

Αξιολόγηση της Δομικής Κατάστασης των Γεφυρών βάσει Συνδυασμένης Οπτικής και Ταχείας Ενόργανης Επιθεώρησής τους Assessment of the Structural Condition of Bridges based on their Combined Visual and Instrumental Inspection

Παναγιώτης ΠΑΝΕΤΣΟΣ¹, Ευάγγελος ΝΤΟΤΣΙΟΣ², Κώστας ΠΑΠΑΔΗΜΗΤΡΙΟΥ³

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Εφαρμόσθηκε συμπληρωματικά της οπτικής επιθεώρησης, η ταχεία ενόργανη παρακολούθηση της περιβαλλοντικής ταλάντωσης (ambient vibration) τριών γεφυρών, δύο παλαιών ποταμογεφυρών και μίας υπό κατασκευή χαραδρογέφυρας, στον άξονα της Εγνατίας Οδού (Ε.Ο.). Σκοπός ήταν η αποτίμηση της σημασίας των παρατηρηθεισών φθορών για την σεισμική ασφάλεια και την ακεραιότητα του φορέα των δύο παλιών ποταμογεφυρών (Στρυμόνα και ΠΑΘΕ), καθώς και η επιβεβαίωση της επιτυχούς ολοκλήρωσης των φάσεων κατασκευής της υπό κατασκευή νέας χαραδρογέφυρας του Μετσόβου. Για την επίτευξη του προηγούμενου σκοπού, αναγνωρίστηκαν οι ιδιοσυχνότητες, ιδιομορφές και συντελεστές απόσβεσης των τριών γεφυρών βάσει λειτουργικών εκ κυκλοφορίας και περιβαλλοντικών ταλαντώσεων, στη συνέχεια αναθεωρήθηκαν τα αναλυτικά δυναμικά μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων τους και προέκυψαν οι πραγματικές ιδιότητες ακαμψίας τους. Προέκυψαν σημαντικά συμπεράσματα για την δομική ακεραιότητα και την πραγματική συμπεριφορά των τριών γεφυρών

ABSTRACT : The instrumental rapid monitoring of the dynamic response of three bridges, two of them old and one under construction, on the axis of Egnatia Motorway, was implemented in combination to their visual inspection. The aim was to assess the influence of the observed concrete deterioration to the structural integrity of the two old bridges (riverbridges over Stymonas and PATHE), as well as to ensure the successful completion of the structural phases of the under construction ravine bridge of Metsovo. To achieve this, the modal frequencies, modes and damping ratios of these bridges were identified from their ambient acceleration records, and their analytical dynamic models were updated to determine the actual stiffness properties of the bridges.

¹Τμηματάρχης Τακτ. Συντήρησης Μεγ. Τεχν. Έργων, Εγνατία Οδός Α.Ε., email: ppane@egnatia.gr

²Υποψήφιος Διδάκτωρ, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, email: entotsio@mie.uth.gr

³Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, email: costasp@mie.uth.gr

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η τακτική οπτική παρακολούθηση των γεφυρών, σε χρονικά διαστήματα 2 έως 5 ετών, αναλόγως της σημασίας και της τρωτότητάς τους, όπως και η έκτακτη ή ειδική οπτική επιθεώρησή τους, στην περίπτωση προσεισμικού ελέγχου, υλοποιείται σε όλες τις αναπτυγμένες χώρες του κόσμου, στις οποίες η υποδομή τους (αυτοκινητόδρομοι και σιδηρόδρομοι) έχει διανύσει ένα σημαντικό τμήμα της συνολικής διάρκειας λειτουργίας της.

Στόχος της εξ' επαφής οπτικής επιθεώρησης των βασικών δομικών στοιχείων της γέφυρας είναι η αναγνώριση και καταγραφή της έκτασης και του τύπου των φθορών και ζημιών σε σκυρόδεμα, οπλισμό, εφέδρανα, αρμούς, επιδομή (στεγάνωση, στηθαία, πεζοδρόμια, αποχέτευση). Αναλόγως της σημασίας, της έκτασης και του τύπου της παρατηρηθείσας φθοράς, το δομικό στοιχείο και η γέφυρα βαθμολογούνται για τη δομική και λειτουργική επάρκειά τους (E.O.A.E. 2006, CDT 2000, FHWA 1995, 2002). Ωστόσο, ακόμη και στην περίπτωση των σοβαρών βλαβών, που είναι δυνατή η αναγνώρισή τους λόγω της εκδήλωσης σαφών και μεγάλης έκτασης ενδείξεων, όπως έντονης ρηγμάτωσης, αποφλοίσωσης του σκυροδέματος και απώλειας διατομής χάλυβα οπλισμού ή/και προέκτασης, δεν είναι εύκολη η ακριβής αποτίμηση της πραγματικής επιρροής που έχουν στην ασφάλεια και στην παραμένουσα αντοχή και ακαμψία των ίδιων των δομικών στοιχείων ή πολύ περισσότερο του συνολικού φορέα των γεφυρών.

Συνεπώς η σε γενικές γραμμές εμπειρική διαδικασία της πρώτης αξιολόγησης και βαθμολόγησης των ευρημάτων της σοβαρής φθοράς, λόγω των παραπάνω προβλημάτων είναι συνήθως ιδιαίτερα συντηρητική και οδηγεί σε αποφάσεις μεγάλης διάρκειας αποκλεισμού λωρίδων κυκλοφορίας (μέχρι την επισκευή), προσωρινού ή μόνιμου κλεισίματος της γέφυρας, με συνέπεια χρονοβόρες παρακάμψεις, ή ακόμη και την αντικατάσταση της γέφυρας. Για την λήψη τέτοιων αποφάσεων, συνήθως της πρώτης αξιολόγησης του επιθεωρητή γεφυρών, έπεται η αναλυτική διερεύνηση των επιπτώσεων που έχει στην στατική και δυναμική ακεραιότητα της γέφυρας η παρατηρηθείσα φθορά. Ωστόσο και σε αυτήν την περίπτωση το αναλυτικό μοντέλο στηρίζεται αφενός στις παραδοχές της μελέτης, αφού συνήθως δεν είναι διαθέσιμα τα κατασκευαστικά στοιχεία της γέφυρας (as built documents), αφετέρου στην λιγότερο ή περισσότερο αυθαίρετη προσομοίωση του μηχανισμού φθοράς που παρατηρήθηκε. Ορισμένες φορές δεν είναι διαθέσιμη ούτε η μελέτη παλιών γεφυρών.

Για την ακριβέστερη αποτίμηση της επιρροής των παρατηρηθεισών σημαντικών φθορών των γεφυρών, ώστε να υποστηριχθεί ο φορέας διαχείρισης της συντήρησης τους στη λήψη σημαντικών αποφάσεων που αφορούν στον χρόνο, στην έκταση και στο είδος των επισκευών, εξετάζεται στην παρούσα εργασία η εφαρμογή της ταχείας παρακολούθησης της δυναμικής απόκρισης των γεφυρών υπό περιβαλλοντικά και λειτουργικά φορτία (άνεμος, διέλευση οχημάτων), με στόχο την αναγνώριση των δυναμικών χαρακτηριστικών των γεφυρών και μέσω της αναθεώρησης του μοντέλου τους, τον προσδιορισμό των πραγματικών ιδιοτήτων μάζας και ακαμψίας τους. Με αυτόν τον τρόπο επιδιώκεται σε συνδυασμό και με άλλους ελέγχους και μετρήσεις, η αποτίμηση της επιρροής της διαπιστωμένης φθοράς στην μεταβολή της ακαμψίας της γέφυρας.

Τα τελευταία οκτώ χρόνια, η Εγνατία Οδός Α.Ε. (Ε.Ο.Α.Ε.) σε συνεργασία με το Εργαστήριο Δυναμικής Συστημάτων του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας και το Ινστιτούτο Τεχνικής Σεισμολογίας και Αντισεισμικών Κατασκευών (ΙΤΣΑΚ), στο πλαίσιο ερευνητικών προγραμμάτων ή και ίδιας χρηματοδότησης της εταιρείας, εφάρμοσε σε γέφυρες της μεθοδολογίες και συστήματα ενοργάνωσης με ειδικά δίκτυα επιταχυνσιογράφων για την μόνιμη ή έκτακτη συστηματική παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς τους (Ntotsios et al 2008; Papadimitriou et al. 2007, Karakostas et al. 2006, Panetsos et al. 2006). Το τμήμα Τακτικής Συντήρησης Μεγάλων Τεχνικών Έργων της Ε.Ο.Α.Ε. (Τ.Τ.Σ.), τη τελευταία διετία με χρήση ιδιόκτητου εξοπλισμού εφαρμόζει πλέον ευρύτερα τα προηγούμενα, για την ενόργανη παρακολούθηση και δομική αξιολόγηση παλιών και υπό κατασκευή γεφυρών του άξονα της Εγνατία Οδού (Ε.Ο.), στο πλαίσιο της ευθύνης του για τακτική επιθεώρηση και συντήρηση των γεφυρών του αυτοκινητοδρόμου. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε να παρουσιασθούν τα πρόσφατα αποτελέσματα από την ενόργανη παρακολούθηση και την αξιολόγηση της δομικής ακεραιότητας δύο παλαιών γεφυρών του άξονα της Ε.Ο., λόγω διαπιστωμένων βλαβών, καθώς και μίας υπό κατασκευή υψηλής χαραδρογέφυρας της Ε.Ο., λόγω της μεθοδολογίας κατασκευής της και λόγω της σημασίας της ως μιας από τις ψηλότερες και μεγαλύτερου μήκους προβόλου, γέφυρες στην Ευρώπη.

ΟΠΤΙΚΗ ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗ ΠΑΛΑΙΩΝ ΓΕΦΥΡΩΝ ΤΟΥ ΑΞΟΝΑ ΤΗΣ ΕΓΝΑΤΙΑΣ ΟΔΟΥ

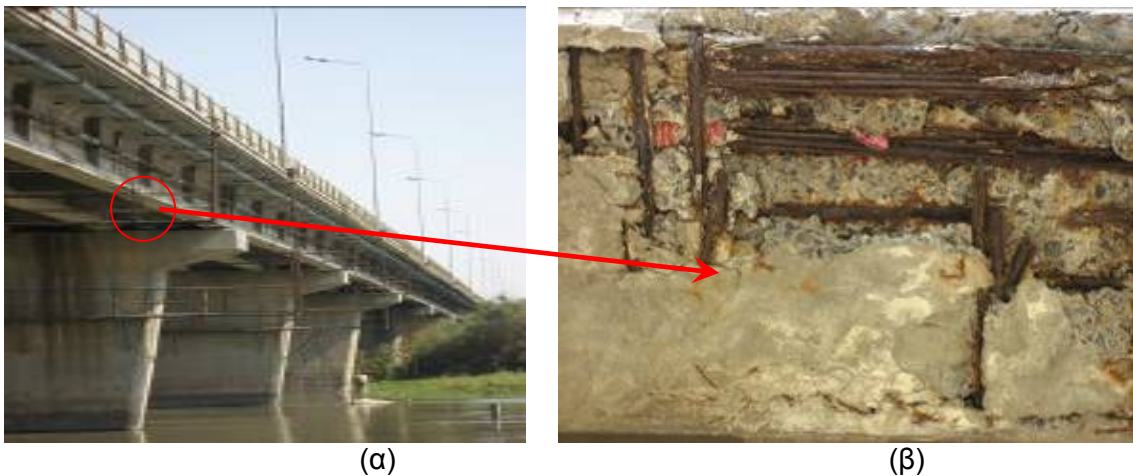
Σε εφαρμογή της διαδικασίας και των οδηγιών οπτικής επιθεώρησης γεφυρών της Ε.Ο.Α.Ε. (Panetsos et. al. 2006), διενεργήθηκε σε όλες τις γέφυρες του άξονα της Ε.Ο., αρχική οπτική επιθεώρηση με συνεργεία του Τ.Τ.Σ. Τα αποτελέσματα και τα ευρήματα της επιθεώρησης αυτής καταγράφηκαν στην Βάση Δεδομένων Γεφυρών της Ε.Ο.Α.Ε. και βαθμολογήθηκε η δομική και λειτουργική επάρκεια των γεφυρών βάσει του συστήματος αξιολόγησης της ΕΟΑΕ (Ε.Ο.Α.Ε. 2006, CDT 2000. FHWA 1995, 2002). Ακολουθως περιγράφονται οι φορείς των δύο παλαιών γεφυρών μαζί με αναφορά στις σημαντικότερες εκ των αναγνωρισμένων φθορών τους, και ο φορέας και οι φάσεις κατασκευής της νέας γέφυρας Μετσόβου της Ε.Ο., που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία.

