

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ & ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟΥ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ, ΒΙΝΤΕΟΜΕΤΡΙΑΣ ΚΑΙ RADAR ΜΙΚΡΟΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑΣ ΣΤΗΝ ΜΕΛΕΤΗ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

Χ. Περάκης, Γ. Πηνιώτης, Α. Μπίμης, και Β. Γκίκας
Εργαστήριο Γενικής Γεωδαισίας, Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, ΕΜΠ
e-mail: vgikas@central.ntua.gr

Περίληψη

Σε αυτή την εργασία επιχειρείται πειραματική διερεύνηση και συγκριτική αξιολόγηση των δυνατοτήτων και περιορισμών σύγχρονων τοπογραφικών αισθητήρων που βρίσκουν εφαρμογή στην παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς (ταλαντώσεις) γεφυρών και υψηλών κατασκευών. Η πειραματική διαδικασία περιλαμβάνει την δημιουργία ελεύθερης ταλάντωσης μεταλλικής ράβδου πακτωμένης στο ένα άκρο για εναλλακτικά σενάρια παρατήρησης που διακρίνονται ως προς την εφαρμογή συγκεντρωμένης / κατανεμημένης μάζας, το αρχικό εύρος ταλάντωσης, το υλικό / διαστάσεις της ράβδου, κ.α.. Η καταγραφή της κίνησης γίνεται ταυτόχρονα με τρεις γεωδαιτικούς αισθητήρες: ένα δέκτη GNSS δύο συχνοτήτων (L1/L2), ένα σύστημα βιντεομετρίας και έναν αισθητήρα RADAR μικροκυματικής συμβολομετρίας. Η ανάλυση των μετρήσεων περιλαμβάνει προεπεξεργασία των μετρήσεων, αναγωγή των μετρημένων μεγεθών σε ενιαίο σύστημα αναφοράς και υπολογισμό / αξιολόγηση των παραμέτρων ταλάντωσης (εύρος και φάσμα συχνοτήτων ταλάντωσης, λόγος απόσβεσης) ξεχωριστά για κάθε σύστημα παρατήρησης. Χρήσιμα συμπεράσματα προκύπτουν ως προς τις δυνατότητες και τους περιορισμούς που παρουσιάζει κάθε τύπος αισθητήρα σε εφαρμογές παρακολούθησης της δυναμικής συμπεριφοράς τεχνικών έργων.

Λέξεις-Κλειδιά: *GNSS, βιντεομετρία, radar μικροκυματικής συμβολομετρίας, ταλαντώσεις.*

Abstract

This paper attempts an experimental investigation of the potential of modern topographic surveying methods used for the assessment of the dynamic behavior of bridges and tall structures. The experimental setup involves the generation of a number of free vibration test scenarios of a metallic beam for concentrated / distributed mass, variations in the initial vibration amplitude and material type, etc. Vibration monitoring relies on the use of three independent observation sensors; namely, a dual frequency GNSS receiver, a digital image correlation (videometry) system and a ground-based RADAR microwave interferometer. Data analysis includes the computation and assessment of critical oscillation parameters such as the vibration frequency spectra, the oscillation amplitude and damping factor computed for every test scenario and observation system encountered. Also, useful results regarding the capabilities and shortcomings for each sensor type for use in structural health monitoring tasks are reviewed and discussed.

Keywords: GNSS, videometry, microwave interferometry radar, oscillations

Χ. Περάκης, Γ. Πηνιώτης, Α. Μπίμης, Β. Γκίκας
Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, ΕΜΠ

Πειραματική διερεύνηση & συγκριτική αξιολόγηση αισθητήρων δορυφορικού εντοπισμού, βιντεομετρίας και radar μικροκυματικής συμβολομετρίας στη μελέτη ταλαντώσεων τεχνικών έργων

5^ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας, Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών, Αθήνα, 9-10 Μαΐου 2014

1. Εισαγωγή

Η συστηματική παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς κρίσιμων τεχνικών έργων με τη χρήση αισθητήρων και δικτύων αισθητήρων συμβάλλει ουσιαστικά στην κατανόηση του μηχανισμού απόκρισής τους έναντι εξωτερικών διεγέρσεων όπως, ο σεισμός και ο άνεμος, καθώς και την εκτίμηση των επιπτώσεων που αυτές έχουν για την ασφαλή λειτουργία τους (Chopra 1995, Coleman 2004). Σε αυτή την διαδικασία, η βέλτιστη επιλογή του τύπου, του πλήθους και της θέσης τοποθέτησης των αισθητήρων καθορίζεται από τα φυσικά και τεχνικά χαρακτηριστικά της κατασκευής ενδιαφέροντος καθώς και τις υποθέσεις που αφορούν τα φορτία και τις συνθήκες διέγερσης. Σήμερα, η αντιμετώπιση του προβλήματος στηρίζεται κυρίως σε συμβατικές όσο και σύγχρονες μεθόδους πειραματικής μηχανικής και τοπογραφικές μεθόδους, όπως επιταχυνσιόμετρα και διατάξεις οπτικών ινών (Στρατάκος και λοιποί 2008, Gikas et al. 2013). Οι υπόψη μέθοδοι παρότι είναι αποδεδειγμένα καταξιωμένες στην πράξη, παρουσιάζουν εγγενή μειονεκτήματα όπως η ανάγκη επισκευσιμότητας της κατασκευής και το περιορισμένο πλήθος σημείων παρατήρησης – και συνεπώς, η αξιοποίηση νέων, συμπληρωματικών τεχνολογιών μπορεί να συμβάλλει ουσιαστικά στην αρτιότερη αντιμετώπιση του προβλήματος.

