

Έλεγχος υφιστάμενων γεφυρών από σκυρόδεμα Evaluation of Greek old concrete river road bridges

Παπαγιάννη-Ι¹, Πανέτσος-Π², Αναστασίου-Ε³, Παπαχριστοφόρου-Μ⁴

Λέξεις κλειδιά: Γέφυρες από σκυρόδεμα, Ανθεκτικότητα, Μη-Καταστρεπτικοί Έλεγχοι

Keywords: Concrete bridges, Durability, Non-Destructive Testing

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα από τρεις γέφυρες που ελέγχθηκαν στα πλαίσια τη συνεργασίας του Εργαστηρίου Δομικών Υλικών του Α.Π.Θ. με το Τμήμα Συντήρησης Γεφυρών της Εγνατίας Οδός Α.Ε. Η μεθοδολογία ελέγχου περιλάμβανε, μεταξύ άλλων, οπτική παρατήρηση, αποτύπωση παθολογίας και προσδιορισμό ή εκτίμηση των εναπομείναντων μηχανικών χαρακτηριστικών και ελαστικότητας. Χρησιμοποιήθηκαν μη-καταστρεπτικές μέθοδοι, αλλά και λήψη πυρήνων, ενώ διενεργήθηκε και προσδιορισμός πορώδους, ΡΗ, βάθους ενανθράκωσης του σκυροδέματος, όπως και της περιεκτικότητάς του σε χλωρίοντα και άλλα άλατα. Στις περιπτώσεις αυτές αναγνωρίστηκαν η τοπογραφία των βλαβών και ο μηχανισμός της διάβρωσης ή όποιας άλλης προσβολής του σκυροδέματος. Επιπρόσθετα, από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά των αρχείων της Εγνατίας Οδός Α.Ε., φαίνεται ότι υπάρχουν κάποιες περιοχές στις γέφυρες που είναι πιο ευάλωτες. Αυτές οι περιοχές θα μπορούσαν να προστατευτούν καλύτερα, προκειμένου να αυξηθεί ο ωφέλιμος χρόνος ζωής των γεφυρών από σκυρόδεμα.

ABSTRACT: The results from three concrete river bridges are presented and commented, based on the collaboration between the Laboratory of Building Materials at the Aristotle University of Thessaloniki and the Department of Bridge Maintenance of Egnatia Odos S.A. Based on the research findings, the topography of damage and the mechanisms of corrosion or any other concrete deterioration have been recognized, using a combination of concrete coring and NDT measurements. The damaged areas could be protected more in order to prolong the service life of concrete bridges. Technical faults associated with the drainage system cause failures and premature corrosion repeatedly. Although most of the concrete bridges are near the sea (at a distance of 1 km) the concrete does not show relatively high content of chlorides, while carbonation depth is generally low.

¹ Ομότιμη Καθηγήτρια, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ., email: papayian@civil.auth.gr

² Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ Α.Ε., e-mail: ppane@egnatia.gr

³ Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ., email: elan@civil.auth.gr

⁴ Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ., email: papchr@civil.auth.gr

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η επισκευή και συντήρηση του δικτύου οδών και αυτοκινητοδρόμων είναι ύψιστης σημασίας, προκειμένου να εξασφαλιστεί η ασφαλής μεταφορά ανθρώπων και αγαθών. Οι γέφυρες από σκυρόδεμα, που αποτελούν μέρος αυτού του δικτύου, λειτουργούν εδώ και αρκετές δεκαετίες και, εφόσον οι κατασκευές από σκυρόδεμα εμφανίζουν συχνά προβλήματα ανθεκτικότητας, τόσο η λειτουργικότητα όσο και η φέρουσα ικανότητά τους πρέπει να παρακολουθούνται μονίμως. Σε αυτή την κατεύθυνση υπάρχουν συστήματα διαχείρισης γεφυρών (Miyamoto et al 2000), αλλά και σχετικές τεχνικές οδηγίες (AASHTO, 2000). Η φθορά των κατασκευών από σκυρόδεμα έχει σαν σημείο εκκίνησης είτε κατασκευαστικά λάθη, είτε τη μακροχρόνια έκθεση σε δυσμενείς συνθήκες περιβάλλοντος. Τα κατασκευαστικά λάθη περιλαμβάνουν κακό σχεδιασμό του μίγματος σκυροδέματος, χαμηλή αντοχή και ανεπαρκές πάχος επικάλυψης οπλισμού, ενώ κατασκευαστικές αστοχίες όπως η κακή σφράγιση των αρμών ή η κακή απορροή των ομβρίων προκαλούν επίσης τοπικές φθορές στο σκυρόδεμα (Enright & Frangopol, 2000). Η έκθεση στις περιβαλλοντικές συνθήκες περιλαμβάνει διαβρωτικά στοιχεία στο νερό που ρέει κάτω από τη γέφυρα ή ακόμα και εντομοκτόνα που ψεκάζονται στη γέφυρα λόγω παρακείμενης αγροτικής δραστηριότητας. Η ενανθράκωση και οι συνθήκες γήρανσης, όπως η εναλλαγή κύκλων ψύξης-απόψυξης ή ύγρανσης-ξήρανσης μπορούν επίσης να πλήξουν την παθητική προστασία του χάλυβα οπλισμού του σκυροδέματος. Τέλος, η μηχανική φθορά από τη μακροχρόνια χρήση της γέφυρας μπορεί να πλήξει τη λειτουργικότητά της, ειδικά αν μεγάλες φορτίσεις ή φαινόμενα κόπωσης έχουν προκαλέσει εκτεταμένες ρηγματώσεις (Lawrence et al 2011).

