

ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ Ο.Σ. ΥΣΤΕΡΑ ΑΠΟ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

ΛΟΓΟΘΕΤΗ ΑΝΤΩΝΙΑ

Προπτυχιακή Φοιτήτρια Π.Π., antonialog123@gmail.com

ΝΙΚΟΛΑΟΥ ΒΑΣΙΛΙΚΗ

Προπτυχιακή Φοιτήτρια Π.Π., vicky22nik@gmail.com

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να εξαχθούν συμπεράσματα για το πώς συμπεριφέρεται μία κατασκευή υπό την επίδραση πυρκαγιάς. Αρχικά, παρουσιάζεται συνοπτικά το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο του φαινομένου, με έμφαση στις συνήθεις βλάβες που προκαλούνται από πυρκαγιά. Κατόπιν, με τη χρήση λογισμικού έγινε αποτίμηση της υπάρχουσας κατασκευής πριν και μετά την εκδήλωση της πυρκαγιάς. Από την αποτίμηση προέκυψαν μειωμένες αντοχές κάποιων μελών καθώς και κάποιοι λόγοι επάρκειας, οι οποίοι ξεπερνούσαν το επιτρεπτό όριο. Τα αποτελέσματα αυτά προέκυψαν μέσω μη γραμμικής στατικής ανάλυσης (Push-over). Λαμβάνοντας υπόψιν τα παραπάνω, πραγματοποιήθηκαν ενισχύσεις μελών, όπου αυτό κρίθηκε απαραίτητο. Η προσομοίωση, η ανάλυση, η αποτίμηση και η ενίσχυση, ακολουθούν τον Ελληνικό Κανονισμό Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ) και πραγματοποιήθηκαν με την χρήση του λογισμικού FESPA.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με αφορμή τα γεγονότα του περασμένου καλοκαιριού που διαδραματίστηκαν στην ευρύτερη περιοχή της Αττικής, τα οποία οδήγησαν στην απώλεια ανθρώπινων ζωών και κατοικιών, παρατηρήθηκε η έντονη αδυναμία των κτιρίων να παραλάβουν φορτία υπό υψηλές θερμοκρασίες. Έτσι, κρίθηκε αναγκαίος όσο ποτέ άλλοτε, ο σχεδιασμός έναντι τέτοιων φαινομένων. Ένα σπουδαίο ζήτημα στον τομέα του Πολιτικού Μηχανικού, ιδίως στη χώρα μας, είναι ο αντισεισμικός σχεδιασμός, με αποτέλεσμα να υπάρχουν σαφείς οδηγίες και μέθοδοι για τέτοιου είδους δράσεις. Ωστόσο, το κομμάτι των κατασκευών που αφορά τη πυρασφάλεια των κτιρίων παραμένει ιδιαίτερα ανεξερεύνητο στον ελλαδικό χώρο, καθώς υπάρχουν μόνο κάποιοι εμπειρικοί κανόνες, οι οποίοι χρήζουν σπάνιας εφαρμογής. Στην παρούσα εργασία, σε πρώτο στάδιο, διερευνάται η διαδικασία αποτίμησης μιας υφιστάμενης διώροφης κατοικίας που κατασκευάστηκε το 1975 με ισχύοντες κανονισμούς: ΠΚΩΣ '54 και Αντισεισμικός '59. Στη συνέχεια ακολουθώντας ένα υποθετικό σενάριο εκδήλωσης πυρκαγιάς πραγματοποιήθηκε εκ νέου αποτίμηση και παρατηρήθηκαν ορισμένες βλάβες οι οποίες αντιμετωπίστηκαν με τις κατάλληλες επεμβάσεις κατά τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. Για την εκτίμηση των βλαβών έγινε χρήση της μη γραμμικής στατικής ανάλυσης (Push-over). Παράλληλα, έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την ανάλυση σε τρία στάδια: α) πριν την εκδήλωση της πυρκαγιάς, β) μετά το πέρας της πυρκαγιάς και γ) αφότου ολοκληρώθηκε η ενίσχυση των μελών.

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΦΟΡΕΑ

Διώροφο κτίριο οπλισμένου σκυροδέματος, κατασκευής 1975 με ύψος ορόφου 3,96 μέτρα, βρίσκεται σε περιοχή ζώνης σεισμικότητας II κατά ΕΑΚ, με κατηγορία εδάφους B, σπουδαιότητα Σ3 και στάθμη αξιοπιστίας δεδομένων (ΣΑΔ) ικανοποιητική:

Υποστυλώματα:

Κεντρικό (K5) → 528/528 με 4Φ20 στις γωνίες και 4Φ18 στα μέσα των πλευρών.

Περιμετρικά (K1, K4, K6, K7, K8, K10) → 352/352 με 4Φ20.

Τοιχώματα (K2, K3, K9, K11) → 1320/264 με 4Φ18 σε κάθε μικρή πλευρά και από 4Φ10 σε κάθε μεγάλη πλευρά.

Δοκοί:

Περιμετρικές δοκοί → 200/500 με οπλισμό στο κάτω πέλμα 4Φ18 στα ανοίγματα, από τα οποία τα μισά κάμπτονται στις στηρίξεις.

Εσωτερικές δοκοί → 200/600 με οπλισμό στο κάτω πέλμα 5Φ16 στα ανοίγματα, από τα οποία επίσης τα μισά κάμπτονται στις στηρίξεις.

Συνδετήρες:

Ορθογωνικοί Φ8/180 σε όλα τα υποστυλώματα ή τοιχώματα και Φ6/250 στις δοκούς με καλή αγκύρωση.

Πλάκες:

Πάχος πλακών 176 mm, οπλισμένες σε δύο διευθύνσεις με Φ8/100.

Φορτία:

Επί των πλακών υπάρχει φορτίο από επίστρωση ίσο με $1,1 \text{ kN/m}^2$.

Τα ωφέλιμα φορτία θεωρήθηκαν μόνο επί της πλάκας οροφής ισογείου ίσα με $2,0 \text{ kN/m}^2$.

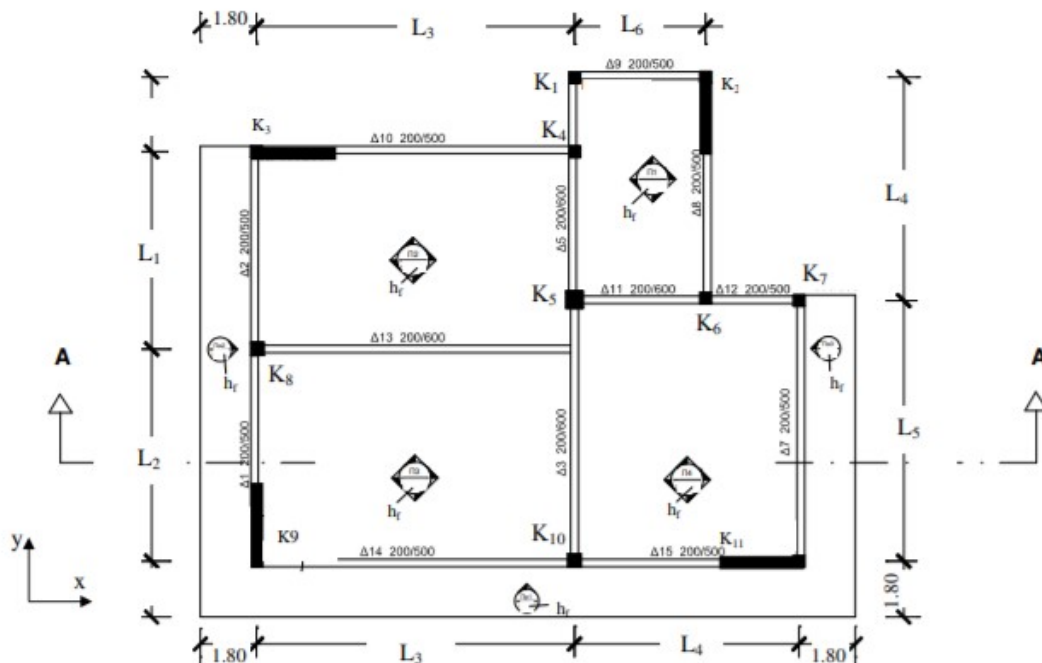
Υλικά:

Σκυρόδεμα:

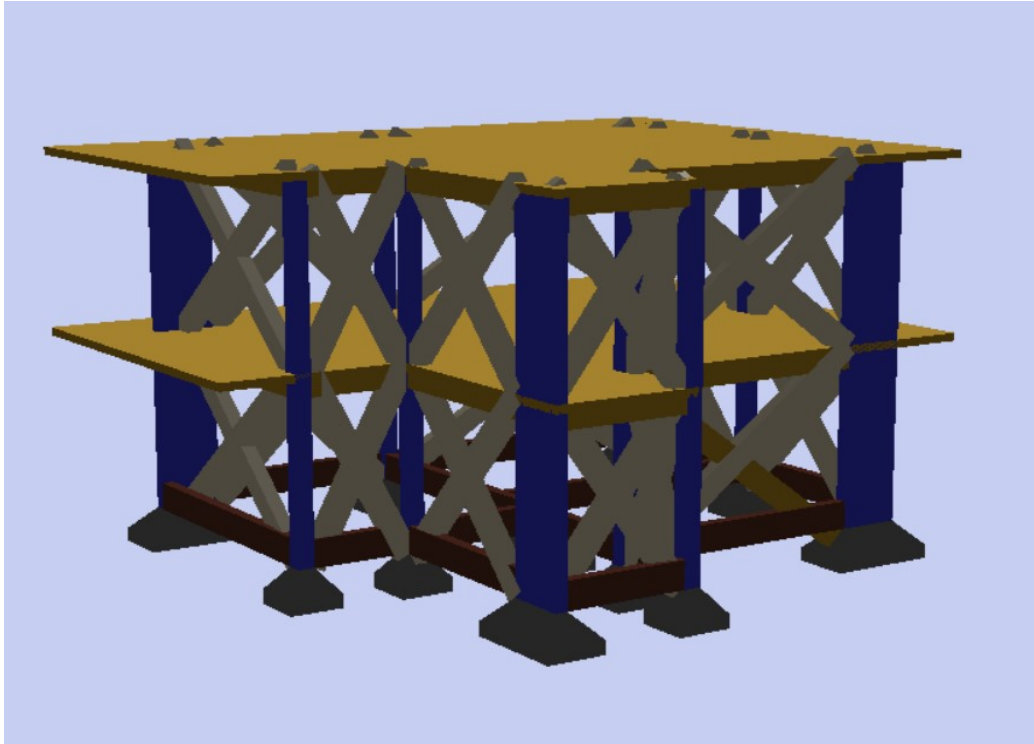
C20/25

Χάλυβας:

S500



Σχήμα 1. Ξυλότυπος υφιστάμενης κατασκευής. Δρίτσος Σ.Η. [18]

