ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΗΣ ΠΕΖΟΓΕΦΥΡΑΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Φάνης Μόσχας¹, Πάνος Ψιμούλης², Στάθης Στείρος³, Νικήτας Μπαζαίος⁴, Δημήτριος Λ. Καράμπαλης⁵

Διπλ. Πολ. Μηχανικός, Μεταπτυχιακός Φοιτητής¹, Ερευνητικός Συνεργάτης², Αναπληρωτής Καθηγητής^{3,4}, Καθηγητής⁵ Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών 26500, Πάτρα, Ελλάδα e-mail:fmoschas@upatras.gr¹, ppsimo@upatras.gr², stiros@upatras.gr³, N.Bazeos@upatras.gr⁴, karabali@upatras.gr⁵

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε μεταλλική πεζογέφυρα με κεντρικό άνοιγμα 40m στη Λεωφόρο Κηφισού (μελέτη Ι. Σεκαρά) επιχειρήθηκε μη καταστροφικός έλεγχος με βάση γεωδαιτικά στοιχεία. Ομάδα πεζών με συντονισμένα βήματα και άλματα προκάλεσε διέγερση της γέφυρας (μέγιστη επιτάχυνση απόκρισης κατασκευής 1,1g) και η μετακίνηση μετρήθηκε από GPS και επιταχυνσιογράφο και ρομποτικό θεοδόλιχο. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων GPS ήταν γρονοσειρές συντεταγμένων οι οποίες μετασγηματίστηκαν σε φαινομενικές μετατοπίσεις κατά το διαμήκη, εγκάρσιο και κατακόρυφο άξονα του καταστρώματος της γέφυρας. Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι υψίσυχνες συνιστώσες των χρονοσειρών γενικά απαλλαγμένες από χαμηλόσυχνο θόρυβο υποβάθρου των μετρήσεων (background noise) και με συνδυασμό καταγραφών επιταχυνσιογράφου εντοπίστηκαν τα διαστήματα της διέγερσης. Διαπιστώθηκε διαφοροποίηση των μετατοπίσεων και φασματικών χαρακτηριστικών των διαστημάτων διέγερσης σε σχέση με τα διαστήματα ηρεμίας της κατασκευής. Με τεχνικές ψηφιακής ανάλυσης (φίλτρων) υπολογίστηκαν τα δυναμικά χαρακτηριστικά της γέφυρας (κύρια ιδιοσυχνότητα 4,3Hz και εύρος ταλάντωσης +6mm) τα οποία βρίσκονται εντός των προβλεπόμενων ορίων της μελέτης και επιβεβαίωσαν τη δομική ακεραιότητα (structural health) της κατασκευής.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μέτρηση της απόκρισης μίας κατασκευής σε δυναμικές φορτίσεις (άνεμος, σεισμός, κυκλοφοριακά φορτία) και η δυνατότητα εκτίμησης των δυναμικών χαρακτηριστικών της (π.χ. κύριες ιδιοσυχνότητες) συνιστούν πολύ σημαντικές εφαρμογές για τον έλεγχο της δομικής ακεραιότητας (Structural Health Monitoring) των υπαρχουσών κατασκευών αλλά και στην ανάπτυξη των μελλοντικών μεθόδων σχεδιασμού. Η απόκριση των κατασκευών συνήθως μετράται μέσω επιταχυνσιογράφων και σπανιότερα μέσω μηκυνσιομέτρων ή οπτικών ινών. Τα τελευταία χρόνια, η εμφάνιση των σύγχρονων γεωδαιτικών οργάνων (GPS, ρομποτικοί θεοδόλιχοι (RTS)) έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη των απ' ευθείας μέτρηση των δυναμικών και στατικών μετακινήσεων των κατασκευών.

