε κανονικές συνθήκες)

ο οποίος συνοδεύεται όταν χρησιμοποιείται συνολική στατική ανάλυση, ή

$\eta_{fi} = \frac{E_{fi}.d.t}{E_d}$ (φόρτιση σε συνθήκες φωτιάς σε σχέση με το φορτίο σχεδιασμού σε κανονικές συνθήκες)

το οποίο είναι πιο συντηρητικό και χρησιμοποιείται σε απλοποιημένους σχεδιασμούς μεμονωμένων μελών, όταν μόνο η κύρια μεταβλητή δράση χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τις μόνιμες δράσεις. Αυτό μπορεί να εκφραστεί με όρους των χαρακτηριστικών φορτίων και των συντελεστών τους, ως :

$$\eta_{fi} = \frac{\gamma_{GA} G_k + \psi_{1.1} Q_{k.1}}{\gamma_G G_k + \gamma_Q Q_{k.1}}$$

Οι τυπικές τιμές των συντελεστών ασφαλείας καθορίζονται από τον Ευρωκώδικα 1 και είναι οι παρακάτω:

g_{GA}	$= 1,0$	(Μόνιμα φορτία: τυχηματικές καταστάσεις σχεδιασμού)
$\psi_{1.1}$	$= 0,5$	(Συντελεστής συνδυασμού: μεταβλητά φορτία, κτίρια γραφείων)
g_G	$= 1,35$	(Μόνιμα φορτία: αντοχή σχεδιασμού)
$g_{Q.1}$	$= 1,5$	(Μεταβλητά φορτία: αντοχή σχεδιασμού)

Βασική αρχή του σχεδιασμού της αντοχής έναντι πυρκαγιάς

Ο δομικός σχεδιασμός έναντι πυρκαγιάς ενός μέλους αφορά την απόδειξη ότι ικανοποιούνται οι απαιτήσεις του εθνικού Κτιριοδομικού Κανονισμού κατά την καθορισμένη χρονική περίοδο όταν υπόκειται στην κατάλληλη ονομαστική καμπύλη φωτιάς. Αυτό μπορεί να εκφραστεί με τρεις εναλλακτικούς τρόπους:

- Ο διατιθέμενος δείκτης πυραντίστασης πρέπει να υπερβαίνει τον απαιτούμενο ανάλογα με τη χρήση και τον τύπο του κτιρίου όταν αυτό φορτίζεται στη στάθμη σχεδιασμού και υπόκειται σε ονομαστική καμπύλη φωτιάς:

$${}^t f_{i,d} \geq {}^t f_{i,requ}$$

- Η φέρουσα ικανότητα του στοιχείου πρέπει να υπερβαίνει τη φόρτιση σχεδιασμού, όταν το στοιχείο θερμαίνεται κατά τον απαιτούμενο χρόνο από την ονομαστική φωτιά:

$$R_{f_i,d,t} \geq E_{f_i,d,t}$$

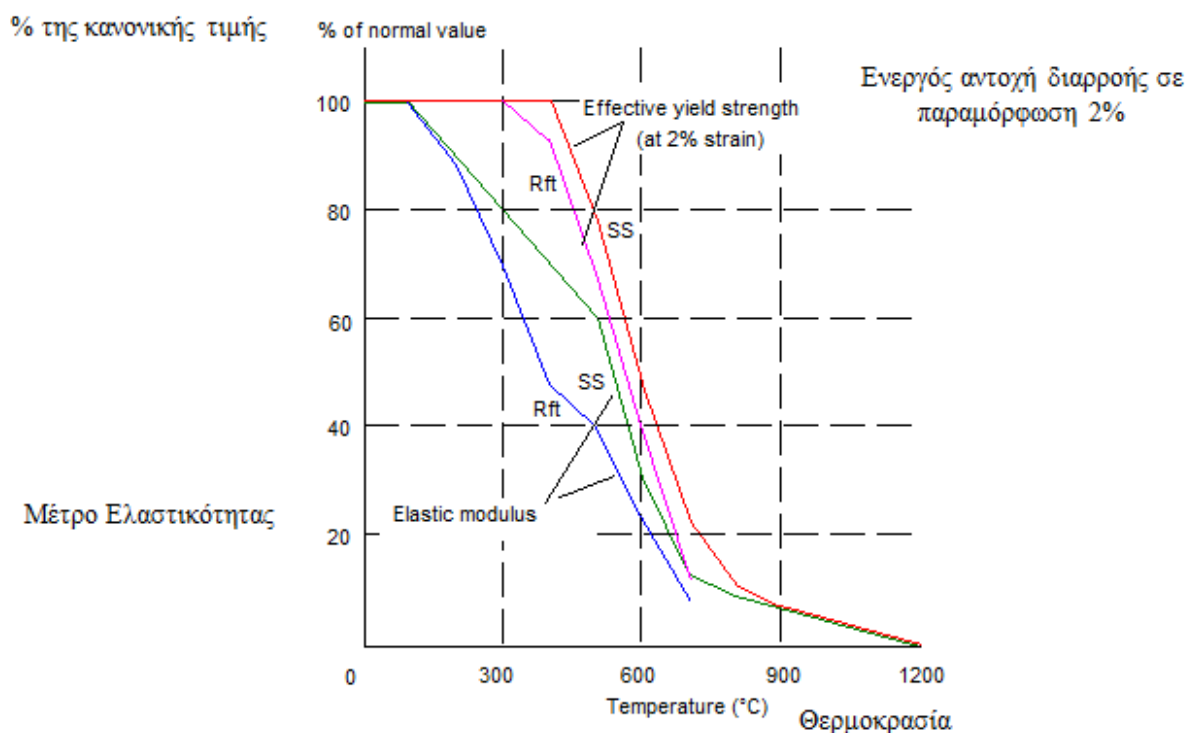
- Η κρίσιμη θερμοκρασία ενός στοιχείου που φορτίζεται στη στάθμη σχεδιασμού πρέπει να υπερβαίνει τη θερμοκρασία του που αντιστοιχεί στον απαιτούμενο χρόνο έκθεσης και την ονομαστική φωτιά:

$$\theta_{cr,d} \geq \theta_d$$

2.6. Ιδιότητες του υλικού

Αντοχές του χάλυβα

Έχει ήδη παρουσιαστεί μία ομάδα από καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων για χάλυβα ποιότητας S275, ως παράδειγμα της κύριας επιρροής της θερμοκρασίας στην εξασθένηση των χαλύβων.



Σχήμα 8. Μειωτικοί συντελεστές αντοχής κατά τον EC3 για δομικούς χάλυβες (SS) και επεξεργασμένους εν ψυχρώ οπλισμούς (Rft) σε υψηλές θερμοκρασίες

(Ευρωκώδικας 3, Μέρος 1-2, Σχήμα 3.2)

Οι καμπύλες αυτές βασίζονται σε εκτεταμένες σειρές πειραμάτων και έχουν διαμορφωθεί με εξισώσεις που παριστούν ένα αρχικό γραμμικό ελαστικό τμήμα, μετατρέπόμενο στη συνέχεια σε τμήμα ελλείψεως της οποίας η κλίση είναι μηδενική για ανηγμένη παραμόρφωση 2%. Όταν παρόμοιες καμπύλες παρουσιάζονται κατά ανηγμένο τρόπο, δηλαδή με τάσεις που εμφανίζονται ως το ποσοστό της τάσης της διαρροής σε κανονική θερμοκρασία, για τις διάφορες ποιότητες χάλυβα S235, S275 και S355, τότε διαπιστώνεται ότι βρίσκονται πολύ κοντά η μία στη άλλη. Είναι, ως εκ τούτου, δυνατόν να χρησιμοποιείται μόνο ένας πίνακας μειωτικών συντελεστών της

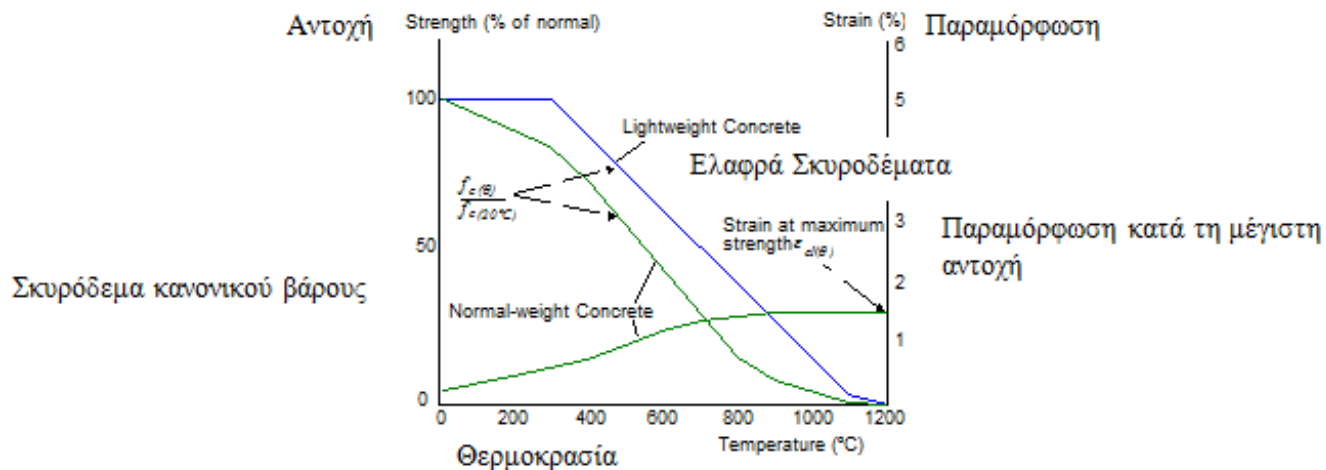
αντοχής και για τις τρεις ποιότητες χάλυβα για συγκεκριμένες θερμοκρασίες και επίπεδα παραμορφώσεων. Στους Ευρωκώδικες 3 και 4 χρησιμοποιούνται στο σχεδιασμό έναντι πυρκαγιάς, αντοχές που αντιστοιχούν σε ποσοστό παραμόρφωσης 2% για όλους τους τύπους των δομικών μελών.

Ελατές ράβδοι οπλισμού αντιμετωπίζονται στον Ευρωκώδικα 4 κατά παρόμοιο τρόπο με τους δομικούς χάλυβες, αλλά επεξεργασμένος εν ψυχρώ χάλυβας οπλισμού πρότυπης ποιότητας S500, χάνει την αντοχή του σε υψηλές θερμοκρασίες πολύ ταχύτερα από τις συνήθεις ποιότητες. Οι μειωτικοί συντελεστές αντοχής για την ενεργό τάση διαρροής και το μέτρο ελαστικότητας φαίνονται στο Σχήμα 8. Είναι απίθανο, ράβδοι οπλισμού ή πλέγματα να φθάνουν σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια φωτιάς, δεδομένης της μονωτικής προστασίας που παρέχεται από το σκυρόδεμα εφόσον έχουν τηρηθεί οι προδιαγραφές για τις επικαλύψεις. Η πολύ χαμηλή ολκιμότητα του χάλυβα S500 (εγγυημένη στο 5% μόνον) μπορεί να αποκτήσει μεγάλη σημασία όπου προκαλούνται μεγάλες παραμορφώσεις στα πλέγματα πλακών από την προοδευτική εξασθένηση των χαλύβδινων διατομών που τις υποστηρίζουν.

Αντοχές σκυροδέματος

Οι καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων του σκυροδέματος, σε διάφορες θερμοκρασίες, διαφέρουν σημαντικά στη μορφή από τις αντίστοιχες του χάλυβα. Όλες οι καμπύλες έχουν μέγιστη θλιπτική αντοχή, και όχι ενεργό αντοχή διαρροής, η οποία εμφανίζεται σε παραμορφώσεις που σε σχέση με τη θερμοκρασία αυξάνονται προοδευτικά. Η εφελκυστική αντοχή για όλα τα σκυροδέματα θεωρείται συνήθως μηδενική. Όπως είναι φυσικό, στους Ευρωκώδικες μπορούν να χρησιμοποιηθούν εναλλακτικοί καταστατικοί νόμοι για το υλικό, υπό την προϋπόθεση ότι υποστηρίζονται από πειραματικές αποδείξεις.

Για σκυροδέματα κανονικού βάρους (πυκνότητα περίπου 2400 kg/m³) μόνο η κατώτερη γραμμή των τιμών αντοχής, που αντιστοιχεί στον πυριτικό τύπο, έχουν πινακοποιηθεί στον Ευρωκώδικα 4, Μέρος 1-2. Για σκυροδέματα από ασβεστικά αδρανή χρησιμοποιούνται οι ίδιες τιμές, παρότι είναι συντηρητικές. Όταν απαιτούνται περισσότερες λεπτομέρειες, οι μελετητές αναφέρονται στον Ευρωκώδικα 2 Μέρος 1-2.



Σχήμα 9. Μειωτικοί συντελεστές αντοχής κατά τον EC4 για κανονικού βάρους πυριτικά σκυροδέματα και ελαφρά σκυροδέματα σε υψηλές θερμοκρασίες

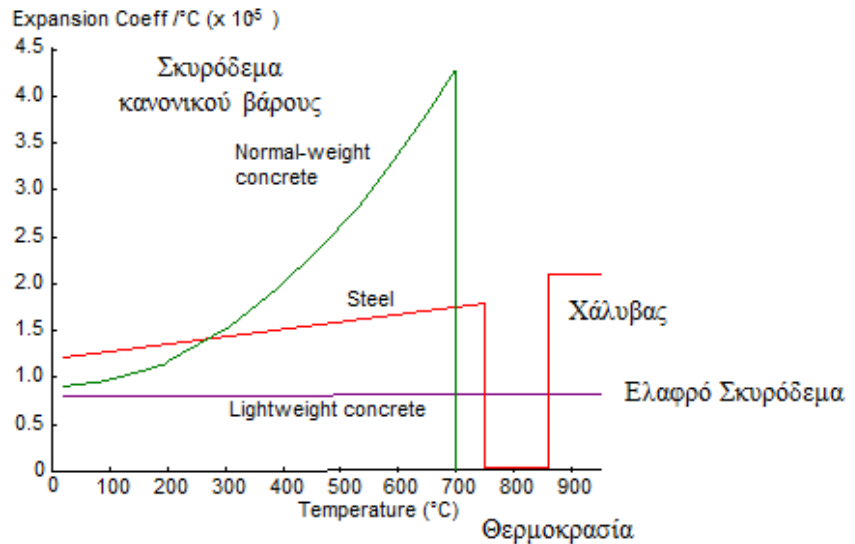
(Ευρωκώδικας 4, Μέρος 1-2)

Ως ελαφρά σκυροδέματα ορίζονται εκείνα των οποίων η περιοχή πυκνοτήτων κυμαίνεται μεταξύ 1600-2000 kg/m³. Αν και στην πράξη μπορούν να κατασκευαστούν με τη χρησιμοποίηση διαφόρων τύπων αδρανών, αντιμετωπίζονται στον Ευρωκώδικα 4 Μέρος 1-2 ως εξασθενούντα ομοιόμορφα με τη θερμοκρασία. Έτσι το σύνολο μειωτικών συντελεστών αντοχής για τα ελαφρά σκυροδέματα, είναι πάλι προς τη συντηρητική πλευρά.