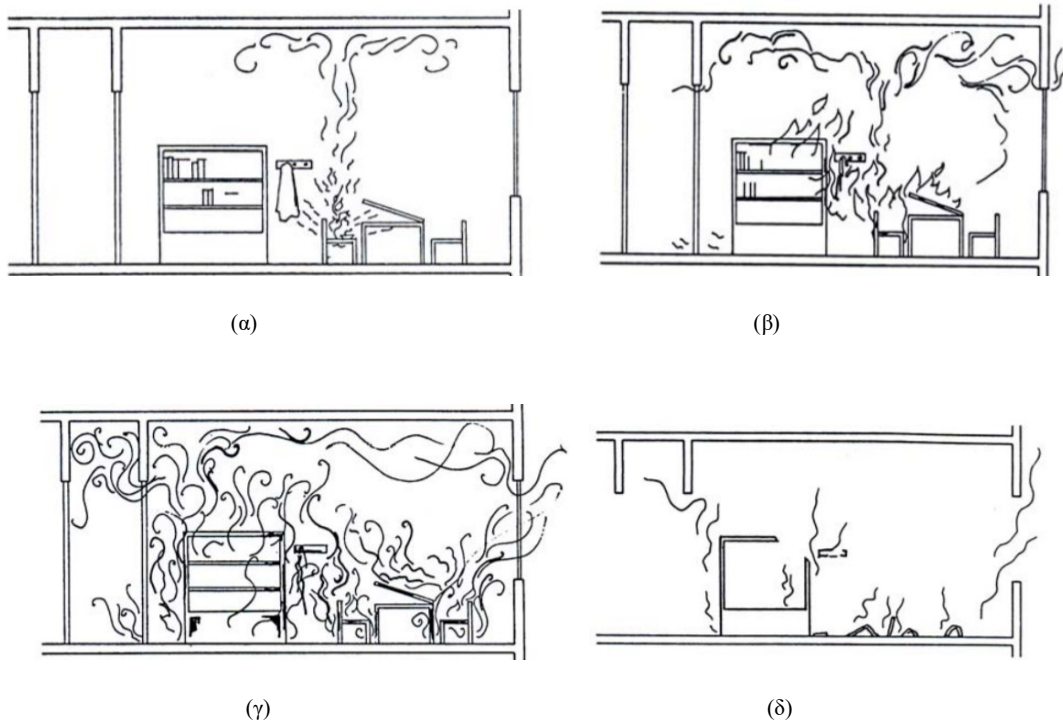


Σχήμα 2. Απεικόνιση του φορέα με τη χρήση του λογισμικού FESPA.

3.ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ

Ο διαχωρισμός ενός κτιρίου σε πυροδιαμερίσματα έχει ως στόχο να περιορίσει την πυρκαγιά μέσα στο χώρο που εκδηλώθηκε και να εμποδίσει την οριζόντια ή/και κατακόρυφη εξάπλωσή της στο υπόλοιπο κτίριο. Με τον όρο πυροδιαμέρισμα, περιγράφεται οποιοσδήποτε χώρος που περιβάλλεται απ'όλες τις πλευρές είτε από τοίχους, είτε από πόρτες και παράθυρα. Μια τυπική πυρκαγιά σε ένα πυροδιαμέρισμα, αποτελείται από τέσσερα στάδια:

- Επώαση: Μετά την αρχική ανάφλεξη, στρώμα θερμών αερίων σχηματίζεται στην οροφή του κτιρίου.
- Φούντωμα: Το συσσωρευμένο στην οροφή στρώμα αερίων προκαλεί την ανάφλεξη της διαθέσιμης καύσιμης ύλης στο πυροδιαμέρισμα. Διαρκεί περίπου 15-30 λεπτά και οι θερμοκρασίες φτάνουν στους 800-900 °C.
- Πλήρης Ανάπτυξη: Όλη η καύσιμη ύλη του πυροδιαμερίσματος καίγεται ενώ οι φλόγες και τα αέρια μεταφέρονται μέσω ανοιγμάτων σε παρακείμενα πυροδιαμερίσματα. Σε αυτό το στάδιο καίγεται ότι είναι δυνατό να καεί. Οι θερμοκρασίες ανεβαίνουν λίγο περισσότερο και φτάνουν στους 1000-1100 °C, ανάλογα με την ποσότητα των φλεγόμενων αντικειμένων.
- Εξασθένιση: Η εξάντληση της καύσιμης ύλης συνοδεύεται με την απομάκρυνση πλέον των θερμών αερίων. Κατά τη φάση της εξασθένισης, η πυρκαγιά υποχωρεί και οι θερμοκρασίες πέφτουν γρήγορα.



Σχήμα 3. (α) Επώαση, (β) Φούντωμα, (γ) Πλήρης Ανάπτυξη και (δ) Εξασθένιση. [11]

4.ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΕ ΥΨΗΛΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ

Είναι γνωστό ότι η ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών στα υλικά δομήσεως επηρεάζει δυσμενώς τόσο τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους (όπως την θλιπτική και εφελκυστική αντοχή, όρια διαρροής και θραύσεως, μέτρο ελαστικότητας κ.λπ.), όσο και τις φυσικοχημικές ιδιότητές τους (αλλαγή κρυσταλλικής δομής, πορώδες κ.λπ.). Συνέπεια αυτών των μεταβολών είναι αντίστοιχη μείωση της φέρουσας ικανότητας των δομικών μελών, αύξηση των παραμορφώσεών τους υπό σταθερό φορτίο, ανακατανομές εντάσεως κ.λπ..

4.1.ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Ύστερα από ιστορική αναδρομή, παρατηρείται ότι το σκυρόδεμα έχει μία εξαιρετική εγγενή συμπεριφορά όταν εκτίθεται σε πυρκαγιά, ειδικά σε σύγκριση με άλλα δομικά υλικά, ενώ παράλληλα σπάνια παρατηρείται ολική κατάρρευση της κατασκευής που να οφείλεται εξ ολοκλήρου σε πυρκαγιά. Βέβαια, η πυραντίσταση του δεν πρέπει να θεωρείται δεδομένη, με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητος ο προσεκτικός σχεδιασμός έναντι τέτοιων φαινομένων. Ο σχεδιασμός βασίζεται στην κατανόηση τόσο του υλικού, όσο και της δομικής συμπεριφοράς του σκυροδέματος που εκτίθεται σε πυρκαγιά. Ο σημαντικότερος παράγοντας που καθιστά το σκυρόδεμα ως ένα από τα πλέον πυράντοχα δομικά υλικά, είναι η χαμηλή θερμική του αγωγιμότητα. Μερικοί ακόμα παράγοντες που συντελούν στην ανθεκτικότητα του είναι η ποιότητα του τσιμεντοπολτού και των αδρανών, το μέγεθος των δομικών στοιχείων και ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας κατά την πυρκαγιά, καθώς επίσης και η περιεκτικότητα του σε νερό (ακόμα και σε ξηρό περιβάλλον). Όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε νερό, τόσο καθυστερεί η αύξηση της θερμοκρασίας σε αυτό. Ωστόσο, το νερό είναι υπεύθυνο για μία από τις σημαντικότερες βλάβες που προκαλούνται στις κατασκευές κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς, αυτή της εκρηκτικής απόσχισης (spalling). Η εκρηκτική απόσχιση, γενικά ορίζεται ως η βίαιη ή μη απομάκρυνση στρωμάτων ή κομματιών από την επιφάνεια του σκυροδέματος σε ένα δομικό μέλος, το οποίο έχει εκτεθεί σε υψηλή και ραγδαία αύξηση της

θερμοκρασίας. Κατά την έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες, παρουσιάζεται το φαινόμενο της αποφλοιώσης του σκυροδέματος λόγω υπέρβασης της εφελκυστικής αντοχής του. Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω της αύξησης της πίεσης των πόρων, που προκαλείται από τους υδρατμούς και της θερμικής διαστολής των αδρανών.



(α)



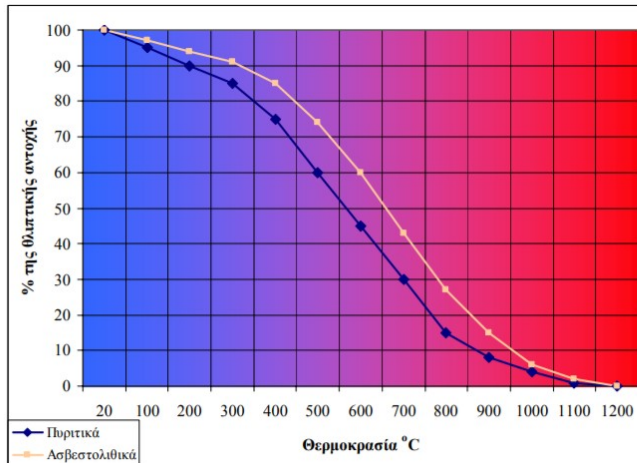
(β)



(γ)

Σχήμα 4. Φαινόμενα (α) εκρηκτικής απόσχισης και (β), (γ) αποφλοιώσης σε δοκούς. [13], [19]

Όπως προαναφέρθηκε, το είδος των αδρανών που περιέχονται στο σκυρόδεμα παίζει σημαντικό ρόλο. Τα ασβεστολιθικά αδρανή, τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως στην Ελλάδα, θεωρούνται καλύτερα σε σύγκριση με τα πυριτικά, διότι ο ασβεστόλιθος χάνει την ικανότητά του στους 900 °C, οπότε αρχίζει η ασβεστοποίηση με έκλυση διοξειδίου του άνθρακα (διαδικασία που απορροφά επίσης σημαντικά ποσά θερμότητας), ενώ στα πυριτικά αδρανή η ασβεστοποίηση ξεκινά πολύ νωρίτερα, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα που κατασκευάστηκε από τις δεδομένες τιμές του EC2.



