

**Σύστημα ενόργανης παρακολούθησης
της δομικής ακεραιότητας των γεφυρών από σκυρόδεμα
της Εγνατίας Οδού**
**Structural Health Monitoring of the Egnatia Motorway
concrete bridges**

**Παναγιώτης ΠΑΝΕΤΣΟΣ¹, Ιωάννης ΡΕΝΤΖΕΠΕΡΗΣ², Κωνσταντίνος
ΛΙΩΛΙΟΣ³**

*Λέξεις κλειδιά: Ενόργανη επιθεώρηση, Δομική αξιολόγηση, Συντήρηση, Γέφυρες
από σκυρόδεμα*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται συγκεντρωτικά αποτελέσματα της οκταετούς ενόργανης παρακολούθησης, με δίκτυα αισθητήρων, της μηχανικής συμπεριφοράς, υπό λειτουργικές και σεισμικές δράσεις, γεφυρών από σκυρόδεμα της Εγνατίας Οδού. Πρώτα, μέσω της ενόργανης παρακολούθησης καταγράφονται μετρήσεις επιτάχυνσης, παραμόρφωσης, μετακίνησης, ταχύτητας ανέμου και θερμοκρασίας, ενός ελάχιστου αριθμού κρίσιμων σημείων των γεφυρών. Κατόπιν, με την χρήση ειδικών μεθοδολογιών και υπολογιστικών κωδίκων, που εφαρμόζονται για την αξιολόγηση της δομικής κατάστασης των εννοργανωμένων γεφυρών, προκύπτουν αποτελέσματα, που αφορούν στην αναγνώριση των δυναμικών χαρακτηριστικών (ιδιοσυχνότητες, ιδιομορφές) των γεφυρών και στον αναλυτικό προσδιορισμό των παραμέτρων ακαμψίας και αντοχής τους. Τέλος, τα αποτελέσματα αυτά χρησιμοποιούνται για την αναθεώρηση των δυναμικών προσομοιώσεων των γεφυρών, ώστε τα σχετικά αναλυτικά αποτελέσματα να ταυτίζονται με τα πειραματικά αναγνωρισμένα δυναμικά χαρακτηριστικά τους.

ABSTRACT : In this paper, results from monitoring many reinforced concrete bridges of Egnatia Motorway, Northern Greece, by installed sensor networks, are given. The main scope of this continuous instrumental monitoring of selected bridges of the Egnatia Motorway is to measure strain, acceleration, displacement and temperature fields on a few critical points/sections of the bridge structure, in order to evaluate their static and dynamic performance, when subjected to ambient or seismic excitations. By the use of special software and methodologies, the

¹ Δρ. Πολ. Μηχ/κός, Προϊστάμενος Παρακολούθησης Μεγ. Τεχνικών Έργων, Εγνατία Οδός Α.Ε., GR-57001Θέρμη-Θεσσαλονίκη, email: ppane@egnatia.gr

² Δρ. Πολ. Μηχ/κός, Γενικός Διευθυντής, Εγνατία Οδός Α.Ε., GR-57001Θέρμη-Θεσσαλονίκη, email: irentze@egnatia.gr.

³ Διπλ. Μηχ/κός Περιβάλλοντος, MSc, Τμήμα Μηχ/κών Περιβάλλοντος Δ.Π.Θ., GR-67100 Ξάνθη, email: kliolios@env.duth.gr.

dynamic characteristics of the bridges are identified and then their dynamic models are updated such as to fit the experimentally identified properties. Useful conclusions are also presented for supporting the final structural evaluation of the bridges and the decision of the extent and the type of repairs.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ενόργανη παρακολούθηση των δομικών κατασκευών είναι μία συμπληρωματική μέθοδος δομικού ελέγχου τους, που μπορεί να υποστηρίξει την επαρκή, έγκαιρη και οικονομική συντήρησή τους με στόχο την ενίσχυση της ανθεκτικότητάς τους στον χρόνο. Υλοποιείται με δίκτυα ειδικών οργάνων (αισθητήρων), που εγκαθίστανται στην επιφάνεια ή ενσωματώνονται στην μάζα του φορέα των κατασκευών (Σχήμα 1.). Ο στόχος είναι η καταγραφή, με ειδικές καταγραφικές μονάδες, βασικών παραμέτρων της μηχανικής απόκρισης των δομικών κατασκευών, όπως η επιτάχυνση, η παραμόρφωση και η μετακίνηση, υπό συνήθεις και σεισμικές δράσεις. Η καταγραφή αυτή περιλαμβάνει την αρχική μέτρηση, όπου αυτή είναι διαθέσιμη κατά την έναρξη της λειτουργίας τους, και τις περιοδικές μετρήσεις (με συχνότητα μηνών ή ετών).