Θερμική διαστολή χάλυβα και σκυροδέματος

Στους απλούστερους υπολογισμούς σε συνθήκες φωτιάς, παραβλέπεται η θερμική διαστολή των υλικών, αλλά για μέλη από χάλυβα τα οποία υποβαστάζουν πλάκα από σκυρόδεμα στο ανώτερο πέλμα τους, η διαφορική θερμική διαστολή που προκαλείται από την προστασία του πάνω πέλματος και η λειτουργία δεξαμενής θερμότητας από την πλάκα από σκυρόδεμα δημιουργούν ένα «θερμικό καμπούριασμα» προς τη φωτιά στη χαμηλή περιοχή θερμοκρασιών. Όταν χρησιμοποιούνται προχωρημένα υπολογιστικά μοντέλα, είναι απαραίτητο να αναγνωρίσουμε ότι, η θερμική διαστολή πυροδιαμερίσματος παρεμποδίζεται από τις ψυχρές κατασκευές που το περιβάλλουν και αυτό δημιουργεί συμπεριφορά σημαντικά διαφορετική από εκείνη που έχει διαπιστωθεί σε παρόμοια μέλη σε δοκιμές φούρνους χωρίς δεσμεύσεις. Είναι, ως εκ τούτου, αναγκαίο να αναγνωρίσουμε τουλάχιστον τον τρόπο κατά τον οποίο οι συντελεστές θερμικής διαστολής μεταβάλλονται ο ένας ως προς τον άλλο, αλλά και ο καθένας με τη θερμοκρασία. Τα παραπάνω φαίνονται στο Σχήμα 10. Ίσως, το πιο σημαντικό είναι ότι οι συντελεστές θερμικής διαστολής του χάλυβα και του σκυροδέματος έχουν συγκρίσιμα μεγέθη στην περιοχή θερμοκρασιών πρακτικού ενδιαφέροντος.

Συντελεστής διαστολής



Σχήμα 10. Μεταβολή των συντελεστών θερμικής διαστολής του χάλυβα και του σκυροδέματος, κατά τους Ευρωκώδικες 3 και 4, με τη θερμοκρασία

(Ευρωκώδικας 3, Μέρος 1-2 και Ευρωκώδικας 4, Μέρος 2-2)

Είναι απίθανο να φθάσει το σκυρόδεμα την περιοχή θερμοκρασιών των 700°C στην οποία η θερμική του διαστολή σταματά, ενώ αντίθετα, οι εκτεθειμένες χαλύβδινες διατομές θα φτάσουν, σχεδόν σίγουρα, την ελαφρά υψηλότερη περιοχή θερμοκρασιών, στην οποία λαμβάνει χώρα αλλαγή της κρυσταλλικής δομής και σταματά προσωρινά η θερμική διαστολή.

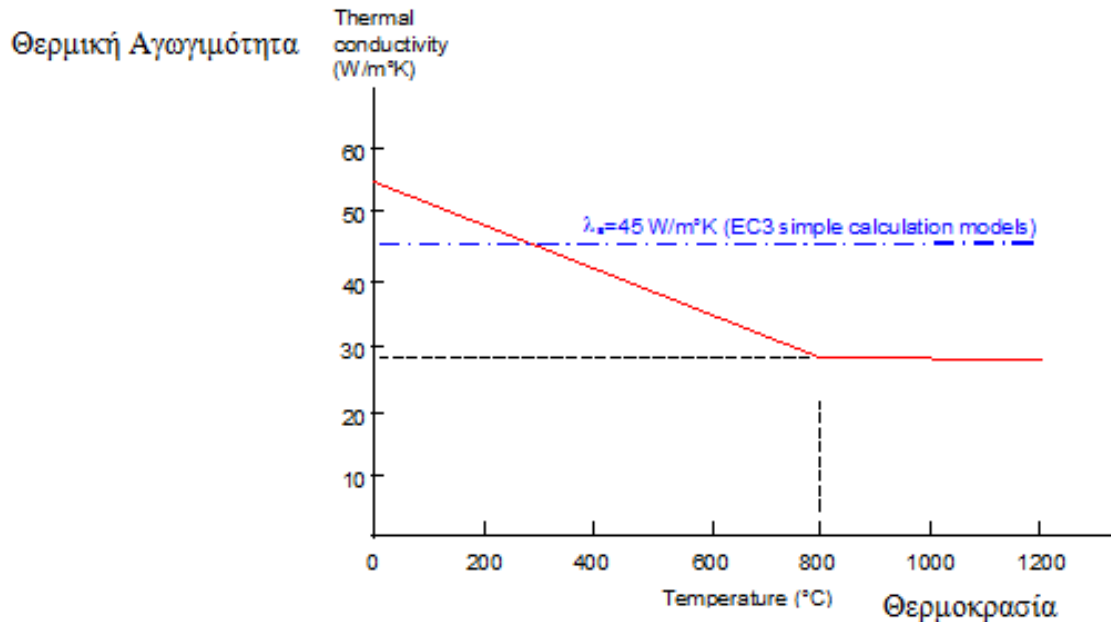
Άλλες σχετικές θερμικές ιδιότητες του χάλυβα

Δύο πρόσθετες θερμικές ιδιότητες του χάλυβα επηρεάζουν το ρυθμό θέρμανσής του κατά τη φωτιά. Η θερμική αγωγιμότητα είναι ο συντελεστής που υπαγορεύει το ρυθμό με τον οποίο η θερμότητα που φτάνει στην επιφάνεια του χαλύβδινου μέλους οδηγείται δια μέσου του μετάλλου. Απλοποιημένη εκδοχή για τη μεταβολή της αγωγιμότητας με τη θερμοκρασία, που ορίζεται στον Ευρωκώδικα 3. Σε απλούς υπολογισμούς σχεδιασμού, επιτρέπεται η χρήση της σταθερής συντηρητικής τιμής των 45W/m²K .

Η ειδική θερμότητα του χάλυβα είναι η ποσότητα θερμότητας που είναι απαραίτητη για να ανεβεί η θερμοκρασία του κατά 1°C. Αυτή μεταβάλλεται σε κάποιο βαθμό σε όλες τις θερμοκρασίες, αλλά η τιμή της υφίσταται δραματική πτώση στην περιοχή των 700-800°C. Η απότομη αύξηση προς μία απείρως μεγάλη τιμή στους 735°C περίπου είναι μία ένδειξη της ποσότητας θερμότητας που χρειάζεται για να λάβει χώρα η αλλαγή στην κρυσταλλική δομή. Και πάλι, όταν χρησιμοποιούνται απλά υπολογιστικά μοντέλα, επιτρέπεται να θεωρήσουμε μία μοναδική τιμή 600J/kg°K η οποία είναι σχεδόν ακριβής για το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής θερμοκρασιών που μας

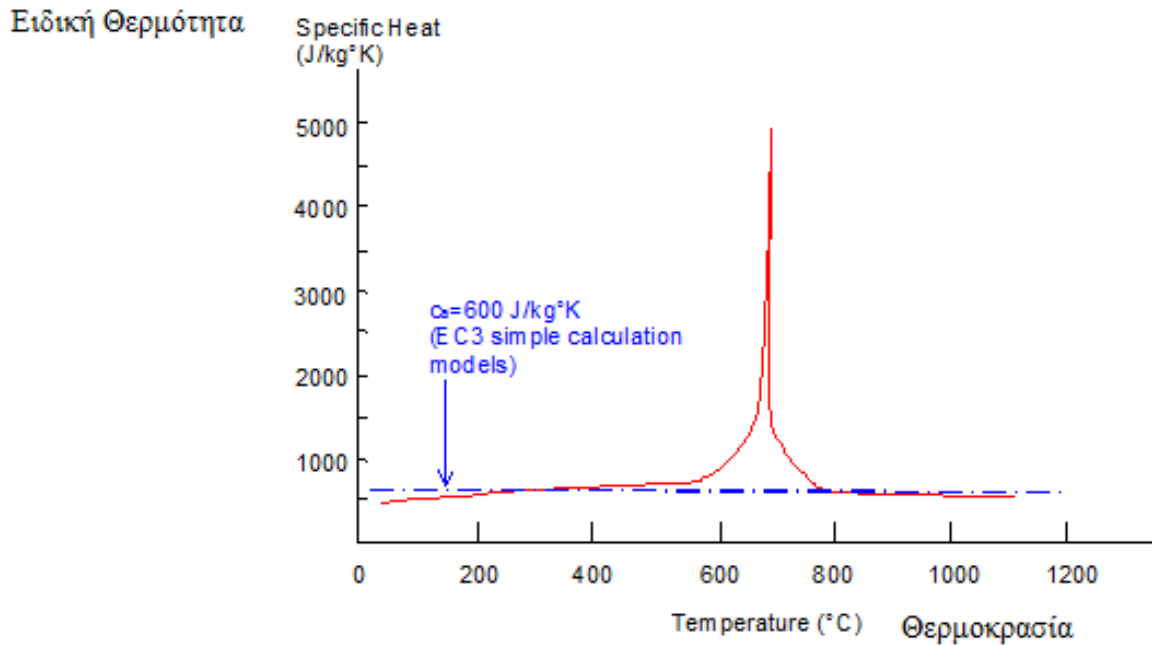
ενδιαφέρει, αλλά δεν είναι κατάλληλη για την ενδοθερμική φύση της φάσεως αλλαγής της κρυσταλλικής δομής.

(Ευρωκώδικας 3, Μέρος 1-2 (ΕΛΟΤ EN 1993-01:2002): Γενικοί κανόνες - Σχεδιασμός φορέων σε πυρκαγιά.)



Σχήμα 11. Παράσταση των προβλέψεων του Ευρωκώδικα 3 για τη μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας του χάλυβα συναρτήσει της θερμοκρασίας

(Ευρωκώδικας 3, Μέρος 1-2)



Σχήμα 12. Μεταβολή της ειδικής θερμότητας του χάλυβα με τη θερμοκρασία
(Ευρωκώδικας 3, Μέρος 1-2)

2.7. Κατάταξη διατομών

Για το σχεδιασμό, τόσο σε κανονικές συνθήκες όσο και σε συνθήκες πυρκαγιάς, όλα τα μέλη τα οποία καταπονούνται σε κάμψη κατατάσσονται σε κατηγορίες και αντιστοιχούν σε αντίστοιχες μεθόδους υπολογισμού. Αυτό αποτελεί στην ουσία έλεγχο της λυγηρότητας των διάφορων τμημάτων της διατομής που βρίσκονται υπό θλίψη, ώστε να εκτιμηθεί η ευαισθησία τους έναντι τοπικού λυγισμού. Ο έλεγχος αυτός εφαρμόζεται πολύ περισσότερο στο σχεδιασμό σε συνθήκες πυρκαγιάς παρά σε κανονικές συνθήκες, επειδή οι στάθμες παραμορφώσεων κατά τη φωτιά μπορεί να γίνουν πολύ μεγάλες και επειδή οι αντοχές μειώνονται στις υψηλές θερμοκρασίες, οπότε οι ιδιότητες του υλικού πρέπει να χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με την κατάταξη της διατομής.

Οι ορισμοί των τεσσάρων δυνατών κατηγοριών των μελών δίνονται παρακάτω:

1. Κοντές και χονδρές διατομές που μπορούν αξιόπιστα να χρησιμοποιηθούν σε πλαστικούς υπολογισμούς αντοχών

2. Ενώ η αντοχή του μέλους μπορεί να υπολογιστεί με βάση την πλαστική της αντοχή, δεν υπάρχει επαρκής ικανότητα στροφής της διατομής χωρίς την πρόκληση τοπικού λυγισμού, ώστε να υπάρχει δυνατότητα σχηματισμού άλλων πλαστικών αρθρώσεων ως μέρος ενός πλήρους μηχανισμού καταρρεύσεως. Το πλαίσιο πρέπει να αναλυθεί ελαστικά.
3. Η αντοχή του μέλους πρέπει να υπολογιστεί ελαστικά, μέχρι του ορίου της πρώτης διαρροής.
4. Διατομές με λυγηρά στοιχεία, των οποίων η αντοχή καθορίζεται από ελαστικό τοπικό λυγισμό, και βρίσκεται κάτω από την καταπόνηση που προκαλεί πρώτη διαρροή.

Κατά το σχεδιασμό σε συνθήκες φωτιάς θλιβόμενων μελών και αμφιέριστων δοκών που υποβαστάζουν μία πλάκα από σκυρόδεμα στο θλιβόμενο πέλμα τους η κατάταξη γίνεται όπως κατά τον κανονικό σχεδιασμό, λόγω των σχετικά χαμηλών παραμορφώσεων που αναπτύσσονται από το θλιβόμενο πέλμα κατά την αστοχία. Αυτό εφαρμόζεται επίσης στις μάλλον λυγηρές διατομές κατηγοριών 3 και 4, για τις οποίες οι παραμορφώσεις είναι πάλι χαμηλές. Για άλλα μέλη, η τιμή του ε μειώνεται καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται, επηρεάζοντας την κατάταξη της διατομής. Έτσι οι διαχωριστικές αναλογίες στοιχείων των Κατηγοριών 1 και 2 μετατρέπονται σε ενεργό λόγο πλάτους/πάχους:

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{eff} = \frac{b}{t} \sqrt{\left[\left(\frac{f_y}{235}\right)\left(\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}\right)\right]} \text{ όπου :}$$

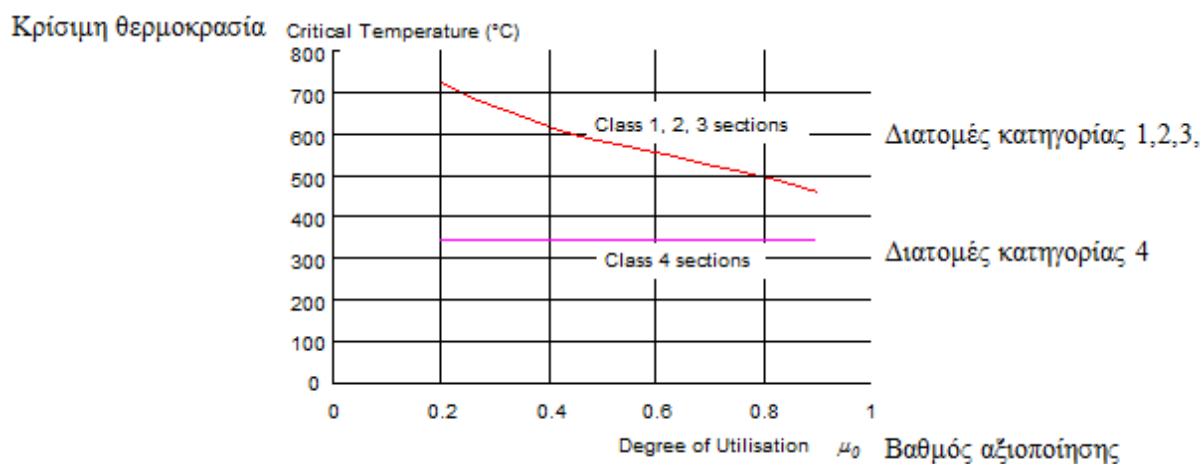
$\frac{b}{t} =$	πραγματικός λόγος πλάτους/πάχους,
$f_y =$	αντοχή διαρροής του χάλυβα
$k_{y,\theta} =$	μειωτικός συντελεστής της αντοχής διαρροής του χάλυβα, σε θερμοκρασία θ ,
$k_{E,\theta} =$	μειωτικός συντελεστής του μέτρου ελαστικότητας του χάλυβα σε θερμοκρασία θ .

Ένα μειονέκτημα αυτών είναι ότι σε μερικές περιπτώσεις μπορεί η κατηγορία της διατομής να αλλάξει καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται και έτσι μπορεί η κατάταξη της διατομής να ενταχθεί σε μία διαδικασία επαναλήψεων και δοκιμών.

(Ευρωκώδικας 3, Μέρος 1-4 (ΕΛΟΤ EN 1993-1-4:2006): Γενικοί κανόνες - Συμπληρωματικοί κανόνες για ανοξείδωτους χάλυβες.)

2.8. Κρίσιμη θερμοκρασία

Η κρίσιμη θερμοκρασία θ_{cr} ενός δομικού μέλους, είναι η θερμοκρασία στην οποία το μέλος υπολογίζεται ότι θα αστοχήσει υπό δεδομένο φορτίο. Αυτή μπορεί να προσδιοριστεί για όλους τους τύπους μελών όταν χρησιμοποιείται από τον Ευρωκώδικα 3 ο βαθμός αξιοποίησης μ_0 του μέλους, κατά το σχεδιασμό σε συνθήκες φωτιάς.



