

Ενόργανη παρακολούθηση παραμορφώσεων γεφυρών από προεντεταμένο σκυρόδεμα με χρήση αισθητήρων οπτικών ινών.

Strain monitoring of post-tensioned bridges using Optical Fibre Bragg Grating sensors.

Παναγιώτης ΠΑΝΕΤΣΟΣ¹, Μανώλης ΧΑΡΑΛΑΜΠΙΑΚΗΣ², Ευάγγελος ΑΣΤΡΕΙΝΙΔΗΣ³

Λέξεις κλειδιά: Ενόργανη παρακολούθηση γεφυρών, Παραμορφώσεις, Αισθητήρες οπτικών ινών, πειραματική αποτίμηση φέρουσας ικανότητας σε κινητά φορτία γεφυρών.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ενόργανης παρακολούθησης παραμορφώσεων γεφυρών από προεντεταμένο σκυρόδεμα με χρήση αισθητήρων οπτικών ινών (Optical Fibre Bragg grating sensors). Για την παρακολούθηση τοπικών παραμέτρων μηχανικής απόκρισης όπως η ορθή παραμόρφωση διατομών του προεντεταμένου φορέα, τοποθετήθηκαν σε δύο γέφυρες της Εγνατίας Οδού (Ε.Ο.), στην γέφυρα Γ3 (τμήμα 9.1, Δερβένι – Ανάληψη) και στην γέφυρα Γ9 (τμήμα 5.1, Πολύμυλος - Λευκόπετρα), αισθητήρες δυναμικής μέτρησης παραμόρφωσης. Ελήφθησαν μετρήσεις παραμόρφωσης από διελεύσεις βαρέων οχημάτων γνωστού βάρους και κατανομής του στους άξονες. Τα τμήματα των μετρημένων χρονοϊστοριών παραμόρφωσης μεταξύ των χρονικών στιγμών εισόδου και εξόδου του υπέρβαρου οχήματος συγκρίθηκαν με τις στατικές γραμμές επιρροής της παραμόρφωσης των ινών των διατομών που εννοργάνωθηκαν. Διαπιστώθηκε ικανοποιητική προσέγγιση πειράματος και μοντέλου ως προς τη θέση της μέγιστης τιμής παραμόρφωσης και ως προς την μορφή τους. Οι μέγιστες πειραματικές τιμές παραμόρφωσης περιβάλλονται ικανοποιητικά από τις θεωρητικές στατικές (επαυξημένες με τον συντελεστή δυναμικής μεγέθυνσης). Ο λόγος της πειραματικής προς τη θεωρητική παραμόρφωση χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της διαθέσιμης φέρουσας ικανότητας των υπόψη γεφυρών σε κινητό φορτίο εκ κυκλοφορίας, απαραίτητης για την αξιολόγηση της λειτουργικής και δομικής κατάστασής τους.

¹ Δρ. Πολ. Μηχ/κος, Προϊστάμενος Τμήματος Συντήρησης Τεχνικών Έργων, Εγνατία Οδός Α.Ε email: ppane@egnatia.gr

² Πολ. Μηχ/κος MSC, Τμήμα Συντήρησης Τεχνικών Έργων, Εγνατία Οδός Α.Ε. email: mharala@egnatia.gr.

³ Δρ. Πολ. Μηχ/κος, CRD O.E. email: vastrin@crd.gr.

ABSTRACT : The results from monitoring the strain of two post-tensioned bridges using Optical Fibre Bragg Grating sensors, are presented in this paper. Two post-tensioned bridge superstructures of Egnatia Odos were instrumented by optical sensors. Strain time histories were measured during the crossing of heavy loaded trucks, over the instrumented bridges. The time intervals of the measured strain time histories between the points of the time respecting to the entrance and the exit of the truck, were compared to the static strain influence lines of the instrumented top and bottom section fibres. A good agreement of the measured strain curves to the theoretical influence lines, in terms of the position of the extreme strain value and of their shape, was observed. The extreme experimental strain values are well enveloped by the extreme theoretical static values (multiplied by the dynamic amplification factor). The ratio of the theoretical to the experimental strain was used for the determination of the live load carrying capacity of the two instrumented bridges, which is required for the evaluation of their structural and functional sufficiency.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η περιοδική τακτική επιθεώρηση των γεφυρών και τεχνικών είναι απαραίτητη για την αξιολόγηση της δομικής και λειτουργικής κατάστασής τους, την έγκαιρη διάγνωση βλαβών και την ορθή επιλογή της μεθόδου, της έκτασης και του χρόνου επισκευής τους, πριν οι φθορές επηρεάσουν την ακεραιότητα των τεχνικών. Καθώς η ηλικία των 675 κατασκευασμένων γεφυρών και τεχνικών της Εγνατίας Οδού μεγαλώνει, αυξάνεται η ανάγκη τακτικής επιθεώρησής τους.

Παράλληλα με την οπτική επιθεώρηση των γεφυρών και τεχνικών της Εγνατίας Οδού, η οποία εφαρμόστηκε με εξ'επαφής σχολαστική επιτόπια οπτική εξέταση όλων των δομικών και λειτουργικών στοιχείων τους, σε εφαρμογή του αναλυτικού εγχειριδίου οπτικής επιθεώρησης από συνεργεία του Τμήματος Συντήρησης Μεγάλων Τεχνικών της εταιρείας, αναπτύχθηκαν και εφαρμόστηκαν διαδικασίες, μεθοδολογίες και τεχνικές ενόργανης παρακολούθησης των μηχανικών παραμέτρων απόκρισής τους σε σεισμό, άνεμο, φορτία κυκλοφορίας (Πανέτσος, 2006, 2008). Τέτοιες μηχανικές παράμετροι είναι η επιτάχυνση, η μετακίνηση και η παραμόρφωση επιλεγμένων θέσεων και διατομών των γεφυρών, οι οποίες μετρώνται μέσω της ενοργάνωσης των γεφυρών με δίκτυα επιταχυνσιομέτρων, μετακινησιομέτρων και παραμορφωσιομέτρων. Στόχος της ενόργανης παρακολούθησης της μηχανικής συμπεριφοράς των γεφυρών είναι, μέσω της καταγραφής της πραγματικής στατικής και δυναμικής συμπεριφοράς τους, η πειραματική αποτίμηση της διαθέσιμης ακαμψίας και αντοχής και η σύγκρισή τους με τις παραδοχές της μελέτης. Επιπλέον η τακτική επανάληψη κατά τη διάρκεια της ζωής του έργου ενόργανων μετρήσεων έχει σκοπό να παρακολουθήσει την εξέλιξη των βασικών αυτών ιδιοτήτων των γεφυρών και εγκαίρως να εντοπίσει και διαγνώσει τυχόν απομειώσεις και σημαντικές αλλαγές που είναι πιθανόν να οφείλονται σε δομικές βλάβες. Οι δομικές βλάβες ιδιαίτερα

κατά την πρώτη εκδήλωσή τους και στη συνέχεια κατά την εξέλιξή τους είναι πολύ δύσκολο να αξιολογηθούν ως προς τις συνέπειες στην δομική και λειτουργική επάρκεια των γεφυρών μόνον με οπτική παρακολούθηση. Σε ορισμένες περιπτώσεις γεφυρών πολύ μεγάλου μήκους και ύψους, όπως πολλές στον άξονα της Εγνατίας Οδού, η οπτική επιθεώρηση είναι ιδιαίτερα δυσχερής και χρονοβόρα ενώ τίθεται υπό αμφισβήτηση η αποτελεσματικότητά της ως προς τον έγκαιρο και ορθό εντοπισμό των δομικών βλαβών.

