

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ ΣΕ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Περίληψη

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί γίνεται μια προσπάθεια παρουσίασης κατ' αρχήν της επίδρασης της πυρκαγιάς σε δομικά υλικά και στοιχεία κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα, έπειτα παρουσιάζονται διάφορες μέθοδοι ανάλυσης κατασκευών υπό την επίδραση πυρκαγιάς, μαζί με σειρά κατασκευαστικών οδηγιών, και τέλος παρουσιάζεται μια ομάδα υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν πυροπροστατευτικές επενδύσεις.

1. Εισαγωγή

Ο σχεδιασμός των κατασκευών για καταπόνηση σε πυρκαγιά είναι ίσως μία από τις “παραμελημένες” εργασίες του Πολιτικού Μηχανικού, αφού κυριαρχεί η ως ένα βαθμό δικαιολογημένη πεποίθηση ότι το οπλισμένο σκυρόδεμα προσφέρει πρακτικά απεριόριστη προστασία έναντι πυρκαγιάς. Η πράξη όμως, έχει αποδείξει ότι σε πολλές περιπτώσεις (όπως π. χ. Μινιόν 1980 [4],[10]) μεγάλοι φέροντες οργανισμοί υπέστησαν σοβαρότατες ζημιές που έχρηζαν άμεσης επισκευής και ενίσχυσης προκειμένου να γίνουν ξανά λειτουργικοί. Το πρόβλημα είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε περιπτώσεις βιομηχανικών κτιρίων, αποθηκευτικών χώρων και γενικά όπου υπάρχει κίνδυνος αναφλέξεως (καύσιμα υλικά, εμπορεύματα κλπ.). Σαν πρώτο βήμα για την διαδικασία του σχεδιασμού των κατασκευών για καταπόνηση σε πυρκαγιά απαιτείται η γνώση της συμπεριφοράς του οπλισμένου σκυροδέματος σε υψηλές θερμοκρασίες.

2. Αντοχή δομικών στοιχείων σε πυρκαγιά^[3]

2.1. Συμπεριφορά δομικών υλικών σε υψηλές θερμοκρασίες

Επειδή η καταστροφή των δομικών υλικών υπό την επίδραση πυρκαγιάς είναι ζήτημα χρόνου δεν μπορούμε να μιλάμε για υλικά με απεριόριστη αντοχή σε θερμοκρασίες συνήθων πυρκαγιών. Η συμπεριφορά τους εξάλλου εξαρτάται από τις διαστάσεις και τον τρόπο στερέωσης του στοιχείου του οποίου αποτελούν μέρος. Μπορούμε να μιλάμε, επομένως, για αντοχή δομικών στοιχείων κι όχι για αντοχή υλικών σε πυρκαγιά. Η αντοχή αυτή των δομικών στοιχείων συνδέεται άμεσα με τις ιδιότητες των υλικών σύνθεσης σε υψηλές θερμοκρασίες και γι αυτό θα παραθέσουμε παρακάτω μερικές.

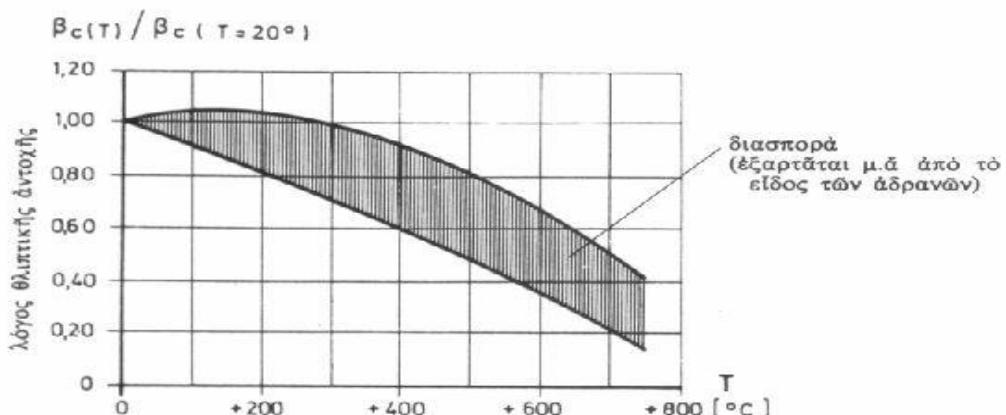
2.1.1. Σκυρόδεμα

Το καλύτερο ίσως από τα σύγχρονα δομικά υλικά από άποψη συμπεριφοράς σε πυρκαγιά εφόσον: α) Η μάζα των δομικών στοιχείων που κατασκευάζονται από αυτό είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή στοιχείων από χάλυβα ή ξύλο. β) Περιέχει νερό το οποίο συγκρατείται : με φυσικές δυνάμεις όπως η ικανότητα των τριχοειδών πόρων να συγκρατούν νερό ανάλογα με τη

σχετική υγρασία του περιβάλλοντος, με φυσικοχημικές δυνάμεις όπως οι τάσεις συνάφειας προς τους κόκκους των σκύρων και με χημικές δυνάμεις όπως το κρυσταλλικό νερό ενυδάτωσης του τσιμεντοπολοτού.

Σε υψηλές θερμοκρασίες το νερό εξατμίζεται αρχικά στην επιφάνεια και σιγά-σιγά, όσο διαρκεί η πυρκαγιά, βαθύτερα. Κατά την εξάτμισή του απορροφάται θερμότητα με αποτέλεσμα να καθυστερεί η θέρμανση των εσωτερικών στρωμάτων.

Σημαντικό ρόλο παίζει το είδος των αδρανών. Τα ασβεστολιθικά αδρανή είναι καλύτερα. Ο ασβεστόλιθος χάνει την ικανότητά του στους 900°C , οπότε αρχίζει η ασβεστοποίηση με έκλυση διοξειδίου του άνθρακα (κατά την διαδικασία αυτή απορροφώνται σημαντικά ποσά θερμότητας). Εξίσου καλή συμπεριφορά παρουσιάζουν οι σκωρίες υψηλαρίων (εφόσον πρωτίστως εκπληρώνουν καταληλότητα για μπετόν). Τα πυριτικά αδρανή (συνήθως χαλαζίτου από κοιτάσματα φυσικού αμμοχάλικου) παρουσιάζουν διόγκωση και σπάζουν όταν θέρμανθούν στους 500°C , οπότε γίνεται αλλαγή του συστήματος κρυστάλλωσης του χαλαζίτου συνοδευόμενη από διόγκωση.