Σχήμα 13. Κρίσιμη θερμοκρασία, συνδεδεμένη με το βαθμό αξιοποίησης

(Ευρωκώδικας 3, Μέρος 1-2)

Η ακόλουθη εξίσωση, που παρουσιάζεται γραφικά στο Σχήμα 13, ορίζει την κρίσιμη θερμοκρασία:

$$\theta_{cr} = 39.19 \ln \left[\frac{I}{0.9674 \mu_0^{3.833}} - 1 \right] + 482$$

Η σχέση αυτή χρησιμοποιείται για όλες τις διατομές, εκτός από εκείνων της Κατηγορίας 4, για τις οποίες προδιαγράφεται μοναδική συντηρητική κρίσιμη θερμοκρασία 350°C.

Ο βαθμός αξιοποίησης m_0 είναι ο λόγος του φορτίου σε συνθήκες φωτιάς προς την αντοχή σχεδιασμού του μέλους σε συνήθεις θερμοκρασίες (ή σε χρόνο $t=0$) αλλά με τη χρήση του συντελεστή ασφαλείας του υλικού που αντιστοιχεί στο σχεδιασμό σε συνθήκες φωτιάς παρά στον συνήθη σχεδιασμό:

$$\mu_0 = \frac{E_{f_i,d}}{R_{f_i,d,0}}$$

Μία απλή παραλλαγή, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφελκόμενα μέλη και πλευρικά προστατευμένες δοκούς, όπου αποκλείεται ο στρεπτοκαμπτικός λυγισμός, είναι

$$\mu_0 = \eta_{f_i} \left(\frac{\gamma_{M,f_i}}{\gamma_{M,1}} \right)$$

στην οποία ο μειωτικός συντελεστής η_{f_i} μπορεί ήδη να είναι συντηρητικός.

(Ευρωκώδικας 3, Μέρος 1-4 (ΕΛΟΤ EN 1993-1-4:2006): Γενικοί κανόνες - Συμπληρωματικοί κανόνες για ανοξείδωτους χάλυβες.)

2.9. Αντοχή εφελκόμενων μελών

Για ένα εφελκόμενο μέλος υπό ομοιόμορφη θερμοκρασία διατομής q η αντοχή σχεδιασμού σε συνθήκες φωτιάς υπολογίζεται απλά με τη χρησιμοποίηση του μειωτικού συντελεστή $k_{y,q}$ της τάσεως διαρροής σε υψηλές θερμοκρασίες, με μία προσαρμογή του συντελεστή ασφαλείας του υλικού σε κανονικές και συνθήκες πυρκαγιάς:

$$N_{f_i,\theta,Rd} = k_{y,\theta} N_{Rd} \left(\frac{\gamma_{M,1}}{\gamma_{M,f_i}} \right)$$

οπότε ο βαθμός αξιοποίησης είναι

$$\mu_0 = \frac{N_{f_i,d}}{N_{f_i,20,Rd}} = \frac{N_{f_i,d}}{N_{Rd}} \left(\frac{\gamma_{M,f_i}}{\gamma_{M,1}} \right)$$

(Ευρωκώδικας 3, Μέρος 1-4 (ΕΛΟΤ EN 1993-1-4:2006): Γενικοί κανόνες - Συμπληρωματικοί κανόνες για ανοξείδωτους χάλυβες.)

2.10. Αντοχή πλευρικά στηριζόμενων δοκών

Η αντοχή σε κάμψη σε συνθήκες φωτιάς για διατομές Κατηγορίας 1 και 2 με θερμοκρασία q στη διατομή τους, υπολογίζεται με βάση την πλαστική αντοχή

σχεδιασμού, με τη χρήση του μειωτικού συντελεστή $k_{y,q}$ της τάσεως διαρροής σε υψηλές θερμοκρασίες με την προσαρμογή του συντελεστή ασφαλείας του υλικού:

$$M_{f_i,\theta,Rd} = k_{y,\theta} M_{Rd} \left(\frac{\gamma_{M,1}}{\gamma_{M,f_i}} \right)$$

Σε διατομές Κατηγορίας 3 εφαρμόζεται ο ίδιος τύπος, αλλά χρησιμοποιείται η ελαστική ροπή αντοχής για το M_{Rd} .

Εναλλακτικά, μπορεί να υπολογιστεί συντηρητικά με τη χρησιμοποίηση δύο εμπειρικών συντελεστών προσαρμογής k_1 και k_2 για να προσδιοριστεί η ροπή αντοχής στο χρόνο t ως:

$$M_{f_i,t,Rd} = \frac{M_{f_i,\theta,Rd}}{\kappa_1 \kappa_2}$$

όπου k_1 είναι ο συντελεστής ανομοιόμορφης κατανομής της θερμοκρασίας επί της διατομής και k_2 ο συντελεστής μείωσης της θερμοκρασίας πλησίον των στηρίξεων μιας στατικώς αορίστου δοκού. Οι τιμές των k_1 και k_2 καθορίζονται στα Εθνικά Κείμενα Εφαρμογής.

Στη Μεγάλη Βρετανία το k_1 έχει τιμή 0,7 για πλάκα στηριζόμενη στο άνω πέλμα και το k_2 είναι 0,85 για στατικά αόριστες δοκούς, ενώ στις άλλες περιπτώσεις, έχουν τιμή = 1.

Η αντοχή σε τέμνουσα υπολογίζεται με τη χρήση της ίδιας γενικής διαδικασίας, όπως για την κάμψη και τον εφελκυσμό, με τους ίδιους συντελεστές προσαρμογής όπως προηγουμένως, σε περιπτώσεις ανομοιόμορφης κατανομής της θερμοκρασίας. Ο γενικός τύπος που καλύπτει ομοιόμορφες και ανομοιόμορφες περιπτώσεις θερμοκρασίας είναι:

$$V_{f_i,t,Rd} = k_{y,\theta} \max V_{Rd} \left(\frac{\gamma_{M1}}{\gamma_{M,f_i}} \right) \frac{1}{\kappa_1 \kappa_2}$$

(Ευρωκώδικας 3, Μέρος 1-4 (ΕΛΟΤ EN 1993-1-4:2006): Γενικοί κανόνες - Συμπληρωματικοί κανόνες για ανοξείδωτους χάλυβες.)

2.11. Στρεπτοκαμπτικός λυγισμός

Σε περιπτώσεις όπου το θλιβόμενο πέλμα δεν είναι πλευρικά στηριγμένο, η αντοχή σχεδιασμού σε κάμψη έναντι στρεπτοκαμπτικού λυγισμού για διατομές Κατηγορίας 1 και 2 υπολογίζεται με τη χρήση του τύπου από τον Ευρωκώδικα 3 Μέρος 1-1, με μικρή τροποποίηση για τις συνθήκες πυρκαγιάς:

$$M_{b.fi.t.Rd} = W_{pl.y} k_{y,\theta.com} f_y \left(\frac{X_{LT.fi}}{1,2} \right) \frac{1}{\gamma_{M.fi}}$$

Όπου :

$$\begin{aligned} X_{LT.fi} &= \text{μειωτικός συντελεστής στρεπτοκαμπτικού λυγισμού σε συνθήκες φωτιάς} \\ k_{y,\theta.com} &= \text{μειωτικός συντελεστής της τάσεως διαρροής για τη μέγιστη θερμοκρασία του} \\ &\quad \text{θλιβόμενου πέλματος κατά τη χρονική στιγμή } t \end{aligned}$$

Το 1,2 είναι εμπειρικά διορθωτικός συντελεστής για έναν αριθμό επιρροών. Ο μειωτικός συντελεστής στρεπτοκαμπτικού λυγισμού $X_{LT.fi}$ προσδιορίζεται όπως στον συνήθη σχεδιασμό, εκτός του ότι η ανηγμένη λυγηρότητα προσαρμόζεται στις ιδιότητες του χάλυβα σε υψηλές θερμοκρασίες:

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta.com} = \bar{\lambda}_{LT} \sqrt{\frac{k_{y,\theta.com}}{k_{E,\theta.com}}} \quad \text{όπου:}$$

$$k_{E,\theta.com} = \text{μειωτικός συντελεστής του μέτρου ελαστικότητας στη μέγιστη θερμοκρασία του} \\ \text{θλιβόμενου πέλματος κατά τη χρονική στιγμή } t$$

αντοχή έναντι στρεπτοκαμπτικού λυγισμού πρέπει να ληφθεί υπόψη μόνο εάν το $\bar{\lambda}_{LT,\theta.com}$ υπερβαίνει το 0,4. Για μικρότερη λυγηρότητα, μόνο η αντοχή σε κάμψη είναι αναγκαίο να ληφθεί υπόψη.

(I. Βάγιας, I. Ερμόπουλος, Γ. Ιωαννίδης, «Σχεδιασμός Δομικών Έργων Από Χάλυβα, Με βάση τα τελικά κείμενα των Ευρωκωδίκων», εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2011.)

2.12. Αντοχή των θλιβόμενων μελών

Η αντοχή σχεδιασμού έναντι λυγισμού υποστυλωμάτων με διατομές Κατηγορίας 1,2 ή 3 υπολογίζεται ως ακολούθως, λαμβάνοντας υπόψη μείωση της αντοχής και αύξηση της ανηγμένης λυγηρότητας σε υψηλές θερμοκρασίες:

$$N_{b.fi.t.Rd} = A k_{y,\theta,\max} f_y \left(\frac{\chi_{fi}}{1,2} \right) \frac{1}{\gamma_{M.fi}}$$

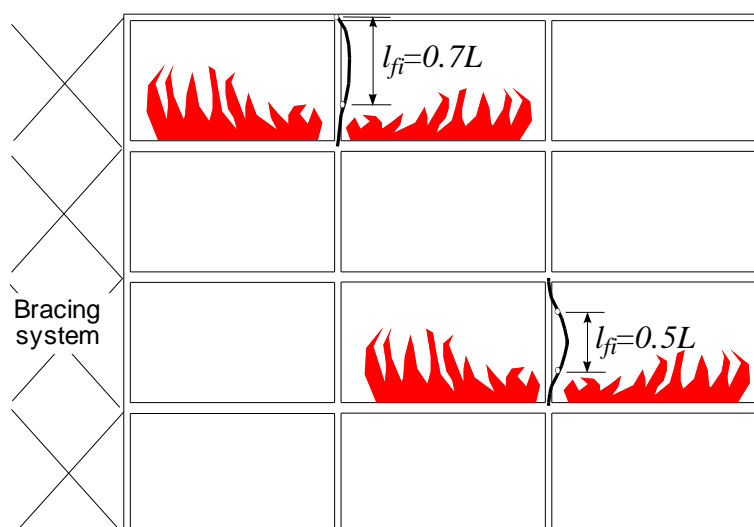
Το 1,2 αποτελεί εμπειρικό διορθωτικό συντελεστή για έναν αριθμό επιρροών.

Ο μειωτικός συντελεστής καμπτικού λυγισμού χ_{fi} είναι η μικρότερη από τις τιμές του ως προς τους άξονες yy και zz και προσδιορίζεται όπως στο σχεδιασμό σε κανονικές συνθήκες, εκτός του ότι η χρησιμοποιούμενη λυγηρότητα προσαρμόζεται στις συνθήκες φωτιάς ως εξής:

- Χρησιμοποιείται πάντοτε η καμπύλη λυγισμού c.

Το μήκος λυγισμού l_{fi} προσδιορίζεται όπως φαίνεται στο Σχήμα 14, υπό την προϋπόθεση ότι κάθε όροφος του κτιρίου αποτελεί ένα χωριστό πυροδιαμέρισμα και ότι η αντοχή σε φωτιά των ορίων του πυροδιαμερίσματος δεν είναι μικρότερη από την αντοχή των υποστυλωμάτων. Επειδή τα συνεχή υποστυλώματα είναι πολύ πιο δύσκαμπτα από τα υποστυλώματα εντός του πυροδιαμερίσματος, υποτίθεται ότι προκαλούν στα άκρα του θερμαινόμενου υποστυλώματος μία δέσμευση, έτσι ο συντελεστής ενεργού μήκους λαμβάνεται ίσος προς 0,5 για τους ενδιάμεσους ορόφους και 0,7 για τον ανώτερο.

(I. Βάγιας, I. Ερμόπουλος, Γ. Ιωαννίδης, «Σχεδιασμός Δομικών Έργων Από Χάλυβα, Με βάση τα τελικά κείμενα των Ευρωκωδίκων», εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2011.)



Σχήμα 14. Μήκη λυγισμού υποστυλωμάτων σε πυρκαγιά

(Ευρωκώδικας 3, Μέρος 1-2)

Η ανηγμένη λυγηρότητα του υποστυλώματος για τη μέγιστη θερμοκρασία δίδεται από τη σχέση:

$$\bar{\lambda}_{\theta, \max} = \bar{\lambda} \sqrt{\frac{k_{y, \theta, \max}}{k_{E, \theta, \max}}}$$

(Ι. Βάγιας, Ι. Ερμόπουλος, Γ. Ιωαννίδης, «Σχεδιασμός Δομικών Έργων Από Χάλυβα, Με βάση τα τελικά κείμενα των Ευρωκωδίκων», εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2011.)

2.13. Δείκτης πυραντίστασης μη προστατευμένων μελών από χάλυβα

Είναι ο χρόνος που απαιτείται για ένα μέλος να φτάσει την κρίσιμη θερμοκρασία του όταν υπόκειται σε μία πρότυπη καμπύλη φωτιάς. Αν και για ορισμένα μέλη περιορισμένου μεγέθους υπάρχει ένα σώμα πειραματικών αποτελεσμάτων φούρνου, είναι απαραίτητο να έχουμε τη δυνατότητα να υπολογίσουμε την αύξηση της θερμοκρασίας κάθε μέλους για μία δεδομένη πρότυπη φωτιά. Η μεταφορά θερμότητας προς το μέλος κυριαρχείται από δύο μηχανισμούς: ακτινοβολία και συναγωγή (επαφή). Επειδή ο ρυθμός θέρμανσης εξαρτάται σε κάθε χρονική στιγμή από τη θερμοκρασία τόσο του περιβάλλοντος το μέλος αέρα, κατά τη διάρκεια της φωτιάς, όσο και του μέλους, η θερμοκρασία του μέλους συναρτήσει του χρόνου εκφράζεται από μία διαφορική εξίσωση. Η δυσκολία αυτή αντιμετωπίζεται στον Ευρωκώδικα 3 γραμμικοποιώντας τις αυξήσεις της θερμοκρασίας σε μικρά χρονικά διαστήματα.