Σχήμα 1. Αισθητήρες δυναμικής μέτρησης: (α) παραμόρφωσης, (β) μετακίνησης αρμού

Η ως άνω ενόργανη παρακολούθηση συνδυάζεται με/και συμπληρώνει τις ακόλουθες κύριες μεθόδους δομικού ελέγχου, που εφαρμόζονται για τις γέφυρες από σκυρόδεμα της Εγνατίας Οδού:

1. Οπτική επιθεώρηση.

Ο εξ'επαφής λεπτομερής οπτικός έλεγχος όλων των δομικών και λειτουργικών στοιχείων των γεφυρών από σκυρόδεμα είναι ο παραδοσιακός και ιδιαίτερα χρήσιμος πρωτογενής δομικός έλεγχος. Εξετάζονται τουλάχιστον μία φορά κάθε δύο χρόνια (τακτική κύρια οπτική επιθεώρηση) και εκτάκτως μετά από εντοπισμό ενδείξεων βλάβης (έκτακτη οπτική επιθεώρηση) όλα τα βασικά δομικά στοιχεία της κατασκευής: Βάθρα, ακρόβαθρα, πτερυγότοιχοι, εφέδρανα, φορείς

(κιβωτιοειδείς, πλακοδοκοί, πλάκες), αρμοί διαστολής, πεζοδρόμια. Τα βασικά δομικά στοιχεία ελέγχονται εξ'επαφής για τις ακόλουθες περιβαλλοντικές και άλλες επιδράσεις: ρηγματώσεις, επιφανειακές φθορές (αποφλοίωση, απολέπιση, εξάνθηση, αποχρωματισμός, διόγκωση κ.α.), οξείδωση, απώλεια διατομής, διαρροή ή θραύση οπλισμού, μη αναμενόμενη τοπική ή συνολική παραμόρφωση - βλ. π.χ. Σχήμα 2(α).



Σχήμα 2. Αποτελέσματα οπτικής επιθεώρησης: (α) Απώλεια διατομής οπλισμού λόγω οξείδωσης, (β) Υποσκαφή μεσοβάθρου

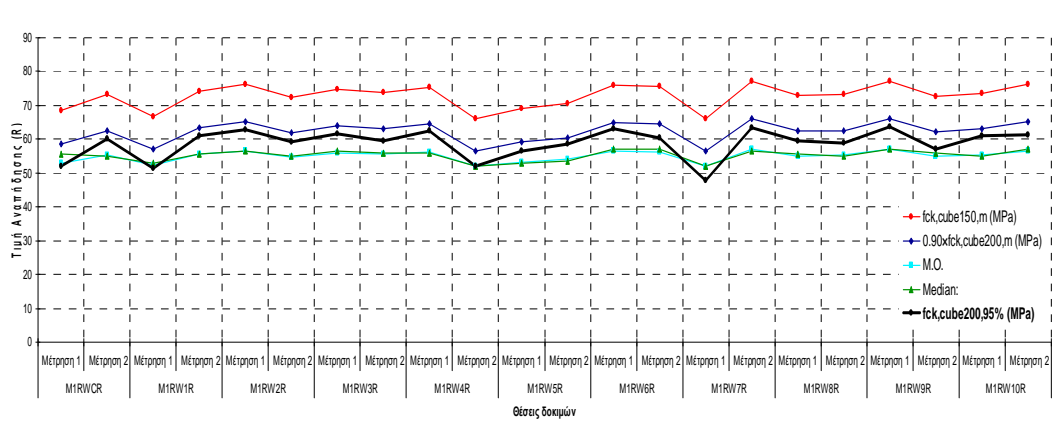
Σημαντικές ενδείξεις, που αφορούν εμμέσως στη δομική ακεραιότητα των γεφυρών και καταγράφονται χωριστά, είναι π.χ.:

- (1). Η υποσκαφή, λόγω πλημμυρικών παροχών, των επιφανειακών ή βαθειών θεμελιώσεων- βλ. Σχήμα 2(β).
- (2). Οι στροφές και καθιζήσεις των βάθρων, ακροβάθρων και πτερυγότοιχων (γέφυρες).
- (3). Οι μετακινήσεις – παραμορφώσεις των στηθαίων, κιγκλιδωμάτων, συλλεκτήριων αποχετευτικών αγωγών και εν γένει των μη δομικών συστημάτων εκ της παραμόρφωσης του φορέα στον οποίο αναρτώνται ή πακτώνονται.

Τα ευρήματα τοπικών βλαβών της οπτικής επιθεώρησης είναι αυτά που καλείται να ερμηνεύσει η ενόργανη επιθεώρηση που ακολουθεί, κυρίως ως προς την επιρροή των τοπικών βλαβών στην συνολική δομική ακεραιότητα του δομικού στοιχείου ή του φορέα.

2. Μη καταστροφικοί έλεγχοι σκυροδέματος

Η κρουσιμέτρηση - σχετ. Σχήμα 3 -και η μέτρηση της ταχύτητας διάδοσης των υπερήχων δίνουν χρήσιμες πληροφορίες για την σκληρότητα, την αντοχή και το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος και σε συνδυασμό με περιορισμένης έκτασης συμβατικούς ελέγχους (πυρήνες) αποτελούν αρκετά αξιόπιστη πειραματική εκτίμηση της ομοιογένειας και της μέσης τιμής των ιδιοτήτων αυτών.