($d = 5\text{ cm}$, $h = 7\text{ cm}$). [1]

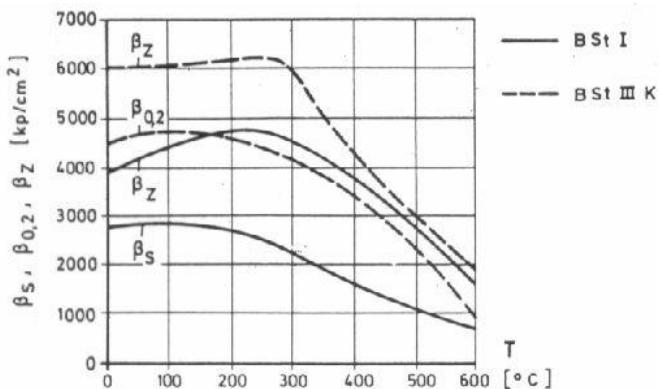
(Παπαϊωάννου Κ., Υπολογισμός Κατασκευών Σκυροδέματος Σε Επιπόνηση Πυρκαγιάς, $10^{\circ}\text{Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, 1991-Τάσιος Π. Θ., Πρακτικός Σχεδιασμός Κατασκευών Από Ο.Σ. Έναντι Πυρκαγιάς. } 6^{\circ}\text{ Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, 1983}.$

2.1.2. Χάλυβας

Αποτελεί βέβαια άκαυστο υλικό, αλλά δεν αντέχει για πολλή ώρα στις θερμοκρασίες των συνήθων πυρκαγιών. Σύμφωνα με εργαστηριακές δοκιμές συνήθους μαλακού σιδήρου η αντοχή του σε εφελκυσμό αυξάνει μέχρι θερμοκρασίας 250°C και επανέρχεται στην αρχική στους 400°C από όπου

πέφτει, και στους 550°C φθάνει στην επιτρεπόμενη τάση με τους συνηθισμένους συντελεστές ασφαλείας. Τη στιγμή αυτή έχουμε συντελεστή ασφαλείας 1, γι' αυτό και η θερμοκρασία των 550°C θεωρείται ως κρίσιμη θερμοκρασία του χάλυβα.

Σαφώς ταχύτερη πτώση δείχνουν χάλυβες που με ψυχρή εξέλαση έχουν αποκτήσει υψηλή αντοχή, διότι με την ανόπτηση που επέρχεται χάνεται η πρόσθετη αντοχή. Η κρίσιμη θερμοκρασία αυτών των χαλύβων είναι 400°C έως 450°C .



Σχήμα 2. Επιρροή της θερμοκρασίας στην εφελκυστική αντοχή β_Z , στο όριο $\beta_{0.2}$ για παραμόρφωση 0.2% και στο όριο διαρροής β_S του δομικού χάλυβα St I και St III.

(Παπαϊωάννου Κ., Υπολογισμός Κατασκευών Σκυροδέματος Σε Επιπόνηση Πυρκαγιάς, 10^ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, 1991).

2.2 Συμπεριφορές δομικών στοιχείων σε υψηλές θερμοκρασίες

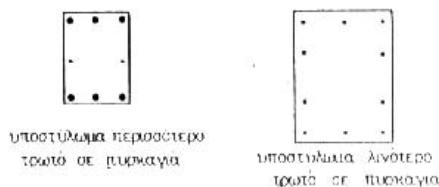
Η συμπεριφορά των δομικών στοιχείων έναντι πυρκαγιάς πέραν της εξάρτησης τους από το υλικό, εξαρτάται και από τη μορφή, τις διαστάσεις και τον τρόπο σύνδεσης και συνεργασίας με τα υπόλοιπα φέροντα στοιχεία. Αποτελεί ένα πολύ δύσκολο ζήτημα που διερευνάται με θεωρητικές και πειραματικές μεθόδους, τα συμπεράσματα των οποίων εισάγονται ως απλοί κανόνες κατασκευής στους οικοδομικούς κανονισμούς. Μερικά από τα κυριότερα σημεία εκτίθενται παρακάτω.

2.2.1 Υποστηλώματα

Ένας από τους κυριότερους κινδύνους είναι η απόσχιση (spalling) του οπλισμένου σκυροδέματος, ιδίως στις γωνίες, οπότε εκτίθεται ο οπλισμός στην προσβολή των φλογών. Αν θερμανθεί άνω των 600°C φθάνει για τις συνήθεις φορτίσεις το όριο διαρροής του.

Η αντοχή των υποστυλωμάτων οφείλεται κυρίως στο οπλισμένο σκυρόδεμα χάριν του οποίου αργεί να θερμανθεί το εσωτερικό. Οι διαστάσεις του σκυροδέματος αντιστοιχούν σε συντελεστή ασφαλείας 3 και αν αυτές είναι αρκετά μεγάλες, ακόμα κι αν αποφλοιωθούν οι επιφάνειες, το υποστύλωμα δεν καταρρέει.

Υποστυλώματα διατομής πάνω από 40 x 40 cm αντέχουν σε πυρκαγιά 1½ ώρας, με το φορτίο του στατικού υπολογισμού. Υποστυλώματα 25 x 25 cm αντέχουν σε πυρκαγιά 1 ώρας. Σε υποστυλώματα πλευράς 20 cm έχουμε πρόβλημα όχι λόγω υπέρβασης της αντοχής σε θλίψη, αλλά από λυγισμό. Από πειράματα έχει προκύψει πως πρόσθετη επένδυση χρειάζονται υποστυλώματα με διάσταση κάτω από 25 cm. Σε περίπτωση που απαιτείται αυξημένη αντοχή, τυλίγουμε τον οπλισμό με ελαφρό πυκνό δομικό πλέγμα, το οποίο εμποδίζει την αποφλοίωση του σκυροδέματος, και επιπροσθέτως συντελεί στο διπλασιασμό της αντοχής σε πυρκαγιά των λεπτών υποστυλωμάτων (έως 30 cm).