ΠΟΤΑΜΟΓΕΦΥΡΑ Π.Α.Θ.Ε. (ΔΕΞΙΟΣ ΚΛΑΔΟΣ)

Η ποταμογέφυρα δεξιού κλάδου του Π.Α.Θ.Ε., βρίσκεται στο τμήμα Α/Κ Κλειδιού – Θεσσαλονίκης του ΠΑΘΕ, το οποίο ταυτίζεται με το τμήμα 7 (Α/Κ Κλειδιού – Α/Κ Γαλλικού) της Ε.Ο. Κατασκευάστηκε τη δεκαετία του '70, και αποτελείται από 27 ανοίγματα. Ο φορέας αποτελείται από έξι αμφιέριστες πλακοδοκούς, προεντεταμένες μήκους 30 m στα μεσαία ανοίγματα, οπλισμένες μήκους 25 m στα ακραία ανοίγματα, με πλάκα καταστρώματος πάχους 0,30 m περίπου και συνολικό ύψος 1,90 m περίπου. Το συνολικό μήκος της γέφυρας είναι 800 m περίπου, ενώ το πλάτος του καταστρώματος είναι 14,70 m και φέρει οδό τριών λωρίδων κυκλοφορίας με ΛΕΑ. Οι δοκοί στηρίζονται μέσω εφεδράνων 4 στρώσεων ελαστομερούς ενισχυμένων με χαλύβδινα ελάσματα, διαστάσεων 400 X 300 X 51, στις δοκούς έδρασης των τοιχωματικών βάθρων. Αρμοί διαστολής έχουν τοποθετηθεί στα άκρα κάθε αμφιέριστου τμήματος.

Σημειώνεται ότι σε κάθε άνοιγμα, τις πλακοδοκούς συνδέουν εγκαρσίως 4 νευρώσεις πάχους 25 cm και ύψους 1,70 m περίπου, ανά 5,80 περίπου μέτρα κατά μήκος του ανοίγματος, οι οποίες προσδίδουν σημαντική αστρεψία στον αμφιέριστο φορέα καθώς και υπερστατικότητα, που με την σειρά της καθιστά λιγότερο τρωτό τον φορέα από τοπική βλάβη μίας εκ των έξι δοκών.

Η γέφυρα παρουσιάζει έντονες φθορές σκυροδέματος, λόγω της πολύχρονης (επί 40 περίπου χρόνια) έκθεσης σε διαβρωτικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Οι φθορές παρατηρούνται κυρίως στις περιοχές μόνιμης διαβροχής από διαρροή αρμών και αποχέτευσης καταστρώματος. Έτσι στις τρεις ανά άνοιγμα θέσεις απευθείας απορροής της αποχέτευσης στον εξωτερικό κορμό των ακραίων πλακοδοκών, παρατηρούνται σημαντικές απώλειες διατομής τόσο σκυροδέματος όσο και χαλαρού οπλισμού, ενώ σε κάποια ανοίγματα η προχωρημένη οξείδωση των κάτω οπλισμών προέντασης έχει οδηγήσει στην θραύση τμήματος των συρματόσχοινων (Σχήμα 1 (β)). Έντονη είναι η επιφανειακή φθορά και οξείδωση των οπλισμών των δοκών έδρασης και των κορμών των τοιχωματικών μεσοβάθρων, ενώ και τα εφέδρανα συνολικά έχουν αστοχήσει, λόγω οξείδωσης των χαλύβδινων ελασμάτων και σχετικής ολίσθησης μεταξύ των διαδοχικών στρώσεων ελαστομερούς. Κάποιες ενδείξεις διαφορικής καθίζησης ακροβάθρων ή μεσοβάθρων πρέπει να παρακολουθούνται αλλά δεν περιλαμβάνονται στις φθορές που επειγόντως πρέπει να αντιμετωπισθούν.



Σχήμα 1. Ποταμογέφυρα ΠΑΘΕ (δεξιός κλάδος) (α) Γενική όψη β) Βλάβες ακραίων δοκών.

Η βαθμολογία της κατάστασης του σκυροδέματος των ακραίων δοκών, θα ήταν 3 με άριστα το 9 για το σύστημα της Ε.Ο. (προχωρημένη οξείδωση με απώλεια διατομής προέντασης), 4 με άριστα το 1 για το σύστημα CALTRANS (σπασμένα σύρματα) και 3 με άριστα το 9 για το σύστημα της FWA (απώλεια διατομής που ίσως επηρεάζει το κύριο δομικό σύστημα). Δηλαδή η κατάσταση της ακραίας δοκού απαιτεί άμεση αντιμετώπιση με λήψη κατά προτεραιότητα απόφασης επισκευών.

ΠΟΤΑΜΟΓΕΦΥΡΑ ΣΤΡΥΜΟΝΑ (ΑΡΙΣΤΕΡΟΣ ΚΛΑΔΟΣ)

Η ποταμογέφυρα αριστερού κλάδου του Στρυμόνα ποταμού, κατασκευάστηκε τη δεκαετία του '80, πολύ πριν την έναρξη κατασκευής της Ε.Ο. και αποτελείται από 8 ανοίγματα. Ο φορέας αποτελείται από πέντε αμφιέριστες πλακοδοκούς, από προεντεταμένο σκυρόδεμα κατηγορίας αντοχής B25, μήκους 30 m, με πλάκα καταστρώματος πάχους 0,26 m και συνολικό ύψος 1,86 m. Το συνολικό μήκος της γέφυρας είναι 240 m περίπου, ενώ το πλάτος του καταστρώματος είναι 13,5 m και θα φέρει τον αριστερό κλάδο της Ε.Ο., μετά την αποπεράτωση της νέας γέφυρας του αριστερού κλάδου, μέσα στο 2008. Οι δοκοί στηρίζονται μέσω τύπου 1 ελαστομεταλλικών εφεδράνων, διαστάσεων 400 X 300 X 51, στις δοκούς έδρασης των δίστυλων πλαισιακών βάθρων. Αρμοί διαστολής έχουν τοποθετηθεί στα άκρα κάθε αμφιέριστου τμήματος. Η γέφυρα παρουσιάζει έντονες φθορές σκυροδέματος, λόγω της πολύχρονης (επί 25 περίπου χρόνια) έκθεσης σε ακραίες διαβρωτικές περιβαλλοντικές συνθήκες, λόγω παραθαλάσσιου περιβάλλοντος (έκθεση σε χλωριόντα). Οι φθορές παρατηρούνται κυρίως στις περιοχές μόνιμης διαβροχής από διαρροή αρμών και αποχέτευσης καταστρώματος. Έτσι στις θέσεις απευθείας απορροής της αποχέτευσης στους εξωτερικούς κορμούς των ακραίων πλακοδοκών παρατηρούνται σημαντικές απώλειες διατομής σκυροδέματος και χαλαρού οπλισμού, με αποκάλυψη τμήματος των σωλήνων προέντασης σε ορισμένες θέσεις (σχήμα 2). Έντονη είναι η επιφανειακή φθορά και οξειδωση των οπλισμών των δοκών έδρασης και των κορμών των ακροβάθρων.



Σχήμα 2. Φθορές ποταμογέφυρας Στρυμόνα (α) Άποψη, (β) ακραίες δοκοί.

Η βαθμολογία της κατάστασης του σκυροδέματος των δοκών, θα ήταν 4 με άριστα το 9 για το σύστημα της Ε.Ο. (οξειδωση και φθορά που απαιτεί διερεύνηση της επιρροής της στο δομικό σύστημα), 3 με άριστα το 1 για το σύστημα CALTRANS (οξειδωση χαλαρού οπλισμού) και 4 με άριστα το 9 για το σύστημα της FWA (απώλεια διατομής, αποφλοίωση, που ίσως επηρεάζει το κύριο δομικό σύστημα). Δηλαδή η κατάσταση της ακραίας δοκού απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση ώστε να αποτιμηθεί η βλάβη εκ χλωριόντων και λήψη κατά προτεραιότητα απόφασης επισκευών.

ΝΕΑ ΧΑΡΑΔΡΟΓΕΦΥΡΑ ΜΕΤΣΟΒΟΥ (ΑΡΙΣΤΕΡΟΣ ΚΛΑΔΟΣ)

Η νέα χαραδρογέφυρα Μετσόβου η οποία κατασκευάζεται στο τμήμα 3.2 (Σήραγγα Ανθοχωρίου – σήραγγα Ανηλίου) της Ε.Ο., γεφυρώνει την χαράδρα του ποταμού Μετσοβίτικου, 150 m περίπου ψηλότερα της κοίτης του ποταμού. Είναι η ψηλότερη γέφυρα της Ε.Ο. με μέγιστο ύψος βάθρου περίπου 110 m και συνολικό μήκος 357 m . Λόγω της έντονης ανισοψίας των δύο βασικών βάθρων της, Μ2 και Μ3 (110 m : 35 m), το έργο αποτελεί πολύ μεγάλο μεσαίο άνοιγμα των 235 m , είναι ακόμη μεγαλύτερο κατά τις φάσεις κατασκευής, με συνολικό μήκος προβόλων του ψηλού βάθρου Μ2, 250 περίπου μέτρων, λόγω της έκκεντρης ως προς το μέσο του ανοίγματος θέσης της κλείδας. Η κλείδα τοποθετείται έκκεντρα λόγω διαφορετικού ύψους φορέα στις στηρίξεις των δύο βάθρων (13,0 m στο Μ2 και 11,50 m στο Μ3), για άμβλυση της έντονης μη κανονικότητας, που είναι και ο βασικός λόγος που η γέφυρα σχεδιάστηκε για συντελεστή συμπεριφοράς $q=1,0$ (ελαστική συμπεριφορά). Η γέφυρα έχει συνολικά τέσσερα ανοίγματα μήκους 44,78 m /117,87 m /235,00 m /140,00 m και τρία μεσόβαθρα εκ των οποίων το Μ1, ύψους περίπου 45 m στηρίζει μέσω εφεδράνων εγκιβωτισμένου ελαστικού τον φορέα, ενώ τα Μ2, Μ3 συνδέονται μονολιθικά με τον φορέα της γέφυρας. Η γέφυρα κατασκευάζεται με την μέθοδο της συμμετρικής προβολοδόμησης. Το πλάτος του καταστρώματος είναι 13,95 m . Ο φορέας είναι προεντεταμένος κιβωτιοειδής μονοκυβελικός με μέγιστο ύψος 13,5 m στις στηρίξεις και ελάχιστο 4,00 m στην κλείδα.



(α)



(β)

Σχήμα 3. Όψεις της υπό κατασκευή χαραδρογέφυρας Μετσόβου (α) Γενική Άποψη (β) Κλείδα Μ2-Μ3

Η γέφυρα ενοργανώθηκε μετά την ολοκλήρωση των σπονδύλων των προβόλων του βάθρου Μ3, όταν είχε συνολικό μήκος 215 m περίπου (σχήμα 3). Τα βάθρα Μ2, Μ3 θεμελιώνονται μέσω βαθιών κυκλικών φρεάτων στις απότομες βραχώδεις πλαγιές της χαράδρας του Μετσοβίτικου ποταμού, βάθους 25 m και 15 m , αντίστοιχα, διατομής $\varnothing 12,0 m$.

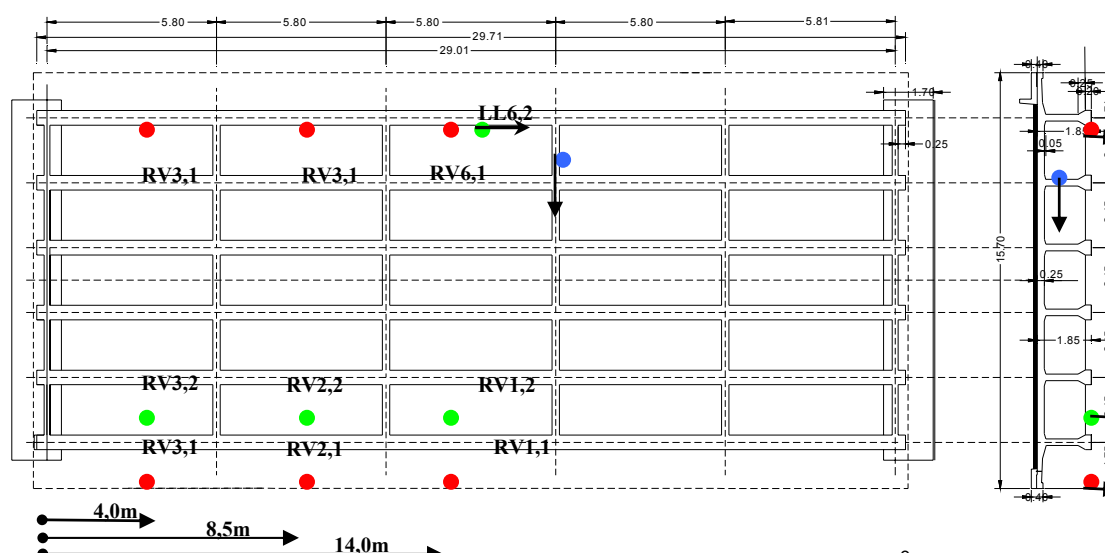
Η γέφυρα Μετσόβου επιθεωρείται σε τακτά χρονικά διαστήματα από το Τ.Τ.Σ. με αφορμή την ενόργανη παρακολούθησή του, τόσο λόγω της σημαντικότητάς της όσο και λόγω του ενδιαφέροντος να ελεγχθεί το τελικό αποτέλεσμα μιας τόσο δυσχερούς και πρωτοπόρας κατασκευαστικής και μελετητικής προσπάθειας που δεν έχει προηγούμενο στην Ελλάδα, για τέτοιου τύπου φορέα.

