

ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΜΕΛΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ ΚΑΤΑ EC2

ΓΑΣΠΑΡΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ
ΖΑΧΑΡΙΑΔΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

Περίληψη

Η εργασία αυτή παρουσιάζει μια γενική περιγραφή της επίδρασης της φωτιάς, τόσο στο σκυρόδεμα και το χάλυβα όπλισης, όσο και στην καμπτική συμπεριφορά γραμμικών στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος, με έμφαση στις αντίστοιχες διατάξεις του Ευρωκώδικα 2 μέρος 1-2. Πραγματοποιήθηκε παραμετρική μελέτη της καμπτικής απομειωμένης αντοχής στοιχείων Ο.Σ. με χρήση μεθόδου του κανονισμού, καθώς και έλεγχος αυτών μέσω αποτελεσμάτων αναλύσεων με λογισμικό από άλλα papers. Τέλος αναφέρθηκαν φαινόμενα που επηρεάζουν την καμπτική αντοχή και σχετικές μέθοδοι επέμβασης.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Έρευνες σχετικά με την επίδραση της φωτιάς στο σκυρόδεμα και σε κατασκευές σκυροδέματος έχει πραγματοποιηθεί τουλάχιστον από το 1922, κυρίως σε σχέση με τα κτίρια. Οι κύριοι τομείς ενδιαφέροντος ήταν η κατανόηση της πολύπλοκης συμπεριφοράς του ίδιου του υλικού και η δομική ασφάλεια και ακεραιότητα του κτιρίου τόσο κατά τη διάρκεια, όσο και μετά τη φωτιά.

Σε μια πυρκαγιά, η κατασκευή πρέπει να μεταφέρει μηχανικά φορτία ώστε να εξασφαλιστεί ασφαλής εκκένωση και δράση των πυροσβεστικών. Η αντίσταση κατασκευών σκυροδέματος στη φωτιά είναι συχνά πολύ πάνω από τις ελάχιστες απαιτήσεις καθώς λόγω του ότι υπάρχει δομική συνέχεια στα περισσότερα κτίρια, υπάρχουν αποθέματα αντοχών που μπορεί να επιτρέψουν στην κατασκευή να επιβιώσει στις πυρκαγιές. Στις περισσότερες περιπτώσεις η συμπεριφορά του σκυροδέματος σε πυρκαγιά αξιολογείται από απλοποιημένες αναλυτικές-εμπειρικές τεχνικές, ωστόσο πολύ απλοποιημένες μέθοδοι δίνουν μια πρόχειρη εκτίμηση της συμπεριφοράς του σκυροδέματος σε πυρκαγιά. Μέσω λειτουργικού πεπερασμένων στοιχείων, μπορούμε να λάβουμε υπόψη και την επιρροή διαφόρων φυσικών φαινομένων, ωστόσο τα αποτελέσματα της ανάλυσης (μετατοπίσεις, χρόνος αντίστασης) μπορεί να διαφέρουν λόγω της περιπλοκότητας των φαινομένων αυτών. Επομένως τα προσφάτως αναπτυγμένα θερμικά και φυσικά μοντέλα, λόγω έλλειψης πειραματικής έρευνας, δεν είναι ακριβή. Ακόμα απαιτούνται σημαντικοί υπολογιστικοί πόροι για τις διάφορες αριθμητικές τεχνικές.

2. ΑΥΤΟΨΙΑ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

Μετά από μια πυρκαγιά απαιτείται κανονικά μια άμεση και εμπειριστατωμένη εκτίμηση, εφόσον επιτρέπεται είσοδος στην κατασκευή, πριν από την απομάκρυνση των συντριμμίων. Κατά την αυτοψία πραγματοποιείται μακροσκοπική εξέταση και ταξινόμηση των βλαβών για κάθε δομικό μέλος. Παρά το γεγονός ότι το σκυρόδεμα έχει πολύ καλή αντοχή σε πυρκαγιά, σταδιακά με την αύξηση της θερμοκρασίας εμφανίζονται βλάβες, όπου μπορούν να επιδιορθωθούν μετά από κατάλληλη αξιολόγηση. Βασισμένοι στην πείρα και σε συλλεγμένα δεδομένα από λεπτομερή μακροσκοπική έρευνα στα δομικά στοιχεία, μπορούν να καταγραφούν οι παρακάτω χαρακτηριστικές βλάβες:

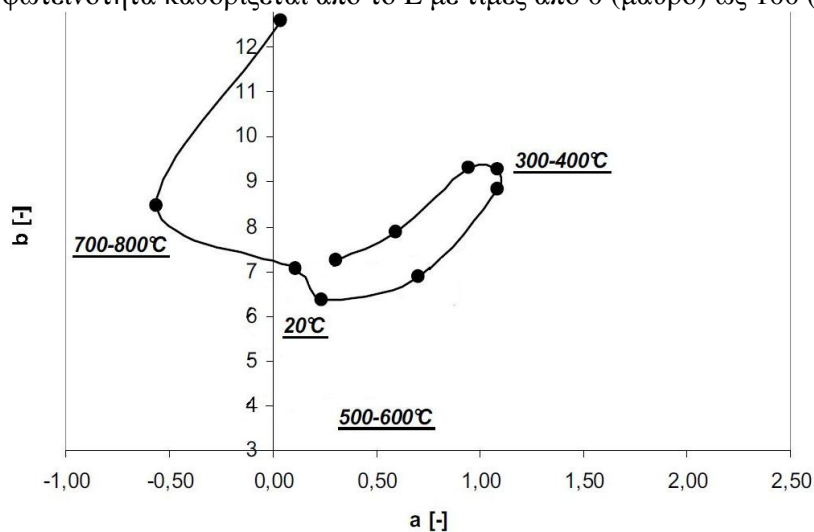
- Αλλαγή του χρώματος του σκυροδέματος (κόκκινο, γκριζοκίτρινο, κίτρινο)
- Σχισμές και ρωγμές μέσα στην μάζα του σκυροδέματος, ρωγμές κατά μήκος του κύριου οπλισμού σε κολώνες, δοκούς ή πλάκες
- Θραύση του σκυροδέματος και απώλεια τμημάτων σκυροδέματος κατά μήκους των γωνιών γραμμικών μελών μέχρι να εμφανιστεί ο οπλισμός

Μέθοδοι όπως η ανάλυση του χρώματος του σκυροδέματος και η βύθιση σε νερό παρέχουν μια επαρκή βάση για να εκτιμηθεί η θερμοκρασιακή ιστορία του σκυροδέματος. Έτσι γίνεται μια εκτίμηση της σοβαρότητας της έκθεσης στην φωτιά σε σχέση με μια ισοδύναμη standard δοκιμή.

- Αλλαγή χρώματος του σκυροδέματος[2]

Χρωματομετρία: Το σκυρόδεμα σε υψηλές θερμοκρασίες δέχεται αλλοιώσεις στο χρώμα του, γεγονός που βοηθά στον προσδιορισμό της θερμοκρασιακής στάθμης που έφτασε κατά την διάρκεια μιας πυρκαγιάς. Το χρώμα του σκυροδέματος μπορεί να μετρηθεί με την βοήθεια φασματοφωτομετρητή.

Παρακάτω παρουσιάζεται μια μορφή διαγραμματοποίησης των χρωματικών μεταβολών ανάλογα με την θερμοκρασιακή στάθμη. Το διάγραμμα έχει υπολογιστεί σε πειραματικές δοκιμές κατά τις οποίες για κάθε θερμοκρασιακή στάθμη, μετρίοταν μετά από ψύξη το αντίστοιχο χρώμα του σκυροδέματος. Στο διάγραμμα το a εκτείνεται από ματζέντα (θετικές τιμές) σε πράσινο (αρνητικές τιμές), το b κίτρινο (θετικές τιμές) σε μπλε (αρνητικές τιμές) ενώ η φωτεινότητα καθορίζεται από το L με τιμές από 0 (μαύρο) ως 100 (άσπρο).



Σχήμα 1 Διάγραμμα χρωματικών μεταβολών[2]

Γενικά το σκυρόδεμα αποκτά στα πρώτα στάδια της πυρκαγιάς ροζ χρώμα, έπειτα γκρι-ροζ και το τελικό στάδιο όπου αφορά βαριές βλάβες (αισθητές παραμορφώσεις, εκτεθειμένος οπλισμός στην πυρκαγιά, αρκετές ράβδοι έχουν λυγίσει) παίρνει γκρι ή φαιό κίτρινωπό χρώμα.[2]

| Χρώμα | Θερμοκρασία | |
|---------------|-------------|------|
| Κόκκινο-ροζ | 300 | 600 |
| Υπόλευκο γκρι | 600 | 900 |
| Κιτρινωπό | 900 | 1000 |

Πίνακας 1 Διάγραμμα χρωματικών μεταβολών[2],[8]

- Μέτρηση μεγέθους εσωτερικών ρωγμών[2]

Βύθιση σε νερό : Η θέρμανση του σκυροδέματος εισάγει θερμικές εντάσεις που οδηγούν σε ρηγμάτωση, ενώ παράλληλα χημικές διεργασίες έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση του κενού των πόρων. Ως εκ τούτου προκύπτει μια συνολική αύξηση του πορώδους του σκυροδέματος με την θερμοκρασία. Η βύθιση ενός δείγματος (από κάποιο πυρόπληκτο μέλος της

κατασκευής) σε νερό θα γεμίσει τους πόρους και έτσι με μέτρηση του βάρους του νερού που απορροφάται, μπορεί να ποσοτικοποιηθεί η εσωτερική βλάβη λόγω της θέρμανσης.

3. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΥΛΙΚΩΝ ΕΝΑΝΤΙ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ

3.1. ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

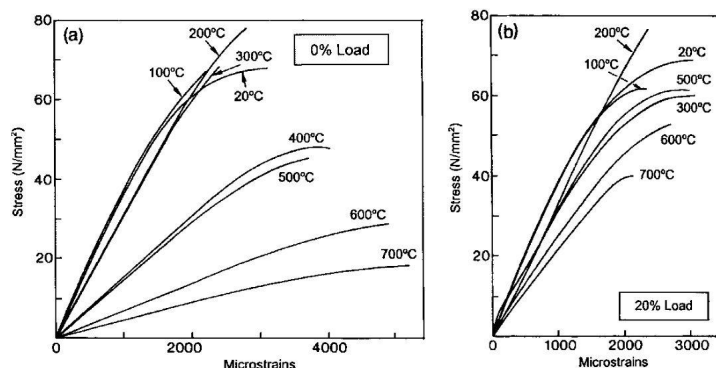
Η συμπεριφορά του σκυροδέματος σε πυρκαγιά είναι πολύπλοκη, καθώς το σκυρόδεμα είναι ένα σύνθετο υλικό με συστατικά διαφόρων θερμικών χαρακτηριστικών. Σημαντικά πλεονεκτήματα του σκυροδέματος σε μια πυρκαγιά είναι το ότι είναι άκαυστο και καλό μονωτικό υλικό με χαμηλή θερμική διάχυση. Ωστόσο, υπάρχουν δύο προβλήματα του σκυροδέματος σε φωτιά η επιδείνωση των μηχανικών ιδιοτήτων και η απότομη αποφλοιώση.