Σε αυτό το πλαίσιο, η παρούσα εργασία αποσκοπεί στην διερεύνηση των εγγενών χαρακτηριστικών, των δυνατοτήτων και των προβλημάτων που παρουσιάζουν σύγχρονες τοπογραφικές μέθοδοι με εφαρμογή στην παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς των κατασκευών. Για το σκοπό αυτό υλοποιούνται εναλλακτικά πειραματικά σενάρια ταλάντωσης μεταλλικής ράβδου τα οποία καταγράφονται ταυτόχρονα με χρήση τριών ετερογενών τοπογραφικών τεχνολογιών αιχμής. Συγκεκριμένα, εξετάζονται η μέθοδος και τα συστήματα δορυφορικού εντοπισμού (*Global Navigational Satellite Systems - GNSS*), επίγειου *radar* μικροκυματικής συμβολομετρίας (*Ground Based Microwave Interferometry - GBMI*) και βιντεομετρίας (*Digital Image Correlation - DIC*).

2. Τοπογραφικές Μέθοδοι και Αισθητήρες Καταγραφής

Η διαδικασία ελεύθερης ταλάντωσης μεταλλικής ράβδου αποτελεί φαινόμενο υψηλής δυναμικής και ως εκ τούτου, η μελέτη του με την μέθοδο του δορυφορικού εντοπισμού προϋποθέτει την χρήση γεωδαιτικών δεκτών GNSS με δυνατότητα υψηλής δειγματοληψίας και εφαρμογή της τεχνικής του σχετικού εντοπισμού (Nickitoroulou et al. 2006). Για τον σκοπό αυτό, στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν δύο δέκτες Trimble® 5800 (*Base-Rover*) ονομαστικής ακρίβειας $\pm 10 \text{ mm} \pm 1 \text{ ppm}$ σε οριζοντιογραφία και σε κινηματικό προσδιορισμό θέσης.

Η τεχνολογία επίγειου *radar* μικροκυματικής συμβολομετρίας έχει αναπτυχθεί πρόσφατα. Η μέθοδος στηρίζεται στην αρχή της συμβολομετρίας της μικροκυματικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται από διάταξη επίγειου *radar* και παρέχει την δυνατότητα εξ αποστάσεως υπολογισμού ακτινικών μετατοπίσεων με μεγάλη ακρίβεια (Gentile 2009). Το σύστημα που χρησιμοποιήθηκε είναι το IBIS-S (IDS SpA) το οποίο παρέχει μετρήσεις μετατοπίσεων με συχνότητα δειγματοληψίας έως 200 Hz, εμβέλεια έως 500 m και ακρίβεια υπολογισμού μετακινήσεων 1/10 mm ή καλύτερα.

Τα συστήματα βιντεομετρίας στηρίζονται στις αρχές της φωτογραμμετρίας και λειτουργούν χωρίς να προϋποθέτουν επαφή με το μετρούμενο αντικείμενο.

Χ. Περάκης, Γ. Πηνιώτης, Α. Μπίμης, Β. Γκίκας
Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, ΕΜΠ

Πειραματική διερεύνηση & συγκριτική αξιολόγηση αισθητήρων δορυφορικού εντοπισμού, βιντεομετρίας και *radar* μικροκυματικής συμβολομετρίας στη μελέτη ταλαντώσεων τεχνικών έργων

5^ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας, Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών, Αθήνα, 9-10 Μαΐου 2014

Ο υπολογισμός μετακινήσεων γίνεται μέσω της αναγνώρισης, παρακολούθησης και ανάλυσης των κινηματικών χαρακτηριστικών κατάλληλων στόχων σε διαδοχικές εικόνες βίντεο που λαμβάνονται από κάμερα υψηλής ανάλυσης και δειγματοληψίας. Συγκεκριμένα, η ψηφιακή εικόνα που συλλέγεται σε κάθε στιγμιότυπο λήψης περιέχει μία ζώνη που αντιστοιχεί στην περιοχή του αντικειμένου που περιλαμβάνει κάθε παρατηρούμενο στόχο (Potter and Setchell 2006). Ο υπολογισμός μετακινήσεων στηρίζεται στην εφαρμογή αλγορίθμων αναγνώρισης προτύπου σε επιλεγμένες θέσεις μεταξύ διαδοχικών εικόνων. Για τις ανάγκες αυτής της εργασίας χρησιμοποιήθηκε το σύστημα βιντεομετρίας *Video Gauge* της εταιρείας Imetrum Ltd. Το σύστημα περιλαμβάνει κάμερα, φορητό Η/Υ με λογισμικό επεξεργασίας και τους στόχους παρατήρησης. Η κάμερα που χρησιμοποιήθηκε κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων έχει ανάλυση 1 *megapixel* και συχνότητα δειγματοληψίας έως και 15 Hz. Η ακρίβεια του συστήματος εξαρτάται από την γεωμετρία παρατήρησης και τα χαρακτηριστικά του φακού λήψης και μπορεί να φτάσει τα 0,1 mm ή καλύτερα.