Θερμοκρ. σκυρ. °C	$f_{ct(\theta)}/f_{ct(20^{\circ}\text{C})}$		$\varepsilon_{ct(\theta)}/10^{-3}$
	πυριτ.	ασβ/κα	
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	-

Σχήμα 5. Διάγραμμα θερμοκρασίας – αντοχής τύπων σκυροδέματος κατά EC2. [10]

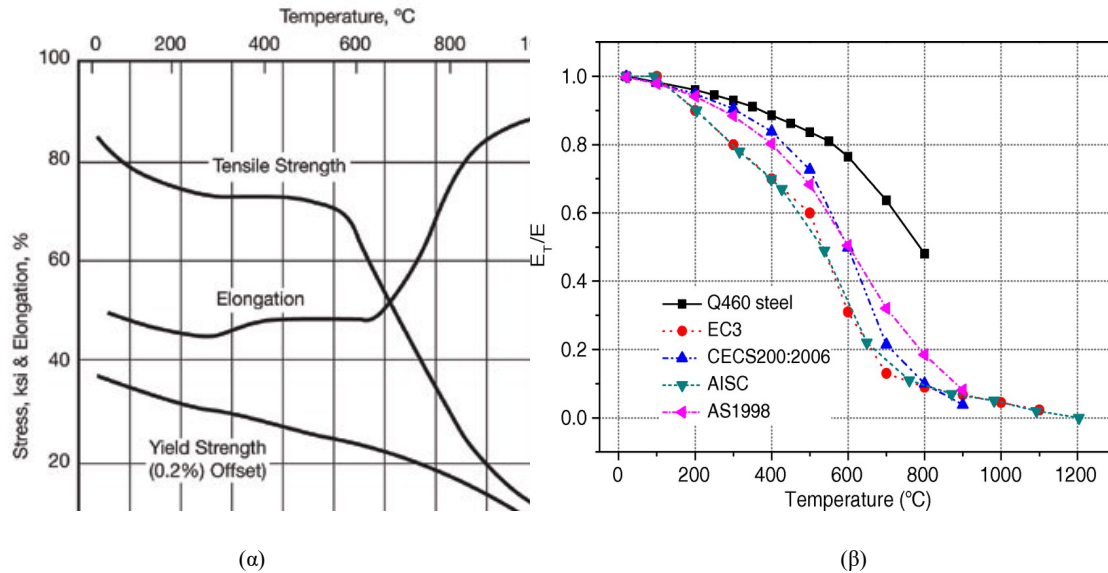
Μέσω των παραπάνω διαγραμμάτων, παρατηρείται ότι η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος μειώνεται όταν αυξάνεται η θερμοκρασία, κυρίως λόγω των εσωτερικών ρηγματώσεων που προκαλεί η θέρμανση του ύδατος και της ανομοιόμορφης κατανομής των θερμοκρασιών στην μάζα του σκυροδέματος, καθώς και λόγω των φυσικοχημικών αντιδράσεων που προκαλούνται. Τέλος, παρατηρείται ότι η μείωση της αντοχής του σκυροδέματος ξεκινά από τους 300 °C περίπου και είναι χονδρικά γραμμική μέχρι τους 900 °C περίπου, όπου τείνει να μηδενιστεί.

Μετά το πέρας της πυρκαγιάς και την πτώση σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος συνήθως οι μηχανικές ιδιότητες δεν επανέρχονται ή επανέρχονται σε μικρό, αμελητέο ποσοστό.

4.2.ΧΑΛΥΒΑΣ

Οι κατασκευές από χάλυβα σχεδιάζονται συνήθως για χρήση σε συνηθισμένες θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Για θερμοκρασίες άνω των 100 °C περίπου, η καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων είναι έντονα μη γραμμική, χωρίς σαφές όριο διαρροής. Για όλες τις κατηγορίες συνήθων χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος, η αύξηση της θερμοκρασίας μέχρι 500 °C περίπου, για χρόνους μέχρι και 2 ώρες, δεν δημιουργεί ουσιαστική μεταβολή στις αρχικές μηχανικές ιδιότητες. Για μεγαλύτερους όμως χρόνους έκθεσης ή και για μεγαλύτερες θερμοκρασίες, θα υπάρξουν σημαντικές μειώσεις των μηχανικών χαρακτηριστικών.

Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, μειώνεται το όριο διαρροής, η εφελκυστική αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας. Ο ρυθμός μείωσης των παραπάνω είναι μέγιστος για θερμοκρασίες γύρω στους 450 °C - 550 °C όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.



Σχήμα 6. Επίδραση υψηλών θερμοκρασιών (α) στο όριο διαρροής και στην εφελκυστική αντοχή και (β) στο μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα. [17]

Τα παραπάνω αναφέρονται σε εν θερμώ έλαση του χάλυβα. Η ψυχρή έλαση των χαλύβδινων ράβδων, με σκοπό την απόκτηση υψηλής αντοχής, είναι μια μέθοδος κατεργασίας η οποία δεν χρησιμοποιείται πλέον, ωστόσο συναντάται σε υφιστάμενες κατασκευές. Παράλληλα, παρατηρείται ότι οι χάλυβες ψυχρής έλασης παρουσιάζουν ταχύτερο ρυθμό μείωσης αντοχής, διότι με την ανόπτηση που επέρχεται, χάνεται η πρόσθετη αντοχή και η κρίσιμη θερμοκρασία τους υπολογίζεται στους 400 °C - 450 °C.

Ορισμένοι χάλυβες, ιδιαίτερα αυτοί με μεγάλη περιεκτικότητα σε άνθρακα, εμφανίζουν μικρή αύξηση του ορίου διαρροής και της εφελκυστικής αντοχής για θερμοκρασίες μεταξύ 150 °C - 370 °C, η οποία μπορεί να φτάσει μέχρι και 10 % περίπου της αντίστοιχης τιμής σε θερμοκρασία δωματίου. Το φαινόμενο αυτό σχετίζεται με τη γήρανση παραμόρφωσης του χάλυβα. Ένα άλλο φαινόμενο που μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία του χάλυβα για τάσεις μικρότερες από το όριο διαρροής είναι ο ερπυσμός σε υψηλές θερμοκρασίες. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι χάλυβας με όριο διαρροής 250 MPa και εφελκυστική αντοχή γύρω στα 400 MPa θα αστοχήσει στους 430 °C λόγω ερπυσμού σε 10^3 ώρες για τάση ίση με 260 MPa.

Βέβαια, κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς το σκυρόδεμα είναι αυτό που παρουσιάζει τις περισσότερες βλάβες, αφού εγκιβωτίζει το χάλυβα θερμομονώνοντάς τον και έτσι ο τελευταίος δεν παρουσιάζει μεγάλες απώλειες στις μηχανικές του ιδιότητες. Όταν όμως, ο χάλυβας έρχεται σε άμεση επαφή με τις υψηλές θερμοκρασίες λόγω κακής επικάλυψης ή εκρηκτικής απόσχισης του σκυροδέματος, γίνεται εξίσου ευάλωτος με το σκυρόδεμα.

5.ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΒΛΑΒΕΣ ΛΟΓΩ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ ΑΠΟ Ο.Σ.

5.1.ΓΕΝΙΚΗ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΒΛΑΒΩΝ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η πυρκαγιά προκαλεί διάφορες χαρακτηριστικές αλλοιώσεις των υλικών, τήξεις και καύσεις. Πέραν αυτών, οι κύριες και τυπικές «γεωμετρικές» βλάβες λόγω πυρκαγιάς, μπορούν να συνοψισθούν ως ακολούθως:

- Πρόωρες αποκολλήσεις και καταπτώσεις επιχρισμάτων και οροφокονιαμάτων, λόγω πλημμελούς πρόσφυσης και μεγάλου πάχους.
- Απομειώσεις διατομών των φερόντων στοιχείων λόγω απολεπίσεων, αποφλοιώσεων και αποκολλήσεων των εξωτερικών στοιβάδων, καθώς και αποσύνθεση της μάζας του σκυροδέματος ή του κονιάματος.
- Χαρακτηριστικές (και αισθητές) παραμένουσες παραμορφώσεις, τόσο για τους οριζόντιους φορείς (π.χ. βέλη πλακών και δοκών), όσο και για κατακόρυφα στοιχεία (π.χ. αποκλίσεις στύλων και τοίχων). Ας σημειωθεί ότι μεγάλο μέρος των παρουσιαζόμενων θερμικών παραμορφώσεων παραμένει ως μόνιμο (εμπειρικά, έως και 50%).
- Λόγω των έντονων παραμορφώσεων (σε συνδυασμό με την απομείωση των διατομών και των αντοχών), παρατηρούνται σημαντικές καμπτικές καθώς και διατμητικές βλάβες (ρωγμές). Οι πιο τυπικές διατμητικές βλάβες είναι οι λοξές ρωγμές σε μεσαίες εδράσεις συνεχών δοκών από Ο.Σ. (και λόγω ανακατανομής της έντασης), καθώς και τα θερμικά «λακτίσματα», δηλαδή, οι έντονες λοξές ρωγμές σε ισχυρά και δύσκαμπτα κατακόρυφα στοιχεία.



Σχήμα 7. Βλάβες ύστερα από εκδήλωση πυρκαγιάς. [13], [15]

5.2.ΣΤΑΘΜΕΣ ΒΛΑΒΗΣ ΓΙΑ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΑ ΦΕΡΟΝΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Οι στάθμες βλάβης για στύλους από Ο.Σ. αντιστοιχούν γενικώς σε διαθέσιμα περιθώρια αντιστάσεων των καμμένων δομικών στοιχείων, καθώς και σε απαιτούμενα μέτρα επισκευών και ενισχύσεων, αναλόγως της βαρύτητας της βλάβης. Διακρίνονται σε πέντε βασικές κατηγορίες:

- Βλάβες βαθμού Α → Ασήμαντες (Καπνιά)
- Βλάβες βαθμού Β → Ελαφρές (Καπνιά και ροζ χρώμα σκυροδέματος)
- Βλάβες βαθμού Γ → Σοβαρές (Γκρι ή ροζ χρώμα σκυροδέματος)
- Βλάβες βαθμού Δ → Βαριές (Γκρι ή φαιό, κιτρινωπό χρώμα σκυροδέματος)
- Βλάβες βαθμού Ε → Πολύ Βαριές

Concrete Color	Temperature	Other Possible Physical Effects
Buff	950°C	
Black Through		
Gray to Buff	900 °C	Powdered, lightcolored, dehydrated paste
	800 °C	Spalling, exposing not more than 25 percent of reinforcing bars
	600°C	
	575 °C	Popouts over chert or quartz aggregate particle
Pink to Red	550 °C	Deep Cracking
	300°C	
	300 °C	Surface crazing
Normal	40 °C	
		None

Σχήμα 8. Οπτική εκτίμηση των βλαβών με βάση το χρώμα του σκυροδέματος. [8]

6.ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

6.1.ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗ ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Κύριος στόχος της ανελαστικής στατικής ανάλυσης είναι η εκτίμηση του μεγέθους των ανελαστικών παραμορφώσεων που θα αναπτυχθούν στα δομικά στοιχεία όταν το κτίριο υπόκειται στη σεισμική δράση για την οποία γίνεται η αποτίμηση ή ο ανασχεδιασμός. Κατά την ανελαστική στατική ανάλυση εξετάζεται η συμπεριφορά του φορέα έναντι σταθερών φορτίων βαρύτητας και μονοτονικά αυξανόμενων οριζοντίων φορτίων έως ότου κάποιο δομικό στοιχείο της κατασκευής δεν είναι πλέον σε θέση να φέρει τα κατακόρυφα φορτία του. Αυτό επιτυγχάνεται θεωρώντας τις ανελαστικές παραμορφώσεις συγκεντρωμένες σε συγκεκριμένες κρίσιμες θέσεις (πλαστικές αρθρώσεις), η συμπεριφορά των οποίων περιγράφεται με τη βοήθεια απλοποιημένων διγραμμικών ή πολυγραμμικών διαγραμμάτων έντασης – μετακίνησης ή έντασης – παραμόρφωσης, συνήθως ροπής - καμπυλότητας ή ροπής - στροφής χορδής. Αποτέλεσμα της μεθόδου είναι η χάραξη της καμπύλης αντίστασης του φορέα, η οποία μεταφράζεται σε όρους τέμνουσας βάσης – μετακίνησης του κόμβου ελέγχου, ο οποίος σύμφωνα με τον κανονισμό αφορά το κέντρο μάζας στην κορυφή του φορέα. Ως τελευταίο βήμα της ανάλυσης, ο κανονισμός ορίζει τον έλεγχο των κριτηρίων επιτελεστικότητας, με σύγκριση των διαθέσιμων μεγεθών αντοχής του κάθε μέλους της κατασκευής με τα απαιτούμενα μεγέθη απόκρισης.