Το σύστημα GPS αποτελεί ένα σύστημα απόλυτου προσδιορισμού θέσης με βάση δορυφορικές παρατηρήσεις. Οι μετρήσεις GPS παρέχονται με ρυθμό 1-10Hz ενώ ήδη χρησιμοποιούνται ρυθμοί μέχρι 100Hz. Η χρήση των GPS μέχρι στιγμής έχει περιοριστεί σε σχετικά εύκαμπτες κατασκευές με κύρια ιδιοσυχνότητα < 1Hz και μετακινήσεις >10-20mm [1,2,3,4]. Η δυσκολία εφαρμογής των μεθόδων αυτών και σε πιο δύσκαμπτες κατασκευές έγκειται στο ότι: α) Ο θόρυβος των μετρήσεων καλύπτει πολλές φορές τις μικρού εύρους μετακινήσεις και β) οι ιδιοσυχνότητες των κατασκευών αυτών βρίσκονται κοντά στη μέγιστη συχνότητα που μπορεί να προσδιοριστεί με τους συνήθεις ρυθμούς δειγματοληψίας των οργάνων GPS (πχ. με βάση το θεώρημα Nyquist για δειγματοληψία 10Hz, μέγιστη συχνότητα που μπορεί να προσδιοριστεί είναι 5Hz.

Πάντως, πρόσφατες συστηματικές πειραματικές μελέτες [5,6] έχουν δείξει ότι μετά από κατάλληλη επεξεργασία των μετρήσεων GPS είναι δυνατό να εξαχθούν με ακρίβεια συχνότητες και μετακινήσεις που αντιστοιχούν σε σχετικά δύσκαμπτες κατασκευές (συχνότητες 1-5Hz/ μετακινήσεις <10-20mm).

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η μεθοδολογία επεξεργασίας μετρήσεων GPS με δειγματοληψία 10Hz η οποία περιλαμβάνει πολλαπλό φιλτράρισμα των μετρήσεων μέσω φίλτρων υποβοηθούμενων από δεδομένα επιταχυνσιογράφου. Επίσης παρουσιάζεται εφαρμογή της μεθοδολογίας σε δεδομένα μετρήσεων των μετακινήσεων μιας δύσκαμπτης μεταλλικής πεζογέφυρας.

2. XAPAKTHPISTIKA METAAAIKHS ΠΕΖΟΓΕΦΥΡΑΣ ΕΘΝΙΚΗΣ ΟΔΟΥ ΑΘΗΝΩΝ ΛΑΜΙΑΣ

Η μεταλλική πεζογέφυρα που επιλέχθηκε βρίσκεται στην εθνική οδό Αθηνών-Λαμίας κοντά στη διασταύρωση με την οδό Πέτρου Ράλλη. Το κατάστρωμά της γέφυρας αποτελείται από μεταλλικό δικτύωμα με συνολικό μήκος 62m και εδράζεται σε τέσσερις πυλώνες από οπλισμένο σκυρόδεμα. Το συνολικό άνοιγμα χωρίζεται σε τρία επιμέρους ανοίγματα (δύο ακραία μήκους 11,25μ και ένα κεντρικό μήκους 41,5m) όπως φαίνεται στο Σχήμα 1. Η μελέτη της γέφυρας έγινε βάσει τους EC-1 και EC-3 και προδιαγράφει ιδιοσυχνότητες της γέφυρας μεγαλύτερες από 3Hz και μέγιστο βέλος κάμψης 3cm.



Σχ.1 : Επάνω: Η Μεταλλική πεζογέφυρα στην εθνική οδό Αθηνών-Λαμίας που εζετάστηκε. Κάτω: Όψη της πεζογέφυρας και θέση κεντρικού ανοίγματος όπου εγκαταστάθηκαν τα όργανα καταγραφής των ταλαντώσεων