Η παρούσα μελέτη αφορά τρεις γέφυρες κατασκευασμένες σε διαφορετικές χρονικές περιόδους τα τελευταία 70 χρόνια, από οπλισμένο ή προεντεταμένο σκυρόδεμα. Οι γέφυρες αυτές είναι η γέφυρα του Βενέτικου με χρονολογία κατασκευής πριν το 1955, η γέφυρα του Αξιού που κατασκευάστηκε το 1968 και η γέφυρα του Στρυμόνα που κατασκευάστηκε το 1985. Οι τρεις αυτές γέφυρες έδειξαν διαφορετικούς βαθμούς φθοράς και εκτιμήθηκαν ως προς την παθολογία, την ανθεκτικότητα και τις μηχανικές αντοχές τους. Η παρούσα κατάσταση των γεφυρών εκτιμήθηκε με οπτική παρατήρηση, ενώ συντάχθηκαν χάρτες παθολογίας με κατασκευαστικές αστοχίες που προκαλούν εκτεταμένη τοπική φθορά στο σκυρόδεμα. Η ανθεκτικότητα εκτιμήθηκε μετρώντας την ενανθράκωση και τη συγκέντρωση αλάτων στο σκυρόδεμα, ενώ η μηχανική αντοχή εκτιμήθηκε με τη λήψη πυρήνων.

Τα αποτελέσματα της έρευνας μπορούν να βοηθήσουν στον εντοπισμό συνήθων δομικών αστοχιών και αιτιών φθοράς στις γέφυρες από σκυρόδεμα. Εφόσον υπάρχει ένα κενό 13-30 χρόνων μεταξύ των χρονολογιών κατασκευής των γεφυρών, τα προβλήματα ανθεκτικότητας που πηγάζουν όχι μόνο από τη μακροχρόνια χρήση, αλλά από το περιβάλλον και τα κατασκευαστικά λάθη μπορούν να αναδειχθούν καλύτερα. Η καλύτερη κατανόηση της τοπογραφίας των φθορών μπορούν να οδηγήσουν σε καλύτερη διαχείριση των γεφυρών.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Κοινή μεθοδολογία ακολουθήθηκε στη μελέτη και των τριών γεφυρών, που περιλάμβανε το στάδιο της οπτικής παρατήρησης, το στάδιο των επί-τόπου ελέγχων και το στάδιο των εργαστηριακών ελέγχων. Το στάδιο της οπτικής παρατήρησης περιλαμβάνει την παραγωγή ή την επικαιροποίηση των αρχιτεκτονικών σχεδίων και την αναλυτική αναγνώριση φθορών, που επισημαίνονται στα σχέδια αλλά και σε φωτογραφίες, καταλήγοντας έτσι σε χάρτες παθολογίας (ACI, 1992). Χρησιμοποιήθηκαν μη-καταστρεπτικοί έλεγχοι για να επιβεβαιωθούν τα ευρήματα της οπτικής παρατήρησης και πιο συγκεκριμένα, ανιχνευτής οπλισμού για τις θέσεις και την κατάσταση των οπλισμών και σονόμετρο για τη διερεύνηση ύπαρξης ρηγματώσεων (ACI, 1998). Επίσης, έγινε μια εκτίμηση της ενανθράκωσης με ψεκασμό με διάλυμα φαινολοφθαλεΐνης στα σημεία πυρηνοληψίας. Οι πυρήνες που λήφθηκαν ελέγχθηκαν στο εργαστήριο ως προς το πορώδες, την πυκνότητα, τη θλιπτική αντοχή και το στατικό μέτρο ελαστικότητας. Οι εργαστηριακοί έλεγχοι περιλάμβαναν επίσης χημική ανάλυση του νερού του ποταμού και μετρήσεις PH , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- σε διάφορα βάθη σκυροδέματος. Τέλος, κομμάτια του οπλισμού μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο, όπου αξιολογήθηκε η αντοχή και ο βαθμός διάβρωσής τους.