Οι βασικές έννοιες που σχετίζονται με την ανελαστική στατική ανάλυση είναι η απαίτηση και η ικανότητα της κατασκευής. Τα βήματα της ανελαστικής στατικής ανάλυσης επιγραμματικά είναι :

- Προσομοίωση της κατασκευής.
- Εισαγωγή των κατακόρυφων φορτίων που ενεργούν στην κατασκευή.
- Εκτίμηση των μειωμένων δυσκαμψιών των μελών του φέροντος οργανισμού.
- Επιλογή της καθ' ύψος κατανομής των οριζόντιων φορτίων για θετική και αρνητική φορά της κάθε διεύθυνσης του σεισμού.
- Εκτέλεση της ανελαστικής στατικής ανάλυσης.
- Σχεδιασμός της καμπύλης ικανότητας της κατασκευής.
- Διγραμμικοποίηση της καμπύλης ικανότητας.
- Υπολογισμός της στοχευόμενης μετακίνησης.
- Υπολογισμός μεγεθών απόκρισης για την μετακίνηση του κόμβου ελέγχου ίση με εκείνη της στοχευόμενης μετακίνησης.
- Έλεγχος για την εκπλήρωση των κριτηρίων της στάθμης επιτελεστικότητας.

6.2.ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Με τη χρήση του λογισμικού FESPA, έγινε προσομοίωση του φορέα και πραγματοποιήθηκε η ανελαστική στατική ανάλυση (Push-over), τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται παρακάτω.

	Μέλος	Κ/Δ	λDL Αρχής	λDL Τέλους	λSD Αρχής	λSD Τέλους	λ VRy Αρχής	λ VRy Τέλους
1	Δ1.3(-1)	Κύριο	-	0.11	-	0.15	-	0.64
2	Δ4.1(-1)	Κύριο	0.21	0.17	0.31	0.15	0.30	0.22
3	Δ5.1(-1)	Κύριο	0.17	0.39	0.10	0.07	0.11	0.20
4	Δ7.1(-1)	Κύριο	0.20	0.14	0.09	0.09	0.14	0.05
5	Δ8.1(-1)	Κύριο	0.29	0.58	0.12	0.12	0.23	0.22
6	Δ1.1(0)	Κύριο	0.22	0.27	0.24	0.37	1.21 !	1.16 !
7	Δ1.2(0)	Κύριο	0.28	-	0.51	-	2.41!	-
8	Δ1.3(0)	Κύριο	-	0.62	-	0.48	-	1.39!
9	Δ2.3(0)	Κύριο	0.37	0.40	0.46	0.22	1.50!	0.43
10	Δ2.4(0)	Κύριο	0.56	0.46	0.34	0.60	1.06 !	1.69!
11	Δ3.3(0)	Κύριο	0.22	0.06	0.07	0.06	0.53	0.36
12	Δ4.1(0)	Κύριο	0.12	0.07	0.34	0.11	1.14 !	0.61
13	Δ5.1(0)	Κύριο	0.24	0.27	0.09	0.13	0.49	0.97
14	Δ6.3(0)	Κύριο	0.45	0.18	0.46	0.27	1.19 !	0.87
15	Δ7.1(0)	Κύριο	0.07	0.09	0.08	0.07	0.68	0.57
16	Δ8.1(0)	Κύριο	0.54	0.59	0.40	0.45	1.69!	2.00!
17	Δ9.3(0)	Κύριο	0.09	0.27	0.05	0.29	1.41!	1.11 !
18	Δ9.4(0)	Κύριο	0.32	0.17	0.12	0.09	1.96!	2.03!
19	Δ10.1(0)	Κύριο	0.09	0.09	0.08	0.09	0.82	0.62
20	Δ11.1(0)	Κύριο	0.43	0.48	0.14	0.12	1.58!	1.36!
21	Δ37.1(0)	Κύριο	0.21	0.40	0.36	0.37	0.63	0.80
22	Δ49.1(0)	Κύριο	0.37	0.29	0.65	0.37	0.76	0.74
23	Δ1.1(1)	Κύριο	0.17	0.22	0.07	0.12	0.37	0.99
24	Δ1.2(1)	Κύριο	0.09	-	0.07	-	1.81!	-

	Μέλος	K/Δ	λDL Αρχής	λDL Τέλους	λSD Αρχής	λSD Τέλους	λ VRy Αρχής	λ VRy Τέλους
25	Δ1.3(1)	Κύριο	-	0.17	-	0.03	-	0.91
26	Δ2.3(1)	Κύριο	0.23	0.45	0.16	0.07	1.43!	0.14
27	Δ2.4(1)	Κύριο	0.29	0.24	0.09	0.11	0.66	1.15!
28	Δ3.3(1)	Κύριο	0.11	0.10	0.04	0.02	0.39	0.44
29	Δ4.1(1)	Κύριο	0.07	0.12	0.09	0.08	0.63	0.62
30	Δ5.1(1)	Κύριο	0.22	0.16	0.12	0.05	0.30	0.57
31	Δ6.3(1)	Κύριο	0.33	0.05	0.08	0.02	0.84	0.58
32	Δ7.1(1)	Κύριο	0.05	0.09	0.05	0.04	0.31	0.27
33	Δ8.1(1)	Κύριο	0.23	0.17	0.12	0.07	1.10 !	1.25!
34	Δ9.3(1)	Κύριο	0.24	0.14	0.15	0.16	1.14!	0.63
35	Δ9.4(1)	Κύριο	0.26	0.29	0.07	0.10	1.88!	1.85!
36	Δ10.1(1)	Κύριο	0.07	0.24	0.04	0.05	0.64	0.20
37	Δ11.1(1)	Κύριο	0.23	0.23	0.08	0.06	1.07 !	1.02 !
38	Δ34.1(1)	Κύριο	0.09	0.16	0.24	0.11	0.24	0.14
39	Δ35.1(1)	Κύριο	0.09	0.18	0.14	0.13	0.28	0.21
40	Δ47.1(1)	Κύριο	0.09	0.12	0.26	0.12	0.18	0.16

*Με σκίαση παρουσιάζονται τα μέλη που δεν εκπληρώνουν τον στόχο σχεδιασμού.

Πίνακας 1. Συγκεντρωτικός πίνακας λόγων επάρκειας δοκών.

	Μέλος	K/Δ	λDL Αρχής	λDL Τέλους	λSD Αρχής	λSD Τέλους	λ VRy	λ VRz
1	K1(0)	Κύριο	0.19	0.19	0.17	0.18	0.13	0.33
2	K1(1)	Κύριο	0.14	0.15	0.09	0.11	0.10	0.06
3	K2(0)	Κύριο	0.25	0.22	0.19	0.21	-	0.87
4	K2(1)	Κύριο	0.25	0.22	0.28	0.12	-	0.36
5	K3(0)	Κύριο	0.43	0.40	0.21	0.05	-	0.41
6	K3(1)	Κύριο	0.34	0.31	0.14	0.07	-	0.17
7	K4(0)	Κύριο	0.27	0.28	0.26	0.23	0.12	0.56
8	K4(1)	Κύριο	0.22	0.19	0.09	0.10	0.13	0.06
9	K5(0)	Κύριο	0.28	0.25	0.50	0.28	0.20	0.85
10	K5(1)	Κύριο	0.19	0.22	0.15	0.09	0.13	0.20
11	K6(0)	Κύριο	0.22	0.19	0.40	0.18	0.14	0.54
12	K6(1)	Κύριο	0.15	0.16	0.08	0.09	0.11	0.09
13	K7(0)	Κύριο	0.20	0.31	0.25	0.14	0.09	0.38
14	K7(1)	Κύριο	0.49	0.36	0.08	0.09	0.07	0.23
15	K8(0)	Κύριο	0.33	0.42	0.60	0.34	0.25	0.56
16	K8(1)	Κύριο	0.45	0.41	0.18	0.13	0.20	0.19
17	K9(0)	Κύριο	0.43	0.63	0.28	0.25	-	0.82
18	K9(1)	Κύριο	0.69	0.60	0.41	0.14	-	0.72
19	K10(0)	Κύριο	0.19	0.23	0.28	0.19	0.17	0.24
20	K10(1)	Κύριο	0.52	0.52	0.28	0.20	0.34	0.27
21	K11(0)	Κύριο	0.40	0.58	0.18	0.10	-	0.33
22	K11(1)	Κύριο	0.68	0.46	0.16	0.09	-	0.35

Πίνακας 2. Συγκεντρωτικός πίνακας λόγων επάρκειας υποστυλωμάτων.

Στους πίνακες 1 και 2 παρουσιάζονται οι λόγοι επάρκειας των μελών για τις αντίστοιχες στάθμες επιτελεστικότητας. Οι λόγοι επάρκειας λ (απαίτηση / ικανότητα) μας δείχνουν την πιθανότητα ένα μέλος του φέροντος οργανισμού να έχει ξεπεράσει την οριακή τιμή γωνίας στροφής χορδής θ ($\lambda = \theta / \theta_{lim}$) ή της τέμνουσας δύναμης ($\lambda = V / V_{Rd}$) όπως αυτοί αντιστοιχούν στην κάθε στάθμη επιτελεστικότητας. Για τις στάθμες DL, SD, NC και για μετατόπιση ίση με την αντίστοιχη στοχευόμενη υπολογίζονται οι λόγοι $\lambda = \theta / \theta_{lim}$. Αναγκαία προϋπόθεση για να ικανοποιείται το κριτήριο είναι η τιμή του λ να είναι μικρότερη της μονάδας, διαφορετικά το μέλος δεν επαρκεί για την αντίστοιχη στάθμη επιτελεστικότητας. Ο λόγος επάρκειας έναντι διάτμησης υπολογίζεται στη στάθμη επιτελεστικότητας SD. Όπως προαναφέρθηκε, το κτίριο είναι κατηγορίας σπουδαιότητας Σ3, δηλαδή κτίρια που στεγάζουν εγκαταστάσεις πολύ μεγάλης οικονομικής σημασίας, καθώς και κτίρια δημοσίων συναθροίσεων και γενικώς κτίρια στα οποία παρευρίσκονται πολλοί άνθρωποι κατά μεγάλο μέρος του 24ώρου (Παράρτημα 2.1, ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2012), πράγμα που σημαίνει ότι πρέπει να παραμένει λειτουργικό ακόμη και κατά τη διάρκεια σεισμού. Οι επιτρεπόμενες βλάβες σ' αυτό είναι οι ελαφριές και οι σημαντικές. Άρα, οι προς μελέτη στάθμες επιτελεστικότητας είναι η στάθμη A (Damage Limitation, DL) και η στάθμη B (Significant Damage, SD), με πιθανότητα υπέρβασης εντός 50 ετών ίση με 50% και 10% αντίστοιχα.