ΕΝΟΡΓΑΝΩΣΗ ΓΕΦΥΡΩΝ ΤΗΣ ΕΓΝΑΤΙΑΣ ΟΔΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

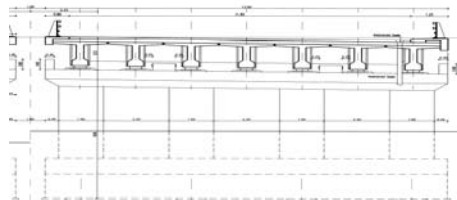
Περιγραφή των ενοργανωμένων γεφυρών

Για την ενόργανη παρακολούθηση των ορθών παραμορφώσεων των προεντεταμένων φορέων γεφυρών, τοποθετήθηκαν σε δύο γέφυρες αντιπροσωπευτικές των δομικών τύπων της πλειοψηφίας των γεφυρών της Εγνατίας Οδού, αισθητήρες στατικής και δυναμικής μέτρησης παραμόρφωσης. Οι δύο δομικώς αντιπροσωπευτικές γέφυρες της Εγνατίας Οδού είναι η γέφυρα T3 (τμήμα 9.1, Δερβένι – Ανάληψη) και η γέφυρα Γ9 (τμήμα 5.1, Πολύμυλος - Λευκόπετρα).

- **Γέφυρα T3 (τμήμα 9.1 της Εγνατίας Οδού)**

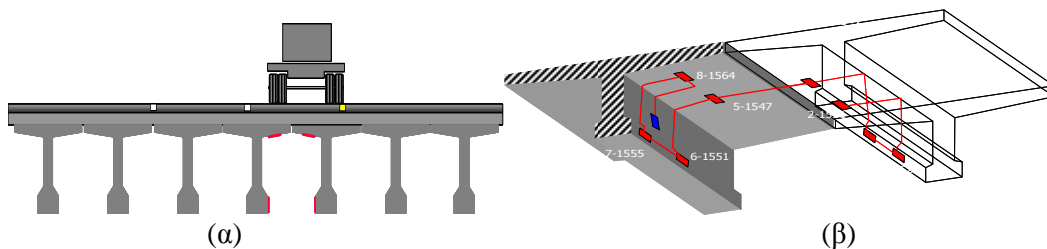
Η γέφυρα βρίσκεται στο τμήμα 9.1 (Δερβένι – Ανάληψη) της Εγνατίας Οδού και φέρει τον αριστερό κλάδο. Έχει φορέα που αποτελείται από 7 προεντεταμένες πλακοδοκούς με χυτή επί τόπου πλάκα καταστρώματος, συνεχόμενη πάνω από τα μεσόβαθρα. Έχει τρία ανοίγματα μήκους 30 μέτρων έκαστο (Σχήμα 1). Ο φορέας μέσω αγκυρούμενων ελαστομεταλλικών εφεδράνων στηρίζεται σε βάθρα αποτελούμενα από τετράστυλα πλαίσια και στα ακρόβαθρα. Ο φορέας έχει λοξότητα 45°. Η κατηγορία αντοχής σκυροδέματος φορέα είναι B35.

Η συγκεκριμένη γέφυρα επελέγη να ενοργανωθεί λόγω του ότι ανήκει στον πρώτο πιο αντιπροσωπευτικό δομικό τύπο γεφυρών της Εγνατίας Οδού. Επίσης επελέγη λόγω της σχετικής απλότητας του φορέα της και λόγω της προσβασιμότητας του φορέα της με απλά μέσα (ελεύθερου ύψος 6,00μ.).



Σχήμα 1. Γέφυρα T3, Τμήμα 9.1, Δερβένι – Ανάληψη της Εγνατίας Οδού .

Τοποθετήθηκαν με επικόλληση αισθητήρες οπτικών ινών σε δύο διατομές στο μέσο της 3^{ης} και 4^{ης} - από την εξωτερική πλευρά της γέφυρας - δοκού, οι οποίες βρίσκονται κάτω από την λωρίδα βραδείας κυκλοφορίας και δέχονται τα μεγαλύτερα φορτία λόγω της διέλευσης βαρέων, υπέρβαρων και ειδικών οχημάτων (Σχήμα 2). Οι αισθητήρες εγκαταστάθηκαν σε δύο διατομές που απέχουν μεταξύ τους 1 μέτρο, κοντά στο μέσο κάθε δοκού και όσο το δυνατό πλησιέστερα στο άνω και κάτω άκρο της δοκού όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2 (β).



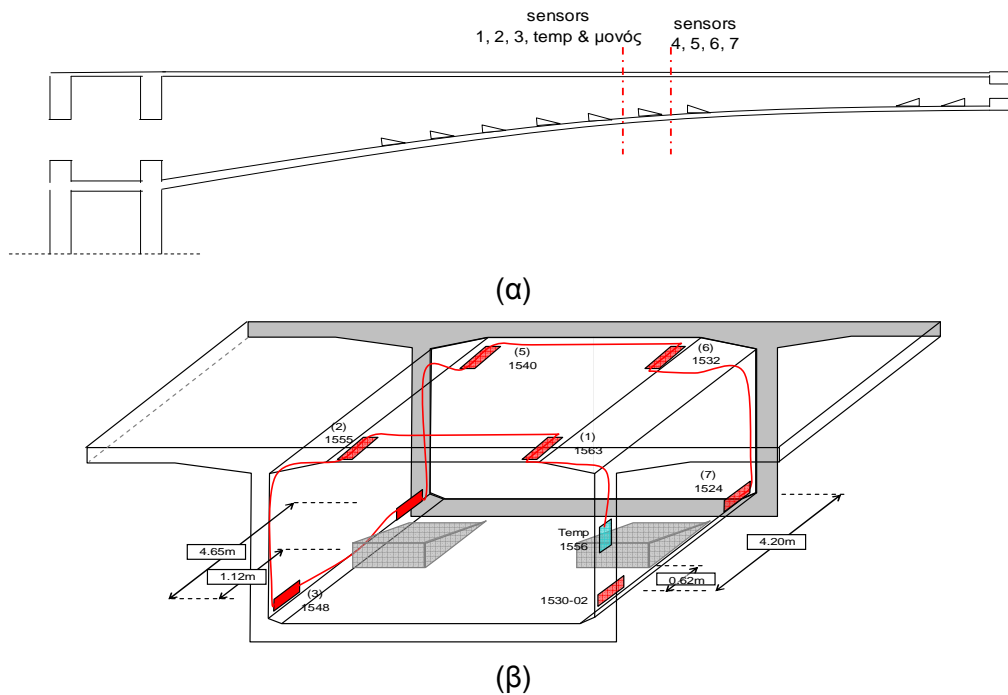
Σχήμα 2.(α) Σχηματική τομή του φορέα ανωδομής της γέφυρας και της θέσης διέλευσης των βαρέων οχημάτων (β) διάταξη επικόλλησης των αισθητήρων στις δύο διατομές.