3. Πειραματική Διάταξη και Σενάρια Καταγραφής

Συνολικά διενεργήθηκαν δύο σειρές πειραμάτων ελεύθερης ταλάντωσης ράβδου. Η πρώτη σειρά πειραμάτων (*Πείραμα-I*) περιλαμβάνει την καταγραφή της ταλάντωσης σε κλειστό χώρο με το σύστημα βιντεομετρίας στόχων που βρίσκονται σε διακριτές θέσεις κατά μήκος της ράβδου και αποσκοπεί στην περιγραφή του φαινομένου σε όλο το μήκος της όσο και σε έλεγχο της ακρίβειας (επαναληψιμότητα) της μεθόδου. Η δεύτερη σειρά πειραμάτων (*Πείραμα-II*) αφορά την καταγραφή του φαινομένου ταυτόχρονα με τους τρεις τύπους αισθητήρων και αποβλέπει σε έλεγχο της αξιοπιστίας καθενός από τα τρία συστήματα.

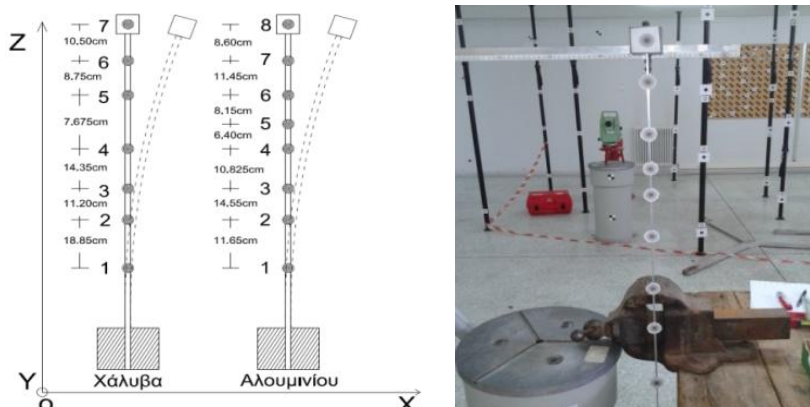
Για την υλοποίηση των πειραμάτων, χρησιμοποιούνται δύο μεταλλικές ράβδοι ορθογωνικής διατομής τα χαρακτηριστικά των οποίων δίνονται στον Πίνακα 1. Κάθε ράβδος πακτώνεται στο κάτω άκρο της σε κατακόρυφη θέση με τη βοήθεια συστήματος σφινγκτήρα βιομηχανικού τύπου. Στο άνω άκρο της, κάθε ράβδος φέρει κοχλίωση ώστε ανάλογα με το σενάριο παρατήρησης να προσαρτάται κύβος συγκεντρωμένης μάζας 1,47 kg ή εναλλακτικά η κεραία του δέκτη GNSS. Σε κάθε περίπτωση, η πειραματική διάταξη ισοδυναμεί με ένα σύστημα ενός βαθμού ελευθερίας (Single Degree Of Freedom-SDOF).

Πίνακας 1: Υλικό και διαστάσεις πειραματικών ράβδων

Υλικό ράβδου	Μήκος L (m)	Πλάτος D (m)	Πάχος d (m)
Αλουμίνιο	0.600, 1.000	0.050	0.0035
Χάλυβας	0.600, 1.000	0.030	0.003

Η υλοποίηση της πρώτης σειράς πειραμάτων περιλαμβάνει την τοποθέτηση συνολικά οκτώ αυτοκόλλητων στόχων καθ' ύψος κάθε μιας ράβδου και τοποθέτηση της κάμερας σε απόσταση λίγων μέτρων από αυτή, έτσι ώστε, ο άξονας παρατήρησης της κάμερας να είναι κάθετος στη διεύθυνση κίνησης της ράβδου (Σχήμα 1). Συνολικά υλοποιούνται οκτώ δοκιμές, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2. Συγκεκριμένα, τα πειράματα περιλαμβάνουν δοκιμές για μήκη ράβδου 0.6 m και 1.0 m με ή χωρίς συγκεντρωμένη μάζα. Η ταλάντωση

για κάθε σενάριο πραγματοποιείται με αρχική μετατόπιση 3 cm από την θέση ισορροπίας της, η οποία υλοποιείται με χρήση νήματος, το οποίο απελευθερώνεται ακαριαία σε κάθε σενάριο.



