

Αποτίμηση Δυναμικών Χαρακτηριστικών Γεφυρών της Εγνατίας Οδού με Βάση την Απόκρισή τους σε Δυναμικές Διεγέρσεις

Assessment of Dynamic Characteristics of Bridges on Egnatia Motorway Based on their Response to Dynamic Excitations

Χρήστος ΚΑΡΑΚΩΣΤΑΣ¹, Βασίλης ΛΕΚΙΔΗΣ², Κώστας ΠΑΠΑΔΗΜΗΤΡΙΟΥ³,
Παναγιώτης ΠΑΝΕΤΣΟΣ⁴, Ευάγγελος ΝΤΟΤΣΙΟΣ⁵, Θωμάς ΣΑΛΟΝΙΚΙΟΣ⁶,
Τριαντάφυλλος ΜΑΚΑΡΙΟΣ⁷, Ιωάννης ΝΙΚΟΛΑΟΥ⁸, Ισάμ ΣΟΥΣ⁹

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η ενοργάνωση δύο γεφυρών της Εγνατίας Οδού με ειδικά συστήματα επιταχυνσιογράφων με στόχο τον προσδιορισμό των δυναμικών τους χαρακτηριστικών με βάση την καταγραμμένη απόκριση τους σε περιβαλλοντικά ή άλλα αίτια. Παρουσιάζονται αναλυτικά τα δομικά συστήματα των ενοργανωμένων γεφυρών και οι απαιτούμενες εργασίες υποδομής για την υλοποίηση των ενοργανώσεων με τον βέλτιστο δυνατό τρόπο. Από τις καταγραφές της απόκρισης των γεφυρών και με τη χρήση κατάλληλης μεθοδολογίας και λογισμικού που αναπτύχθηκε από την ερευνητική ομάδα, καθίσταται δυνατός ο προσδιορισμός των πραγματικών δυναμικών χαρακτηριστικών (ιδιοτιμών, ιδιομορφών, συντελεστών απόσβεσης) των έργων κατά τη φάση λειτουργίας τους.

ABSTRACT : The instrumentation of two bridges on Egnatia Motorway with special accelerometer arrays is presented, aiming towards the identification of their dynamic characteristics based on their recorded response to environmental and other types of dynamic excitations. The structural systems of the bridges are described in detail, as well as all the necessary infrastructure in order to assure an optimal instrumentation procedure. Based on the recorded response, and using a suitable methodology and software also developed by the research team, it was possible to identify the actual dynamic characteristics (eigenvalues, eigenvectors, damping ratios) of the bridges under typical operating conditions.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

¹ Διευθυντής Ερευνών, Ινστιτούτο Τεχνικής Σεισμολογίας & Αντισεισμικών Κατασκευών, email: christos@itsak.gr

² Διευθυντής Ερευνών, Ινστιτούτο Τεχνικής Σεισμολογίας & Αντισεισμικών Κατασκευών, email: lekidis@itsak.gr

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

⁴ Δρ. Πολ. Μηχ. Α.Π.Θ., Τμηματάρχης Τακτ. Συντήρησης Μεγ. Τεχν. Έργων, Εγνατία Οδός Α.Ε., email: ppane@egnatia.gr

⁵ Υποψήφιος Διδάκτωρ, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

⁶ Κύριος Ερευνητής, Ινστιτούτο Τεχνικής Σεισμολογίας & Αντισεισμικών Κατασκευών, email: salonikios@itsak.gr

⁷ Εντεταλμένος Ερευνητής, Ινστιτούτο Τεχνικής Σεισμολογίας & Αντισεισμικών Κατασκευών, email: makarios@itsak.gr

⁸ Μεταπτυχιακός φοιτητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

⁹ Ερευνητής, Ινστιτούτο Τεχνικής Σεισμολογίας & Αντισεισμικών Κατασκευών, email: sous@teiser.gr

Η παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς των γεφυρών με τη βοήθεια ειδικών δικτύων επιταχυνσιογράφων συμβάλλει αποτελεσματικά στην κατανόηση της πραγματικής δυναμικής τους συμπεριφοράς και στον ρόλο των διαφόρων παραγόντων που την επηρεάζουν. Οι πειραματικές διερευνήσεις του είδους αυτού σε υπάρχουσες πραγματικές γέφυρες που έχουν ενοργανωθεί κατάλληλα, είναι απαλλαγμένες από τις απλοποιητικές παραδοχές, περιορισμούς και λάθη που αναπόφευκτα υπεισέρχονται στα εργαστηριακά πειράματα σε μοντέλα υπό κλίμακα. Από την καταγραμμένη απόκριση είναι δυνατός ο προσδιορισμός των δυναμικών χαρακτηριστικών (ιδιοτιμών, ιδιομορφών, συντελεστών απόσβεσης) με τη χρήση κατάλληλων μεθοδολογιών. Οι διεγέρσεις σε μία γέφυρα μπορεί να έχουν είτε ντετερμινιστικό χαρακτήρα (π.χ. τεχνητά επιβαλλόμενες διεγέρσεις, σεισμός) είτε τυχηματικό (περιβαλλοντικές διεγέρσεις όπως άνεμος και κυκλοφορία οχημάτων). Ο πειραματικός προσδιορισμός των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών μιας ενοργανωμένης γέφυρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για την σε τακτά χρονικά διαστήματα αποτίμηση της δομικής της κατάστασης (στο πλαίσιο ενός προγράμματος συντήρησης), είτε μπορεί να εφαρμοσθεί και μετά από ένα έκτακτο γεγονός (π.χ. ισχυρός σεισμός) με στόχο τον εντοπισμό σημαντικών αλλαγών των δυναμικών χαρακτηριστικών που μπορεί να αποτελούν ένδειξη εμφάνισης βλάβης. Σε δεύτερο επίπεδο, τα πειραματικά προσδιορισμένα πραγματικά ιδιομορφικά χαρακτηριστικά μιας γέφυρας μπορούν να χρησιμεύσουν ως βάση για την κατάλληλη προσαρμογή αναλυτικών προσομοιωμάτων της γέφυρας, με στόχο την πιο αξιόπιστη πρόβλεψη της πραγματικής της συμπεριφοράς σε μελλοντικές διεγέρσεις.

Το Ινστιτούτο Τεχνικής Σεισμολογίας και Αντισεισμικών Κατασκευών (ΙΤΣΑΚ), ήδη από το 1994 έχει ενοργανώσει με κατάλληλο μόνιμο δίκτυο επιταχυνσιογράφων την Υψηλή Καλωδιωτή Γέφυρα της Χαλκίδας για την παρακολούθηση της δυναμικής της συμπεριφοράς (Lekidis et al. 2005, Καρακώστας κ.α. 2006). Επίσης, τα τελευταία χρόνια το ΙΤΣΑΚ, σε συνεργασία με το τμήμα Τακτικής Συντήρησης Μεγάλων Τεχνικών Έργων της Εγνατίας Οδού ΑΕ και το Εργαστήριο Δυναμικής Συστημάτων του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας έχει προχωρήσει στην ενοργάνωση με ειδικά δίκτυα επιταχυνσιογράφων και τη συστηματική παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς δύο γεφυρών της Εγνατίας Οδού (2^η Χαραδρογέφυρα παράκαμψης Καβάλας και η γέφυρα Γ9, θέση 5.1 – Πολύμυλος) (Lekidis et al. 2004, Karakostas et al. 2006, Panetsos et al. 2006, Papadimitriou et al., 2007). Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα πρόσφατα αποτελέσματα της διερεύνησης της δυναμικής συμπεριφοράς των δύο ενοργανωμένων γεφυρών με βάση την καταγραφές της απόκρισης τους και τη χρήση κατάλληλης μεθοδολογίας αναγνώρισης των δυναμικών χαρακτηριστικών που αναπτύχθηκε από το Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας. Τα πειραματικώς προσδιορισμένα ιδιομορφικά χαρακτηριστικά των δύο γεφυρών συγκρίνονται κατόπιν με αυτά αναλυτικών προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων (που αντιστοιχούν με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν για το σχεδιασμό των γεφυρών) και γίνεται μία εκτενής διερεύνηση των παρατηρούμενων διαφορών μεταξύ αναλυτικών και πειραματικών αποτελεσμάτων και των αιτιών στα οποία αυτές οφείλονται.