Η υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος κατά τη θέρμανση αποτελεί μια από τις πιο σημαντικές θεματικές περιοχές κατά τα τελευταία χρόνια. Αυτή μπορεί να αποδοθεί γενικά στις φυσικοχημικές μεταβολές στα συνθετικά υλικά του σκυροδέματος (πάστα τσιμέντου και αδρανή) καθώς και στην θερμική ασυμβατότητα μεταξύ τους. Άλλοι παράγοντες είναι ο τύπος της πυρκαγιάς (θερμοκρασία και ρυθμός θέρμανσης), το εφαρμοζόμενο φορτίο και η πιθανή παρεμπόδιση της απώλειας υγρασίας από την επιφάνεια του θερμαινόμενου σκυροδέματος.

Έχει παρατηρηθεί ότι το σκυρόδεμα δεν θραύεται στους 100°C, παρά το γεγονός ότι οι διαφορικές παραμορφώσεις αδρανών - τσιμέντου είναι ήδη υπερβολικά μεγάλες για να παραληφθούν από ελαστικές παραμορφώσεις. Αυτό οφείλεται στον παροδικό ερπυσμό, φαινόμενο που αναπτύσσεται κατά την πρώτη θέρμανση υπό φόρτιση. Ο παροδικός ερπυσμός είναι παραμορφώσεις πολύ μεγαλύτερες από τις ελαστικές και συμβάλλει σε σημαντική χαλάρωση και ανακατανομή των θερμικών τάσεων στο σκυρόδεμα. Κάθε ανάλυση θερμαινόμενου σκυροδέματος που αγνοεί τον ερπυσμό θα έδινε, επομένως, λανθασμένα αποτελέσματα, ιδιαίτερα για τις κολώνες που εκτίθενται σε πυρκαγιά.

Επιπλέον η παρουσία θλιπτικού φορτίου δρα ευεργετικά καθώς θέτει το υλικό σε θλίψη, συμπιέζοντας το κατά τη διάρκεια της θέρμανσης και αναστέλλοντας έτσι την ανάπτυξη των ρωγμών. Τόσο η θλιπτική αντοχή όσο και το μέτρο ελαστικότητας μειώνονται πολύ λιγότερο με την αύξηση της θερμοκρασίας για το σκυρόδεμα που θερμάνθηκε υπό φόρτιση.

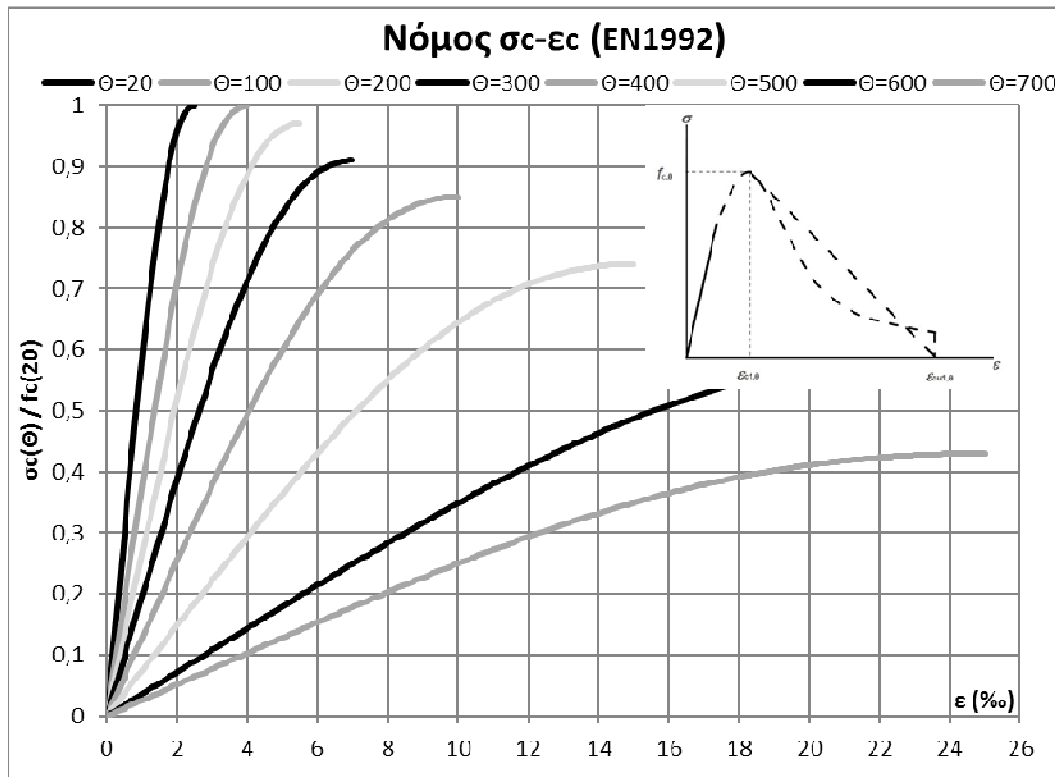
Τέλος, κατά την απόσβεση της πυρκαγιάς, η επιφάνεια του σκυροδέματος ψύχεται απότομα. Αντιθέτως ο πυρήνας της διατομής, λόγω της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας του σκυροδέματος, συνεχίζει να βρίσκεται σε υψηλές θερμοκρασίες. Έτσι η θερμότητα ακολουθεί πλέον την αντίστροφη πορεία, οδηγώντας σε ρηγματώσεις επιφάνειας και περαιτέρω μείωση της αντοχής.



Σχήμα 2 Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων για διαφορετικό φορτίο[3]

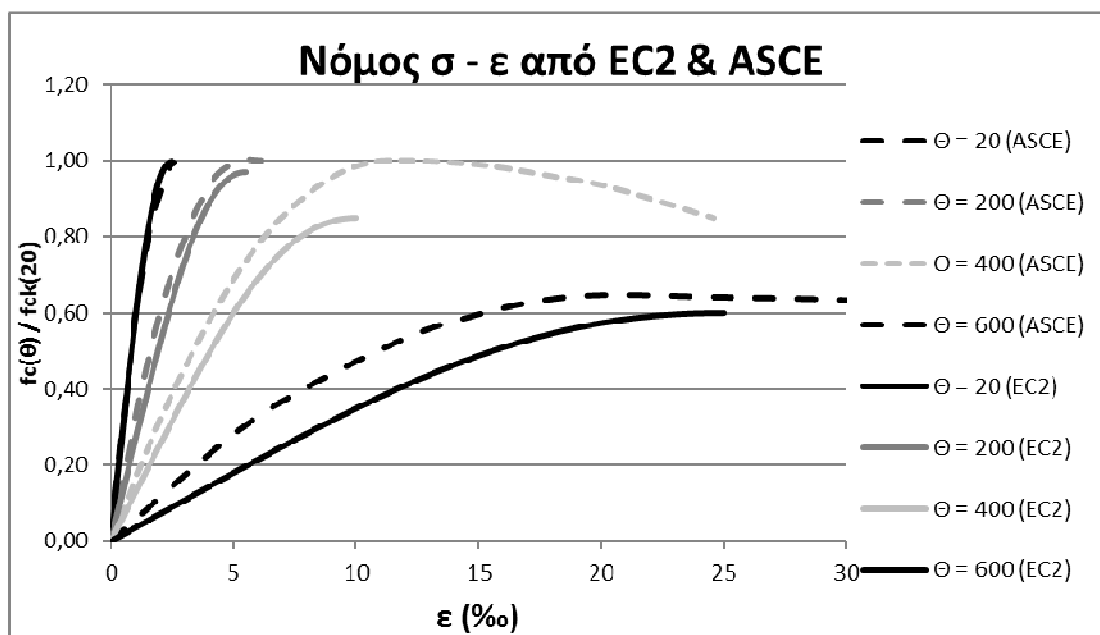
3.1.1. ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ- EC2

Οι τιμές που δίνονται στο σχετικό κεφάλαιο του EN1992 για τις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος βασίζονται σε αποτελέσματα δοκιμών μικρής ή μεγάλης διάρκειας (παροδική ή μόνιμη έκθεση). Η σχέση σ - ϵ του θλιβόμενου και εφελκόμενου σκυροδέματος όπως φαίνεται στο σχήμα έχει ένα παραβολικό τμήμα στην θλιβόμενη περιοχή και μπορεί να υιοθετηθεί για υπολογιστικούς λόγους ένα καμπύλο ή γραμμικό φθίνον τμήμα ως την θραύση. Το εφελκόμενο τμήμα αγνοείται καθώς η εφελκυστική συμπεριφορά του σκυροδέματος είναι πολύ ψαθυρή και αναξιόπιστη. Οι διάφορες παράμετροι του διαγράμματος προσδιορίζονται στον EN1992 συναρτήσει της θερμοκρασίας. Παρακάτω παρουσιάζονται η γενική μορφή του νόμου σ - ϵ , καθώς και καμπύλες σ - ϵ ασβεστολιθικών σκυροδεμάτων για διάφορες θερμοκρασίες κανονικοποιημένες ως προς την αντοχή $f_{ck}(20^{\circ}\text{C})$.



Σχήμα 3 Νόμος τάσεων - παραμορφώσεων σκυροδέματος κατά EN1992 [1]

Επιπλέον έγινε μία σύγκριση του νόμου τάσεων παραμορφώσεων του EN1992 με τον αντίστοιχο νόμο κατά τους Αμερικάνικους κανονισμούς (ASCE) και παρατηρήθηκε ότι δε παρουσιάζουν μεταξύ τους σημαντικές διαφορές.



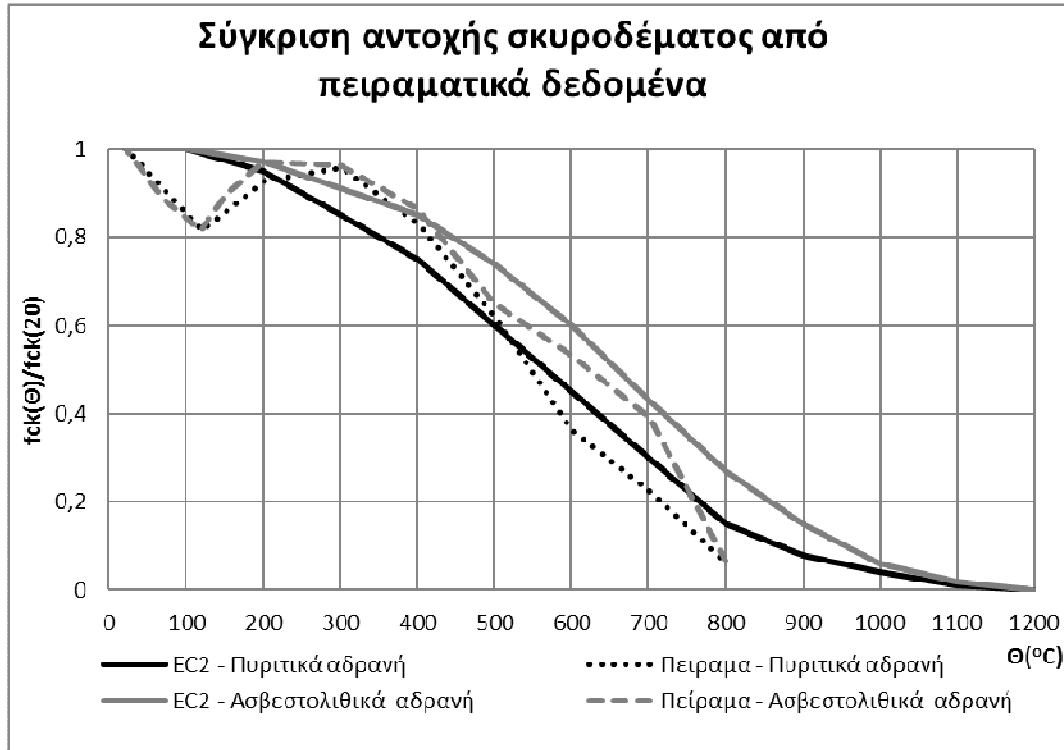
Σχήμα 4 Σύγκριση σ-ε EN1992 με ASCE[10]