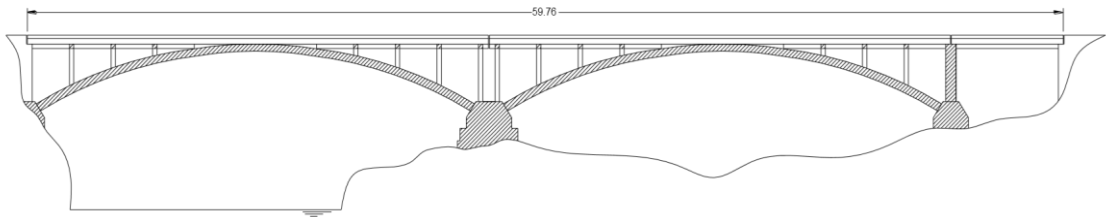
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΕΦΥΡΑΣ ΒΕΝΕΤΙΚΟΥ

Περιγραφή

Η γέφυρα του Βενέτικου είναι κατασκευασμένη από οπλισμένο σκυρόδεμα και έχει τρία ανοίγματα, ενώ αποτελεί τμήμα της παλιάς εθνικής οδού Γρεβενών-Λάρισας. Το μήκος της γέφυρας είναι 60 m και το συνολικό πλάτος 7,52 m. Το πρώτο άνοιγμα είναι 10 m, ενώ τα άλλα δύο 25 m και τα καταστρώματα υποστηρίζονται από δύο αψιδωτούς φορείς και αυτοί από 28 τετραγωνικά υποστρώματα. Και τα τρία ανοίγματα εδράζονται σε απλές στηρίξεις, ενώ τα άκρα των αψίδων συνδέονται με μεταλλικές πλάκες στις ογκώδεις βάσεις από σκυρόδεμα, επιτρέποντας περιστροφές περί του εγκάρσιου άξονα. Η ηλικία της γέφυρας υπολογίζεται σε πάνω από 60 χρόνια.

Οπτική παρατήρηση – Παθολογία

Εφόσον δε βρέθηκαν αρχιτεκτονικά σχέδια, αρχικά διενεργήθηκε τοπογραφική αποτύπωση (Σχήμα 1). Επίσης, η κατηγορία σκυροδέματος και το είδος του χάλυβα οπλισμού ήταν άγνωστο, οπότε χρησιμοποιήθηκε ανιχνευτής οπλισμού για τον προσδιορισμό των θέσεων, του μεγέθους και του πάχους επικάλυψης του οπλισμού (Σχήμα 2). Η γέφυρα λειτουργεί σε δυσμενές περιβάλλον μια και η περιοχή εμφανίζει υψηλή υγρασία σε συνδυασμό με συχνές εναλλαγές ψύξης-απόψυξης κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Πολλοί τύποι φθορών αναγνωρίστηκαν στην εξωτερική επιφάνεια του σκυροδέματος και καταγράφηκαν στους χάρτες παθολογίας.



Σχήμα 1. Αρχιτεκτονική αποτύπωση της γέφυρας του Βενέτικου



Σχήμα 2. Ανίχνευση και χαρτογράφηση οπλισμού

Στο Σχήμα 3 φαίνεται εκτεταμένη αποκόλληση υλικού, εμφάνιση του οπλισμού και προχωρημένη διάβρωση του. Η έκταση της φθοράς του σκυροδέματος κυμαίνεται από ήπια έως πολύ σοβαρή, ενώ βρέθηκαν και εξανθήσεις (Σχήμα 3). Κρυμμένοι ασφαλτικοί αρμοί βρέθηκαν στο κατάστρωμα της γέφυρας, οι οποίοι επιτρέπουν τη διαρροή νερού στα κύρια φέροντα στοιχεία της γέφυρας. Αυτή η συνεχιζόμενη απορροή υδάτων μέσα από τα δομικά στοιχεία φαίνεται να προκαλεί σοβαρές φθορές στο σκυρόδεμα, αλλά και διάβρωση του οπλισμού.



Σχήμα 3. Ολική αποκόλληση σκυροδέματος, εμφάνιση και διάβρωση οπλισμού σε υποστύλωμα (αριστερά) και εξανθήσεις σε δοκούς (δεξιά) – γέφυρα Βενέτικου

Εργαστηριακοί έλεγχοι

Λήφθηκαν έξι πυρήνες από τις ασίδες και χρησιμοποιήθηκε το κρουσίμετρο προκειμένου να εκτιμηθεί η αντοχή του σκυροδέματος στις θέσεις δειγματοληψίας. Οι πυρήνες ελέγχθηκαν στο εργαστήριο ως προς την πυκνότητα, την ταχύτητα διάχυσης ηχητικού κύματος, τη θλιπτική αντοχή και το πορώδες. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά πυρήνων (γέφυρα Βενέτικου)