Περίοδος T (έτη)	Πιθανότητα υπέρβασης εντός 50 ετών (P/50)	A/A	Στάθμη επιτελεστικότητας (επίδοσης) Φ.Ο.		
			Άμεση χρήση A (DL)	Προστασία ζωής B (SD)	Αποφυγή κατάρ. Γ (NC)
975	5%/50	0	○ A ₀	○ B ₀	○ Γ ₀
475	10%/50	1	○ A ₁	○ B ₁	● Γ ₁
72	50%/50	2	○ A ₂	● B ₂	■ Γ ₂
31	80%/50	3	● A ₃	■ B ₃	■ Γ ₃
Ορολογία EC8			DL	SD	NC

 Πίνακας 2.1
ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Σχήμα 9. Στόχοι σχεδιασμού κατά EC8, ΕΑΚ. [16]

Μελετώντας τους πίνακες 1,2 είναι εμφανές ότι τα μέλη του φορέα που είναι πιο αδύναμα να παραλάβουν φορτία είναι οι δοκοί, ενώ τα υποστυλώματα επαρκούν πλήρως.

7.ΕΚΔΗΛΩΣΗ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ – ΠΡΟΤΥΠΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ - ΧΡΟΝΟΥ ISO P834

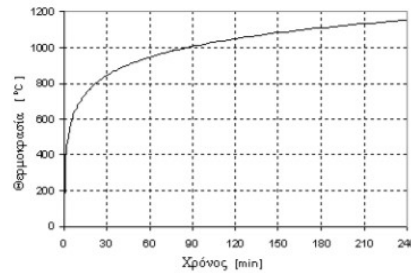
Η πρότυπη καμπύλη θερμοκρασίας – χρόνου χαρακτηρίζεται από την θερμοκρασία του αέρα στο πυροδιαμέρισμα η οποία αυξάνεται συνεχώς με το χρόνο, αλλά με επιβραδυνόμενο ρυθμό. Η συνάρτηση αυτή δεν παριστά κανένα τύπο φυσικής φωτιάς σε κτίριο και ο δείκτης πυραντίστασης που αναφέρεται στην καμπύλη αυτή δεν δείχνει τον πραγματικό χρόνο κατά τον οποίο ένα στοιχείο θα επιζήσει σε μία πυρκαγιά κτιρίου, αλλά αποτελεί συγκριτική ένδειξη της πιθανότητας ενός στοιχείου να επιβιώσει σε μία σοβαρή πυρκαγιά. Η μεταβολή της θερμοκρασίας συναρτήσει του χρόνου κατά τον ISO – 834 είναι:

$$T - T_0 = 345 \cdot \log (8 \cdot t + 1) \quad (1)$$

όπου:

T η θερμοκρασία του χώρου καύσης
 T_0 η κανονική θερμοκρασία δωματίου (20 °C)
 t χρόνος καύσης σε λεπτά

t (min)	$T - T_0$ (°C)
0	0
5	556
10	658
15	719
30	822
60	925
90	986
120	1029
180	1090
240	1133
360	1194



$T - T_0 = 345 \log (8t + 1)$
 T : θερμοκρασία χώρου καύσης
 T_0 : θερμοκρασία του δοκιμίου κατά την έναρξη της δοκιμασίας
 t : χρόνος σε λεπτά

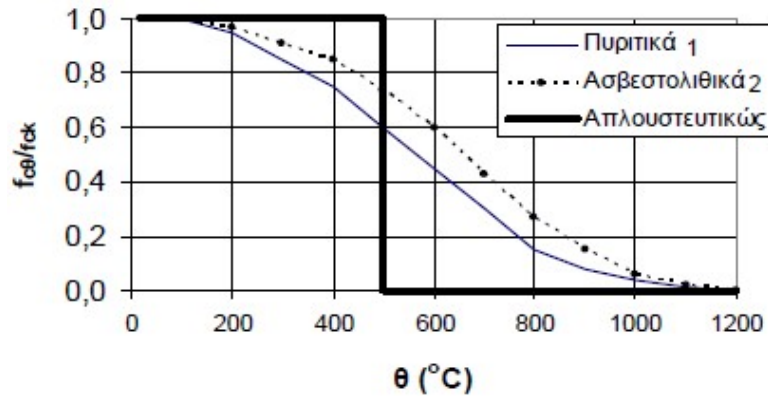
Σχήμα 10. Καμπύλη ISO – 834: 2000 Θερμοκρασία – Χρόνος. [9]

Μη έχοντας πραγματική μελέτη αποτίμησης βλαβών ύστερα από πυρκαγιά, χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση ένα υποθετικό σενάριο εκδήλωσης πυρκαγιάς στην υφιστάμενη κατασκευή. Αρχικά, θεωρήθηκε ο συνολικός χρόνος πυρκαγιάς και με τη χρήση της καμπύλης ISO υπολογίστηκε η αντίστοιχη μέγιστη θερμοκρασία. Όπως προαναφέρθηκε, τα ασβεστολιθικά αδρανή είναι καλύτερα από τα πυριτικά, άρα εύλογα επιλέχθηκαν για το συγκεκριμένο παράδειγμα. Στη συνέχεια, έχοντας υπολογίσει τις μέγιστες θερμοκρασίες που σημειώθηκαν στα μέλη τα οποία έβλαψε η φωτιά, κρίθηκε αναγκαίος ο υπολογισμός των νέων μειωμένων αντοχών. Η μείωση της μέγιστης θλιπτικής τάσεως του σκυροδέματος εκφράζεται μέσω του συντελεστή, k_c όπου:

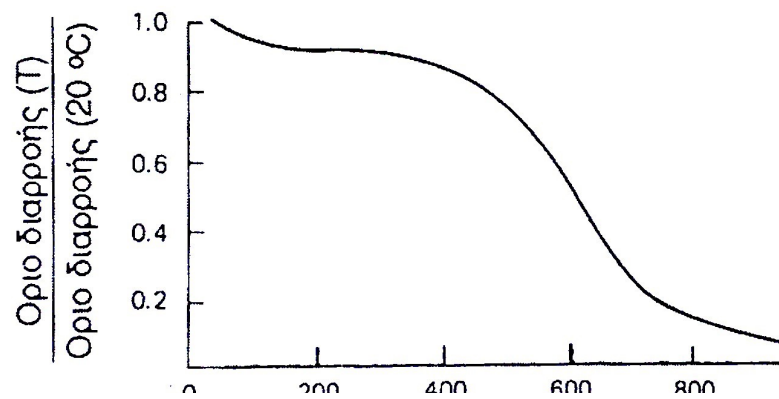
$$k_c (\theta) = f_{c\theta} (\theta) / f_{ck} \quad (2)$$

με $f_{c\theta} (\theta)$ η τελική μέγιστη θλιπτική τάση και f_{ck} η χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος.

Ενώ η μείωση του ορίου διαρροής του χάλυβα υπολογίστηκε σύμφωνα με το Σχήμα 14.

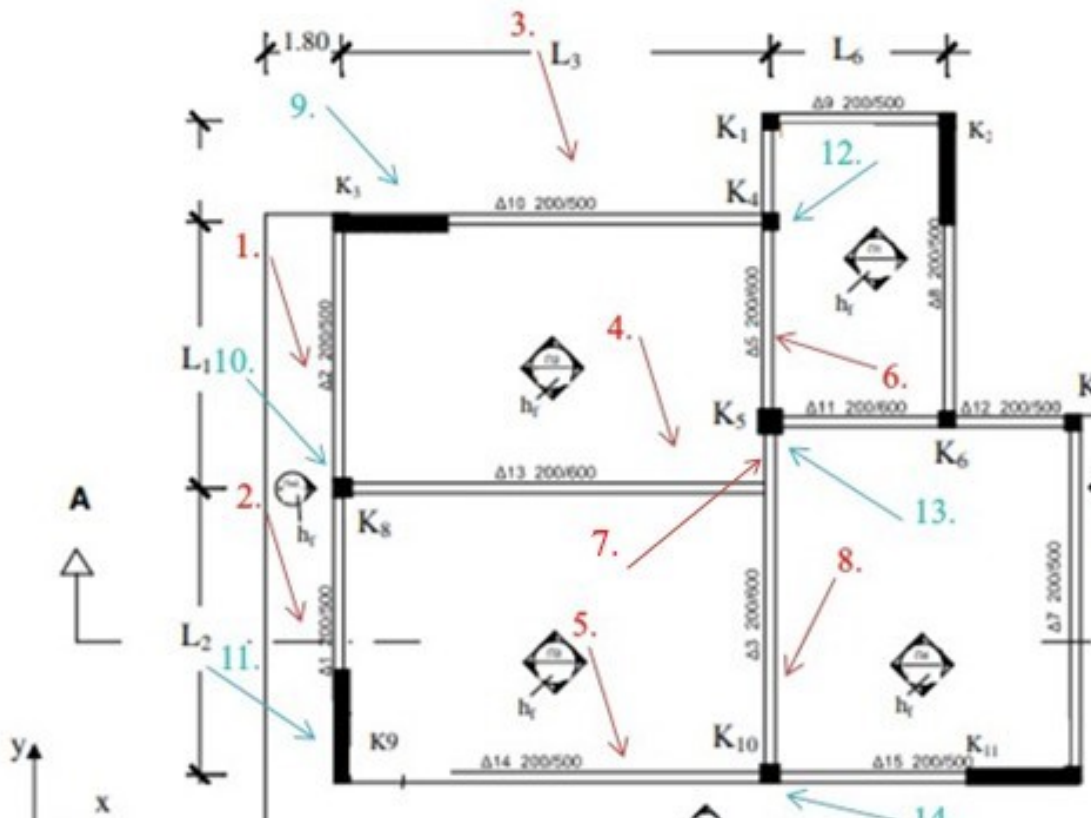


Σχήμα 11. Μεταβολή του συντελεστή $k_c(\theta)$ συναρτήσει της θερμοκρασίας (EC2). [15]



Σχήμα 12. Επίδραση υψηλών θερμοκρασιών στο όριο διαρροής του χάλυβα. [3]

Κατά το υποθετικό σενάριο, η πυρκαγιά εκδηλώθηκε στην δυτική πλευρά του κτιρίου, ξεκίνησε από το ισόγειο και εξαπλώθηκε σταδιακά στον πρώτο όροφο. Η συνολική διάρκεια της πυρκαγιάς ήταν 30 min και η μέγιστη θερμοκρασία που αναπτύχθηκε ήταν 840 °C. Στο παρακάτω σχήμα, φαίνονται αναλυτικότερα τα μέλη που έβλαψε η πυρκαγιά.



Σχήμα 13. Κάτοψη με σημειωμένα τα βλαμμένα μέλη.