Σχήμα 3. Σύγκριση τρόπων οπλίσεως υποστυλωμάτων από την άποψη της τρωτότητας έναντι πυρκαγιάς.^[6]

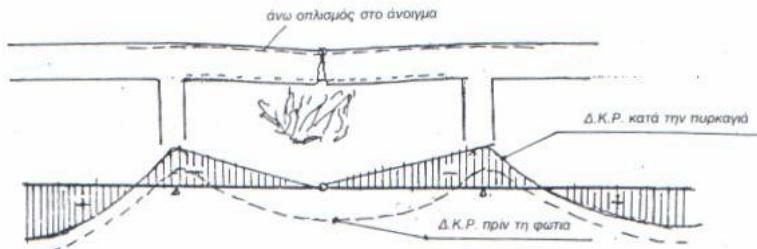
(Leonhardt F. –Mönnig E. Ολόσωμες Κατασκευές Τόμος 1., Εκδόσεις Μ. Γκιούρδας).

2.2.2. Δοκοί

Σημαντικοί παράγοντες στην αντοχή της δοκού σε πυρκαγιά είναι το πλάτος της διατομής της, το βάθος του οπλισμού από την επιφάνεια και η ύπαρξη πυκνού επιφανειακού οπλισμού (συνδετήρων). Σε ξηρό περιβάλλον αν χρησιμοποιήσουμε ασβεστολιθικά αδρανή και το πλάτος της δεν είναι κάτω των 20 cm ελαττώνουμε τον κίνδυνο εκρηκτικής απόσχισης ή αποφλοίωσης από φωτιά.

Ιδιαίτερα σημαντικό παράγοντα αποτελεί και το σύστημα στατικής λειτουργίας της δοκού. Αμφιέρειστες δοκοί ή πλαίσια ενός ανοίγματος είναι ευπαθέστερα, ενώ συνεχείς δοκοί και πολύστυλα πλαίσια είναι ασφαλέστερα. Αυτό συμβαίνει γιατί από την θερμότητα προσβάλλεται ο κάτω οπλισμός (ανοιγμάτων), ενώ στις στηρίξεις ο οπλισμός είναι κοντά στο δάπεδο (του υπερκείμενου ορόφου), όπου κυκλοφορεί ο εισερχόμενος αέρας και οι θερμοκρασίες είναι χαμηλότερες. Αν ο οπλισμός των ανοιγμάτων, επομένως, φθάσει το όριο διαρροής θα γίνει ανακατανομή των ροπών με αύξηση των

ροπών στήριξης τις οποίες ο εκεί ψυχρότερος οπλισμός είναι ικανός να αναλάβει. Γι' αυτό το λόγο ένα καλό μέτρο της αύξησης της ικανότητας των συνεχών δοκών είναι η συνέχιση μέρους των ράβδων των στηρίξεων στο άνοιγμα (Σχήμα 4).



Σχήμα 4. Ανακατανομή των ροπών κάμψης λόγω σχηματισμού πλαστικής άρθρωσης στο μέσο του ανοίγματος από υποβιβασμό του ορίου διαρροής του οπλισμού εξαιτίας πυράκτωσης. Η ύπαρξη άνω οπλισμού επιτρέπει στα 2 κομμάτια της δοκού να λειτουργούν ως πρόβολοι. [3]

(Τάσιος Π. Θ., Πρακτικός Σχεδιασμός Κατασκευών Από Ο.Σ. Έναντι Πυρκαγιάς. 6^ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, 1983).

2.2.3. Πλάκες

Οι πλάκες από σύνηθες οπλισμένο σκυρόδεμα(με χαλαρό οπλισμό), πάχους 8 και 9cm θεωρούνται από τους κανονισμούς ανασταλτικές του πυρός(αντοχή 30 λεπτών). Πλάκες άνω των 10cm θεωρούνται πυράντοχες για 1½ ώρα (F 90). Επαύξηση της αντοχής συνεχών πλακών γίνεται αν τοποθετήσουμε και στα ανοίγματα οπλισμό στο πάνω μέρος κατ' επέκταση μέρους του οπλισμού στηρίξεων, όπως αναφέρθηκε για τις δοκούς

3. Υπολογισμός κατασκευών Ο. Σ. σε επιπόνηση πυρκαγιάς

Όσα προαναφέρθηκαν για τα επιμέρους δομικά στοιχεία πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη διάρκεια τόσο του αρχικού σχεδιασμού της κατασκευής όσο και κατά τον ανασχεδιασμό της μετά από μια καταστροφική πυρκαγιά. Παρακάτω παρουσιάζεται συνοπτικά μια μεθοδολογία σχεδιασμού έναντι πυρκαγιάς βασισμένη στους κώδικες του CEB, στα σχέδια των Ευροκωδίκων και στη βιβλιογραφία.

3.1 Βασικές αρχές σχεδιασμού [5]

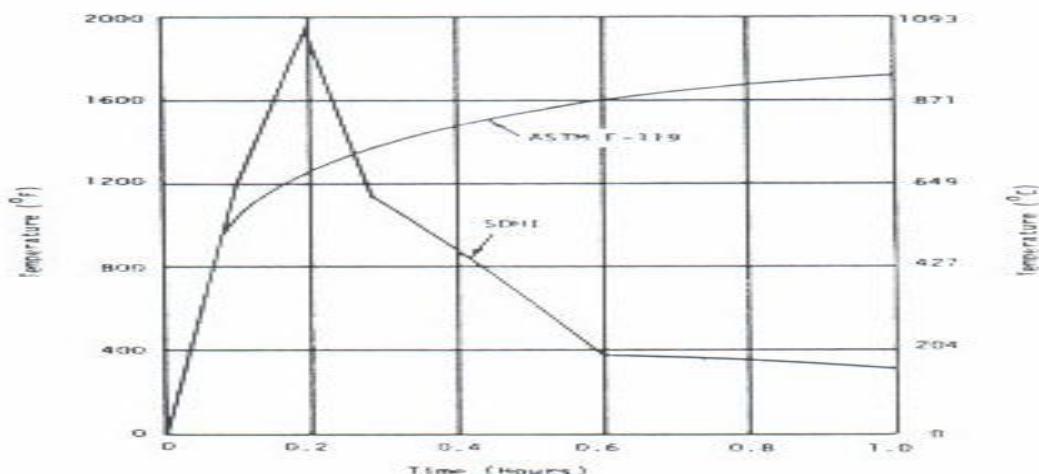
Ο φορέας πρέπει να κατασκευάζεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε σε ενδεχόμενο πυρκαγιάς να ικανοποιεί τις εξής απαιτήσεις λειτουργικότητας: α) Να διατηρεί τη φέρουσα ικανότητά του κατά τη διάρκεια της έκθεσης σε φωτιά. β) Να διατηρεί τις διαχωριστικές του ιδιότητες (δηλ. ακεραιότητα, θερμομονωτική ικανότητα) κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς.