ΕΝΟΡΓΑΝΩΣΗ ΓΕΦΥΡΩΝ ΤΗΣ ΕΓΝΑΤΙΑΣ ΟΔΟΥ

Σύμφωνα με τους στόχους του προγράμματος ΑΣΠΡΟΓΕ, κατά τον πρώτο χρόνο του προγράμματος έγινε η επιλογή δύο αντιπροσωπευτικών από δομικής πλευράς οδογεφυρών της Εγνατίας οδού οι οποίες και ενοργανώθηκαν με ειδικά δίκτυα επιταχυνσιογράφων. Η επιλογή των γεφυρών έγινε κατόπιν στενής συνεργασίας των συμμετεχόντων φορέων Εγνατία Οδός ΑΕ (ΕΟΑΕ), Ινστιτούτου Τεχνικής Σεισμολογίας και Αντισεισμικών Κατασκευών (ΙΤΣΑΚ) και Πανεπιστημίου Θεσσαλίας (Π.Θ.).

Η τελική επιλογή των δύο γεφυρών από το σύνολο της Εγνατίας Οδού έγινε με βάση τα παρακάτω κύρια κριτήρια επιλογής :

- Είδος του δομικού συστήματος (φορέας στηριζόμενος μέσω εφεδράνων στα βάθρα/μονολιθικά συνδεδεμένος στα βάθρα φορέας)
- Αντιπροσωπευτικότητα του δομικού συστήματος και της μεθόδου κατασκευής του (ύπαρξη περισσότερων γεφυρών με το ίδιο σύστημα και κατασκευασμένες με προκατασκευή ή με προβολοδόμηση.
- Συμμετρία στην κατανομή μάζας – ακαμψίας και περιορισμένο μήκος γέφυρας, παράγοντες που διασφαλίζουν την προβλέψιμη συμπεριφορά των φορέων και δεν απαιτούν μεγάλο αριθμό αισθητήρων.
- Δυνατότητα πρόσβασης στην ανωδομή και στις βάσεις των πυλώνων / ακροβάθρων.
- Δυνατότητα υλοποίησης απαιτούμενων έργων υποδομής για την ενοργάνωση (δυνατότητα παροχής ρεύματος, επικοινωνίας κλπ).
- Σεισμική επικινδυνότητα της περιοχής του έργου.

Μετά από διάφορες επισκέψεις της ερευνητικής ομάδας σε διάφορες υποψήφιες γέφυρες, τελικά επιλέχθηκαν να ενοργανωθούν, ως πλέον κατάλληλες, η 2^η Χαραδρογέφυρα παράκαμψης Καβάλας και η γέφυρα Γ9 (θέση 5.1 – Πολύμυλος) (οι θέσεις τους σημειώνονται με πορτοκαλί κύκλους στο Σχήμα 1).



Σχήμα 1. Θέση των ενοργανωθείσων γεφυρών της Εγνατίας Οδού

ΕΝΟΡΓΑΝΩΣΗ 2^{ΗΣ} ΧΑΡΑΔΡΟΓΕΦΥΡΑΣ ΠΑΡΑΚΑΜΨΗΣ ΚΑΒΑΛΑΣ (Γ2)

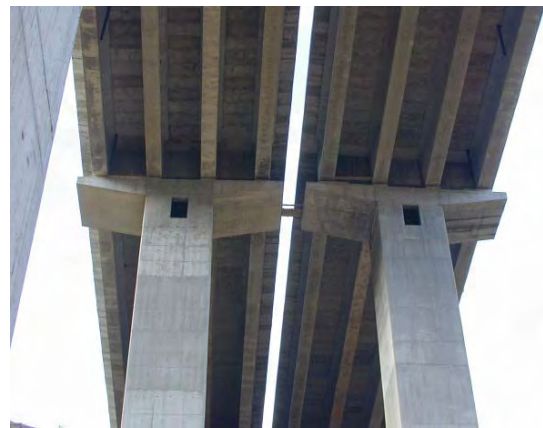
Η γέφυρα Γ2 ευρίσκεται στην Εγνατία οδό, στο τμήμα παράκαμψης της Καβάλας. Ένας από τους κύριους παράγοντες που οδήγησε την ερευνητική ομάδα στην επιλογή της συγκεκριμένης γέφυρας είναι ότι το δομικό της σύστημα είναι το πλέον αντιπροσωπευτικό μεταξύ των δομικών τύπων των γεφυρών της Εγνατίας Οδού αλλά και γενικότερα των ελληνικών αυτοκινητοδρόμων, και επομένως η διερεύνηση της δυναμικής του συμπεριφοράς αποκτά ιδιαίτερη σημασία για την ΕΟΑΕ.

Δομικό σύστημα 2^{ης} χαραδρογέφυρας παράκαμψης Καβάλας (Γ2)

Η 2η Χαραδρογέφυρα παράκαμψης Καβάλας έχει δύο όμοιους, αλλά στατικώς ανεξάρτητους κλάδους (έναν ανά κατεύθυνση), εκ των οποίων ενοργανώθηκε ο δεξιός κλάδος κίνησης των οχημάτων από δυτικά προς ανατολικά (κλάδος Ηγουμενίτσας προς Κήπους).



(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχήμα 2. 2η Χαραδρογέφυρα παράκαμψης Καβάλας (α) Όψη (β) Άνοψη των δύο κλάδων (γ) στήριξη κυρίων δοκών στις δοκούς έδρασης των μεσοβάθρων μέσω ελαστομεταλλικών εφεδράνων (δ) κατάστρωμα γέφυρας και αρμός διαστολής στη θέση του ακροβάθρου.

Ο ενοργανωμένος κλάδος αποτελείται από τέσσερα ανοίγματα, στηριζόμενα σε τρία μεσόβαθρα και δύο ακρόβαθρα (Σχήμα 2α). Η γέφυρα είναι ευθεία σε κάτοψη, ενώ παρουσιάζει κλίση στη διαμήκη διεύθυνση. Το κάθε άνοιγμα διαμορφώνεται από 4 προκατασκευασμένες, προεντεταμένες δοκούς διατομής I, ανοίγματος 45 m (Σχήμα. 2β), κάθε μία εκ των οποίων στηρίζεται στα δύο της άκρα με ελαστομεταλλικά εφέδρανα στις δοκούς έδρασης - κεφαλές των βάθρων (Σχήμα 2γ) και στα ακρόβαθρα. Τα τέσσερα ανοίγματα συνδέονται με επί τόπου σκυροδετούμενη πλάκα καταστρώματος η οποία συνεχίζει χωρίς αρμό άνωθεν των μεσοβάθρων, διαμορφώνοντας συνεχές κατάστρωμα μήκους 170 περίπου μέτρων, ενώ υπάρχουν αγκυρούμενοι ελαστομεταλλικοί αρμοί διαστολής στα δύο άκρα, στις περιοχές στήριξης στα ακρόβαθρα (Σχήμα 2δ). Στις δοκούς έδρασης - κεφαλές των μεσοβάθρων έχουν επίσης διαμορφωθεί ειδικοί σεισμικοί σύνδεσμοι (stoppers) οι οποίοι έχουν σχεδιασθεί να ενεργοποιούνται μετά την υπέρβαση τμήματος της συνολικής σεισμικής δράσης σχεδιασμού, τόσο κατά τη διαμήκη, όσο και κατά την εγκάρσια διεύθυνση. Τα μεσόβαθρα είναι κοίλα, τετραγωνικής κιβωτιοειδούς διατομής, και έχουν κατασκευασθεί με επιτόπου έγχυση (τεχνική ολισθαίνοντος ξυλοτύπου), ενώ θεμελιώνονται με φρέατα στο βραχώδες υπόβαθρο. Σημειώνεται ότι οι προκατασκευασμένες δοκοί της 2ης χαραδρογέφυρας Παράκαμψης Καβάλας έχουν το μεγαλύτερο κατασκευασμένο μήκος ανοίγματος για το δεδομένο τύπο γέφυρας και για τη δεδομένη ποιότητα αντοχής σκυροδέματος (B35).