- **Γέφυρα Γ9 (Τμήμα 5.1. της Εγνατίας Οδού)**

Η γέφυρα βρίσκεται στο τμήμα Πολύμυλος-Λευκόπετρα της Εγνατίας οδού και ανήκει στο δεύτερο πιο αντιπροσωπευτικό δομικό τύπο γεφυρών της Εγνατίας Οδού, κατασκευασμένη με την μέθοδο της συμμετρικής προβολοδόμησης. Η γέφυρα είναι δύο ανοιγμάτων με προεντεταμένο κιβωτιοειδή φορέα, κατηγορίας αντοχής σκυροδέματος B45, παραβολικής μεταβολής του ύψους του, από 4,0μ στο ακρόβαθρο στα 9,0μ στην παρειά στήριξης του στη κεφαλή του βάθρου. Ο φορέας συνδέεται μονολιθικά με το μεσόβαθρο που αποτελείται από δύο εγκάρσιες λεπίδες, και θεμελιώνεται σε φρέαρ. Ο φορέας ολισθαίνει στα ακρόβαθρα σε οδηγούς επαπτομενικής στον άξονα της γέφυρας ολίσθησης που φέρονται από ελαστομεταλλικά εφέδρανα. Το συνολικό μήκος της γέφυρας είναι 170 μ, με δύο ίσα ανοίγματα των 85 μέτρων. Η γέφυρα είναι σε κάτοψη καμπύλη με ακτίνα καμπυλότητας στον άξονα 757μ.

Οι διατομές στις οποίες εγκαταστάθηκαν αισθητήρες βρίσκονται στη περιοχή των θετικών ροπών λόγω κινητού φορτίου, περιοχή που λόγω ερπυσμού επιβαρύνεται μετά το πάτημα του προβόλου και την ανύψωση (jacking) του άκρου του, για την τελική στήριξη στα εφέδρανα. Οι διατομές βρίσκονται σε αποστάσεις 48,88μ (αισθητήρες 1,2,3, θερμοκρασιακός) και 53,70μ (αισθητήρες 4,5,6,7) από τον άξονα του μεσοβάθρου της γέφυρας, (Σχήματα 4 (α), (β)). Οι αισθητήρες εγκαταστάθηκαν έτσι ώστε να καλύπτουν 2 διατομές απόστασης 4.2 περίπου

μέτρων μεταξύ τους και επικολλήθηκαν στην κάτω παρειά της άνω πλάκας του κιβωτιοειδούς φορέα και κοντά στην άνω παρειά της κάτω πλάκας, ακριβώς πάνω από την νεύρωση σύνδεσης κορμών – κάτω πλάκας, όπως φαίνονται στο Σχήμα 4.(β).



Σχήμα 3. (α) Σχηματική τομή κατά μήκος του φορέα ανωδομής της γέφυρας (β) διάταξη επικόλλησης των αισθητήρων στις δύο διατομές.

Αισθητήρες και καταγραφική μονάδα παραμορφώσεων

Χρησιμοποιήθηκαν εμπορικού τύπου οπτικοί αισθητήρες Bragg Gratings ο οποίοι είχαν ενσωματωθεί σε επιθέματα από σύνθετα υλικά (Smart Patch®). Ο αισθητήρας Bragg Grating που ενσωματώνεται στο επίθεμα λειτουργεί στην περιοχή των 1520-1570 nm και είναι ευαίσθητος στη μεταβολή τόσο του μηχανικού όσο και του θερμοκρασιακού πεδίου. Στον πίνακα 1 αναγράφονται τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά στοιχεία του αισθητήρα Smart Patch®.

Με την χρήση επιθέματος εξασφαλίζεται μεγάλη αντοχή σε διάβρωση και οι αισθητήρες καθίστανται συμβατοί για επιφανειακή επικόλληση σε μεταλλικές κατασκευές, σε μπετόν ή σε κατασκευές από σύνθετο υλικό.

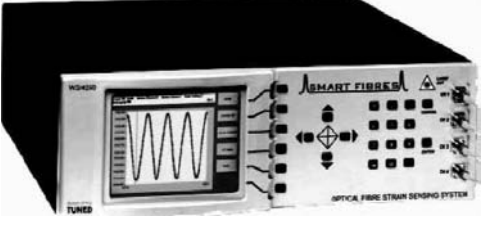
Πίνακας 1: Βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά στοιχεία του αισθητήρα Smart Patch®.

Διακριτική Ικανότητα	0.2 μm	Μήκος Κύματος
	0.2 μstrain	Παραμόρφωση
	0.02 $^{\circ}\text{C}$	Θερμοκρασία
Οπτικό καλώδιο	Διάμετρος 3mm Προστασία PVC – Ίνες Κέβλαρ.	
Τύπος Οπτικής Ίνας	Μονότροπη 9/125 μm - Ακρυλική επένδυση 250 μm	
Τύπος Αισθητήρα	Μήκος Κύματος 1520-1570nm R>90%	
Μήκος Αισθητήρα	0.1 – 10mm	
Εύρος Μέτρησης	$\pm 20.000 \mu\text{strain}$	
Οπτικός σύνδεσμος	FC/APC	

Σύμφωνα με τους κατασκευαστές τους, οι οπτικές ίνες παρέχουν απόλυτη αντοχή στην επίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και μπορούν να υποστηρίξουν μεγάλης διάρκειας ενόργανη παρακολούθηση, λόγω μη φθίνουσας με τον χρόνο ακρίβειας μέτρησης και λόγω μη απαίτησης περιοδικής διακρίβωσης (calibration). Στην εφαρμογή της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε γέφυρα 8 αισθητήρες παραμόρφωσης και 1 αισθητήρας θερμοκρασίας, όλοι συνδεδεμένοι εν σειρά σε μία οπτική ίνα, η οποία κατέληγε σε οπτικό ακροδέκτη (connector) τύπου FC/APC.