Πυρήνας	Πυκνότητα (g/cm ³)	Ταχύτητα σονομέτρησης (km/s)	Εκτίμηση θλιπτικής αντοχής με κρουσίμετρο (MPa)	Θλιπτική αντοχή (MPa)	Πορώδες (%)
1	2,476	4,1	30	26,6	13,9
2	2,606	4,2	24	34,1	13,0
3	2,474	4,7	28	19,8	6,6
4	2,474	4,7	31	12,8	6,3
5	2,395	4,6	30	15,2	14,5
6	2,272	3,5	30	-	12,8
M.O.	2,450	4,3	28,8	21,7	11,2

Για τον υπολογισμό του βάθους ενανθράκωσης αρχικά χρησιμοποιήθηκε ψεκασμός με δείκτη φαινολοφθαλείνης στις θέσεις δειγματοληψίας (Σχήμα 4), όπου ενανθράκωση βάθους μεγαλύτερου των 30 mm βρέθηκε σε όλες τις θέσεις. Οι εργαστηριακοί χημικοί έλεγχοι περιλάμβαναν προσδιορισμό Cl⁻, SO₄⁻², NO₃⁻ και PH, τόσο στην εξωτερική επιφάνεια του πυρήνα (συνήθως στα εξωτερικά 3 cm του πυρήνα), όσο και στο εσωτερικό του πυρήνα (συνήθως σε βάθη > 7 cm από την επιφάνεια του πυρήνα). Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 2.



Σχήμα 4. Εκτίμηση βάθους ενανθράκωσης (αριστερά) και μικροσκοπική παρατήρηση σκυροδέματος πυρήνων (δεξιά) – γέφυρα Βενέτικου

Η μικροσκοπική παρατήρηση των πυρήνων (Σχήμα 4) έδειξε ότι τα αδρανή αποτελούνται από λεία φυσικά πυριτικά χαλίκια και άμμο, χωρίς πολύ καλή κοκκομετρική διαβάθμιση αλλά με επαρκή συνάφεια αδρανών-τσιμεντόπαστας. Η τσιμεντόπαστα είχε εκτιμώμενο πορώδες 7-8% και διάμετρο πόρων λιγότερο από 400 μm, ενώ δεν ανιχνεύθηκε παρουσία αλάτων.

Πίνακας 2. Χημικές ιδιότητες πυρήνων (γέφυρα Βενέτικου)

Πυρήνας	Cl ⁻		Άλατα (%)		NO ₃ ⁻		PH	
	Άνω 3cm	Κάτω 3cm	Άνω 3cm	Κάτω 3cm	Άνω 3cm	Κάτω 3cm	Άνω 3cm	Κάτω 3cm
1	0,03	0,05	0,16	0,16	0,03	n/d*	8,6	11,0
2	0,35	0,12	0,30	0,23	0,03	n/d	9,1	11,9
3	0,06	0,05	0,15	0,15	0,04	0,02	10,3	11,8
4	-	0,37	-	0,22	-	n/d	-	11,3
5	-	0,03	-	0,22	-	0,03	-	11,9
6	0,02	0,02	0,16	0,16	0,03	n/d	9,4	10,8

n/d: μη ανιχνεύσιμο

Μια διαβρωμένη ράβδος που λήφθηκε από την κατασκευή χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της αρχική αντοχής του οπλισμού. Μετά από την αφαίρεση του διαβρωμένου τμήματος, ο έλεγχος αντοχής σε εφελκυσμό έδειξε τάση διαρροής ίση με 318 MPa και μέγιστη τάση ίση με 454 MPa, ενώ η αρχική διάμετρος των 24 mm είχε μειωθεί κατά 50% λόγω διάβρωσης.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΕΦΥΡΑΣ ΑΞΙΟΥ