Σχήμα 3. Αποτελέσματα κρουσιμέτρησης κατά μήκος του φορέα της γέφυρας Γ10, κατηγορίας αντοχής σκυροδέματος B45, στο τμήμα 5.1. (Πολύμυλος-Λευκόπετρα) της Εγνατίας Οδού (60 μετρήσεις/σπόνδυλο).

Είναι απαραίτητο και ιδιαίτερα χρήσιμο να έχουν προσδιορισθεί οι παραπάνω ιδιότητες ώστε τυχόν διαφορές μεταξύ της μηχανικής απόκρισης των ενόργανων μετρήσεων και του μοντέλου να μπορούν ευκολότερα και πιο αξιόπιστα να αξιολογηθούν.

3. Γεωδαιτική παρακολούθηση μετακινήσεων και μικρομετακινήσεων.

Αυτή γίνεται με χρήση τοπογραφικών οργάνων, χωροβάτη, γεωδαιτικού σταθμού ή και σαρωτή Laser και με τη βοήθεια εγκατεστημένων τοπογραφικών στόχων, ανακλαστήρων. Η συσχέτιση των τοπογραφικών μετρήσεων με τις ενόργανες μετρήσεις αφορά κυρίως στην στατική συμπεριφορά των κατασκευών υπό φορτία που ασκούνται «αργά», με αμελητέα χρονική διακύμανση της τιμής τους.

ΑΝΑΓΚΑΙΟΤΗΤΑ ΕΝΟΡΓΑΝΗΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΓΙΑ ΓΕΦΥΡΕΣ ΑΠΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Η χάραξη σύγχρονων αυτοκινητοδρόμων σε δύσκολο ορεινό ανάγλυφο, όπως συμβαίνει σε πολλά τμήματα της Εγνατία Οδού, απαιτεί την κατασκευή χαραδρογεφυρών και κοιλαδογεφυρών μεγάλου μήκους, με πολύ ψηλά βάθρα. Η ορθή χρήση των σύγχρονων μεθόδων και λογισμικών Στατικής και Δυναμικής Ανάλυσης και η πιστή εφαρμογή των Κανονισμών οδηγεί εν γένει σε ασφαλή σχεδιασμό για τις φορτίσεις και τους καταναγκασμούς που θα επιβληθούν στην γέφυρα κατά τη διάρκεια της ζωής της. Ωστόσο οι **ακόλουθοι παράγοντες** μπορούν να μεταβάλουν **δυσμενώς** τις αρχικές προβλέψεις, και συνεπώς πρέπει η επίδρασή τους στη λειτουργική και δομική ακεραιότητα της γέφυρας να

αποτιμάται μέσω συμπληρωματικών δομικών ελέγχων, όπως της ενόργανης παρακολούθησης:

- Η έκθεση της γέφυρας σε **ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες**, ιδιαίτερα όταν συνυπάρχουν εκτεταμένες κακοτεχνίες και κατασκευαστικές αποκλίσεις, είναι ένας παράγοντας πρόωρης εκδήλωσης σημαντικών φθορών (π.χ. ενανθράκωση του σκυροδέματος, απώλεια διατομής οπλισμού λόγω οξειδωσης). Ως γνωστόν, η σημαντική απώλεια διατομής οπλισμού προκαλεί ρηγμάτωση και απώλεια διατομής σκυροδέματος. Συνεπώς επηρεάζει την ακαμψία του φορέα της γέφυρας.
- Κατά τον σχεδιασμό γεφυρών με **πολύ μεγάλα** χαρακτηριστικά (ύψος βάθρων, μήκος ανοίγματος και συνολικό μήκος, βάθος θεμελίωσης), ή γεφυρών με μη κανονική κατανομή μάζας και ακαμψίας, η αυτονόητη συμμόρφωση με τους εν ισχύ κανονισμούς μπορεί να μη είναι αρκετή για την ασφαλή πρόβλεψη της συμπεριφοράς τους στην πράξη. Έτσι απαιτείται συνήθως, ιδιαίτερα για αυτές τις γέφυρες, η αρχική και στην συνέχεια η τακτική ενόργανη παρακολούθηση τους, ώστε να μετρηθεί, να αναλυθεί και να γίνει κατανοητή η **πραγματική** μηχανική συμπεριφορά τους και η συμμόρφωση με τις προβλέψεις του σχεδιασμού τους.
- Σε γέφυρες που οι φορείς τους στηρίζονται μέσω **εφεδράνων** σε βάρθα και ακρόβαθρα, οι ιδιότητες αυτών των συσκευών (π.χ. δυστένεια, δυστημψία) είναι δεσπόζουσες για την στατική και δυναμική συμπεριφορά των γεφυρών. Στην περίπτωση, λοιπόν, χρήσης τέτοιων συσκευών **σεισμικής μόνωσης** είναι πολύ κρίσιμη η πιθανή μεταβολή ή απώλεια των βασικών ιδιοτήτων τους με τον χρόνο (π.χ. απόσβεση, ακαμψία κ.α.). Συνεπώς, για την έγκαιρη διάγνωση της τυχόν δυσμενούς μεταβολής των ιδιοτήτων των συσκευών αυτών, είναι χρήσιμη η ενόργανη παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς των γεφυρών.
- Οι **περιορισμένης μετέντασης** φορείς γεφυρών, παρ'όλο που εκ της φύσεως της επιβολής της προέντασης υποβάλλονται εξ' αρχής σε σημαντικές τάσεις όχι μακριά από τα όρια διαρροής των υλικών τους (υπερτάνυση, προθλιβόμενη ίνα), δεν παύουν να κινδυνεύουν από κακή εφαρμογή της τσιμεντένεσης των σωλήνων προέντασης, χρόνιες απώλειες σημαντικά μεγαλύτερες από τις προβλεπόμενες, κ.α. Τέτοιες αλλαγές πρέπει (και υπό προϋποθέσεις μπορούν) να διαγνωσθούν από την ενόργανη παρακολούθηση των προεντεταμένων φορέων.
- Οι **γεωτεχνικές συνθήκες θεμελίωσης**, ιδιαίτερα των εκτεταμένων και βαθειών θεμελιώσεων, λαμβάνονται υπόψη στον σχεδιασμό με χρήση υψηλών συντελεστών ασφαλείας. Η πραγματική, όμως, επιρροή τους στην μηχανική συμπεριφορά των βάθρων, στύλων, τοιχείων είναι απαραίτητο να αποτιμηθεί πειραματικά (βαθμός στατικής και δυναμικής πάκτωσης) με ενόργανη παρακολούθηση της κατασκευής. Υπενθυμίζεται ότι η δυναμική συμπεριφορά των γεφυρών επηρεάζεται, ως γνωστόν, σημαντικά λόγω της αλληλεπίδρασης με το έδαφος.
- Η αξιόπιστη εκτίμηση του **σεισμικού κινδύνου** μπορεί να γίνει μέσω της ενόργανης παρακολούθησης. Έτσι μπορούν να εκτιμηθούν π.χ. η συχνότητα και η ένταση σεισμικού κραδασμού, καθώς και η πιθανή

γεινίαση με ενεργό σεισμικό ρήγμα, σε συνδυασμό με την αποτίμηση της επιρροής παραγόντων δυσμενούς αλλοίωσης της έντασης, του συχνοτικού περιεχομένου και του συγχρονισμού του σεισμικού κραδασμού στη βάση των βάθρων, (όπως το γεωλογικό υπόστρωμα και το τοπογραφικό ανάγλυφο κατά μήκος της γέφυρας).

Για την αξιόπιστη, λοιπόν, γνώση της επιρροής των παραπάνω παραγόντων στη δομική ακεραιότητα και στη δομική διακινδύνευση των γεφυρών, απαιτείται η αρχική και η συχνή ή μόνιμη ενόργανη παρακολούθηση της μηχανικής απόκρισης τους και της απόκρισης του εδάφους θεμελίωσής τους σε σεισμό.

ΤΥΠΟΣ - ΔΙΑΤΑΞΗ - ΘΕΣΕΙΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΕΝΟΡΓΑΝΗΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΓΕΦΥΡΩΝ ΑΠΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Ακολουθώς παρουσιάζονται βασικά σημεία των **γενικών προδιαγραφών** που τηρήθηκαν για τη διάταξη των διαφόρων τύπων αισθητήρων μόνιμης ενοργάνωσης των γεφυρών της Εγνατίας Οδού. Βασικό κριτήριο της ενοργάνωσης αυτής ήταν το χαμηλό κόστος, χωρίς να μειώνεται η ακρίβεια και η αποτελεσματικότητα της, μέσω της μόνιμης εγκατάστασης ενός ελάχιστου αριθμού αισθητήρων, σε διαφορετικές διατάξεις αναλόγως των δομικών τύπων των γεφυρών. Στην περίπτωση αναγνώρισης βλαβών ή άλλων δομικών μεταβολών είναι δυνατή η πύκνωση αυτών των διατάξεων με χρήση έκτακτου κινητού εξοπλισμού που διαθέτει η εταιρεία.

