

Επισκευή Κατασκευής Οπλισμένου Σκυροδέματος μετά από Έκθεση σε Πυρκαγιά

Repair of a Fire-Exposed Reinforced Concrete Structure

Αναξαγόρας Ελένας¹, Κοσμάς Κ. Σίδερης²

*Λέξεις κλειδιά: Επισκευή, Ενίσχυση, Έκθεση σε Πυρκαγιά
Rehabilitation, Strengthening, Fire-Damaged Structure*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Στην εργασία παρουσιάζεται η μελέτη αποκατάστασης βλαβών μιας κατασκευής οπλισμένου σκυροδέματος, οι οποίες προκλήθηκαν από εκδήλωση πυρκαγιάς. Διεξήχθησαν επιτόπιοι και εργαστηριακοί έλεγχοι για τη διάγνωση του επίπεδου βλάβης της κατασκευής. Στη συνέχεια, ακολούθησε αριθμητική ανάλυση για την αποτίμηση της υφιστάμενης κατάστασης της κατασκευής, λαμβάνοντας υπόψη τις εναπομείνουσες μηχανικές ιδιότητες των υλικών. Οι ελλείψεις που διαπιστώθηκαν μέσω της οπτικής επιθεώρησης και των δοκιμών, δεν προκλήθηκαν μόνο από την έκθεση της κατασκευής στην πυρκαγιά. Έτσι, ανιχνεύθηκε χαμηλό ποσοστό διατμητικού οπλισμού, σημαντική διασπορά αντοχής και ενανθράκωση του σκυροδέματος που προϋπήρχαν της θερμικής έκθεσης. Αντίθετα, έντονες παραμορφώσεις διαμηκών ράβδων οπλισμού υποστρωμάτων, η μείωση της αντοχής των υλικών σε δομικά στοιχεία καθώς και η τοπική αποφλοίωση του σκυροδέματος, προκλήθηκαν λόγω της ανάπτυξης υψηλών θερμοκρασιών. Το σχέδιο επισκευής βασίστηκε στη χρήση μανδύων από οπλισμένο σκυρόδεμα σε δομικά στοιχεία με εκτεταμένες βλάβες, σε συνδυασμό με τοπική αποκατάσταση βλαβών δομικών στοιχείων με μικρές βλάβες.

ABSTRACT : This study presents an investigation of a r/c structure exposed to a fire accident. First, a number of on-site and laboratory-based techniques were conducted for the diagnosis of the post-fire structural material status. Next, the results of a numerical analysis exposed the shortages of the structure, considering the post-fire mechanical and geometrical material properties. Not all the deficiencies found through the visual inspection and the tests, were caused by the fire. Thus, low stirrup amount, significant dispersion of concrete strength and concrete carbonation were detected and were existent before the thermal

¹ Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης,
email: elenas@civil.duth.gr

² Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης,
email: kksider@civil.duth.gr

exposure. Whereas, buckling of longitudinal column reinforcements, strength reduction and concrete spalling, were caused through the fire impact. Appropriate techniques were adopted for the rehabilitation of the structure. The repair scheme was based on the use of r/c jackets on structural elements with severe damage, combined with local damage rehabilitation of elements with low damage.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Πολλά περιστατικά εκδήλωσης πυρκαγιάς έχουν παρουσιασθεί σε οικοδομές, λόγω απρόβλεπτων ατυχηματικών συμβάντων όπως η χρήση εκρηκτικών υλών ή βραχυκύκλωση ηλεκτρικών συσκευών. Η επίδραση της πυρκαγιάς είναι μία τυχηματική κατάσταση που είναι δυνατόν να επιφέρει σημαντικές βλάβες στις κατασκευές. Έτσι, η επίδραση της πυρκαγιάς στο σκυρόδεμα και στον οπλισμό δεν πρέπει να υποτιμάται, ακόμη κι όταν η υφιστάμενη επικάλυψη του οπλισμού παρέχει κάποιο βαθμό προστασίας στην περίπτωση πυρκαγιάς με ανάπτυξη χαμηλής θερμοκρασίας, λόγω χρονικά σύντομης έκθεσης του δομικού στοιχείου σε αυτή. Το σκυρόδεμα δύναται να αντέξει διάφορα επίπεδα βλάβης ανάλογα με τη ένταση της πυρκαγιάς, τα επίπεδα θερμοκρασίας που έχουν αναπτυχθεί και τον χρόνο έκθεσης των δομικών υλικών - σκυρόδεμα και χάλυβας - σε αυτή. Ανάλογα με την περίπτωση, οι επιδράσεις της πυρκαγιάς στα στοιχεία σκυροδέματος περιλαμβάνουν: μείωση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος, μικρορωγμές εντός της μικροδομής του σκυροδέματος, μεταβολή χρώματος των αδρανών ανάλογα με την μείωση αντοχής, μείωση του μέτρου ελαστικότητας σκυροδέματος και χάλυβα, απώλεια συνάφειας μεταξύ σκυροδέματος και χάλυβα, μείωση της θλιπτικής και εφελκυστικής αντοχής του χάλυβα.