Ενοργάνωση 2^{ης} χαραδρογέφυρας παράκαμψης Καβάλας (Γ2)

Για την ενοργάνωση της γέφυρας χρησιμοποιήθηκε κινητό σύστημα καταγραφής της απόκρισης (σύστημα επιταχυνσιογράφων) που απέκτησε η ΕΟΑΕ και το οποίο τοποθετήθηκε και λειτουργεί επί μονίμου βάσεως από τον Φεβρουάριο του 2005 έως και σήμερα. Οι προδιαγραφές του συστήματος καθορίστηκαν από την ΕΟΑΕ σε στενή συνεργασία με το ΙΤΣΑΚ. Το αποκτηθέν σύστημα ενοργάνωσης είναι της εταιρείας Kinematics Inc. Αποτελείται από 4 καταγραφικές μονάδες υψηλής ανάλυσης τύπου Kinematics K2 (19 bits), η κάθε μία από τις οποίες υποστηρίζει μέχρι 12 αισθητήρες (επιταχυνσιόμετρα) τύπου Episensor. Υπάρχει η δυνατότητα διασύνδεσης των καταγραφικών μονάδων, έτσι ώστε σε πλήρη σύνθεση υποστηρίζονται μέχρι 48 αισθητήρες.

Η δομή του συστήματος επιτρέπει τη διάσπαση του σε επιμέρους συστήματα (π.χ. δύο συστήματα των 24 αισθητήρων) για την ταυτόχρονη χρήση τους σε διαφορετικές γέφυρες, ενώ παράλληλα είναι ιδιαίτερα εύκολη η περαιτέρω επέκταση του με την απόκτηση πρόσθετων καταγραφικών μονάδων. Το σύστημα στηρίζεται στην ηλεκτρονική αποθήκευση και άντληση της πληροφορίας, με σύγχρονο λογισμικό που παρέχει δυνατότητες γραφικών απεικονίσεων των κυματομορφών. Άλλα χαρακτηριστικά του συστήματος συμπεριλαμβάνουν τον κοινό χρόνο εκκίνησης, την κοινή διέγερση για όλα τα αισθητήρια, και τη δυνατότητα καθορισμού της έναρξης καταγραφής (trigger) με πολλαπλούς τρόπους (π.χ. με εξωτερική εντολή, ή αυτόματα, όταν σε κάποια προκαθορισμένα από το χρήστη αισθητήρια, η διέγερση υπερβεί κάποια επίσης προκαθορισμένη τιμή). Η κάθε καταγραφική μονάδα είναι επίσης εφοδιασμένη με μονάδα χρόνου GPS, καθώς και modem κινητής τηλεφωνίας (GSM/GPRS), το οποίο επιτρέπει την τηλεματική παρακολούθηση της λειτουργικής κατάστασης του συστήματος και τη ρύθμιση των σχετικών παραμέτρων.



(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχήμα 3. 2η Χαραδρογέφυρα παράκαμψης Καβάλας - εκτελεσθέντα έργα υποδομής : (α) Μεταλλικός κλωβός προστασίας καταγραφικής μονάδας και κυτίο ρευματοληψίας. Διακρίνεται επίσης η κεραία GPS (β) Κυτίο ρευματοληψίας και αισθητήρας μέτρησης (γ), (δ) πλατφόρμα πρόσβασης στην κορυφή του πυλώνα

Παράλληλα με τις διαδικασίες απόκτησης του συστήματος ενοργάνωσης από την ΕΟΑΕ, υλοποιήθηκαν στη 2η Χαραδρογέφυρα παράκαμψης Καβάλας τα απαιτούμενα έργα υποδομής για την ενοργάνωση. Η υλοποίησή τους έγινε από τη Θεμελιοδομή ΑΕ, κατόπιν σχετικών οδηγιών από το ΙΤΣΑΚ και την ΕΟΑΕ, και περιελάμβαναν, μεταξύ άλλων, τη δημιουργία προστατευτικών μεταλλικών κλωβών για τα καταγραφικά συστήματα (Σχήμα 3α), και τη δημιουργία θέσεων ρευματοληψίας σε κατάλληλες θέσεις (Σχήμα 3α,β). Για την επιτυχή παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς της γέφυρας ήταν απαραίτητη η τοποθέτηση αισθητήρων και στις δοκούς έδρασης των μεσοβάθρων, στις θέσεις στήριξης των κυρίων δοκών του καταστρώματος μέσω ελαστομεταλλικών εφεδράνων, η πρόσβαση στις οποίες αρχικά δεν ήταν άμεσα εφικτή. Για το λόγο αυτό κατασκευάστηκαν επίσης, έπειτα από σχετική μελέτη από το ΙΤΣΑΚ, τρεις ειδικές μεταλλικές πλατφόρμες που επιτρέπουν την ασφαλή πρόσβαση από το επίπεδο του καταστρώματος στην κορυφή του κάθε πυλώνα (θέσεις εφεδράνων) (Σχήμα 3γ,δ).



(α)



(β)



(γ)



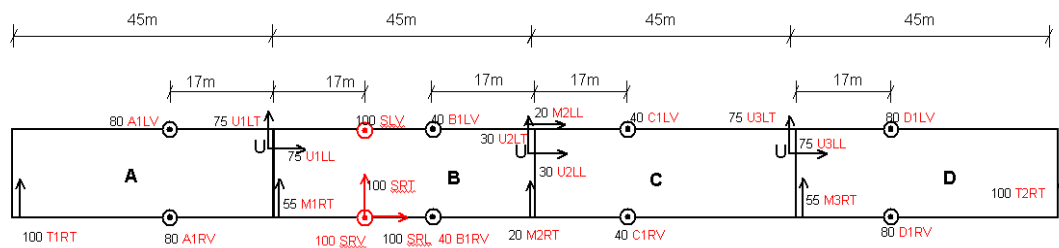
(δ)

Σχήμα 4. 2^η Χαραδρογέφυρα παράκαμψης Καβάλας – σύστημα ενοργάνωσης (α) Καταγραφική μονάδα (‘δεξιά’ πλευρά) (β) αισθητήριο επί του διαχωριστικού New Jersey (‘αριστερή’ πλευρά) (γ) αισθητήριο επί του πεζοδρομίου (‘δεξιά’ πλευρά) (δ) τοποθέτηση αισθητήρων στην κεφαλή των μεσοβάθρων. Διακρίνεται επίσης ο υφιστάμενος σεισμικός σύνδεσμος (stopper)

Από την ερευνητική ομάδα, και με δεδομένα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και διαστάσεις της γέφυρας, κρίθηκε ότι επαρκούσε για την πλήρη παρακολούθηση της η ενοργάνωση της με χρήση 24 αισθητήρων που θα υποστηρίζονται από 2 καταγραφικές μονάδες Kinematics K2. Στο μέσο του συνολικού ανοίγματος και σε κάθε πλευρά της γέφυρας εγκαταστάθηκε μία καταγραφική μονάδα (Σχήμα 4α), και υλοποιήθηκε μεταξύ τους σύνδεση με ειδικό καλώδιο για την επίτευξη κοινής εκκίνησης εγγραφής (common start) όλων των αισθητήρων. Στη μία (‘δεξιά’, σύμφωνα με την κίνηση των οχημάτων) πλευρά της γέφυρας, όπου υπήρχε πεζοδρόμιο, οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν σε αυτό (Σχήμα 4γ), ενώ στην άλλη (‘αριστερή’) πλευρά, η τοποθέτηση τους έγινε στο κάτω μέρος (στο ύψος του καταστρώματος) της εξωτερικής πλευράς του υφιστάμενου διαχωριστικού New Jersey (Σχήμα 4β). Όπως προαναφέρθηκε, η κατασκευή των μεταλλικών πλατφορμών πρόσβασης, επέτρεψε την τοποθέτηση αισθητήρων και στην κεφαλή των μεσοβάθρων με στόχο την αποσαφήνιση της λειτουργίας των ελαστομεταλλικών εφεδράνων (Σχήμα 4δ). Λόγω των αντίξοων καιρικών

συνθηκών κατά τη διάρκεια του χειμερινών μηνών (χαμηλές θερμοκρασίες, παγετός, χιονοπτώσεις και χρήση άλατος για αντιπαγετικούς λόγους στο κατάστρωμα της γέφυρας) επιδιώχθηκε πρόσθετη προστασία των αισθητηρίων με την κάλυψη τους με πρόσθετα κυττάρια από πλαστικό υλικό.