Σχήμα 1: Σκαρίφημα και φωτογραφία διάταξης Πειράματος-*I*

Πίνακας 2: Σενάρια ελεύθερης ταλάντωσης Πειράματος-*I*

Σενάριο	Ράβδος Χάλυβα	
	I-1	1 m / με συγκεντρωμένη μάζα
I-2	1 m / χωρίς συγκεντρωμένη μάζα	6στόχοι (1-6)
I-3	60 cm / με συγκεντρωμένη μάζα	6στόχοι (2-7)
I-4	60 cm / χωρίς συγκεντρωμένη μάζα	5στόχοι (2-6)
	Ράβδος Αλουμινίου	
I-5	1 m / με συγκεντρωμένη μάζα	8στόχοι (1-8)
I-6	1 m / χωρίς συγκεντρωμένη μάζα	7στόχοι (1-7)
I-7	60 cm / με συγκεντρωμένη μάζα	7στόχοι (2-8)
I-8	60 cm / χωρίς συγκεντρωμένη μάζα	6στόχοι (2-7)

Η υλοποίηση του Πειράματος *II* περιλαμβάνει καταγραφή του φαινομένου σε ανοικτό χώρο, ταυτόχρονα με τις τρεις μεθόδους παρακολούθησης (δορυφορικός εντοπισμός, βιντεομετρία και μικροκυματική συμβολομετρία). Προκειμένου να εξασφαλιστεί υψηλή ποιότητα πρωτογενών δεδομένων ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε ώστε να επικρατεί μικρή (< 2 m/s) ένταση του ανέμου κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Όπως και στο Πείραμα *I*, η κάμερα του συστήματος βιντεομετρίας τοποθετείται σε τέτοια θέση ώστε η διεύθυνση του άξονα της κάμερας να είναι κάθετη στο επίπεδο κίνησης της ράβδου. Η κεραία του δέκτη GNSS προσαρτάται στο άνω μέρος της ράβδου ενώ ο σταθερός δέκτης τοποθετείται σε απόσταση λίγων μέτρων από την διάταξη παρατήρησης. Για την καταγραφή της κίνησης με το σύστημα μικροκυματικής συμβολομετρίας ο αισθητήρας τοποθετείται σε θέση όπου ο σκοπευτικός του άξονας κείται στο επίπεδο της κίνησης της ράβδου όπως φαίνεται στο Σχήμα 2. Τα σενάρια που σχεδιάζονται και υλοποιούνται φαίνονται στον Πίνακα 3. Εδώ, την θέση του κύβου συγκεντρωμένης μάζας, παίρνει ο δέκτης GNSS.

Χ. Περάκης, Γ. Πηνιώτης, Α. Μπίμης, Β. Γκίκας
Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, ΕΜΠ

Πειραματική διερεύνηση & συγκριτική αξιολόγηση αισθητήρων δορυφορικού εντοπισμού, βιντεομετρίας και radar μικροκυματικής συμβολομετρίας στη μελέτη ταλαντώσεων τεχνικών έργων

Πίνακας 3: Σενάρια ελεύθερης ταλάντωσης Πειράματος–II

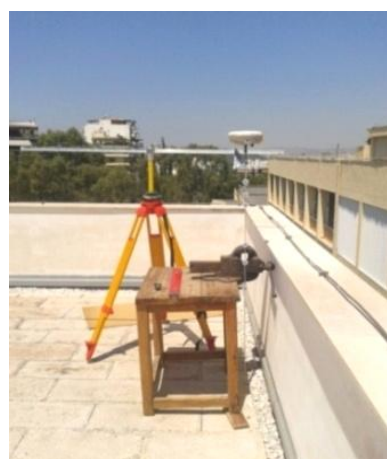
Σενάριο	Υλικό / Μήκος ράβδου	Στόχοι DIC	Μέθοδοι Παρακολούθησης
Π-1	Αλουμίνιο / 1 m	5 στόχοι (1-5)	DIC + GNSS
Π-2	Χάλυβας / 1 m	4 στόχοι (1-4)	DIC + GNSS
Π-3	Χάλυβας / 0,60 m	4 στόχοι (1-4)	DIC + GNSS
Π-4	Αλουμίνιο/ 0,60 m	3 στόχοι (1-3)	DIC + GNSS
Π-5	Αλουμίνιο / 0,60 m	3 στόχοι (1-3)	DIC + GNSS + GBMI
Π-6	Χάλυβας / 0,60 m	3 στόχοι (1-3)	DIC + GNSS + GBMI



Σχήμα 2: Γεωμετρία παρατήρησης συστήματος radar μικροκυματικής συμβολομετρίας



Σχήμα 3: Γεωμετρία παρατήρησης συστήματος βιντεομετρίας



Σχήμα 4: Διάταξη κατακόρυφης ράβδου με τους στόχους DIC και τον δέκτη GNSS. Η βοηθητική ράβδος μέτρησης του αρχικού εύρους ταλάντωσης φαίνεται πίσω από την διάταξη παρατήρησης

4. Επεξεργασία Πρωτογενών Μετρήσεων

4.1 Προεπεξεργασία δεδομένων

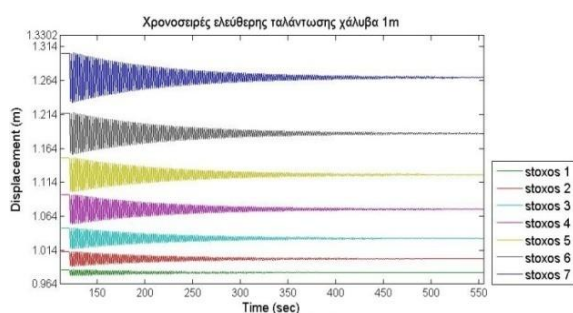
Το στάδιο προεπεξεργασίας των πρωτογενών μετρήσεων αρχικά περιλαμβάνει στατιστικό έλεγχο για την αφαίρεση χονδροειδών σφαλμάτων και αναγωγή των μετρήσεων σε ενιαίο σύστημα αναφοράς. Συγκεκριμένα, από τα δεδομένα του συστήματος βιντεομετρίας

