

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ ΣΕ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

**ΑΡΓΥΡΟΠΟΥΛΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ
ΤΣΙΤΟΣ ΑΝΤΩΝΗΣ**

Περίληψη

Στην εργασία 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. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

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 έρχονταν 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. ΑΝΤΟΧΗ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ ^[3]

2.1. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΕ ΥΨΗΛΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ

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. ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

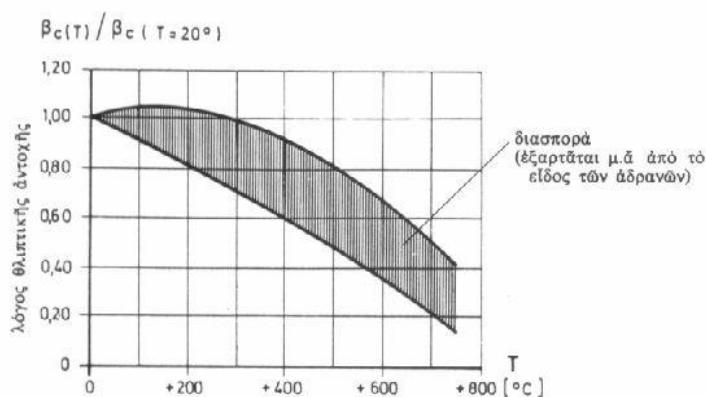
Το καλύτερο ίσως από τα σύγχρονα δομικά υλικά από άποψη συμπεριφοράς σε πυρκαγιά εφόσον:

- 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 τσιμεντοπολτού.

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 υψικαμίνων (εφόσον πρωτίστως εκπληρώνουν καταλληλότητα για μπετόν. Τα πυριτικά αδρανή (συνήθως χαλαζίτου από κοιτάσματα φυσικού αμμογάλικου) παρουσιάζουν διόγκωση και σπάζουν όταν θερμανθούν στους 500° C, οπότε γίνεται αλλαγή του συστήματος κρυστάλλωσης του χαλαζίτου συνοδευόμενη από διόγκωση.

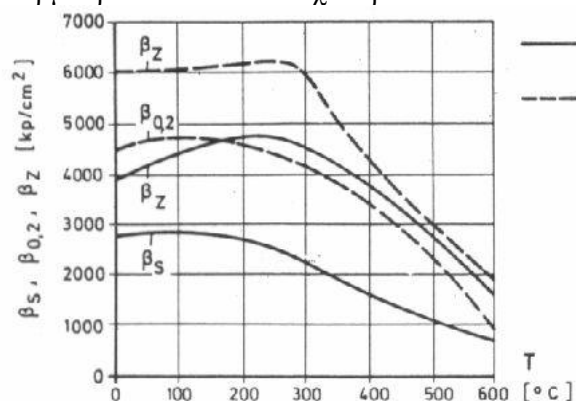


Σχήμα 1. Επιρροή υψηλών θερμοκρασιών σκυροδέματος στη θλιπτική αντοχή κυλίνδρων ($d = 5 \text{ cm}$, $h = 7 \text{ cm}$).^[1]

2.1.2. ΧΑΛΥΒΑΣ

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 χάλυβων 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.^[1]

2.2. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΕ ΥΨΗΛΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ

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. ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΑ

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^ο 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).

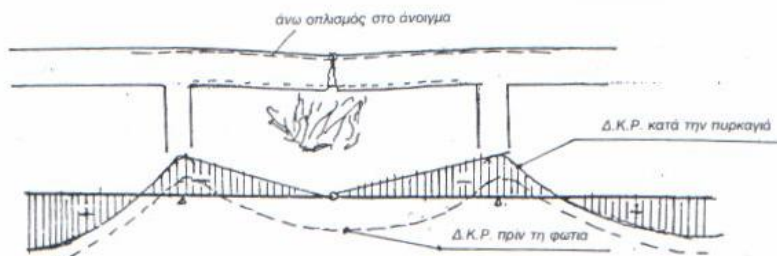


Σχήμα 3. Σύγκριση τρόπων οπλίσεως υποστυλωμάτων από την άποψη της τρωτότητας έναντι πυρκαγιάς. ^[6]

2.2.2. ΔΟΚΟΙ

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]

2.2.3. ΠΛΑΚΕΣ

Οι πλάκες από σύνθητες οπλισμένο σκυρόδεμα (με χαλαρό οπλισμό), πάχους 8 και 9 cm θεωρούνται από τους κανονισμούς ανασταλτικές του πυρός (αντοχή 30 λεπτών). Πλάκες άνω των 10 cm 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. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ Ο.Σ. ΣΕ ΕΠΙΠΟΝΗΣΗ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ

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 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ [5]

Ο φορέας πρέπει να κατασκευάζεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε σε ενδεχόμενο πυρκαγιάς να ικανοποιεί τις εξής απαιτήσεις λειτουργικότητας:

- Να διατηρεί τη φέρουσα ικανότητά του κατά τη διάρκεια της έκθεσης σε φωτιά.
- Να διατηρεί τις διαχωριστικές του ιδιότητες (δηλ. ακεραιότητα, θερμομονωτική ικανότητα) κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς.

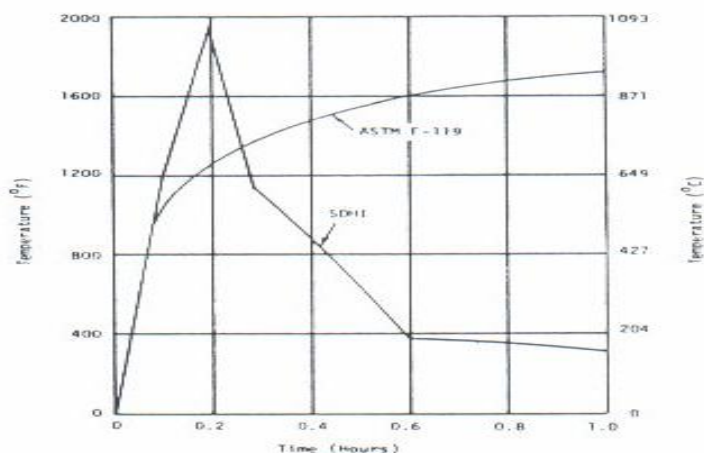
Οι δράσεις σχεδιασμού χωρίζονται σε μηχανικές και θερμικές.

- Οι μηχανικές δράσεις περιλαμβάνουν τις συνήθεις φορτίσεις των νεκρών και των κινητών φορτίων, την ανεμοπίεση, 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:

$$S_{d,f} = 0,7 S_d$$

όπου S_d η τιμή υπολογισμού των φορτίων για κανονικές συνθήκες και $S_{d,f}$ 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.



Σχήμα 5. Καμπύλες θερμοκρασίας – χρόνου για τυποποιημένες πυρκαγιές ASTM E-119 και SDHI. ^[7]

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 ΘΕΡΜΟ-ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

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

- της αντοχής σε θλίψη $f_c(\theta)$
- της αντίστοιχης στην $f_c(\theta)$ παραμόρφωσης $\epsilon_{c1}(\theta)$

Πίνακας 1: Θερμο-μηχανικές ιδιότητες σκυροδέματος. ^[5]

θερμοκρασία σκυροδέματος (°C)	$f_c(\theta) / f_c(20^\circ\text{C})$		$\epsilon_{c1}(\theta)/10^{-3}$
	πυριτικά αδρανή	ασβεστολιθικά 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	-

Παρατηρούμε ότι τα ασβεστολιθικά αδρανή πλεονεκτούν έναντι των πυριτικών.

3.3 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΓΙΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ

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

3.3.1 ΠΙΝΑΚΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ^[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			Ελάχιστες διαστάσεις σε mm					
Είδος σκυροδέματος	Εκθεση στην πυρκαγιά	Πλάτος υποστυλώματος “b” κ αξονική απόσταση οπλισμών “a”	F30	F60	F90	F120	F180 ***	F240 ***
Σκυροδέματα με	Όλες οι πλευρές	b a**	150 18	200 30	240 45	300 55	400	450
		b εναλλακτική a** λύση		240 25	300 35			

συνήθη αδρανής	Μία μόνο πλευρά	b α**	100 10	120 25	140 35	160 45	200 40	240 40
Ελαφροσκυροδέματα*	Όλες οι πλευρές	b α**	150 18	160 30	190 45	240 55	320	360
	Μία μόνο πλευρά	b α**	100 10	100 25	115 35	130 40	160 40	190 40