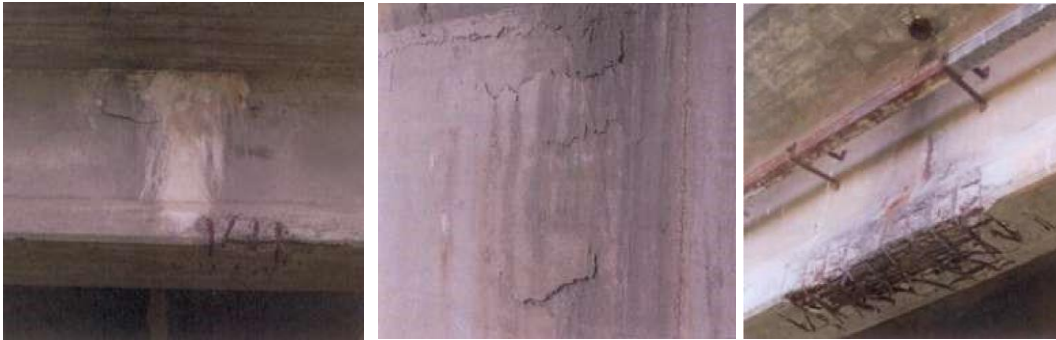
Περιγραφή

Η γέφυρα του Αξιού είναι 28 ανοιγμάτων, κατασκευασμένη με προεντεταμένο σκυρόδεμα και βάρθρα από διατμητικά τοιχία. Η γέφυρα αποτελεί τμήμα της εθνικής οδού Αθηνών-Θεσσαλονίκης, έχει συνολικό μήκος 780 m και το συνολικό πλάτος της είναι 15,75 m. Το πρώτο και το τελευταίο άνοιγμα είναι μικρότερα, 15 m, και είναι κατασκευασμένα από προκατασκευασμένες δοκούς T, ενώ τα 26 κύρια ανοίγματα είναι μήκους 30 m, κατασκευασμένα το καθένα με 6 προκατασκευασμένες δοκούς T. Όλα τα ανοίγματα είναι απλά εδραζόμενα στα βάρθρα, μέσω ελαστομερικών εφεδρανών. Η ηλικία της γέφυρας ξεπερνά τα 45 χρόνια.

Οπτική παρατήρηση – Παθολογία

Η γέφυρα λειτουργεί σε δυσμενές περιβάλλον, μια και η περιοχή παρουσιάζει υψηλή υγρασία και βρίσκεται σε απόσταση 5 km από τη θάλασσα. Οι κύριες

φθορές που εντοπίστηκαν ήταν εξάνθηση, απολέπιση, εκτεταμένες αποκολλήσεις και διάβρωση του χάλυβα (Σχήμα 5). Λόγω του ότι το έδαφος είναι χαλαρό στην κοίτη του ποταμού παρατηρήθηκαν εκτεταμένες διαφορικές καθιζήσεις. Τα παλαιού τύπου ελαστομερή εφέδρανα έχουν αστοχήσει στην πλειονότητά τους, μια και οι ενσωματωμένοι μεταλλικοί δίσκοι τους έχουν διαβρωθεί και διογκωθεί.



Σχήμα 5. Εξάνθηση σκυροδέματος (αριστερά), απολέπιση σκυροδέματος (μέσο), εκτεταμένη αποκόλληση υλικού και διάβρωση χάλυβα (δεξιά) – γέφυρα Αξιού

Εργαστηριακοί έλεγχοι

Μετά από την οπτική παρατήρηση και τις επί-τόπου μη-καταστρεπτικές δοκιμές, διενεργήθηκε πυρηνοληψία δοκιμίων σκυροδέματος για εργαστηριακές μετρήσεις. Εννιά πυρήνες λήφθηκαν από τα βάθρα και ελέγχθηκαν στο εργαστήριο ως προς την πυκνότητα, την ταχύτητα διέλευσης ηχητικού κύματος, τη θλιπτική αντοχή και το πορώδες. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3. Φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά πυρήνων (γέφυρα Αξιού)

Πυρήνας	Πυκνότητα (g/cm ³)	Ταχύτητα σονομέτρησης (km/s)	Θλιπτική αντοχή (MPa)	Πορώδες* (%)
1	2,241	4,4	19,9	5-7
2	2,271	4,5	23,7	3-7
3	2,280	4,8	19,3	1-2
4	2,266	4,7	27,8	1-3
5	2,278	4,9	22,6	1-3
6	2,292	4,7	21,1	1-3
7	2,241	4,6	-	3-5
8	2,271	4,7	20,3	3-5
9	2,280	4,4	22,3	2-3
M.O.	2,269	4,6	22,1	

* το πορώδες εκτιμήθηκε από τη μικροσκοπική παρατήρηση

Στις θέσεις πυρηνοληψίας έγινε επί-τόπου ψεκάσμος με διάλυμα δείκτη φαινολοφθαλεΐνης, όπου μετρήθηκε βάθος ενανθράκωσης 10 ± 5 mm σε όλες τις περιπτώσεις. Οι εργαστηριακές μετρήσεις χημικών ιδιοτήτων περιλάμβαναν τον προσδιορισμό αλάτων και PH τόσο στην εξωτερική επιφάνεια του σκυροδέματος, όσο και στο εσωτερικό του πυρήνα. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4. Χημικές ιδιότητες πυρήνων (γέφυρα Αξιού)