3.1.2. ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ-ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Δεδομένου του μεγάλου αριθμού παραγόντων που επηρεάζουν την θλιπτική αντοχή του θερμαινόμενου σκυροδέματος, δεν αποτελεί έκπληξη το ότι οι μετρήσεις της θλιπτικής αντοχής μπορεί να δώσουν από χαμηλότερη (30%) έως υψηλότερη (120%) της αρχικής αντοχής. Έτσι δεδομένα για αντοχές θερμαινόμενου σκυροδέματος από διαφορετικές πηγές μπορεί να διαφέρουν σημαντικά, ενώ σε πολλές περιπτώσεις ακόμα μπορεί να φαίνονται και αντιφατικά. Ως εκ τούτου, η παρουσίαση της αντοχής όλων των σκυροδεμάτων σε μια ενιαία "μέση καμπύλη" καθίσταται ανακριβής.[2]

Παρακάτω παρουσιάζεται μια σύγκριση των ανηγμένων θλιπτικών αντοχών του σκυροδέματος κατά τον EN1992 με πειραματικά αποτελέσματα της απομειωμένης αντοχής σκυροδέματος για πυριτικό και ασβεστολιθικό τύπο σκυροδέματος. Κατά το πείραμα δυο κύβοι θερμάνθηκαν για κάθε επίπεδο θερμοκρασίας και έπειτα από αργή ψύξη υποβλήθηκαν σε θλίψη μέχρι αστοχίας.

Κατά την διάρκεια της θέρμανσης, η θλιπτική αντοχή μειώνεται ως μια τοπικά ελάχιστη περίπου στους 100°C. Πρόκειται για μια φαινομενική απώλεια, σε μεγάλο βαθμό αναστρέψιμη μετά την ψύξη και αποδίδεται στην αποδυνάμωση των φυσικών δυνάμεων Van der Waals. Συχνά, η αντοχή φαίνεται ότι αυξάνει σε ένα μέγιστο για θερμοκρασίες περίπου 200°C-300°C, ενώ για μεγαλύτερες θερμοκρασίες υπάρχει μια συνεχής μείωση.



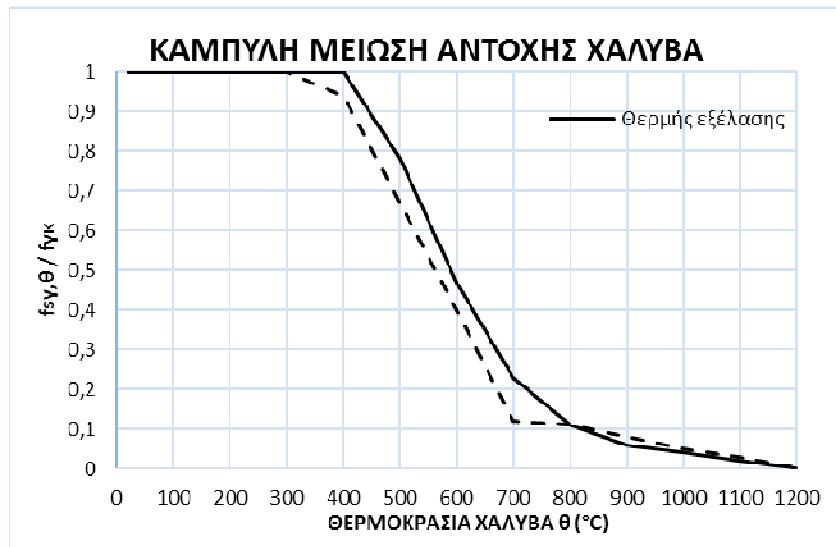
Σχήμα 5 Σύγκριση αντοχής από πειραματικά δεδομένα[1],[2]

3.2. ΧΑΛΥΒΑΣ

Η αύξηση της θερμοκρασίας έχει σημαντική επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα. Για θερμοκρασίες περίπου πάνω από 200 °C η καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων αρχίζει να παρουσιάζει μεταβολές. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία το όριο διαρροής, η εφελκυστική αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας μειώνονται. Γενικά για συνήθης κατηγορίες χάλυβα οπλισμού η θέρμανση σε θερμοκρασίες 500-550 °C για χρονική διάρκεια μέχρι και δύο ωρών δε προκαλεί ουσιαστική μεταβολή στις αρχικές μηχανικές ιδιότητες, εφόσον πραγματοποιηθεί ομαλή ψύξη μέχρι τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.[4]

Ακόμα ο συντελεστής θερμικής διαστολής του χάλυβα αυξάνεται για θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 200 °C, οπότε σε περίπτωση πυρκαγιάς προκαλείται θερμική ασυμβατότητα με το σκυρόδεμα, με αποτέλεσμα την εσωτερική ρηγμάτωση του τελευταίου.

Τέλος οι χάλυβες θερμής έλασης, οι οποίοι χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στην Ελλάδα, συμπεριφέρονται καλύτερα σε υψηλές θερμοκρασίες. Αυτό οφείλεται στο τρόπο κατασκευής τους.

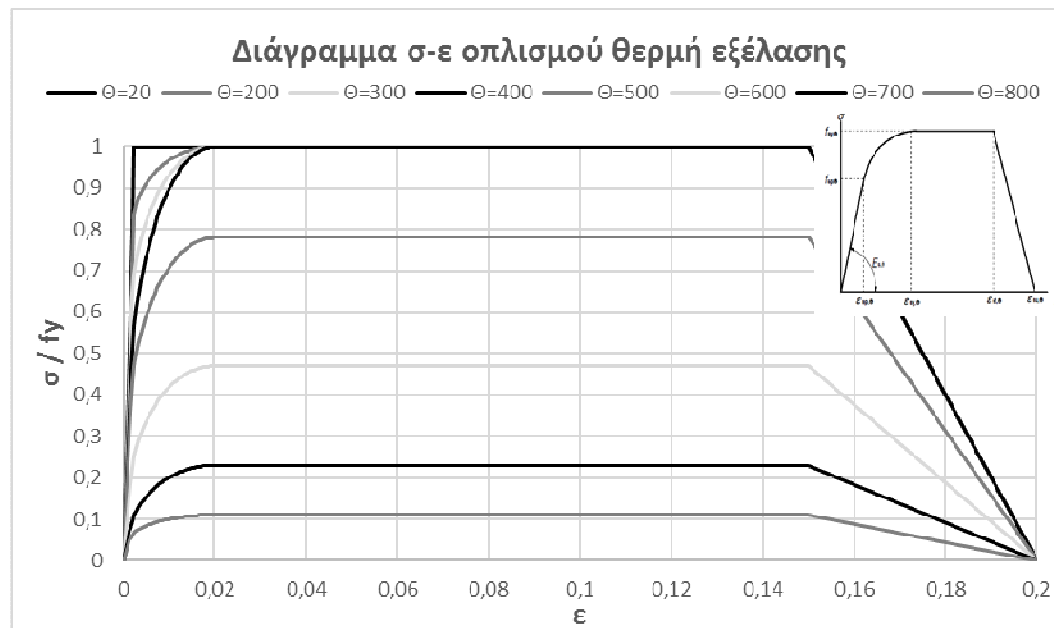


Σχήμα 6 Καμπύλη μείωσης αντοχής χάλυβα οπλισμού[1]

3.2.1. ΧΑΛΥΒΑΣ – EC2

Ομοίως με το σκυρόδεμα ο EN1992 προτείνει μια καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων για το θερμαινόμενο χάλυβα οπλισμού. Η καμπύλη αυτή, που παρουσιάζεται παρακάτω για διάφορες θερμοκρασίες, αποτελείται από τέσσερα τμήματα και ορίζονται μέσω τριών παραμέτρων

- της κλίσης του γραμμικού ελαστικού κλάδου, $E_{s,θ}$
- του ορίου αναλογίας, $f_{sp,θ}$
- της μέγιστης τάσης, $f_{sy,θ}$

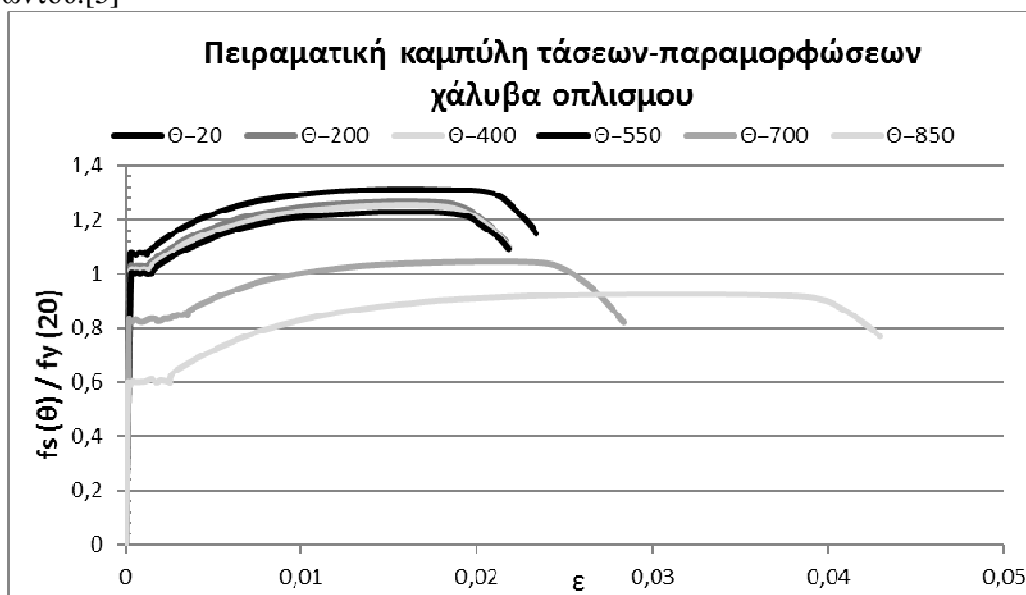


Σχήμα 7 Διάγραμμα σ-ε οπλισμού θερμής εξέλασης κατά EC2[1]

3.2.2. ΧΑΛΥΒΑΣ – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Από πειράματα που πραγματοποιήθηκαν σε ράβδους οπλισμού Tempcore υψηλής συνάφεια θερμής εξέλασης προέκυψαν δεδομένα από τον μέσο όρο τριών δοκιμών και μετρήθηκε το αντίστοιχο διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων.[5]

Έως τους 500 °C δεν υπήρχε σημαντική μεταβολή της αντοχής, αλλά εμφανίστηκε μια αξιοσημείωτη φθορά σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Η θέρμανση στους 850 ° C επίσης αυξάνει την ολκιμότητα. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι δοκιμή εφελκυσμού πραγματοποιήθηκε έπειτα από ομαλή ψύξη, κατά την οποία χάλυβας ανακτά μέρος των μηχανικών ιδιοτήτωντου.[5]