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Τα δεδομένα που αναλύονται στην παρούσα εργασία προέρχονται από καταγραφές των κατακόρυφων μετακινήσεων της μεταλλικής πεζογέφυρας που παρουσιάστηκε προηγουμένως. Για την καταγραφή των μετακινήσεων στο κέντρο του μεσαίου ανοίγματος της γέφυρας (Σχήμα 1,2) εγκαταστάθηκε ένα δίκτυο οργάνων που περιελάμβανε τρία όργανα GPS, δύο ανακλαστήρες και έναν επιταχυνσιογράφο τοποθετημένα σε κοντινή (<2m) μεταξύ τους απόσταση. Τα όργανα GPS τοποθετήθηκαν στο επάνω μέρος του καταστρώματος της γέφυρας ώστε να εξασφαλίζεται ανεμπόδιστη λήψη δορυφορικού σήματος. Όλα τα όργανα συνδέθηκαν με τη γέφυρα μέσω άκαμπτων συνδέσεων (Σχήμα 2) ώστε να ακολουθούν τις μετακινήσεις του καταστρώματος. Ο επιταχυνσιογράφος εγκαταστάθηκε στην κουπαστή της γέφυρας, η οποία ήταν άκαμπτα συνδεδεμένη με το κατάστρωμα.

Παράλληλα σε μικρή απόσταση (<100m) από τη γέφυρα τοποθετήθηκαν δύο σταθμοί αναφοράς GPS και δύο ρομποτικοί θεοδόλιχοι (RTS) για την παρακολούθηση των ανακλαστήρων επάνω στη γέφυρα. Τα όργανα GPS και οι ρομποτικοί θεοδόλιχοι κατέγραφαν με ρυθμό 10Hz ενώ ο επιταχυνσιογράφος κατέγραφε με ρυθμό 250Hz σε συνδυασμό με ρολόι GPS. Στην παρούσα εργασία αναλύονται τα δεδομένα από ένα GPS που ήταν τοποθετημένο στο πάνω μέρος του καταστρώματος και από τον επιταχυνσιογράφο.

Τα πειράματα διέγερσης της γέφυρας πραγματοποιήθηκαν στις 2 Δεκεμβρίου 2007, ημέρα κατά την οποία επικρατούσε άπνοια και ηλιοφάνεια, συνθήκες ευνοϊκές για τη λειτουργία των γεωδαιτικών οργάνων. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων μία ομάδα 10 ατόμων με μέσο όρο βάρους περίπου 80 κιλά εκτέλεσε ρυθμικές κινήσεις διαφόρων ειδών (ρυθμικά άλματα, βάδισμα, τροχάδην) διεγείροντας το κατάστρωμα της γέφυρας. Οι ταλαντώσεις του καταστρώματος καταγράφονταν ταυτόχρονα από τρία όργανα GPS, δύο ρομποτικούς θεοδολίχους και έναν επιταχυνσιογράφο.

4. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

4.1 Πρωτογενής επεξεργασία

Οι μετρήσεις των GPS που ήταν τοποθετημένα επάνω στη γέφυρα, αρχικά επιλύθηκαν με χρήση του λογισμικού Topcon Pinnacle ως προς ένα από τα GPS αναφοράς. Αποτέλεσμα της επεξεργασίας ήταν χρονοσειρές των συντεταγμένων του κάθε



Σχ. 2: Θέσεις στήριζης οργάνων στο μέσο του κεντρικού ανοίγματος της πεζογέφυρας και φωτογραφίες των συνδέσεων

οργάνου WGS84. Στη συνέχεια στο σύστημα συντεταγμένων ακολούθησε μετασχηματισμός των συντεταγμένων σε τοπικό σύστημα στο οποίο οι άξονες Χ, Υ και Ζ συνέπιπταν με το διαμήκη, τον εγκάρσιο και τον κατακόρυφο άξονα του καταστρώματος της γέφυρας. Ως αρχή των αξόνων καθορίστηκε το μηδέν που συνέπιπτε με τη θέση ισορροπίας της γέφυρας και το οποίο προέκυψε αφαιρώντας από τις αρχικές χρονοσειρές το μέσο όρο των μετρήσεων κατά τη διάρκεια ενός διαστήματος ηρεμίας του καταστρώματος. Από την παραπάνω διαδικασία προέκυψαν οι γρονοσειρές φαινομενικών μετακινήσεων, στις οποίες τα διαστήματα ταλάντωσης δεν ήταν σαφώς διακριτά λόγω του υψηλού ποσοστού θορύβου στις μετρήσεις του GPS. Ο ακριβής εντοπισμός των διαστημάτων διέγερσης βασίστηκε στις ανεξάρτητες καταγραφές επιταχυνσιογράφου, ο οποίος παρείχε χρόνο GPS.