Πυρήνας	Cl ⁻		Άλατα (%)		NO ₃ ⁻		PH	
	Άνω 3cm	Κάτω 3cm	Άνω 3cm	Κάτω 3cm	Άνω 3cm	Κάτω 3cm	Άνω 3cm	Κάτω 3cm
1	0,03	0,01	0,17	0,34	0,02	n/d	12,3	12,2
2	0,04	0,01	0,31	0,32	0,01	0,01	12,2	12,3
3	0,08	0,01	0,23	0,32	0,01	n/d	12,2	12,2
4	0,02	0,03	0,27	0,27	n/d	0,01	12,2	12,2
5	0,01	0,01	0,22	0,26	0,01	0,01	12,0	12,2
6	0,07	0,03	0,22	0,31	0,01	n/d	11,4	12,1
7	0,01	0,01	0,37	0,35	n/d	0,01	12,1	12,2
8	0,01	0,01	0,36	0,36	0,01	0,01	12,2	12,2
9	0,02	0,01	0,36	0,34	0,01	n/d	12,1	12,2

Εφόσον η διάβρωση του σκυροδέματος μπορεί να ξεκινήσει από το νερό του ποταμού, κρίθηκε σκόπιμο να ληφθεί ένα δείγμα του νερού και να ελεγχθεί στο εργαστήριο ως προς τη συγκέντρωση αλάτων και το PH. Τα αποτελέσματα έδειξαν PH = 7,75, Cl⁻ = 8,5 mg/l, SO₄²⁻ = 35,4 mg/l και NO₃⁻ = 5,4 mg/l, τιμές που δεν καθιστούν το νερό επικίνδυνο για τη διάβρωση του σκυροδέματος (ACI Building Code 318).

Η μικροσκοπική παρατήρηση του σκυροδέματος των πυρήνων έδειξε θραυστά, γωνιώδη αδρανή καλής κοκκομετρίας και καλή συνάφεια αδρανών-τσιμεντόπαστας (Σχήμα 6). Η τσιμεντόπαστα είχε χαμηλό μέσο πορώδες (κάτω από 7%), 500-800 μm μέση διάμετρο πόρων και περιορισμένη ρηγμάτωση, ενώ δεν ανιχνεύθηκαν άλατα.



Σχήμα 6. Μικροσκοπική παρατήρηση σκυροδέματος πυρήνων – γέφυρα Αξιού

Μια διαβρωμένη ράβδος που λήφθηκε από την κατασκευή χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της αρχικής αντοχής του οπλισμού. Μετά από την αφαίρεση του διαβρωμένου τμήματος, ο έλεγχος αντοχής σε εφελκυσμό έδειξε τάση διαρροής ίση με 442 MPa και μέγιστη τάση ίση με 718 MPa, ενώ η αρχική διάμετρος των 12 mm είχε μειωθεί κατά 16% λόγω διάβρωσης.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΕΦΥΡΑΣ ΣΤΡΥΜΟΝΑ

Περιγραφή

Η γέφυρα του Στρυμόνα διαθέτει 8 ανοίγματα και είναι κατασκευασμένη από προεντεταμένο σκυρόδεμα, με πολλαπλά βάθρα επί πασσάλων. Η γέφυρα αποτελεί τμήμα της Εγνατίας Οδού, το μήκος της είναι 240 m και το συνολικό πλάτος της 12 m. Και τα 8 ανοίγματα έχουν μήκος 30 m και είναι κατασκευασμένα, το καθένα από 5 προκατασκευασμένες, προεντεταμένες δοκούς Τ. Όλα τα ανοίγματα είναι απλά εδραζόμενα στα βάθρα, μέσω ελαστομερικών εφένδρανων και η ηλικία της γέφυρας ξεπερνά τα 30 χρόνια.

Οπτική παρατήρηση – Παθολογία

Τα υφιστάμενα αρχιτεκτονικά σχέδια κρίθηκαν επαρκή και χρησιμοποιήθηκαν για να απεικονίσουν την τρέχουσα κατάσταση και παθολογία της γέφυρας. Η γέφυρα λειτουργεί σε δυσμενές περιβάλλον, μια και η περιοχή παρουσιάζει υψηλή υγρασία και βρίσκεται σε απόσταση 2 km από τη θάλασσα. Οι κύριες φθορές που εντοπίστηκαν ήταν απολέπιση και αποκάλυψη και διάβρωση του χάλυβα οπλισμού, ενώ η ανεπαρκής επικάλυψη του οπλισμού και απορροή του νερού φαίνεται να προκαλούν τα περισσότερα προβλήματα (Σχήμα 7).



Σχήμα 7. Απολέπιση σκυροδέματος (αριστερά) και φθορά σκυροδέματος λόγω κακής απορροής υδάτων (δεξιά) – γέφυρα Στρυμόνα

Εργαστηριακοί έλεγχοι

Οχτώ πυρήνες λήφθηκαν από τις δοκούς σκυροδέματος και ελέγχθηκαν στο εργαστήριο ως προς την πυκνότητα, την ταχύτητα διέλευσης ηχητικού κύματος, και τη θλιπτική αντοχή. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 5.