Χ. Περάκης, Γ. Πηνιώτης, Α. Μπίμης, Β. Γκίκας
Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, ΕΜΠ

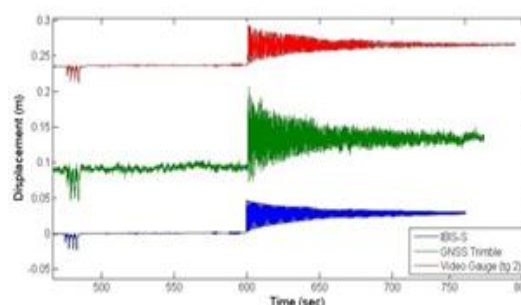
Πειραματική διερεύνηση & συγκριτική αξιολόγηση αισθητήρων δορυφορικού εντοπισμού, βιντεομετρίας και radar μικροκυματικής συμβολομετρίας στη μελέτη ταλαντώσεων τεχνικών έργων

5^ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας, Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών, Αθήνα, 9-10 Μαΐου 2014

εξάγεται η μετατόπιση των στόχων παρατήρησης στο επίπεδο κίνησης της ράβδου στο σύστημα εικονοσυντεταγμένων της κάμερας. Το σύστημα radar μικροκυματικής συμβολομετρίας παρέχει τις μετατοπίσεις του άνω μέρους της ράβδου (θέση τοποθέτησης μεταλλικού κώνου) κατά μήκος της διεύθυνσης σκόπευσης του αισθητήρα (Σχήμα 4). Τέλος, τα δεδομένα του συστήματος δορυφορικού εντοπισμού δίνουν την κίνηση της θέσης του δέκτη σε οριζοντιογραφία. Πραγματοποιείται μετασχηματισμός στροφής προκειμένου τα δεδομένα από τα επιμέρους συστήματα να καταστούν παράλληλα ούτως ώστε, η μελέτη του φαινομένου να εστιάζεται στην προβολή της κίνησης στο οριζόντιο επίπεδο. Τα Σχήματα 5 και 6 περιέχουν αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα από τα Πειράματα I και II.



Σχήμα 5: Χρονοσειρές οριζόντιας μετατόπισης των στόχων DIC (I-1)



Σχήμα 6: Χρονοσειρές οριζόντιας μετατόπισης ράβδου όπως προέκυψαν για τα συστήματα GNSS, DIC και GBMI (II-5)

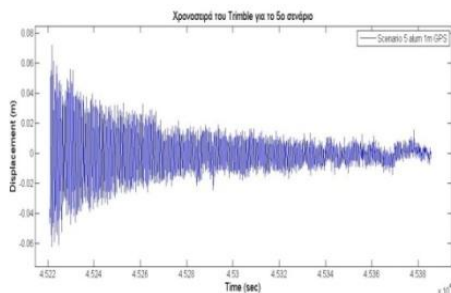
Στο πλαίσιο της επεξεργασίας δεδομένων που προέρχονται από διαφορετικούς αισθητήρες, γίνεται ο συγχρονισμός των δεδομένων που συλλέχθηκαν κατά το Πείραμα II. Στόχος της διαδικασίας αυτής είναι η άμεση σύγκριση των διαφορών του εύρους των χρονοσειρών των αισθητήρων μεταξύ κάθε σεναρίου. Η μεθοδολογία συγχρονισμού στηρίχθηκε στην τεχνική της ετεροσυσχέτισης (cross-correlation) (Mathworks, Cross-correlation).

4.2 Υπολογισμός παραμέτρων ταλάντωσης

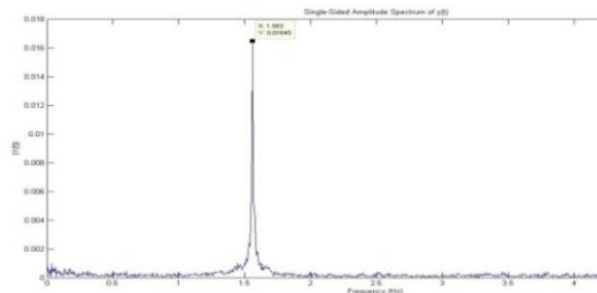
Κατά τον πειραματικό υπολογισμό των παραμέτρων της ελεύθερης ταλάντωσης, γίνεται διαχωρισμός των μεθόδων υπολογισμού τους με βάση την μορφή του φορτίου που χρησιμοποιείται. Ειδικότερα, υπολογίζονται το μέγιστο εύρος, το φάσμα συχνοτήτων ταλάντωσης και ο λόγος απόσβεσης της πειραματικής διάταξης. Ο υπολογισμός του φάσματος συχνοτήτων ταλάντωσης από τα δεδομένα GNSS και GBMI γίνεται με εφαρμογή του μετασχηματισμού *Fourier* (Smith 1999) και ειδικότερα με τη μέθοδο *Fast Fourier Transform (FFT)*. Στην περίπτωση των δεδομένων βιντεομετρίας η ανάλυση της κίνησης στο πεδίο των συχνοτήτων γίνεται με χρήση του περιοδογράμματος *Lomb*, (Mathworks Lomb-Scargle Periodogram 2013), δεδομένου ότι ο ρυθμός δειγματοληψίας δεν είναι σταθερός. Τέλος, η εκτίμηση του λόγου απόσβεσης για τα σεναρία των Πειραμάτων II και III, γίνεται με τη μέθοδο της “*λογαριθμικής μείωσης του εύρους της ταλάντωσης*” και με τη μέθοδο “*half-power point*” (*Vibration Damping*).