Για μη προστατευμένη χαλύβδινη διατομή, η αύξηση της θερμοκρασίας $Dq_{a,t}$ σε μικρό χρονικό διάστημα Dt δίδεται μέσω της καθαρής ποσότητας θερμότητας που απορροφά η διατομή κατά τη διάρκεια αυτού του χρόνου:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{I}{c_a \rho_a} \frac{A_m}{V} h_{net,d} \Delta t$$

στην οποία :

$$\begin{array}{l} c_a = \\ \rho_a = \end{array} \left| \begin{array}{l} \text{ειδική θερμότητα του χάλυβα} \\ \text{πυκνότητα του χάλυβα} \end{array} \right.$$

$$\frac{A_m}{V} = \left\{ \begin{array}{l} \text{«Συντελεστής Διατομής» αποτελούμενος από} \\ \\ A_m \left| \begin{array}{l} \text{εκτεθειμένη επιφάνεια του μέλους ανά μονάδα μήκους} \\ \text{του} \end{array} \right. \\ = \\ V = \left| \begin{array}{l} \text{όγκος του μέλους ανά μονάδα μήκους του} \end{array} \right. \\ \\ h_{net,a} = \text{τιμή σχεδιασμού της καθαρής θερμικής ροής ανά μονάδα} \\ \text{επιφανείας} \end{array} \right.$$

Η καθαρή θερμική ροή αποτελείται από συνιστώσες ακτινοβολίας και συναγωγής, εκ των οποίων η συνιστώσα ακτινοβολίας είναι:

$$h_{net,r} = 5,67 * 10^{-8} \Phi \epsilon_{res} \left[(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4 \right]$$

στην οποία, πέραν της σταθεράς των Stefan-Boltzmann $5,67 \times 10^{-8}$,

$$\Phi = \left\{ \begin{array}{l} \text{συντελεστής διατάξεως (μπορεί να τίθεται ίσος με 1.0 εν} \\ \text{απουσία δεδομένων)} \\ \\ \epsilon_{res} = \epsilon_f \epsilon_m \left| \begin{array}{l} \text{συνισταμένη αναδοτικότητα} = \text{αναδοτικότητα του} \\ \text{πυροδιαμερίσματος x αναδοτικότητα της επιφάνειας του} \\ \text{μέλους (0,8 \cdot 0,625=0,5 εάν δεν υπάρχουν ειδικά δεδομένα)} \end{array} \right. \\ = \\ \theta_r, \theta_m = \text{θερμοκρασίες αέρα και επιφάνειας μέλους} \end{array} \right.$$

Η εκ συναγωγής συνιστώσα της θερμικής ροής είναι:

$$h_{net,c} = \alpha_c (\theta_g - \theta_m)$$

στην οποία α_c = συντελεστής μεταφοράς θερμότητας δια συναγωγής (τιμές καθοριζόμενες από τα Εθνικά Κείμενα Εφαρμογής, αλλά $25 \text{W/m}^2\text{K}$ για την πρότυπη ή εξωτερικές καμπύλες φωτιάς, $50 \text{W/m}^2\text{K}$ για καμπύλες υδρογονανθράκων)

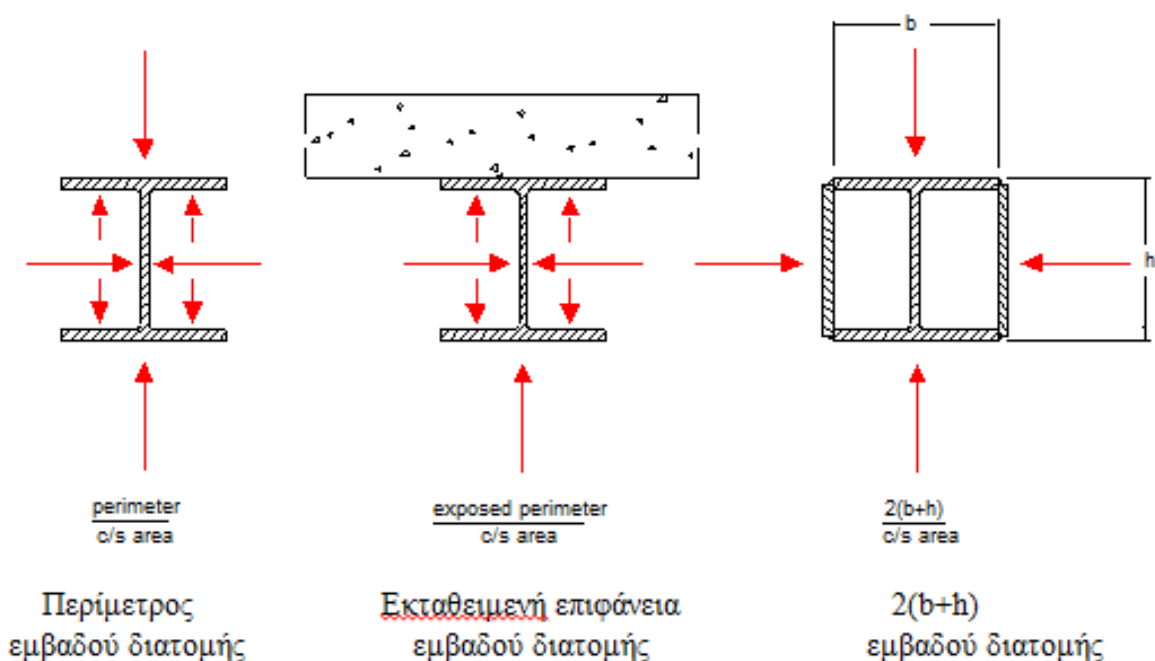
$$\theta_g, \theta_m = \text{θερμοκρασία αέρα και επιφάνειας μέλους}$$

Όταν σχηματίζουμε τη συνολική καθαρή θερμική ροή κάθε μία συνιστώσα πρέπει να πολλαπλασιάζεται επί κατάλληλο συντελεστή για να ληφθούν υπόψη οι διαφορετικές εθνικές πρακτικές κατά τα πειράματα, αλλά συνήθως οι συνιστώσες απλώς προστίθενται.

Ο Συντελεστής Διατομής A_m/V χρησιμοποιεί την εκτεθειμένη περίμετρο για να υπολογίσει μία κατάλληλη τιμή του A_m και αυτό ευνοεί την πραγματική επιφάνεια που είναι εκτεθειμένη σε ακτινοβολία και συναγωγή.

(Ευρωκώδικας 3, Μέρος 1-2 (ΕΛΟΤ EN 1993-01:2002): Γενικοί κανόνες - Σχεδιασμός φορέων σε πυρκαγιά.)

Η αρχή αυτή φαίνεται στα τρία παραδείγματα παρακάτω:



Σχήμα 15. Αρχές υπολογισμού του συντελεστή διατομής

(Ευρωκώδικας 3, Μέρος 1-2)

2.14. Δείκτες πυραντίστασης προστατευόμενων μελών από χάλυβα

Για μέλη με παθητική πυροπροστασία, οι βασικοί μηχανισμοί μεταφοράς της θερμότητας είναι οι ίδιοι όπως για τα μη προστατευμένα μέλη, αλλά η κάλυψη της επιφάνειας με υλικό πολύ χαμηλής αγωγιμότητας επιφέρει σημαντική μείωση στο ρυθμό θέρμανσης της χαλύβδινης διατομής. Το μονωτικό περίβλημα έχει το ίδιο την ικανότητα να αποθηκεύει μία ορισμένη, αν και μικρή, ποσότητα θερμότητας. Ο υπολογισμός της αύξησης της θερμοκρασίας του χάλυβα $\Delta\theta_{a,t}$ σε μικρό χρονικό διάστημα Δt αφορά τη μεταβίβαση θερμότητας από την εκτεθειμένη επιφάνεια για

μονώσεις (σε συνδυασμό με την αποθηκευμένη ποσότητα θερμότητας στο μονωτικό περίβλημα) προς τη διατομή από χάλυβα:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p/d_p}{c_a\rho_a} \frac{A_p}{V} \left(\frac{1}{1+\phi/3} \right) (\theta_{g,t} - \theta_{a,t}) \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \Delta\theta_{g,t}$$

$$\Delta\theta_{a,t} \geq 0$$

στην οποία η σχετική αποθηκευμένη θερμότητα στο μονωτικό υλικό δίδεται από τον όρο

$$\phi = \frac{c_p\rho_p}{c_a\rho_a} d_p \frac{A_p}{V}$$

Όπου:

$$\frac{A_p}{V} = \text{συντελεστής διατομής του προστατευμένου χαλύβδινου μέλους, όπου } A_p \text{ είναι γενικά η εσωτερική περίμετρος του μονωτικού υλικού}$$

$$c_a, c_p = \text{ειδικές θερμότητες του χάλυβα και του μονωτικού υλικού}$$

$$d_p = \text{πάχος του υλικού προστασίας}$$

$$\theta_{a,t}, \theta_{g,t} = \text{θερμοκρασίες του χάλυβα και του αέρα τη χρονική στιγμή } t$$

$$\Delta\theta_{g,t} = \text{αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα κατά τη διάρκεια του χρονικού βήματος } \square t$$

$$\lambda_p = \text{θερμική αγωγιμότητα του υλικού προστασίας}$$

$$\rho_a, \rho_p = \text{πυκνότητες του χάλυβα και του υλικού προστασίας}$$

Υλικά προστασίας έναντι της φωτιάς συχνά περιέχουν ένα ορισμένο ποσοστό υγρασίας το οποίο εξατμίζεται στους 100°C περίπου, με σημαντική απορρόφηση θερμότητας. Αυτό προκαλεί ένα στην καμπύλη θέρμανσης ένα οριζόντιο τμήμα του προστατευμένου μέλους από χάλυβα, στη στάθμη αυτής της θερμοκρασίας, ενώ το περιεχόμενο νερό διαφεύγει από τον περιβάλλον.

(Ευρωκώδικας 3, Μέρος 1-2 (ΕΛΟΤ EN 1993-01:2002): Γενικοί κανόνες - Σχεδιασμός φορέων σε πυρκαγιά.)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΑ ΚΑΙ ΠΑΘΗΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΥΡΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Με τον όρο **πυροπροστασία** εννοούμε το σύνολο των μέτρων που λαμβάνονται για την προστασία από τη φωτιά και τις συνέπειές της.

Μέτρα πυροπροστασίας λαμβάνονται σε οχήματα, πλοία, αεροπλάνα και κτίρια.

Πυροπροστασία κτιρίων

Για τα μέτρα πυροπροστασίας προβλέπει η ισχύουσα νομοθεσία κάθε χώρας κατά την μελέτη και κατασκευή ενός κτιρίου και αποβλέπουν αφενός στην πρόληψη του κινδύνου εκδήλωσης ενδεχόμενης πυρκαγιάς στο κτίριο και αφετέρου στην αντιμετώπιση της πυρκαγιάς σε περίπτωση που αυτή εκδηλωθεί.

Κατά την σχεδίαση ενός κτιρίου από τους μελετητές (αρχιτέκτονα, πολιτικό μηχανικό, μηχανολόγο μηχανικό, τοπογράφο μηχανικό) αντιμετωπίζεται και το θέμα της πρόληψης και αντιμετώπισης της πιθανότητας εμφάνισης πυρκαγιάς σε ένα κτίριο.

Τα μέτρα που λαμβάνονται διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

- παθητικά ή προληπτικά μέτρα πυροπροστασίας
- ενεργητικά ή κατασταλτικά μέτρα πυροπροστασίας

Παθητική πυροπροστασία

Η παθητική πυροπροστασία ενός κτιρίου στοχεύει στον έλεγχο της εξάπλωσης της φωτιάς και στην έγκαιρη και ασφαλή εκκένωση του κτιρίου από όσους βρίσκονται μέσα σε αυτό κατά την εκδήλωση της πυρκαγιάς. Τα μέτρα του τύπου παθητικής πυροπροστασίας αποτελούν την δομική πυροπροστασία του κτιρίου και είναι ενσωματωμένα στην αρχιτεκτονική και στατική σχεδίαση όπως και κατασκευή του κτιρίου από τον αρχιτέκτονα και τον πολιτικός μηχανικό.

Στα μέτρα παθητικής πυροπροστασίας περιλαμβάνονται :

- μέτρα για τη μη εξάπλωση της πυρκαγιάς εντός του κτιρίου
- μέτρα για τη μη εξάπλωση της πυρκαγιάς εκτός του κτιρίου και στον περιβάλλοντα χώρο
- η επάρκεια και το ποσοστό της αντοχής των δομικών στοιχείων του κτιρίου στην πυρκαγιά για κάποιο χρονικό διάστημα ώστε να είναι δυνατή η έγκαιρη εκκένωσή του κτιρίου
- κατάλληλη σχεδίαση των οδεύσεων διαφυγής και των εξόδων κινδύνου



Εικόνα 2. Σήματα Διάσωσης

Η μελέτη της παθητικής πυροπροστασίας κοστολογείται για ένα κτίριο 100 m² από 150,00 € έως και 200,00 € και χρειάζεται έκδοση πιστοποιητικού.

Το κόστος των σημάτων εξαρτάται από τις ανάγκες του κτιρίου και τις εξόδους διαφυγής που έχει.

Ενεργητική πυροπροστασία

Η ενεργητική πυροπροστασία ενός κτιρίου αποβλέπει στην αντιμετώπιση και καταστολή της φωτιάς σε περίπτωση που αυτή έχει ήδη εκδηλωθεί. Τα προβλεπόμενα μέτρα από τον μελετητή μηχανολόγο μηχανικό, αφορούν τον απαραίτητο εξοπλισμό και τις προγραμματισμένες ενέργειες που ενεργοποιούνται αν εμφανιστεί πυρκαγιά ή και κατά την διάρκεια της πυρκαγιάς.

Στα μέτρα ενεργητικής πυροπροστασίας περιλαμβάνονται (ανάλογα με το είδος και το μέγεθος του κτιρίου):

- η τοποθέτηση φορητών μέσων πυρόσβεσης (πυροσβεστήρες)
τιμή μονάδος πυροσβεστήρα Ρα 6kg 55,00 €
- η τοποθέτηση συστήματος πυρανίχνευσης στο κτίριο

ενδεικτική τιμή σε κτίριο 100 m² είναι 400,00 €

- η τοποθέτηση χειροκίνητου συστήματος συναγερμού (κομβία συναγερμού)

ενδεικτική τιμή σε κτίριο 100 m² είναι 300,00 €

- η τοποθέτηση μόνιμου υδροδοτικού πυροσβεστικού δικτύου (πυροσβεστικές φωλιές)

τιμή μονάδος πυροσβεστικής φωλιάς 100,00 €

- η τοποθέτηση συστήματος καταιονητήρων (sprinklers)

τιμή μονάδος συστήματος καταιονητήρων 70,00 €



Εικόνα 3. Πυροσβεστήρες



Εικόνα 4. Sprinklers

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΒΛΑΒΕΣ ΑΠΟ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

Η επίδραση της πυρκαγιάς οδηγεί στη μείωση των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών, στην παρούσα διπλωματική εργασία το χάλυβα, την ανακατανομή της έντασης, την εκδήλωση βλαβών, όπως επίσης και τη μερική ή ολική κατάρρευση του μεταλλικού κτιρίου.

Οι περισσότερες βλάβες που παρατηρούνται και εντοπίζονται στα μεταλλικά κτίρια ποικίλουν όσον αφορά τη μορφή και την έκτασή τους και εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες.

Η λεπτομερή αποτύπωση των δομικών στοιχείων του φέροντος οργανισμού, η αναζήτηση πληροφοριών που αφορούν μετατροπές ή και επεμβάσεις στο υφιστάμενο μεταλλικό κτίριο, αποτελούν τα βασικά δεδομένα για την ορθή τεκμηρίωση της παθολογίας του κτιρίου.

Η γνώση των αιτιών που οδήγησαν και προκάλεσαν τις βλάβες στο κτίριο, αποτελεί τη πιο σημαντική παράμετρο για την ορθή αντιμετώπιση των βλαβών και τη σχεδίαση των κατάλληλων επισκευών και ενισχύσεων.

