

Ενόργανη Παρακολούθηση Γεφυρών της Εγνατία Οδού

Παναγιώτης Πανέτσος, Δημήτρης Κωνσταντινίδης
Δρ. Πολιτικοί Μηχανικοί, Τμήμα Γεφυρών, Δ/ση Μελετών ΕΟΑΕ

Κωνσταντίνος Παπαδημητρίου
Καθηγητής, Εργαστήριο Δυναμικής Συστημάτων Παν. Θεσσαλίας

Βασίλειος Λεκίδης, Χρήστος Καρακώστας
Ερευνητές, Ινστιτούτο Τεχνικής Σεισμολογίας & Αντισεισμικών Κατασκευών (Ι.Τ.Σ.Α.Κ)

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Εγνατία Οδός είναι το μεγαλύτερο και τεχνικά δυσχερέστερο έργο οδοποιίας της χώρας μας, μήκους 670 χλμ. και περιλαμβάνει περίπου 1856 γέφυρες και μικρότερα τεχνικά. Πολλές από τις γέφυρες της εκτίθενται ήδη στις καθημερινές συνέπειες της κυκλοφορίας και των τοπικών περιβαλλοντικών συνθηκών (σε ορισμένα τμήματα ακραίων ή έντονα διαβρωτικών). Παράλληλα στη διάρκεια της ζωής τους αναμένεται να εκτεθούν αρκετές φορές σε μικρούς και μέτριους σεισμούς, χωρίς να αποκλείεται να υποστούν σημαντικές ζημιές από έναν καταστροφικό σεισμό. Οι νέες γέφυρες της Εγνατίας Οδού, αν και σχεδιάστηκαν για διάρκεια ζωής 120 ετών και έχουν τεθεί σε λειτουργία στην τελευταία πενταετία, ωστόσο η περιοδική επιθεώρηση και αξιολόγηση της κατάστασής τους κρίνεται απαραίτητη για την παρακολούθηση και την καθυστέρηση, μέσω τακτικής συντήρησης, του ρυθμού φθοράς τους, καθώς και για την επαρκή πρόβλεψη της χρονικής στιγμής εκδήλωσης και της έκτασης ανεπιθύμητων ζημιών.

1. ΕΝΟΡΓΑΝΗ ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗ ΓΕΦΥΡΩΝ

Η τεχνικά επαρκής διαδικασία επιθεώρησης και η κατάλληλη μεθοδολογία αποτίμησης των αποτελεσμάτων της, είναι απαραίτητη για την αξιολόγηση της δομικής κατάστασης των κατασκευασμένων γεφυρών της Εγνατίας Οδού. Η οπτική επιθεώρηση που γενικώς εφαρμόζεται για τις γέφυρες της Εγνατία Οδού, θα είναι δύσκολη, χρονοβόρα, δαπανηρή σε ειδικά μέσα πρόσβασης και προσωπικό και περιορισμένης ακρίβειας, στην περίπτωση πολλών γεφυρών με μεγάλα ανοίγματα και ψηλά βάθρα σε έντονο ανάγλυφο. Για ορισμένες γέφυρες που αποτελούν ελληνικό ρεκόρ για την μέθοδο κατασκευής τους (π.χ. προβολοδόμηση) και για το μέγιστο άνοιγμα/ συνολικό μήκος τους (υπερβαίνει τα 235μ/1000μ αντίστοιχα), απαιτούνται εξελιγμένες και ακριβέστερες τεχνικές επιθεώρησης και μέθοδοι αξιολόγησης της δομικής κατάστασής τους, λόγω της έκτασής και της πολυπλοκότητάς τους.

Αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε από την ΕΟΑΕ ένας νέος τύπος επιθεώρησης, με την χρήση ειδικών δικτύων οργάνων, που εγκαθίστανται προσωρινά /ή μόνιμα πάνω στις γέφυρες, για την παρακολούθηση της δυναμικής τους απόκρισης (μέτρηση επιταχύνσεων) λόγω περιβαλλοντικών (ambient) διεγέρσεων (άνεμος, κυκλοφορία κ.λ.π.). Η ενοργάνωση με δίκτυα επιταχυνσιογράφων γεφυρών για την μέτρηση της δυναμικής τους απόκρισης (επιταχύνσεις) είναι ευρύτατα διαδεδομένη διεθνώς, ενώ και στη χώρα μας έχει εφαρμοσθεί στη γέφυρα του Ευρίπου από το Ι.Τ.Σ.Α.Κ. και σε μικρότερες γέφυρες, κυρίως για ερευνητικούς σκοπούς.