Χ. Περάκης, Γ. Πηνιώτης, Α. Μπίμης, Β. Γκίκας
Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, ΕΜΠ

Πειραματική διερεύνηση & συγκριτική αξιολόγηση αισθητήρων δορυφορικού εντοπισμού, βιντεομετρίας και radar μικροκυματικής συμβολομετρίας στη μελέτη ταλαντώσεων τεχνικών έργων



Σχήμα 8: Χρονοσειρά μετακινήσεων δορυφορικού δέκτη (Π-5)



Σχήμα 9: Διάγραμμα συχνότητας ταλάντωσης ράβδου δεδομένων δορυφορικού εντοπισμού (Π-5) που βρίσκεται εγγύτερα στο ελεύθερο άκρο.

5. Ανάλυση Αποτελεσμάτων και Συζήτηση

Για κάθε μία από τις δοκιμές του *Πειράματος-I* έγινε υπολογισμός της συχνότητας ταλάντωσης καθ' ύψος της ράβδου σε όλους τους διαθέσιμους στόχους παρατήρησης (βλ. Σχήμα 1, Πίνακας 1). Σημειώνεται ότι οι τιμές των συχνοτήτων ταλάντωσης που προέκυψαν είναι κοινές (με ακρίβεια 0.001 Hz) σε όλους τους στόχους παρατήρησης, γεγονός που καταδεικνύει την υψηλή επαναληψιμότητα της μεθόδου. Ο Πίνακας 4 περιέχει τις τιμές της συχνότητας ταλάντωσης του μονοβάθμιου συστήματος για το στόχο, για κατανεμημένο και συγκεντρωμένο φορτίο του *Πειράματος-I*. Εν γένει, παρατηρείται αντιστοιχία της διαφοροποίησης των τιμών συχνότητας ταλάντωσης και των φυσικών χαρακτηριστικών της εκάστοτε ράβδου. Για παράδειγμα, παρατηρείται πως η ράβδος με κατανεμημένο φορτίο ταλαντώνεται με μεγαλύτερη συχνότητα από ότι αυτή με συγκεντρωμένο, αλλά και πως η ράβδος αλουμινίου παρουσιάζει αυξημένες τιμές συχνότητας σε σχέση με τη ράβδο χάλυβα.

Πίνακας 4: Συχνότητα ταλάντωσης ράβδου με κατανεμημένο και συγκεντρωμένο φορτίο όπως προέκυψε από τις μετρήσεις DIC (*Πείραμα-I*)

	συχνότητα ταλάντωσης (Hz)			
	χάλυβας		αλουμίνιο	
Φορτίο	1.0 m	0.6 m	1.0 m	0.6 m
Κατανεμημένο	1.752	4.413	2.275	5.622
Συγκεντρωμένο	0.467	1.356	0.671	1.706

Στους Πίνακες 5 και 6 παρουσιάζονται τα μέγιστα εύρη και οι συχνότητες ταλάντωσης της ράβδου, αντίστοιχα, για το εκάστοτε σενάριο του *Πειράματος-II*. Σημειώνεται πως το σύστημα GBMI λαμβάνει τιμές μόνο για τα 2 σενάρια μήκους ράβδου 0.6m (αλουμίνιο και χάλυβας) εφόσον, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3, το σύστημα χρησιμοποιείται μόνο για τα σενάρια 5 και 6.

Χ. Περάκης, Γ. Πηγιώτης, Α. Μπίμης, Β. Γκίκας
Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, ΕΜΠ

Πειραματική διερεύνηση & συγκριτική αξιολόγηση αισθητήρων δορυφορικού εντοπισμού, βιντεομετρίας και radar μικροκομματικής συμβολομετρίας στη μελέτη ταλαντώσεων τεχνικών έργων

5^ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας, Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών, Αθήνα, 9-10 Μαΐου 2014

Για τη μέτρηση με το σύστημα GBMI τοποθετείται ειδικός στόχος επί της ράβδου, με αποτέλεσμα την αύξηση της μάζας της ταλαντευόμενης διάταξης. Ως εκ τούτου αναμένεται η μείωση της συχνότητας ταλάντωσής της, η οποία επιβεβαιώνεται από τη σύγκριση των τιμών συχνότητας των σεναρίων Π-3 και Π-6, καθώς και των σεναρίων Π-4 και Π-5, αντίστοιχα (Πίνακας 6). Συγκεκριμένα, παρατηρείται μείωση της συχνότητας ταλάντωσης με συστηματικό τρόπο κατά 0.02 Hz. Από 1.269 Hz σε 1.249 Hz και από 1.270 Hz σε 1.250 Hz για το σύστημα DIC και GNSS αντίστοιχα, για περιπτώσεις ράβδου χάλυβα 0.6 m πριν και μετά την προσθήκη του ανακλαστήρα GBMI. Όμοια συμπεράσματα προκύπτουν για την περίπτωση ράβδου αλουμινίου.