4.1. Βλάβες μελών από πυρκαγιά

Σχηματικά η πορεία που ακολουθεί το μεταλλικό κτίριο κατά το φαινόμενο της πυρκαγιάς είναι:

- Εκδήλωση πυρκαγιάς σε ένα χώρο
- Αύξηση θερμοκρασίας χώρου
- Αύξηση θερμοκρασίας φερόντων στοιχείων
- Απομείωση μηχανικών χαρακτηριστικών χάλυβα
- Απομείωση αντοχής και δυσκαμψίας φερόντων στοιχείων
- Κίνδυνος αστοχίας υπό τα λοιπά μόνιμα και κινητά φορτία

4.1.1. Τοπικός λυγισμός



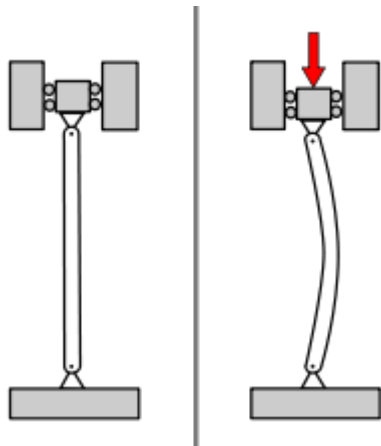
Εικόνα 5. Τοπικός λυγισμός

4.1.2. Σύνθλιψη κεφαλής υποστυλώματος



Εικόνα 6. Σύνθλιψη κεφαλής υποστυλώματος

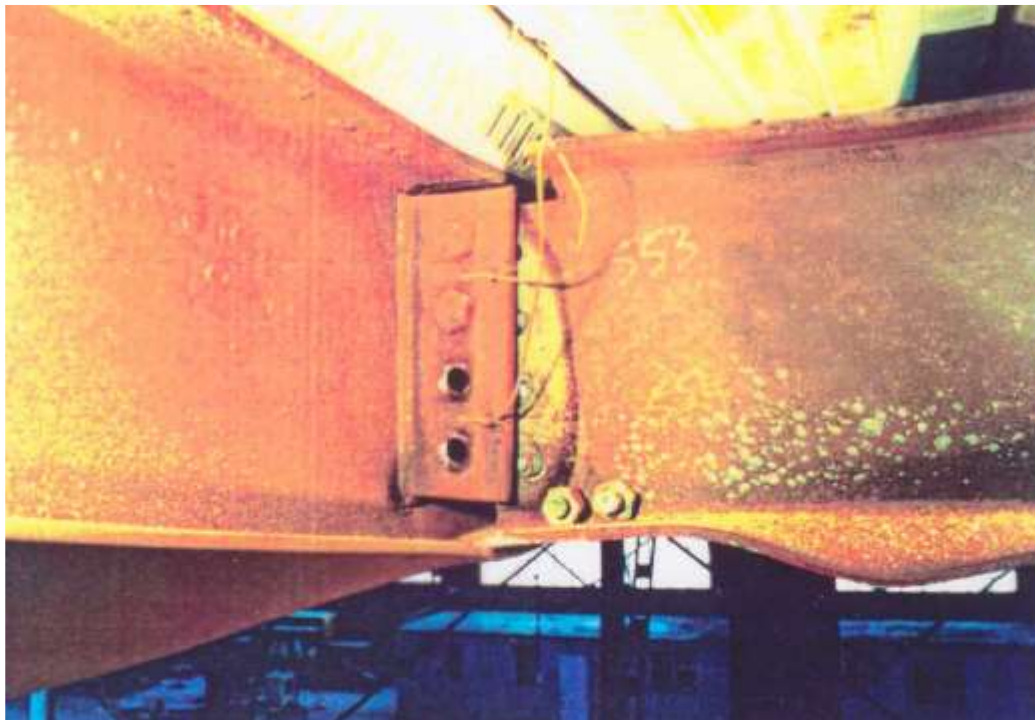
4.1.3. Καθολικός λυγισμός υποστυλώματος



Εικόνα 7. Καθολικός λυγισμός υποστυλώματος

4.2. Βλάβες συνδέσεων από πυρκαγιά

4.2.1. Διατμητική αστοχία κοχλιών



Εικόνα 8. Διατμητική αστοχία κοχλιών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΥΛΙΚΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν για την αποκατάσταση του μεταλλικού κτιρίου έπειτα από την έκθεσή του στη φωτιά, πρέπει να τηρούν τις παρακάτω απαιτήσεις:

- Διατήρηση θερμικών μηχανικών χαρακτηριστικών σε ψηλές θερμοκρασίες
- Μη έκλυση καπνού και τοξικών αερίων

Στον Κανονισμό Πυροπροστασίας Κτιρίων (Κ.Π.Κ), Άρθρο 14, ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α, Δείκτες Πυραντίστασης Δομικών Στοιχείων, αναφέρεται ότι ο ορισμός των φέρουσων κατασκευών από χάλυβα ως :

Οι χαλύβδινες κατασκευές χωρίς συγκεκριμένη πυροπροστατευτική επίστρωση ή επένδυση, παρουσιάζουν μηδενικό δείκτη πυραντίστασης. Ο δείκτης πυραντίστασης εξαρτάται τόσο από τη χρησιμοποιούμενη διατομή, όσο και από το υλικό επικάλυψης και τον τρόπο εφαρμογής του. Αυτό θα πρέπει πάντα να αποδεικνύεται με πιστοποιητικό εξουσιοδοτημένου Ευρωπαϊκού εργαστηρίου που χρησιμοποιεί αποδεκτή πρότυπη δοκιμασία.

Οι βασικότερες εφαρμογές μεταλλικών δομικών στοιχείων στο φέροντα σκελετό αφορούν κτίρια βιομηχανίας ή αποθηκών, μεγάλων δηλαδή σύγχρονων μεταλλικών κατασκευών. Όπως αναφέρεται στον Κ.Π.Κ. (Άρθρο 11):

Υπάρχουν τρεις κατηγορίες όπου κατατάσσονται οι βιομηχανίες, οι βιοτεχνίες και οι αποθήκες ανάλογα με την επικινδυνότητά τους σε σχέση με την εκδήλωση πυρκαγιάς, σύμφωνα με το Παράρτημα της Απόφασης 5905/12-6-95 Υπουργού Βιομηχανίας Ενέργειας και Τεχνολογίας, όπως ισχύει κάθε φορά:

- Ζώνη 1 (Z1) : Χαμηλού βαθμού κινδύνου (Αα, Βα, Ca της απόφασης 5905)
- Ζώνη 2: (Z2) : Μέσου βαθμού κινδύνου (Αβ, Ββ, Cβ της απόφασης 5905)
- Ζώνη 3 : (Z1) : Υψηλού βαθμού κινδύνου (Αγ, Βγ, Cγ της απόφασης 5905)

Ιδιαίτερα για τα κτίρια που στεγάζουν αποθήκες, η κατάταξη μπορεί να γίνει ορθότερα με βάση τη μέση πυκνότητα του πυροθερμικού φορτίου εφόσον αυτό παραμένει σχετικά σταθερό, ως εξής:

- Ζώνη 1: (Z1) : πυροθερμικό φορτίο < 1.000 MJ/m²
- Ζώνη 2: (Z2) : πυροθερμικό φορτίο 1.000 – 2.000 MJ/m²
- Ζώνη 3: (Z3) : πυροθερμικό φορτίο > 2.000 MJ/m² ‘

Οι ελάχιστοι απαιτούμενοι κατά περίπτωση δείκτες πυραντίστασης και χρόνοι αντοχής του χάλυβα σε συνθήκες φωτιάς καθορίζονται από κανονισμούς. Οι προβλέψεις του Ελληνικού κανονισμού πυροπροστασίας Π.Δ. 71/88 ως προς τους απαιτούμενους ελάχιστους δείκτες πυραντίστασης φαίνονται στον παρακάτω πίνακα του κανονισμού που ακολουθεί:

ΕΛΑΧΙΣΤΟΙ ΕΠΙΤΡΕΠΟΜΕΝΟΙ ΔΕΙΚΤΕΣ ΠΥΡΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ				
Κατηγορία κτιρίου	Μονόροφα	Πολυρόροφα	Υπόγεια	Εγκατάσταση* καταιονητήρων (συντελεστής)
Βιομηχανίες				
Z1	χωρίς απαίτηση	60 λεπτά	120 λεπτά	0,5
Z2	60 λεπτά	90 λεπτά	120 λεπτά	0,6
Z3	60 λεπτά	120 λεπτά	180 λεπτά	0,7
Αποθήκες				
Z1	60 λεπτά	90 λεπτά	120 λεπτά	0,5
Z2	120 λεπτά	180 λεπτά	180 λεπτά	0,5
Z3	180 λεπτά	240 λεπτά	240 λεπτά	0,5

Πίνακας 1. Ελάχιστοι Επιτρεπόμενοι Δείκτες Πυραντίστασης

Ως πυροθερμικό φορτίο ορίζεται το εκλυόμενο ποσοστό θερμότητας από την καύση του υλικού που βρίσκεται στο εσωτερικό του μεταλλικού κτιρίου. Αναγόμενο το φορτίο αυτό σε τετραγωνικό μέτρο κατόψεως δίνει την λεγόμενη πυκνότητα του πυροθερμικού φορτίου. Η πυκνότητα αυτή εκφράζεται σε χιλιόγραμμα ισοδύναμης ποσότητας, από πλευράς εκλυόμενης θερμότητας, ξύλου ανά τετραγωνικό μέτρο της κάτοψης. Έτσι η πυκνότητα πυροθερμικού φορτίου 2000 MJ/m² ισοδυναμεί περίπου με 115 kg/m² ξύλου.

(Ι. Βάγιας, Ι. Ερμόπουλος, Γ. Ιωαννίδης, «Χαλύβδινες Κατασκευές, Παραδείγματα εφαρμογής του Ευρωκώδικα 3», Τόμος Ι, εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2008.)

5.1. Πυρίμαχες πλάκες

Τα πλεονεκτήματα των πυρίμαχων πλακών είναι τα εξής:

- Κατασκευάζονται σε πολλές διαστάσεις
- Έχουν μεγάλη αντίσταση σε χτυπήματα
- Τοποθετούνται με συνδετήρες, βίδες ή καρφιά. Οι σφήνες στήριξης τοποθετούνται απλά με τριβή.
- Έχουν μεγάλη αντίσταση στη σκουριά και στη φθορά.
- Δεν επηρεάζονται από την υγρασία.
- Ταχύτητα τοποθέτησης.
- Αρχιτεκτονική τελική μορφή.
- Είναι κατάλληλες για εφαρμογές τόσο σε εξωτερικούς όσο και σε εσωτερικούς χώρους.

(Ι. Βάγιας, Ι. Ερμόπουλος, Γ. Ιωαννίδης, «Σχεδιασμός Δομικών Έργων από Χάλυβα με Παραδείγματα Εφαρμογής», εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2013.)

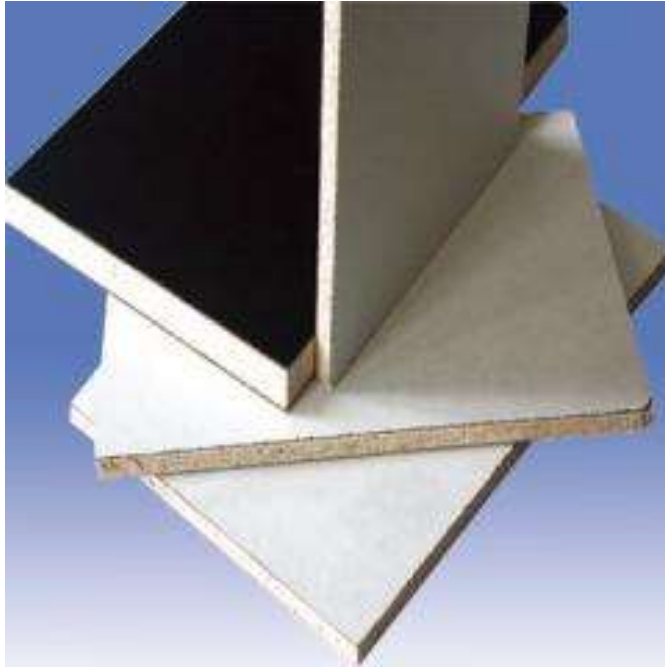


Εικόνα 9. Εφαρμογή πυρίμαχων πλακών

Το κόστος των πυρίμαχων πλακών εξαρτάται από το πάχος τους :

Ενδεικτικές τιμές :

- Πυρίμαχη πλάκα 38% 500 x 250 x 60mm, κόστος 22,32 €
- Πυρίμαχη πλάκα 38% 500 x 250 x 40mm, κόστος 20,10 €
- Πυρίμαχη πλάκα 38% 500 x 250 x 30mm, κόστος 20,09 €



Εικόνα 10. Πυρίμαχες Πλάκες

5.2. Εκτοξευόμενα επιχρίσματα

Τα επιχρίσματα είναι τσιμεντοειδούς βάσης, προζυγισμένα, κονιάματα πυροπροστασίας σε μορφή σκόνης για εφαρμογή με τη μέθοδο του υγρού ψεκασμού, ταχείας πήξης για τοποθέτηση πυρίμαχων πλίνθων, καθώς και για την κατασκευή και επισκευή στοιχείων ανθεκτικών στη θερμότητα

Με βάση τις εθνικές τεχνικές προδιαγραφές ΠΕΤΕΠ 03-03-01-00 :

Τα επιχρίσματα διαστρώνονται πάντοτε από επάνω προς τα κάτω, αφού έχουν προστατευτεί με φύλλα οικοδομικού χαρτιού, πολυαιθυλενίου ή ειδικές αφαιρούμενες επαλείψεις τα οικοδομικά στοιχεία που δεν προβλέπεται να επιχριστούν.

Πριν από την έναρξη των εργασιών επιλέγονται τα σημεία «αρμών εργασίας» και η διάστρωση των επιχρισμάτων θα εκτελείται με αυτό το δεδομένο, ώστε οι αρμοί εργασίας να μην γίνονται αντιληπτοί στα τελειωμένα επιχρίσματα.

Στην πρώτη φάση το εκτοξευόμενο κονίαμα σε λεπτό στρώμα καλύπτει όλη την επιφάνεια και πιέζεται εντός της τραχειάς επιφάνειας της δεύτερης στρώσης.

Μόλις αρχίσει να τραβάει και να συνδέεται με την δεύτερη στρώση, ακολουθεί η δεύτερη φάση:

Πεταχτή , ώστε να αποδώσει ομοιόμορφη και χωρίς τρεξίματα τραχειά επιφάνεια (πεταχτό). Ανάλογα με το ανάγλυφο που έχει αποφασιστεί θα επιλέγεται και το μέγεθος των κόκκων του αδρανούς. Δείγμα εργασίας είναι απαραίτητο.

(Ι. Βάγιας, Ι. Ερμόπουλος, Γ. Ιωαννίδης, «Χαλύβδινες Κατασκευές, Παραδείγματα εφαρμογής του Ευρωκώδικα 3», Τόμος Ι, εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2008.)



Εικόνα 11. Εφαρμογή εκτοξευόμενου επιχρίσματος

Ενδεικτική τιμή μονάδος εκτοξευόμενου επιχρίσματος, το υλικό και η εργασία, 110,00 € / m²

5.3. Διογκούμενες βαφές

Τα διογκούμενα χρώματα (intumescent coatings) έχουν χημική σύνθεση τέτοια που τους δίνει τη δυνατότητα να διογκώνονται σε υψηλή θερμοκρασία, παράγοντας ένα προστατευτικό αφρό πάχους πενήντα ή και περισσότερες φορές το πάχος τους αρχικά διαστρωμένου χρώματος. Από την παραπάνω ιδιότητά τους προκύπτει ότι η κατασκευή τέτοιων χρωμάτων είναι μία σύνθετη διαδικασία που απαιτεί ειδική τεχνολογική γνώση.

Παρ' ότι από παραγωγό σε παραγωγό διογκούμενου χρώματος η χημική σύνθεση παραλλάσσει, μία τυπική σύνθεση περιλαμβάνει τα εξής:

α) Μία χημική ένωση που διασπώμενη παράγει ένα οξύ, συνήθως φωσφορικό οξύ. Η διάσπαση αυτή γίνεται στους 200 °C περίπου.

β) Μία καρβονική ένωση (από την οποία τελικά θα προκύψει ο άνθρακας) η οποία αντιδρά με το οξύ, όταν η θερμοκρασία του χρώματος φτάνει τους 240 °C, οπότε παράγεται εστέρας και νερό.

Σε θερμοκρασία περίπου 360 °C ο εστέρας διασπάται οπότε παράγεται κυρίως ο άνθρακας, ο οποίος μας ενδιαφέρει, και δευτερευόντως νερό και φωσφορικό οξύ.

γ) Ένα διογκωτικό μέσο (συνήθως μελαμίνη) το οποίο σε υψηλή θερμοκρασία παράγει μη αναφλέξιμα αέρια.