Μία χαρακτηριστική χρονοσειρά φαινομενικών μετατοπίσεων από μία ταλάντωση σχετικά μεγάλου εύρους παρουσιάζεται στο σχήμα 3α. Ενδεικτικό του μεγάλου εύρους της ταλάντωσης αποτελεί η ιδιαίτερα υψηλή τιμή επιτάχυνσης (1.1g) που καταγράφηκε από τον επιταχυνσιογράφο (Σχήμα 3δ). Παρόμοιες τιμές επιτάχυνσης έχουν παρατηρηθεί και σε άλλες περιπτώσεις [7].

4.2 Φίλτρο 1^{ου} σταδίου – αφαίρεση χαμηλόσυχνου θορύβου

Όπως είναι εμφανές από το Σχήμα 3α, στο σήμα της φαινομενικής μετακίνησης περιέχονται σήματα μεγάλου εύρους και υψηλής περιόδου (χαμηλής συχνότητας) τα οποία πιθανώς εκφράζουν ημιστατική κίνηση της γέφυρας, αλλά και θόρυβο χαμηλής



Σχ. 3: α) Χρονοσειρά φαινομενικών μετατοπίσεων από όργανο GPS όπου κυριαρχεί ο χαμηλόσυχνος θόρυβος. Με λευκή γραμμή παρουσιάζεται η χαμηλόσυχνη συνιστώσα του σήματος η οποία αντιστοιχεί σε χαμηλόσυχνο θόρυβο και ενδεχομένως σε ημιστατική κίνηση του καταστρώματος της γέφυρας. β) Υψίσυχνη συνιστώσα της χρονοσειράς του σχήματος 3α όπως προέκυψε μετά από αφαίρεση του σήματος μακράς περιόδου με φίλτρο κυλιόμενου μέσου όρου. γ) Χρονοσειρά δυναμικής μετατόπισης όπως προέκυψε μετά από φιλτράρισμα της χρονοσειράς του σχήματος 3α. Από τη χρονοσειρά δυναμικής μετατόπισης το εύρος ταλάντωσης προσδιορίζεται ίσο με <u>+</u>6mm. δ) Καταγραφές επιταχυνσιογράφου κατά τη διάρκεια της διέγερσης της γέφυρας.

συχνότητας ο οποίος επηρεάζει σημαντικά τις μετρήσεις GPS [8]. Για να γίνει η λεπτομερής μελέτη της δυναμικής κίνησης της γέφυρας απομακρύνθηκε η χαμηλόσυχνη συνιστώσα της χρονοσειράς φαινομενικών μετατοπίσεων με ένα φίλτρο τύπου κυλιόμενου μέσου όρου (Moving-Average filter). Μετά το φιλτράρισμα προέκυψε η υψίσυχνη συνιστώσα των φαινομενικών μετατοπίσεων (Σχήμα 3β) η οποία περιλαμβάνει τη δυναμική μετακίνηση της γέφυρας καθώς και θόρυβο ο οποίος δεν επιτρέπει τη διάκριση του εύρους των δυναμικών μετατοπίσεων.