Ισόγειο:

	Μέλος	Διάρκεια [min]	Μέγιστη θερμοκρασία [° C]	Τελική αντοχή f_{ck} [MPa]	Τελική αντοχή f_{yk} [MPa]	Τελική αντοχή f_{ywk} [MPa]
1.	Δοκός Δ.2.4 (0):	30	840	5	60	60
2.	Δοκός Δ.2.3 (0)	30	840	5	60	60
3.	Δοκός Δ.3.3 (0)	10	680	10	160	160
4.	Δοκός Δ.11.1 (0)	10	680	10	160	160
5.	Δοκός Δ.9.4 (0)	10	680	10	160	160
6.	Δοκός Δ.1.1 (0)	3	500	15	380	380
7.	Δοκός Δ.1.2 (0)	3	500	15	380	380
8.	Δοκός Δ.1.3 (0)	3	500	15	380	380
9.	Υποστύλωμα K3	30	840	5	60	60
10.	Υποστύλωμα K8	30	840	5	60	60
11.	Υποστύλωμα K9	30	840	5	60	60
12.	Υποστύλωμα K4	3	500	15	380	380
13.	Υποστύλωμα K5	3	500	15	380	380
14.	Υποστύλωμα K10	3	500	15	380	380

Πίνακας 3. Μέλη που έβλαψε η πυρκαγιά στο ισόγειο.

Πρώτος όροφος:

	Μέλος	Διάρκεια [min]	Μέγιστη θερμοκρασία [° C]	Τελική αντοχή f_{ck} [MPa]	Τελική αντοχή f_{yk} [MPa]	Τελική αντοχή f_{ywk} [MPa]
1.	Δοκός Δ.2.4 (1):	20	780	7	100	100
2.	Δοκός Δ.2.3 (1)	20	780	7	100	100
3.	Δοκός Δ.3.3 (1)	5	580	14	305	305
4.	Δοκός Δ.11.1 (1)	5	580	14	305	305
5.	Δοκός Δ.9.4 (1)	5	580	14	305	305
6.	Δοκός Δ.1.1 (1)	-	-	-	-	-
7.	Δοκός Δ.1.2 (1)	-	-	-	-	-
8.	Δοκός Δ.1.3 (1)	-	-	-	-	-
9.	Υποστύλωμα K3	20	780	7	100	100
10.	Υποστύλωμα K8	20	780	7	100	100
11.	Υποστύλωμα K9	20	780	7	100	100
12.	Υποστύλωμα K4	-	-	-	-	-
13.	Υποστύλωμα K5	-	-	-	-	-
14.	Υποστύλωμα K10	-	-	-	-	-

*(-): Τα συγκεκριμένα μέλη δεν επηρεάστηκαν από την πυρκαγιά.

Πίνακας 4. Μέλη που έβλαψε η πυρκαγιά στον πρώτο όροφο.

8.ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΚΔΗΛΩΣΗ ΤΗΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ

Σε αυτό το στάδιο της εργασίας εφαρμόστηκε το σενάριο της πυρκαγιάς στον φορέα με τη χρήση του λογισμικού και έγινε εκ νέου αποτίμηση ώστε να εκτιμηθεί η επίδραση που είχε η φωτιά στην κατασκευή. Στους επόμενους πίνακες παρουσιάζονται οι νέοι λόγοι επάρκειας των μελών.

	Μέλος	K/Δ	λDL Αρχής	λDL Τέλους	λSD Αρχής	λSD Τέλους	λ VRy Αρχής	λ VRy Τέλους
1	Δ1.3(-1)	Κύριο	-	0.09	-	0.14	-	0.57
2	Δ4.1(-1)	Κύριο	0.52	0.53	0.30	0.38	0.50	0.42
3	Δ5.1(-1)	Κύριο	0.20	0.43	0.09	0.06	0.11	0.20
4	Δ7.1(-1)	Κύριο	0.28	0.13	0.09	0.18	0.16	0.09
5	Δ8.1(-1)	Κύριο	0.25	0.52	0.20	0.09	0.23	0.21
6	Δ1.1(0)	Κύριο	0.35	0.28	0.27	0.42	1.21 !	1.22 !
7	Δ1.2(0)	Κύριο	0.29	-	0.47	-	2.44!	-
8	Δ1.3(0)	Κύριο	-	0.59	-	0.42	-	1.33!
9	Δ2.3(0)	Κύριο	0.41	0.30	0.68	0.29	1.88!	0.80
10	Δ2.4(0)	Κύριο	0.53	0.51	0.39	0.52	1.07 !	1.69!
11	Δ3.3(0)	Κύριο	0.12	0.18	0.06	0.13	1.07 !	0.84
12	Δ4.1(0)	Κύριο	0.47	0.45	0.60	0.34	1.42 !	1.26 !
13	Δ5.1(0)	Κύριο	0.26	0.29	0.08	0.11	0.49	0.93
14	Δ6.3(0)	Κύριο	0.42	0.18	0.36	0.24	1.15 !	0.85

	Μέλος	K/Δ	λDL Αρχής	λDL Τέλους	λSD Αρχής	λSD Τέλους	λ VRy Αρχής	λ VRy Τέλους
15	Δ7.1(0)	Κύριο	0.10	0.13	0.08	0.12	0.84	0.66
16	Δ8.1(0)	Κύριο	0.57	0.51	0.46	0.55	1.66!	2.06!
17	Δ9.3(0)	Κύριο	0.50	0.71	0.71	0.51	1.50!	1.10 !
18	Δ9.4(0)	Κύριο	0.52	0.62	0.55	0.50	1.86!	2.19!
19	Δ10.1(0)	Κύριο	0.15	0.30	0.19	0.24	1.18 !	0.79
20	Δ11.1(0)	Κύριο	0.77	0.63	0.35	0.19	1.63!	1.34!
21	Δ49.1(0)	Κύριο	0.24	0.25	0.55	0.23	0.36	0.29
22	Δ1.1(1)	Κύριο	0.35	0.23	0.12	0.23	0.58	1.08 !
23	Δ1.2(1)	Κύριο	0.16	-	0.12	-	1.83!	-
24	Δ1.3(1)	Κύριο	-	0.10	-	0.03	-	0.86
25	Δ2.3(1)	Κύριο	0.21	0.34	0.24	0.07	1.24!	0.14
26	Δ2.4(1)	Κύριο	0.30	0.24	0.09	0.20	0.67	1.17!
27	Δ3.3(1)	Κύριο	0.20	0.09	0.09	0.03	0.47	0.39
28	Δ4.1(1)	Κύριο	0.15	0.40	0.07	0.18	1.02 !	0.72
29	Δ5.1(1)	Κύριο	0.15	0.14	0.05	0.05	0.17	0.40
30	Δ6.3(1)	Κύριο	0.17	0.07	0.05	0.04	0.35	0.36
31	Δ7.1(1)	Κύριο	0.07	0.06	0.06	0.06	0.43	0.24
32	Δ8.1(1)	Κύριο	0.25	0.15	0.15	0.06	1.04 !	1.31!
33	Δ9.3(1)	Κύριο	0.24	0.08	0.20	0.05	1.19!	0.51
34	Δ9.4(1)	Κύριο	0.28	0.30	0.08	0.15	1.11 !	1.46!
35	Δ10.1(1)	Κύριο	0.08	0.11	0.06	0.07	0.60	0.38
36	Δ11.1(1)	Κύριο	0.36	0.04	0.13	0.03	1.10 !	1.00 !

*Με σκίαση παρουσιάζονται τα μέλη που δεν εκπληρώνουν τον στόχο σχεδιασμού.

Πίνακας 5. Συγκεντρωτικός πίνακας λόγων επάρκειας δοκών μετά την πυρκαγιά.

	Μέλος	K/Δ	λDL Αρχής	λDL Τέλους	λSD Αρχής	λSD Τέλους	λ VRy	λ VRz
1	K1(0)	Κύριο	0.33	0.29	0.17	0.17	0.14	0.32
2	K1(1)	Κύριο	0.26	0.31	0.11	0.15	0.11	0.15
3	K2(0)	Κύριο	0.26	0.28	0.16	0.25	-	0.91
4	K2(1)	Κύριο	0.20	0.17	0.22	0.10	-	0.45
5	K3(0)	Κύριο	0.42	0.31	0.18	0.06	-	0.38
6	K3(1)	Κύριο	0.38	0.34	0.16	0.08	-	0.13
7	K4(0)	Κύριο	0.32	0.31	0.35	0.39	0.18	0.50
8	K4(1)	Κύριο	0.26	0.19	0.09	0.09	0.13	0.08
9	K5(0)	Κύριο	0.30	0.26	0.46	0.27	0.43	0.79
10	K5(1)	Κύριο	0.18	0.23	0.21	0.14	0.09	0.27
11	K6(0)	Κύριο	0.28	0.26	0.67	0.41	0.31	0.48
12	K6(1)	Κύριο	0.13	0.13	0.08	0.07	0.12	0.09
13	K7(0)	Κύριο	0.19	0.32	0.31	0.32	0.14	0.42
14	K7(1)	Κύριο	0.39	0.27	0.10	0.09	0.06	0.18
15	K8(0)	Κύριο	0.34	0.38	0.59	0.35	0.26	0.63
16	K8(1)	Κύριο	0.52	0.43	0.34	0.15	0.31	0.14

	Μέλος	K/Δ	λDL Αρχής	λDL Τέλους	λSD Αρχής	λSD Τέλους	λ VRy	λ VRz
17	K9(0)	Κύριο	0.49	0.46	0.40	0.23	-	0.92
18	K9(1)	Κύριο	0.63	0.60	0.64	0.14	-	0.63
19	K10(0)	Κύριο	0.29	0.28	0.79	0.22	0.59	0.22
20	K10(1)	Κύριο	0.37	0.31	0.40	0.13	0.17	0.23
21	K11(0)	Κύριο	0.40	0.40	0.38	0.19	-	0.93
22	K11(1)	Κύριο	0.55	0.51	0.65	0.17	-	0.41

Πίνακας 6. Συγκεντρωτικός πίνακας λόγων επάρκειας υποστυλωμάτων μετά την πυρκαγιά.

Γενικά παρατηρείται ότι η εικόνα της κατασκευής πριν και μετά την εκδήλωση της πυρκαγιάς δεν παρουσιάζει έντονες διαφορές. Ωστόσο, μετά το πέρας του φαινομένου, αστόχησαν τέσσερις επιπλέον δοκοί και οι λόγοι επάρκειας εμφανίζονται αυξημένοι σε μεγάλο ποσοστό των μελών, ειδικότερα σε αυτά της δυτικής πλευράς του κτιρίου, όπου εκδηλώθηκε η πυρκαγιά. Βέβαια, τα υποστυλώματα εξακολουθούν να παρουσιάζουν μια καλή συμπεριφορά αφού κανένα δεν ξεπερνά το επιτρεπόμενο όριο.