Η διάταξη που προκρίθηκε τελικά φαίνεται στο Σχήμα 5, στοχεύει δε στην παρακολούθηση της απόκρισης της γέφυρας με βάση την καταγραφή της διέγερσης της από περιβαλλοντικά αίτια (ambient excitations - κυρίως κυκλοφορία οχημάτων).



Σχήμα 5. Διάταξη ενοργάνωσης 2ης Χαραδορόγέφυρας παράκαμψης Καβάλας . Η κίνηση των οχημάτων γίνεται από αριστερά προς τα δεξιά (κατεύθυνση από Καβάλα προς Ξάνθη).

Τόσο κατά την εγκατάσταση των συστημάτων παρακολούθησης, όσο και κατά τις τακτικές επιτόπου επισκέψεις για τη συντήρηση των οργάνων και τη επιτόπου λήψη καταγραφών από κυκλοφοριακές διεγέρσεις, ελαμβάνοντο όλα τα απαραίτητα μέτρα ασφαλείας τόσο για τα κινούμενα οχήματα όσο και για το επιτόπου ευρισκόμενο προσωπικό. Μεταξύ αυτών αναφέρεται η τοποθέτηση σημάτων μείωσης ταχύτητας, κορίνων και σημάτων εκτροπής της κυκλοφορίας, η προληπτική τοποθέτηση οχήματος με alarm εντός του αποκλεισμένου από κορίνες διαδρόμου και πριν από το σημείο όπου διεξάγοντο οι εργασίες, η χρήση φωσφοριζουσών τζάκετ από το προσωπικό κλπ. (Σχήμα 6).



Σχήμα 6. Μέτρα ασφαλείας κατά τη διάρκεια των εργασιών στη γέφυρα.

Στη θέση της γέφυρας, δίπλα στο πύλαρ ρύθμισης της τροφοδοσίας του ηλεκτροφωτισμού υπάρχει μονάδα μέτρησης θερμοκρασίας εξωτερικού αέρα, σε θέση λίγα μέτρα ψηλότερα από την στάθμη του καταστρώματος της γέφυρας, που κάθε ώρα καταγράφει την θερμοκρασία.

ΕΝΟΡΓΑΝΩΣΗ ΓΕΦΥΡΑΣ Γ9 (ΘΕΣΗ 5.1 – ΠΟΛΥΜΥΛΟΣ)

Η γέφυρα ευρίσκεται στην Εγνατία οδό, στο τμήμα Πολύμυλος - Λευκόπετρα. Ένας από τους κύριους παράγοντες που οδήγησε την ερευνητική ομάδα στην επιλογή της συγκεκριμένης γέφυρας είναι το ότι ανήκει στο δεύτερο πιο αντιπροσωπευτικό τύπο γεφυρών της ΕΟΑΕ, κατασκευασμένη με τη μέθοδο της προβολοδόμησης. Το μήκος της εν προβόλω δόμησης των 85 περίπου μέτρων, θεωρείται από τα πιο μεγάλα αυτού του δομικού τύπου στην ΕΟ (μέγιστος πρόβολος που έχει κατασκευασθεί μέχρι σήμερα στην ΕΟΑΕ είναι περίπου 110 μέτρα, ενώ στην πλειονότητα των γεφυρών αυτού του τύπου είναι μήκους 55 – 60 μέτρα). Η απλότητα του φορέα που είναι στην ουσία ένα T πακτωμένο στο βραχώδες έδαφος θεμελίωσης έχοντας συμμετρικώς κατανεμημένη μάζα και δυσκαμψία, το μικρό για τον συγκεκριμένο δομικό τύπο συνολικό μήκος της γέφυρας, καθώς και ο ιδιαίτερα ενδιαφέρων δομικός τύπος του πυλώνα (με λεπίδες), που είναι από τους σχετικά νέους που απαντώνται σε γέφυρες της Εγνατίας Οδού και του Ελληνικού χώρου γενικότερα, ήταν επίσης λόγοι επιλογής.

Δομικό σύστημα γέφυρας Γ9 (θέση 5.1 – Πολύμυλος)

Ο φορέας της γέφυρας, μορφής T, αποτελείται από φορέα κιβωτιοειδούς διατομής παραβολικώς μεταβαλλόμενου ύψους, συνολικού μήκους 170 m (δύο πρόβολοι των 85 m), ο οποίος συνδέεται μονολιθικά με τον κεντρικό πυλώνα. Ο φορέας είναι κυκλικός σε κάτοψη, ενώ παρουσιάζει σημαντική κλίση (περίπου 5%) κατά μήκος του άξονα του, και κατά την εγκάρσια έννοια λόγω καμπύλης (Σχήμα 7).

Ο κεντρικός πυλώνας εδράζεται στη βάση του σε συμπαγές ορθογωνικό κιβωτιοειδές φρέαρ, και κατόπιν συνεχίζει καθ' ύψος με τη μορφή δύο ολόσωμων εγκάρσιων λεπίδων, οι οποίες συνδέονται μονολιθικά με το κατάστρωμα. Η στήριξη του φορέα της ανωδομής στα ακρόβαθρα γίνεται μέσω ειδικού τύπου εφεδράνων, τα οποία επιτρέπουν την ελεύθερη κίνηση (ολίσθηση) κατά μήκος του διαμήκη άξονα της γέφυρας (για παραλαβή των θερμοκρασιακών συστολοδιαστολών), ενώ λειτουργούν ως ελαστομεταλλικά κατά την εγκάρσια έννοια. Σημειώνεται ότι τα εφεδράνα αυτά λειτουργούν ως ελαστομεταλλικά και στη διαμήκη έννοια έως την υπέρβαση της στατικής ή της δυναμικής, αναλόγως της φόρτισης, τριβής μεταξύ φορέα και επιφάνειας TEFLON του εφεδράνου. Και αυτή η γέφυρα είναι διπλού κλάδου (ένας ανά κατεύθυνση), εκ των οποίων ενοργανώθηκε ο κλάδος, κίνησης των οχημάτων από ανατολικά προς δυτικά (κλάδος από Βέροια προς Κοζάνη).



(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχήμα 7. Γέφυρα Πολυμύλου (Γ9) (α), (β) Όψεις (γ) άνοψη των δύο κλάδων (δ) ακρόβαθρο ενός κλάδου

Ενοργάνωση γέφυρας Γ9 (θέση 5.1 – Πολύμυλος)

Για την ενοργάνωση της γέφυρας χρησιμοποιήθηκε το κινητό σύστημα καταγραφής της απόκρισης (σύστημα επιταχυνσιογράφων) της ΕΟΑΕ που περιγράφηκε προηγουμένως. Παράλληλα με τις διαδικασίες απόκτησης του συστήματος ενοργάνωσης από την ΕΟΑΕ, υλοποιήθηκαν στη γέφυρα Γ9 τα απαιτούμενα έργα υποδομής για την ενοργάνωση. Η υλοποίησή τους έγινε από την Θεμελιοδομή ΑΕ, κατόπιν σχετικών οδηγιών από το ΙΤΣΑΚ και την ΕΟΑΕ, και περιελάμβαναν, μεταξύ άλλων, τη δημιουργία θέσεων ρευματοληψίας σε κατάλληλες θέσεις, τη δημιουργία προστατευτικών μεταλλικών κλωβών για τα καταγραφικά συστήματα (Σχήμα 8α) καθώς επίσης και την κατασκευή ειδικής μεταλλικής πλατφόρμας, η οποία τοποθετήθηκε στο διάκενο μεταξύ των δύο στατικώς ανεξάρτητων κλάδων, για την εγκατάσταση σε αυτή της μίας καταγραφικής μονάδας (Σχήμα 8β).