ΕΝΟΡΓΑΝΩΣΗ ΓΕΦΥΡΩΝ ΤΟΥ ΑΞΟΝΑ ΤΗΣ ΕΓΝΑΤΙΑΣ ΟΔΟΥ

Συμπληρωματικά της οπτικής επιθεώρησης ενοργανώθηκαν με περισσότερες της μίας διατάξεις αισθητήρων επιτάχυνσης, οι παλιές ποταμογέφυρες Στρυμόνα και Π.Α.Θ.Ε. και ο πρόβολος Μ3 της υπό κατασκευή γέφυρας Μετσόβου της Ε.Ο. Για την ενοργάνωση των γεφυρών χρησιμοποιήθηκε κινητό σύστημα καταγραφής της απόκρισης (σύστημα επιταχυνσιογράφων) που διαθέτει το Τ.Τ.Σ. της ΕΟΑΕ και το οποίο τοποθετήθηκε για μικρό χρονικό διάστημα (λίγες ώρες ως λίγες ημέρες) στις υπόψη γέφυρες, μέσα στο δεύτερο εξάμηνο του 2007. Το κινητό σύστημα ενοργάνωσης είναι της εταιρείας Kinemetrics Inc. Αποτελείται από 1 καταγραφική μονάδα υψηλής ανάλυσης τύπου Kinemetrics K2 (19 bits), η οποία υποστηρίζει μέχρι 6 αισθητήρες (επιταχυνσιόμετρα) τύπου EpiSensor.

Ενοργάνωση Ποταμογέφυρας Δεξιού Κλάδου Π.Α.Θ.Ε. (τμήμα 7 Ε.Ο./ Π.Α.Θ.Ε.)

Επιλέχθηκε να ενοργανωθεί το 4ο από 28 συνολικά αμφιέριστα ανοίγματα του φορέα της ποταμογέφυρας, με κριτήριο την έκταση και ένταση της βλάβης της ακραίας δεξιάς δοκού του (απώλεια προέντασης και σκυροδέματος). Εγκαταστάθηκαν έξι μονοαξονικά επιταχυνσιόμετρα, σε δύο βασικές διατάξεις: α) στην 1η διάταξη στερεώθηκαν 3 επιταχυνσιόμετρα στον εξωτερικό κορμό της 6ης δεξιάς ακραίας δοκού και 3 στον αριστερό εξωτερικό κορμό της 1ης αριστερής ακραίας δοκού και β) στη 2η διάταξη στερεώθηκαν 3 επιταχυνσιόμετρα στον δεξιό κορμό της 5ης εσωτερικής δοκού και 3 στον εξωτερικό κορμό της 1ης αριστερής ακραίας δοκού. Στο Σχήμα 4, δίνονται οι δύο διατάξεις με τις τρεις ανά διάταξη παραλλαγές, που αφορούν τη διεύθυνση μέτρησης επιτάχυνσης του κάθε αισθητηρίου. Έτσι για κάθε διάταξη ελήφθησαν μετρήσεις με όλα τα αισθητήρια κατακόρυφα, με 5 αισθητήρια κατακόρυφα και το 6ο διαμήκως (παράλληλο στον άξονα της γέφυρας) και με 5 αισθητήρια κατακόρυφα και το 6ο εγκάρσιο (κάθετο στον άξονα της γέφυρας).

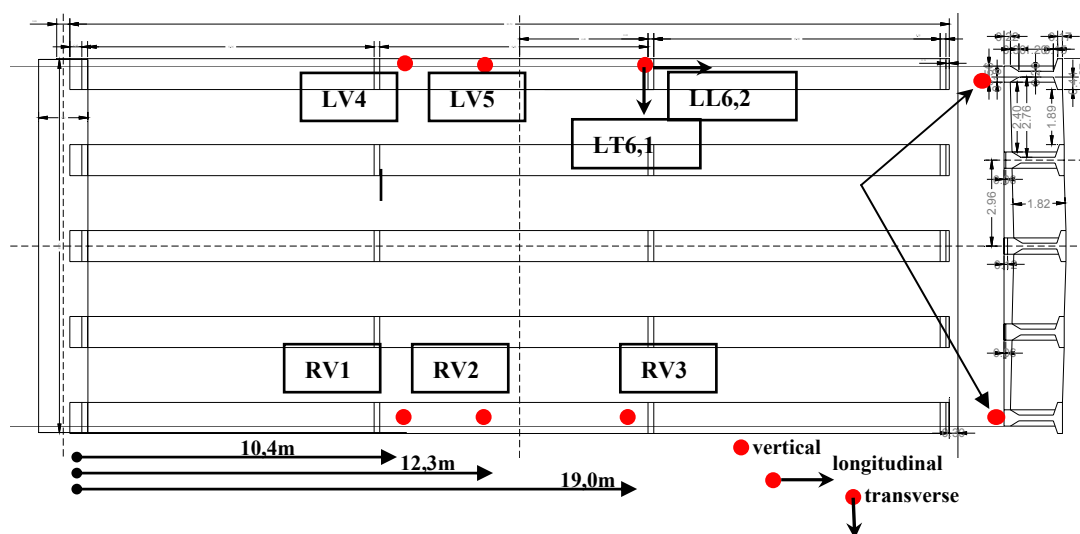


Σχήμα 4. Διατάξεις εγκατάστασης – μέτρησης αισθητήρων επιτάχυνσης στο 4^ο άνοιγμα δεξιού κλάδου της ποταμογέφυρας Π.Α.Θ.Ε.

Στόχος των 6 συνολικά παραλλαγών ενόργανης παρακολούθησης, ήταν η αναγνώριση των κατακόρυφων καμπτικών και στρεπτικών (γύρω από το διαμήκη άξονα της γέφυρας) ιδιοσυχνοτήτων, ιδιομορφών και ποσοστών απόσβεσης, αφού η παρατηρηθείσα βλάβη εκτιμήθηκε αρχικώς ότι επηρεάζει κυρίως αυτές. Λόγω της αμφιέριστης στήριξης του φορέα σε κάθε άνοιγμα, εκτιμήθηκε επίσης ότι οι υπόψη ιδιομορφές επηρεάζονται ελάχιστα ή καθόλου από τα βάθρα, τα εφέδρανα και τα γειτονικά ανοίγματα και έτσι δεν κρίθηκε απαραίτητη στο πλαίσιο της ταχείας (λίγων ωρών) ενόργανης παρακολούθησης, η τοποθέτηση πρόσθετων αισθητήρων στα βάθρα (δοκοί έδρασης, βάση βάθρων) και σε δοκούς γειτονικών ανοιγμάτων. Με τα έξι αισθητήρια, στις 6 διαφορετικές διατάξεις τους, ελήφθησαν ταυτόχρονες χρονοϊστορίες επιτάχυνσης, διάρκειας 10 – 35 λεπτών της ώρας, από την εξακάναλη καταγραφική μονάδα του Τ.Τ.Σ. της Ε.Ο.Α.Ε, με συχνότητα δειγματοληψίας 250Hz.

Ενοργάνωση Ποταμογέφυρας Αριστερού Κλάδου Στρυμόνα Ποταμού (τμήμα 11 Ε.Ο.)

Επιλέχθηκε να ενοργανωθεί το πρώτο από τα 8 αμφιέριστα ανοίγματα του φορέα της ποταμογέφυρας, με κριτήριο την έκταση και ένταση της βλάβης των δοκών του. Εγκαταστάθηκε δίκτυο τριών, πέντε ή έξι μονοαξονικών επιταχυνσιόμετρων, ως εξής: α) στην 1η διάταξη στερεώθηκαν 3 επιταχυνσιόμετρα στον δεξιό κορμό της 5ης εσωτερικής δοκού του 1ου ανοίγματος β) στην 2η διάταξη στερεώθηκαν 3 επιταχυνσιόμετρα στον εξωτερικό κορμό της 5ης δεξιάς ακραίας δοκού του 1ου ανοίγματος και 2 στον δεξιό εξωτερικό κορμό της 5ης δεξιάς ακραίας δοκού του 2ου ανοίγματος και γ) στην 3η διάταξη στερεώθηκαν 3 επιταχυνσιόμετρα στον εξωτερικό κορμό της 5ης δεξιάς ακραίας δοκού του 1ου ανοίγματος και 3 στον αριστερό εξωτερικό κορμό της 1ης αριστερής ακραίας δοκού του 1ου ανοίγματος. Στο Σχήμα 6, δίνεται η τρίτη διάταξη με τις τρεις παραλλαγές της, που αφορούν τη διεύθυνση μέτρησης επιτάχυνσης του κάθε αισθητηρίου. Έτσι στην πρώτη παραλλαγή της τρίτης διάταξης τα 6 αισθητήρια ήταν κατακόρυφα ενώ στη δεύτερη και τρίτη παραλλαγή της, τα 5 αισθητήρια ήταν κατακόρυφα και το 6ο διαμήκες (παράλληλο στον άξονα της γέφυρας) ή εγκάρσιο (κάθετο στον άξονα της γέφυρας), αντίστοιχα.

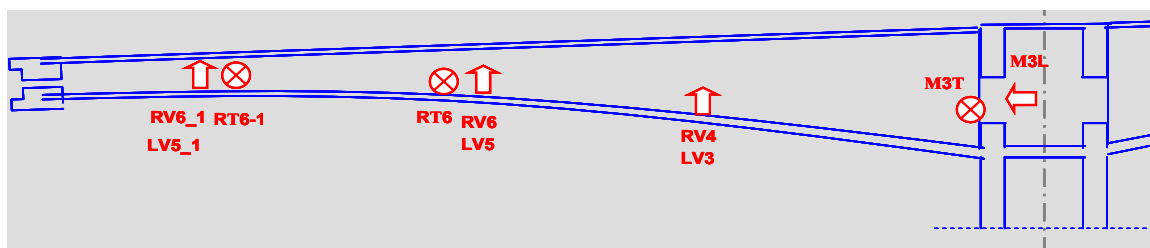


Σχήμα 5. Διατάξεις εγκατάστασης – μέτρησης αισθητήρων επιτάχυνσης στο 1^ο άνοιγμα αρ. κλάδου της παλιάς ποταμογέφυρας Στρυμόνα

Στόχος των 5 συνολικά παραλλαγών ενόργανης παρακολούθησης, ήταν η αναγνώριση των κατακόρυφων καμπτικών και στρεπτικών (γύρω από το διαμήκη άξονα της γέφυρας) ιδιοσυχνοτήτων, ιδιομορφών και ποσοστών απόσβεσης, αφού η παρατηρηθείσα βλάβη εκτιμήθηκε αρχικώς ότι επηρεάζει κυρίως αυτές. Λόγω της αμφιέριστης και εδώ στήριξης του φορέα σε κάθε άνοιγμα, εκτιμήθηκε επίσης ότι οι υπόψη ιδιομορφές επηρεάζονται ελάχιστα ή καθόλου από τα βάθρα, τα εφέδρανα και τα γειτονικά ανοίγματα και έτσι δεν κρίθηκε απαραίτητη στο πλαίσιο της ταχείας (λίγων ωρών) ενοργάνης παρακολούθησης, η τοποθέτηση πρόσθετων αισθητήρων στα βάθρα (δοκοί έδρασης, βάση βάθρων) και σε δοκούς γειτονικών ανοιγμάτων. Με τα έξι αισθητήρια, στις 5 διαφορετικές διατάξεις τους, ελήφθησαν ταυτόχρονες χρονοϊστορίες επιτάχυνσης, διάρκειας 10 – 30 λεπτών της ώρας, από την εξακάναλη καταγραφική μονάδα του Τ.Τ.Σ. της Ε.Ο.Α.Ε, με συχνότητα δειγματοληψίας 250Hz.

Ενοργάνωση υπό Κατασκευή Χαραδρογέφυρας Μετσόβου (τμήμα 3.2 της Ε.Ο.)