I. Θεμελίωση, κορμός, κεφαλή βάθρων.

Ένα ή δύο τριαξονικά επιταχυνσιόμετρα τοποθετούνται στις βάσεις μεσοβάθρων, αναλόγως του μήκους, της τοπογραφίας και της γεωτεχνικής μηκοτομής. Επίσης, οριζόντια επιταχυνσιόμετρα τοποθετούνται στις κεφαλές των βάθρων που φέρουν (μέσω ελαστομεταλλικών εφεδράνων – μονωτήρων) τον φορέα. Τα επιταχυνσιόμετρα των βάθρων πρέπει να ενεργοποιούνται και να καταγράφουν ταυτόχρονα και συγχρονισμένα με τα επιταχυνσιόμετρα, μετακινησιόμετρα, παραμορφωσιόμετρα και ανεμόμετρα του φορέα.

II. Φορείς γεφυρών

Ο φορέας της γέφυρας είναι συνήθως προεντεταμένος και δουλεύει υπό τα καθημερινά λειτουργικά φορτία, αλλά και υπό σημαντικά σεισμικά φορτία, χωρίς να ρηγματώνεται (γενικώς γραμμική η σχέση έντασης – παραμόρφωσης). Συνεπώς θεωρήθηκε ιδιαίτερα χρήσιμη η εγκατάσταση δύο παραμορφωσιόμετρων ανά διατομή (ένα στην κάτω παρειά άνω πέλματος και ένα στην άνω παρειά κάτω πέλματος), σε θέσεις max/min ροπής λόγω κινητών και σεισμού (πέριξ της στήριξης, κλείδα, άνοιγμα) – βλ. Σχήμα 4. Τέλος, τριαξονικά επιταχυνσιόμετρα τοποθετήθηκαν, μετά από μελέτη των ιδιομορφών των γεφυρών, σε θέσεις στους κορμούς ή στο κάτω πέλμα του φορέα.



Σχήμα 4. (α), (β) Ανακλαστήρες, (γ) Τριαξονικά επιταχυνσιόμετρα κιβωτιοειδούς φορέα

Πίνακας 1: Αισθητήρες ενοργάνωσης (τύπος, αριθμός) 12 γεφυρών της Εγνατίας Οδού

	Τμήμα	Επιταχυν- σιόμετρα	παραμορφωσιό μετρα/θερμόμετρα	Αρμό μετρα	Ανεμό μετρο
Κρυσταλλοπηγής	1.1.6	20	22	2	-
Γ4	1.1.6	12	20	2	-
Γ7	1.1.6	12	14	2	-
Μετσόβου	3.2	12	14	2	1
Γ1	3.5.1	6	8	2	-
Γ7	3.5.1	9	14	2	-
Γ8	3.5.2	9	14	2	-
Γ2	4.1.1s	12	14	2	1
Γ3	4.1.2s	30	48	2	-
Βενέτικου	4.1.3s	21	30	2	-
Γ2	4.1.3s	21	30	2	-
Γ3	4.1.3s	18	24	2	-

Τα προηγούμενα εφαρμόζονται για την μόνιμη ενοργάνωση δεκάδων γεφυρών κατά μήκος του άξονα της Εγνατίας Οδού, στο πλαίσιο εργασιών κατασκευής ή συντήρησής τους. Οι γέφυρες επελέγησαν με κριτήριο το μέγεθός τους, την δομική αντιπροσωπευτικότητα τους και την ζώνη σεισμικότητας στην οποία ανήκουν. Στον **Πίνακα 1** δίνονται στοιχεία για τον τύπο και τον αριθμό των αισθητήρων που εγκαταστάθηκαν σε δώδεκα χαρακτηριστικές γέφυρες της Εγνατίας Οδού.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ, ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΕΝΟΡΓΑΝΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Για την επεξεργασία, και κυρίως για την αναλυτική αξιολόγηση των ενόργανων μετρήσεων των παραμέτρων μηχανικής απόκρισης των ενοργανωμένων γεφυρών

της Εγνατίας Οδού, χρησιμοποιούνται μεθοδολογίες και ειδικά λογισμικά επεξεργασίας σήματος, αναγνώρισης ιδιομορφών, αναθεώρησης επιλεγμένων τιμών ακαμψίας και μάζας του στατικού και δυναμικού μοντέλου των γεφυρών. Ο στόχος είναι η **διάγνωση μεταβολών** είτε ως προς την μελέτη είτε ως προς αρχικές ή προηγούμενες μετρήσεις. Εκτενείς σχετικές παρουσιάσεις της θεωρίας και των λογισμικών αυτών έχουν γίνει σε προηγούμενες εργασίες, βλ. Πανέτσος κ.ά. (2006, 2008), Ntotsios et al (2009a,b).

Εδώ τονίζεται ότι στην ενόργανη επιθεώρηση των γεφυρών της Εγνατίας Οδού έχει δοθεί ιδιαίτερο βάρος στην παρακολούθηση αφενός καθολικών παραμέτρων μηχανικής απόκρισης, όπως είναι η επιτάχυνση, και αφετέρου στην πειραματική αναγνώριση καθολικών χαρακτηριστικών του φορέα τους, όπως οι ιδιοσυχνότητες και οι ιδιομορφές. Ο λόγος είναι ότι η μέτρηση επιταχύνσεων είναι πιο αξιόπιστη και γρήγορη και δεν απαιτεί γνώση της διέγερσης (ασθενείς περιβαλλοντικές ταλαντώσεις). Οι περιβαλλοντικές ταλαντώσεις είναι πάντα παρούσες και μετρήσιμες (άνεμος, κυκλοφορία). Η σαφώς πολυπλοκότερη και πιο απαιτητική φάση της αναγνώρισης των ιδιοσυχνοτήτων – ιδιομορφών υποστηρίζεται από τα ως άνω λογισμικά.