9.ΕΝΙΣΧΥΣΗ

9.1.ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

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. Αναλυτικότερα, η επέμβαση θεωρείται οικονομικά ωφέλιμη μόνο εάν κοστίζει λιγότερο από το 80 % της απομένουσας αξίας της κατασκευής. Η απομένουσα αξία της κατασκευής εκτιμάται ως το κόστος ανακατασκευής μειωμένο αναλογικά κατά τα χρόνια ζωής, σε σχέση με την κατ' εκτίμηση συνολική διάρκεια ζωής της. Σε αυτό το σημείο, κρίνεται απαραίτητος ο υπολογισμός του δείκτη δ , που είναι άμεσα εξαρτώμενος από τη σχέση του κόστους της επέμβασης προς το κόστος πλήρους ανακατασκευής και από την ηλικία της κατασκευής. Για $\delta \leq 0.8$ συνίσταται επέμβαση ενώ όταν ο δείκτης ξεπερνά αυτή την τιμή κρίνεται αναγκαία η πλήρης ανακατασκευή. Βέβαια, λαμβάνοντας υπόψιν τις σημερινές συνθήκες ζωής, θα πρέπει ίσως η οριακή τιμή $\delta = 0.8$ να αναθεωρηθεί και να μειωθεί. Εφόσον ο βαθμός βλάβης και το οικονομικό κόστος πληρούν τις προϋποθέσεις, υπάρχει μεγάλη ποικιλία τρόπων επέμβασης, που κυμαίνονται από επιδιορθώσεις διακοσμητικού χαρακτήρα, έως σημαντικές επεμβάσεις στο δομικό σύστημα. Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά οι απαιτήσεις ενισχύσεις και οι αντίστοιχες μέθοδοι:

- Καμπτική ενίσχυση δομικών στοιχείων με πρόσθετες στρώσεις σκυροδέματος. Η συγκεκριμένη τεχνική μπορεί να εφαρμοσθεί σε πλάκες, δοκούς και στοιχεία θεμελίωσης ενώ εν γένει δεν συνιστάται για υποστυλώματα ή τοιχώματα. Συνιστάται η χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος, ιδιαίτερα εάν η ενίσχυση γίνεται στο κάτω πέλμα οριζοντίων στοιχείων.
- Καμπτική ενίσχυση με επικολλητά φύλλα από χάλυβα ή ινοπλισμένα πολυμερή. Η τεχνική εφαρμόζεται κυρίως σε πλάκες και δοκούς, σπανίως δε σε υποστυλώματα ή τοιχώματα. Τα ελάσματα ή τα υφάσματα επικολλώνται στο εφελκυσμένο πέλμα με χρήση ρητίνης. Στη περίπτωση των χαλύβδινων ελασμάτων χρησιμοποιούνται και βλήτρα σύνδεσης.

- Επεμβάσεις με στόχο την αύξηση της τοπικής πλαστιμότητας. Η αύξηση της τοπικής πλαστιμότητας επιτυγχάνεται με την επιβολή εξωτερικής περίσφιγξης ή με την εφαρμογή μανδύα από οπλισμένο σκυρόδεμα. Η τεχνική εφαρμόζεται κυρίως σε υποστυλώματα, είναι δε ευχερής σε στοιχεία με κυκλική διατομή ή ορθογωνική διατομή σχετικά μικρών διαστάσεων.
- Αποκατάσταση περιοχών με ανεπαρκή μήκη μάτισης (παράθεσης) ράβδων οπλισμού.
- Ενίσχυση υποστυλωμάτων με μανδύες Ο.Σ. με στόχο τη σύγχρονη ενίσχυση της εφελκυστικής και θλιβόμενης ζώνης. Η συγκεκριμένη τεχνική, είναι η πλέον αποτελεσματική μέθοδος αύξησης της καμπτικής ή/και διατμητικής αντοχής, της δυσκαμψίας και της πλαστιμότητας των υποστυλωμάτων. Συνιστώμενη επιλογή για την κατασκευή των μανδύων είναι το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.
- Επεμβάσεις με στόχο την αύξηση της φέρουσας ικανότητας έναντι τέμνουσας.
- Ενίσχυση κόμβων δοκών – υποστυλωμάτων. Οι ενισχύσεις στην περιοχή των κόμβων αποτελούν ίσως την δυσκολότερη κατασκευαστική διαδικασία στον τομέα των επεμβάσεων, επειδή εκεί συντρέχουν πολλά στοιχεία του φορέα.

9.2.ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΜΕ ΜΑΝΔΥΕΣ

Στην παρούσα κατασκευή, τα δοκάρια είναι αυτά που αδυνατούν να φτάσουν το στόχο σχεδιασμού, αφού πολλά από αυτά αστοχούν σε κάμψη ή/και διάτμηση. Επομένως, συνιστάται η ενίσχυση των συγκεκριμένων μελών. Σε πρώτο στάδιο έγινε δοκιμή ενίσχυσης με ινοπλισμένα πολυμερή αλλά στα αποτελέσματα που προέκυψαν, παρατηρήθηκε βελτίωση μόνο έναντι κάμψης, ενώ τα προβλήματα λόγω διάτμησης παρέμειναν. Συνεπώς ως μέθοδος ενίσχυσης επιλέχθηκαν μανδύες σκυροδέματος. Η τεχνική της κατασκευής μανδύων οπλισμένου σκυροδέματος είναι η πλέον αποτελεσματική μέθοδος αύξησης της καμπτικής ή/και διατμητικής τους αντοχής, της δυσκαμψίας τους και της πλαστιμότητάς τους. Συνήθως εφαρμόζεται σε περιπτώσεις στοιχείων με σοβαρές βλάβες ή γενικότερα όταν διαπιστώνεται ιδιαίτερη ανεπάρκεια της αντοχής τους. Η τεχνική περιλαμβάνει την αύξηση της διατομής με νέο σκυρόδεμα και νέους διαμήκεις και εγκάρσιους οπλισμούς περιμετρικά του αρχικού στοιχείου και είναι σκόπιμο να εκτείνεται περιμετρικά σε όλο το μήκος του στοιχείου. Το νέο σκυρόδεμα μπορεί να είναι είτε έγχυτο σκυρόδεμα είτε εκτοξευόμενο. Στη παρούσα εργασία επιλέχθηκε μανδύας ανοιχτού τύπου, διότι είναι δύσκολο να επιτευχθεί κλειστός μανδύας σε δοκούς, λόγω της υπερκείμενης πλάκας. Έγινε χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος καθώς παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα, όπως είναι η υψηλή θλιπτική του αντοχή, η καλή του πρόσφυση με το υλικό βάσης, η ικανότητά του να αυτοστηρίζεται (δεν απαιτείται ξυλότυπος) και η δυνατότητα να σκυροδετείται σε δυσπρόσιτες θέσεις.



Σχήμα 14. Διαδικασία εφαρμογής μανδύα με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. [19]

Σε αυτό το σημείο, έχοντας επιλέξει τρόπο ενίσχυσης των μελών, πρέπει να υλοποιηθεί ξανά ανελαστική στατική ανάλυση (Push-over), έτσι ώστε να εκτιμηθεί αν ο φορέας έχει ενισχυθεί επαρκώς. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε πάχος μανδύα ίσο με 150 mm τόσο στα περιμετρικά, όσο και στα εσωτερικά δοκάρια.

Παρακάτω δίνονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης:

	Μέλος	K/Δ	λDL Αρχής	λDL Τέλους	λSD Αρχής	λSD Τέλους	λ VRy Αρχής	λ VRy Τέλους
1	Δ1.3(-1)	Κύριο	-	0.10	-	0.07	-	0.50
2	Δ4.1(-1)	Κύριο	0.20	0.16	0.12	0.13	0.17	0.08
3	Δ5.1(-1)	Κύριο	0.13	0.31	0.09	0.06	0.12	0.18
4	Δ7.1(-1)	Κύριο	0.28	0.08	0.07	0.06	0.13	0.04
5	Δ8.1(-1)	Κύριο	0.32	0.41	0.06	0.09	0.19	0.20
6	Δ1.1(0)	Κύριο	0.17	0.21	0.07	0.09	0.36	0.73
7	Δ1.2(0)	Κύριο	0.27	-	0.20	-	1.36!	-
8	Δ1.3(0)	Κύριο	-	0.09	-	0.07	-	0.66
9	Δ2.3(0)	Κύριο	0.81	0.44	0.17	0.08	1.10 !	0.39
10	Δ2.4(0)	Κύριο	0.28	0.04	0.06	0.02	0.64	0.74
11	Δ3.3(0)	Κύριο	0.24	0.07	0.05	0.05	0.53	0.31
12	Δ4.1(0)	Κύριο	0.11	0.11	0.09	0.06	0.67	0.38
13	Δ5.1(0)	Κύριο	0.15	0.20	0.08	0.11	0.56	0.81
14	Δ6.3(0)	Κύριο	0.35	0.14	0.17	0.05	0.55	0.24
15	Δ7.1(0)	Κύριο	0.13	0.16	0.07	0.07	0.91	0.36
16	Δ8.1(0)	Κύριο	0.11	0.26	0.04	0.06	0.87	0.94
17	Δ9.3(0)	Κύριο	0.42	0.22	0.10	0.13	0.62	0.60
18	Δ9.4(0)	Κύριο	0.27	0.05	0.10	0.02	1.05 !	0.83
19	Δ10.1(0)	Κύριο	0.12	0.17	0.05	0.07	0.87	0.45
20	Δ11.1(0)	Κύριο	0.07	0.02	0.02	0.02	0.76	0.75
21	Δ35.1(0)	Κύριο	0.27	0.11	0.09	0.06	0.73	0.60
22	Δ37.1(0)	Κύριο	0.16	0.36	0.10	0.21	0.33	0.46
23	Δ49.1(0)	Κύριο	0.37	0.29	0.17	0.17	0.75	0.71
24	Δ1.1(1)	Κύριο	0.14	0.23	0.02	0.12	0.16	0.57
25	Δ1.2(1)	Κύριο	0.23	-	0.02	-	0.98	-
26	Δ1.3(1)	Κύριο	-	0.07	-	0.03	-	0.80
27	Δ2.3(1)	Κύριο	0.33	0.53	0.15	0.10	1.06 !	0.16
28	Δ2.4(1)	Κύριο	0.37	0.05	0.07	0.02	0.37	0.57
29	Δ3.3(1)	Κύριο	0.17	0.07	0.04	0.02	0.43	0.35
30	Δ4.1(1)	Κύριο	0.06	0.15	0.05	0.09	0.50	0.36
31	Δ5.1(1)	Κύριο	0.15	0.11	0.09	0.03	0.24	0.42
32	Δ6.3(1)	Κύριο	0.30	0.04	0.04	0.01	0.79	0.49
33	Δ7.1(1)	Κύριο	0.10	0.11	0.06	0.04	0.53	0.15
34	Δ8.1(1)	Κύριο	0.03	0.12	0.03	0.03	0.78	0.85
35	Δ9.3(1)	Κύριο	0.44	0.16	0.02	0.02	0.61	0.53
36	Δ9.4(1)	Κύριο	0.21	0.07	0.03	0.02	0.96	0.81
37	Δ10.1(1)	Κύριο	0.10	0.14	0.04	0.05	0.59	0.24
38	Δ11.1(1)	Κύριο	0.04	0.03	0.03	0.02	0.58	0.58
39	Δ34.1(1)	Κύριο	0.06	0.07	0.06	0.05	0.20	0.20

	Μέλος	K/Δ	λDL Αρχής	λDL Τέλους	λSD Αρχής	λSD Τέλους	λ VRy Αρχής	λ VRy Τέλους
40	Δ35.1(1)	Κύριο	0.10	0.06	0.11	0.04	0.22	0.23
41	Δ47.1(1)	Κύριο	0.10	0.15	0.15	0.09	0.19	0.10
42	Δ50.1(1)	Κύριο	0.06	0.08	0.07	0.09	0.45	0.46

*Με σκίαση παρουσιάζονται τα μέλη που δεν εκπληρώνουν τον στόχο σχεδιασμού.