Εγκαταστάθηκε στο εσωτερικό του κιβωτοειδούς φορέα του προβόλου M3 της υπό κατασκευή γέφυρας Μετσόβου (αριστερός κλάδος, Σχήμα 3), εξακάναλο κινητό σύστημα επιταχυνσιόμετρων. Η διάταξη του συστήματος των 6 επιταχυνσιόμετρων, που εγκαταστάθηκαν στην υπό κατασκευή γέφυρα Μετσόβου δίνεται στο Σχήμα 7. Λόγω συμμετρικής προβολοδόμησης και λόγω ολοκλήρωσης ίδιου αριθμού σπονδύλων πέριξ του βάθρου M3, επελέγη να τοποθετηθούν αισθητήρια μόνο στο δεξιό πρόβολο του βάθρου M3 (αριστερού κλάδου) με τις εξής 2 βασικές διατάξεις: α) στην 1η διάταξη 2 επιταχυνσιόμετρα στη κεφαλή του βάθρου M3, ένα να μετράει σε διαμήκη και ένα σε εγκάρσια οριζόντια διεύθυνση (M3L, M3T), και 4 επιταχυνσιόμετρα στον αριστερό και δεξιό κορμό του κιβωτοειδούς φορέα, στις διατομές σε απόσταση 46m και 68m ε από τον άξονα του M3, για μέτρηση κατακόρυφης επιτάχυνσης β) στην 2η διάταξη τα 2 τελευταία κατακόρυφα επιταχυνσιόμετρα σε διατομή κοντύτερα στο άκρο του προβόλου, σε απόσταση 93m από τον άξονα του βάθρου M3. Και στις δύο διατάξεις το 6ο αισθητήριο μετρούσε εναλλακτικά στην κατακόρυφη και στην εγκάρσια, στον άξονα της γέφυρας, διεύθυνση (RV6 ή RT6). Στο σχήμα 7 δίνονται λεπτομέρειες των διατάξεων ενοργάνωσης.



Σχήμα 6. Διάταξη αισθητήρων ενοργάνωσης δεξιού προβόλου M3.

ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΤΡΙΩΝ ΕΝΟΡΓΑΝΩΜΕΝΩΝ ΓΕΦΥΡΩΝ

Για την αναγνώριση των δυναμικών χαρακτηριστικών των τριών γεφυρών, εφαρμόσθηκε κατάλληλη μεθοδολογία και το αντίστοιχο λογισμικό αναγνώρισης ιδιομορφικών χαρακτηριστικών γεφυρών βάσει μετρήσεων της δυναμικής τους απόκρισης σε

περιβαλλοντικές διεγέρσεις (άνεμος – κυκλοφορία), που ανέπτυξε το εργαστήριο Δυναμικής Συστημάτων του Παν. Θεσσαλίας σε συνεργασία και με την Ε.Ο.Α.Ε. Στις ιδιομορφικές παραμέτρους περιλαμβάνονται οι ιδιοσυχνότητες, οι συντελεστές απόσβεσης και οι συνιστώσες των ιδιομορφών στα σημεία μέτρησης των γεφυρών. Η αναγνώριση των βέλτιστων τιμών των ιδιομορφικών παραμέτρων επιτυγχάνεται ελαχιστοποιώντας τη διαφορά μεταξύ επιλεγμένων χαρακτηριστικών της μετρούμενης απόκρισης (π.χ. χρονοϊστοριών, συνιστωσών Fourier ή φασμάτων απόκρισης) και των αντίστοιχων χαρακτηριστικών απόκρισης που προβλέπονται από ένα ιδιομορφικό μοντέλο (modal model) των γεφυρών.

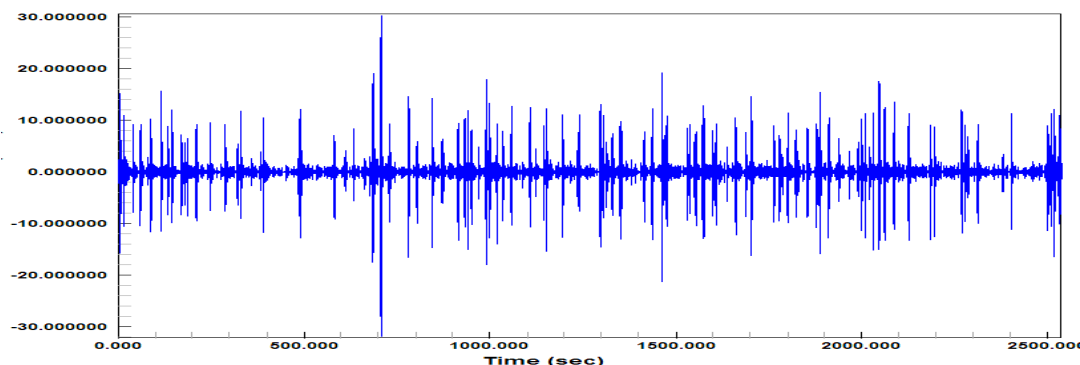
Στις μεθοδολογίες ιδιομορφικής αναγνώρισης βάσει των ταλαντώσεων που προκαλούνται από λειτουργικά φορτία που έχουν αναπτυχθεί, οι οποίες επεξεργάζονται δεδομένα μόνο εξόδου, γίνεται η παραδοχή πως οι διεγέρσεις μπορούν να θεωρηθούν σαν στοχαστικές διαδικασίες λευκού θορύβου (white noise process). Ο υπολογισμός των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών επιτυγχάνεται εφαρμόζοντας τη μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων. Συγκεκριμένα, η αναγνώριση επιτυγχάνεται ελαχιστοποιώντας το σταθμισμένο (weighted) μέτρο της διαφοράς (Ntotsios 2008)

$$E(\boldsymbol{\psi}) = \sum_{k=1}^{N_{\omega}} tr \left[\left(\mathbf{S}(k\Delta\omega; \boldsymbol{\psi}) - \hat{\mathbf{S}}(k\Delta\omega) \right)^{*T} \boldsymbol{w} \left(\mathbf{S}(k\Delta\omega; \boldsymbol{\psi}) - \hat{\mathbf{S}}(k\Delta\omega) \right) \right] \quad (1)$$

μεταξύ των συναρτήσεων διαφασματικής πυκνότητας (CPSD) $\hat{\mathbf{S}}(k\Delta\omega) \in C^{N_0 \times N_0}$ που υπολογίζονται από τις μετρούμενες χρονο-ιστορίες της απόκρισης και των συναρτήσεων διαφασματικής πυκνότητας $\mathbf{S}(k\Delta\omega; \boldsymbol{\psi}) \in C^{N_0 \times N_0}$ που προβλέπονται από ένα ιδιομορφικό μοντέλο, όπου N_0 είναι ο αριθμός των μετρούμενων βαθμών ελευθερίας (DOF), $\Delta\omega$ είναι το βήμα στο διακριτό πεδίο συχνοτήτων, $k = \{1, \dots, N_{\omega}\}$ είναι οι δείκτες που αντιστοιχίζουν τις συχνότητες $\omega = k\Delta\omega$, N_{ω} είναι ο αριθμός των διακριτών σημείων στο πεδίο συχνοτήτων, $\boldsymbol{w} \in R^{N_0 \times N_0}$ το μητρώο που περιέχει τους συντελεστές βαρύτητας και $\boldsymbol{\psi}$ είναι το διάνυσμα των παραμέτρων που πρόκειται να αναγνωρισθεί. Για την επίλυση του προβλήματος ελαχιστοποίησης που προκύπτει χρησιμοποιείται κατάλληλος αλγόριθμος τριών βημάτων ο οποίος περιγράφεται αναλυτικά στις εργασίες Ntotsios (2008), Paradimitriou et al. (2008).

Προσδιορισμός Δυναμικών Χαρακτηριστικών Ποταμογέφυρας Δεξιού Κλάδου Π.Α.Θ.Ε. από τις Μετρήσεις Επιτάχυνσης από Λειτουργικά Φορτία

Ενδεικτικά, στο Σχήμα 7 παρουσιάζεται η κατακόρυφη επιτάχυνση που καταγράφηκε από αισθητήρα (RV1) στο μέσο της φθαρμένης δοκού της ποταμογέφυρας του δεξιού κλάδου ΠΑΘΕ.



Σχήμα 7. Χρονοϊστορία επιτάχυνσης (cm/sec^2) στο κανάλι RV1

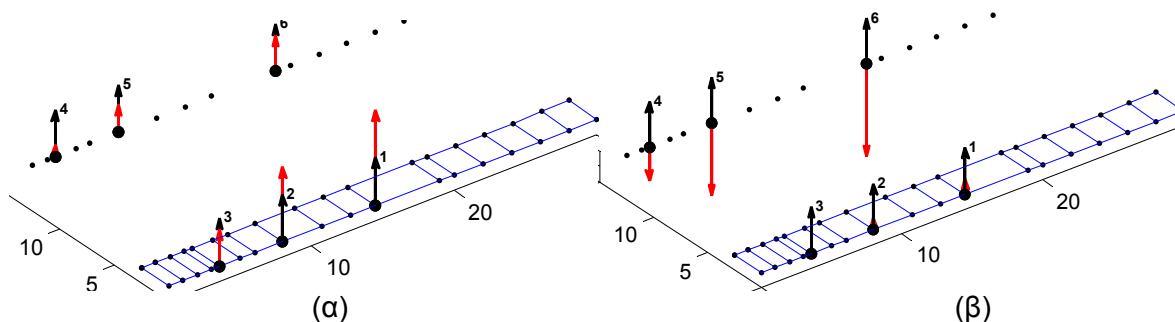
Από την χρονοϊστορία του Σχήματος 7, φαίνεται ότι η ένταση της διέγερσης του φορέα της γέφυρας από διερχόμενη κυκλοφορία ήταν σημαντική, της τάξης 3% της επιτάχυνσης βαρύτητας g .

Οι χρονοϊστορίες απόκρισης σε λειτουργικά φορτία που οφείλονται κυρίως στη διέλευση των οχημάτων επεξεργάστηκαν με το αναπτυχθέν λογισμικό για τον προσδιορισμό των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών. Η εφαρμογή του λογισμικού έδωσε τη δυνατότητα αναγνώρισης αρκετών βασικών ιδιοσυχνοτήτων, ιδιομορφών και συντελεστών απόσβεσης.

Ο τύπος των ιδιομορφών που αναγνωρίστηκαν με αξιοπιστία, οι τιμές των ιδιοσυχνοτήτων και οι αντίστοιχες τιμές των συντελεστών απόσβεσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 1, ενώ δύο βασικές ιδιομορφές, η 1^η καμπτική και η 1^η στρεπτική, δίνονται στο Σχήμα 8. Τα κόκκινα βέλη στο Σχήμα 8 βρίσκονται στα σημεία μέτρησης και το μήκος τους είναι ανάλογο της αντίστοιχης κανονικοποιημένης ιδιομορφικής συνιστώσας. Συγκεκριμένα, από τη διέλευση των οχημάτων διεγέρθηκαν και αναγνωρίστηκαν πέντε ιδιοσυχνότητες και ιδιομορφές της γέφυρας: δύο καμπτικές και τρεις στρεπτικές του φορέα.