Σχήμα 8 Πειραματική καμπύλη σ-ε χάλυβα οπλισμού

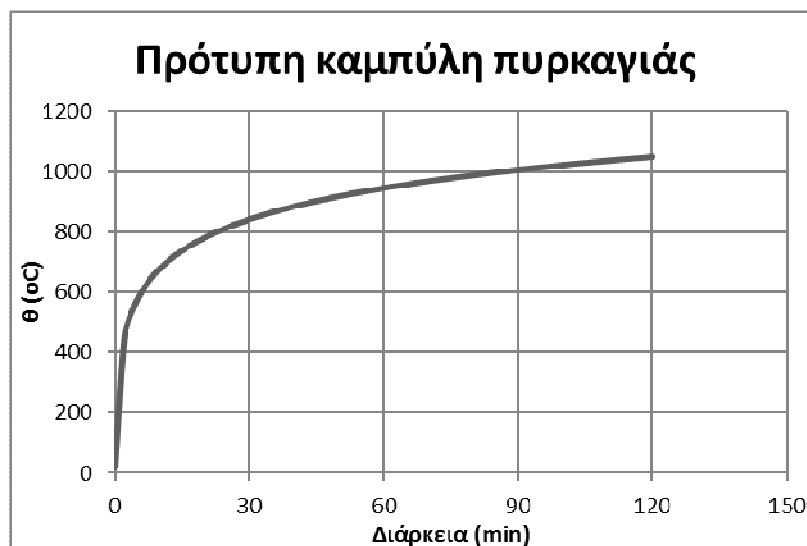
4. ΒΗΜΑΤΑ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

4.1. ΠΡΟΤΥΠΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ – ΧΡΟΝΟΥ

Με βοήθεια πειραματικών αποτελεσμάτων έχουν καθοριστεί ορισμένες σχέσεις για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας μιας πυρκαγιάς συναρτήσει του χρόνου. Οι σχέσεις αυτές εξαρτώνται από το είδος της πυρκαγιάς (εσωτερική ή εξωτερική), το βαθμό αερισμού και την καύσιμη ύλη (υδρογονάνθρακες, μηχανήματα, έπιπλα κλπ)

Ωστόσο ο σχεδιασμός δομικών μελών από οπλισμένο σκυρόδεμα έναντι πυρκαγιάς έχει στηριχθεί κυρίως στη πρότυπη καμπύλη πυρκαγιάς (ISO 834) και η οποία φαίνεται παρακάτω:

$$T_g = T_0 + 345 \log_{10}(1 + 8t) \quad (1)$$



Σχήμα 9 Πρότυπη καμπύλη πυρκαγιάς ISO 834[1]

Συγκριτικά, οι πραγματικές πυρκαγιές έχουν μια πιο αργή ή μεγαλύτερη φάση ανάπτυξης, και οι θερμοκρασίες μπορεί να είναι υψηλότερες από τις θερμοκρασίες της πρότυπης καμπύλης. Η πρότυπη καμπύλη θερμοκρασίας – χρόνου, ως εκ τούτου, αντιστοιχεί σε μια σοβαρή πυρκαγιά, αλλά όχι στην αυστηρότερη δυνατή φωτιά.

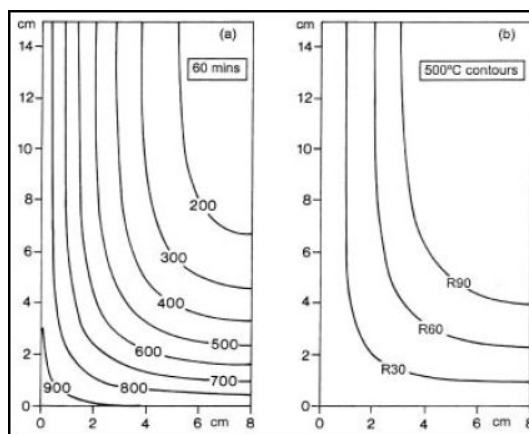
4.1.1. ΚΡΙΣΙΜΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ

Για τις κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος μπορούν να ορισθούν τρεις κρίσιμες θερμοκρασίες. Από πειραματικές ενδείξεις προκύπτει ότι οι θερμοκρασίες της επιφάνειας, όταν εμφανίζεται αποφλοίωση κυμαίνονται από περίπου 250-420°C, ανάλογα με το ρυθμό θέρμανσης και τα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος. Η κρίσιμη θερμοκρασία έναρξης απώλειας αντοχής εξαρτάται από τον τύπο του σκυροδέματος και είναι περίπου στους 300 °C για πυριτικά σκυροδέματα. Τέλος, η κρίσιμη θερμοκρασία γενικής απώλειας της φέρουσας ικανότητας για σκυροδέματα τύπου Πόρτλαντ βρίσκεται στο διάστημα 550-600°C.[3]

4.2. ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΑ ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η γνώση της κατανομής της θερμοκρασίας σε κατασκευές σκυροδέματος αποτελεί το πρώτο βασικό βήμα για την κατανόηση της συμπεριφοράς της κατασκευής στη φωτιά. Οι θερμοκρασίες του αέρα σε πυρκαγιές συχνά υπερβαίνουν τα 900°C. Ωστόσο, οι καλές μονωτικές ιδιότητες του σκυροδέματος σημαίνει ότι η θερμοκρασιακή διαβάθμιση είναι μεγάλη και μόνο η θερμοκρασία του εξωτερικού στρώματος είναι σημαντικά αυξημένη, ενώ στο εσωτερικό παραμένει συγκριτικά χαμηλή. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένα θερμικό προφίλ δοκού διαστάσεων 300x160mm (Παράρτημα Α EN1992-1-2) που εκτίθεται στις τρεις πλευρές από πρότυπη ISO 834 φωτιά για χρονική διάρκεια μίας ώρας.[3]

Η θερμοκρασία σε μία δεδομένη απόσταση από την εκτεθειμένη επιφάνεια θα είναι



Σχήμα 10 Θερμικό προφίλ δοκού 300x160mm[3]

υψηλότερη στις γωνίες ενός στοιχείου που οφείλεται στη μετάδοση θερμότητας και από τις δύο επιφάνειες. Έτσι, το προφίλ των ισοθερμικών μιας διατομής είναι στρογγυλεμένο στις γωνίες.

4.3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΓΙΑ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΑΝΤΟΧΩΝ

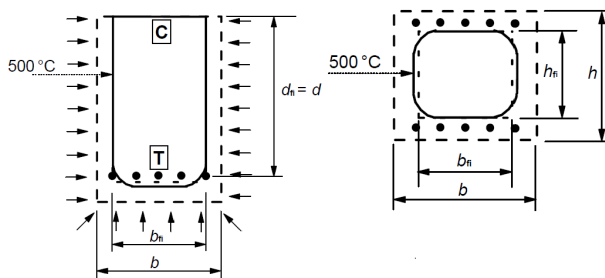
4.3.1. ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ

Οι απλοποιημένες μέθοδοι υπολογισμού για τον καθορισμό της οριακής αντοχής διατομών υπό υψηλή θερμοκρασία βασίζονται στις ισόθερμες καμπύλες για φορείς σκυροδέματος που εκτίθενται σε πυρκαγιά μπορεί να προκύψουν μέσω πειραματικών δοκιμών ή υπολογισμών. Οι ισόθερμες που δίνονται στο Παράρτημα Α μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον καθορισμό της κατανομής της θερμοκρασίας σε διατομές σκυροδέματος για έκθεση στην πρότυπη πυρκαγιά μέχρι τη στιγμή της μέγιστης θερμοκρασίας αερίων.

➤ ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΙΣΟΘΕΡΜΗΣ ΤΩΝ 500°C Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΝΕΡΓΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ [1]

Η μέθοδος αυτή είναι εφαρμόσιμη για πρότυπη έκθεση σε πυρκαγιά και για οποιοδήποτε άλλες χρονοϊστορίες θέρμανσης που προκαλούν παρόμοια πεδία θερμότητας στο μέλος που εκτίθεται σε πυρκαγιά.

Η απλοποιημένη αυτή μέθοδος υπολογισμού στηρίζεται στην υπόθεση ότι το πάχος του κατεστραμμένου στρώματος σκυροδέματος ισούται με το μέσο βάθος της ισόθερμης των 500°C στη θλιπτική περιοχή της διατομής. Το κατεστραμμένο σκυρόδεμα-δηλαδή σκυρόδεμα με θερμοκρασίες άνω των 500°C -δεν



Σχήμα 11 Μέθοδος των 500°C [1]

συμβάλει στην ικανότητα μεταφοράς φορτίου του μέλους, ενώ η εναπομένουσα διατομή θεωρείται ότι διατηρεί πλήρως τις αρχικές τιμές της αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας. Κριτήριο εφαρμογής της μεθόδου είναι η ύπαρξη ελάχιστων διαστάσεων μέλους, ανάλογα με τον χρόνο πυραντίστασης ή την πυκνότητα του θερμικού φορτίου. Μια σημαντική σημείωση είναι ότι η επιλογή της ισόθερμης θερμοκρασίας εξαρτάται από τον τύπο του σκυροδέματος που χρησιμοποιείται και την απώλεια της χαρακτηριστικής αντοχής του έναντι της θερμοκρασίας. Για ορισμένα σκυροδέματα, η ισόθερμη θερμοκρασία μπορεί να είναι κάτω από 500°C, ή ακόμα και κάτω από 400°C.

Η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοσθεί για τον υπολογισμό διατομών οπλισμένου σκυροδέματος σε κάμψη, αξονική δύναμη ή συνδυασμό τους και τα βασικά της βήματα παρατίθενται παρακάτω:

- Προσδιορισμός της ισόθερμης των 500°C για την συγκεκριμένη έκθεση σε πυρκαγιά, πρότυπη πυρκαγιά ή παραμετρική πυρκαγιά.
- Προσδιορισμός νέου πλάτους b_f και νέου δρόντος ύψους d_f της διατομής, εξαιρώντας το σκυρόδεμα εκτός της ισόθερμης των 500°C. Οι στρογγυλεμένες γωνίες των ισόθερμων μπορούν να ληφθούν με προσέγγιση της πραγματικής μορφής της ισόθερμης προς ορθογώνιο ή τετράγωνο
- Καθορισμός της θερμοκρασίας των ράβδων οπλισμού στις ζώνες εφελκυσμού και θλίψης. Η θερμοκρασία των μεμονωμένων ράβδων οπλισμού μπορεί να προσδιοριστεί από τις ισόθερμες καμπύλες του Παραρτήματος Α του EN1992-1-2 ή από εγχειρίδια και λαμβάνεται ως η θερμοκρασία στο κέντρο της ράβδου. Ορισμένες από τις ράβδους οπλισμού ενδεχομένως να βρίσκονται εκτός της μειωμένης διατομής, εντούτοις οι ράβδοι

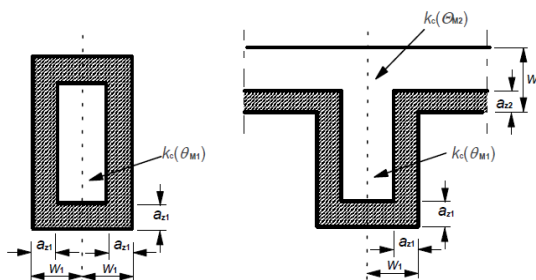
αυτές μπορούν να περιληφθούν στον υπολογισμό της οριακής φέρουσας ικανότητας της εκτεθειμένης σε πυρκαγιά διατομής.