1.1 Ενοργάνωση γεφυρών και τηλεματική παρακολούθηση της Δυναμικής συμπεριφοράς τους

Δύο κατασκευασμένες, σε κυκλοφορία, γέφυρες της Εγνατίας Οδού επιλέχθηκαν για να ενοργανωθούν με κριτήριο την δομική αντιπροσωπευτικότητά τους, την κανονικότητά τους (ως προς την κατανομή μάζας και ακαμψίας) και το μεσαίο μήκος τους, όχι μεγαλύτερο των 200μ. (εικόνες 2α, 2β). Δίκτυο 24 μονοαξονικών αισθητηρίων (forced balanced) εγκαταστάθηκε στις άκρες του καταστρώματος των δύο γεφυρών, στις δοκούς έδρασης των βάθρων (γέφυρα Γ2) και στη βάση των μεσοβάθρων (γέφυρα Γ9) και συνδέθηκαν καλωδιακά με συνολικά τέσσερις, 12κάναλες καταγραφικές

ΗΜΕΡΙΔΑ
Τ.Ε.Ε. ΤΚΜ – ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ Α.Ε. – ΣΥΛΛΟΓΟΣ ΠΜ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

μονάδες (Εικόνες 1α, 1β). Οι καταγραφικές μονάδες στις δύο άκρες των ενοργανωμένων γεφυρών, συνδέθηκαν καλωδιακά για τη διασφάλιση συγχρονισμένης καταγραφής και εξοπλίσθηκαν με εξωτερικά μόντεμ κινητής τηλεφωνίας GSM/GPRS. Αυτό επιτρέπει την τηλεματική εκτέλεση ρυθμίσεων και την μεταφορά (υπό προϋποθέσεις), καταγραφών περιβαλλοντικών ή σεισμικών ταλαντώσεων, με αποτέλεσμα την μείωση των συχνών επισκέψεων, του κόστους και του χρόνου εκμετάλλευσης του συστήματος.



Εικόνες 1α, 1β. Εγκατάσταση δικτύου 12 κανάλων επιταχυνσιογράφων

Οι ρυθμίσεις των συστημάτων γίνονται επί τόπου και τηλεματικά με στόχο την αποφυγή γρήγορης εξάντλησης της διαθέσιμης μνήμης των καταγραφικών μονάδων. Γι'αυτό επιδιώκεται η επιλεκτική καταγραφή μόνο των ισχυρότερων εκ των μικρών (της τάξης των 2 – 10 τοις % του g) ταλαντώσεων λόγω κυκλοφορίας.