δ) Στο τελικό στάδιο ο άνθρακας με τα αέρια παράγει έναν καρβονικό αφρό που διαδραματίζει το ρόλο ενός μονωτικού υλικού προστασίας.

Ανάλογα με τον απαιτούμενο δείκτη πυραντίστασης, το συντελεστή διατομής του μέλους και το βαθμό αξιοποίησής του στον τυχηματικό συνδυασμό πυρκαγιάς προκύπτει το απαιτούμενο πάχος της αρχικής στρώσεως πυροπροστασίας το οποίο συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 400 και 1200 μ. Το χρώμα είναι κατά κανόνα εκτοξευόμενο και εφαρμόζεται γενικά σε μία στρώση. Το απαιτούμενο πάχος στρώσης μετρείται πάντοτε ξηρό δεδομένου ότι μεταξύ νωπής (υγρής) και στερεοποιημένης στρώσης υπάρχει διαφορά έως και 30 %.

Της στρώσεως πυροπροστασίας προηγείται η εφαρμογή στον χάλυβα (μετά την αμμοβολή) συμβατής αρχικής στρώσεως (primer). Η βαφή πυροπροστασίας δέχεται εν συνεχεία, συμβατές επίσης, τελικές προστατευτικές στρώσεις (συνήθως δύο στρώσεις των 50 mm) που δίνουν επιπλέον και την τελική απόχρωση στο φέροντα οργανισμό. Η βαφή πυροπροστασίας έχει πάντοτε λευκό χρώμα.

(Ι. Βάγιας, Ι. Ερμόπουλος, Γ. Ιωαννίδης, «Σχεδιασμός Δομικών Έργων Από Χάλυβα, Με βάση τα τελικά κείμενα των Ευρωκωδίκων», εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2011)

Ενδεικτική τιμή μονάδος διογκούμενης βαφής, το υλικό και η εργασία, 20,00 € - 25,00 € / m²



Εικόνα 12: Εφαρμογή χρώματος πυροπροστασίας σε μεταλλικό στοιχείο



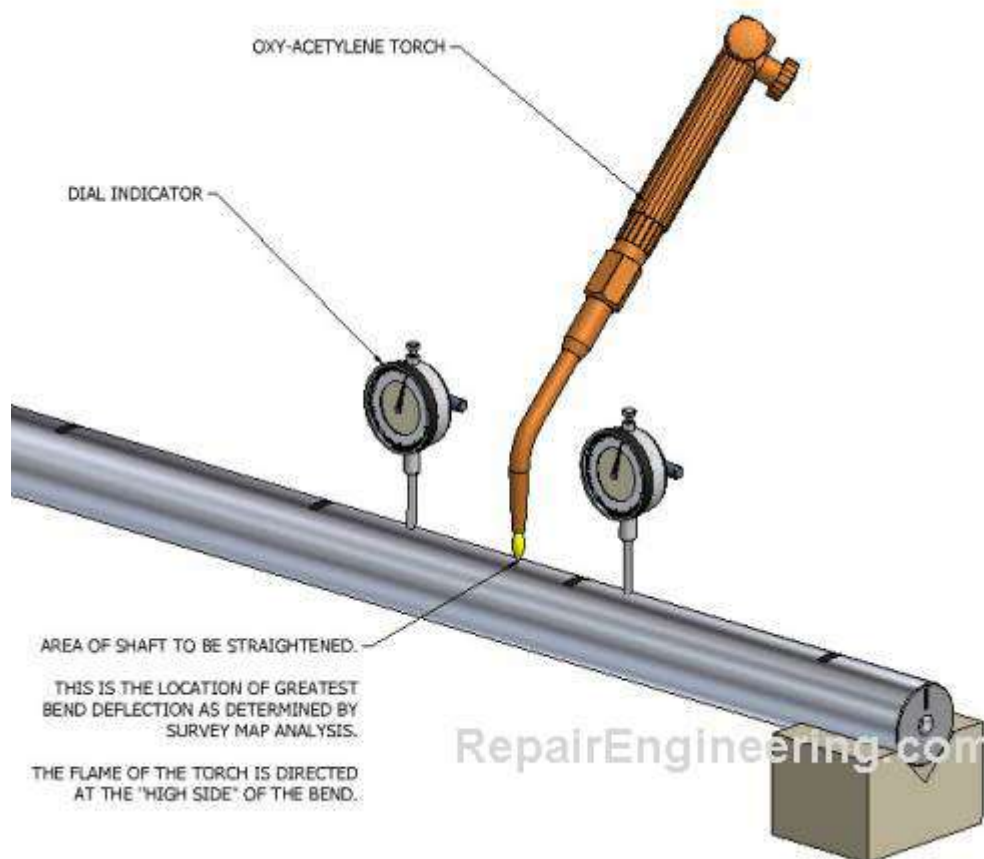
Εικόνα 13: Εφαρμογή χρώματος πυροπροστασίας σε μεταλλική στέγη

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

ΠΥΡΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΚΑΙ ΕΠΙΣΚΕΥΕΣ – ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

Με βάση τον Ευρωκώδικα 4 όλα τα στοιχεία στα κτίρια πρέπει να διαθέτουν πυραντίσταση, η οποία καθορίζεται είτε μέσω πρότυπων εφαρμογών πυραντίστασης είτε με υπολογισμούς που καθορίζονται από τον Ευρωκώδικα. Έτσι οι μεταλλικές δοκοί και στύλοι μονώνονται συνήθως με πυράντοχες σανίδες και διογκούμενο χρώμα. Πρέπει να ικανοποιούνται τρία κριτήρια των αρχών σχεδιασμού με βάση τον Ευρωκώδικα 4. Πρώτον, το κριτήριο της φέρουσας ικανότητας, μέσω του οποίου εξασφαλίζεται η αντοχή και η ευστάθεια του δομικού μέλους για ένα ορισμένο χρόνο σε συνθήκες πυρκαγιάς. Δεύτερον, το κριτήριο της ακεραιότητας, το οποίο εάν ικανοποιείται δεν διαπερνάται από φλόγες και καπνούς. Και τρίτον, το κριτήριο της μονωτικής ικανότητας, μέσω του οποίου εξασφαλίζεται ότι η θερμοκρασία που θα αναπτυχθεί μετά την πάροδο ορισμένου χρόνου στο δομικό μέλος θα είναι μικρότερη από τη θερμοκρασία ανάφλεξης του. Ο έλεγχος της φέρουσας ικανότητας μπορεί να γίνει με τρεις διαφορετικούς τρόπους. Έλεγχος με βάση το χρόνο (κατά τον οποίο η τιμή σχεδιασμού του χρόνου πυραντίστασης πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τον απαιτούμενο χρόνο πυραντίστασης), έλεγχος με βάση την αντοχή (κατά τον οποίο η αντοχή σχεδιασμού στη θερμή κατάσταση πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τη δράση σχεδιασμού στη θερμή κατάσταση), έλεγχος με βάση τη θερμοκρασία (κατά τον οποίο η τιμή σχεδιασμού της θερμοκρασίας στην οποία το στοιχείο μπορεί να διατηρήσει τις αντοχές του, πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την τιμή σχεδιασμού της κρίσιμης θερμοκρασίας του στοιχείου).

Ένας τρόπος για να επισκευάσει κάποιος ένα μέλος από δομικό χάλυβα είναι να προσπαθήσει να μειώσει τις παραμορφώσεις με τη βοήθεια της θερμοκρασίας. Σύμφωνα με τον Martin Anderson, συντονιστή του AISC's Steel Solutions Center, μπορεί να γίνει «ίσιωμα» του μέλους μέσω της θερμοκρασίας σε συνδυασμό με τη παθητική αυτοσυγκράτηση του δομικού στοιχείου, όπου στην ουσία οι παραμορφώσεις που ήδη υπάρχουν εξουδετερώνονται από τις μόνιμες παραμορφώσεις που προκαλούνται από τη μέθοδο αυτή. Με τη μέθοδο αυτή, αντιδρούν οι λιγότερο θερμές περιοχές και προσπαθούν να εμποδίσουν την εξάπλωση δημιουργώντας πλαστικές παραμορφώσεις και έτσι αλλάζοντας το παραμορφωμένο σχήμα της δοκού. Απαιτεί συνετή χρήση της θερμοκρασίας και εφαρμόζεται σε μικρού μεγέθους παραμορφώσεις και κυρίως σε φαινόμενα λυγισμού.



Εικόνα 14. Spot Heat και Line Heat

Ένας άλλος τρόπος ενίσχυσης πραγματοποιείται με τη χρήση σύνθετων υλικών, γνωστά και ως ινοπλισμένα πολυμερή (FRP).

Τα σύνθετα υλικά είναι γνωστά σε μία σειρά πεδίων, όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροναυπηγική, η ναυσιπλοΐα και ορισμένες βιομηχανίες καταναλωτικών ειδών, παράδειγμα σπορ για τις εξαιρετικές μηχανικές τους ιδιότητες, το χαμηλό τους βάρος και την καλή ανθεκτικότητα σε περιβαλλοντικές επιδράσεις.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά είχαν ως αποτέλεσμα τη σταδιακή εισαγωγή των σύνθετων υλικών και στα έργα του πολιτικού μηχανικού, με κύριο πεδίο εφαρμογής τις επισκευές και ενισχύσεις, όπου τα υλικά εφαρμόζονται στις εξωτερικές επιφάνειες δομικών μελών μέσω επικόλλησης.

Η χρήση των σύνθετων υλικών για την επισκευή και ενίσχυση των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος, τοιχοποιίας, ξύλινων αλλά και μεταλλικών, έχει ανθίσει τόσο σε παγκόσμια κλίμακα όσο και στη χώρα μας. Η τεχνική των σύνθετων υλικών εξαπλώθηκε στην Ελλάδα ιδιαίτερα μετά το σεισμό των Αθηνών το 1999, ο οποίος

σηματοδότησε την έναρξη της ευρείας χρήσης τους για την ενίσχυση του φέροντος οργανισμού κτιρίων που υπέστησαν βλάβες.

Τα υλικά αυτά αποτελούνται από συνεχείς ίνες (συνήθως άνθρακα ή γυαλιού ή αραμιδίου) και έχουν εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες, όπως είναι η ανθεκτικότητα σε διάβρωση, το χαμηλό βάρος (περίπου 1/4 - 1/5 του χάλυβα), η εξαιρετικά υψηλή εφελκυστική αντοχή (πολλαπλάσια του κοινού χάλυβα), η διαθεσιμότητα των υλικών σε πολύ μεγάλα μήκη, η μεγάλη 'ευκαμψία' τους και η υψηλή ανθεκτικότητα σε εξωτερικές περιβαλλοντικές επιδράσεις, με αποτέλεσμα η αντίστοιχη τεχνική ενίσχυσης να χαρακτηρίζεται από εξαιρετική ευκολία και ταχύτητα εφαρμογής, ακόμα και σε δύσκολα προσβάσιμα τμήματα κατασκευών. Μειονεκτήματα τους είναι η πτωχή συμπεριφορά σε υψηλές θερμοκρασίες, το σχετικά υψηλό κόστος και η έλλειψη πλαστιμότητας.

Τα υλικά αυτά εφαρμόζονται στην εξωτερική επιφάνεια των μεταλλικών δομικών μελών μέσω επικόλλησης με χρήση εποξειδικής ρητίνης ως συνδετικό υλικό. Οι ίνες τους παραλαμβάνουν εφελκυστικές δυνάμεις, παράλληλα στον άξονά τους, και έχουν εξαιρετικά υψηλή εφελκυστική αντοχή και γραμμικά ελαστική συμπεριφορά μέχρι τη θραύση τους. Ένα βασικό μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι η εποξειδική ρητίνη δεν παρουσιάζει καλή συμπεριφορά στις υψηλές θερμοκρασίες με αποτέλεσμα να χάνεται η συνεργασία της διεπιφάνειας. Για αυτό το λόγο, το είδος του υλικού που παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά σαν συνδετική ύλη, προέκυψε ότι είναι το micro-cement, το οποίο διαθέτει επαρκείς μηχανικές ιδιότητες για μεταφορά φορτίων, επιτρέπει τη σωστή συνοχή και διείσδυση των ινωδών υφασμάτων, αποτελεί ένα καλό υπόστρωμα για πυραντίσταση και είναι οικολογικά αποδεκτό.

(Αθανάσιος Χ. Τριανταφύλλου, «Ενισχύσεις Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος Με Σύνθετα Υλικά (Ινοπλισμένα Πολυμερή)», εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2004, 2η έκδοση.)



Εικόνα 15. Εφαρμογή ινοπλισμένων πολυμερών

Παρακάτω γίνεται μία συνοπτική παρουσίαση της ανθεκτικότητας των συστημάτων ενίσχυσης συνθέτων υλικών υπό την επίδραση των εξής παραγόντων:

- Υψηλές θερμοκρασίες
- Υγρασία
- Υπεριώδης ακτινοβολία
- Αλκαλικό και όξινο περιβάλλον
- Γαλβανική διάβρωση
- Ερπυσμός, θραύση υπό τάση, διάβρωση υπό τάση
- Κόπωση
- Κρούση

Θερμοκρασιακές επιδράσεις

Σχετικά υψηλές θερμοκρασίες, της τάξης των 50-80 °C, μειώνουν σημαντικά την ικανότητα ανάλιψης δυνάμεων στις ρητίνες (μήτρα συνθέτων υλικών, κόλλα στη διεπιφάνεια συνθέτων υλικών – υποστρώματος). Ακόμα υψηλότερες θερμοκρασίες, όπως αυτές κατά τη διάρκεια πυρκαγιάς, προκαλούν πλήρη αποσύνθεση των ρητινών (πολλές από τις οποίες κατά την καύση τους εκλύουν τοξικά αέρια) και επομένως τα σύνθετα υλικά δεν μπορούν να φέρουν τάσεις. Οι θερμοκρασίες «αποσύνθεσης» των ινών είναι 1000 °C για το γυαλί, 650 °C για τον άνθρακα και 200 °C για το αραμίδιο. Πειραματικά αποτελέσματα έχουν δείξει ότι μανδύες συνθέτων υλικών με ίνες άνθρακα σε εποξειδική μήτρα υφίστανται απώλεια αντοχής για θερμοκρασίες πάνω από περίπου 260 °C. Έτσι, κατά τη διάρκεια ανάπτυξης υψηλών θερμοκρασιών (αλλά και μετά) το σύστημα ενίσχυσης θα πρέπει να θεωρείται ανενεργό, εκτός αν φέρει πυροπροστασία. Η τελευταία είναι εφικτή σε σημαντικό βαθμό μέσω επικάλυψης των συνθέτων υλικών είτε με ειδικά επιχρίσματα (ή κοινά επιχρίσματα μεγάλου πάχους, της τάξης των 40-50 mm, σύμφωνα με τις Ιαπωνικές Συστάσεις JSCE 2001) είτε με ειδικά προστατευτικά (π.χ. τύπου γυψοσανίδας μεγάλου πάχους).

Υγρασία

Γενικά τα σύνθετα υλικά έχουν πολύ καλή συμπεριφορά σε συνθήκες υγρασίας. Σε ορισμένες περιπτώσεις όμως και μετά από μακροχρόνια δράση του νερού (ή ρευστών, γενικότερα), κάποιοι συνδυασμοί ινών-ρητίνης ενδέχεται να παρουσιάσουν προβλήματα. Οι ρητίνες απορροφούν μικρές ποσότητες νερού, οι οποίες μειώνουν ελαφρά την αντοχή τους καθώς και τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης. Αυτές

βέβαια που χρησιμοποιούνται συνήθως για την επικόλληση συνθέτων υλικών (καλής ποιότητας εποξειδικές ρητίνες) έχουν γενικά εξαιρετική ανθεκτικότητα στην υγρασία (Blaschko et al. 1998). Από τις ίνες, παρουσία υγρασίας το γυαλί υφίσταται μικρή μείωση αντοχής (λόγω απομάκρυνσης ιόντων από την επιφάνεια των ινών) και το αραμίδιο, το οποίο μπορεί να απορροφήσει υγρασία μέχρι και 13% κ.β., αρκετά μεγαλύτερη. Οι ίνες άνθρακα είναι πρακτικά απρόσβλητες.