Οι δράσεις σχεδιασμού χωρίζονται σε μηχανικές και θερμικές.

- Οι μηχανικές δράσεις περιλαμβάνουν τις συνήθεις φορτίσεις των νεκρών και των κινητών φορτίων, την ανεμοπίση, τη φόρτιση χιονιού, το σεισμό και τις δυνάμεις καταναγκασμού λόγω συστολοδιαστολών, καθιζήσεων κλπ. Στον υπολογισμό έναντι πυρκαγιάς προτείνεται λόγω της σπανιότητας του γεγονότος μια μείωση των τιμών των φορτίων της τάξης του 30%. Δηλαδή:

$Sd,f = 0,7 Sd$ όπου Sd η τιμή υπολογισμού των φορτίων για κανονικές συνθήκες και Sd,f η αντίστοιχη τιμή υπολογισμού για πυρκαγιά.

- Οι θερμικές δράσεις μπορούν να λαμβάνονται είτε από καμπύλες μεταβολής θερμοκρασίας χρόνου (π.χ. καμπύλες ASTM E-119, SDHI), είτε από ένα μοντέλο πυρκαγιάς σε πυροδιαμέρισμα που όμως πρέπει να λαμβάνει υπόψη μία κατάλληλη θεωρητική ή πραγματική πυκνότητα πυροθερμικού φορτίου.



SDHI. [7]

(Schmitt Heinrich –Heene Andreas, Κτιριακές Κατασκευές. Εκδόσεις Μ. Γκιούρδας).

Η ανάλυση γίνεται είτε για μεμονωμένα δομικά στοιχεία, είτε για υποφορείς, είτε τέλος για το σύνολο της κατασκευής. Χρησιμοποιείται η μέθοδος των οριακών αντοχών και θεωρούνται οι συνθήκες αστοχίας όπως και για κανονική

θερμοκρασία. Είναι όμως απαραίτητη η ποσοτική γνώση των θερμο-μηχανικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος και του χάλυβα σε υψηλές θερμοκρασίες.

3.2 Θερμό-μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος

Ο πίνακας 1 δίνει χαρακτηριστικές τιμές για δύο βασικές παραμέτρους σκυροδεμάτων με ασβεστολιθικά και πυριτικά αδρανή:

- της αντοχής σε θλίψη $fc(\theta)$
- της αντίστοιχης στην $fc(\theta)$ παραμόρφωσης $\epsilon c1(\theta)$

Πίνακας 1: Θερμομηχανικές ιδιότητες σκυροδέματος. [5] Παρατηρούμε ότι τα ασβεστολιθικά αδρανή πλεονεκτούν έναντι των πυριτικών.

θερμοκρασία σκυροδέ- ματος ($^{\circ}\text{C}$)	$fc(\theta) / fc(20^{\circ}\text{C})$		$\epsilon c1(\theta)/10^{-3}$
	Πυριτικά αδρανή	Ασβεστολι- θικά αδρανή	
20	1,00	1,00	2,5
100	0,95	0,97	3,5
200	0,90	0,94	4,5
300	0,85	0,91	6,0
400	0,75	0,85	7,5
500	0,60	0,74	9,5
600	0,45	0,60	12,5
700	0,30	0,43	14,0
800	0,15	0,27	14,5
900	0,08	0,15	15,0
1000	0,04	0,06	15,0
1100	0,01	0,02	15,0
1200	0,00	0,00	-

3.3 Σχεδιασμός για κατάσταση πυρκαγιάς

Οι κανονισμοί πυροπροστασίας επιβάλλουν απαιτήσεις για τους δείκτες πυραντίστασης των φερόντων δομικών στοιχείων των κατασκευών καθώς και των δομικών στοιχείων του κελύφους των μεμονωμένων πυροδιαμερισμάτων ενός κτιρίου. Σαν δείκτης πυραντίστασης ορίζεται το χρονικό διάστημα κατά το

οποίο το δομικό στοιχείο ή η κατασκευή μπορεί να ανθίσταται στη φωτιά χωρίς απώλεια στην ευστάθεια, στην ακεραιότητα και στη θερμομονωτική ικανότητα.^[2] Ακολουθείται γενικά ένας από τους ακόλουθους τρόπους σχεδιασμού : α) Χρήση έτοιμων δεδομένων από πίνακες (κατασκευαστικές διατάξεις) β) Απλές υπολογιστικές μέθοδοι γ) Σύνθετες γενικές υπολογιστικές μέθοδοι.

(Σεμινάριο Πυροπροστασίας Γ' Μέρος. Τεχνικά Χρονικά -Ιαν. - Μάρτιος 1987 – Έτος 56^ο – μηνιαία έκδοση Τ. E. E.- Schmitt Heinrich –Heene Andreas, Κτιριακές Κατασκευές. Εκδόσεις Μ. Γκιούρδας).

3.3.1 Πινακοποιημένα δεδομένα^[6]

Είναι αποτελέσματα προτύπων δοκιμασιών πυραντίστασης για δομικά στοιχεία από σκυρόδεμα και υιοθετούνται από πολλούς εθνικούς κανονισμούς πυροπροστασίας. Οι σχετικοί πίνακες αφορούν σε υποστυλώματα, τοιχία, δοκούς και πλάκες . Οι τιμές αναφέρονται σε δοκιμασίες με σκυροδέματα συνήθους πυκνότητας και ελαφροσκυροδέματα με πυριτικά αδρανή. Για σκυροδέματα με ασβεστολιθικά αδρανή οι τιμές μπορούν να μειωθούν κατά ένα ποσοστό 10%.

Η ανθεκτικότητα έναντι πυρκαγιάς εκφράζεται σε όρους απαιτούμενου χρόνου εκθέσεως στην καμπύλη ISO “θερμοκρασία αερίων-χρόνος”. Σύμφωνα με διεθνή συμφωνία η πυρκαγιά ακολουθεί τον παρακάτω διαχωρισμό σε κλάσεις ISO:

F30, F60, F90, F120, F180, F240, . . . όπου ο αριθμός αναφέρεται στον απαιτούμενο χρόνο εκθέσεως σε πρώτα λεπτά.