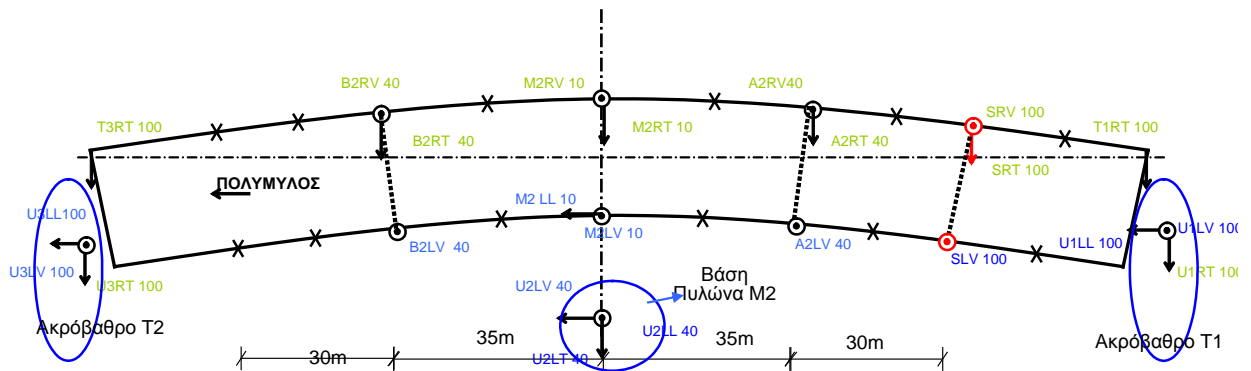


Εικόνα 2α. 2^η Χαραδρογέφυρα Καβάλας Γ2



Εικόνα 2β. Χαραδρογέφυρα Γ9 (Πολύμυλος – Κουλούρα)

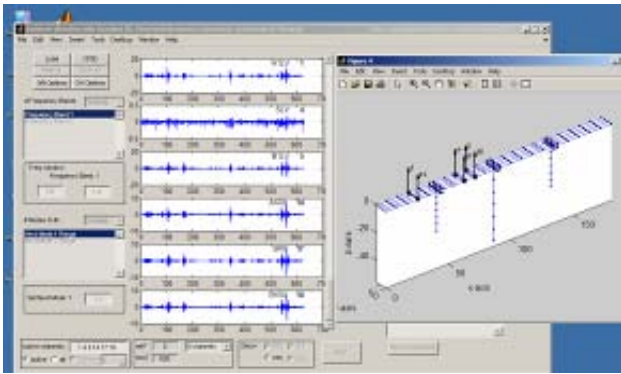
Έτσι υπάρχει ετοιμότητα για την καταγραφή ενός πιθανού ασθενούς σεισμού (αναμένεται να συμβεί κατά τη διάρκεια της συνεχούς παρακολούθησης των γεφυρών στο πλαίσιο της σημερινής ερευνητικής – πιλοτικής φάσης). Το συνολικό εγχείρημα της ενοργάνωσης υλοποιήθηκε χάρη στην επιστημονική και τεχνική βοήθεια του Ι.Τ.Σ.Α.Κ.



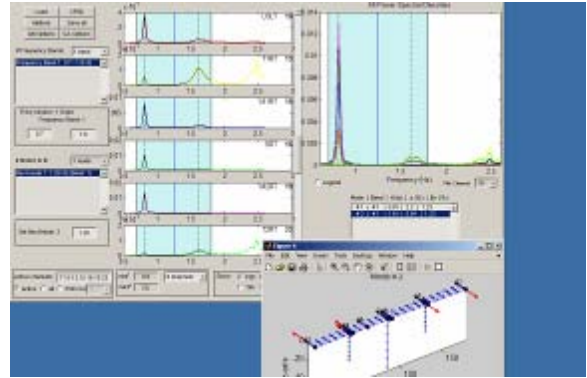
Εικόνα 3. Διάταξη αισθητήρων γέφυρας Γ9.

1.2 Ανάπτυξη λογισμικού μορφικής αναγνώρισης

Ένα φιλικό προς τον χρήστη λογισμικό μορφικής αναγνώρισης, με γραφικό περιβάλλον (εικόνες 4, 5) αναπτύχθηκε από το εργαστήριο Δυναμικής Συστημάτων του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, σε συνεργασία με την Εγνατία Οδό και το Ι.Τ.Σ.Α.Κ.



Εικόνα 4 Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης χαραδρόγέφυρας Γ2



Εικόνα 5. Αναγνώριση καμπτικών ιδιομορφών φορέα χαραδρόγέφυρας

Εφαρμόσθηκε για την αναγνώριση των μορφικών χαρακτηριστικών (ιδιοσυχνοτήτων, ιδιομορφών, ποσοστών απόσβεσης) των υπό παρακολούθηση γεφυρών, μέσω της επεξεργασίας των καταγεγραμμένων χρονοϊστοριών ταλάντωσης (επιτάχυνσης).