Για την καταγραφή της παραμόρφωσης των ινών σκυροδέματος στις θέσεις των 8 αισθητήρων, χρησιμοποιήθηκε οπτικός αποδιαμορφωτής (optical interrogator) τύπου W3/2100, ο οποίος έχει τη δυνατότητα να παρέχει γρήγορες και ακριβείς μετρήσεις από δίκτυο εκατοντάδων οπτικών αισθητήρων (μέχρι 128 ανά κανάλι) εν σειρά τοποθετημένο σε μέχρι τέσσερα κανάλια (συνεχείς οπτικές ίνες). Ο υπόψη αποδιαμορφωτής W3/2100 περιλαμβάνει πηγή laser και ευρυζωνικό ανιχνευτή φάσματος με συχνότητα λειτουργίας 100 Hz. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του αποδιαμορφωτή.

Πίνακας 2: Optical Interrogator W3/2100

Διακριτική Ικανότητα	0.2 μm	Μήκος Κύματος
	0.2 μstrain	Παραμόρφωση
	0.02 $^{\circ}\text{C}$	Θερμοκρασία
Επαναληψιμότητα Μετρήσεων	$\pm 1 \mu\text{m}$	Μήκος Κύματος
	$\pm 0.8 \mu\text{strain}$	Παραμόρφωση
	0.09 $^{\circ}\text{C}$	Θερμοκρασία
Εύρος Μήκους Κύματος	1520-1570 nm	
Αριθμός καναλιών	2	
Μέγιστος Αριθμός αισθητήρων ανά κανάλι	128	
Συχνότητα ανάγνωσης	100 Hz	
Οπτικός σύνδεσμος	FC/APC	
Παροχή ηλεκτρικής ισχύος	24VDC/220VAC	

Μεθοδολογία εγκατάστασης αισθητήρων οπτικών ινών.

Η διαδικασία επικόλλησης των αισθητήρων τύπου Smart Patch® είναι παρόμοια αυτής που ακολουθείται για την επικόλληση επιθεμάτων συνθέτων υλικών σε κατασκευές. Η κόλλα που χρησιμοποιήθηκε για την επικόλληση των αισθητήρων είναι εποξειδική κόλλα δύο συστατικών τύπου SP106, της εταιρείας SP Systems. Για την επιτυχή επικόλληση που είναι πρώτιστης σημασίας για την επιτυχία της ενόργανης μέτρησης παραμορφώσεων, ώστε το πλήρες μήκος του επιθέματος να έχει παντού κοινή παραμόρφωση με το σκυρόδεμα, καθαρίστηκε και λειάνθηκε κατάλληλα η επιφάνεια του σκυροδέματος και εφαρμόστηκε μετά την τοποθέτηση του επιθέματος διάταξη πίεσης της τάξης των 8-10Kg, έως ότου πολυμεριστεί η κόλλα. (Σχήμα 3).



Σχήμα 4. (α) Εξωτερικά επιθέματα προστασίας αισθητήρων (β) Εφαρμογή πίεσης στους αισθητήρες.

ΛΗΨΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Το υπόψη σύστημα καταγράφει τις μετρήσεις του μήκους κύματος σε nm (Wavelength) που ανακλάται από κάθε sensor FBG, με συχνότητα καταγραφής 50 Hz. Η σχέση που συνδέει το ανακλώμενο σήμα με την μεταβολή του strain και την μεταβολή της θερμοκρασίας είναι η παρακάτω:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - \rho_\alpha) \Delta\varepsilon + \lambda_B(\alpha + \xi) \Delta T \quad (1)$$

όπου $\Delta\lambda_B$ η μεταβολή του Bragg wavelength από την θεωρούμενη τιμή αναφοράς, ρ_α = συντελεστής φωτοελαστικότητας, α = συντελεστής παραμόρφωσης της ίνας λόγω θερμοκρασίας και ξ = θερμοοπτικός συντελεστής (λόγω συντελεστή διάθλασης). Στο τυπικό εύρος των $\lambda_B = 1550$ nm οι συντελεστές ευαισθησίας στη παραμόρφωση και στη θερμοκρασία είναι περίπου 1.2 pm/με και 10pm/C. Έτσι ο τύπος επεξεργασίας του σήματος απλοποιείται ως ακολούθως:

$$\Delta\lambda_B = K_\alpha \Delta\varepsilon + K_\beta \Delta T \Rightarrow \Delta\lambda_B = 1.2 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta\varepsilon + 10^{-2} \cdot \Delta T \quad (2)$$

Ο ζητούμενος υπολογισμός των παραμορφώσεων πραγματοποιείται με την βοήθεια του παρακάτω τύπου:

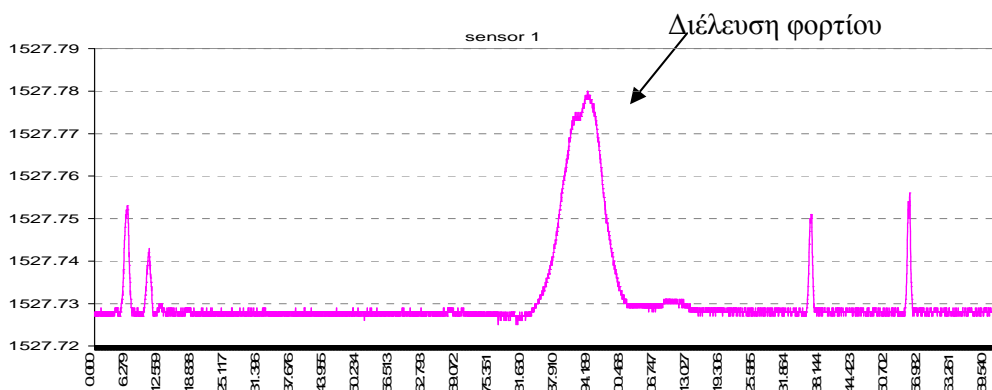
$$\Delta\epsilon = (\Delta\lambda_B - 10^{-2} \cdot \Delta T) / 1.2 \cdot 10^{-3} \quad (3)$$

Η μεταβολή της θερμοκρασίας λαμβάνεται υπόψη εφόσον λαμβάνει χώρα τέτοια μεταβολή στο χρονικό διάστημα που διεξάγονται οι μετρήσεις και η επίδρασή της υπολογίζεται με τη μέγιστη ακρίβεια από την μεταβολή ως προς την θέση ηρεμίας του αντίστοιχου αισθητήρα ($\Delta\lambda_{temp}$). Έτσι ο τελικός τύπος υπολογισμού των παραμορφώσεων δίνεται ως εξής:

$$\Delta\epsilon = (\Delta\lambda_B - \Delta\lambda_{temp}) / 1.2 \cdot 10^{-3} \quad (\mu\epsilon) \quad (4)$$

Στην συγκεκριμένη εφαρμογή στόχος ήταν η μικρής διάρκειας παρακολούθηση των παραμορφώσεων λόγω διέλευσης ζυγισμένου οχήματος. Στη μικρή διάρκεια των μετρήσεων που ελήφθησαν ως παραμόρφωση αναφοράς θεωρήθηκε η θέση ηρεμίας του φορέα και αυτή προσδιορίστηκε με στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων.