Ανάλογα τώρα με την κλάση πυρκαγιάς ISO, στην οποία πρόκειται να εκτεθεί το δομικό στοιχείο, προτείνεται να τηρούνται ορισμένες πρόσθετες κατασκευαστικές διατάξεις. Αυτές αναφέρονται κυρίως:

- στις ελάχιστες διαστάσεις της διατομής
- στις ελάχιστες επικαλύψεις οπλισμών
- στις αγκυρώσεις των οπλισμών

Οι παραπάνω διατάξεις έχουν ελεγχθεί κυρίως μέσω πειραμάτων, αλλά παρέχουν στην πράξη, τις περισσότερες φορές, αποδεκτή στάθμη ασφαλείας. Τα Σχήματα 6, 7 διασαφηνίζουν τα σύμβολα που χρησιμοποιούνται στους πίνακες που ακολουθούν. Στο Σχήμα 8 υποδεικνύονται οι κατάλληλες διευθετήσεις οπλισμών.

Πίνακας 2: Υποστυλώματα από Οπλισμένο Σκυρόδεμα (για λυγηρότητα < 25). [6]

ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΟΔΗΓΙΕΣ			ΕΛΑΧΙΣΤΕΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΣΕ mm					
Είδος σκυροδέματος	Έκθεση στη πυρκαγιά	Πλάτος υποστηλώματος «b» και αξονική απόσταση οπλισμών	F30	F60	F90	F120	F180 ***	F240 ***
			b a **	150 18	200 30	240 45	300 55	400 450
Σκυρόδεμα από τα συνήθη αδρανή	Όλες οι πλευρές	B έναλλα-κτική λύση a**		240 25	300 35			
			b a **	100 10	120 25	140 35	160 40	200 40
	Mία μόνο πλευρά	b a **	150 18	160 30	190 45	240 55	320	360
	Όλες οι πλευρές	b a **	100 10	100 25	115 35	130 40	160 40	190 40
	Mία μόνο πλευρά	b a **						

* Ελαφροσκυροδέματα πυκνότητας περίπου 1,2 t/m³. Για μεγαλύτερες πυκνότητες οι διαστάσεις πρέπει να αυξάνονται.

** Η αξονική απόσταση των οπλισμών α, ισχύει για $T_{crit.} = 500^\circ C$.

*** Δεν έχει επιτευχθεί μέχρι στιγμής συμφωνία για κοινές τιμές.

Πίνακας 3: Φέροντα τοιχία από Ο.Σ. ($h : b < 25$). ^[6]

ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΟΔΗΓΙΕΣ	Είδος σκυροδεμάτος	Τάση σκυροδεμάτος	Παχος τοιχείου «t» και αξονική απόστασης «a»	ΕΛΑΧΙΣΤΕΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΣΕ mm					
				F30	F60	F90	F120	F180	F240
Σκυρόδεμα από τα συνήθη αδρανή	$\sigma < 0.15F_{ck}$	t	120	120	140	160	200	240	
		a	10	15	25	35	55	75	
	$\sigma < 0.30F_{ck}$	t	120	140	170	220	300	400	
		a	12	25	35	45	65	85	
Ελαφροσκυροδέματα *	$\sigma < 0.15F_{ck}$	t	120	120	140	160	200	240	
		a	10	12	20	28	44	60	
	$\sigma < 0.30F_{ck}$	t	120	140	170	220	300	400	
		a	10	20	28	36	52	68	

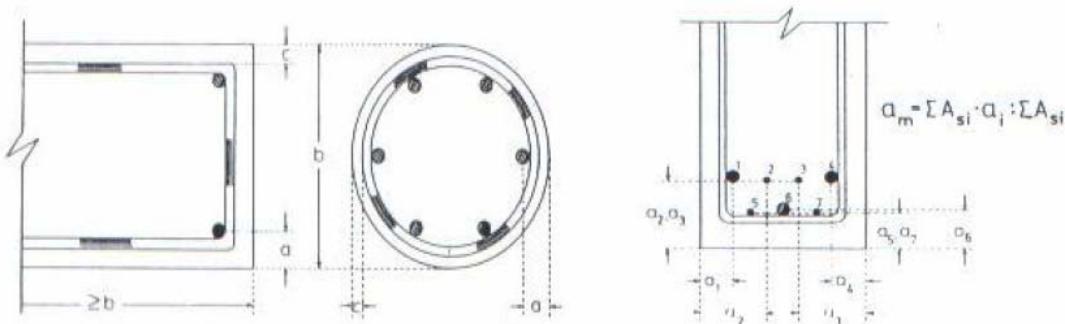
* Ελαφροσκυροδέματα πυκνότητας περίπου $1,2 \text{ t/m}^3$. Για μεγαλύτερες πυκνότητες οι διαστάσεις πρέπει να αυξάνονται.

Πίνακας 4: Σιδηροπαγείς και προεντεταμένες συνεχείς δοκοί (προσβολή από 3 μεριές). [6] (όπου ast είναι η αξονική απόσταση από την κατακόρυφη παρειά της δοκού)

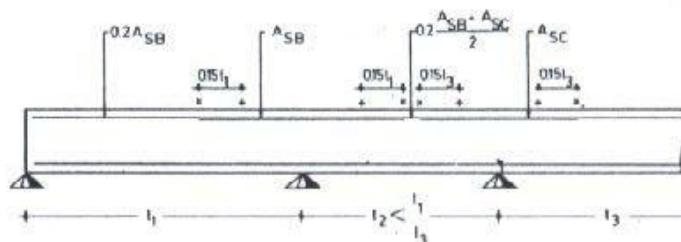
ΚΛΑΣΕΙΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ	ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΑ ΑΠΟ ΣΥΝΗΘΗ ΑΔΡΑΝΗ					
	Πλάτος δοκού “b” σε mm και αντίστοιχη ελάχιστη αξονική απόσταση “a” σε mm				Ελάχιστο πάχος κορμού (*) “bw” σε mm	
F30	b a	80 12	200	12	80	
F60	b a	120 25	200 12	300 12	100	
F90	b a	150 35	250 25	400 25	100	
F120	b a	200 45	300 35	500 35	120	220
F180	b a	240 50		600 50	140	400
F240	b	280		700	160	600
	a	60		60		
$ast = a + 10 \text{ mm}$			$ast = a$			

* Σε δοκούς μορφής I, το ελάχιστο πάχος bw του κορμού οφείλει να είναι τουλάχιστον ίσο με το ελάχιστο απαιτούμενο πλάτος δοκού b, για ένα μήκος εκατέρωθεν της στηρίξεως τουλάχιστον ίσο με $2h$ (h το ύψος της δοκού).