Με δεδομένα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και διαστάσεις της γέφυρας, κρίθηκε ότι επαρκούσε για την πλήρη παρακολούθηση της η χρήση 24 αισθητήρων που θα υποστηρίζονται από 2 καταγραφικές μονάδες Kinematics K2. Στο μέσο του συνολικού ανοίγματος (στη θέση του κεντρικού πυλώνα) και σε κάθε πλευρά της γέφυρας εγκαταστάθηκε από μία καταγραφική μονάδα (Σχήμα 8α,β), και υλοποιήθηκε μεταξύ τους σύνδεση με ειδικό καλώδιο για την επίτευξη κοινής εκκίνησης εγγραφής (common start) όλων των αισθητήρων.



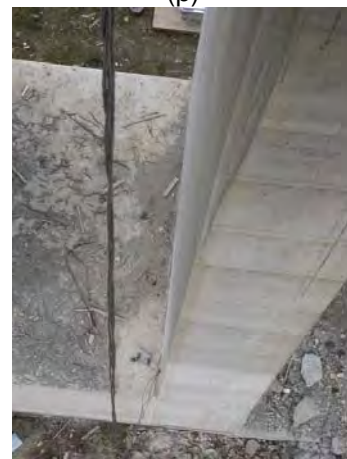
(α)



(β)



(γ)

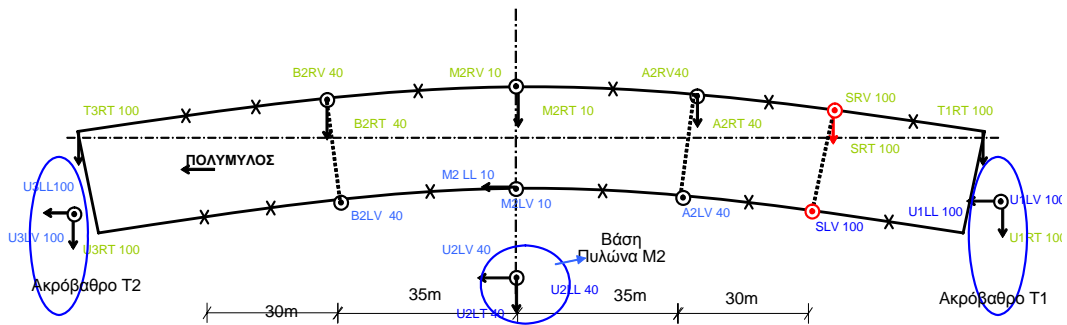


(δ)

Σχήμα 8. Γέφυρα Πολυμύλου (Γ9) – σύστημα ενοργάνωσης (α) Καταγραφικές μονάδες στη ‘δεξιά’ πλευρά της γέφυρας (β) Μεταλλική πλατφόρμα στην ‘αριστερή’ πλευρά της γέφυρας και καταγραφική μονάδα (γ) αισθητήρες στη θέση έδρασης σε ακρόβαθρο (δ) αισθητήρες στη βάση του κεντρικού πυλώνα

Η διάταξη ενοργάνωσης που προκρίθηκε τελικά φαίνεται στο Σχήμα 9, στοχεύει δε στην παρακολούθηση της απόκρισης της γέφυρας τόσο σε διεγέρσεις από περιβαλλοντικά αίτια (ambient excitations - κυρίως κυκλοφορία οχημάτων), όσο και από τυχόν σεισμική διέγερση (με την τοποθέτηση αισθητήρων και στη βάση του κεντρικού πυλώνα). Κατά τη διάρκεια της παρακολούθησης της γέφυρας δεν υπήρξε ισχυρή σεισμική διέγερση στην ευρύτερη περιοχή. Από το σύστημα, καταγράφηκε στις 21/2/2007 μία σχετικά ασθενής σεισμική δόνηση μεγέθους $M=4.6$ σε απόσταση περί τα 30 km ΒΑ του έργου. Όμως λόγω του μικρού μεγέθους του σεισμού, η διέγερση της γέφυρας ήταν μικρότερη και από αυτή λόγω του συνήθους κυκλοφοριακού φόρτου, και δεν προέκυψαν διαφορετικές πληροφορίες για τα

δυναμικά χαρακτηριστικά της γέφυρας από αυτές που είχαν ήδη εξαχθεί από τις διεγέρσεις λόγω κυκλοφορίας, και οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω.



Σχήμα 9 Διάταξη ενοργάνωσης γέφυρας Πολυμύλου (Γ9) . Η κίνηση των οχημάτων γίνεται από δεξιά προς τα αριστερά (κατεύθυνση από Βέροια προς Πολύμυλο).

ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΕΝΟΡΓΑΝΩΜΕΝΩΝ ΓΕΦΥΡΩΝ

Από τα μέλη της ερευνητικής ομάδας Εργαστηρίου Δυναμικής Συστημάτων του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας αναπτύχθηκε κατάλληλη μεθοδολογία και αντίστοιχο λογισμικό αναγνώρισης ιδιομορφικών χαρακτηριστικών γεφυρών βάσει μετρήσεων της δυναμικής τους απόκρισης σε διάφορες διεγέρσεις. Στις ιδιομορφικές παραμέτρους περιλαμβάνονται οι ιδιοσυχνότητες, οι συντελεστές απόσβεσης και οι συνιστώσες των ιδιομορφών στα σημεία μέτρησης της κατασκευής. Αναπτύχθηκαν μεθοδολογίες αναγνώρισης για : (α) ταλαντώσεις σε λειτουργικά φορτία (κυκλοφορία οχημάτων και φορτία ανέμου) και (β) ταλαντώσεις σε σεισμικά φορτία. 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.

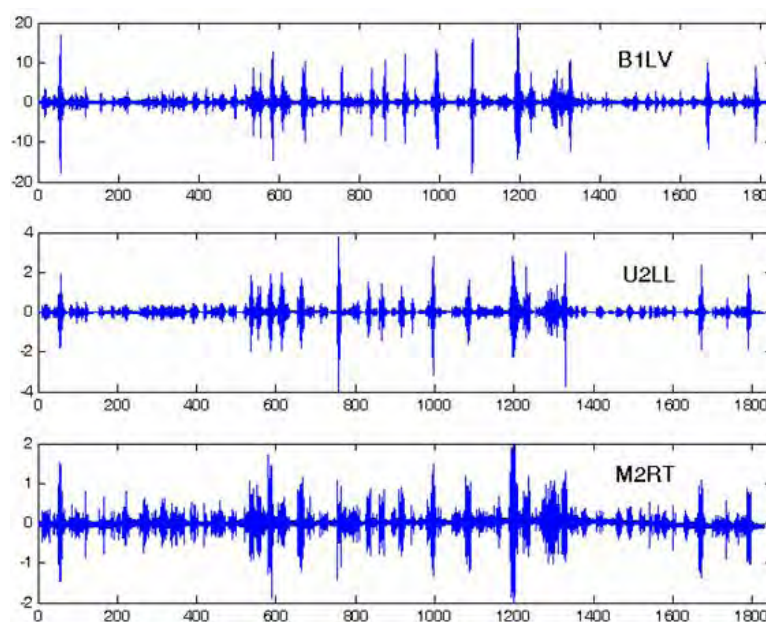
Στις μεθοδολογίες ιδιομορφικής αναγνώρισης βάσει των ταλαντώσεων που προκαλούνται από λειτουργικά φορτία που έχουν αναπτυχθεί, οι οποίες επεξεργάζονται δεδομένα μόνο εξόδου, γίνεται η παραδοχή πως οι διεγέρσεις μπορούν να θεωρηθούν σαν στοχαστικές διαδικασίες λευκού θορύβου (white noise process). Ο υπολογισμός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

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

μεταξύ των συναρτήσεων διαφασματικής πυκνότητας (CPSD) $\hat{S}(k\Delta\omega) \in C^{N_0 \times N_0}$ που υπολογίζονται από τις μετρούμενες χρονο-ιστορίες της απόκρισης και των συναρτήσεων διαφασματικής πυκνότητας $S(k\Delta\omega; \psi) \in C^{N_0 \times N_0}$ 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, $w \in R^{N_0 \times N_0}$ το μητρώο που περιέχει τους συντελεστές βαρύτητας και ψ 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. (2007).