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΩΝ ΚΑΙ ΔΟΜΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΓΕΦΥΡΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΕΝΟΡΓΑΝΗ ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΕΩΝ

Στη συνέχεια παρουσιάζονται σε πίνακες συνοπτικά τα δυναμικά χαρακτηριστικά και οι βάσει αυτών προσδιορισμένες δομικές ιδιότητες (ακαμψία) των αναθεωρημένων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων για συνολικά επτά (7) χαρακτηριστικές γέφυρες της Εγνατίας Οδού: 1) Αριστερός και 2) Δεξιός κλάδος γέφυρας Μετσόβου, 3) Γ9 και 4) Γ10 Πολύμυλου - Λευκόπετρας, 5) Γ2 Παράκαμψης Καβάλας, 6) Δεξιός κλάδος ποταμογέφυρας Αξιού και 7) Αριστερός κλάδος ποταμογέφυρας Στρυμόνα. Οι τιμές των σχετικών πινάκων αναγνωρίστηκαν και προσδιορίστηκαν βάσει των ενόργανων μετρήσεων των τελευταίων 8 ετών. Οι μετρήσεις επιτάχυνσης έχουν αναλυθεί με το ειδικό λογισμικό που ανέπτυξε η εταιρεία (ΑΣΠΡΟΓΕ, 2007) για τον προσδιορισμό των ιδιομορφικών και δομικών χαρακτηριστικών των γεφυρών. Στόχος είναι η εκτίμηση της παρούσας δομικής κατάστασης των γεφυρών αυτών, η οποία θα αποτελέσει στο μέλλον τη βάση για την αποτίμηση της κατάστασης άλλων γεφυρών του ίδιου ή παρόμοιου τύπου.

Α. Πειραματική αναγνώριση ιδιομορφικών χαρακτηριστικών

Στον **Πίνακα 2** που ακολουθεί παρουσιάζονται οι μέσες τιμές των ιδιοσυχνοτήτων των 5 γεφυρών της Εγνατίας Οδού. Οι τιμές αυτές έχουν αναγνωρισθεί με βάση τις λειτουργικές και σεισμικές διεγέρσεις.

Πίνακας 2.: Αναγνωρισμένες τιμές των ιδιοσυχνοτήτων (σε Hz) για 5 γέφυρες της Εγνατίας Οδού.

Ιδιομορφή	Αρ. κλάδος Μετσόβου Κατασκευή	Δεξ. κλάδος Μετσόβου Κατασκευή	Αρ. κλάδος Μετσόβου Λειτουργία	Γ10 Πολύμυλου	Γ2 Καβάλας	Γ9 Πολύμυλου	
						Ambient	Σεισμός
1 ^η Εγκάρσια	0.16	0.16	0.28	0.89	0.81	1.13	1.29
2 ^η Εγκάρσια	0.62	0.62	0.44	1.87	1.61	1.20	1.30
3 ^η Εγκάρσια	1.31	1.30	0.57	3.57		2.22	2.56
4 ^η Εγκάρσια	1.72	1.47	0.64	6.04		4.10	4.23
5 ^η Εγκάρσια	2.23	2.59	0.71			6.78	7.24
6 ^η Εγκάρσια	-	-	1.03				
1 ^η Καμπτική	0.30	0.30	0.66	1.43	3.40	2.13	2.20
2 ^η Καμπτική	0.69	0.69	1.09	2.72	3.46	3.07	3.20
3 ^η Καμπτική	0.91	0.91	1.48	3.47	3.47	6.66	6.89
4 ^η Καμπτική	2.41	2.29	1.86	4.51	3.51		
5 ^η Καμπτική	3.17	3.24	2.08	6.79			
6 ^η Καμπτική			2.83	7.67			
1 ^η Διαμήκης	-				1.29		
1 ^η Στρεπτική	4.89	4.91		5.85			

Στη συνέχεια και στον **Πίνακα 3** παρουσιάζονται οι μέσες τιμές των συντελεστών απόσβεσης για τις προηγούμενες γέφυρες. Στον **Πίνακα 4** παρουσιάζονται οι τιμές των ιδιοσυχνοτήτων και των συντελεστών απόσβεσης των δύο ποταμογεφυρών Στρυμόνα και Αξιού. Οι τιμές αυτές έχουν αναγνωρισθεί με βάση τις λειτουργικές διεγέρσεις. Ειδικότερα, στον Πίνακα 4 αναφέρονται προς σύγκριση τα αποτελέσματα των τιμών δυσκαμψίας των εφεδράνων, φορέα και βάθρων που προέκυψαν για την γέφυρα Γ9 του Πολύμυλου με βάση την αναθεώρηση μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων σε σεισμικές ταλαντώσεις. Τέλος, στους **Πίνακες 5** και **6** παρουσιάζονται οι τιμές και οι διακυμάνσεις των τιμών των δομικών χαρακτηριστικών των 5 γεφυρών της Εγνατίας Οδού, οι οποίες έχουν αναγνωρισθεί με βάση τις λειτουργικές και σεισμικές διεγέρσεις.