Οι καταγραφές – μετρήσεις αποτελούνται είτε από χαμηλού εύρους περιβαλλοντικές ταλαντώσεις της γέφυρας, που διεγείρονται από την κυκλοφορία και τον άνεμο, είτε από ταλαντώσεις εκ σεισμού. Διάφορες μεθοδολογίες μορφικής αναγνώρισης τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο πεδίο των συχνοτήτων έχουν ενσωματωθεί.

Για την περίπτωση των περιβαλλοντικών ταλαντώσεων, γίνεται χρήση μεθοδολογίας βάσει της οποίας, με άγνωστη την χρονοϊστορία διέγερσης της γέφυρας (output only model), αναγνωρίζονται ως μορφικές παράμετροι του συστήματος (ιδιοσυχνότητες, ιδιομορφές, ποσοστά απόσβεσης) αυτές για τις οποίες το μητρώο φασματικής πυκνότητας, που «προβλέπει» το ιδιομορφικό μοντέλο, προσεγγίζει καλύτερα (μέσω ελαχιστοποίησης μίας σταθμισμένης διαφοράς) το μητρώο φασματικής πυκνότητας των μετρημένων χρονοϊστοριών επιτάχυνσης.

Για την περίπτωση των ταλαντώσεων εκ σεισμού, γίνεται χρήση μεθοδολογιών μορφικής αναγνώρισης για γνωστές χρονοϊστορίες διέγερσης και ταλάντωσης της γέφυρας, τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο πεδίο των συχνοτήτων. Αυτές οι μεθοδολογίες αναγνωρίζουν τις μορφικές παραμέτρους (ιδιοσυχνότητες, ιδιομορφές, ποσοστά απόσβεσης) μέσω της ελαχιστοποίησης μίας σταθμισμένης διαφοράς μεταξύ των καταγεγραμμένων χρονοϊστοριών απόκρισης (ή των μετασχηματισμών τους Fourier) και των χρονοϊστοριών απόκρισης (ή των μετασχηματισμών τους Fourier), οι οποίες «υπολογίζονται» από το ιδιομορφικό μαθηματικό μοντέλο (με δεδομένα τις μετρημένες χρονοϊστορίες εισαγωγής της σεισμικής διέγερσης στα θεμέλια της γέφυρας).

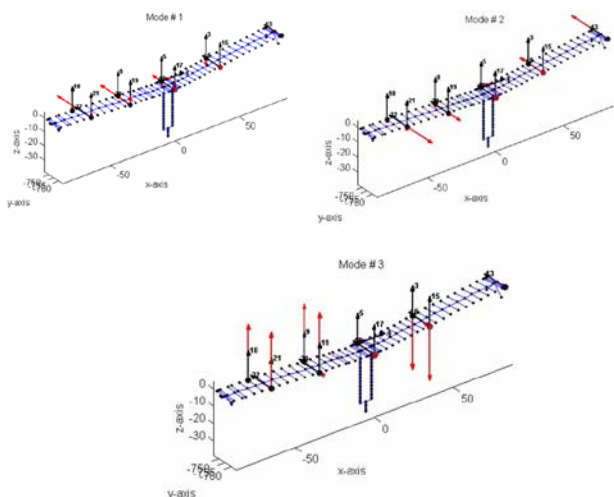
Διάφορες τεχνικές βελτιστοποίησης, περιλαμβανομένων και γενετικών αλγορίθμων χρησιμοποιούνται για την επίλυση των ανωτέρω προβλημάτων βελτιστοποίησης.

Οι χρονοϊστορίες περιβαλλοντικής ταλάντωσης μετρώνται εύκολα μέσω των εγκατεστημένων δικτύων επιταχυνσιόμετρων. Μπορεί να χρησιμοποιηθούν καταγραφές ανά τακτά χρονικά διαστήματα, με στόχο την εξέλιξη πιθανής φθοράς, ή καταγραφές πριν και μετά από ένα σεισμό, για τη διάγνωση σημαντικών δομικών αλλοιώσεων-ζημιών της γέφυρας. Αναγνωρίζονται τα δυναμικά χαρακτηριστικά της γέφυρας, σύμφωνα με τις ανωτέρω μεθόδους, με στόχο την αξιολόγηση των παραδοχών της μελέτης και της πραγματικής δομικής κατάστασης της γέφυρας.