Πίνακας 1: Αναγνωρισμένες ιδιοσυχνότητες και συντελεστές απόσβεσης και αναλυτικές ιδιοσυχνότητες της ποταμογέφυρας Π.Α.Θ.Ε. (δεξιός κλάδος)

		Καταγραφή	Καταγραφή	Αναλυτικό μοντέλο
No	Τύπος Ιδιομορφών	Ιδιοσυχνότητες (Hz)	Συντελεστές Απόσβεσης (%)	Ιδιοσυχνότητες (Hz)
1	1 ^η καμπτική	3.95	3.73	3.75
2	1 ^η στρεπτική	4.10	2.98	4.24
3	2 ^η καμπτική	12.9	2.06	14.00
4	2 ^η στρεπτική	13.6	2.64	14.78
5	3 ^η στρεπτική	14.5	1.78	21.06

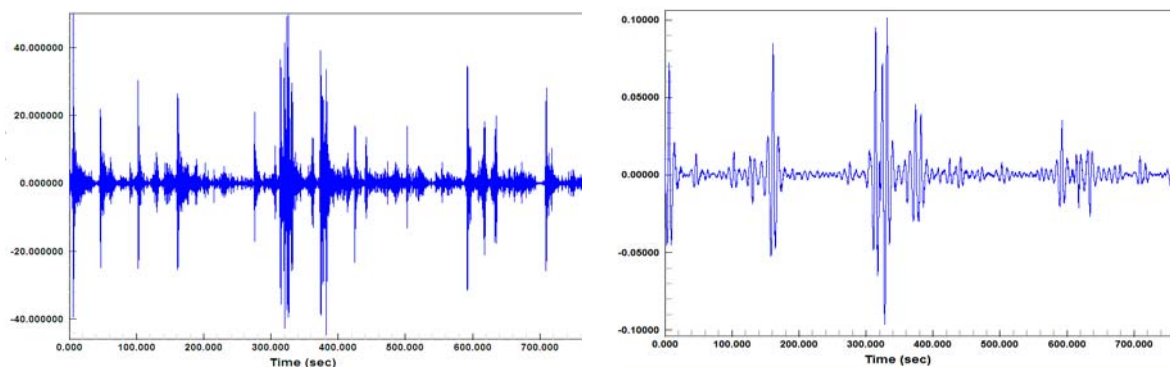


Σχήμα 8. Αναγνωρισμένες ιδιομορφές της ποταμογέφυρας Π.Α.Θ.Ε. (δεξιός κλάδος) (α) 1^η καμπτική ($\omega = 3,95\text{Hz}$), (β) 1^η στρεπτική ($\omega = 4,10\text{Hz}$)

Σημειώνεται ότι η διασπορά των τιμών των ιδιοσυχνοτήτων που αναγνωρίζονται από πολλαπλές καταγραφές είναι μικρότερη του 1%, ενώ η διασπορά των τιμών των συντελεστών απόσβεσης είναι της τάξης του 10 με 50%. Τα αποτελέσματα αυτά είναι συμβατά με αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην βιβλιογραφία από άλλους ερευνητές. Τα πραγματικά δυναμικά χαρακτηριστικά της γέφυρας που προσδιορίστηκαν από τις μετρήσεις, συγκρίθηκαν με αναλυτικά αποτελέσματα προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων που καταστρώθηκαν βάσει αποτύπωσης της γέφυρας και παραδοχών που θεωρήθηκαν βάσει του μήκους ανοίγματος και των δεδομένων της εποχής κατασκευής της γέφυρας. Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 1, υπάρχουν διαφορές μεταξύ των αναλυτικών προβλέψεων και αυτών που προέκυψαν από τις μετρήσεις σε συνθήκες συνήθους κυκλοφοριακού φόρτου. Σημαντικό είναι ότι παρ' όλη την σημαντική αναγνωρισμένη βλάβη της ακραίας δοκού, με μεγάλη απώλεια διατομής σκυροδέματος και χάλυβα προέντασης, η 1η καμπτική ιδιοσυχνότητα είναι μεγαλύτερη από αυτή που προβλέπει το μοντέλο, που δείχνει ότι γενικώς δεν επηρεάζεται σημαντικά ακόμη η συνολική δομική ακεραιότητα της γέφυρας, Ωστόσο η 1η, 2η και 3η στρεπτική αλλά και η 2η καμπτική ιδιοσυχνότητα είναι σαφώς μικρότερες από αυτές που προβλέπει το μοντέλο, γεγονός που βεβαιώνει την όχι κρίσιμη αλλά σημαντική επιρροή της βλάβης. Τέλος αξιοσημείωτη είναι και η σημαντική εκκεντρότητα των αναγνωρισμένων καμπτικών και στρεπτικών ιδιομορφών (συνιστώσες φθαρμένης και υγιούς πλευράς) που εκτός από την μικρή επιρροή της έκκεντρης διέλευσης βαρέων φορτηγών, και του σφάλματος προσδιορισμού της ιδιομορφής, πρέπει να οφείλεται και στην αναγνωρισμένη βλάβη της μίας εκ των ακραίων δοκών. Σημειώνεται βέβαια ότι τα προηγούμενα συμπεράσματα δεν είναι τελικά, αφού αφενός η σύγκριση γίνεται με μοντέλο όχι της μελέτης αλλά όπως προέκυψε από την αποτύπωση της γέφυρας. Επίσης δεν υπήρξε μέτρηση πριν την φθορά και βεβαίως η πυκνότητα και ο αριθμός των μετρήσεων δεν εξαντλούν την επάρκεια ενός τέτοιου εγχειρήματος.

Προσδιορισμός Δυναμικών Χαρακτηριστικών Ποταμογέφυρας Στρυμόνα (τμήμα 11.3 της Ε.Ο.) από τις Μετρήσεις Περιβαλλοντικής Επιτάχυνσης

Ενδεικτικά, στο Σχήμα 9 παρουσιάζονται η κατακόρυφη επιτάχυνση που καταγράφηκε από αισθητήρα (RV1) στο μέσο της δεξιάς δοκού και η οριζόντια εγκάρσια μετακίνηση από αισθητήρα (LT6).



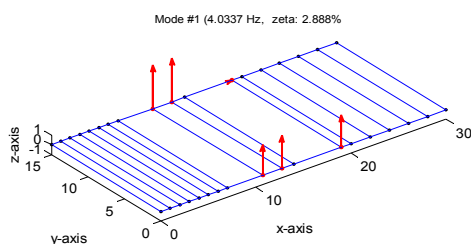
Σχήμα 9. Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης (cm/sec²) στο κανάλι RV1, μετακίνησης (cm) στο κανάλι LT6

Από τις χρονοϊστορίες του Σχήματος 9, φαίνεται ότι η ένταση της διέγερσης του φορέα της γέφυρας από διερχόμενη κυκλοφορία ήταν σημαντική, της τάξης 3-4% της επιτάχυνσης βαρύτητας g .

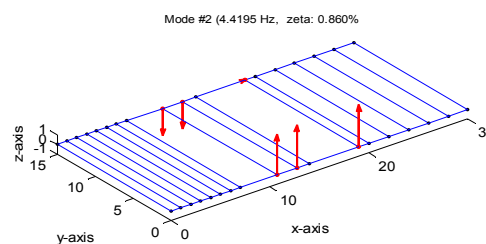
Από την κυκλοφορία των οχημάτων στη γέφυρα διεγέρθηκαν και αναγνωρίστηκαν καθαρά μέχρι τέσσερις ιδιοσυχνότητες και ιδιομορφές της γέφυρας: δύο καμπτικές ιδιομορφές και δύο στρεπτικές ιδιομορφές. Ο τύπος των ιδιομορφών που αναγνωρίστηκαν, οι βέλτιστες τιμές των ιδιοσυχνοτήτων και οι αντίστοιχες τιμές των συντελεστών απόσβεσης για όλα τα σετ μετρήσεων φαίνονται στον Πίνακα 2. Μερικές ενδεικτικές ιδιομορφές φαίνονται στο Σχήμα 10. Τα βέλη βρίσκονται στα σημεία μέτρησης και το μήκος τους είναι ανάλογο της αντίστοιχης κανονικοποιημένης ιδιομορφικής συνιστώσας.

Πίνακας 2: Αναγνωρισμένες ιδιομορφές, ιδιοσυχνότητες και συντελεστές απόσβεσης ποταμογέφυρας Στρυμόνα

No	Τύπος Ιδιομορφών	Καταγραφή Ιδιοσυχνότητες (Hz)	Καταγραφή Συντελεστές Απόσβεσης (%)	Αναλυτικό μοντέλο Ιδιοσυχνότητες (Hz)
1	1 ^η καμπτική	4.03	2.89	4.05
2	1 ^η στρεπτική	4.42	0.86	4.45
3	2 ^η στρεπτική	13.04	0.31	12.96
4	2 ^η καμπτική	13.18	0.51	14.99



(α)



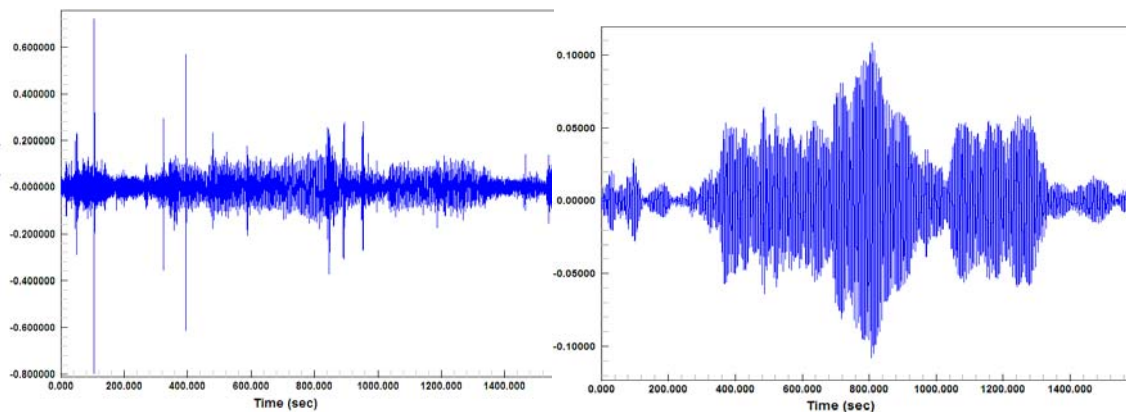
(β)

Σχήμα 10. Αναγνωρισμένες ιδιομορφές (α) 1^η καμπτική ($\omega = 4.03$ Hz) (β) 1^η στρεπτική ($\omega = 4.42$ Hz)

Σημειώνεται ότι και στη ποταμογέφυρα Στρυμόνα παρατηρήθηκαν διαφορές μεταξύ των πειραματικά προσδιορισμένων ιδιομορφικών χαρακτηριστικών και αυτών αναλυτικών προσομοιωμάτων που αντιστοιχούσαν με αυτά του σχεδιασμού της γέφυρας. Σημαντικό είναι ότι οι αναγνωρισμένες ιδιοσυχνότητες της 1^{ης} καμπτικής και της 1^{ης} στρεπτικής ιδιομορφής είναι χαμηλότερες από αυτές που προβλέπει το μοντέλο, γεγονός που από μόνο του δείχνει ότι είναι πιθανόν η φθορά να έχει επηρεάσει την καμπτική και στρεπτική ακαμψία του φορέα.

Προσδιορισμός δυναμικών χαρακτηριστικών προβόλου M3 της υπό κατασκευή νέας χαραδρογέφυρας Μετσόβου από τις μετρήσεις περιβαλλοντικής επιτάχυνσης

Ενδεικτικά, στο Σχήμα 11 παρουσιάζονται η εγκάρσια επιτάχυνση και μετακίνηση που καταγράφηκε από τον αισθητήρα (RT6) στο άκρο του προβόλου του βάθρου M3.



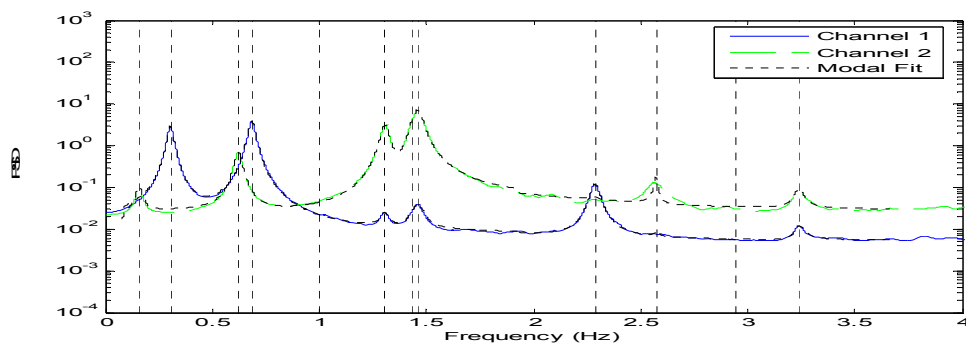
Σχήμα 11. Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης (cm/sec^2) και μετακίνησης (cm) στο κανάλι RT6

Οι χρονοϊστορίες απόκρισης σε λειτουργικά φορτία που οφείλονται κυρίως στον άνεμο, στη διέλευση ελαφρού οχήματος στο κατάστρωμα της γέφυρας και άλλων μικροφορτίσεων για την ενσυρμάτιση των σωλήνων προέντασης, πολύ μικρής γενικά έντασης της τάξης του 0,6% της επιτάχυνσης της βαρύτητας, επεξεργάστηκαν με το αναπτυχθέν λογισμικό για τον προσδιορισμό των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών. Η εφαρμογή του λογισμικού έδωσε τη δυνατότητα αναγνώρισης πολλών βασικών ιδιοσυχνοτήτων, ιδιομορφών και συντελεστών απόσβεσης.