Πίνακας 3: Αναγνωρισμένες (επί τοις εκατό -%) τιμές των συντελεστών απόσβεσης για 5 γέφυρες της Εγνατίας Οδού.

Ιδιομορφή	Αρ. κλάδος Μετσόβου Κατασκευή	Δεξ. κλάδος Μετσόβου Κατασκευή	Αρ. κλάδος Μετσόβου Φορέας	Γ10 Πολύμυλου	Γ2 Καβάλας	Γ9 Πολύμυλου	
						Λειτουργικά φορτία	Σεισμικά φορτία
1 ^η Εγκάρσια	1.05	0.34	0.28	1.65	1.42	2.0	1.8
2 ^η Εγκάρσια	0.60	0.32	0.52	1.65	5.23	5.6	5.9
3 ^η Εγκάρσια	1.28	0.47	1.07	0.97		1.1	3.5
4 ^η Εγκάρσια	0.69	1.25	1.07	0.85		0.8	3.2
5 ^η Εγκάρσια	0.36	0.93	0.30			0.8	1.2
6 ^η Εγκάρσια			0.46				
1 ^η Καμπτική	0.48	0.46	0.55	0.70	0.61	0.6	0.6
2 ^η Καμπτική	0.38	0.21	0.45	1.29	0.71	0.4	0.7
3 ^η Καμπτική	0.59	0.39	0.50	0.87	0.43	0.5	0.6
4 ^η Καμπτική	0.47	0.38	0.75	1.12	0.52		
5 ^η Καμπτική	0.37	0.46	0.37	0.81			
6 ^η Καμπτική			0.61	1.54			
1 ^η Διαμήκης					5.61		
1 ^η Στρεπτική	0.76	0.54					

Πίνακας 4: Αναγνωρισμένες ιδιοσυχνότητες και συντελεστές απόσβεσης των ποταμογεφυρών Αξιού (Π.Α.Θ.Ε. - δεξιός κλάδος) και Στρυμόνα

Ιδιομορφή	Ποταμογέφυρα Αξιού		Ποταμογέφυρα Στρυμόνα	
	Ιδιοσυχνότητες (Hz)	Συντελεστές Απόσβεσης (%)	Ιδιοσυχνότητες (Hz)	Συντελεστές Απόσβεσης (%)
1 ^η καμπτική	3.97	3.87	4.03	2.89
1 ^η στρεπτική	4.09	2.30	4.42	0.86
2 ^η στρεπτική	12.80	1.97	13.04	0.31
2 ^η καμπτική	13.75	1.75	13.18	0.51
3 ^η καμπτική	14.63	1.85	-	-

B. Σύγκριση δομικών χαρακτηριστικών

Στους Πίνακες 5 και 6 παρουσιάζονται κυρίως οι σχετικές τιμές της δυσκαμψίας που αναφέρονται στον φορέα, στους πυλώνες και στα εφέντρανα (όπου υπάρχουν). Για τη γέφυρα του Μετσόβου αναφέρονται οι πολύτιμες αναλύσεις που έγιναν για την φάση κατασκευής με βάση την 1^η καμπτική και την 1^η στροφική ιδιομορφή. Στις ιδιομορφές αυτές το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων της γέφυρας

θεωρείται αξιόπιστο αφού η επιρροή του εδάφους στη δυναμική συμπεριφορά της γέφυρας όσον αφορά τις συγκεκριμένες ιδιομορφές είναι αμελητέα.

Πίνακας 5: Σχετικές τιμές δυσκαμψίας - Αποτελέσματα αναθεώρησης μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων για τις γέφυρες Γ9 Πολύμυλου, Γ10 Πολύμυλου και Γ2 Καβάλας

Παράμετρος	Γ9 Πολύμυλου		Γ2 Καβάλας	Γ10 Πολύμυλου	
Φορέας	λειτουργικά φορτία	σεισμικά φορτία	1.57	καμπτικές μόνο	εγκάρσιες καμπτικές
	1.00-1.10	1.04		1.45-1.60	1.15-1.20
Βάθρα	λειτουργικά φορτία	σεισμικά φορτία	1.63	καμπτικές μόνο	εγκάρσιες καμπτικές
	0.69-0.82	1.55		0.75-1.10	0.84-0.92
Εφέδρανα	λειτουργικά φορτία	σεισμικά φορτία	9.07	-	
	3.35 - 3.55	3.74			