- Καθορισμός της μειωμένης αντοχής του οπλισμού λόγω θερμοκρασίας.
- Χρήση συμβατικών μεθόδων υπολογισμού στην μειωμένη διατομή για τον καθορισμό της οριακής φέρουσας ικανότητας με την αντοχή των ράβδων οπλισμού.

➤ ΜΕΘΟΔΟΣ ΖΩΝΩΝ[1]

Η μέθοδος ζωνών βασίζεται στην αρχή ότι η διατομή που έχει υποστεί βλάβη από την πυρκαγιά μειώνεται αγνοώντας μία βλαμμένη ζώνη στις πλευρές που εκτίθενται στην πυρκαγιά.

Η διατομή αρχικά υποδιαιρείται σε έναν αριθμό ($n \geq 3$) παράλληλων ζωνών ίσου πάχους w με ορθογωνικά στοιχεία, σε κάθε μία από τις οποίες υπολογίζεται η μέση θερμοκρασία και η αντίστοιχη μέση θλιπτική αντοχή $f_{cd}(\theta)$ καθώς και το μέτρο ελαστικότητας. Στη συνέχεια προσομοιώνεται μια νέα, μειωμένη της αρχικής, διατομή στην οποία αγνοείται η ζώνη βλάβης πάχους a_z στις πλευρές που έχουν εκτεθεί στην πυρκαγιά. Τα πάχη w και a_z καθορίζονται σαφώς από τις αντίστοιχες διατάξεις το EN1992-1-2.



Σχήμα 12 Μέθοδος ζωνών[1]

Η μέθοδος των ζωνών συνιστάται κυρίως για μικρές διατομές και για λυγηρά υποστυλώματα, αλλά ισχύει μόνον για την πρότυπη πυρκαγιά. Η μέθοδος αυτή είναι πιο επίπονη, αλλά ακριβέστερη από την μέθοδο της ισόθερμης των 500°C, ειδικά για μικρά υποστυλώματα. Η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοσθεί για τον υπολογισμό διατομών οπλισμένου σκυροδέματος σε κάμψη, αξονική δύναμη ή συνδυασμό τους

4.3.2. ΠΡΟΗΓΜΕΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ[1]

Οι προηγμένες μέθοδοι υπολογισμού βασίζονται στη ρεαλιστική ανάλυση του φορέα υπό την έκθεση σε πυρκαγιά, στηρίζονται στη θεμελιώδη φυσική συμπεριφορά των υλικών και δίνουν αξιόπιστη προσέγγιση της αναμενόμενης συμπεριφοράς των υπόψη δομικών στοιχείων υπό συνθήκες πυρκαγιάς. Οι μέθοδοι αυτή περιλαμβάνουν τη διερεύνηση πολλών φαινομένων που επηρεάζουν άμεσα και έμμεσα τον υπολογισμό και των παραμορφώσεων και των εντάσεων στη διατομή. Ορισμένοι από τους παράγοντες αυτούς αναφέρονται παρακάτω:

- Η ανάπτυξης και κατανομής της θερμοκρασίας εσωτερικά των δομικών μελών.
- Η μηχανική συμπεριφορά του φορέα ή οποιουδήποτε τμήματός της κατασκευής.
- Η επιρροή των θερμικών τάσεων και παραμορφώσεων λόγω αύξησης της θερμοκρασίας και θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ τμημάτων του φορέα ή των μελών του.
- Ελέγχεται το κατά πόσον το μέγεθος των παραμορφώσεων που προκύπτουν από τον υπολογισμό για την οριακή κατάσταση αστοχίας, δεν παραβιάζει το συμβιβαστό των παραμορφώσεων μεταξύ όλων των τμημάτων του φορέα.
- Λαμβάνει επίσης υπόψη γεωμετρική μη-γραμμικότητα όταν χρειάζεται, για τα προσομοιώματα της μηχανικής απόκρισης

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό οι προηγμένες μέθοδοι υπολογισμού δίνουν πολύ καλά αποτελέσματα για το σύνολο των δυνατών περιπτώσεων πυρκαγιάς, όχι μόνο σε μεμονωμένα μέλη, αλλά και για το σύνολο ενός φορέα. Ωστόσο είναι αρκετά πολύπλοκες και μπορούν να εφαρμοστούν μόνο μέσα από εξειδικευμένο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων, τα όποια σε αρκετές περιπτώσεις δεν είναι εύκολα προσβάσιμα από το μέσο μελετητή.

5. ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΑΝΤΟΧΗΣ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΜΕΛΩΝ

5.1. ΔΟΚΟΙ

Για τη μελέτη της συμπεριφοράς των δοκών ενός φορέα έναντι πυρκαγιάς, θεωρήσαμε δύο δοκούς διαφορετικών διαστάσεων, με τρεις περιπτώσεις οπλισμών και τις υποβάλαμε σε πρότυπη πυρκαγιά στις τρεις πλευρές τους. Ακόμα θεωρήσαμε και διαφορετικό πάχος επικάλυψης οπλισμού, ανάλογα με τις διαστάσεις. Επίσης έγινε προσπάθεια, τα ποσοστά οπλισμού σε κάθε περίπτωση να μην παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις, προκειμένου τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα. Σημαντική σημείωση είναι ότι σε όλες τις περιπτώσεις αγνοήθηκε ο θλιβόμενος οπλισμός.

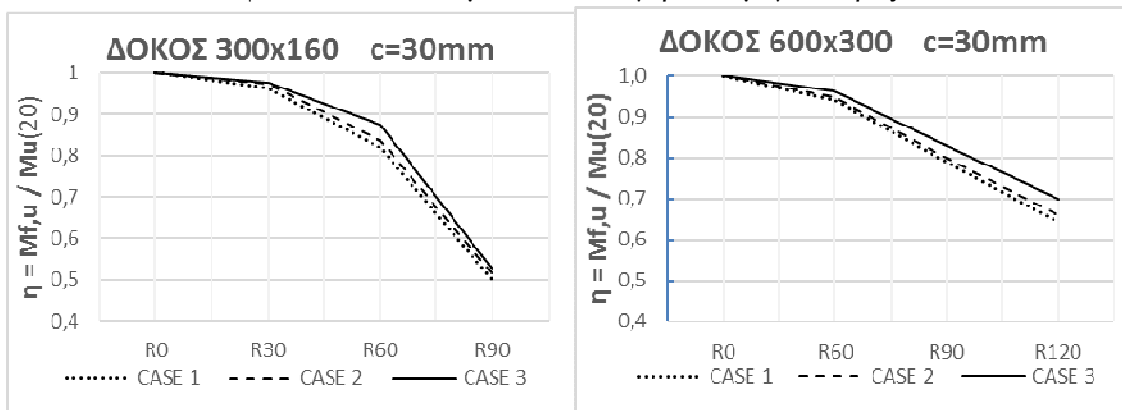
| Διαστάσεις (mm) | Επικαλύψεις (mm) | Case 1 | Case 2 | Case 3 |
|-----------------|------------------|---------------|---------------|---------------|
| 300 x 160 | 20 , 30 | 2Ø12 (0.47 %) | 2Ø14 (0.64 %) | 3Ø12 (0.71 %) |
| 600 x 300 | 20 , 30 , 40 | 2Ø14 (0.34 %) | 4Ø18 (0.57 %) | 6Ø16 (0.67 %) |

Πίνακας 2 Στοιχεία δοκών

Ο υπολογισμός των αντοχών έγινε χρησιμοποιώντας την μέθοδο των 500°C[9] και τις ισόθερμες καμπύλες από το παράτημα Α του EN1992-1-2. Ο χάλυβας οπλισμού, ο οποίος θεωρούμε ότι είναι θερμής εξέλασης, ακολουθεί την παρακάτω καμπύλη μείωσης αντοχής συναρτήσει της θερμοκρασίας, σύμφωνα με τον EN1992-1-2, όπως παρουσιάστηκε στο σχήμα 5. Το σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν κατηγορίας C30/35, ενώ ο χάλυβας οπλισμού ήταν κατηγορίας B500c.

Μέσα από αυτή τη διαδικασία παρήχθησαν ένας μεγάλος αριθμός διαγραμμάτων, όπου μετά από μελέτη τους καταλήξαμε στους παρακάτω παράγοντες που επηρεάζουν την αντοχή των δοκών έναντι πυρκαγιάς

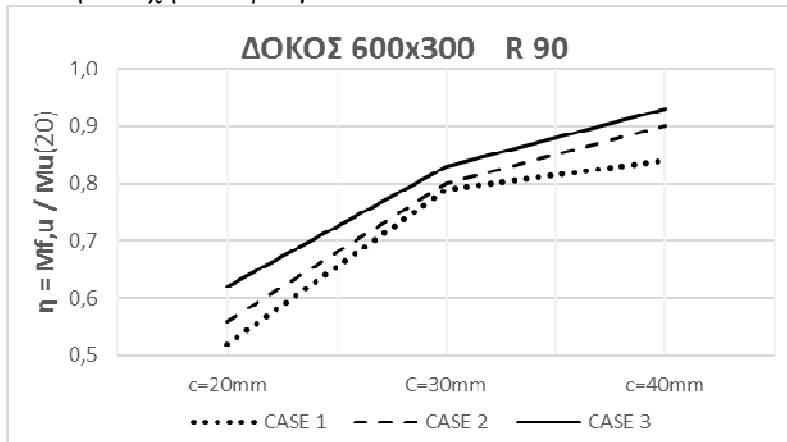
- **Διαστάσεις δοκών:** Οι μεγαλύτερες σε μέγεθος δοκοί παρουσιάζουν καλύτερη συμπεριφορά έναντι σε υψηλές θερμοκρασίες, εξαιτίας του γεγονότος ότι θεωρείται δομικά αδρανές μικρότερη-αναλογικά-ποσότητα σκυροδέματος. Έτσι ο μοχλοβραχίονας θλιπτικών και εφελκυστικών δυνάμεων είναι συγκριτικά μεγαλύτερος.



Σχήμα 14 Δοκός 300x160mm για επικάλυψη c=30mm

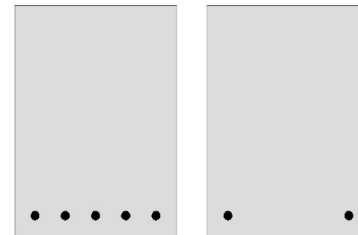
Σχήμα 13 Δοκός 600x300mm για επικάλυψη c=30mm

- Επικάλυψη:** Η ύπαρξη μεγαλύτερης επικάλυψης σκυροδέματος δρα ως μονωτικό υλικό για τις ράβδους οπλισμού, στις οποίες αναπτύσσονται χαμηλότερες θερμοκρασίες. Επομένως όσο αυξάνεται η επικάλυψη σκυροδέματος που έχει τοποθετηθεί, αυξάνεται αντίστοιχα και η αντοχή σε πυρκαγιά.