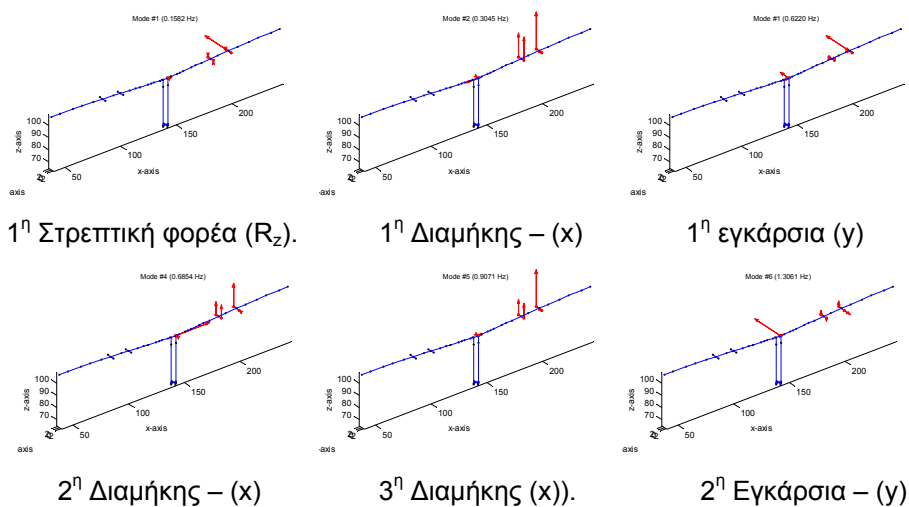
Ο τύπος των ιδιομορφών που αναγνωρίστηκαν με αξιοπιστία, οι τιμές των ιδιοσυχνοτήτων και οι αντίστοιχες τιμές των συντελεστών απόσβεσης για όλα τα σετ μετρήσεων φαίνονται στον Πίνακα 3 για τις δέκα πρώτες ιδιομορφές. Ενδεικτικά, οι πρώτες 6 ιδιομορφές φαίνονται στο Σχήμα 13. Τα κόκκινα βέλη βρίσκονται στα σημεία μέτρησης και το μήκος τους είναι ανάλογο της αντίστοιχης κανονικοποιημένης ιδιομορφικής συνιστώσας.

Πίνακας 3: Αναγνωρισμένες ιδιομορφές, ιδιοσυχνότητες και συντελεστές απόσβεσης προβόλου M3 χαραδρογέφυρας Μετσόβου

No	Αναγνωρισμένες Ιδιοσυχνότητες	Καταγραφή	Καταγραφή	Αναλυτικό μοντέλο
		Ιδιοσυχνότητες (Hz)	Συντελεστές Απόσβεσης (%)	Ιδιοσυχνότητες (Hz)
1	1 ^η στροφική (Rz)	0.15	2.93	0.136
2	1 ^η διαμήκης	0.30	0.18	0.267
3	1 ^η εγκάρσια	0.62	0.43	0.511
4	2 ^η διαμήκης	0.68	0.42	0.617
5	1 ^η καμπτική (κατάστρωμα)	0.90	0.25	0.70
6	2 ^η εγκάρσια	1.30	0.40	1.24
7	2 ^η καμπτική (κατάστρωμα)	1.43	0.43	1.84
8	2 ^η στροφική (Rz)	1.46	0.47	2.04
9	3 ^η καμπτική (κατάστρωμα)	2.28	0.40	2.71
10	3 ^η εγκάρσια	2.58	1.27	3.79



Σχήμα 12. Σύγκριση συναρτήσεων διαφασματικής πυκνότητας μεταξύ μετρούμενων επιταχύνσεων και προβλεπόμενων από το ιδιομορφικό μοντέλο.



Σχήμα 13. Οι έξι πρώτες αναγνωρισμένες ιδιομορφές του προβόλου M3

Σημειώνεται ότι για τον πρόβολο M3 της χαραδρογέφυρας Μετσόβου, στάθηκε δυνατή η αναγνώριση άνω των 15 πρώτων ιδιομορφών, με άριστη προσέγγιση του σταθμισμένου μέτρου της διαφοράς μεταξύ των συναρτήσεων διαφασματικής πυκνότητας του ιδιομορφικού μοντέλου με των μετρήσεων (Εξίσωση (1)). Το πολύ αδύνατο σήμα των μετρήσεων ήταν αρκετό για αυτήν την ιδιαίτερα πετυχημένη αναγνώριση. Όπως ήταν αναμενόμενο, από τα αποτελέσματα του Πίνακα 3 προκύπτουν διαφορές μεταξύ των πειραματικά προσδιορισμένων ιδιομορφικών χαρακτηριστικών και αυτών των αναλυτικών προσομοιωμάτων που αντιστοιχούν στη μελέτη της γέφυρας. Αξιοσημείωτο είναι ότι οι αναγνωρισμένες τιμές των ανώτερων ιδιομορφών, η 7η έως και η 10η, δείχνουν τον πρόβολο να ταλαντώνεται πιο έυκαμπτος από της μελέτης. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι οι ακραίοι σπόνδυλοι που συνεισφέρουν σε αυτές τις ιδιομορφές ήταν πολύ νεαρής ηλικίας (ημέρες έως μήνες μετά την σκυροδέτηση) σε συνδυασμό με την πιθανή υποεκτίμηση των μαζών των κινητών φορτίων κατασκευής στο άκρο της γέφυρας, στο μοντέλο.

ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΤΩΝ ΤΡΙΩΝ ΕΝΟΡΓΑΝΩΜΕΝΩΝ ΓΕΦΥΡΩΝ ΒΑΣΕΙ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΟΥΣ (ΙΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ – ΙΔΙΟΜΟΡΦΩΝ)

Για την αναθεώρηση των δυναμικών μοντέλων των ενοργανωμένων γεφυρών εφαρμόσθηκε κατάλληλη μεθοδολογία και αντίστοιχο λογισμικό αναθεώρησης μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων κατασκευών βάσει μετρήσεων της δυναμικής τους απόκρισης (Papadimitriou et al. 2008), που αναπτύχθηκε από το Εργαστήριο Δυναμικής Συστημάτων του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, σε συνεργασία και με την Ε.Ο.Α.Ε.

Στόχος των μεθοδολογιών αναθεώρησης μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων είναι ο υπολογισμός των παραμέτρων $\theta \in R^{N_\theta}$ μιας ομάδας γραμμικών μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων που περιγράφουν μια κατασκευή, έτσι ώστε οι ιδιοσυχνότητες και τα ιδιοδιανύσματα $\{\omega_r(\theta), \phi_r(\theta) \in R^{N_0}, r=1, \dots, m\}$ που προβλέπονται από τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων να προσεγγίζουν κατά το δυνατόν καλύτερα τα ιδιομορφικά χαρακτηριστικά $\{\hat{\omega}_r, \hat{\phi}_r \in R^{N_0}, r=1, \dots, m\}$ που προκύπτουν πειραματικά από την κατασκευή, όπου m είναι ο αριθμός των ιδιομορφών που λαμβάνονται υπόψη, και N_0 είναι ο αριθμός των μετρούμενων βαθμών ελευθερίας. Το πρόβλημα της εύρεσης των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων θ μπορεί να αντιμετωπιστεί ως ένα μονοκριτηριακό πρόβλημα ελαχιστοποίησης των σταθμισμένων ιδιομορφικών υπολοίπων (weighted modal residuals, Christodoulou και Papadimitriou 2007).

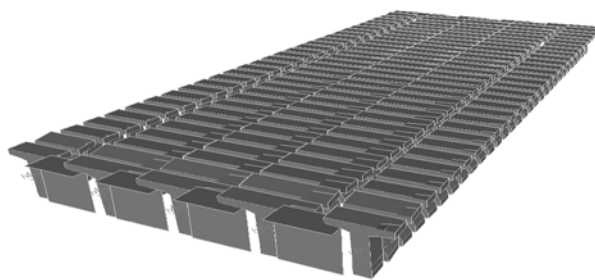
$$J(\theta; \mathbf{w}) = \sum_{r=1}^m \left[w_{\omega_r} \frac{[\omega_r(\theta) - \hat{\omega}_r]^2}{[\hat{\omega}_r]^2} + w_{\phi_r} \frac{\|\beta_r \phi_r(\theta) - \hat{\phi}_r\|^2}{\|\hat{\phi}_r\|^2} \right] \quad (2)$$

Ο πρώτος όρος στην εξίσωση (2) καλείται ιδιομορφικό υπόλοιπο για την r ιδοσυχνότητα και εκφράζει τη διαφορά μεταξύ των μετρούμενων και των προβλεπόμενων από το μοντέλο τιμών για την r ιδιοσυχνότητα, ενώ ο δεύτερος όρος καλείται ιδιομορφικό υπόλοιπο για την

r ιδιομορφή και εκφράζει τη διαφορά μεταξύ των μετρούμενων και των προβλεπόμενων από το μοντέλο τιμών για τις ιδιομορφικές συνιστώσες της r ιδιομορφής, όπου $\|z\|^2 = z^T z$ είναι το σύννηθες Ευκλείδειο μέτρο και $\beta_r = \hat{\phi}_r^T \phi_r(\theta) / \phi_r^T(\theta) \phi_r(\theta)$ είναι ένας συντελεστής κανονικοποίησης που εξασφαλίζει ότι οι μετρούμενες συνιστώσες των ιδιομορφών στους μετρούμενους βαθμούς ελευθερίας είναι κοντά στις προβλεπόμενες από το μοντέλο $b_r \phi_r(q)$ συνιστώσες για μία συγκεκριμένη τιμή των παραμέτρων q . Οι συντελεστές κανονικοποίησης προκύπτουν από την ελαχιστοποίηση του μέτρου της διαφοράς $\|\phi_r(q) - \beta_r(q) \hat{\phi}_r(q)\|$. Οι συντελεστές βαρύτητας $w_{\omega_r} \geq 0$ και $w_{\phi_r} \geq 0$, $r=1, \dots, m$, ικανοποιούν τη συνθήκη $\sum_{r=1}^m [w_{\omega_r} + w_{\phi_r}] = 1$. Η αντικειμενική συνάρτηση $J(\theta; w)$ αντιπροσωπεύει το συνολικό μέτρο της διαφοράς μεταξύ των μετρούμενων δεδομένων και των προβλεπόμενων από το μοντέλο ιδιομορφικών χαρακτηριστικών. Η ευαισθησία των αναθεωρημένων μοντέλων στην επιλογή των συντελεστών βαρύτητας έχει μελετηθεί από Christodoulou και Paradimitriou (2007).

Αναθεώρηση δυναμικού μοντέλου 1^{ου} ανοίγματος της ποταμογέφυρας αριστερού κλάδου Στρυμόνα για τις πειραματικώς αναγνωρισθείσες ιδιοσυχνότητες, ιδιομορφές.

Με βάση τις ιδιότητες υλικών και γεωμετρίας της μελέτης της παλαιάς ποταμογέφυρας Στρυμόνα της Ε.Ο., κατασκευάστηκαν λεπτομερή μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων. Η προσομοίωση των δοκών και πλακών του αμφιέριστου φορέα έγινε με τρισδιάστατα ευκλείδια πεπερασμένα στοιχεία δοκού, με χρήση των λογισμικού SAP2000NLV11, ενώ για τις ανάγκες της αναθεώρησης καταστρώθηκε μοντέλο και με το λογισμικό COMSOL Multiphysics. Για την σύνδεση των δοκών με τα πλακίδια πλάκας καταστρώματος χρησιμοποιήθηκαν άκαμπτα στοιχεία μηδενικής μάζας. Τα μοντέλα του SAP2000NLV11 φαίνεται στο Σχήμα 15 και έχει 2232 βαθμούς ελευθερίας, αντίστοιχα. Οι δοκοί θεωρήθηκε ότι στηρίζονται σε ακλόνητα βάθρα, μέσω ελατηρίων που προσομοιώνουν την οριζόντια δυστημψία και την ατένεια των ελαστομεταλλικών εφεδράνων. Λόγω της αμφιέριστης μόρφωσης κάθε ανοίγματος αλλά και λόγω της εστίασης στην κάμψη και στρέψη του φορέα θεωρήθηκε ικανοποιητική προσέγγιση η εξέταση του περιγραφόμενου υποφορέα της γέφυρας.



Σχήμα 14. Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων του αμφιέριστου φορέα της γέφυρας Στρυμόνα

Η μεθοδολογία αναθεώρησης του αρχικού μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων της γέφυρας εφαρμόστηκε αρχικά χρησιμοποιώντας τα πειραματικώς αναγνωρισμένα μετρητικά δεδομένα μόνο της πρώτης καμπτικής ιδιομορφής, με σκοπό τον υπολογισμό της πραγματικής ακαμψίας της εσχάρας δοκών. Το παραμετροποιημένο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων περιέχει μία παράμετρο q_1 , η οποία περιγράφει την δυσκαμψία της εσχάρας των πλακοδοκών. Η παράμετρος πολλαπλασιάζει την ονομαστική τιμή της ακαμψίας της εσχάρας δοκών του αρχικού μοντέλου, συγκεκριμένα του μέτρου ελαστικότητας δοκών και πλάκας,

έτσι ώστε το μοντέλο που αντιστοιχεί σε τιμή της παραμέτρου $q_1=1.0$, να αντιστοιχεί στο αρχικό μοντέλο της γέφυρας που χρησιμοποιήθηκε στη φάση του σχεδιασμού.