Πίνακας 6: Σχετικές τιμές δυσκαμψίας - Αποτελέσματα αναθεώρησης μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων για τη γέφυρα του Μετσόβου

Παράμετρος	Πρόβολος Μ3			Αριστερός κλάδος Μετσόβου – Ολοκληρωμένος Φορέας
	Αριστερός κλάδος Μετσόβου- Φάση ΔΕ Κατασκευής		Δεξιός κλάδος Μετσόβου- Φάση ΔΕ Κατασκευής	
	1 ^η καμπτική 1 ^η στροφοική	5 χαμηλότερες		
Φορέας	1.57	0.85-0.92	0.85-0.91	0.96 – 1.00
Βάθρα	1.20	1.09-1.15	1.09-1.15	1.00 – 1.29

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την οκταετή εμπειρία της δομικής επιθεώρησης των γεφυρών από σκυρόδεμα της Εγνατίας Οδού προκύπτει ως βασικό συμπέρασμα ότι η **συστηματική ενόργανη επιθεώρηση** των μεγάλων γεφυρών είναι χρήσιμη και **απαραίτητη**, αφενός για την πειραματική αναγνώριση της **μηχανικής συμπεριφοράς** τους και αφετέρου για τον **έγκαιρο εντοπισμό** δυσμενών μεταβολών της λόγω σημαντικών βλαβών. Συνεπώς, η **ενόργανη επιθεώρηση** αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο δομικής αξιολόγησης και λήψης αποφάσεων για την συντήρηση μεγάλων τεχνικών έργων.

Ειδικότερα, τα πρώτα συγκεντρωτικά αποτελέσματα ενόργανης επιθεώρησης δεκάδων γεφυρών, τόσο νέων της Εγνατίας Οδού όσο και φθαρμένων παλαιών, δείχνουν ότι η **ακαμψία του φορέα** είναι, υπό ασθενείς ταλαντώσεις

κυκλοφορίας και ανέμου, **σημαντικά μεγαλύτερη** από την θεωρητική (σχεδιασμού) κατά 10 – 50%. Η **ακαμψία των βάθρων**, όμως, εμφανίζει σημαντική διασπορά και είναι γενικά **μικρότερη** από την αντίστοιχη της θεώρησής τους ως πακτωμένων. Έτσι επαληθεύεται η σημαντική επιρροή του εδάφους θεμελίωσης στη δυναμική συμπεριφορά των γεφυρών. Τέλος, η πειραματική αναγνώριση της μειωμένης ακαμψίας, πιθανόν σε συνδυασμό με μεταβολή της κατανομής της ακαμψίας, είναι μία σημαντική ένδειξη ότι οι φθορές της γέφυρας, οπτικά αναγνωρίσιμες ή μη, επηρεάζουν τη δομική ακεραιότητα της και αποτελεί τεκμήριο άμεσης διορθωτικής ενέργειας επισκευής.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ο τρίτος συν-συγγραφέας (Κ.Λ.) εκφράζει τις ευχαριστίες του προς την ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ Α.Ε. για την δυνατότητα που του δόθηκε, στα πλαίσια σχετικής Μεταπτυχιακής Πρακτικής Άσκησης, να ασχοληθεί, μεταξύ άλλων, και με το θέμα της παρούσας εργασίας.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

ΑΣΠΡΟΓΕ: «Ερευνητικό Πρόγραμμα για την Αντισεισμική Προστασία των Γεφυρών. Τελική Έκθεση», ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ Α.Ε., Θεσσαλονίκη, (2007).

Ε.Νtotsios, C. Papadimitriou, P. Panetsos, G. Karaiskos, K. Perros, P. Perdikaris (2009). “Bridge Health Monitoring system based on vibration measurements”. Bulletin of Earthquake Engineering, No 7: 409-483.

Ε.Νtotsios, C. Karakostas, V. Lekidis, P. Panetsos, I. Nikolaou, C. Papadimitriou, T. Salonikios (2009). “Structural Identification of Egnatia Odos Bridges based on ambient and earthquake induced vibrations”. Bulletin of Earthquake Engineering, No 7: 485-501.

Πανέτσος Π., Ρεντζεπέρης Ι., Λιώλιος Α., (2006) «Σύστημα διαχείρισης της κύριας συντήρησης οδικών γεφυρών από σκυρόδεμα». 15^ο Ελλ. Συνέδριο Σκυροδέματος, Αλεξανδρούπολη.

Πανέτσος Π., Ντότσιος Ε., Παπαδημητρίου Κ. (2008). «Αξιολόγηση της δομικής κατάστασης των γεφυρών βάσει συνδυασμένης οπτικής και ενόργανης επιθεώρησής τους». Πρακτικά 3^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Αντισεισμικής Μηχανικής, Αθήνα.