Πίνακας 7. Συγκεντρωτικός πίνακας λόγων επάρκειας δοκών μετά την ενίσχυση.

	Μέλος	K/Δ	λDL Αρχής	λDL Τέλους	λSD Αρχής	λSD Τέλους	λ VRy	λ VRz
1	K1(0)	Κύριο	0.15	0.15	0.09	0.09	0.10	0.14
2	K1(1)	Κύριο	0.09	0.11	0.05	0.08	0.06	0.06
3	K2(0)	Κύριο	0.21	0.23	0.07	0.09	-	0.39
4	K2(1)	Κύριο	0.14	0.16	0.10	0.07	-	0.09
5	K3(0)	Κύριο	0.25	0.24	0.12	0.10	-	0.32
6	K3(1)	Κύριο	0.18	0.15	0.06	0.03	-	0.07
7	K4(0)	Κύριο	0.23	0.25	0.11	0.16	0.12	0.22
8	K4(1)	Κύριο	0.18	0.15	0.08	0.07	0.09	0.06
9	K5(0)	Κύριο	0.22	0.21	0.23	0.17	0.15	0.38
10	K5(1)	Κύριο	0.13	0.22	0.06	0.08	0.07	0.20
11	K6(0)	Κύριο	0.24	0.22	0.18	0.13	0.10	0.26
12	K6(1)	Κύριο	0.09	0.10	0.04	0.05	0.08	0.03
13	K7(0)	Κύριο	0.19	0.23	0.13	0.14	0.06	0.23
14	K7(1)	Κύριο	0.18	0.20	0.05	0.07	0.03	0.12
15	K8(0)	Κύριο	0.29	0.28	0.15	0.13	0.15	0.19
16	K8(1)	Κύριο	0.30	0.29	0.07	0.09	0.12	0.13
17	K9(0)	Κύριο	0.26	0.34	0.16	0.17	-	0.34
18	K9(1)	Κύριο	0.54	0.48	0.12	0.06	-	0.43
19	K10(0)	Κύριο	0.22	0.26	0.11	0.11	0.15	0.13
20	K10(1)	Κύριο	0.33	0.33	0.20	0.13	0.19	0.15
21	K11(0)	Κύριο	0.40	0.24	0.20	0.06	-	0.36
22	K11(1)	Κύριο	0.41	0.43	0.07	0.05	-	0.18

Πίνακας 8. Συγκεντρωτικός πίνακας λόγων επάρκειας υποστυλωμάτων μετά την ενίσχυση.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω αποτελέσματα, προκύπτει ότι η ενίσχυση με μανδύες βελτιώνει σημαντικά την συμπεριφορά της κατασκευής. Στα αποτελέσματα της αποτίμησης μετά την πυρκαγιά οι δοκοί που χρειαζόνταν ενίσχυση ($\lambda > 1$) προέκυψαν ίσες με 22. Πραγματοποιώντας την ενίσχυση η εικόνα βελτιώθηκε αισθητά. Παρόλα αυτά, όπως φαίνεται και στον πίνακα 7 κάποιες δοκοί εξακολουθούν να αστοχούν, συγκεκριμένα η Δ1.2(0), η Δ2.3(0), η Δ9.4(0) και η Δ2.3(1). Αυτό οφείλεται στην μειωμένη αντοχή των συγκεκριμένων μελών ύστερα από την εκδήλωση της πυρκαγιάς στην κατασκευή. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με διάφορα πάχη μανδύα ώστε να ενισχυθούν, ωστόσο οι λόγοι επάρκειας των αντίστοιχων δοκών έλαβαν τιμές μικρότερες της μονάδας για πάχος μανδύα ίσο με το τριπλάσιο των αρχικών διαστάσεων, λύση που θεωρήθηκε μη ρεαλιστική και μη

εφαρμόσιμη. Γι' αυτό το λόγο, διατηρήθηκε το πάχος μανδύα ίσο με 150 mm για όλες τις δοκούς. Επομένως, συμπεραίνεται ότι οι δοκοί αυτοί δεν μπορούν να ενισχυθούν περαιτέρω.

10.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρακάτω παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα συμπεράσματα στα οποία κατέληξε η παρούσα μελέτη:

- Η αναπτυσσόμενη θερμοκρασία σε ένα πυροδιαμέρισμα είναι, κατά κανόνα, υψηλότερη από αυτή στο εσωτερικό των υλικών τα οποία προσβάλει.
- Το σκυρόδεμα θεωρείται ως το υλικό με την καλύτερη αντίσταση σε πυρκαγιά. Ιδίως η χρήση ασβεστολιθικών αδρανών το καθιστά πιο πυράντοχο σε σχέση με σκυροδέματα πυριτικών.
- Η ανελαστική στατική ανάλυση υπερέχει της κλασικής ελαστικής καθώς είναι πιο ακριβής διότι δεν βασίζεται μόνο στη δυσκαμψία των μελών, αλλά συνεκτιμά και την αντοχή τους. Επίσης, εξασφαλίζεται η εποπτεία κατανομής των βλαβών στον φορέα, γίνεται απαλλαγή από ικανοτικά προσομοιώματα, μπορεί να ελεγχθεί η επάρκεια του φορέα για πολλές επιτελεστικότητες ταυτόχρονα και τέλος παρέχει πληροφόρηση σχετικά με την μορφή της δομικής ανεπάρκειας και βοηθάει να σχεδιαστεί η ενίσχυση είτε με αύξηση της αντοχής, είτε με αύξηση της πλαστιμότητας, είτε με συνδυασμό τους.
- Η αποτίμηση πριν και μετά την εκδήλωση της πυρκαγιάς έδειξε ότι τα υποστυλώματα μπορούν να φέρουν με επιτυχία τα επιβαλλόμενα φορτία αφού και στις δύο περιπτώσεις τα αποτελέσματα δεν απείχαν σημαντικά και κανένας λόγος επάρκειας δεν ξεπέρασε τη μονάδα.
- Η αποτίμηση πριν την εκδήλωση της πυρκαγιάς έδειξε ότι ένα μεγάλο ποσοστό των δοκών αδυνατεί να παραλάβει τα επιβαλλόμενα φορτία, καθώς αστοχούν σε κάμψη ή/και σε διάτμηση, χωρίς καν να ληφθεί υπόψιν η μείωση της αντοχής λόγω των υψηλών θερμοκρασιών.
- Μετά το πέρας της πυρκαγιάς, έχοντας συνυπολογίσει τις νέες μειωμένες αντοχές των μελών, η εικόνα που παρουσιάζουν οι δοκοί δεν διαφέρει σημαντικά από εκείνη της αρχικής αποτίμησης, καθώς η μόνη εναλλαγή είναι τέσσερις επιπλέον δοκοί που αστοχούν, δηλαδή ο λόγος επάρκειάς τους ξεπερνά τη μονάδα.
- Για την ενίσχυση των μελών επιλέχθηκε η μέθοδος των μανδύων διότι κρίθηκε ως η πλέον κατάλληλη για τις βλάβες του συγκεκριμένου φορέα, καθώς αστοχούσαν και σε κάμψη και σε διάτμηση.
- Η ενίσχυση κρίθηκε επιτυχής στο μεγαλύτερο ποσοστό των μελών, αλλά εξακολουθούσαν να παραμένουν προβλήματα σε τέσσερα δοκάρια, τα οποία έβλαψε η πυρκαγιά. Έτσι, κρίθηκε ότι δεν μπορούν να ενισχυθούν και ότι θα πρέπει να ληφθεί υπόψη κάποιο άλλο μέτρο για την αντιμετώπιση του προβλήματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Δρίτσος Σ.Η. (2018), “Ενισχύσεις – Επισκευές κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος”, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.
- [2] ΚΑΝ.ΕΠΕ., 2013, Κανονισμός Επεμβάσεων”, ΦΕΚ 2984/Β’/30-08-2017, 2^η Αναθεώρηση 2017.
- [3] Τριανταφύλλου Α.Χ. (2013), “Δομικά Υλικά”, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.
- [4] Φαρδής Μ.Ν. (2017), “Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος – Μέρος Ι”, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.
- [5] Φαρδής Μ.Ν. (2017), “Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος – Μέρος ΙΙ”, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.
- [6] Eurocode 2: Design of concrete structures, Part 10: Structural Fire Design.
- [7] ISO P834 Fire resistance tests – Elements of building construction Part 1: General requirements, International Organization for Standardization (ISO), 1999.
- [8] Mehmet M. Kose , Huseyin Temiz, Hanifi Binici, (2005), “Effects of fire on precast members: A case study”, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, K. Sutcu Imam University, Turkey.
- [9] Κωνσταντοπούλου Σ.Δ., Πετκίδης Δ.Π. (2012), “Σχεδιασμός έναντι πυρκαγιάς-Αριθμητικές εφαρμογές πάνω στα παραρτήματα του μέρους 1-2 των EC1, EC3, EC4”, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- [10] Νέζης Χ., Στάθης Π. (2007), “Επίδραση πυρκαγιάς σε κατασκευές από Ο.Σ.- Μέθοδοι αποκατάστασης και ενίσχυσης”, 13^ο Φοιτητικό Συνέδριο Επισκευών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.
- [11] Κωνταντίνου Ε., Λαμπροπούλου Α., (2006), “Πυρκαγιά - Μέθοδοι Επισκευής- Ενίσχυσης”, 12^ο Φοιτητικό Συνέδριο Επισκευών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.
- [12] Παπαγιαννόπουλου Π., Χατζηδουκάκη Γ., “Αποτίμηση – Ανάλυση κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ.”, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.
- [13] Ελένας Α. , Σίδερης Κ. Κ., (2018), “Επισκευή κατασκευής οπλισμένου σκυροδέματος μετά από έκθεση σε πυρκαγιά”, 18^ο Συνέδριο Σκυροδέματος, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Αθήνα.
- [14] Τάσσιος Θ.Π., Δεοδάτης Γ., (1984), “Πρακτικός σχεδιασμός κατασκευών από Ο.Σ. έναντι πυρκαγιάς”, σελ. VII, 14,23-24, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- [15] Τάσσιος Θ.Π., Χρονόπουλος Μ., (2007), “Πρακτικός οδηγός για την αποτίμηση φέρουσας ικανότητας και τις δομητικές επισκευές μετά από πυρκαγιά, σε μικρά κτίρια από σκυρόδεμα και από τοιχοποιία”, ΤΕΕ.
- [16] Βοηθητικό υλικό της εταιρείας LH ΛΟΓΙΣΜΙΚΗ για την υποστήριξη του προγράμματος.
- [17] <https://www.sandmeyersteel.com/A330.html> , (Λήψη φωτογραφικού υλικού).
- [18] Δρίτσος Σ.Η., (2018), “Ενισχύσεις -Επισκευές κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος”, Παρουσιάσεις μαθήματος, <https://eclass.upatras.gr/>, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.
- [19] <https://www.sandberg.co.uk/> , (Λήψη φωτογραφικού υλικού)
- [20] <https://www.klk.gr/> , (Λήψη φωτογραφικού υλικού)