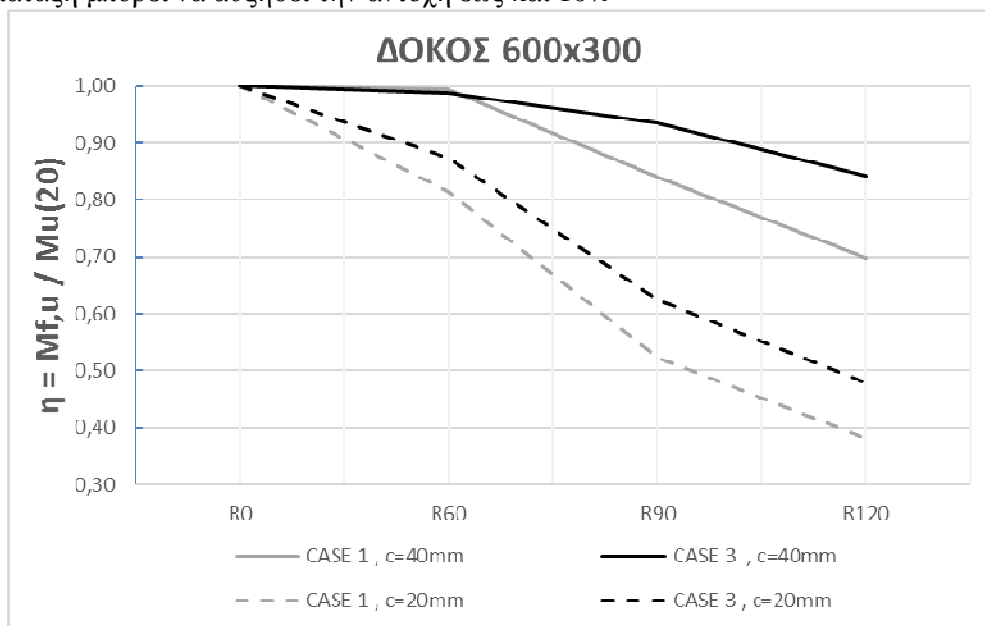


Σχήμα 15 Δοκός 600x300mm για χρονική διάρκεια πυρκαγιάς 90 λεπτών

- Διάταξη οπλισμού:** Σημαντικός παράγοντας στην αντοχή και στην κυρίως στη συμπεριφορά των δοκών σε υψηλές θερμοκρασίες αποτελεί η θέση του χάλυβα οπλισμού στην εφελκόμενη ζώνη. Οι ράβδοι δεν πρέπει να είναι συγκεντρωμένες στα άκρα της δοκού, καθώς όπως προαναφέρθηκε η θερμοκρασία σε μία δεδομένη απόσταση από την εκτεθειμένη επιφάνεια θα είναι υψηλότερη στις γωνίες. Επομένως η απομείωση της αντοχής του χάλυβα είναι μεγαλύτερη και ταχύτερη, όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα για τα Case 1 & 3 της δοκού 600x300mm. Άρα η κατάλληλη διάταξη μπορεί να αυξήσει την αντοχή έως και 10%.



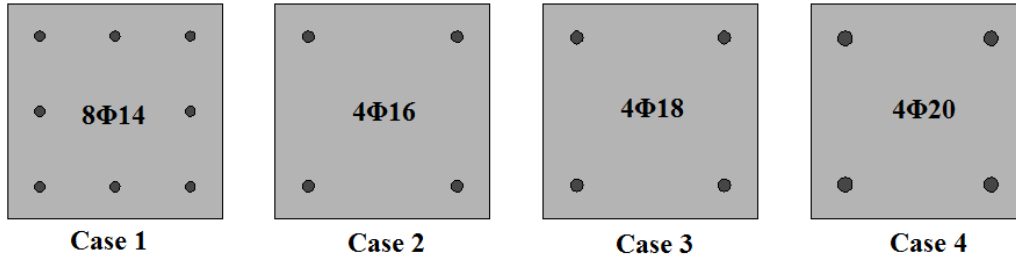
Σχήμα 16 Λεπτομέρεια για διάταξη οπλισμού



Σχήμα 17 Δοκός 600x300mm για Case 1 & 3 και επικαλύψεις c=20mm, c=40mm

5.2. ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΑ

Το πρώτο στάδιο μελέτης ενός γραμμικού στοιχείου είναι ο προσδιορισμός της θερμοκρασιακής κατανομής στην διατομή του. Αυτός πραγματοποιείται με την βοήθεια του παραρτήματος Α του EN1992, στο οποίο δίνονται πληροφορίες μόνο για διατομές 300*300mm. Έτσι μελετήθηκε η συμπεριφορά τεσσάρων διαφορετικών περιπτώσεων όπλισης και ορίστηκαν διαφορετικές επικαλύψεις και αξονικά φορτία. Οι υπολογισμοί βασίστηκαν στην μέθοδο της ισόθερμης των 500°C και στην θεώρηση ορθογωνικού μπλοκ για το σκυρόδεμα. Οι διάφορες περιπτώσεις φαίνονται παρακάτω:

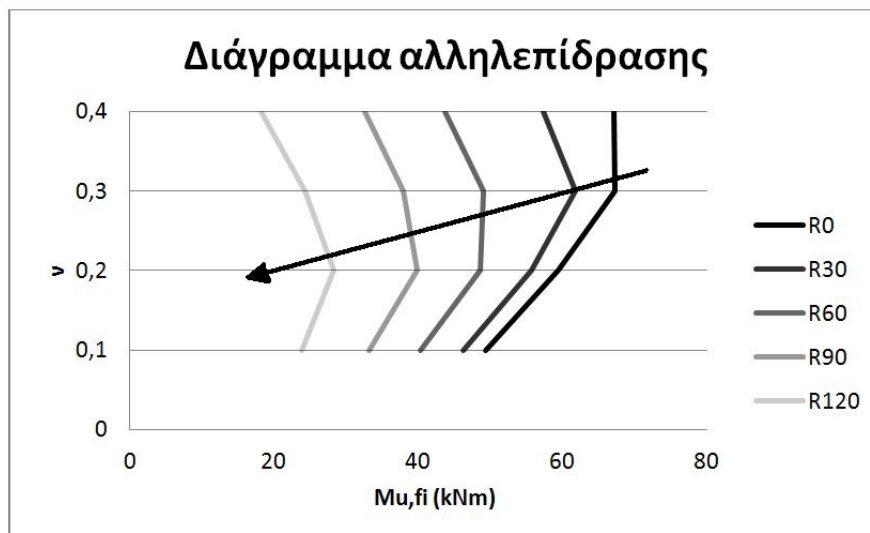


Σχήμα 18 Λεπτομέρεια όπλισμών υποστυλωμάτων

Κάθε μια περίπτωση υπολογίστηκε για επικαλύψεις 2,3 και 4cm και αξονικό 0.1 ως 0,4. Ακόμα θεωρήθηκαν υλικά χάλυβας 500 MPa και σκυρόδεμα C20/25. Από τα αποτελέσματα ελέγχθηκε η επιρροή του αξονικού, της επικάλυψης και της ποιότητας του σκυροδέματος στην καμπτική αντοχή των υποστυλωμάτων.

• Ένταση Αξονικού:

Παρατηρήθηκε ότι για τα επίπεδα έντασης από 0.1 ως 0.4 η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί μετατόπιση του "γόνατου" στα διαγράμματα αλληλεπίδρασης σε όλες τις περιπτώσεις όπλισης. Δηλαδή με την αύξηση της θερμοκρασίας το αξονικό ενδέχεται να δρα ευεργετικά ή επιβαρυντικά στην απομειωμένη (λόγω πυρκαγιάς) καμπτική αντοχή του υποστυλώματος. Αυτό φαίνεται για παράδειγμα στο παρακάτω διάγραμμα N-M για την Case 2, με επικάλυψη 4cm. Επομένως μεγάλες τιμές αξονικού (π.χ. $\nu=0.4$) προκαλούν ταχύτερες μειώσεις της αντοχής. Στην περίπτωση αυτή ($\nu=0.4$) υπήρξε πτώση της αντοχής από R0 σε R120 κατά 73%.



Σχήμα 19 Διάγραμμα αλληλεπίδρασης ν -M

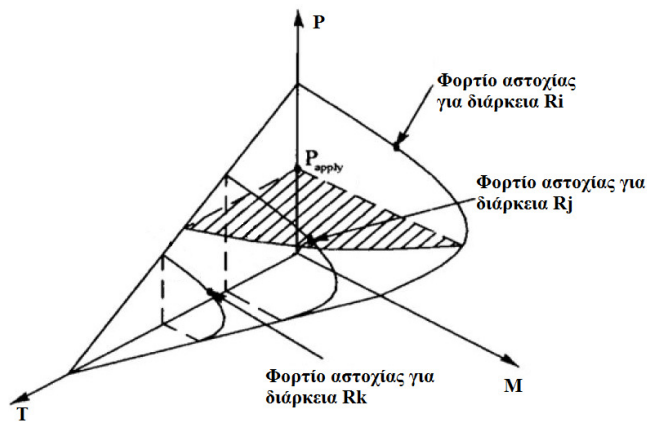
Στον πίνακα παρακάτω φαίνεται ότι με την αύξηση της διάρκειας της πυρκαγιάς όσο μικρότερο είναι το επίπεδο φόρτισης τόσο μικρότερη είναι η απώλεια αντοχής.

| | R0 | R30 | R60 | R90 | R120 |
|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 0,1 | 49,4 | 46,3 | 40,3 | 33,2 | 23,8 |
| 0,2 | 59,5 | 55,8 | 48,6 | <u>39,9</u> | <u>28,3</u> |
| 0,3 | <u>67,3</u> | <u>61,9</u> | <u>49,0</u> | 38,0 | 24,4 |
| 0,4 | 67,1 | 57,4 | 43,7 | 32,5 | 18,2 |

Πίνακας 3 Απομειωμένες καμπτικές αντοχές για case2, $c=4\text{cm}$.

• Επικάλυψη:

Η μορφή του διαγράμματος αλληλεπίδρασης ενός γραμμικού καμπτόμενου στοιχείου υπό θλίψη επηρεάζεται από την αύξηση της θερμοκρασίας και εμφανίζει την μορφή του σχήματος στην εικόνα [7]. Η σύγκλιση των διαγραμμάτων N-M προς το μηδέν σε υψηλές θερμοκρασιακές στάθμες είναι λογική καθώς οφείλεται στην πτώση της καμπτικής αντοχής με την θερμοκρασία.