Εδώ αξίζει να επισημάνουμε ότι η πλήρης κάλυψη στοιχείων σκυροδέματος με μανδύες συνθέτων υλικών δημιουργεί στεγανές (σε νερό και αέρα) εξωτερικές επιφάνειες με αποτέλεσμα την προστασία του μέλους από δυσμενείς περιβαλλοντικούς παράγοντες (π.χ. χλωριόντα, δράση χημικών). Τούτο, σε στοιχεία τα οποία είτε παρουσιάζουν έντονη διάβρωση είτε εκτίθενται σε διαβρωτικό περιβάλλον, είναι ιδιαίτερα ευνοϊκό, διότι ο ρυθμός διάβρωσης μειώνεται δραστικά. Τονίζεται ότι σε στοιχεία τα οποία θα πρέπει να «αναπνέουν» (να είναι δηλαδή σχετικά εύκολα διαπερατά) ένας καθολικός μανδύας (ο οποίος ενδέχεται μάλιστα να εγκλωβίσει την υγρασία) θα πρέπει να αποφεύγεται.

Υπεριώδης ακτινοβολία

Η υπεριώδης ακτινοβολία του ηλίου (UV) επιφέρει αλλοίωση της ισχύος των δεσμών και γενικά μείωση της αντοχής στα πολυμερή (μήτρα συνθέτων υλικών) που εκτίθενται σε αυτή. Φαινομενικά, το αποτέλεσμα της επίδρασης της υπεριώδους ακτινοβολίας είναι η χρωματική αλλοίωση και μικρορηγματώση των εκτιθέμενων επιφανειών. Για την περίπτωση των συνθέτων υλικών η υπεριώδης ακτινοβολία επηρεάζει κάπως την επιφανειακή στρώση ρητίνης, επιφέροντας χρωματική αλλοίωση και ενδεχομένως μικρή μείωση της αντοχής της, όχι όμως και τις ίνες (εξαιρέση αποτελούν οι ίνες αραμιδίου, οι οποίες είναι ελαφρώς ευπαθείς, Ahmad and Plecnik 1989). Ως μέθοδος προστασίας στην περίπτωση απευθείας έκθεσης στον ήλιο επί μακρόν προτείνεται η εφαρμογή επιχρισμάτων ή ειδικών αντι-UV (ακρυλικής ή πολυουρεθανικής σύστασης) βαφών ανοικτού χρώματος (π.χ. γκρί ανοικτό).

Αλκαλικό και όξινο περιβάλλον

Γενικά, τόσο το αλκαλικό περιβάλλον όσο και το όξινο δεν έχουν δυσμενείς επιδράσεις σε σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα. Οι ίνες γυαλιού είναι όμως αρκετά ευπαθείς (υφίστανται μείωση αντοχής), ενώ οι ίνες αραμιδίου έχουν ενδιάμεση συμπεριφορά. Προστασία σε ευπαθείς ίνες μπορεί παρέχεται από την μήτρα (ρητίνη), υπό την προϋπόθεση βέβαια ότι αυτή τις απομονώνει από το αλκαλικό ή το όξινο περιβάλλον.

Γαλβανική διάβρωση

Η επαφή των ινών άνθρακα με χάλυβα θα πρέπει να αποφεύγεται, διότι ο τελευταίος θα υποστεί γαλβανική διάβρωση. Τέτοιο πρόβλημα δεν υφίσταται όταν χρησιμοποιούνται ίνες γυαλιού ή αραμιδίου.

Ερπυσμός, θραύση υπό τάση, διάβρωση υπό τάση

Γενικά οι ερπυστικές παραμορφώσεις (αυτές δηλαδή που αναπτύσσονται με το χρόνο υπό σταθερή τάση) συνθέτων υλικών τα οποία φορτίζονται κυρίως παράλληλα στις ίνες είναι μικρές. Για υλικά με ίνες άνθρακα είναι πρακτικά μηδενικές, για ίνες γυαλιού πολύ μικρές (αμελητέες), ενώ για ίνες αραμιδίου κάπως μεγαλύτερες. Δεδομένου όμως ότι σε περιπτώσεις ενισχύσεων συνήθως (α) τα σύνθετα υλικά ευρίσκονται υπό τάση μόνο για τα πρόσθετα φορτία (πλέον του ιδίου βάρους) και (β) το σκυρόδεμα δεν είναι «μικρής ηλικίας», οπότε έχει αναπτύξει το μεγαλύτερο τμήμα των ερπυστικών παραμορφώσεων, ο ερπυσμός σπανίως αποτελεί φαινόμενο προς εξέταση.

Μία αξιοσημείωτη πάντως παρατήρηση είναι η εξαιρετικά πτωχή συμπεριφορά των συνθέτων υλικών με ίνες γυαλιού υπό τάση. Οι τελευταίες μπορεί να αστοχήσουν όταν βρίσκονται υπό μόνιμη τάση, ακόμα και αν αυτή είναι εξαιρετικά χαμηλή (π.χ. 20% της εφελκυστικής αντοχής). Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται *θραύση υπό τάση* (stress rupture).

Το φαινόμενο της *διάβρωσης υπό τάση* (stress corrosion) αφορά στην μείωση της αντοχής των συνθέτων υλικών λόγω της συνδυασμένης δράσης εφελκυστικών τάσεων και διαβρωτικού (π.χ. όξινου ή αλκαλικού) περιβάλλοντος (το οποίο όμως, απουσία τάσεων, δεν θα είχε ως αποτέλεσμα την μείωση της αντοχής). Γενικά τα σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα δεν έχουν πρόβλημα διάβρωσης υπό τάση ακόμα και αν η τάση φθάνει στο 80% της εφελκυστικής αντοχής. Οι ίνες γυαλιού όμως είναι εξαιρετικά ευπαθείς (ειδικά όταν συνδυάζονται με ρητίνες όχι τόσο καλές όσο οι εποξειδικές) ενώ οι ίνες αραμιδίου δείχνουν ενδιαμέση συμπεριφορά.

Συμπερασματικά, όταν τα σύνθετα υλικά φέρουν μόνιμα φορτία, η βέλτιστη επιλογή υλικού ινών είναι ο άνθρακας (σε συνδυασμό με εποξειδική ρητίνη).

Κόπωση

Γενικά, η συμπεριφορά των συνθέτων υλικών σε κόπωση (δράση μεγάλου αριθμού κύκλων επαναλαμβανόμενης φόρτισης) είναι πολύ καλή. Ειδικά για υλικά με ίνες άνθρακα η διεθνής βιβλιογραφία (π.χ. Kaiser 1989, Deuring 1993, Barnes and Mays 1999) καταδεικνύει ότι η αντοχή σε κόπωση είναι μεγαλύτερη από αυτή του χάλυβα οπλισμού: σε περιπτώσεις καμπτικής ενίσχυσης δοκών με υλικά ινών άνθρακα υπό επαναλαμβανόμενη φόρτιση πρώτα παρατηρήθηκαν αστοχίες λόγω κόπωσης στον εφελκόμενο χάλυβα και σε καμία περίπτωση στους εξωτερικούς οπλισμούς ενίσχυσης.

Κρούση

Σε ότι αφορά στην επίδραση της κρούσης (π.χ. λόγω πρόσκρουσης οχήματος σε υποστύλωμα γέφυρας ενισχυμένο με μανδύα συνθέτων υλικών) στην εναπομένονσα αντοχή των συνθέτων υλικών, καλύτερη συμπεριφορά δίνουν τα υλικά με ίνες αραμιδίου (δεν είναι τυχαίο άλλωστε ότι αυτές χρησιμοποιούνται για την κατασκευή αλεξίσφαιρων γιλέκων!), ακολουθούν αυτά με ίνες γυαλιού και τέλος αυτά με ίνες άνθρακα.

Αξιολόγηση τύπου ινών

Ένα ερώτημα το οποίο τίθεται συχνά στην πράξη από τους μηχανικούς – μελετητές ενισχύσεων με σύνθετα υλικά αφορά στην επιλογή του πλέον κατάλληλου για κάθε περίπτωση τύπου ινών. Όπως φάνηκε σε προηγούμενα κεφάλαια, η παράμετρος που καθορίζει τον σχεδιασμό μίας επέμβασης σε πολλές περιπτώσεις (π.χ. ενίσχυση σε κάμψη, ενίσχυση σε τέμνουσα, περίσφιγξη με στόχο αύξηση της θλιπτικής αντοχής, περίσφιγξη στις κρίσιμες περιοχές υποστυλωμάτων με στόχο την αποτροπή λυγισμού των διαμήκων ράβδων) είναι η «δυστένεια» του υλικού, δηλαδή το γινόμενο $E_f t_f$ (μέτρο ελαστικότητας επί συνολικό πάχος). Έτσι, ένα πρώτο κριτήριο επιλογής υλικού ινών θα μπορούσε να αποτελέσει το κόστος για δεδομένη δυστένεια.

(Ι. Βάγιας, Ι. Ερμόπουλος, Γ. Ιωαννίδης, «Σχεδιασμός Δομικών Έργων Από Χάλυβα, Με βάση τα τελικά κείμενα των Ευρωκωδίκων», εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2011.)

Κριτήριο	Ίνες Άνθρακα	Ίνες Γυαλιού	Ίνες Αραμιδίου
Υψηλές θερμοκρασίες	+	-	-
Υγρασία	+	-	-
Υπεριώδης ακτινοβολία	++	+	-
Αλκαλικό και όξινο περιβάλλον	++	--	+
Γαλβανική διάβρωση	--	+	+
Ερπυσμός	++	--	-
Θραύση υπό τάση, διάβρωση υπό τάση	++	--	+
Κόπωση	++	-	+
Κρούση	-	+	++

Πίνακας 2. Αξιολόγηση ινών με βάση την ανθεκτικότητα

Στους παραπάνω συλλογισμούς όμως θα πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη και άλλες παράμετροι, όπως είναι το κόστος εργατικών (αυξάνεται με τον αριθμό στρώσεων), η αποδοτικότητα των πολλαπλών στρώσεων (δεν είναι ανάλογη του αριθμού των στρώσεων), η δυσκολία εμποτισμού στρώσεων μεγάλου πάχους και, φυσικά, η ανθεκτικότητα του συστήματος σε διάρκεια. Σε ότι αφορά στον τελευταίο παράγοντα, τα σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα είναι αυτά που έχουν την καλύτερη συμπεριφορά, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 1.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7ο

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

Σχεδιασμός θλιβόμενου στοιχείου έναντι πυρκαγιάς

Συνεχές καθ' ύψος υποστήλωμα διατομής HEA 240, από χάλυβα ποιότητας S275 ανήκει στον ανώτερο όροφο, ύψους 4,00m, πολυόροφου κτιρίου γραφείων και καταπονείται από μόνιμο φορτίο $N_g=420\text{kN}$ και κινητό $N_p=250\text{kN}$. Τα μεταλλικά υποστηλώματα του κτιρίου έχουν αμετάθετα άκρα και μεταφέρουν μόνο αξονικές δυνάμεις, προστατεύονται δε έναντι πυρκαγιάς από μονωτικές πλάκες με λόγο πάχους d (σε m) προς συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ (σε W/mK), $d/\lambda=0,10$. Ζητείται εάν η προστασία αυτή εξασφαλίζει δείκτη πυραντίστασης 60min.

1. Έλεγχος υποστηλώματος σε συνθήκες συνθήκες

Το υποστήλωμα θεωρείται ως αμφιαρθρωτό με λυγηρότητα.

$$\lambda=400/5,87=68,14$$

Ανηγμένη λυγηρότητα:

$$\bar{\lambda} = \lambda / \pi \sqrt{E / f_y} = 68,14 / \pi * \sqrt{21000 / 27,5} = 0,785$$

Μειωτικός συντελεστής (μέσω της καμπύλης λυγισμού c)

$$\chi=0,69$$

Αντοχή σε θλίψη:

$$N_{b, Rd} = \chi * A * f_y / \gamma_{M1} = 0,69 * 1 * 76,8 * 27,5 / 1 = 1.457\text{kN} \text{ κατηγορία 1}$$

Θλιπτικό φορτίο σχεδιαμού:

$$N_{Ed} = 1,35 * 420 + 1,5 * 250 = 567 + 375 = 942\text{kN}$$

Έλεγχος επάρκειας: $N_{Ed} = 942\text{kN} < N_{b, Rd} = 1.457\text{kN}$

2. Έλεγχος έναντι πυρκαγιάς

Θλιπτικό φορτίο σε συνθήκες πυρκαγιάς:

$$N_{fi, Sd} = \gamma_{G, A} N_g + \psi_{11} N_p = 1 * 420 + 0,5 * 250 = 545\text{kN}$$

Η τιμή $\psi_{11}=0,5$, ελήφθη από το EN1990.

Το μήκος λυγισμού για περίπτωση αμετάθετου πλαισίου και υποστύλωμα του ανώτερου ορόφου, λαμβάνεται ίσο προς

$$l_{fi} = 0,70L = 0,70 \cdot 400 = 280 \text{ cm}$$

(οπότε $\lambda = 280/5,87 = 47,7$ και $\bar{\lambda} = \lambda / \pi \sqrt{E / f_y} = 47,7 / \pi \cdot \sqrt{21000 / 27,5} = 0,55$)

Λόγω της πακτώσεως που προσφέρει το δύσκαμπτο ψυχρό υποστύλωμα του κατώτερου ορόφου. Ο έλεγχος θα γίνει σε όρους αντοχής, θα εξεταστεί εάν η αντοχή του υποστυλώματος μετά 60min από την έναρξη της πυρκαγιάς είναι μεγαλύτερη από τη δράση $N_{fi, sd} = 545 \text{ kN}$

Συντελεστής διατομής

$$A_p / V = 2 \cdot (23 + 24) \cdot 100 / 76,8 = 122 \text{ m}^{-1}$$

Θα χρησιμοποιηθεί η πρότυπη καμπύλη ISO θερμοκρασίας-χρόνου και ο σχετικός πίνακας που δίνει για χαρακτηριστικά μόνωσης με $d/\lambda = 0,10$ και διάφορες τιμές του συντελεστή διατομής, τη θερμοκρασία του χάλυβα συναρτήσει του χρόνου. Απο τον πίνακα αυτόν προκύπτει ότι η θερμοκρασία του χάλυβα τη χρονική στιγμή $t = 60 \text{ min}$ είναι $\theta_a = 493^\circ \text{C}$

Κατάταξη της διατομής

Τάση διαρροής του υλικού στη θερμοκρασία $\theta_a = 493^\circ \text{C}$

Είναι $k_{y, \theta} = 0,79$ και

$$f_{y, \theta} = k_{y, \theta} \cdot f_y = 0,79 \cdot 27,5 = 21,7 \text{ kN/cm}^2$$

$$\varepsilon = 0,85 \cdot \sqrt{235 / f_y} = 0,78$$

Κατάταξη κορμού

$$d/t_w = 164/7,5 = 21,8 < 33 \cdot 0,78 = 26 \text{ κατηγορία 1}$$

Κατάταξη πέλματος

$$c/t_f = [110 - (7/2) - 18] / 12 = 7,3 < 10 \cdot \varepsilon = 7,8, \text{ κατηγορία 2}$$

Ανηγμένη λυγηρότητα:

Για $\theta_a = 493^\circ \text{C}$ είναι $k_{y, \theta} = 0,79$ και $k_{E, \theta} = 0,607$

$$\bar{\lambda}_{\theta, \max} = \bar{\lambda} \sqrt{[k_{y, \theta, \max} / k_{E, \theta, \max}]} = 0,55 \cdot (0,79/0,607)^{0,5} = 0,62$$

Η αντοχή σε θλίψη λαμβάνεται από τη σχέση

$$N_{b, fi, t, Rd} = \chi_{fi} A k_{y, \theta} f_y / \gamma_{M, fi}, \text{ όπου}$$

$$x_{fi} = [\phi_{\theta} + (\phi_{\theta}^2 - \bar{\lambda}_{\theta}^2)^{1/2}]^{-1}, \text{ με}$$

$$\phi_{\theta} = (1/2) * (1 + \alpha * \bar{\lambda}_{\theta} + \bar{\lambda}_{\theta}^2) \text{ και } \alpha = 0,65 * (235/f_y)^{1/2}$$

Είναι

$$\alpha = 0,6 \text{ και } \phi_{\theta} = (1/2) * (1 + 0,6 * 0,62 + 0,62^2) = 0,87, \text{ οπότε}$$

$$x_{fi} = [0,87 + (0,87^2 - 0,62^2)^{1/2}]^{-1} = 0,675 \text{ και}$$

$$N_{b,fi,t,Rd} = 0,675 * 76,8 * 0,79 * 27,5 / 1 = 1.126 \text{ kN}$$

Οι διατιθέμενες συνθήκες μόνωσης είναι επαρκείς επειδή

$$N_{fi,Ed} = 545 \text{ kN} < N_{b,fi,t,Rd} = 1.126 \text{ kN}$$

Σχεδιασμός δοκού υπό θλίψη και κάμψη έναντι πυρκαγιάς

Να εξετασθεί εάν η αμφιέριστη δοκός μήκους $l=10\text{m}$, από διατομή IPE 550 και χάλυβα ποιότητας S275, με απλές στρεπτικές (διχαλωτές) στηρίξεις στα άκρα της και χωρίς ενδιάμεση πλευρική προστασία, μπορεί να αναλάβει σε θερμοκρασία 550°C ομοιόμορφα διανεμημένο φορτίο σχεδιασμού $q_{fi,Ed}=30\text{kN/m}$ και ταυτόχρονα θλιπτικό φορτίο $N_{fi,Ed}=150\text{kN}$.