Προσδιορισμός δυναμικών χαρακτηριστικών 2^{ης} χαραδρογέφυρας παράκαμψης Καβάλας (Γ2) από τις μετρήσεις

Ενδεικτικά, στο Σχήμα 10 παρουσιάζονται οι επιταχύνσεις που καταγράφηκαν από τρεις αισθητήρες, εκ των οποίων ο πρώτος μετράει στην κατακόρυφη διεύθυνση, ο δεύτερος στην διαμήκη διεύθυνση και ο τρίτος στην εγκάρσια διεύθυνση.



Σχήμα 10. Χρονοιστορίες απόκρισης (επιτάχυνσης) στα κανάλια B1LV, U2LL, M2RT του δικτύου αισθητήρων της 2^{ης} χαραδρογέφυρας παράκαμψης Καβάλας

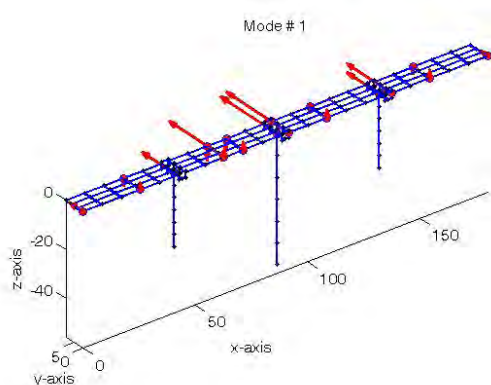
Οι χρονοιστορίες απόκρισης σε λειτουργικά φορτία - που οφείλονται κυρίως στη διέλευση των οχημάτων - επεξεργάστηκαν με το αναπτυχθέν λογισμικό για τον προσδιορισμό των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών. Η εφαρμογή του λογισμικού έδωσε τη δυνατότητα αναγνώρισης αρκετών βασικών ιδιοσυχνοτήτων, ιδιομορφών και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

Ο τύπος των ιδιομορφών που αναγνωρίστηκαν με αξιοπιστία, οι βέλτιστες τιμές των ιδιοσυχνοτήτων και οι αντίστοιχες τιμές των συντελεστών απόσβεσης φαίνονται στον Πίνακα 1, ενώ δύο ενδεικτικές ιδιομορφές φαίνονται στο Σχήμα 11. Τα κόκκινα βέλη στο Σχήμα 11 βρίσκονται στα σημεία μέτρησης και το μήκος τους είναι ανάλογο της αντίστοιχης κανονικοποιημένης ιδιομορφικής συνιστώσας. Συγκεκριμένα, από τη διέλευση των οχημάτων

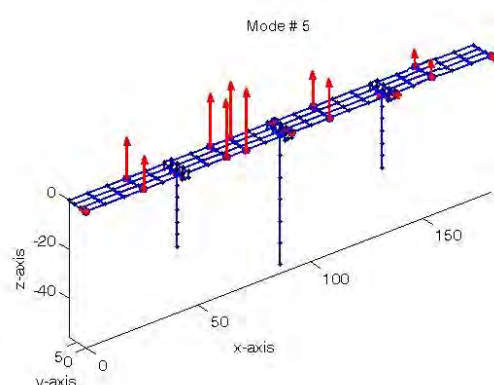
διεγέρθηκαν και αναγνωρίστηκαν καθαρά επτά ιδιοσυχνότητες και ιδιομορφές της γέφυρας: τρεις ιδιομορφές στην εγκάρσια κατεύθυνση, μία ιδιομορφή στη διαμήκη κατεύθυνση και τρεις πολύ κοντινές καμπτικές ιδιομορφές. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η γέφυρα της Καβάλας παρουσιάζει πολλαπλές πολύ κοντινές καμπτικές ιδιομορφές που οφείλονται στο γεγονός ότι τα τέσσερα σχεδόν όμοια σε διαστάσεις και υλικά ανοίγματα (spans) της γέφυρας συμπεριφέρονται σχεδόν ανεξάρτητα σε καμπτική ταλάντωση. Οι κοντινές αυτές ιδιομορφές δυσχεραίνουν σημαντικά το πρόβλημα αναγνώρισής τους. Από τις τιμές των ιδιοσυχνοτήτων στον Πίνακα 1 παρατηρείται ότι πράγματι οι τρεις καμπτικές ιδιομορφές είναι πολύ κοντινές.

Πίνακας 1: Αναγνωρισμένες ιδιοσυχνότητες και συντελεστές απόσβεσης και αναλυτικές ιδιοσυχνότητες της γέφυρας Γ2

No	Τύπος Ιδιομορφών	Καταγραφή	Καταγραφή	Αναλυτικό μοντέλο
		Ιδιοσυχνότητες (Hz)	Συντελεστές Απόσβεσης (%)	Ιδιοσυχνότητες (Hz)
1	1 ^η εγκάρσια	0.81	2.6	0.55
2	1 ^η διαμήκης	1.29	4.8	0.59
3	2 ^η εγκάρσια	1.61	3.8	0.69
4	3 ^η εγκάρσια	2.36	0.88	1.24
5	1 ^η καμπτική (deck)	3.41	1.00	2.79
6	2 ^η καμπτική (deck)	3.46	0.98	2.85
7	3 ^η καμπτική (deck)	3.51	0.96	2.87



(α)

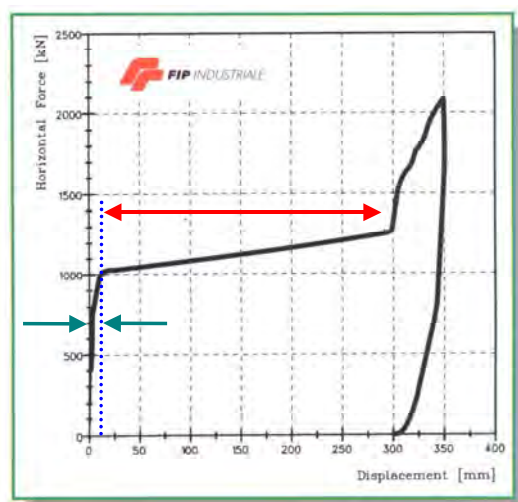


(β)

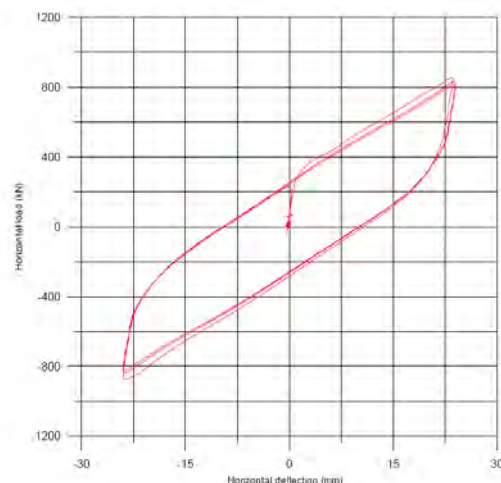
Σχήμα 11: Αναγνωρισμένες ιδιομορφές της 2^{ης} χαραδρογέφυρας παράκαμψης Καβάλας (α) 1^η εγκάρσια ($\omega = 0,81\text{Hz}$) (β) 1^η καμπτική (deck) ($\omega = 3,41\text{Hz}$)

Τέλος πραγματοποιήθηκε στατιστική ανάλυση των τιμών των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών από πολλαπλές καταγραφές και παρατηρήθηκε ότι η διασπορά των τιμών των ιδιοσυχνοτήτων που αναγνωρίζονται είναι μικρότερη του 1%, ενώ η διασπορά των τιμών των συντελεστών απόσβεσης είναι της τάξης του 10 με 20% και σε κάποιες περιπτώσεις φθάνει και τα 50%. Τα αποτελέσματα αυτά είναι συμβατά με αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην βιβλιογραφία από άλλους ερευνητές (Arici and Mosalam 2005 και Siringoringo and Fujino 2006).