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

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

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

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

ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΟΔΗΓΙΕΣ			Ελάχιστες διαστάσεις σε mm					
Είδος σκυροδέματος	Τάση σκυροδέματος	Πάχος τοιχίου "t" και αξονική απόσταση "α"	F30	F60	F90	F120	F180	F240
Σκυροδέματα από συνήθη αδρανής	$\sigma < 0.15f_{ck}$	t α	120 10	120 15	140 25	160 35	200 55	240 75
	$\sigma < 0.30f_{ck}$	t α	120 12	140 25	170 35	220 45	300 65	400 85
Ελαφροσκυροδέματα *	$\sigma < 0.15f_{ck}$	t α	120 10	120 12	140 20	160 28	200 44	240 60
	$\sigma < 0.30f_{ck}$	t α	120 10	140 20	170 28	220 36	300 52	400 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]

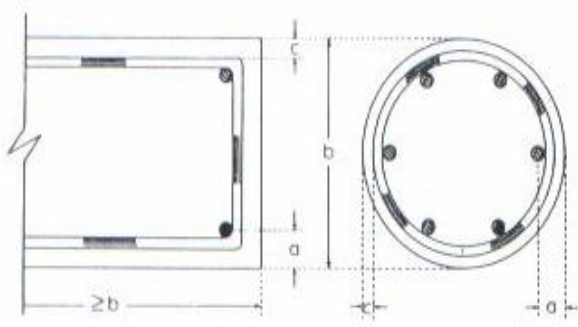
ΚΛΑΣΕΙΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ	ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΑ ΑΠΟ ΣΥΝΗΘΗ ΑΔΡΑΝΗ				
	Πλάτος δοκού "b" σε mm και αντίστοιχη ελάχιστη αξονική απόσταση "α" σε mm				Ελάχιστο πάχος κορμού (*) "b _w " σε mm
F30	b	80		200	80
	α	12		12	
F60	b	120	200	300	100
	α	25	12	12	

F90	b	150	250	400	100	
	a	35	25	25		
F120	b	200	300	500	120	220
	a	45	35	35		
F180	b	240		600	140	400
	a	50		50		
F240	b	280		700	160	600
	a	60		60		
				$\alpha_{st} = \alpha + 10 \text{ mm}$	$\alpha_{st} = \alpha$	

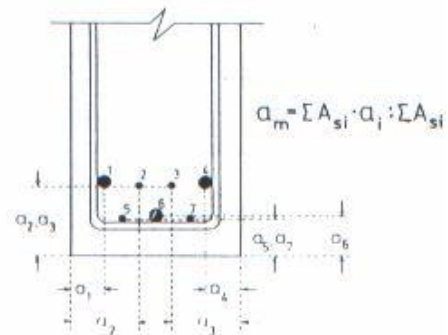
(όπου α_{st} είναι η αξονική απόσταση από την κατακόρυφη παρειά της δοκού)

* Σε δοκούς μορφής I, το ελάχιστο πάχος b_w 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).

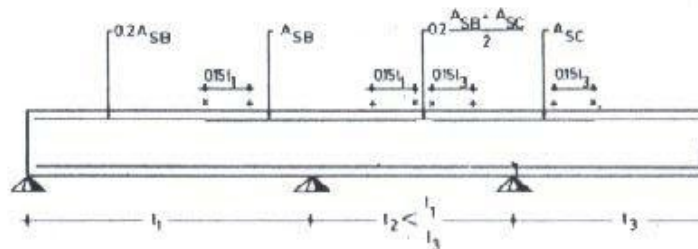
** Για τις περιπτώσεις ενδιάμεσων στηριγμάτων συνεχών δοκών με κίνδυνο πρόωρης καμπτοδιατμητικής θραύσεως : Δοκοί 2 ανοιγμάτων με συγκεντρωμένα φορτία κοντά στα στηρίγματα και με εξάντληση της οριακής παραμορφώσεως σκυροδέματος.



Σχήμα 6. Διαστάσεις δομικών στοιχείων : αξονική απόσταση “α” και σταθερή επικάλυψη οπλισμών “c”. [6]



Σχήμα 7. Στοιχεία για τον προσδιορισμό μιας “μέσης” αξονικής αποστάσεως ράβδων από τις παρειές. [6]



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

Σχήμα 8. Διευθέτηση του πάνω οπλισμού σε συνεχή δοκό. [6]

3.3.2 ΑΠΛΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ [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_0 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_0 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 εφελκυσόμενη και θλιβόμενη ζώνη.
- δ) Καθορισμός της κρίσιμης τάσης λόγω της θερμοκρασίας για τον θλιβόμενο και τον εφελκυσμένο οπλισμό.
- ε) Χρήση των κλασικών υπολογιστικών μεθόδων στην απομειωμένη διατομή για τον καθορισμό της οριακής φέρουσας αντοχής R_0 .
- στ) Σύγκριση της οριακής φέρουσας αντοχής R_0 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 κλασική μέθοδο υπολογισμού της φέρουσας ικανότητας της εκτεθειμένης στη φωτιά διατομής.

3.3.3 ΣΥΝΘΕΤΕΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ^{[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 εξιδανίκευση 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.

4. ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΤΙΚΕΣ ΕΠΕΝΔΥΣΕΙΣ^[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 μεπετόν, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα.

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

- εκτοξευόμενες 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 συνθετιμένες από περλίτη ή βερμικουλίτη
- πλάκες από γυψοκονίαμα

4.1. ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΕΣ ΑΝΟΡΓΑΝΕΣ ΙΝΕΣ

Παλαιότερα χρησιμοποιούταν αμιάντος. 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 επιπόνηση. Η μηχανική αντοχή μπορεί να βελτιωθεί με επικόλληση υαλοϋφάσματος, όπου να εφαρμοσθεί σοβάς με γύψο.

4.2. ΠΥΡΟΠΡΟΣΤΑΤΕΥΤΙΚΑ ΕΠΙΧΡΙΣΜΑΤΑ

Αυτά έχουν για αδρανές υλικό βερμικουλίτη ή περλίτη. Κατά κανόνα εφαρμόζονται πάνω σε μεταλλικό φορέα (από εκτεταμένο πλέγμα π.χ. νερβομετάλλ) 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 μεπετόκαρφα ένα συρματόπλεγμα. Ειδικά κινδυνεύει να αποκολληθεί το επίχρισμα.

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

4.3. ΠΥΡΟΠΡΟΣΤΑΤΕΥΤΙΚΑ ΧΡΩΜΑΤΑ

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. ΠΛΑΚΕΣ ΛΙΘΟΒΑΜΒΑΚΑ

Αποτελούνται από συμπιεσμένες ίνες με λίγη συνδετική ύλη, συνήθως υδρύαλο, και πρέπει να είναι ειδικού βάρους πάνω από 150 kg/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. ΠΛΑΚΕΣ ΒΕΡΜΙΚΟΥΛΙΤΗ Ή ΠΕΡΛΙΤΗ

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

kgf/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. Κατασκευάζονται σε πάχη 10 έως 30 mm. Επικολλώνται με πυράντοχη κόλλα στους φορείς ή στερεώνονται με μηχανικά μέσα.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

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 διείδυση 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».

Βιβλιογραφία

1. **Ολόσωμες Κατασκευές Τόμος 1.** F. Leonhardt – E. Mönning, Εκδόσεις Μ. Γκιούρδας.
2. **Κτιριακές Κατασκευές.** Heinrich Schmitt – Andreas Heene, Εκδόσεις Μ. Γκιούρδας.
3. **Σεμινάριο Πυροπροστασίας Γ' Μέρος.** Τεχνικά Χρονικά - Ιαν. - Μάρτιος 1987 – Έτος 56^ο – μηνιαία έκδοση Τ.Ε.Ε.
4. **Επίδραση Πυρκαγιάς Σε Φέροντες Οργανισμούς Από Οπλισμένο Σκυρόδεμα.** Αλέξης Χατζόπουλος, 6^ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, 1983.
5. **Υπολογισμός Κατασκευών Σκυροδέματος Σε Επιπόνηση Πυρκαγιάς.** Κυριάκος Παπαϊωάννου, 10^ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, 1991.
6. **Πρακτικός Σχεδιασμός Κατασκευών Από Ο.Σ. Έναντι Πυρκαγιάς.** Θ.Π. Τάσιος, 6^ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, 1983.
7. **Behavior Of Epoxy Repaired Beams Under Fire.** Joseph M. Plecnik, John M. Plecnik, J. H. Fogarty, J. R. Kurfees, Journal Of Structural Engineering A.S.C.E. April 1986.
8. **Analysis Of Structural Members Under Elevated Temperature Conditions.** K. W. Poh – I. D. Bennetts, Journal Of Structural Engineering A.S.C.E. April 1995.
9. **Analytical Methods To Evaluate Fire Resistance Of Structural Members.** J. A. Milke, Journal Of Structural Engineering A.S.C.E. October 1999.
10. **Επισκευή Φέροντος Οργανισμού Συγκροτήματος Μινιόν Μετά Την Πυρκαγιά Της 18/12/1980.** Γ. Σιγάλας, , 6^ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος 1983.