Η παρούσα εργασία μελετά την ενίσχυση μιας τριώροφης οικοδομής με υπόγειο στην Θάσο, που εκτέθηκε σε πυρκαγιά. Η πυρκαγιά εκδηλώθηκε στο ισόγειο κατάστημα, μετά από ένα βραχυκύκλωμα στην ηλεκτρική εγκατάσταση (Σχήμα 1). Το κτήριο κατασκευάστηκε το 1976, σύμφωνα με τους τότε ισχύοντα κανονισμό φορτίσεων (ΦΕΚ 325/A/31.12.1945), αντισεισμικό κανονισμό (ΦΕΚ 36A/26-02-1959) και κανονισμό διαστασιολόγησης κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος (ΦΕΚ 160A/26-07-1954). Έτσι, για την ανέγερση της κατασκευής χρησιμοποιήθηκαν ως δομικά υλικά, σκυρόδεμα ποιότητας B 160 και χάλυβας οπλισμού ποιότητας St I. Οι μηχανικές ιδιότητες των προαναφερθέντων υλικών αντιστοιχούν σε ένα σκυρόδεμα με χαρακτηριστική αντοχή $f_{ck,cyl} = 11 \text{ MN/m}^2$ (C8/10) και μια χάλυβα οπλισμού με χαρακτηριστική αντοχή $f_{yk} = 220 \text{ MN/m}^2$, σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2.

Για την ακριβή αξιολόγηση των βλαβών μετά την πυρκαγιά και τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα οπλισμού και του σκυροδέματος, πραγματοποιήθηκαν λεπτομερείς επιτόπου παρατηρήσεις σε συνδυασμό με επιτόπου και εργαστηριακά πειράματα. Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα της αξιολόγησης των βλαβών και τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών που προέκυψαν πειραματικά, παρουσιάζονται κατάλληλες μέθοδοι επισκευής κι ενίσχυσης για την αποκατάσταση του κτηρίου.



Σχήμα 1. Ισόγειο της κατασκευής που εκτέθηκε σε πυρκαγιά.

ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

Επιτόπιος Οπτικός Έλεγχος

Ο οπτικός έλεγχος της κατασκευής πραγματοποιήθηκε για να αξιολογηθούν οι εμφανείς βλάβες στο ισόγειο του κτηρίου, όπου και ξέσπασε η πυρκαγιά. Έτσι, παρατηρήθηκαν αποφλοιώσεις του σκυροδέματος επικάλυψης σε διάφορες περιοχές πλάκας, υποστυλωμάτων και δοκών. Οι αποφλοιώσεις σκυροδέματος (που σε μερικές περιοχές ήταν πολύ έντονες) εξέθεσαν τον οπλισμό σε ένα εξαιρετικά διαβρωτικό περιβάλλον, λόγω της εγγύτητας σε θαλάσσιο περιβάλλον (Σχήματα 2 και 3). Επιπλέον, σε περιοχές με πολύ έντονες αποφλοιώσεις εντοπίστηκε ανεπαρκής διατμητικός οπλισμός (μεγάλες αποστάσεις και ανεπαρκής αγκύρωση συνδετήρων) εκτεθειμένος σε ένα εξαιρετικά διαβρωτικό περιβάλλον, τόσο σε δοκούς (Σχήματα 2 και 3) όσο και σε υποστυλώματα (Σχήματα 4 και 5). Λυγισμός του διαμήκη οπλισμού παρατηρήθηκε σε δυο υποστυλώματα (Σχήμα 5). Ο ανεπαρκής διατμητικός οπλισμός (συνδετήρες) που αναφέρθηκε ανωτέρω, επηρέασε τον λυγισμό του διαμήκη οπλισμού των υποστυλωμάτων. Τέλος, δεν παρατηρήθηκε αξιόλογη αλλαγή χρώματος του σκυροδέματος προς το κόκκινο.