Οι δύο ενοργανωμένες γέφυρες δόθηκαν στην κυκλοφορία το 2002 (Γ2, 2^η Χαραδρογέφυρα Παράκαμψης Καβάλας) και το 2004 (Γ9, Χαραδρογέφυρα τμήματος Πολυμύλου- Κουλούρας). Κατά συνέπεια δεν αναμένεται η διάγνωση σημαντικών φθορών, οι οποίες να έχουν αλλοιώσει τα δυναμικά χαρακτηριστικά των γεφυρών.

Η αξιολόγηση των παραδοχών της μελέτης των δύο δομικά αντιπροσωπευτικών γεφυρών και η αρχική πειραματική αναγνώριση των ιδιοτήτων μάζας/ ακαμψίας/ απόσβεσης, είναι πολύ σημαντικές για την παρακολούθηση της δομικής φθοράς τους (μέσω περιοδικής ενοργάνωσης) και την έγκαιρη και με ακρίβεια μελλοντική διάγνωση σημαντικών ζημιών.

Η εφαρμογή του λογισμικού πακέτου για την επεξεργασία μετρήσεων περιβαλλοντικών ταλαντώσεων των δύο ενοργανωμένων γεφυρών, οδήγησε στην αναγνώριση των σημαντικότερων ιδιοσυχνοτήτων και ποσοστών απόσβεσης τους (Εικόνες 6, 7, 8).



No	Αναγνωρισμένη Ιδιομορφή	Hz	Απόσβεση ζ%
1	1 ^η Εγκάρσια	0.807	2,2
2	1 ^η Διαμήκης	1.293	5,3
3	Στροφική (rZ)	1.614	5,4
4	2 ^η Εγκάρσια	2.358	1,2
5	1 ^η Καμπτική (Φορέα)	3.405	1,2
6	2 ^η Καμπτική (Φορέα)	3.455	1,05
7	3 ^η Καμπτική (Φορέα)	3.510	1,07

Εικόνα 7. Αναγνωρισμένες ιδιοσυχνότητες γέφυρας Γ2

No	Αναγνωρισμένη Ιδιομορφή	Hz	Απόσβεση ζ%
1	1 ^η Εγκάρσια	0,810	2,2
2	1 ^η Διαμήκης	1,310	5,3
3	Στροφική (rZ)	1,610	5,4
4	1 ^η Καμπτική(Φορέα)	3,440	1,2
5	2 ^η Καμπτική(Φορέα)	3,490	1,2
6	3 ^η Καμπτική(Φορέα)	3,510	1,05
7	4 ^η Καμπτική(Φορέα)	3,530	1,07

Εικόνα8. Αναγνωρισμένες ιδιοσυχνότητες γέφυρας Γ9

1.3 Αναθεώρηση Δυναμικών Μοντέλων και διάγνωση ζημιών.

Εξεζητημένες μέθοδοι αναγνώρισης, οι οποίες συνδυάζουν την πληροφορία που έχει αποκτηθεί από τις μετρήσεις των δικτύων αισθητήρων, με την θεωρητική πληροφορία που εξάγεται από μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων (που προσομοιώνει την μηχανική συμπεριφορά και την φθορά του φορέα της γέφυρας), έχουν αναπτυχθεί διεθνώς για τη διάγνωση της δομικής ακεραιότητας, της θέσης, της έκτασης και του είδους της ζημιάς.