Τα πραγματικά δυναμικά χαρακτηριστικά της γέφυρας που προσδιορίστηκαν από τις μετρήσεις, συγκρίθηκαν με αναλυτικά αποτελέσματα προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων που ανταποκρίνονται σε αυτά που χρησιμοποιήθηκαν για το σχεδιασμό 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. Οι σημαντικές διαφορές που παρατηρήθηκαν, αποδίδονται κυρίως στη διαφορετική συμπεριφορά των ελαστομεταλλικών εφεδράνων. Στο Σχήμα 12α δίδεται ένα διάγραμμα δύναμης-οριζόντιας μετατόπισης ενός ελαστομεταλλικού εφεδράνου, του οποίου οι δύο πρώτοι κλάδοι (πολύ δύσκαμπτος για μικρές μετατοπίσεις – $d < 12 \text{ mm}$ - ακολουθούμενος από έναν λιγότερο δύσκαμπτο για μεγαλύτερες - $12 \text{ mm} < d < 300 \text{ mm}$) είναι αντιπροσωπευτικοί της συμπεριφοράς των ελαστομεταλλικών εφεδράνων (αυτό δεν ισχύει για τους κλάδους για $d > 300 \text{ mm}$, αλλά αυτό δεν ενδιαφέρει την παρούσα ανάλυση, όπως και το ότι σε άλλα εφέδρανα τα όρια μπορεί να είναι διάφορα των 12 και 300 mm). Η ίδια συμπεριφορά (μεγάλη δυσκαμψία για πολύ μικρές παραμορφώσεις ακολουθούμενη από μικρότερη για μεγαλύτερες, φαίνεται και στο αντίστοιχο Σχήμα 12β δοκιμής άλλου εφεδράνου για 75% παραμόρφωση).



(α)



(β)

Σχήμα 12: Διαγράμματα δύναμης – οριζόντιας μετατόπισης ελαστομεταλλικών εφεδράνων

Όπως γίνεται κατανοητό από το Σχήμα 12, στο αναλυτικό προσομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε για το σχεδιασμό της γέφυρας, γίνεται η παραδοχή ότι τα εφέδρανα θα λειτουργήσουν σε περίπτωση σεισμού σχεδιασμού σε μεγάλες μετατοπίσεις (περιοχή κόκκινου διπλού βέλους στο Σχ. 12α), παρουσιάζοντας δυσκαμψία πολύ μικρότερη από αυτή

που εμφανίζουν για πολύ μικρές μετατοπίσεις (περιοχή πράσινων βελών), όπως είναι αυτή του συνήθους κυκλοφοριακού φόρτου, για τον οποίο και ελήφθησαν οι μετρήσεις. Φυσικά, υπάρχουν και διάφοροι άλλοι παράγοντες που συμβάλλουν – σε μικρότερο, στη συγκεκριμένη περίπτωση βαθμό – στη διαφορά πειραματικών και αναλυτικών προσομοιωμάτων π.χ. η μη ακριβής αντιστοιχία των διαφόρων παραδοχών που έγιναν για το σχεδιασμό με αυτές που εμφανίζονται πραγματικά (όπως ιδιότητες εδάφους, ποιότητα σκυροδέματος, συνωριακές συνθήκες, δυσκαμψία μη δομικών στοιχείων που δεν ελήφθησαν υπόψη στο σχεδιασμό κλπ.).

Για την κατάλληλη προσαρμογή των ιδιοτήτων του αναλυτικού προσομοιώματος ώστε να είναι σε θέση να περιγράψει με ακρίβεια την μετρηθείσα απόκριση, έχει αναπτυχθεί ειδική μεθοδολογία και λογισμικό, (Paradimitriou et al 2008), η εφαρμογή του οποίου για τη συγκεκριμένη γέφυρα παρουσιάζεται στις εργασίες Ntotsios et al. (2008α και 2008β).

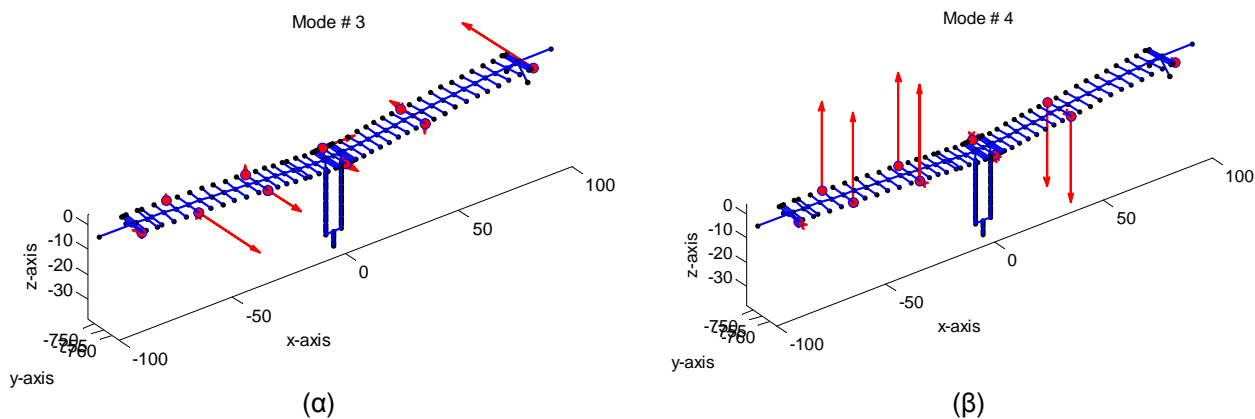
Τέλος σημειώνεται ότι κατά τη διάρκεια παρακολούθησης της γέφυρας, καταγράφετο παράλληλα και η θερμοκρασία. Από την επεξεργασία μετρήσεων που ελήφθησαν σε διαφορετικές θερμοκρασίες (από -3° έως $+38^{\circ}$ C) παρατηρήθηκαν μικροδιαφορές, οι οποίες όμως ευρίσκοντο εντός των στατιστικών ορίων ακρίβειας της μεθοδολογίας προσδιορισμού των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών, και έτσι δεν μπορούσαν να αποδοθούν αποκλειστικά στις θερμοκρασιακές διαφορές.

Προσδιορισμός δυναμικών χαρακτηριστικών γέφυρας Γ9 (θέση 5.1 – Πολύμυλος) από τις μετρήσεις

Από τη διέγερση των οχημάτων διεγέρθηκαν και αναγνωρίστηκαν καθαρά μέχρι οκτώ ιδιοσυχνότητες και ιδιομορφές της γέφυρας: μία διαμήκης, τέσσερις ιδιομορφές στην εγκάρσια κατεύθυνση και τρεις καμπτικές. Ο τύπος των ιδιομορφών που αναγνωρίστηκαν, οι βέλτιστες τιμές των ιδιοσυχνοτήτων και οι αντίστοιχες τιμές των συντελεστών απόσβεσης για ένα σετ μετρήσεων φαίνονται στον Πίνακα 2. Μερικές ενδεικτικές ιδιομορφές φαίνονται στο Σχήμα 13. Τα κόκκινα βέλη βρίσκονται στα σημεία μέτρησης και το μήκος τους είναι ανάλογο της αντίστοιχης κανονικοποιημένης ιδιομορφικής συνιστώσας.