4.3 Προσδιορισμός ιδιοσυχνότητας κατασκευής

Για τον προσδιορισμό της συχνότητας ταλάντωσης της γέφυρας (που συμπίπτει με την ιδιοσυχνότητά της) έγινε φασματική ανάλυση των μετρήσεων του επιταχυνσιογράφου και της υψίσυχνης συνιστώσας των μετρήσεων GPS. Για τη φασματική ανάλυση χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας Normperiod [9] που βασίζεται στο περιοδόγραμμα Lomb και στη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων, και έχει το πλεονέκτημα να δίνει το επίπεδο στατιστικής σημαντικότητας των αποτελεσμάτων. Στα Σχήματα 4.α,β παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της φασματικής ανάλυσης της υψίσυχνης συνιστώσας των μετρήσεων GPS και των μετρήσεων του επιταχυνσιογράφου. Και στα δύο φασματογράμματα η συχνότητα 4.3Hz (0.23sec) εμφανίζεται πάνω από το επίπεδο στατιστικής σημαντικότητας και πιθανότατα αντιστοιχεί στην κύρια ιδιοσυχνότητα του καταστρώματος της γέφυρας. Η ίδια συχνότητα είχε προκύψει και από την ανάλυση των μετρήσεων του ρομποτικού θεοδολίχου (RTS) για τη συγκεκριμένη διέγερση, αλλά και για άλλες διεγέρσεις.



Σχ. 4: Αποτελέσματα φασματικής ανάλυσης α) Υψίσυχνης χρονοσειράς GPS, β) καταγραφών επιταχυνσιογράφου και γ) χρονοσειράς δυναμικής μετατόπισης. Σε όλα τα αποτελέσματα με διακεκομμένη γραμμή σημειώνεται το επίπεδο στατιστικής σημαντικότητας των αποτελεσμάτων. Σε όλες τις περιπτώσεις κυριαρχεί η συχνότητα 4,3Hz καθώς και κάποιες συχνότητες γύρω από αυτή (εμφανείς στα μεγεθυμένα τμήματα των φασματογραμμάτων). Η συχνότητα 4,3Hz πιθανώς αντιστοιχεί στην κύρια ιδιοσυχνότητα του καταστρώματος της γέφυρας. Με γκρι χρώμα σημειώνεται η ζώνη συχνοτήτων που επιλέχθηκε να συγκρατηθεί από το φίλτρο Chebyshev που χρησιμοποιήθηκε για την απομάκρυνση του θορύβου από τις μετρήσεις του GPS.

Στο Σχήμα 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα φασματικής ανάλυσης της υψίσυχνης χρονοσειράς GPS για το διάστημα της διέγερσης της γέφυρας καθώς και για τα διαστήματα ηρεμίας πριν και μετά τη διέγερση. Είναι εμφανές ότι μόνο για το διάστημα διέγερσης εντοπίζεται η συχνότητα 4,3Hz ενώ για τα διαστήματα ηρεμίας δεν εντοπίζεται κάποια στατιστικά σημαντική συχνότητα, ένδειξη ότι το κατάστρωμα της γέφυρας δεν ταλαντώνεται.