Η τιμή που προέκυψε ήταν $q_1 = 0,942$, για την οποία το αναθεωρημένο θεωρείται πλέον ως το ονομαστικό (nominal) μοντέλο της γέφυρας. Η τιμή της παραμέτρου αυτής όντας μικρότερη της μονάδας, δείχνει ήδη την πιθανή επιρροή της αναγνωρισθείσας βλάβης στην ακαμψία και στην δομική ακεραιότητα της γέφυρας.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η αναθεώρηση του ονομαστικού μοντέλου με δύο παραμέτρους. Η αναθεώρηση γίνεται τόσο για την περίπτωση που η μετρούμενη ιδιομορφή είναι μόνον η στρεπτική ιδιομορφή όσο και για την περίπτωση που μετρούμενες ιδιομορφές είναι η καμπτική και η στρεπτική ιδιομορφή του φορέα. Το παραμετροποιημένο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων περιέχει δύο παραμέτρους q_1, q_2 . Η πρώτη παράμετρος q_1 περιγράφει την δυσκαμψία της εσχάρας δοκών και η δεύτερη παράμετρος q_2 περιγράφει την ατένεια των ελαστομεταλλικών εφεδράνων. Οι παράμετροι πολλαπλασιάζουν τις ονομαστικές τιμές των ιδιοτήτων των μοντέλων τις οποίες περιγράφουν, έτσι ώστε το μοντέλο που αντιστοιχεί σε τιμές των παραμέτρων $q_1 = q_2 = 1,0$ να αντιστοιχεί στο ονομαστικό μοντέλο της γέφυρας.

Στην πρώτη περίπτωση, η τιμή της δυσκαμψίας της εσχάρας παραμένει 1.0, δηλαδή η ακαμψία δεν διορθώνεται περισσότερο από την πρώτη αναθεώρηση, ενώ η τιμή της ατένειας των εφεδράνων είναι 5 φορές μικρότερη από την αρχική τιμή ($q_2=0,192$). Στον Πίνακα 4 συγκρίνονται οι τιμές των ιδιοσυχνοτήτων που προβλέπονται από το βέλτιστο αναγνωρισμένο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων με τις αντίστοιχες τιμές των μετρούμενων ιδιοσυχνοτήτων, χρησιμοποιώντας δεδομένα μόνο από την στρεπτική ιδιοσυχνότητα. Επίσης δίνονται τα επί τοις εκατό σφάλματα ($\|\Delta\omega\| = (\omega - \hat{\omega})/\hat{\omega}$) μεταξύ των μετρούμενων και των προβλεπόμενων ιδιοσυχνοτήτων τα οποία είναι μηδέν για την στρεπτική αλλά μεγαλύτερα για την καμπτική.

Πίνακας 4. Μετρούμενες και προβλεπόμενες ιδιοσυχνότητες με τα επί τοις εκατό σφάλματα

Ιδιοσυχνότητα	Μετρούμενη	Αναθεωρημένη	$\Delta\omega$ %
1η καμπτική	4.0402	3.8076	5.75%
1η στρεπτική	4.4307	4.4307	0.0%

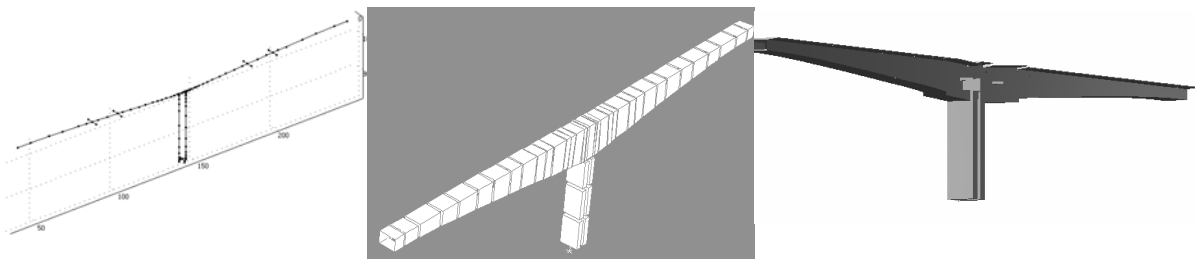
Στην δεύτερη περίπτωση, η τιμή της δυσκαμψίας της εσχάρας παραμένει 1.0, δηλαδή η ακαμψία δεν διορθώνεται περισσότερο από την πρώτη αναθεώρηση, ενώ η τιμή της ατένειας των εφεδράνων είναι 4 φορές περίπου μικρότερη από την αρχική τιμή ($q_2=0,256$). Στον Πίνακα 5 συγκρίνονται οι τιμές των ιδιοσυχνοτήτων που προβλέπονται από το βέλτιστο αναγνωρισμένο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων με τις αντίστοιχες τιμές των μετρούμενων ιδιοσυχνοτήτων, χρησιμοποιώντας δεδομένα και από τις δύο αναγνωρισμένες ιδιοσυχνότητες. Επίσης δίνονται τα επί τοις εκατό σφάλματα ($\|\Delta\omega\| = (\omega - \hat{\omega})/\hat{\omega}$) μεταξύ των μετρούμενων και των προβλεπόμενων ιδιοσυχνοτήτων τα οποία είναι αρκετά καλά για την καμπτική έως και πολύ καλά για την στρεπτική ιδιομορφή.

Πίνακας 5. Μετρούμενες και προβλεπόμενες ιδιοσυχνότητες με τα επί τοις εκατό σφάλματα

Ιδιοσυχνότητα	Μετρούμενη	Αναθεωρημένη	$\Delta\omega$ %
1η καμπτική	4.0402	3.8769	4.04%
1η στρεπτική	4.4307	4.5404	-2.47%

Αναθεώρηση δυναμικού μοντέλου προβόλου M3 της υπό κατασκευή νέας χαραδρογέφυρας Μετσόβου της Ε.Ο. για τις πειραματικώς αναγνωρισθείσες ιδιοσυχνότητες, ιδιομορφές.

Με βάση τις ιδιότητες υλικών και γεωμετρίας της μελέτης της υπό κατασκευή νέας γέφυρας Μετσόβου της Ε.Ο. κατασκευάστηκαν λεπτομερή μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων. Η προσομοίωση τόσο των δύο εγκάρσιων τοιχείων του βάθρου όσο και του φορέα έγινε με τρισδιάστατα ευκλείδια πεπερασμένα στοιχεία δοκού, με χρήση των λογισμικών SAP2000NLV11, STATIK, ενώ για τις ανάγκες της αναθεώρησης καταστρώθηκε μοντέλο και με το λογισμικό COMSOL Multiphysics. Για την καλύτερη γραφική απεικόνιση των ανώτερων ιδιομορφών του φορέα – προβόλου, προστέθηκε μια σειρά άκαμπτων δοκών μηδενικής μάζας εκατέρωθεν του κέντρου βάρους. Για την σύνδεση του καταστρώματος με τα ακρόβαθρα χρησιμοποιήθηκαν άκαμπτα στοιχεία μηδενικής μάζας. Τα τρία μοντέλα φαίνονται στο Σχήμα 15 και έχουν 594, 264 και 448 βαθμούς ελευθερίας, αντίστοιχα. Η θεμελίωση των τοιχωμάτων του βάθρου M3, προσομοιώθηκε με τιμή ελατηρίων που αντιστοιχεί στην πλήρη πάκτωση τους.



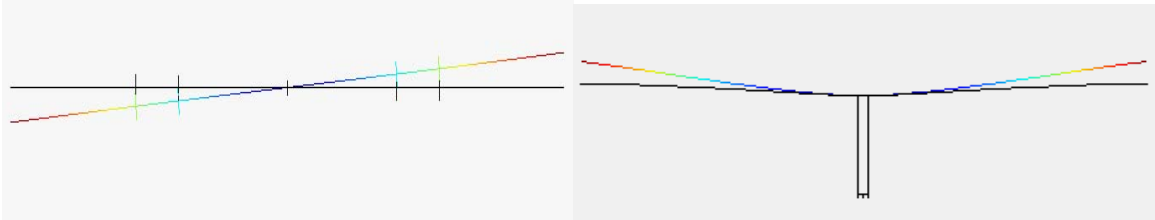
Σχήμα 15. Μοντέλο προβόλου M3 της γέφυρας Μετσόβου με πεπερασμένα στοιχεία δοκού κατά Euler.

Χρησιμοποιώντας τα μετρητικά δεδομένα που αναγνωρίστηκαν και παρουσιάστηκαν από την υπό κατασκευή νέα γέφυρας Μετσόβου της Ε.Ο. εφαρμόστηκε η μεθοδολογία αναθεώρησης μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων για το μοντέλο της γέφυρας. Στον Πίνακα 6 συγκρίνονται οι μετρούμενες τιμές των 5 πρώτων ιδιοσυχνοτήτων με αυτές που προκύπτουν από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για την περίπτωση που η γέφυρα συνδέεται άκαμπτα με τη θεμελίωση (fixed) και για την περίπτωση που η γέφυρα συνδέεται με τη θεμελίωση με σχεδόν άκαμπτα ελατήρια (stiff springs). Συγκρίνοντας τις τιμές των ιδιοσυχνοτήτων για τα δύο μοντέλα φαίνεται πως τα ελατήρια που χρησιμοποιήθηκαν για τη δεύτερη περίπτωση είναι αρκετά άκαμπτα έτσι ώστε το μοντέλο να προσομοιώνει δυναμική συμπεριφορά σχεδόν όμοια με αυτή του πακτωμένου μοντέλου.

Πίνακας 6. Αναγνωρισμένες τιμές των ιδιοσυχνοτήτων και τιμές που προβλέπονται από τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων.

Measured (Hz)	FEM (fixed)	FEM (stiff springs)
0.1592	0.1461	0.1461
0.3049	0.2813	0.2809
0.6232	0.5841	0.5831
0.6855	0.6159	0.6158
0.9082	0.7257	0.7257

Στο Σχήμα 16 παρουσιάζονται η 1^η στρεπτική ιδιομορφή του φορέα γύρω από το βάθρο M3 (0.1461 Hz) και η 1^η καμπτική ιδιομορφή του φορέα - προβόλου (0.7257 Hz), όπως αυτές υπολογίζονται από τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων. Παρατηρώντας την γραφική απεικόνιση των ιδιομορφικών συνιστωσών για την 1^η στρεπτική ιδιομορφή, φαίνεται πως αυτή εξαρτάται μόνο από την ακαμψία των τοιχωμάτων του βάθρου M3. Αντίστοιχα, φαίνεται πως η 1^η καμπτική ιδιομορφή του φορέα εξαρτάται μόνο από την ακαμψία του φορέα.



Σχήμα 16: Ιδιομορφές μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων της γέφυρας του Μετσόβου (α) 1^η στρεπτική ($\omega = 0.1461$ Hz) (β) 1^η καμπτική φορέα ($\omega = 0.7257$ Hz)

Η μεθοδολογία αναθεώρησης του αρχικού μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων της γέφυρας εφαρμόστηκε αρχικά χρησιμοποιώντας τα πειραματικώς αναγνωρισμένα μετρητικά δεδομένα μόνο αυτών των δύο ιδιομορφών, με σκοπό τον υπολογισμό της πραγματικής ακαμψίας των τοιχωμάτων του βάθρου M3 και του φορέα. Το παραμετροποιημένο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων περιέχει δύο παραμέτρους q_1 και q_2 . Η πρώτη παράμετρος q_1 περιγράφει την δυσκαμψία των τοιχωμάτων M3, ενώ η δεύτερη παράμετρος q_2 περιγράφει την δυσκαμψία του φορέα. Οι παράμετροι πολλαπλασιάζουν τις ονομαστικές τιμές των ιδιοτήτων των αρχικών μοντέλων τις οποίες περιγράφουν, έτσι ώστε το μοντέλο που αντιστοιχεί σε τιμές των παραμέτρων $q_1=q_2=1$ να αντιστοιχεί στο αρχικό μοντέλο της γέφυρας που χρησιμοποιήθηκε στη φάση του σχεδιασμού.

Στον Πίνακα 7 παρουσιάζονται οι βέλτιστες τιμές \hat{q} των παραμέτρων q_1 , και q_2 για τα ιδιομορφικά δεδομένα των δύο επιλεγθεισών ιδιομορφών. Στον Πίνακα 6, η τιμή της δυσκαμψίας των βάθρων είναι 1.2 φορές μεγαλύτερη από την αρχική τιμή, ενώ η τιμή της δυσκαμψίας του φορέα είναι 1.57 φορές μεγαλύτερη από την αρχική τιμή. Το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που αντιστοιχεί στις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων q_1 και q_2 θεωρείται πλέον ως το ονομαστικό (nominal) μοντέλο της γέφυρας.