Σχήμα 2. Αποφλοίωση σκυροδέματος σε δοκό.



Σχήμα 3. Έντονη αποφλοίωση σκυροδέματος σε δοκό.



Σχήμα 4. Ανεπαρκείς συνδετήρες σε υποστύλωμα.



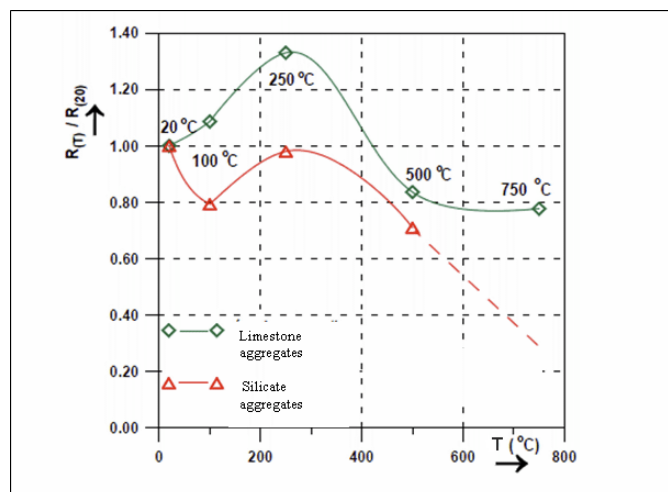
Σχήμα 5. Ανεπαρκείς συνδετήρες και λυγισμός διαμήκη οπλισμού σε υποστύλωμα.

Μη Καταστροφικοί Επιτόπιοι Έλεγχοι

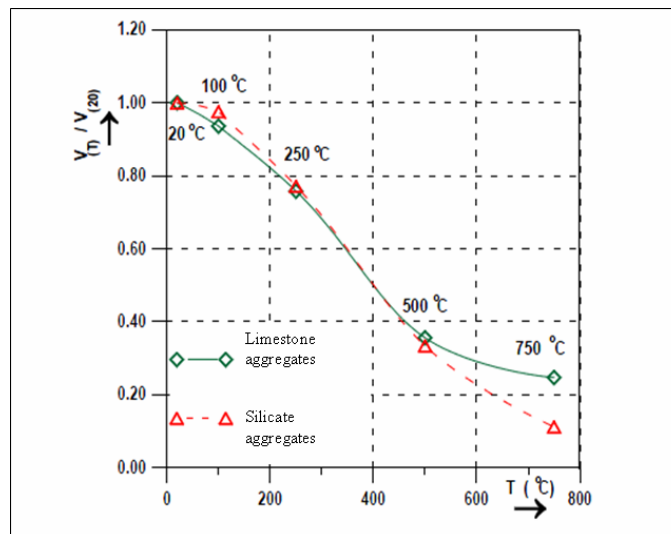
Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος προσδιορίστηκε αξιολογώντας έναν συνδυασμό μετρήσεων αντοχής πυρήνων και μη καταστροφικών τεχνικών (κρουσιμέτρου και μετρήσεων ταχύτητας υπερήχων) σύμφωνα με το EN 13791 (CEN 2007). Οι πυρήνες λήφθηκαν σε διάφορες θέσεις από το κάτω τρίτο του ύψους έξι υποστυλωμάτων. Η εναπομένουσα θλιπτική αντοχή των δομικών στοιχείων που προσβλήθηκαν από την πυρκαγιά, εκτιμήθηκε χρησιμοποιώντας μη καταστροφικές τεχνικές, βασισμένες σε προηγούμενες έρευνες (Οικονόμου κ.ά 1996) (Savva et al. 2005) όπου οι συνθέσεις του σκυροδέματος ταυτιζόταν με την αντίστοιχη της κατασκευής που ερευνήθηκε (Σχήματα 6 και 7).