4.4 Φίλτρο 2^{ου} σταδίου – προσδιορισμός εύρους ταλάντωσης

Όπως είναι εμφανές από το Σχήμα 3β για τον προσδιορισμό του εύρους ταλάντωσης της γέφυρας είναι αναγκαία η αφαίρεση του μεγαλύτερου μέρους του θορύβου από τις μετρήσεις GPS. Με βάση την τιμή της συχνότητας ταλάντωσης που προέκυψε από τις φασματικές αναλύσεις αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί ένα φίλτρο ζώνης (bandpass), ώστε από τη χρονοσειρά των φαινομενικών μετατοπίσεων του GPS να απομακρυνθούν όλες οι συχνότητες εκτός από τις συχνότητες που περιλαμβάνονται σε μια στενή ζώνη γύρω από τη συχνότητα ταλάντωσης. Το φίλτρο που επιλέχθηκε ήταν ζωνοπερατό Chebyshev 8^{ου} βαθμού [10] το οποίο φιλτράρει όλες τις συχνότητες που περιλαμβάνονται στη χρονοσειρά εκτός από τις συχνότητες της ζώνης 4,0-4,6Hz (γκρι ζώνη σχήματος 4α,β,γ). Τα αποτελέσματα μετά το φιλτράρισμα της χρονοσειράς φαινομενικών μετατοπίσεων του GPS παρουσιάζονται στο Σχήμα 3δ ενώ το φασματογράφημα της φιλτραρισμένης χρονοσειράς παρουσιάζονται στη χρονοσειρά της δυναμικής μετατόπισης ισούται με 4.28Hz. Το εύρος ταλάντωσης προσδιορίζεται από το Σχήμα 3γ και έχει τιμή ±6mm.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι μετρήσεις των κατακόρυφων ταλαντώσεων μιας δύσκαμπτης μεταλλικής πεζογέφυρας μετρήθηκαν ταυτόχρονα από όργανα GPS και επιταχυνσιογράφο με χρονομέτρηση GPS. Σε πρώτη φάση αφαιρέθηκε από τις μετρήσεις GPS ο χαμηλόσυχνος θόρυβος με χρήση ενός απλού εμπειρικού φίλτρου κυλιόμενου μέσου όρου, και με τη βοήθεια των μετρήσεων του επιταχυνσιογράφου προσδιορίστηκε η κύρια ιδιοσυχνότητα του καταστρώματος της γέφυρας με τιμή 3Hz (0,23sec). Στη συνέχεια με τη χρήση



Σχ. 5: Υψίσυχνη συνιστώσα μετρήσεων GPS για ένα διάστημα διέγερσης (σημαίνεται με γκρι χρώμα) και δύο διαστήματα ηρεμίας πριν και μετά τη διέγερση. Για κάθε διάστημα παρουσιάζονται και αποτελέσματα της φασματικής ανάλυσης. Είναι εμφανές ότι μόνο για το διάστημα διέγερσης εντοπίζεται η συχνότητα 4,3Hz η οποία, με δεδομένο ότι εντοπίζεται και στις μετρήσεις του επιταχυνσιογράφου, συνάγεται ότι αντιστοιχεί στην κύρια ιδιοσυχνότητα του καταστρώματος της γέφυρας.

φίλτρου Chebyshev απομακρύνθηκε το μεγαλύτερο μέρος του θορύβου των μετρήσεων GPS αφήνοντας μόνο μία στενή ζώνη συχνοτήτων γύρω από την ιδιοσυχνότητα που είχε προσδιοριστεί προηγουμένως. Από τη χρονοσειρά των δυναμικών μετακινήσεων που προέκυψε προσδιορίστηκε το εύρος ταλάντωσης ίσο με ±6mm. Τα αποτελέσματα βρίσκονται εντός των προδιαγραφών του μελετητή (ελάχιστη ιδιοσυχνότητα 4,3Hz και μέγιστο βέλος κάμψης 3cm) και επιβεβαιώνουν τη δομική ακεραιότητα (structural health) της κατασκευής.