** Για τις περιπτώσεις ενδιάμεσων στηριγμάτων συνεχών δοκών με κίνδυνο πρόωρης καμποδιατμητικής θραύσεως : Δοκοί 2 ανοιγμάτων με συγκεντρωμένα φορτία κοντά στα στηρίγματα και με εξάντληση της οριακής παραμορφώσεως σκυροδέματος.



Σχήμα 6. Διαστάσεις δομικών στοιχείων : αξονική Σχήμα 7. Στοιχεία για τον προσδιορισμό απόστασης “*a*” και σταθερή επικάλυψη οπλισμών μιας “μέσης” αξονικής αποστάσεως “*c*”. ράβδων από τις παρειές. [6]



- * Τέλος άνω οπλισμού για την κατάσταση λειτουργίας
- * Τέλος άνω οπλισμού για σχεδιασμό έναντι πυρκαγιάς

Σχήμα 7. Διευθέτηση του πάνω οπλισμού σε συνεχή δοκό. [6]

(Leonhardt F. –Mönnig E. Ολόσωμες Κατασκευές Τόμος 1., Εκδόσεις Μ. Γκιούρδας).

3.3.2 Απλή υπολογιστοκή μέθοδος [5]

Η απλοποιημένη αυτή μέθοδος ισχύει για διατομές δοκών και πλακών σκυροδέματος που κάμπτονται κατά μία διεύθυνση. Υπολογίζεται η οριακή φέρουσα ικανότητα R_θ του δομικού στοιχείου που έχει εκτεθεί σε πρότυπη πυρκαγιά (η R_θ αναφέρεται σε καμπτική ή σε συνδυασμό καμπτικής και αξονικής έντασης). Σε μια κρίσιμη διατομή του φορέα, η οποία καθορίζεται από το μηχανισμό δημιουργίας πλαστικών αρθρώσεων, γίνεται ο έλεγχος αν η οριακή αντοχή R_θ είναι μεγαλύτερη από την αναπτυσσόμενη ένταση που προκύπτει από τις συγκεκριμένες δράσεις σχεδιασμού. Πρέπει το δομικό στοιχείο να σχεδιάζεται έτσι ώστε να έχουν ελάχιστη πιθανότητα εμφάνισης οι υπόλοιποι τύποι αστοχίας: διάτμηση, απόσχιση, συνάφεια, αγκύρωση, στρέψη. Για τη χρήση της απλής υπολογιστικής μεθόδου είναι απαραίτητοι Πίνακες που δίνουν

την κατανομή των θερμοκρασιών σε πρότυπες διατομές που έχουν εκτεθεί σε πρότυπη πυρκαγιά ISO για κλάσεις 30, 60, 90, 120, 180 και 240 λεπτών. Αν δεν διατίθενται τέτοιοι πίνακες ο μελετητής θα αναγκαστεί να καταφύγει στη χρήση θερμικής ανάλυσης με πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων.

Ο υπολογισμός της οριακής φέρουσας ικανότητας R_θ ακολουθεί τα παρακάτω στάδια:

α) Καθορισμός της ισόθερμης καμπύλης της κρίσιμης θερμοκρασίας των 500°C για τον προδιαγεγραμμένο χρόνο έκθεσης σε πυρκαγιά ISO.

β) Καθορισμός ενός νέου θεωρητικού πλάτους b' και ενός νέου στατικού ύψους d' της διατομής μετά την αφαίρεση του σκυροδέματος εκτός της ισόθερμης των 500°C (που θα βρίσκεται σε υψηλότερη θερμοκρασία και δεν θα έχει σημαντική εναπομείνασα αντοχή).

γ) Καθορισμός της θερμοκρασίας των ράβδων οπλισμού στην εφελκυόμενη και θλιβόμενη ζώνη.

δ) Καθορισμός της κρίσιμης τάσης λόγω της θερμοκρασίας για τον θλιβόμενο και τον εφελκυόμενο οπλισμό.

ε) Χρήση των κλασσικών υπολογιστικών μεθόδων στην απομειωμένη διατομή για τον καθορισμό της οριακής φέρουσας αντοχής R_θ.

στ) Σύγκριση της οριακής φέρουσας αντοχής R_θ με την αντίστοιχη φόρτιση, ή εναλλακτικά, σύγκριση της υπολογισθείσας πυραντίστασης με την απαιτούμενη (επιτρεπόμενη) πυραντίσταση.

Οι ράβδοι του οπλισμού που τυχαίνει να βρίσκονται εκτός της απομειωμένης διατομής λαμβάνονται υπόψη στην κλασσική μέθοδο υπολογισμού της φέρουσας ικανότητας της εκτεθειμένης στη φωτιά διατομής.

(Σεμινάριο Πυροπροστασίας Γ' Μέρος. Τεχνικά Χρονικά -Ιαν. - Μάρτιος 1987 – Έτος 56° – μηνιαία έκδοση Τ. Ε. Ε.)

3.3.3 Σύνθετες υπολογιστικές μέθοδοι [8],[9]

Η ακριβής ανάλυση των φερόντων στοιχείων σε ένα κτίριο κατά την πυρκαγιά είναι ένα πολύ σύνθετο πρόβλημα. Διάφοροι παράγοντες πρέπει να ληφθούν υπόψη, μεταξύ των οποίων [8].

- Η μεταβολή της θερμοκρασίας των μελών με το χρόνο.

- Η μεταβολή της θερμοκρασίας τόσο στη διατομή όσο και κατά μήκος του άξονα του μέλους.
- Η επίδραση της θερμοκρασίας στις ιδιότητες του υλικού (διαστολή, ερπυσμός, μείωση αντοχής και δυσκαμψίας).
- Μη-γραμμικότητα υλικού.
- Μη-γραμμικότητα γεωμετρίας.
- Συνδυασμένες δράσεις (αξονική δύναμη και διαξονική κάμψη).
- Πιθανή αποφόρτιση, επαναφόρτιση και αντεστραμμένη φόρτιση του υλικού.
- Αρχικές ατέλειες κατασκευής (γεωμετρία και δυνάμεις καταναγκασμού).
- Οριακές συνθήκες μέλους.