Η διάγνωση της ζημιάς βασίζεται στις μορφικές παραμέτρους που αναγνωρίστηκαν από τα μετρημένα περιβαλλοντικά δεδομένα υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας των γεφυρών. Όταν οι ιδιομορφικές παράμετροι αναγνωρίζονται με την χρήση της μεθοδολογίας της προηγούμενης παραγράφου, χρησιμοποιούνται ως δεδομένα για την αναθεώρηση των γραμμικών ελαστικών δυναμικών μοντέλων των γεφυρών που ενοργανώθηκαν. Γίνεται χρήση μίας υπολογιστικά αποτελεσματικής μεθοδολογίας (αναθεωρούνται οι φυσικές ιδιότητες του φορέα, όπως η μάζα και η δυσκαμψία), η οποία αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο της Δυναμικής των Συστημάτων του Παν. Θεσσαλίας. Σύμφωνα με αυτή, το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων παραμετροποιείται με ένα σετ παραμέτρων που είναι δυνατόν να αντιπροσωπεύει ιδιότητες μάζας και δυσκαμψίας σε επίπεδο στοιχείου ή υποφορέα. Ιδιότητες πεπερασμένων στοιχείων σε ένα τέτοιο σετ παραμέτρων μπορεί να είναι το μέτρο ελαστικότητας πολλαπλασιασμένο με την ροπή αδρανείας, για τον φορέα και τα βάρη (E^*I), ελατηριακές σταθερές προσομοίωσης των ελαστομεταλλικών εφεδράνων GA/h , και άλλες.

Κατάλληλοι υπολογιστικά αλγόριθμοι αναπτύχθηκαν για να αναθεωρήσουν τις τιμές των παραμέτρων που ορίζονται από τον χρήστη. Ο στόχος μίας μεθοδολογίας αναθεώρησης βασισμένης

σε ιδιομορφικό μοντέλο είναι η εύρεση τιμών των παραμέτρων που ορίζονται από τον χρήστη, που να οδηγούν στη σύγκλιση των δυναμικών χαρακτηριστικών του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων με αυτά που αναγνωρίστηκαν πειραματικά. Η χρησιμοποιηθείσα μεθοδολογία ψάχνει για τις βέλτιστες τιμές των φυσικών ιδιοτήτων που ελαχιστοποιούν ένα μέτρο προσέγγισης μεταξύ των ιδιοσυχνοτήτων και ιδιομορφών του μοντέλου και αυτών που έχουν αναγνωρισθεί.

Οι προηγούμενες μεθοδολογίες ενσωματώθηκαν σε κατάλληλο λογισμικό με εύχρηστο γραφικό περιβάλλον που αναπτύχθηκε από το Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας για την αναγνώριση μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων και εκτίμηση των προαναφερθεισών ιδιοτήτων δυσκαμψίας και μάζας σε επίπεδο δομικού στοιχείου ή και ολόκληρου υποφορέα. Η αναθεώρηση των μοντέλων και η διάγνωση βλαβών επιτυγχάνεται μέσω αποτελεσματικών μεθόδων βελτιστοποίησης. Το λογισμικό έχει εφαρμοστεί για την αναθεώρηση του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων της δεύτερης χαραδρογέφυρας της Καβάλας.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Η ανάπτυξη του συστήματος ενόργανης επιθεώρησης των γεφυρών της ΕΟΑΕ έγινε αρχικά με ίδια χρηματοδότηση και στη συνέχεια με χρηματοδότηση της Γενικής Γραμματείας Έρευνας και Τεχνολογίας και της ΕΟΑΕ στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος «ΑντιΣεισμική ΠΡΟστασία Γεφυρών», Δράση ΕΠ.ΑΝ. 4.5.1, ΚΕ ΔΠ15. Επιστημονικός υπεύθυνος και συντονιστής του ερευνητικού προγράμματος είναι το ΑΠΘ (καθηγητής Α. Κάππος). Στο ερευνητικό πρόγραμμα συμμετέχουν η ΕΟΑΕ., τέσσερα ακόμη Α.Ε.Ι. (Δ.Π.Θ., Π.Π., Π.Θ., Ε.Μ.Π.), το Ι.Τ.Σ.Α.Κ., τέσσερις μεγάλες μελετητικές εταιρείες (ΔΟΜΗ, DENCΟ, Τ.ΤΣΙΚΝΙΑΣ, ΕΔΑΦΟΣ) μία κατασκευαστική εταιρεία (ΘΕΜΕΛΙΟΔΟΜΗ Α.Ε.) και δύο εταιρείες εμπορίας ειδικών κατασκευαστικών υλικών (ΕΛΕΜΚΑ, ΣΕΙΣΜΟΜΟΝΩΣΙΣ).