Πίνακας 5. Φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά πυρήνων (γέφυρα Στρυμόνα)

Πυρήνας	Πυκνότητα (g/cm ³)	Ταχύτητα σονομέτρησης (km/s)	Εκτίμηση θλιπτικής αντοχής με κρουσίμετρο (MPa)	
			Εκτίμηση θλιπτικής αντοχής με κρουσίμετρο (MPa)	Θλιπτική αντοχή (MPa)
1	2,272	4,3	47	24,3
2	2,064	3,2	40	15,9
3	2,229	4,0	40	17,9
4	2,251	4,0	42	16,1
5	2,188	4,1	42	16,1
6	2,262	4,1	40	19,0
7	2,191	4,0	43	13,3
8	2,231	4,1	33	-
M.O.	2,211	4,0	40,9	17,5

Στις θέσεις πυρηνοληψίας έγινε επί-τόπου ψεκάσμος με διάλυμα δείκτη φαινολοφθαλεΐνης, όπου δε φάνηκες να υπάρχει ενανθράκωση. Οι εργαστηριακές μετρήσεις χημικών ιδιοτήτων περιλάμβαναν τον προσδιορισμό Cl⁻, SO₄⁻², NO₃⁻ και PH τόσο στην εξωτερική επιφάνεια του σκυροδέματος (συνήθως στα εξωτερικά 3 cm του πυρήνα), όσο και στο εσωτερικό του πυρήνα (συνήθως σε βάθη > 7 cm από την επιφάνεια του πυρήνα). Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 6.

Πίνακας 6. Χημικές ιδιότητες πυρήνων (γέφυρα Στρυμόνα)

Πυρήνας	Άλατα (%)							
	Cl ⁻		SO ₄ ⁻²		NO ₃ ⁻		PH	
	Άνω 3cm	Κάτω 3cm	Άνω 3cm	Κάτω 3cm	Άνω 3cm	Κάτω 3cm	Άνω 3cm	Κάτω 3cm
1	0,44	0,13	0,66	0,53	0,02	n/d	11,8	11,9
2	0,32	0,26	0,34	0,72	0,01	0,01	11,9	12,1
3	0,20	0,14	0,47	0,49	0,01	0,01	11,8	11,9
4	0,07	0,14	0,39	0,49	0,01	n/d	11,9	12,0
5	0,32	0,25	0,50	0,62	0,01	n/d	11,6	11,8
6	0,33	0,27	0,37	0,66	n/d	n/d	11,8	11,9
7	0,35	0,32	1,50	0,92	0,04	n/d	11,6	12,0

n/d: μη ανιχνεύσιμο

Εφόσον η γέφυρα βρίσκεται κοντά στη θάλασσα, κρίθηκε σκόπιμο να ληφθεί ένα δείγμα του νερού και να ελεγχθεί στο εργαστήριο ως προς τη συγκέντρωση αλάτων

και το PH. Τα αποτελέσματα έδειξαν $\text{PH} = 7,74$, $\text{Cl}^- = 7,8 \text{ mg/l}$, $\text{SO}_4^{2-} = 31,6 \text{ mg/l}$ και $\text{NO}_3^- = 3,4 \text{ mg/l}$, τιμές που δεν καθιστούν το νερό επικίνδυνο για τη διάβρωση του σκυροδέματος (ACI Building Code 318).

Η μικροσκοπική παρατήρηση του σκυροδέματος των πυρήνων έδειξε θραυστά,γωνιώδη αδρανή κακής κοκκομετρικής διαβάθμισης (Σχήμα 8). Κακή, επίσης, ήταν και η συνάφεια αδρανών-τσιμενόπαστας, ενώ δεν ανιχνεύθηκαν άλατα στους πόρους της τσιμεντόπαστας.



Σχήμα 8. Μικροσκοπική παρατήρηση σκυροδέματος (γέφυρα Στρυμόνα)