Η παρούσα εργασία αποτελεί μία από τις πρώτες προσπάθειες μέτρησης ταλαντώσεων μιας σχετικά δύσκαμπτης (ιδιοσυχνότητα>1Hz) κατασκευής με χρήση οργάνου GPS. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι με την κατάλληλη επεξεργασία και σε συνδυασμό με άλλα όργανα (ρομποτικοί θεοδόλιχοι, επιταχυνσιογράφοι) είναι δυνατόν να προσδιοριστούν απ' ευθείας οι μετακινήσεις μιας δύσκαμπτης κατασκευής από υψίσυχνες (10Hz) μετρήσεις οργάνων GPS. Βελτίωση των αποτελεσμάτων αναμένεται να δώσει η χρήση νέας γενιάς οργάνων GPS με δυνατότητα υψηλότερου ρυθμού δειγματοληψίας (μέχρι 100Hz) που ήδη χρησιμοποιείται από την ερευνητική μας ομάδα.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Kijewski Correa T. and Kareem A. "The height of precision", *GPS World*, September 2003, pp. 20-30.
- [2] Brownjohn J., Stringer M., Tan G., Poh Y.K., Ge L. and Pan T.C. "Experience with RTK-GPS system for monitoring wind and seismic effects on a tall building" *In: Structural Health monitoring of Intelligent Infrastructure (SHMII-2)*, Shenzhen, November 2005.
- [3] Li X., Ge L., Ambikairajah E., Rizos C., Tamura Y. and Yoshida A. "Fullscale structural monitoring using an integrated GPS and accelerometer system", *GPS Solutions*, Vol. 10, No. 4, 2006, pp. 233-247.
- [4] Breuer P., Chmielewski T., Gorski P., Konopka E. and Tarczynski L. "The Stuttgart TV Tower displacement of the top caused by the effects of sum and wind", *Engineering Structures*, Vol. 30, No. 10, 2008, pp. 2771-81.
- [5] Psimoulis P., Pytharouli S., Karambalis D. and Stiros S. "Potential of Global Positioning System (GPS) to measure frequencies of oscillations of engineering structures", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 318, 2008, pp. 606–623.
- [6] Casciati F. and Fuggini C. "Engineering vibration monitoring by GPS: Long duration records" *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, Vol. 8, No. 3, 2009, pp. 459-67.
- [7] Makris N. and Zhang J. "Seismic Response Analysis of a Highway Overcrossing Equipped with Elastomeric Bearings and Fluid Dampers", *Journal of Structural Engineering*, Vol.130, No. 6, 2004, pp. 830-845.
- [8] Kijewski-Correa T., Kareem A. and Kochly M. "Experimental Verification and Full-Scale Deployment of Global Positioning Systems to Monitor the Dynamic Response of Tall Buildings", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 132, No. 8, 2006, pp. 1242– 1253.
- [9] Pytharouli S. I. and Stiros S.C. "Spectral analysis of unevenly spaced or discontinuous data using the "normperiod" code", *Computers and Structures*, Vol. 86, 2008, pp. 190–196
- [10] Hamming D. "Digital Filters", Third edition, Dover Publications Inc., Mineola NY. 1989, p. 284.

NON-DESTRUCTIVE, GEODESY-BASED METHOD FOR ASSESSING THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF A STEEL FOOTBRIDGE

Fanis Moschas¹, Panos Psimoulis², Stathis Stiros³, Nikitas Bazeos⁴, Dimitris L. Karambalis⁵ Civil Engineer, Graduate Student¹, Associate Researcher², Associate Professor^{3,4}, Professor⁵ Department of Civil Engineering, University of Patras 26500, Patras, Greece e-mail:fmoschas@upatras.gr¹, ppsimo@upatras.gr², stiros@upatras.gr³, N.Bazeos@upatras.gr⁴, karabali@upatras.gr⁵

SUMMARY

In the present study the dynamic characteristics of a steel footbridge with a mid-span of 40 m, crossing the Kifisos Avenue in Athens (designed by I.Sekaras), were assessed by a nondestructive method based on geodetic data. The bridge deck was excited by synchronized jumps of a group of pedestrians and the bridge displacements were simultaneously recorded by GPS instruments, an accelerometer (recorded peak acceleration: 1.1g) and Robotic Theodolites. GPS measurements were transformed into time-series of apparent displacements along the longitudinal, lateral and vertical axes of the bridge deck. The short-period component time series were extracted after removing background noise from the apparent displacement time-series and the bridge excitation intervals were identified by use of the accelerometer recordings. Measurements corresponding to the bridge excitation intervals were found to have different spectral characteristics and different displacement amplitudes in comparison with pre- and post-excitation intervals. Applying digital signal processing techniques (digital filtering) certain dynamic characteristics of the bridge, eigen-frequency 4.3Hz and oscillation amplitude +6mm were identified. These values are consistent with the designer's specifications and they confirm the structural health of the bridge.