Εξαιτίας της μη γραμμικής φύσης του προβλήματος, είναι πρακτικά αδύνατο να βρεθούν λύσεις κλειστού τύπου και απαιτείται μια προσεγγιστική διαδικασία. Η κατ' εξοχήν χρησιμοποιούμενη μέθοδος είναι η εξίδανίκευση με κατάλληλα πεπερασμένα στοιχεία. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται πολλά τέτοια μοντέλα που εμπεριέχουν τις εξής παραδοχές^[9]:

- Υπόθεση Navier-Bernoulli: επίπεδες διατομές παραμένουν επίπεδες.
- Η ολίσθηση μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος αμελείται.
- Η στρέψη είναι αμελητέα.
- Δε λαμβάνεται υπόψη το περιεχόμενο σε υγρασία.

Μερικά από τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων είναι τα εξής^[9]:

- FASBUS-II (Jeanes 1982)
- FIRES-RCII (Iding 1977)
- CONFIRE (Forsen 1982)
- CEFICOSS (Franssen 1987)

- LUSAS (1988)
- Sheffield / Nethercot (1988)
- BRE (Yong 1990)

Τα στοιχεία αυτά παρουσιάζουν όμως και μειονεκτήματα. Δε λαμβάνεται υπόψη προϊστορία φόρτισης της κατασκευής, αγνοείται ο θερμικός ερπυσμός που επηρεάζει σημαντικά τα υποστυλώματα από σκυρόδεμα και λόγω της παραδοχής Bernoulli δεν εξιδανικεύονται σωστά οι μεγάλες μετακινήσεις στο φορέα.

(Poh W. K. – Bennetts D. I. Analysis Of Structural Members Under Elevated Temperature Conditions. Journal Of Structural Engineering A.S.C.E. April 1995 - Milke A. J. , Analytical Methods To Evaluate Fire Resistance Of Structural Members. Journal Of Structural Engineering A.S.C.E. October 1999).

4. Προστατευτικές επενδύσεις^[3]

Αφού επισκευάσουμε ή και ενισχύσουμε τα βλαμμένα τμήματα του φορέα και επιτύχουμε να αποκαταστήσουμε τη φέρουσα ικανότητά τους, οφείλουμε να προστατέψουμε το φέροντα οργανισμό από μελλοντικό κίνδυνο πυρκαγιάς. Η πυροπροστασία βασικά παρέχεται με τη θερμική μόνωση με στρώσεις υλικών που αντέχουν τον απαιτούμενο χρόνο πυρκαγιάς. Οι μέθοδοι αυτοί που τα τελευταία χρόνια έχουν επιτυχώς χρησιμοποιηθεί σε σιδηρές κατασκευές και σε πρόχειρα προεντεταμένα στοιχεία μπετόν, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Αυτές μπορούν να χωριστούν σε «ξηρές» και «υγρές» μεθόδους εφαρμογής. Οι «υγρές» μέθοδοι είναι:

- εκτοξεύμενες ίνες λιθοβάμβακα ή αμιάντου.
- πυροπροστατευτικά επιχρίσματα.
- πυροπροστατευτικά χρώματα

Στις «ξηρές» μεθόδους χρησιμοποιούνται προκατασκευασμένα ή βιομηχανικά στοιχεία που στερεώνονται στα δομικά στοιχεία, όπως..

- πλάκες από λιθοβάμβακα.

- πλάκες συντεθειμένες από περλίτη ή βερμικουλίτη.
- πλάκες από γυψοκονίαμα

4.1. Εκτοξεύμενες ανόργανες ίνες

Παλαιότερα χρησιμοποιούταν αμίαντος. Λόγω, όμως, του κινδύνου εμφανίσεως αμιάντωσης (asbestosis), είδος καρκίνου των πνευμόνων, απαγορεύτηκε η χρήση του. Σήμερα χρησιμοποιείται μίγμα ινών λιθοβάμβακα και τσιμέντου ή γύψου σαν συνδετικού το οποίο ψεκάζεται με ειδικό εκτοξευτήρα και κατά την έξοδό του διαβρέχεται με συγχρόνως ψεκαζόμενο νερό. Η στρώση εφαρμόζεται πάνω σε φορέα επιχρίσματος (π.χ. νερβομετάλ) του οποίου η μεταλλική επιφάνεια δεν πρέπει να έχει λάδια ή λίπη, αλλά να έχει ελαφρό στρώμα όχι χαλαρής σκουριάς. Σχηματίζεται έτσι στρώση 10 έως 30 mm, ανάλογα με τις απαιτήσεις.

Ανάλογα με την κατασκευή, το ειδικό βάρος της στρώσης κυμαίνεται ξεκινώντας από 250 kg/m³. Παρατηρούμε, επομένως, πως η μόνωση είναι πολύ μαλακή, κάτι που πρέπει να έχουμε υπόψη σε κατασκευές όπου μπορεί να κινδυνεύει από άμεση μηχανική επιπτώση. Η μηχανική αντοχή μπορεί να βελτιωθεί με επικόλληση υαλοϋφάσματος, όπου να εφαρμοσθεί σοβάς με γύψο.

4.2. Πυροπροστατευτικά επιχρίσματα

Αυτά έχουν για αδρανές υλικό βερμικουλίτη ή περλίτη. Κατά κανόνα εφαρμόζονται πάνω σε μεταλλικό φορέα (από εκτεταμένο πλέγμα π.χ. νερβομετάλ) που στερεώνεται με μηχανικά μέσα σε επιφάνειες οπλισμένου σκυροδέματος. Ως συνδετικό υλικό χρησιμοποιείται τσιμέντο (που μπορεί να προστεθεί 10% πολτός ασβέστη για καλύτερη εργασιμότητα) ή γύψος.

Ο βερμικουλίτης παράγεται από ένυδρη μίκα που υπόκειται σε απότομη θέρμανση. Ο περλίτης είναι υαλώδες πέτρωμα (ρυόλιθος) που έχει ένα ποσοστό 4 έως 5% νερού στη σύνθεσή του και καθώς θερμαίνεται απότομα από φλόγα στους 850° C διογκώνεται και εξέρχεται από την κάμινο σε μορφή κόκκων έως 4 mm, που χρησιμοποιούνται σαν άμμος στο υλικό επιχρίσματος.

Όταν χρησιμοποιείται για προστασία πλακών οπλισμένου σκυροδέματος, μπορεί να εφαρμόζεται άμεσα ως οροφοκονίαμα, αφού πρώτα στερεωθεί με μπετόκαρφα ένα συρματόπλεγμα. Ειδάλλως κινδυνεύει να αποκολληθεί το επίχρισμα.