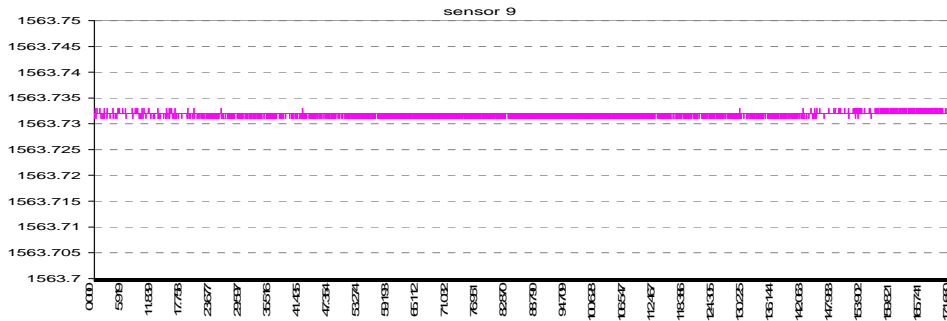
Στο ακόλουθο σχήμα 4 φαίνεται η καταγραφή των μετρήσεων που ελήφθησαν από τους αισθητήρες της τρίτης δοκού της γέφυρας T3, διάρκειας 3 ωρών περίπου. Στο χρονικό διάστημα αυτό διακρίνονται οι διελεύσεις 5 βαρέων οχημάτων μεταξύ των οποίων βρίσκονταν και το ζυγισμένο φορτηγό των 60 τόνων, που χρησιμοποιήθηκε ως φορτίο για την εξαγωγή συμπερασμάτων.



Σχήμα 5. Γραφικές παραστάσεις της καταγραφής του μήκους κύματος όπως ανακλάται από τον αισθητήρα sensor1

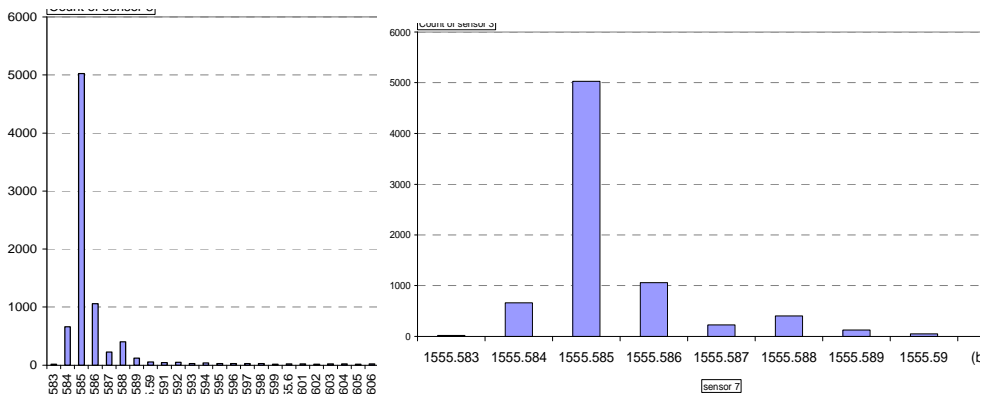
Από την παρατήρηση των μετρήσεων διαπιστώνεται πως η θεωρητική ευαισθησία του συγκεκριμένου συστήματος είναι της τάξης των 0,001 nm που αντιστοιχεί σε 0,833μstrain. Η μεταβολή της θερμοκρασίας είναι αμελητέα στο χρονικό διάστημα των μετρήσεων και οι μόνες διακυμάνσεις που εντοπίζονται οφείλονται

στην ευαισθησία του συστήματος, οπότε οι αντίστοιχες μετρήσεις δεν ελήφθησαν υπόψη στην επεξεργασία (σχήμα 5)



Σχήμα 6. Γραφική παράσταση της καταγραφής του μήκους κύματος θερμοκρασιακού αισθητήρα

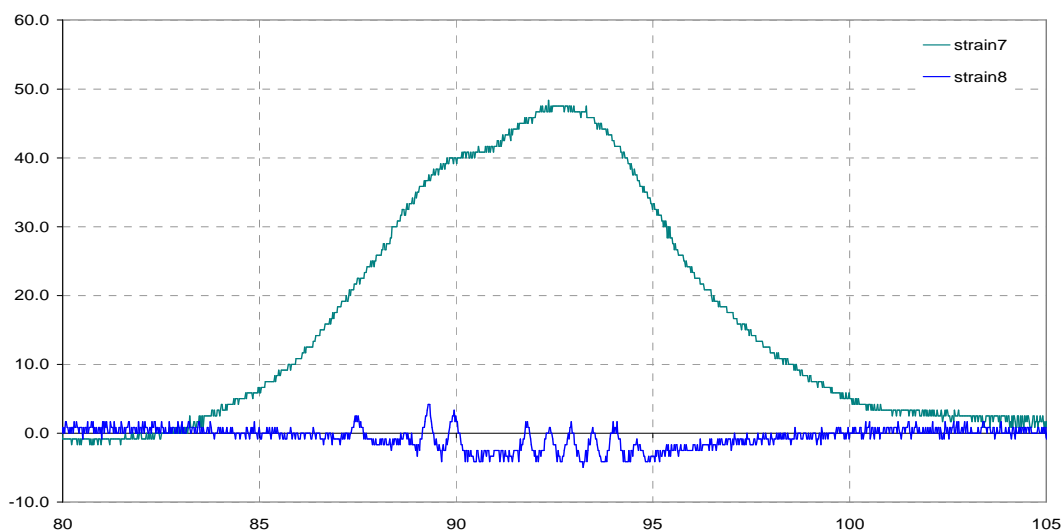
Η εξακρίβωση της τιμής ηρεμίας για κάθε αισθητήρα λαμβάνεται μέσω στατιστικής επεξεργασίας των τιμών. Παρακάτω, (Σχήμα 6), φαίνεται η κατανομή των τιμών του μήκους κύματος στον αισθητήρα 7 (μέτρησης βράχυνσης της 4^{ης} δοκού της γέφυρας T3) για όλο το χρονικό διάστημα παρακολούθησης καθώς και για ένα διάστημα όπου δεν υπήρξε διέλευση οχημάτων στην γέφυρα. Εύκολα διαπιστώνεται πως η τιμή ηρεμίας του αισθητήρα, στη συγκεκριμένη κατάσταση της γέφυρας είναι τα 1555,585 nm.