Τα αποτελέσματα ελέγχου της θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος ποικίλλαν και συναρτάντο από την κατανομή της βλάβης, την ύπαρξη ρωγμών, το πλάτος τους και τις αποστάσεις μεταξύ των ρωγμών. Αμφότερες οι διαδικασίες, έδειξαν ότι η θλιπτική αντοχή σκυροδέματος ήταν χαμηλότερη από την ποιότητα B 160, η οποία επιλέχθηκε στον αρχικό σχεδιασμό και διαστασιολόγηση του κτηρίου. Σε αυτή την περίπτωση, η ποιότητα σκυροδέματος κατατάχθηκε στην κατηγορία B 120 (C8/10 σύμφωνα με ισχύοντα Ευρωκώδικα 2). Η διασπορά της αντοχής οφείλεται πιθανότατα στην επιτόπια μίξη και την ανεπαρκή συμπύκνωση του σκυροδέματος, που ήταν συνήθεις πρακτικές την χρονική περίοδο ανέγερσης του κτηρίου (1976).

Η μέγιστη θερμοκρασία που αναπτύχθηκε στο σκυροδέμα εκτιμήθηκε με βάση την ταχύτητα των υπερήχων των δομικών στοιχείων που εξετάστηκαν (Σχήμα 7). Έτσι, η μέγιστη θερμοκρασία που αναπτύχθηκε στο κάτω τρίτο του ύψους του ισογείου, εκτιμήθηκε ότι ανήλθε σε 400 °C, μέσω επιτόπιων δοκιμών.



Σχήμα 6. Λόγος της εναπομένουσας τιμής της ένδειξης του κρουσιμέτρου $R(T)$ προς την αρχική τιμή $R(20)$ για σκυροδέματα που παρασκευάστηκαν με ασβεστολιθικά και πυριτικά αδρανή και εκτέθηκαν σε υψηλές θερμοκρασίες (Οικονόμου κ.ά 1996).



Σχήμα 7. Λόγος της εναπομένουσας τιμής της ταχύτητας των υπερήχων $V(t)$ προς την αρχική τιμή $V(20)$ για σκυροδέματα που παρασκευάστηκαν με ασβεστολιθικά και πυριτικά αδρανή και εκτέθηκαν σε υψηλές θερμοκρασίες (Οικονόμου κ.ά 1996).

Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, επέδειξαν ότι το βάθος ενανθράκωσης κυμαίνεται μεταξύ 1 cm και 3 cm. Επιπροσθέτως, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το βάθος ενανθράκωσης ήταν τουλάχιστον ίσο με την επικάλυψη σκυροδέματος. Έτσι, η προστασία του χάλυβα από διάβρωση δεν ήταν δεδομένη.

Ο έλεγχος των αδρανών του σκυροδέματος στο άνω τρίτο του ύψους των υποστρωμάτων, όπου παρατηρήθηκε λυγισμός του διαμήκη οπλισμού, έδειξε έναρξη ασβεστοποίησης. Επιπλέον, έναρξη ασβεστοποίησης εντοπίστηκε σε διάφορες δοκούς. Αυτό οφείλεται στην υψηλή θερμοκρασία που αναπτύχθηκε σε αυτή την περιοχή, δηλαδή το άνω τρίτο του ύψους ισογείου. Έτσι, η μέγιστη θερμοκρασία που αναπτύχθηκε σε αυτή την περιοχή εκτιμήθηκε ότι κυμάνθηκε μεταξύ 500 °C και 600 °C.

Εργαστηριακοί Έλεγχοι

Οι πυρήνες σκυροδέματος που λήφθηκαν από θέσεις που επιλέχθηκαν κατά τον επιτόπιο οπτικό έλεγχο, συνέβαλαν στον προσδιορισμό της θλιπτικής του αντοχής, παράλληλα με τις μη καταστροφικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν επιτόπου. Έτσι, έξι δείγματα πυρήνων εξετάστηκαν πειραματικά στο εργαστήριο. Τα αποτελέσματα ταξινομήσαν την ποιότητα του σκυροδέματος στην κατηγορία B 120. Ένα μονωμένο δείγμα ταξινομήθηκε στην κατηγορία B 160. Επομένως, οι μη καταστροφικοί επιτόπιοι έλεγχοι της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος, επιβεβαίωσαν πλήρως την ανομοιομορφία της ποιότητας σκυροδέματος και την χαμηλότερη από την ποιότητα σχεδιασμού και διαστασιολόγησης της κατασκευής σε ορισμένες περιοχές της κατασκευής. Τέλος, μια χημική ανάλυση ανίχνευσε αμελητέο ποσό χλωριόντων στο σκυρόδεμα.