Πίνακας 2: Αναγνωρισμένες ιδιομορφές, ιδιοσυχνότητες και συντελεστές απόσβεσης από ένα σετ μετρήσεων (26/7/2005) της γέφυρας Γ9 του Πολύμυλου.

No	Αναγνωρισμένες Ιδιοσυχνότητες	Ιδιοσυχνότητες (Hz)	Συντελεστές Απόσβεσης (%)
1	1 ^η διαμήκης	-	-
2	1 ^η εγκάρσια	1.19	5.56
3	2 ^η εγκάρσια	1.12	1.97
4	1 ^η καμπτική (deck)	2.13	0.60
5	3 ^η εγκάρσια	-	-
6	2 ^η καμπτική (deck)	3.07	0.43
7	4 ^η εγκάρσια	4.07	0.76
8	3 ^η καμπτική (deck)	6.65	0.45



Σχήμα 13: Αναγνωρισμένες ιδιομορφές της γέφυρας Γ9 - Πολύμυλος (α) 1^η εγκάρσια ($\omega = 1.19$ Hz) (β) 1^η καμπτική ($\omega = 2.13$ Hz)

Σημειώνεται ότι και στη γέφυρα Γ9 παρατηρήθηκαν διαφορές μεταξύ των πειραματικά προσδιορισμένων ιδιομορφικών χαρακτηριστικών και αυτών αναλυτικών προσομοιωμάτων που αντιστοιχούσαν με αυτά του σχεδιασμού της γέφυρας. Όπως και στην περίπτωση της 2^{ης} Χαραδρογέφυρας παράκαμψης Καβάλας, χρησιμοποιήθηκε κατάλληλη μεθοδολογία προσαρμογής του αναλυτικού προσομοιώματος ώστε να είναι σε θέση να περιγράψει με ακρίβεια την μετρηθείσα απόκριση (Ntotsios et al. 2008).

Τέλος, όπως και στην περίπτωση της 2^{ης} χαραδρογέφυρας παράκαμψης Καβάλας, έτσι και στη γέφυρα Γ9 δεν κατέστη δυνατόν να εντοπισθεί σαφής επίδραση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος στη μεταβολή των δυναμικών χαρακτηριστικών. Σημειώνεται ότι και στις δύο γέφυρες οι μετρήσεις ελήφθησαν για θερμοκρασίες όχι χαμηλότερες των -5°C , άρα εκτός της χαμηλής ζώνης θερμοκρασιών όπου έχει παρατηρηθεί σύμφωνα και με τη διεθνή βιβλιογραφία, σημαντική επιρροή στα δυναμικά χαρακτηριστικά των κατασκευών (σε συνάρτηση πάντα με τα εκάστοτε δομικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους και τις συνθήκες στήριξης).

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η ενοργάνωση δύο γεφυρών της Εγνατίας Οδού με ειδικά συστήματα επιταχυνσιογράφων. Παρουσιάζονται αναλυτικά τα δομικά συστήματα των ενοργανωμένων γεφυρών και οι απαιτούμενες εργασίες υποδομής για την υλοποίηση των ενοργανώσεων με τον βέλτιστο τρόπο. Από την καταγραφή της δυναμικής απόκρισης των γεφυρών σε συνήθη κυκλοφοριακά φορτία έγινε δυνατός ο προσδιορισμός των δυναμικών τους χαρακτηριστικών με τη χρήση κατάλληλης μεθοδολογίας και λογισμικού που αναπτύχθηκε για το σκοπό αυτό από την ερευνητική ομάδα. Με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατός ο προσδιορισμός των δυναμικών χαρακτηριστικών των ενοργανωμένων κατασκευών σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, χωρίς ιδιαίτερα υψηλό κόστος, καθώς δεν απαιτείται η εφαρμογή τεχνητής εξαναγκασμένης διέγερσης στην κατασκευή. Η σύγκριση των πειραματικά προσδιορισθέντων ιδιομορφικών χαρακτηριστικών με αναλυτικά προσομοιώματα που αντιστοιχούν με αυτά του σχεδιασμού των γεφυρών κατέδειξε διαφορές, οι οποίες οφείλονται κυρίως στη διαφορετική στάθμη λειτουργίας των ελαστομεταλλικών εφεδράνων σε συνήθεις κυκλοφοριακές συνθήκες από την αναμενόμενη για το σεισμό σχεδιασμού. Από τις μετρήσεις στις δύο γέφυρες δεν παρατηρήθηκε σημαντική

επίδραση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος στη μεταβολή των δυναμικών χαρακτηριστικών τους, καθόσον οι όποιες διαφορές ευρίσκοντο εντός των στατιστικών ορίων ακρίβειας της μεθοδολογίας προσδιορισμού των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν τη Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας για την οικονομική στήριξη της ερευνητικής προσπάθειας μέσω του Γ' Κοινοτικού Πλαισίου στήριξης – Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Ανταγωνιστικότητα (ερευνητικό πρόγραμμα ΑσΠροΓε ΕΠΑΝ– ΔΠ15)

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Καρακώστας Χ., Μάκρα Κ., Λεκίδης Β., και Κλήμης Ν. (2006), “Η Επίδραση των Τοπικών Εδαφικών Συνθηκών στη Σεισμική Διέγερση και η Δυναμική Απόκριση της Καλωδιωτής Γέφυρας του Ευρίπου”, *Πρακτικά 5ου Συνεδρίου Γεωτεχνικής Μηχανικής*, Ξάνθη, Μάιος-Ιούνιος (CD-Rom)
- Ντότσιος Ε., Πέρρος Κ., Παπαδημητρίου Κ., Πανέτσος Π., Λεκίδης Β., Καρακώστας Χ., Σαλονικιός Θ., Μακάριος Τ., Σους Ι. (2008), “Αναθεώρηση Προσομοιωμάτων Γεφυρών της Εγνατίας Οδού με Βάση την Απόκριση τους σε Δυναμικές Διεγέρσεις”, *Πρακτικά 3^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας*, Αθήνα, 5–7 Νοεμβρίου, αρ. εργασίας 2018
- Παπαδημητρίου Κ., Ντότσιος Ε., Νικολάου Ι. (2008), “Αναγνώριση Μοντέλων Κατασκευών βάσει Μετρήσεων των Ταλαντώσεων σε Περιβαλλοντικές και Σεισμικές Διεγέρσεις”, *Πρακτικά 3^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας*, Αθήνα, 5–7 Νοεμβρίου, αρ. εργασίας 2017
- Arici, Y. ,and Mosalam, K.M. (2005). "Modal Identification of Bridge Systems Using State Space Methods", *Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 12, pp. 381-404.
- 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).
- Lekidis V.A., Karakostas C.Z., Christodoulou K., Karamanos S., Papadimitriou K. and Panetsos P. (2004), “Investigation of Dynamic Response and Model Updating of Instrumented R/C Bridges”, *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering (13WCEE)*, Vancouver, August 1-6, (in CD-ROM).
- Lekidis V., Tsakiri M., Makra,K., Karakostas C., Klimis N., and Sous I. (2005), “Evaluation of Dynamic Response and Local Soil Effects of the Evripos Cable-Stayed Bridge using Multi-sensor Monitoring Systems”, *Engineering Geology*, Vol. 79, pp.43-59

- 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.
- Ntotsios E., Papadimitriou C., Panetsos P., Karaiskos G., Perros K., Perdikaris F., (2008), "Bridge Health Monitoring system based on vibration measurements", *Bulletin of Earthquake Engineering*, submitted for publication.
- Panetsos P., Lambropoulos S., Papadimitriou C., Karamanos S., Lekidis V., and Karakostas Ch. (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).
- 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.
- Siringoringo, D.M., and Fujino, Y. (2006). "Observed Dynamic Performance of the Yokohama-Bay Bridge from System Identification using Seismic Records", *Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 13, pp. 226-244.