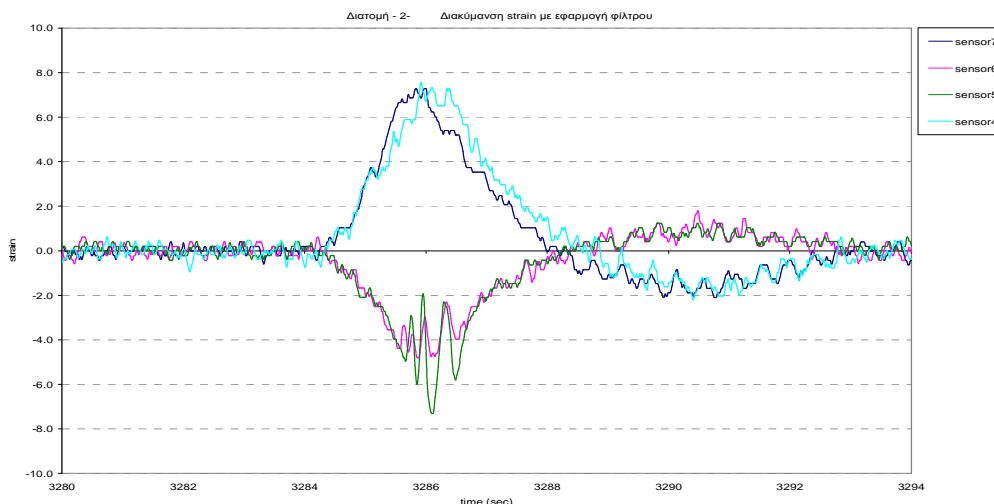
Σχήμα 7. Κατανομή τιμών του αισθητήρα 7 α) σε χρονικό διάστημα 3 ωρών β) σε επιλεγμένο χρονικό διάστημα ηρεμίας.

Σύμφωνα με την παραπάνω μεθοδολογία επεξεργάστηκαν και δίνονται στα ακόλουθα σχήματα 8 και 9 οι τιμές ανηγμένων παραμορφώσεων των αισθητήρων μέτρησης παραμόρφωσης των γεφυρών T3 και Γ9, αντίστοιχα, κατά τη διάρκεια διέλευσης του ζυγισμένου οχήματος των 60 τόνων.

Στο σχήμα 8 φαίνεται η πολύ μικρή τιμή των παραμορφώσεων βράχυνσης λόγω της θέσης των άνω αισθητήρων κοντά στον κεντροβαρικό άξονα (στην κάτω παρειά του άνω πέλματος των δοκών της T3) της τάξης των (-)4 μstrain , όταν η ταυτόχρονη μέγιστη τιμή μήκυνσης των κάτω αισθητήρων (παρειά κάτω πέλματος δοκού) είναι της τάξης των (+)48 μstrain . Η μορφή της καμπύλης διακύμανσης των βραχύνσεων του άνω πέλματος, με έντονες αυξομειώσεις πολλαπλάσιες της μέσης τιμής, υποδηλώνει πιθανόν μη αξιόπιστη μέτρηση των βραχύνσεων λόγω μη γραμμικής συμπεριφοράς του επιθέματος υπό θλίψη και γενικότερα αδυναμίας αξιόπιστης καταγραφής βραχύνσεων. Παρατηρούμε στο ίδιο σχήμα το ιδιαίτερα μικρό δυναμικό τμήμα της μήκυνσης του κάτω πέλματος (οι μικρές αυξομειώσεις πάνω και κάτω από την καμπύλη χρονικής διακύμανσης της στατικής παραμόρφωσης), λόγω και της μικρής ταχύτητας διέλευσης του φορτηγού (5km/h), που δεν επιχειρείται να προσδιορισθεί διότι είναι δύσκολο να διαχωρισθεί από τον θόρυβο του σήματος.



Σχήμα 8. Παραμορφώσεις (με) της άνω και κάτω παρειάς της 3^{ης} δοκού της γέφυρας T3 (διέλευση φορτηγού 60τόνων), αισθητήρες 7 και 8 (άνω, κάτω πέλμα δοκού, αντίστοιχα).

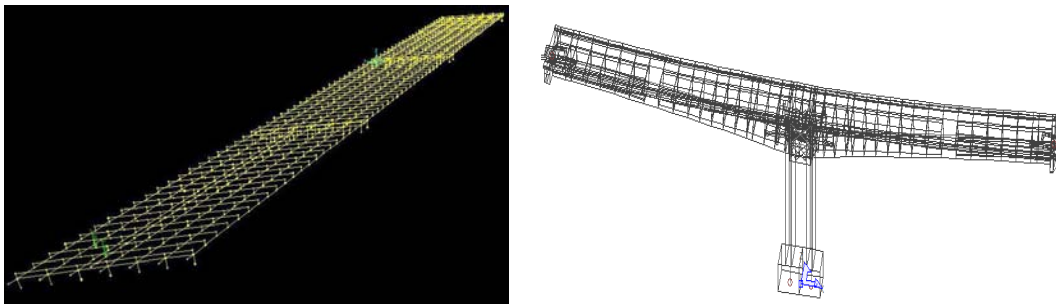


Σχήμα 9. Παραμορφώσεις (με) άνω και κάτω πέλματος κιβωτιοειδούς φορέα της γέφυρας Γ9 (διέλευση φορτηγού 60τόνων), αισθητήρες 4, 5, 6, 7.

Στο σχήμα 9, όπως ήταν αναμενόμενο λόγω συνέχειας του φορέα αλλά και λόγω μεγάλης ακαμψίας του, οι μέγιστες κατά απόλυτη τιμή παραμορφώσεις είναι μικρές, της τάξης των 8 (με), για τη διέλευση του ίδιου ζυγισμένου φορτηγού των 60 τόνων. Οι τιμές της βράχυνσης του άνω πέλματος είναι κοντά σε αυτές της μήκυνσης του άνω πέλματος, λόγω ίσης περίπου απόστασης από τον κεντροβαρικό άξονα των αισθητήρων. Στην καμπύλη διακύμανσης των βραχύνσεων του άνω πέλματος, επαναλαμβάνεται πιο έντονα η ίδια πιθανολογούμενη μη γραμμική συμπεριφορά του επιθέματος υπό θλίψη και γενικότερα η αδυναμία αξιόπιστης καταγραφής βραχύνσεων. Δεν αποκλείεται η επιρροή από δευτερεύουσες παραμορφώσεις λόγω εγκάρσιας κάμψης του άνω πέλματος εκ της διέλευσης του φορτηγού.