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΕΛΕΓΧΩΝ

Ο επιτόπιος οπτικός έλεγχος και τα (επιτόπια και εργαστηριακά) πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι, η κατασκευή οπλισμένου σκυροδέματος εκτέθηκε σε μια θερμοκρασία μεταξύ 400 °C και 600 °C. Η υψηλότερη θερμοκρασία (500 °C - 600 °C) εκδηλώθηκε στις περιοχές, δοκών και υποστυλωμάτων, όπου εντοπίστηκε έναρξη ασβεστοποίησης. Στις ίδιες περιοχές εκδηλώθηκε και λυγισμός του διαμήκη οπλισμού σε δυο υποστυλώματα. Σε αυτές τις θερμοκρασίες ο χάλυβας οπλισμού ποιότητας St I παρουσιάζει μείωση του ορίου διαρροής στο 50% (στους 400 °C) και στο 30% (στους 600 °C) σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή σε κανονική θερμοκρασία περιβάλλοντος. Επιπλέον, ο χάλυβας οπλισμού παρουσιάζει μείωση της εφελκυστικής του αντοχής στο 95% (στους 400 °C) και στο 50% (στους 600 °C) σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή σε κανονική θερμοκρασία περιβάλλοντος. Περαιτέρω, η πλαστιμότητα του χάλυβα μειώνεται λόγω ταχείας ψύξης του υλικού από το νερό που χρησιμοποιείται κατά την πυρόσβεση. Το σκυρόδεμα παρουσιάζει μείωση της θλιπτικής του αντοχής στο 80% (στους 400 °C) και στο 55% (στους 600 °C) σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή σε κανονική θερμοκρασία περιβάλλοντος. Το ποσοστό μείωσης εξαρτάται από την σύνθεση των αδρανών σκυροδέματος. Η ποιότητα του σκυροδέματος κυμάνθηκε μεταξύ B 120 και B 160, αν και στον αρχικό σχεδιασμό και διαστασιολόγηση της κατασκευής επιλέχθηκε ποιότητα B 160.

Οι βλάβες που παρατηρήθηκαν στην κατασκευή οφείλονται τόσο σε ατέλειες κατασκευαστικές και συντήρησης όσο και στην έκθεση σε πυρκαγιά. Ανεπαρκής διατμητικός οπλισμός (συνδετήρες) σε δοκούς και υποστυλώματα, ενανθράκωση σκυροδέματος και ανεπαρκής κάλυψη σκυροδέματος, είναι χαρακτηριστικές κατασκευαστικές ατέλειες και ελλιπής συντήρηση της κατασκευής. Η μειωμένη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος σε σχέση με την σχεδιαστική αντοχή οφείλεται σε ανεπαρκή σύνθεση και ανάμιξη του εργοταξιακού σκυροδέματος, σε ανεπαρκή συμπύκνωση, παράλληλα με την έκθεση σε υψηλή θερμοκρασία λόγω έκθεσης σε πυρκαγιά. Η αποφλοίωση σκυροδέματος που παρατηρήθηκε στο κάτω μέρος δοκών και της πλάκας οροφής, που σε μερικές περιοχές ήταν έντονη, προκλήθηκε από την έκθεση σε πυρκαγιά (Σχήματα 2 έως 4. Ο λυγισμός διαμήκη οπλισμού που παρατηρήθηκε σε δυο υποστυλώματα, οφείλεται ομοίως, στην έκθεση των αντίστοιχων υποστυλωμάτων σε πυρκαγιά (Σχήμα 5).

ΕΠΙΣΚΕΥΗ ΚΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Κάποιες από τις ανεπάρκειες που εντοπίστηκαν (π.χ. ανεπαρκής οπλισμός συνδετήρων, χαμηλότερη ποιότητα σκυροδέματος από την αντίστοιχη σχεδιασμού και διαστασιολόγησης και ο λυγισμός διαμήκη οπλισμού σε υποστυλώματα) επηρεάζουν στην στατική συμπεριφορά της κατασκευής. Για το λόγο αυτόν, ο φορέας υπολογίστηκε και διαστασιολογήθηκε λαμβάνοντας υπόψη τις μηχανικές ιδιότητες που προέκυψαν από τους επιτόπιους και εργαστηριακούς ελέγχους μετά την έκθεση της κατασκευής σε πυρκαγιά. Η ανάλυση του φορέα έδειξε την έκταση της αναγκαίας επισκευής κι ενίσχυσης της κατασκευής. Η