Μια διαβρωμένη ράβδος που λήφθηκε από την κατασκευή χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της αρχικής αντοχής του οπλισμού. Μετά από την αφαίρεση του διαβρωμένου τμήματος, ο έλεγχος αντοχής σε εφελκυσμό έδειξε τάση διαρροής ίση με 439 MPa και μέγιστη τάση ίση με 717 MPa, ενώ η αρχική διάμετρος των 12 mm δεν είχε μειωθεί σημαντικά λόγω διάβρωσης.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η θλιπτική αντοχή που μετρήθηκε στους πυρήνες για τις τρεις γέφυρες ήταν 21,7 MPa για την 60-χρονών γέφυρα του Βενέτικου, 22,1 MPa για την 45-χρονών γέφυρα του Αξιού και 17,5 MPa για την 30-χρονών γέφυρα του Στρυμόνα. Πέρα από το ότι εμφάνισαν χαμηλές αντοχές, οι πυρήνες σκυροδέματος είχαν και μεγάλες διακυμάνσεις στις τιμές, κάτι που δείχνει κακή τοποθέτηση και συμπύκνωση του σκυροδέματος κατά την κατασκευή, όπως επιβεβαιώθηκε σε αρκετές περιπτώσεις και από τη μικροσκοπική παρατήρηση. Οι κύριες βλάβες που αναγνωρίστηκαν στις γέφυρες ήταν ρηγματώσεις, απώλεια παθητικής προστασίας και διάβρωση του χάλυβα οπλισμού, που σε ορισμένες περιπτώσεις έχουν οδηγήσει σε σημαντική απώλεια υλικού. Η ενανθράκωση δε φαίνεται να είναι ο κύριος λόγος για τη διάβρωση του χάλυβα και την επακόλουθη αποκόλληση υλικού, μια και το βάθος της μετρήθηκε ίσο με 30-40 mm για την 60-χρονών γέφυρα, ~10 mm για την 45-χρονών γέφυρα και ελάχιστο για την 30-χρονών γέφυρα. Επίσης, οι περιεκτικότητες σε Cl^- , SO_4^{2-} και NO_3^- ήταν σχετικά χαμηλές μέσα στη δομή του σκυροδέματος. Η περιεκτικότητα σε Cl^- ήταν κάτω από 0,1% για τις γέφυρες του Βενέτικου και του Αξιού και σχετικά υψηλότερη (0,1~0,4%) για τη γέφυρα του Στρυμόνα, αλλά και πάλι όχι αρκετά υψηλή ώστε να προκαλέσει σημαντική ζημιά. Οι χημικές αναλύσεις στο νερό των ποταμών έδειξαν κανονικές

τιμές PH και απουσία βλαβερών συστατικών που θα μπορούσαν να προσβάλουν επιφανειακά το σκυρόδεμα.

Όταν συγκρίνεται η παθολογία των τριών γεφυρών είναι ξεκάθαρο ότι η μακροχρόνια απορροή των ομβρίων υδάτων μέσα από τους αρμούς διαστολής δίπλα στα πεζοδρόμια του καταστρώματος και μέσα από τους κατακόρυφους σωλήνες απορροής, μαζί με τις δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες, δημιούργησαν τις συνθήκες για τη εκκίνηση και εξέλιξη των μηχανισμών φθοράς που προκάλεσε εκτεταμένες βλάβες στην πλειονότητα της εξωτερικής επιφάνειας των γεφυρών. Ακόμη, κατασκευαστικές αστοχίες, όπως το ανεπαρκές πάχος επικάλυψης οπλισμού, οδήγησαν σε διάβρωση του χάλυβα οπλισμού και σε εκτεταμένες αποκολλήσεις σκυροδέματος. Αυτή η κατάσταση οδήγησε στην κοπή καλωδίων σε κάποιους από τους τένοντες προέντασης των ακραίων δοκών στη γέφυρα του Αξιού και στην εμφάνιση των τενόντων προέντασης και τη διάβρωση του συμβατικού οπλισμού των ακραίων δοκών και των βάθρων της γέφυρας του Στρυμόνα. Οι παραπάνω λόγοι, περισσότερο από την ενανθράκωση και τη συγκέντρωση Cl⁻ φαίνεται να είναι και η κύρια ανησυχία για τη μακροχρόνια συμπεριφορά των συγκεκριμένων γεφυρών, κάτι που υποδεικνύει ότι ο έλεγχος ποιότητας της κατασκευής είναι εξίσου σημαντικός με την παρακολούθηση και την καταγραφή των μηχανισμών φθοράς στις γέφυρες από σκυρόδεμα.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν τους Ασπασία Κουτσοκώστα, Ιωάννη Σιμπιλή, Θωμά Ζαφειρίου και Κωνσταντίνα Σκοτιδάκη για τη συνεισφορά τους στην παρούσα εργασία.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

AASHTO The manual for bridge evaluation, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington (2011).

ACI 201.1R-92 Guide for making a condition survey of concrete in Service, ACI Manual of concrete Practice, American Concrete Institute (1992).

ACI 228.2R-98 Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures, ACI Manual of concrete Practice, American Concrete Institute (1998).

Enright, M. P. and Frangopol, D. M., "Survey and evaluation of damaged concrete bridges". Journal of Bridge Engineering, Vol. 5, No 1 (2000) 31-38.

Lawrence, T. O., Ritter, C. T. and Gergely, J., "Bridge Monitoring and Performance Evaluation". Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 29, No 5 (2011) 919-926.

Miyamoto, A., Kawamura, K. and Nakamura, H. "Bridge management system and maintenance optimization for existing bridges". Computer.Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol. 15, No. 1 (2000) 45-55.