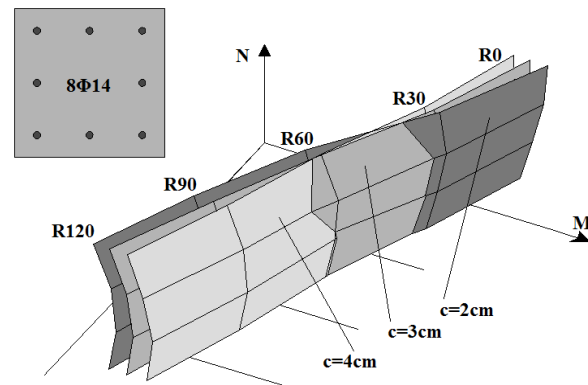
Σχήμα 20 Καμπύλη αντοχής v-M συναρτήσει της θερμοκρασίας[7]

Τα αποτελέσματα για τις τέσσερις περιπτώσεις, διάρκειες R0-R120, αξονικά 0.1-0.4 και επικαλύψεις 2cm-4cm τυπώθηκαν σε διάγραμμα όπου ο κάθετος άξονας στο επίπεδο N-M αντιστοιχίστηκε με την διάρκεια της πυρκαγιάς R. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως η επικάλυψη παίζει σημαντικό ρόλο στην ταχύτητα με την οποία το διάγραμμα αλληλεπίδρασης

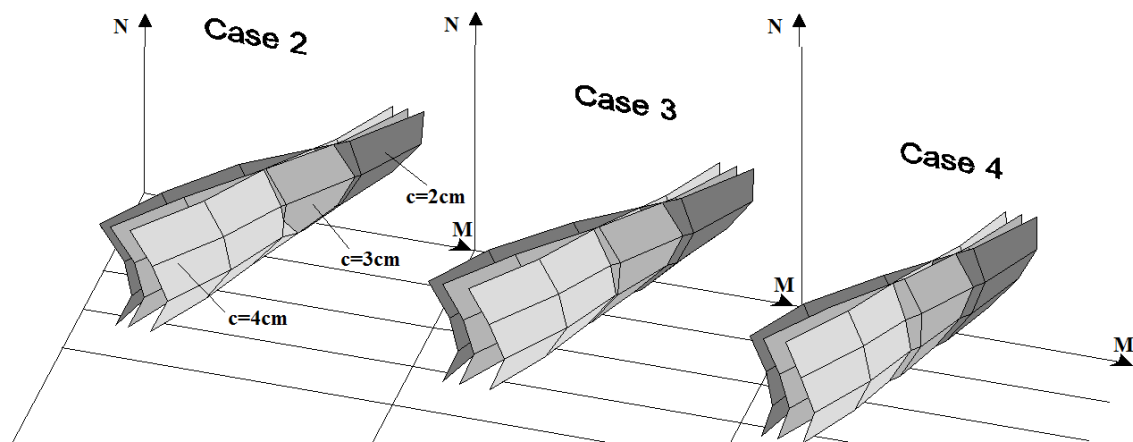
συγκλίνει στο μηδέν.

Σε όλες τις περιπτώσεις, η αντοχή για R0 με επικάλυψη 2cm προκύπτει μεγαλύτερη από την αντίστοιχη για 4cm. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην τοποθέτηση οπλισμών πιο μακριά από τον ουδέτερο άξονα, με αποτέλεσμα την λήψη μεγαλύτερου μοχλοβραχίονα, άρα και ροπής. Το φαινόμενο αυτό αντιστρέφεται και μεγαλύτερες επικαλύψεις δίνουν τελικά υψηλότερες απομειωμένες αντοχές καθώς προστατεύουν τον οπλισμό από υψηλές θερμοκρασίες.

Η αργή πτώση των αντοχών με την αύξηση της επικάλυψης παρατηρείται και στις άλλες τρεις περιπτώσεις όπλισης (Case 2-4), όπου όπως φαίνεται για επικαλύψεις 4cm το αντίστοιχο διάγραμμα (αχνότερο γκρι) σε R120 έχει την μικρότερη απώλεια αντοχής.



Σχήμα 21 Γράφημα v-M-T

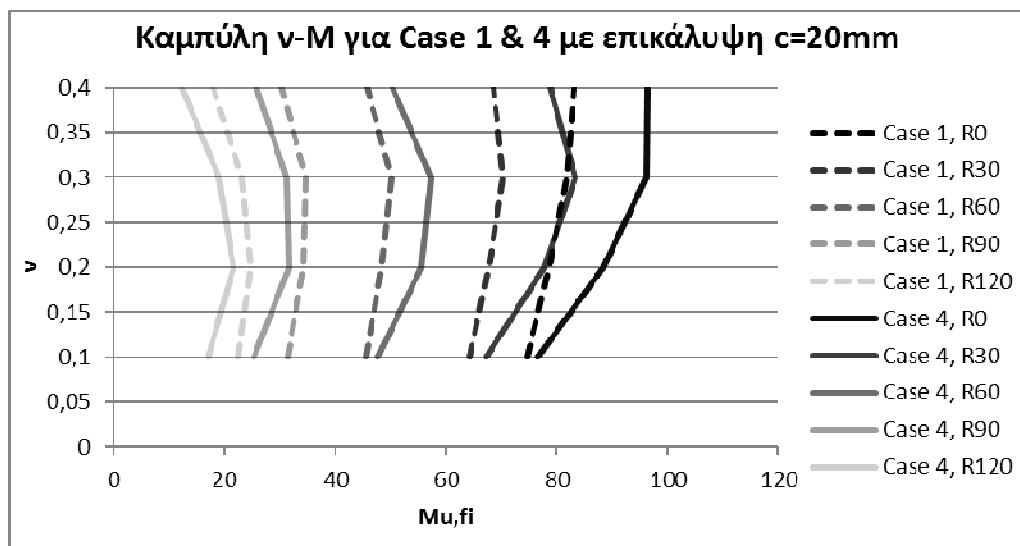


Σχήμα 22 Γράφημα v-M-T για Case 2,3 & 4

- **Διάταξη οπλισμού:**

Ο λόγος που ορίστηκαν οι περιπτώσεις όπλισης 1 και 4 είναι να διερευνηθεί η επίδραση της διάταξης του οπλισμού. Για τις περιπτώσεις αυτές το ποσοστό οπλισμού είναι 1.37% και 1.4% αντίστοιχα, ενώ στις περιπτώσεις 2 και 3 είναι 0.89% και 1.13%. Όπως φάνηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η επικάλυψη των 2cm είναι η δυσμενέστερη. Για αυτό η διερεύνηση πραγματοποιείται για 2cm, κάθε επίπεδο αξονικού και κάθε διάρκεια για τις Case 1 & Case 4.

Προκύπτει πως ενώ αρχικά η Case 4 (4Φ20) είχε μεγαλύτερες αντοχές λόγω του ότι ο οπλισμός βρίσκεται στις δυο πλευρές έχοντας έτσι μέγιστο μοχλοβραχίονα, στην συνέχεια για R120 η Case 1 (8Φ14) χάνει λιγότερο αντοχή. Αυτό οφείλεται στην μικρότερη θερμική καταπόνηση των ράβδων στο μέσο του πλάτους. Συγκεκριμένα οι οπλισμοί στις γωνίες για R120 φτάνουν θερμοκρασία περίπου 750-800°C (μείωση τάσης διαρροής στο 10%), ενώ στο μέσο πλευράς η θερμοκρασία είναι περίπου 550 °C (μείωση τάσης διαρροής στο 47%).

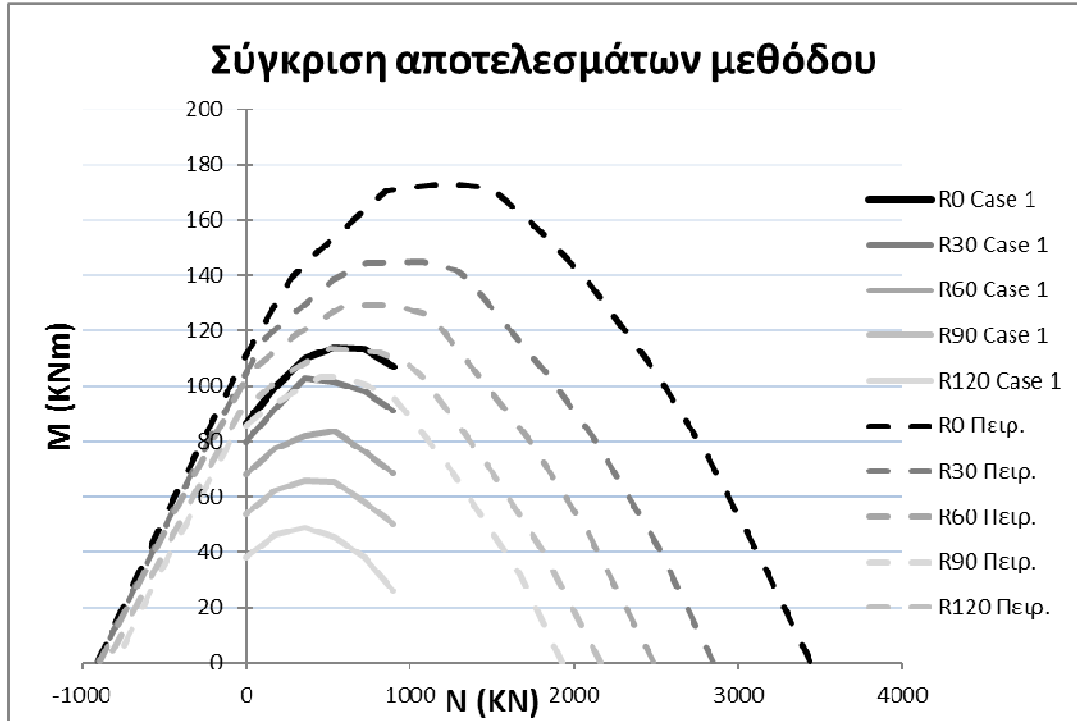


Σχήμα 23 Καμπύλη v-M για Case 1 & 4 με επικάλυψη c=20mm

- **Έλεγχος μεθόδου που εφαρμόστηκε με αναλυτική μέθοδο**

Για τον έλεγχο αξιοπιστίας της διαδικασίας υπολογίστηκαν τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης κολώνας 300x300mm, σκυροδέματος C30, με οπλισμό S500, 12Φ14 που αντιστοιχεί σε ποσοστό 2%. Τα διαγράμματα υπολογίστηκαν με την μέθοδο της ισόθερμης των 500 °C κατά

EC2, για διάρκειες πυρκαγιάς από 0 ως 120min. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται σε κοινό διάγραμμα με τα αντίστοιχα αποτελέσματα αναλυτικής μεθόδου υπολογισμού [5] του ίδιου υποστυλώματος, κατά την οποία η θερμοκρασιακή κατανομή στην διατομή υπολογίζεται επιλύοντας με πρόγραμμα την εξίσωση Fourier. Ως σενάριο πυρκαγιάς θεωρείται επίσης η standard ISO 843. Ο υπολογισμός των διαγραμμάτων γίνεται με την "ακριβή μέθοδο" κατά Meda et al (2002).[5]



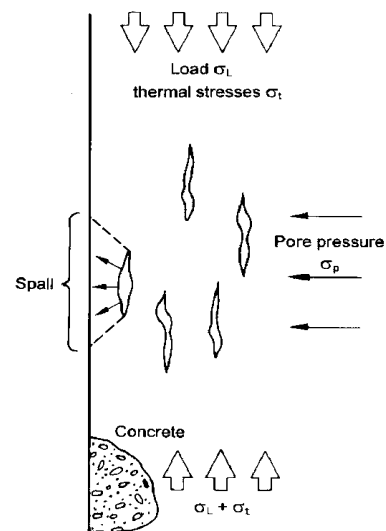
Σχήμα 24 Σύγκριση αποτελεσμάτων μεθόδων

Παρατηρείται έντονη υποτίμηση της απομειωμένης καμπτικής αντοχής όταν υπολογίζεται κατά τον EC2.