ενίσχυση πραγματοποιήθηκε μέσω μανδύων οπλισμένου σκυροδέματος σε δοκούς και υποστυλώματα με μειωμένη οριακή αντοχή σε σχέση με την απαιτούμενη σύμφωνα με του ισχύοντες κανονισμούς. Για την υλοποίηση των εργασιών ενίσχυσης της κατασκευής, απαιτείται προσωρινή υποστύλωσή της για την παραλαβή των φορτίων. Ακολούθως, πραγματοποιείται καθαίρεση του σαθρού σκυροδέματος και οπλισμού, τοποθέτηση κατάλληλου νέου διαμήκη οπλισμού και σύνδεσή του με τον υφιστάμενο μέσω συγκόλλησης, τοποθέτηση νέου και πυκνότερου διατμητικού οπλισμού, και τέλος, σκυροδέτηση του μανδύα στα δομικά στοιχεία που ενισχύθηκαν. Δευτερεύουσες βλάβες όπως μικρό πάχος επικάλυψης σκυροδέματος, ρωγμές μικρού πλάτους στο σκυροδέμα και διάβρωση οπλισμού επισκευάζονται με τοπικές επεμβάσεις αποκατάστασης που δεν απαιτούν στατική ανάλυση και διαστασιολόγηση των στοιχείων της κατασκευής.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η πυρκαγιά είναι δυνατόν να προκαλέσει σημαντικές βλάβες σε μια κατασκευή. Το επίπεδο της βλάβης προσδιορίζεται με επιτόπιο οπτικό και πειραματικό έλεγχο καθώς και με εργαστηριακό έλεγχο. Η αποκατάσταση της κατασκευής μπορεί να είναι τοπική ή εκτεταμένη, ανάλογα με το επίπεδο της δομικής βλάβης. Η παρούσα μελέτη αφορά τον έλεγχο μιας κατασκευής οπλισμένου σκυροδέματος που εκτέθηκε σε πυρκαγιά. Διεξήχθησαν επιτόπιες παράλληλα με εργαστηριακές έρευνες για τη διάγνωση της κατάστασης της κατασκευής μετά την πυρκαγιά. Τα αποτελέσματα στατικής ανάλυσης της κατασκευής κατέδειξε τα δομικά στοιχεία της κατασκευής που απαιτούν ενίσχυση, λαμβάνοντας υπόψη τις μηχανικές ιδιότητες των δομικών υλικών μετά την έκθεσή τους σε υψηλή θερμοκρασία λόγω πυρκαγιάς. Η ενίσχυση των δομικών στοιχείων πραγματοποιήθηκε με τοποθέτηση μανδύων οπλισμένου σκυροδέματος σε δοκούς και υποστυλώματα με μειωμένη οριακή αντοχή σε σχέση με την απαιτούμενη, σύμφωνα με τους κανόνες των ισχυόντων κανονισμών. Δευτερεύουσες βλάβες αποκαταστάθηκαν με τοπικές επεμβάσεις αποκατάστασης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

CEN, "EN13791: Assessment of in situ compressive strength of structures and precast concrete components", (2007)

ΦΕΚ "325/A/31.12.1945: Κανονισμός Φορτίσεων Δομικών Έργων", (1945)

ΦΕΚ "160A/26-07-1954: Περί κανονισμών δια την μελέτην και εκτέλεσιν οικοδομικών έργων εξ ωπλισμένου σκυροδέματος", (1954)

ΦΕΚ "36Α/26-02-1959: Περί αντισεισμικού κανονισμού οικοδομικών έργων", (1959)

Χ. Οικονόμου, Α Σάββα, Κ. Μπαλτζοπούλου, Κ. Κ. Σίδερης, Κ. Σίδερης: "Προσδιορισμός της επίδρασης των υψηλών θερμοκρασιακών δράσεων στη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος με τη χρήση έμμεσων μεθόδων". Πρακτικά 12ου Ελληνικού Συνεδρίου Σκυροδέματος, τόμος Ι, Λεμεσός, Κύπρος (1996), 259-271

Savva A., Manita P. & Sideris K.K., "Influence of Elevated Temperatures at the Mechanical Properties of Blended Cement Concrete Prepared with Limestone and Silicate Aggregates", Cement and Concrete Composites, Vol. 27, No 2 (2005), 239-248