Το ειδικό βάρος των επιχρισμάτων είναι (μετά τη ξήρανση) μεταξύ 300 και 800 kgr/m³. Σε περίπτωση δυνατότητας μηχανικής επιπόνησης μπορούν να καλυφθούν με στρώση ισχυρού τσιμεντοκονιάματος με συνήθη άμμο.

4.3. Πυροπροστατευτικά χρώματα

Εφαρμόζονται κυρίως σε αναφλέξιμα υλικά για την επιβράδυνση μετάδοσης της φωτιάς. Είναι δυνατόν, όμως, να χρησιμοποιηθούν για την πυροπροστασία φερόντων στοιχείων σε χώρους όπου δεν είναι πιθανή η συγκέντρωση μεγάλου θερμικού φορτίου. Εφαρμόζονται με πιστολέτο σε στρώσεις πάχους 0,5 έως 3 mm. Χαρακτηριστικό τους ότι αφρίζουν όταν θερμανθούν στους 100° C έως 150° C οπότε ξηραίνεται ο αφρός σχηματίζοντας ένα μονωτικό στρώμα 5 έως 15 mm πάχους.

4.4. Πλάκες λιθοβάμβακα

Αποτελούνται από συμπιεσμένες ίνες με λίγη συνδετική ύλη, συνήθως υδρύαλο, και πρέπει να είναι ειδικού βάρους πάνω από 150 kgr/m³. Κατασκευάζονται επίσης και πλάκες που περιέχουν και κόκκους περλίτη. Στερεώνονται στην κατασκευή είτε με πυράντοχη κόλλα είτε με μηχανικά μέσα στερέωσης. Το πάχος τους εξαρτάται από την επιθυμητή πυροπροστασία, με πάχη από 30 έως 70 mm, ενώ μικρότερα πάχη δεν είναι εφαρμόσιμα εξ αιτίας της ευκαμψίας τους. Επειδή είναι μικρής μηχανικής αντοχής χρησιμοποιούνται σε θέσεις όχι άμεσα προσιτές.

4.5. Πλάκες βερμιουλίτη ή περλίτη

Έχουν βασικό υλικό διογκωμένο περλίτη ή περλίτη με συνδετικό από συνδυασμούς υδρύαλου, τσιμέντου ή ασβεστοπυριτικής σύνθεσης υλικού και διαμορφώνονται με τρόπο που να έχουν πορώδη ηχοαπορροφητική επιφάνεια και ειδικό βάρος μεταξύ 350 και 500 kgr/m³. Χάρη στη διαμόρφωση της επιφάνειας κατά διάφορες πατενταρισμένες μεθόδους, έχουν ηχοαπορροφητικές ικανότητες, και επειδή είναι αρκετά άκαμπτες και ανεπηρέαστες από υγρασία χρησιμοποιούνται ευρύτατα για αναρτημένες οροφές συνδυάζοντας αισθητικές απαιτήσεις με ηχοαπορρόφηση, θερμομόνωση και πυροπροστασία. Κατάσκευάζονται σε πάχη 10 έως 30 mm. Επικολλώνται με πυράντοχη κόλλα στους φορείς ή στερεώνονται με μηχανικά μέσα.

(Τάσιος Π. Θ., Πρακτικός Σχεδιασμός Κατασκευών Από Ο.Σ. Έναντι Πυρκαγιάς. 6^ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, 1983).

5. Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα για την προστασία του οπλισμένου σκυροδέματος από τη φωτιά είναι συνοπτικά τα ακόλουθα^[4]:

- Προστασία των επιφανειών, κυρίως των κάτω και των πλευρικών, γιατί οι πάνω επιφάνειες συνήθως προστατεύονται από τις επικαλύψεις των πατωμάτων. Για μικρής διάρκειας πυρκαγιές είναι αρκετό 1,5 cm επιχρίσματος, ενώ για μεγαλύτερη διάρκεια πρέπει να προβλέπονται ειδικά υλικά πυροπροστασίας.
- Προστασία του οπλισμού, δηλαδή επαρκής επικάλυψη με σκυρόδεμα και αποφυγή μεταγενέστερων επεμβάσεων που προκαλούν αποκαλύψεις του.
- Μεγάλες διατομές, έτσι ώστε η βραδεία διείσδυση της θερμοκρασίας να μην αχρηστεύει σε μικρό χρόνο μεγάλο ποσοστό της αντοχής του στοιχείου.
- Καλή διάστρωση του σκυροδέματος ώστε να προκύψει χωρίς ανωμαλίες επιφάνεια και να αυξηθεί η αντοχή σε πυρκαγιά.
- Αποφυγή χρησιμοποίησης οπλισμού κατεργασμένου «εν ψυχρώ».

6.Βιβλιογραφία

1. Παπαϊωάννου Κ., Υπολογισμός Κατασκευών Σκυροδέματος Σε Επιπόνηση Πυρκαγιάς, 10^οΕλληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, 1991.
2. Σιγάλας Γ., Επισκευή Φέροντος Οργανισμού Συγκροτήματος Μινιόν Μετά Την Πυρκαγιά Της 18/12/1980., 6^οΕλληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος 1983.
3. Τάσιος Π. Θ., Πρακτικός Σχεδιασμός Κατασκευών Από Ο.Σ. Έναντι Πυρκαγιάς. 6^ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, 1983.
4. Χατζόπουλος Α. Επίδραση Πυρκαγιάς Σε Φέροντες Οργανισμούς Από Οπλισμένο Σκυρόδεμα, 6^οΕλληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, 1983.
5. Σεμινάριο Πυροπροστασίας Γ' Μέρος. Τεχνικά Χρονικά -Ιαν. - Μάρτιος 1987 – Έτος 56^ο – μηνιαία έκδοση Τ.Ε.Ε.
6. Leonhardt F. –Mönnig E. Ολόσωμες Κατασκευές Τόμος 1., Εκδόσεις Μ. Γκιούρδας.
7. Schmitt Heinrich –Heene Andreas, Κτιριακές Κατασκευές. Εκδόσεις Μ. Γκιούρδας.
8. Poh W. K. – Bennetts D. I. Analysis Of Structural Members Under Elevated Temperature Conditions. Journal Of Structural Engineering A.S.C.E. April 1995.
9. Milke A. J. , Analytical Methods To Evaluate Fire Resistance Of Structural Members. Journal Of Structural Engineering A.S.C.E. October 1999.