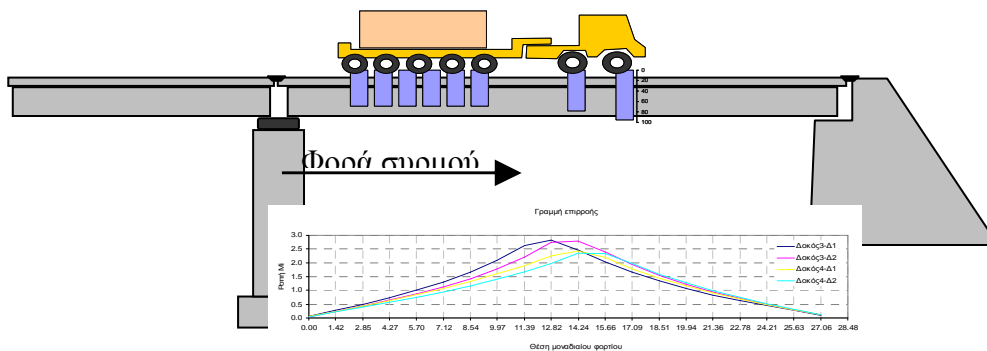
ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΘΕΩΡΗΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ, ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΙΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΚΑΙ ΤΕΛΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των πειραματικών μετρήσεων παραμόρφωσης, καταστρώθηκαν για τις δύο γέφυρες αναλυτικά μοντέλα τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων δοκού κατά Euler, με τη χρήση των λογισμικών πακέτων SAP 2000NL και STATIK-5 και υπολογίσθηκαν οι γραμμές επιρροής τόσο για τη διέλευση του ζυγισμένου φορτηγού, του οποίου ήταν γνωστή η κατανομή του βάρους του στους άξονες, όσο και για τον συρμό 60/30 βάσει του οποίου μελετήθηκε.



Σχήμα 10. Αναλυτικά μοντέλα γέφυρας: (α) γέφυρας T3 και (β) γέφυρας Γ9

Η κατανομή του φορτίου των 60 τόνων σε κάθε άξονα έγινε με βάση στοιχεία από οχήματα παρόμοιου τύπου και αντίστοιχων φορτίων. Η τελική κατανομή ανά άξονα έγινε σύμφωνα με το σκαρίφημα του σχήματος 11. Στο ίδιο σχήμα δίνονται οι γραμμές επιρροής της ροπής κάμψης εκ του οχήματος των 60 τόνων για τις τέσσερις ενοργανωθείσες διατομές των δύο δοκών της γέφυρας T3.



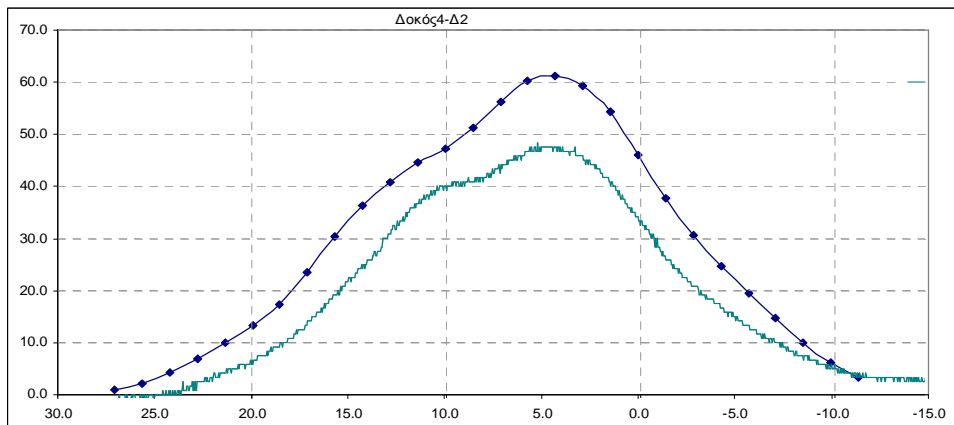
Σχήμα 11. Κατανομή του φορτίου του οχήματος ανά άξονα και γραμμές επιρροής μοναδιαίου φορτίου

Στον πίνακα 3, δίνονται συγκριτικά οι μέγιστες τιμές παραμόρφωσης από τις ενόργανες μετρήσεις και από τις προβλέψεις του αναλυτικού μοντέλου της γέφυρας T3. Στο σχήμα 12 στο ίδιο διάγραμμα σχεδιάζονται η θεωρητική γραμμή επιρροής με την πειραματική καμπύλη διακύμανσης της παραμόρφωσης στη διάρκεια διέλευσης του φορτηγού. Η τελευταία μπορεί να θεωρηθεί και ως «δυναμική» πειραματική γραμμή επιρροής με σημεία αρχής και τέλους τους χρόνους εισόδου – εξόδου του φορτηγού από το ενοργανωμένο άνοιγμα της γέφυρας. Από τη σύγκριση των μέγιστων τιμών προκύπτει μία σαφής περιβολή

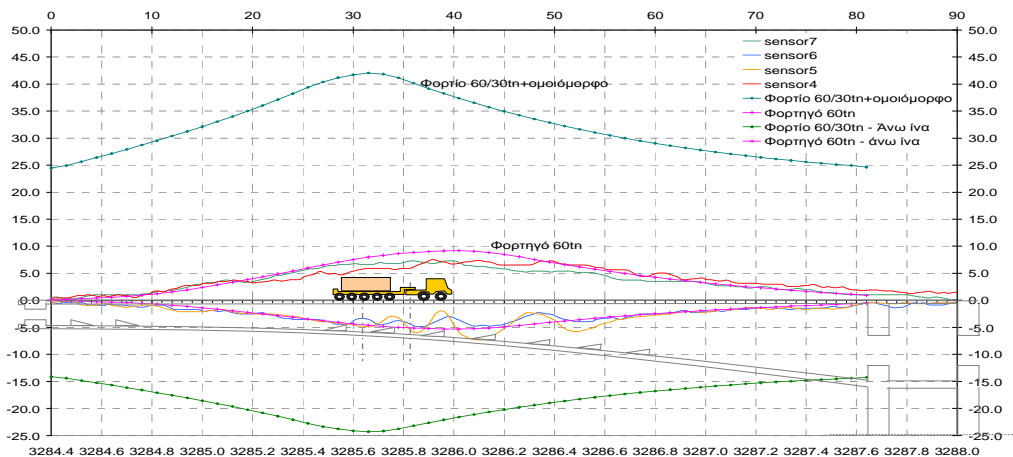
των πειρατικών τιμών από τις θεωρητικές τιμές, ενώ σημαντική είναι και η πολύ καλή προσέγγιση της πειραματικής με τη θεωρητική γραμμή επιρροής.