Πίνακας 7. Βέλτιστες τιμές \hat{q} των παραμέτρων q

Παράμετρος	Τιμή
E βάθρου	1.2032
E φορέα	1.5694

Στον Πίνακα 8 συγκρίνονται οι τιμές των ιδιοσυχνοτήτων που προβλέπονται από το βέλτιστο αναγνωρισμένο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων με τις αντίστοιχες τιμές των μετρούμενων ιδιοσυχνοτήτων, χρησιμοποιώντας δεδομένα από την 1^η και την 5^η μετρούμενη ιδιοσυχνότητα αντίστοιχα. Επίσης δίνονται τα επί τοις εκατό σφάλματα ($\|\Delta\omega\| = (\omega - \hat{\omega})/\hat{\omega}$) μεταξύ των μετρούμενων και των προβλεπόμενων ιδιοσυχνοτήτων τα οποία είναι μηδέν, πράγμα που σημαίνει ότι το μοντέλο προβλέπει ακριβώς όμοια συμπεριφορά με την μετρούμενη.

Πίνακας 8. Μετρούμενες και προβλεπόμενες ιδιοσυχνότητες με τα επί τοις εκατό σφάλματα

Ιδιομορφή	Μετρημένες	Αναθεωρημένες	$\Delta\omega$ %
1 st	0.1592	0.1592	0%
5 th	0.9082	0.9082	0%

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η αναθεώρηση του ονομαστικού μοντέλου με τρεις παραμέτρους. Η αναθεώρηση γίνεται για την περίπτωση που οι μετρούμενες ιδιομορφές είναι οι πέντε πρώτες που έχουν αναγνωρισθεί. Το παραμετροποιημένο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων περιέχει τρεις παραμέτρους q_1 , q_2 και q_3 . Η πρώτη παράμετρος q_1 περιγράφει την δυσκαμψία του καταστρώματος, η δεύτερη παράμετρος q_2 περιγράφει την δυσκαμψία των πυλώνων και η τρίτη παράμετρος q_3 περιγράφει την δυσκαμψία των ελατηρίων που έχουν τοποθετηθεί στη θεμελίωση της γέφυρας. Οι παράμετροι πολλαπλασιάζουν τις ονομαστικές τιμές των ιδιοτήτων των μοντέλων τις οποίες περιγράφουν, έτσι ώστε το μοντέλο που αντιστοιχεί σε τιμές των παραμέτρων $q_1 = q_2 = q_3 = 1$ να αντιστοιχεί στο ονομαστικό μοντέλο της γέφυρας.

Στον Πίνακα 9 παρουσιάζονται οι βέλτιστες τιμές \hat{q} των παραμέτρων χρησιμοποιώντας ιδιομορφικά δεδομένα από τις μετρούμενες ταλαντώσεις της γέφυρας σε περιβαλλοντικές διεγέρσεις. Με βάση τα αποτελέσματα του Πίνακα 9, η τιμή της δυσκαμψίας των βάθρων M3 και του φορέα είναι σχεδόν όμοιες με τις αρχικές τιμές, ενώ η τιμή για τη δυσκαμψία των ελατηρίων στη βάση της γέφυρας είναι ελάχιστα μικρότερη από αυτή της πάκτωσης (0,97).

Πίνακας 9. Βέλτιστες τιμές \hat{q} των παραμέτρων q

Παράμετρος	Τιμή
Ε φορέα	0.9944
Ε βάθρου	0.9979
Ε ελατηρίων	0.9690

Στον Πίνακα 10 συγκρίνονται οι τιμές των ιδιοσυχνοτήτων που προβλέπονται από το βέλτιστο αναγνωρισμένο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων με τις αντίστοιχες τιμές των μετρούμενων ιδιοσυχνοτήτων, χρησιμοποιώντας δεδομένα από τις πέντε πρώτες μετρούμενες ιδιοσυχνότητες αντίστοιχα. Επίσης δίνονται τα επί τοις εκατό σφάλματα ($\|\Delta\omega\| = (\omega - \hat{\omega})/\hat{\omega}$) μεταξύ των μετρούμενων και των προβλεπόμενων ιδιοσυχνοτήτων.

Πίνακας 10. Μετρούμενες και προβλεπόμενες ιδιοσυχνότητες με τα επί τοις εκατό σφάλματα

Ιδιομορφή	Μετρημένες	Ονομαστικές	Αναθεωρημένες	$\Delta\omega$ %
1 ⁿ	0.1592	0.1592	0.1612	1.2563
2 ⁿ	0.3049	0.3062	0.2992	1.8695
3 ⁿ	0.6232	0.6670	0.6300	1.0911
4 ⁿ	0.6855	0.6738	0.6820	0.5106
5 ⁿ	0.9082	0.9082	0.9061	0.2312

Με βάση τον Πίνακα 9, παρατηρείται ότι το σφάλμα μεταξύ των μετρούμενων και των προβλεπόμενων από το βέλτιστο μοντέλο ιδιοσυχνοτήτων κυμαίνεται από 0.2% έως 1.8%. Τα μικρά σφάλματα στις ιδιοσυχνότητες επιβεβαιώνουν ότι η κατηγορία μοντέλων η οποία επιλέχθηκε επαρκεί για την μοντελοποίηση των πέντε ιδιομορφικών χαρακτηριστικών της γέφυρας τα οποία χρησιμοποιούνται στην αναθεώρηση. Βέβαια αυτό δεν σημαίνει κατ'

ανάγκη ότι το μοντέλο αυτό επαρκεί και για την μοντελοποίηση των ανώτερων ιδιομορφικών χαρακτηριστικών τα οποία δεν συμμετέχουν στην αναθεώρηση. Συνήθως πολύ καλά μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων δίνουν και καλές εκτιμήσεις των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών που δεν συμμετέχουν στην αναθεώρηση.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα της συνδυασμένης οπτικής επιθεώρησης και της ταχείας ενόργανωσης τριών γεφυρών του άξονα της Εγνατίας Οδού, με ένα πολύ μικρό αριθμό αισθητήρων και για μικρής διάρκειας, λίγων ωρών, μετρήσεις της δυναμικής απόκρισης τους σε λειτουργικά φορτία, ή φορτία κατασκευής.

Η προσπάθεια της ακριβέστερης αξιολόγησης της κατάστασης των παλαιών γεφυρών και της αποτίμησης της επιρροής της οπτικής αναγνωρισθείσας βλάβης με την συμπληρωματική χρήση της ταχείας ενόργανης επιθεώρησης, έδωσε πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα και συγκεκριμένα:

- Η ευαισθησία της μεθόδου της παρακολούθησης περιβαλλοντικών ταλαντώσεων (ambient vibrations) στην ύπαρξη βλάβης, είναι σημαντική αφού καταγράφεται στις μετρήσεις και αναγνωρίζεται στην μορφή των ιδιομορφών και στις τιμές των ιδιοσυχνοτήτων.
- Η δυνατότητα των μεθοδολογιών και των σχετικών λογισμικών πακέτων να αναγνωρίσουν τις βασικές ιδιομορφές και να αναθεωρήσουν τα δυναμικά μοντέλα των γεφυρών, δείχνοντας τις παραμέτρους της δομικής ακεραιότητας των γεφυρών που επηρεάζονται από την βλάβη είναι σημαντική και οδηγεί σε βασικά συμπεράσματα ακόμη και για πολύ αραιό κάναβο σημείων, ακόμη και στην περίπτωση απουσίας προηγούμενων μετρήσεων, ακόμη και απουσίας της μελέτης.
- Η ύπαρξη αρχικής μέτρησης στις σημαντικές γέφυρες με την ευκαιρία της παραλαβής τους ή στην αρχή της λειτουργίας τους, πολλαπλασιάζει την αποτελεσματικότητα μίας ταχείας ενόργανης παρακολούθησης και αξιολόγησης της δυναμικής απόκρισης των γεφυρών.

Η προσπάθεια της ενόργανης παρακολούθησης μεγάλων γεφυρών που κατασκευάζονται σε πολλές φάσεις, και ξεπερνούν τις συνήθεις νόρμες μελέτης και κατασκευής, με στόχο την επαλήθευση της συμμόρφωσης με τις μελετητικές παραδοχές, στέφθηκε με ανέλπιστα επιτυχία, εφόσον εντοπίστηκαν όλες οι βασικές ιδιοσυχνότητες και ιδιομορφές της γέφυρας Μετσόβου για αμελητέας έντασης διέγερση, εξ ήπιων κατασκευαστικών δραστηριοτήτων και ασθενούς ανέμου. Επιπλέον αποδείχθηκε μέσω επιτυχούς αναθεώρησης του μοντέλου η συμμόρφωση του φορέα ως προς την αναμενόμενη ακαμψία βάρου και προβόλου, ενώ αναγνωρίστηκε και ο βαθμός πάκτωσης του βάρου που όπως ήταν αναμενόμενο ήταν πάκτωση.

Η ταχεία ενόργανη επιθεώρηση της δυναμικής απόκρισης γεφυρών σε λειτουργικά φορτία, αποδεικνύεται ως μία αξιόπιστη μέθοδος γρήγορης και κυρίως ακριβέστερης αξιολόγησης

των δεδομένων της συμπεριφοράς της γέφυρας, για εκτίμηση της σοβαρότητας της βλάβης τους, του χρόνου και του τύπου επικουρίας τους, αλλά και για την επαλήθευση των μελετητικών παραδοχών από τις φάσεις κατασκευής τους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- CDT - California. Department of Transportation (2000) Element Level Inspection Manual. Sacramento: Engineering Service Center.
- Christodoulou, K., Papadimitriou, C. (2007), "Structural identification based on optimally weighted modal residuals", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21, pp. 4-23.
- COMSOL AB., (2005), *COMSOL Multiphysics User's Guide*. [<http://www.comsol.com/>].
- FHWA - United States. Federal highway Administration. Department of Transportation (2002) "Bridge Inspector's Reference Manual". Volumes I and II.
- FHWA - United States. Federal highway Administration. Department of Transportation (1995) "Recording and Coding Guide for the Structure Inventory and Appraisal of the Nation's Bridge"
- Karakostas Ch., Lekidis V., Salonikios T., Makarios T., Sous I., Papadimitriou C., Karamanos S., Christodoulou K. and Panetsos P. (2006), "Structural Identification of Bridges Based on Ambient Vibration Measurements", *Proceedings of the 1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Geneva, September 3-8, (CD-Rom, paper no.1263).
- Ntotsios E., (2008), "Experimental modal analysis using ambient and earthquake vibrations: Theory, Software and Applications", MS Thesis Report No. SDL-08-1, *Department of Mechanical and Industrial Engineering*, University of Thessaly.
- Παπαδημητρίου Κ., Ντότσιος Ε., Νικολάου Ι. (2008), "Αναγνώριση Μοντέλων Κατασκευών βάσει Μετρήσεων των Ταλαντώσεων σε Περιβαλλοντικές και Σεισμικές Διεγέρσεις", *Πρακτικά 3^{ου} Πανελληνίου Συνέδριου Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας*, Αθήνα, 5-7 Νοεμβρίου, αρ. εργασίας 2017
- Papadimitriou C., Ntotsios E., Christodoulou K., Karamanos S., Panetsos P., Karakostas Ch., and Lekidis V. (2007), "Bridge monitoring system based on vibration measurements", *Proceedings of Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPDYN2007)*, Rethymno, Greece, June 13-16, paper No. 1224.
- Panetsos P., Lambropoulos S., (2006), "Bridge Health Monitoring for Egnatia Odos Bridge Management System"., *Proceedings of the 3rd European Workshop on Structural Health Monitoring*, Granada, Spain, July 5-7, (CD-Rom).
- Πανέτσος Π., Μπάρμπα Ζωή, κ.α., (2006), «Αναλυτικό εγχειρίδιο οπτικής επιθεώρησης γεφυρών», Παραδοτέο της Ε.Ο.Α.Ε. στο ερευνητικό πρόγραμμα «ΑΣΠΡΟΓΕ»
- Πανέτσος Π., Ρεντζεπέρης Ι., Δεληβόπουλος Ι., (2006), «Μεθοδολογία ποσοτικής αποτίμησης και ομοιογενοποίησης της βαθμολογίας της φθοράς των γεφυρών», Παραδοτέο της Ε.Ο.Α.Ε. στο ερευνητικό πρόγραμμα «ΑΣΠΡΟΓΕ»
- SAP2000 NL Version 11. Structural Analysis Program Computers & Science Inc. 1995 Univ. Avenue, CA, USA
- Statik-5, Cubus AG, Structural Analysis Program , Eggbühlstrasse 14, Postfach, CH-8052 Zürich