1. Γενικά

Η δοκός θα ελεγχθεί έναντι λυγισμού (καμπτικού ή στρεπτοκαμπτικού) στη θερμοκρασία 550°C για δρώντα εντατικά μεγέθη:

$$M_{y,fi,Ed} = (1/8) * q_{fi,Ed} * l^2 = (1/8) * 30 * 10^2 = 375 \text{ kNm} \text{ και}$$

$$N_{fi,Ed} = 150 \text{ kN}$$

2. Κατάταξη διατομής

$$\varepsilon = 0,85 * (235/275)^{0,5} = 0,785$$

Κατάταξη πέλματος

$$c/t_f = [110 - (1/2) * 11,1 - 24] / 17,2 = 4,67 \text{ κατηγορία 1}$$

Κατάταξη κορμού

Με την υπόθεση ότι η διατομή μπορεί να πλαστικοποιηθεί (να καταγεί στην κατηγορία 1 ή 2) και λαμβάνοντας υπόψη ότι για $\theta=550^{\circ}\text{C}$, $k_{y,\theta}=0,625$ και $f_{y,\theta}=0,625*27,5=17,18\text{kN/cm}^2$ προκύπτει ότι η δρώσα αξονική δύναμη πλατικοποιεί κεντρική περιοχή του κορμού ύψους $2e=78,6\text{mm}$ και ότι το θλιβόμενο τμήμα του κορμού αντιστοιχεί σε ποσοστό 50% του συνόλου.

Πράγματι:

$$N_{fi,Ed}=2*e*t_w*(k_{y,\theta}*f_y) \text{ , άρα}$$

$$150=2*e*1,11*0,625*27,5 \text{ και } e=3,93\text{cm}$$

Καθαρό ύψος κορμού της διατομής $d=467,6\text{mm}$. Ποσοστό του κορμού που βρίσκεται υπό θλίψη.

$$[(1/2)d+e]/d=50\% \text{ άρα } \alpha=0,50$$

Οπότε για την κατάταξη του κορμού

$$d/t_w=467,6/11,1=42,12 < 396*\epsilon/(13\alpha-1)=56,52$$

Επομένως τόσο ο κορμός όσο και η διατομή συνολικά κατατάσσονται στην κατηγορία 1. Ο έλεγχος επάρκειας θα γίνει επομένως με βάση τις σχέσεις 4.21a και 4.21b του EN 1993/1.2

3. Λυγηρότητες και βοηθητικοί συντελεστές

Οι σχέσεις ελέγχου είναι:

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{\min,fi} * A * k_{y,\theta} * f_y / \gamma_{Mfi}} + \frac{k_y * M_{y,fi,Ed}}{W_{pl,y} * k_{y,\theta} * f_y / \gamma_{M,fi}} \leq 1$$

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} * A * k_{y,\theta} * f_y / \gamma_{Mfi}} + \frac{k_{LT} * M_{y,fi,Ed}}{\chi_{LT,fi} * W_{pl,y} * k_{y,\theta} * f_y / \gamma_{M,fi}} \leq 1$$

Μειωτικός συντελεστής $\chi_{y,fi}$ για καμπτικό λυγισμό περί τον ισχυρό άξονα αδρανείας y

$$\text{Για } \theta=550^{\circ}\text{C}, k_{y,\theta}=0,625, k_E,\theta=0,455$$

$$\lambda_y=800/22,35=35,8, \lambda_1=\pi*(E/f_y)^{0,5}=86,77, \bar{\lambda}_y = 0,43$$

$$\bar{\lambda}_{y,\theta} = 0,43*(0,625/0,455)^{0,5}=0,504$$

$$a=0,65*(235/275)^{0,5}=0,6$$

$$\phi_{y,\theta}=(1/2)*(1+a*\bar{\lambda}_{\theta} + \bar{\lambda}_{\theta}^2)=0,77$$

$$\chi_{y,fi}=1/[\phi_{\theta}+(\phi_{\theta}^2-\bar{\lambda}_{\theta}^2)^{0,5}]=0,74$$

Αντιστοίχως ο μειωτικός συντελεστής $\chi_{z,fi}$ για καμπτικό λυγισμό περί τον ασθενή άξονα αδρανείας z:

$$\lambda_z = 800/4,45 = 179, \quad \bar{\lambda}_z = 179 / 76,4 = 2,34$$

$$\bar{\lambda}_{z,\theta} = 2,34 * (0,625/0,455)^{0,5} = 2,74$$

$$\Phi_{z,\theta} = (1/2) * (1 + 0,6 + 2,74 + 2,74^2) = 5,9$$

$$\chi_{z,fi} = 1 / [5,9 + (5,9^2 - 2,74^2)^{0,5}] = 0,089 \text{ και}$$

$$\chi_{\min,fi} = 0,089$$

Βοηθητικοί συντελεστές β_M, μ_y, k_y :

$$\text{Είναι } \beta_{M,\gamma} = 1,30$$

$$\mu_y = (2 \beta_{M,\gamma} - 5) * \bar{\lambda}_{y,\theta} + 0,44 * \beta_{M,\gamma} + 0,29 = (2 * 1,3 + 5) * 0,504 + 0,44 * 1,3 = -0,348 < 0,8$$

$$k_y = 1 - \frac{\mu_y * N_{fi,Ed}}{\chi_{y,fi} * A * k_{y,\theta} * f_y / \gamma_{M,fi}} = 1 + (0,348 * 150) / (0,74 * 134 * 0,625 * 27,5 / 1) = 1 + 52,2 / 1.704,31 = 1,03$$

Μειωτικός συντελεστής $\chi_{LT,fi}$ έναντι στρεπτοκαμπτικού λυγισμού:

Με την υπόθεση ότι η θερμοκρασία είναι ενιαία σε ολόκληρη τη διατομή (διαφορετικά ο υπολογισμός γίνεται με τη θερμοκρασία του θλιβόμενου πέλματος), η κρίσιμη ροπή στρεπτοκαμπτικού λυγισμού (χωρίς παρουσία αξονικής θλιπτικής δύναμης) είναι:

$$M_{cr} = C_1 * [\pi^2 * E * I_z / (KL)^2] * [(k/k_w)^2 * (I_w/I_z) + (KL)^2 * G * I_t / (\pi^2 * E * I_z)]^{0,5} = 58.832 \text{ kNcm}$$

Οπότε

$$\bar{\lambda}_{LT} = (2787 * 27,5 / 58832)^{0,5} = 1,14$$

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta} = \bar{\lambda}_{LT} (k_{y,\theta} / k_{E,\theta})^{0,5} = 1,14 * (0,625/0,455)^{0,5} = 1,33$$

$$\varphi_{LT,\theta} = (1/2) * (1 + a * \bar{\lambda}_{LT,\theta} + \bar{\lambda}_{LT,\theta}^2) = (1/2) * (1 + 0,50 * 1,33 + 1,33^2) = 1,71 \text{ και}$$

$$\chi_{LT,\theta} = 1 / [1,71 + (1,71^2 - 1,33^2)^{1/2}] = 0,36$$

Βοηθητικοί συντελεστές μ_{LT}, k_{LT}

$$\mu_{LT} = 0,15 * 2,74 * 1,3 - 0,15 = 0,38 < 0,9$$

$$k_{LT} = 1 - \mu_{LT} * N_{fi,Ed} / (\chi_{z,fi} * A * k_{y,\theta} * f_y / \gamma_{M,fi}) = 1 - 0,38 * 150 / (0,089 * 134 * 0,625 * 27,5 / 1) = 1 - 51 / 204,9 = 0,75 < 1$$

4. Έλεγχοι αντοχής έναντι λυγισμού

$$120 \cdot 1 / (0,089 \cdot 134 \cdot 0,625 \cdot 27,5) + 1,03 \cdot 375 \cdot 100 / (2787 \cdot 0,625 \cdot 27,5) = 120 / 204,97 + 38625 / 47901 = 0,585 + 0,8 = 1,385 > 1$$

$$120 \cdot 1 / (0,089 \cdot 134 \cdot 0,625 \cdot 27,5) + 0,75 \cdot 375 \cdot 100 \cdot 1 / (0,36 \cdot 2787 \cdot 0,625 \cdot 27,5) = 120 / 204,97 + 28125 / 17244 = 0,585 + 1,63 = 2,2 > 1$$

Επομένως η διατομή δεν είναι επαρκής για την εξεταζόμενη θερμοκρασία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την εν λόγω διπλωματική εργασία προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

A. Μελέτης

- Ότι ο χάλυβας και το σκυρόδεμα υφίστανται προοδευτική μείωση στις μηχανικές ιδιότητες της αντοχής και της δυσκαμψίας τους καθώς η θερμοκρασία τους αυξάνεται σε συνθήκες πυρκαγιάς. Οι Ευρωκώδικες 3 και 4 παρουσιάζουν υπολογιστικά μοντέλα υλικού, μέσω καμπυλών τάσεων - παραμορφώσεων για μία εκτενή περιοχή θερμοκρασιών και τη συμπεριφορά των δύο υλικών.
- Ο Ευρωκώδικας 3 δίνει τη δυνατότητα απλών υπολογισμών μοντέλων για την εκτίμηση της αντοχής σε συνθήκες φωτιάς όλων των τύπων των δομικών στοιχείων της μεταλλικής κατασκευής.
- Η συμπεριφορά των δομικών στοιχείων σε δοκιμές φούρνου εργαστηριακά είναι αρκετά διαφορετική από εκείνη ενός πλαισίου σε κτίριο, ο μόνος όμως πρακτικός τρόπος για να εκτιμήσουμε τη συμπεριφορά της συνολικής μεταλλικής κατασκευής είναι να χρησιμοποιήσουμε προχωρημένα υπολογιστικά μοντέλα με βάση τον Ευρωκώδικα 3.
- Οι υπολογισμοί με βάση τους Ευρωκώδικες 3 και 4 της αντοχής σε συνθήκες πυρκαγιάς λαμβάνουν υπόψη τη στάθμη φορτίσεως του δομικού στοιχείου.
- Η αντοχή σε συνθήκες πυρκαγιάς υπολογίζεται σε χρονικούς όρους, ως μία φέρουσα ικανότητα σε δεδομένη χρονική στιγμή ή ως μία κρίσιμη θερμοκρασία του στοιχείου αντίστοιχη της στάθμης φορτίσεως και του απαιτούμενου χρόνου έκθεσης.
- Η πιο σωστή μέθοδος εκτίμησης της σοβαρότητας μιας φυσικής φωτιάς είναι η μέθοδος του συσχετισμού των χρόνων μεταξύ της μέγιστης θερμοκρασίας της φωτιάς και της ίδιας θερμοκρασίας κατά την πρότυπη καμπύλη ISO834.
- Η κρίσιμη θερμοκρασία υπολογίζεται για όλους τους τύπους μελών, κατηγοριών Z1, Z2 ή Z3 από μία μόνο εξίσωση ανάλογα με τη στάθμη φορτίσεως σε συνθήκες πυρκαγιάς.

B. Πυροπροστασίας

- Η πιο παραδοσιακή μέθοδος προστασίας μεταλλικών - χαλύβδινων κατασκευών είναι να καλύπτουμε με μονωτικό υλικό κατά τη διάρκεια της κατασκευής. Παρ' όλα αυτά στον Ευρωκώδικα 3 παρουσιάζονται και συνδυασμοί παθητικών και ενεργητικών στρατηγικών ώστε να εξασφαλιστεί η αντοχή του κτιρίου σε συνθήκες πυρκαγιάς και να εξασφαλιστεί η προστασία των ανθρώπινων ζώων.

Γ. Επισκευής

- Υπάρχουν διάφοροι τρόποι επισκευής των μεταλλικών κατασκευών έπειτα από την έκθεσή τους στο φαινόμενο της πυρκαγιάς, όπως οι πυράντοχες βαφές, η χρήση ινοπλισμένων πολυμερών, όπως και η ενίσχυση μεταλλικής δοκού με εγκιβωτισμό από οπλισμένο σκυρόδεμα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9^ο

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ευρωκώδικας 3, Μέρος 1-2 (ΕΛΟΤ EN 1993-01:2002): Γενικοί κανόνες - Σχεδιασμός φορέων σε πυρκαγιά
2. Ευρωκώδικας 3, Μέρος 1-4 (ΕΛΟΤ EN 1993-1-4:2006): Γενικοί κανόνες - Συμπληρωματικοί κανόνες για ανοξείδωτους χάλυβες.
3. Χ. Κ. Μπανιωτόπουλος, Χ. Τ. Τσαλίκης, Ο. Vassart, Β. Zhao, «Χαλύβδινες Κατασκευές σε Πυρκαγιά και Σχεδιασμός Σύμμικτης Πλάκας», ISBN10 9604563785, εκδόσεις Ζήτη, 2013.
4. Αθανάσιος Χ. Τριανταφύλλου, «Δομικά Υλικά», εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2008, 8η έκδοση.
5. Αθανάσιος Χ. Τριανταφύλλου, «Ενισχύσεις Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος Με Σύνθετα Υλικά (Ινοπλισμένα Πολυμερή)», εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2004, 2η έκδοση.
6. Ι. Βάγιας, Ι. Ερμόπουλος, Γ. Ιωαννίδης, «Σχεδιασμός Δομικών Έργων Από Χάλυβα, Με βάση τα τελικά κείμενα των Ευρωκωδίκων», εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2011
7. Ι. Βάγιας, Ι. Ερμόπουλος, Γ. Ιωαννίδης, «Χαλύβδινες Κατασκευές, Παραδείγματα εφαρμογής του Ευρωκώδικα 3» Τόμος Ι, εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2008
8. Ι. Βάγιας, Ι. Ερμόπουλος, Γ. Ιωαννίδης, «Σχεδιασμός Δομικών Έργων από Χάλυβα με Παραδείγματα Εφαρμογής», εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2013
9. <https://grc.sika.com>