6. ΑΠΟΦΛΟΙΩΣΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

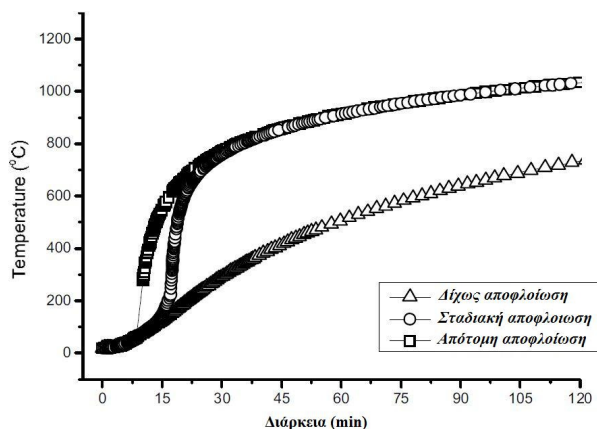
Η αποφλοιοώση περιλαμβάνει την ρήξη στρωμάτων ή τμημάτων του σκυροδέματος από την επιφάνεια κατά την έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες. Η πιο κρίσιμη μορφή είναι η απότομη αποφλοιοώση (explosive spalling), καθώς περιλαμβάνει την ταχύτατη εκτίναξη κομματιών σκυροδέματος από την θερμαινόμενη επιφάνεια. Τυπικά συμβαίνει στα πρώτα στάδια της φωτιάς για υψηλούς ρυθμούς θέρμανσης (20-30°C/min) και αποτελεί την κυριότερη απειλή για την σταθερότητα της κατασκευής.

Προκαλείται από τον συνδυασμό της αύξησης της πίεσης πόρων του σκυροδέματος λόγω της εξάτμισης του νερού (υγρασία) του σκυροδέματος και των θερμικών (θλιπτικών) εντάσεων που οφείλονται στον περιορισμό της θερμικής διαστολής του σκυροδέματος από τον ψυχρότερο πυρήνα ή από την υπόλοιπη κατασκευή. Το αν θα εμφανιστεί ή όχι η αποφλοιοώση εξαρτάται από τις εσωτερικές τάσεις που αναπτύσσονται στο σκυρόδεμα. Η



Σχήμα 25 Μηχανισμός απότομης αποφλοιοώσης[3]

πρόβλεψη της εντατικής κατάστασης που οδηγεί στο φαινόμενο αυτό, απαιτεί σύνθετα υδροθερμομηχανικά υπολογιστικά μοντέλα, στα οποία το σκυρόδεμα αντιμετωπίζεται ως ένα πολυφασικό σύστημα από στερεό, υγρό, και αέριο. Λόγω της δυσκολίας πρόβλεψής του, γενικά αγνοείται κατά την διαδικασία σχεδιασμού αν και προκαλεί έκθεση του οπλισμού σε υψηλές και ταχύτατα αυξανόμενες θερμοκρασίες, γεγονός που μειώνει σημαντικά τα επίπεδα ασφάλειας των υπολογισμών σχεδιασμού πυρασφάλειας.[3]



Σχήμα 26 Διάγραμμα θερμοκρασίας-χρόνου χάλυβα οπλισμού για διάφορες περιπτώσεις αποφλοίωσης[3]

7. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΒΛΑΒΩΝ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΣΚΥΗΣ-ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ

7.1. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΒΛΑΒΩΝ

Μόλις ο βαθμός βλάβης αξιολογηθεί τοπικά, είναι απαραίτητο να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην επίδραση των βλαβών αυτών στη συνολική συμπεριφορά της κατασκευής. Στην κατεύθυνση αυτή, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη διάφοροι παράγοντες, όπως είναι η αλλαγή στις μηχανικές ιδιότητες των υλικών ή η απώλεια αντοχής ή η απώλεια συνάφειας μεταξύ οπλισμού-σκυροδέματος. Στο στάδιο αυτό, είναι ακόμα ανοικτές οι παρακάτω επιλογές[6]:

- πλήρης επισκευή και αποκατάσταση
- μερική επισκευή και ανακατασκευή
- αλλαγή της χρήσης του κτιρίου
- συνολική κατεδάφιση

Τα παραπάνω αντιπροσωπεύουν μόνο ένα μικρό δείγμα επιλογών που μπορούν να γίνουν. Για οποιαδήποτε επιλογή θα πρέπει να εξετάζεται η δυνατότητα πραγματοποίησης της. Προκειμένου να παρθεί η απόφαση για το ποια επιλογή είναι κατάλληλη, θα πρέπει να αναπτυχθεί ένα σύστημα ταξινόμησης βλαβών.

7.2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΣΚΥΗΣ-ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ

Η επισκευή και η ενίσχυση ενός κτιρίου πληγμένου από πυρκαγιά, εξαρτάται από δύο βασικούς παράγοντες, την ταξινόμηση του βαθμού βλάβης και το οικονομικό κόστος, που σε ορισμένες περιπτώσεις είναι αρκετά σημαντικό. Εφόσον και τα δύο εκπληρώνονται, υπάρχει μεγάλη ποικιλία τρόπων επέμβασης που κυμαίνονται από επιδιορθώσεις διακοσμητικού χαρακτήρα, ως σημαντικές επεμβάσεις στο δομικό σύστημα. Μερικές μέθοδοι επισκευής και ενισχύσεις που εφαρμόζονται είναι[6]:

- Καθαρισμός επιφανειών και επισκευή επιχρισμάτων
- Βάψιμο φορέα, πιθανόν και με ειδικά πυροπροστατευτικά χρώματα

- Ενίσχυση με έγχυτο ή εκτοξευμένο σκυρόδεμα υπαρχόντων στοιχείων με στόχο την αύξηση αντοχής και της δυσκαμψίας των στοιχείων
- Επισκευαστική ρητίνη για επισκευή ελαφριά αποφλοιωμένων περιοχών
- Προσθήκη οπλισμού ή συγκόλληση τους με τον υπάρχον
- Ενίσχυση κόμβων, υποστυλωμάτων και δοκών με πολυμερή υλικά ή μεταλλικά ελάσματα με στόχο την αντοχή έναντι διάτμησης
- Αποκατάσταση πληγμένων τοιχοπληρώσεων
- Προσθήκη μεταλλικών δοκών και συνδέσμων, εσωτερικά και εξωτερικά του φορέα και ενίσχυση της δομικής αντοχής του
- Ενίσχυση δομικού συστήματος με προσθήκη νέων φερόντων στοιχείων όπου κρίνεται απαραίτητο

Σε γενικές γραμμές υπάρχουν πολλές διαφορετικές μέθοδοι για την επισκευή των κατεστραμμένων κατασκευών από την πυρκαγιά. Πρέπει πρώτα να αποφασιστούν τα κριτήρια για την επισκευή, δηλαδή αν η επισκευή αφορά στην αποκατάσταση[6]

- της γενικότερης αντοχής
- της αντοχής έναντι σε πυρκαγιά
- της ανθεκτικότητας
- της εμφάνισης

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος παρουσιάζει σημαντική μείωση για θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 200°C.
- Ο χάλυβας οπλισμού παρουσιάζει μείωση της αντοχής του για θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 500°C, ενώ αν η ψύξη του γίνει ομαλά ανακτά μέρος αυτής της απολεσθείσας αντοχής του.
- Οι χάλυβες οπλισμού θερμής εξέλασης έχουν καλύτερη συμπεριφορά στις υψηλές θερμοκρασίας από τους χάλυβες ψυχρής κατεργασίας.
- Η ακριβής ανάλυση ενός φορέα οπλισμένου σκυροδέματος μετά από πυρκαγιά είναι μια πολύπλοκη διαδικασία που περιλαμβάνει πολλές παραμέτρους και μπορεί να γίνει μέσα από το κατάλληλο λογισμικό.
- Η αύξηση των διαστάσεων των γραμμικών μελών εξασφαλίζει καλύτερη συμπεριφορά σε περίπτωση πυρκαγιάς.
- Η αύξηση της επικάλυψης σκυροδέματος σε υποστυλώματα και δοκούς δρα ως μονωτικό υλικό για τους χάλυβες οπλισμού και αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την αντοχή τους έναντι πυρκαγιάς. Για αυτό το λόγο πρέπει να δίνεται μεγάλη προσοχή στην τοποθέτηση των αποστατών κατά τη φάση της κατασκευής.
- Η διάταξη των ράβδων του χάλυβα οπλισμού μέσα στα γραμμικά μέλη παίζει σημαντικό ρόλο για την απομείωση της αντοχής και πρέπει να αποφεύγεται η συγκέντρωσή τους στις γωνίες, γιατί αναπτύσσονται οι υψηλότερες θερμοκρασίες και τη διάρκεια της πυρκαγιάς.
- Στην Ελλάδα για τα συνήθη οικοδομικά έργα οι διαστάσεις των δοκών είναι 600x300mm. Όπως παρουσιάστηκε παραπάνω, οι δοκοί αυτοί δεν παρουσιάζουν σημαντικά προβλήματα αντοχής για διάρκεια πυρκαγιάς μέχρι 90 λεπτά.
- Ένα από τα πιο επικίνδυνα φαινόμενα κατά την πυρκαγιά είναι η απότομη αποφλοίωση (explosive spalling) της επιφάνειας του σκυροδέματος, η οποία συμβαίνει κυρίως στα πρώτα στάδια της φωτιάς. Το γεγονός που την καθιστά τόσο επικίνδυνη είναι ότι σε μεγάλο βαθμό είναι τυχηματική και δεν μπορεί να προσομοιωθεί με ασφάλεια ούτε με ειδικά λογισμικά.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 1-2: General rules – Structural fire design EN1992-1-2 (October 2004)
- [2] Emmanuel Annerel, Luc Taerwe, “Basic Approach for the Diagnose of Concrete after Fire Exposure”, Ghent University, Ghent, Belgium, February 2009
- [3] Gabriel Alexander Houry, “Effect of Fire on Concrete and Concrete Structures”, Imperial College, London, UK, 2000
- [4] Αθανάσιος Χ. Τριανταφύλλου, “Δομικά υλικά”, 8^η έκδοση, Πάτρα 2008, σελ 300
- [5] R.Felicetti¹, A.Meda², “Residual Behavior of Reinforcing Steel Bars after Fire”, ¹Milan University of Technology, Milano, Italy, ²University of Bergamo, Dalmine, Italy, FIB Symposium “Keep concrete Attractive”, Budapest, Hungary, May 2005, pp 1148-1155
- [6] Αικατερίνη Τσιούνια, “Αξιολόγηση Βλαβών Κτιρίων από Πυρκαγιά και Μέθοδοι Επισκευής τους”, Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή αγρονόμων και τοπογράφων μηχανικών, Αθήνα 2008
- [7] Νάκης Ευάγγελος “Επίδραση Πυρκαγιάς σε Κτίρια από Οπλισμένο Σκυρόδεμα και Μέθοδοι Αποκατάστασης”, 15ο Φοιτητικό Συνέδριο: Επισκευές και Ενισχύσεις Κατασκευών, Πάτρα, Φεβρουάριος 2009, Σχήμα 7
- [8] ΤΕΕ/Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος “ΠΡΟΧΕΙΡΟΣ ΟΔΗΓΟΣ για την συγκέντρωση πληροφοριών που αφορούν την απομείωση φέρουσας ικανότητας μικρών κτιρίων μετά από πυρκαγιά”, Αύγουστος 2007
- [9] Annelies de Wit, “Behaviour and Structural Design of Concrete Structures Exposed to Fire”, Master of Thesis Stockholm, KTH Architecture and the Built Environment, Sweden 2011
- [10] Adam M. Knaack, Yahya C. Kurama, David J. Kirkner, “Stress-Strain Properties of Concrete at Elevated Temperatures”, Structural Engineering Research Report, Department of Civil Engineering and Geological Sciences, University of Notre Dame, Notre Dame, Indiana, April 2009