Πίνακας 3: Μέγιστες τιμές Strain κάτω ίνας (με), Γέφυρα Τ3

		Θεωρητικές	Μετρούμενες	Διαφορά
Δοκός3-Δ1	sensor1	66.81	43.33	35%
Δοκός3-Δ2	sensor3	69.96	45.00	36%
Δοκός4-Δ1	sensor6	61.24	43.33	29%
Δοκός4-Δ2	sensor7	61.30	47.50	23%



Σχήμα 12. Πειραματική - θεωρητική γραμμή επιρροής εφελκόμενης ζώνης δοκού Τ3 .



Σχήμα 13. Πειραματική και θεωρητική γραμμή επιρροής εφελκόμενης ζώνης φορέα Γ9.

Στο σχήμα 13 δίνονται στο ίδιο διάγραμμα οι θεωρητικές γραμμές επιρροής για το όχημα 60 τόνων και για τον συρμό 60/30 και η πειραματική γραμμή επιρροής. Η προσέγγιση παραμένει καλή για τις μηκύνσεις του εφελκόμενου κάτω πέλματος, ενώ και εδώ οι πειραματικές τιμές περιβάλλονται από τις θεωρητικές.

Εκτίμηση Φέρουσας Ικανότητας φορέα

Ο υπολογισμός της φέρουσας ικανότητας μιας γέφυρας σε φορτία κυκλοφορίας, αποτελεί έναν σημαντικό δείκτη αξιολόγησης, διότι πέραν της ασφάλειας και της ανθεκτικότητας επηρεάζεται και η λειτουργία της οδού ιδιαίτερα εάν μία μειωμένη φέρουσα ικανότητα οδηγεί σε παρακάμψεις μεγάλου μήκους. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία η τελική φέρουσα ικανότητα μιας γέφυρας μπορεί να επαληθευθεί πειραματικά και να αποτιμηθεί ως ακολούθως:

$$P = Pr \times RF \times Ke \times Ki \times Kt \times Kr \quad (5)$$

Όπου P: η φέρουσα ικανότητα, Pr: η φόρτιση σχεδιασμού, RF: η αντοχή σε κινητά φορτία σχεδιασμού ίση με $(\phi M_n - \gamma_d M_d) / (\gamma_l M_l (1 + i_{code}))$, Ke: ο συντελεστής διόρθωσης από πειραματικά δεδομένα παραμόρφωσης ή μετακίνησης, Ki: ο συντελεστής δυναμικής μεγέθυνσης, Kt, Kr: εμπειρικοί συντελεστές διόρθωσης για να ληφθούν υπόψη ο κυκλοφοριακός φόρτος και ο συντελεστής τραχύτητας. Οι συγκεκριμένες πειραματικές μετρήσεις μπορεί να οδηγήσουν εφόσον επαναληφθούν για περισσότερα φορτηγά διαφορετικών βαρών και με διαφορετικές ταχύτητες διέλευσης, στον υπολογισμό του συντελεστή διόρθωσης:

$$Ke = \epsilon_{μοντέλου} / \epsilon_{μέτρησης} \quad (6)$$

Έτσι για την γέφυρα T3 αξιοποιώντας μόνον τις αξιόπιστες μετρήσεις μήκυνσης των εφελκόμενων πελμάτων των δοκών, ο συντελεστής Ke είναι ίσος με 1.30 και οδηγεί σε αντίστοιχη προσαύξηση της αναλυτικής φέρουσας ικανότητας της γέφυρας. Η παραπάνω αρχική εκτίμηση του συντελεστή επαύξησης της φέρουσας ικανότητας, συμφωνεί με τα αποτελέσματα μη καταστροφικών ελέγχων, κρουσιμέτρησης, υπερηχομέτρησης και μετρήσεων ambient επιτάχυνσης, που διενεργήθηκαν για τις ίδιες γέφυρες στο πλαίσιο της γενικότερης τακτικής επιθεώρησής τους.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Διενεργήθηκαν για δύο δομικώς αντιπροσωπευτικές γέφυρες της Εγνατίας οδού μετρήσεις παραμόρφωσης του φορέα τους εκ διέλευσης ζυγισμένου οχήματος, με χρήση αισθητήρων οπτικών ινών. Η αξιόπιστη μέτρηση των μηκύνσεων των εφελκόμενων ζωνών επαληθεύει αποτελέσματα ανεξάρτητων πειραματικών μη καταστροφικών ελέγχων, που αποτυπώνουν μία πιο άκαμπτη συμπεριφορά των γεφυρών αυτών υπό φορτία κυκλοφορίας. Συνεπώς η συστηματική εφαρμογή μπορεί να οδηγήσει στη θεώρηση της επαυξημένης πραγματικής διαθέσιμης φέρουσας ικανότητας των υπό παρακολούθηση γεφυρών.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστούμε την ΓΓΕΤ του Υπουργείου Ανάπτυξης για την χρηματοδότηση του σημαντικότερου τμήματος της παρούσας έρευνας, στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος «Αντισεισμική Προστασία Γεφυρών».

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

American Association of State Highway Transportation Officials (AASHTO). Manual for Condition Evaluation of Bridges (2000).

Casas, J.R. and Cruz P.J.S. Fiber optic sensors for bridge monitoring. Journal of Bridge Engineering (2003).

Casas, J.R., Cruz P.J.S, Villaba, V. Structural Monitoring systems based on fiber optics. State of the Art. IABSE Symposium. Shanghai (2004).

CSI. SAP2000-Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures. (2008).

Cubus AG. Statik-5. Engineering Software. Version 1.18.0. Zurich. (2008)

Πανέτσος Π., Ρεντζεπέρης Ι, Λιώλιος Α. Σύστημα Κύριας Συντήρησης Γεφυρών της Εγνατίας Οδού. 15^ο Συνέδριο Ελληνικού Σκυροδέματος, Αλεξανδρούπολη, Ελλάδα, 24-27 Οκτωβρίου 2006.

Πανέτσος Π., Ντότσιος Ε, και Κ. Παπαδημητρίου. Αξιολόγηση της Δομικής Κατάστασης των Γεφυρών βάσει Συνδυασμένης Οπτικής και Ταχείας Ενόργανης Επιθεώρησής τους. 3^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας (2008)

Panetsos P., Ntotsios E. and C. Papadimitriou. Structural Health Monitoring of a ravine bridge of Egnatia Motorway during Construction. Fourth European Workshop on Strutral Health Monitoring. Poland. (2008)

Paultre, P., J. Proulx and M. Talbot . Dynamic testing procedures for Highway bridges Using Traffic Loads. J. of Structural Eng., 121(2):362-376. (1995)