Πίνακας 5: Μέγιστα εύρη ταλάντωσης ράβδου στο άνω άκρο της ράβδου (Πείραμα-II)

αισθητήρας	μέγεθος	χάλυβας			αλουμίνιο		
		0.6 m		1.0 m	0.6 m		1.0 m
DIC	$D(m)$	0.0676	0.0952	0.0706	0.0611	0.0799	0.0479
GNSS	$D(m)$	0.089	0.127	0.080	0.134	0.091	0.066
GBMI	$D(m)$	---	0.0628	---	---	0.0455	---

Πίνακας 6: Συχνότητες ταλάντωσης ράβδου στο άνω άκρο της ράβδου (Πείραμα-II)

αισθητήρας	μέγεθος	χάλυβας			αλουμίνιο		
		0.6 m		1.0 m	0.6 m		1.0 m
		Π-3	Π-6	Π-2	Π-4	Π-5	Π-1
DIC	$f(Hz)$	1.269	1.249	0.470	1.581	1.562	0.674
GNSS	$f(Hz)$	1.270	1.250	0.469	1.582	1.563	0.674
GBMI	$f(Hz)$	---	1.248	---	---	1.560	---

Η διαφοροποίηση στις τιμές του εύρους οφείλεται στο διαφορετική θέση του κάθε στόχου-σύστημα παρατήρησης πάνω στη ράβδο (καθ' ύψος). Οι σχετικές διαφορές εύρους μεταξύ των συστημάτων παρατηρούνται σταθερές μεταξύ διαφορετικών σεναρίων διατηρώντας μια γενική ομοιότητα. Παρατηρείται ομοιομορφία των υπολογισμένων τιμών συχνότητας μεταξύ διαφορετικών μεθόδων καταγραφής. Η διαφορά στις υπολογισμένες με διαφορετικούς αισθητήρες συχνότητες ταλάντωσης είναι αμελητέα λαμβανομένου υπόψη της διαφοράς του ρυθμού δειγματοληψίας των μεθόδων καταγραφής, που έχει ως αποτέλεσμα τη διαφορετική ανάλυση στο φάσμα συχνοτήτων ταλάντωσης, καθώς και τη διαφοροποίηση των μεθόδων υπολογισμού της (π.χ. FFT ή Lomb).

Ο Πίνακας 7 περιέχει τις τιμές του υπολογισμένου λόγου απόσβεσης (λ) για τις διαφορετικές μεθόδους καταγραφής των σεναρίων του Πειράματος-II. Επιλέγεται να παρουσιαστούν οι τιμές που υπολογίστηκαν με την μέθοδο λογαριθμικής μείωσης εύρους

ταλάντωσης καθώς με αυτήν επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ακρίβεια στον υπολογισμό του (λ). Οι διαφορές των τιμών του υπολογισμένου λόγου απόσβεσης (λ) είναι εμφανώς αυξημένες σε σχέση με αυτές της συχνότητας. Ωστόσο, παρατηρείται ομοιομορφία των τιμών (λ) για διαφορετικές μεθόδους καταγραφής. Σημειώνεται ότι ο λόγος απόσβεσης είναι η δυναμική παράμετρος των κατασκευών που δε μπορεί να προσδιοριστεί με αξιοπιστία όταν αυτές υπόκεινται σε λειτουργικά ή περιβαλλοντικά φορτία (Felber, 1993).

Πίνακας 7: Συντελεστής απόσβεσης ταλάντωσης ράβδου (Πείραμα-II)

αισθητήρας	μέγεθος	χάλυβας		αλουμίνιο	
		0.6 m	1.0 m	0.6 m	1.0 m
DIC	λ (%)	0.49	0.45	0.20	0.21
GNSS	λ (%)	0.43	0.16	0.16	0.16
GBMI	λ (%)	0.43	---	0.17	---

6. Συμπεράσματα

Στην εργασία αυτή έγινε προσπάθεια διερεύνησης των εγγενών χαρακτηριστικών, των δυνατοτήτων και των προβλημάτων που παρουσιάζουν σύγχρονες τοπογραφικές μέθοδοι με εφαρμογή στην παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς των κατασκευών. Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων διαπιστώνεται ότι:

- Παρατηρούνται υψηλά επίπεδα συμβιβαστότητας των υπολογιζόμενων παραμέτρων με χρήση διαφορετικών μεθόδων καταγραφής. Ο υπολογισμός της συχνότητας δίνει μικρές αποκλίσεις, για τα δεδομένα με τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά.
- Από την αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος *GNSS* σε σύγκριση με τα συστήματα *GBMI* και *DIC*, με χρήση συγχρονισμένων χρονοσειρών οριζόντιων μετακινήσεων, παρατηρείται ότι η απόκλιση των καταγεγραμμένων μετακινήσεων είναι της τάξης ως και 5 mm για χρονοσειρές οριζόντιας μετακίνησης εγγύς-υψομετρικά - στόχων.
- Η χρήση της κατάλληλης μεθόδου υπολογισμού συχνότητας ταλάντωσης (*FFT*, *Lomb periodogram*) καθορίζεται από τον ρυθμό δειγματοληψίας (σταθερός / μεταβλητός) των πρωτογενών δεδομένων μετρήσεων.
- Κατά την διαδικασία εκτίμησης του λόγου απόσβεσης παρατηρείται πως η μέθοδος “λογαριθμικής μείωσης” παρέχει, εν γένει, αποτελέσματα μεγαλύτερης συμβιβαστότητας μεταξύ των μεθόδων καταγραφής.
- Κατά την εφαρμογή διαδικασίας ετεροσυσχέτισης, για τον συγχρονισμό δεδομένων, παρατηρείται πως το επίπεδο ακρίβειας συγχρονισμού συνδέεται άμεσα με τον ρυθμό δειγματοληψίας τον οποίο λαμβάνουν τα δεδομένα από την διαδικασία της επαναδειγματοληψίας. Η ακρίβεια συγχρονισμού (εκφρασμένη σε sec) συμπίπτει, εν πολλοίς, με τον τελικό ρυθμό δειγματοληψίας των δεδομένων.

Βιβλιογραφία

- Ανδρουλάκη Α. «*Τεχνολογία Επίγειου Radar Συνθετικού Ανοίγματος Εφαρμογή στη Μέτρηση Ταλαντώσεων Υψηλών Κατασκευών.*» Αθήνα: Μεταπτυχιακή Εργασία, Ε.Μ.Π., 2011.
- Κωμοδρόμος Π. «*Προχωρημένη Ανάλυση Κατασκευών με Η/Υ.*» Διαφάνειες διαλέξεων. Λευκωσία: Πανεπιστήμιο Κύπρου, 2010.
- Στρατάκος Ι., Γκίκας Β., Σακελλαρίου Μ., Δασκαλάκης Σ. «*Ενόργανη Παρακολούθηση Δυναμικής Ταλάντωσης με Τεχνικές Πειραματικής Μηχανικής και Γεωδαιτικές Μεθόδους.*» 3ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας. 2008.
- Ψιμούλης Π. «*Τεκμηρίωση Δυνατότητας Μετρήσεων Ταλαντώσεων Δύσκαμπτων Κατασκευών με GPS και Ρομποτικό Θεοδόλιχο (RTS): Πειραματική, Αναλυτική Προσέγγιση και Εφαρμογές.*» Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών, Διδακτορική Διατριβή, 2009.
- Chopra A. «*Dynamics of Structures - Theory and Applications to Earthquake Engineering.*» New Jersey: Prentice Hall, 1995.
- Coleman R. «*Experimental Structural Dynamics: An Introduction to Experimental Methods of Characterizing Vibrating Structures.*» AuthorHouse, 2004.
- Gentile C. «*Application of Radar Technology to Deflection Measurement and Dynamic Testing of Bridges.*» Στο *Radar Technology*, του/της Dr. Kouemou G., 410. Croatia: INTECH, 2009.
- Gikas V. «*Ambient Vibration Monitoring of Slender Structures by Microwave Interferometer Remote Sensing*», Journal of Applied Geodesy, Vol. 6(3-4), pp 167–176, 2012
- Gikas V. Karydakakis P., Mpimis A., Piniotis G., Rodopoulos J. «*Structural Integrity Verification of a Cable-stayed Footbridge Based on Conventional and Non-Conventional Geodetic Data*», 2nd Joint Int. Symposium on Deformation Measurements, Nottingham, UK, Sept. 9–10, 2013
- IMetrum. 2013. www.imetrum.com
- Kwiek D., Dr Setchell C., Dr Rossiter J. «*High Accuracy Non-Contact Optical Measurement Systems Embedded Applications with Imetrum.*» First Annual Research Conference for the Engineering doctorate in Systems. Bristol: University of Bristol, 2010.
- Mathworks Lomb-Scargle Periodogram.
2013.<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/20004-lomb-lomb-scargle-periodogram/content/lomb.m>.
- Mathworks Cross-correlation.
www.mathworks.com/help/signal/ref/xcorr.html
- Vibration Damping, www.mfg.mtu.edu/cyberman/machtool/machtool/vibration/damping.html
- Nikitopoulou A., Protopsalti K., Stiros S. «*Monitoring dynamic and quasi-static deformations of large flexible engineering structures with GPS: Accuracy, limitations and promises.*» Engineering Structures 28 . 2006. 1471–1482.
- Palombo A., Pignatti S., Perrone A., Soldovieri F., Stabile T-A, Pascucci S. «*Noninvasive Remote Sensing Techniques for Infrastructures Diagnostics.*» *International Journal of Geophysics*, 2011.
- Potter K., Setchell C. «*Point-to-Point non-contact video extensometry for composite materials and structures - a comparison with full-field methods.*» 3rd International Conference on Composite Materials and Model Identification. Porto, 2006
- Smith S. *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. San Diego: California Technical Publishing , 1999

Χ. Περάκης, Γ. Πηνιώτης, Α. Μπίμης, Β. Γκίκας
Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, ΕΜΠ

Πειραματική διερεύνηση & συγκριτική αξιολόγηση αισθητήρων δορυφορικού εντοπισμού, βιντεομετρίας και radar μικροκομματικής συμβολομετρίας στη μελέτη ταλαντώσεων τεχνικών έργων

5^ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας, Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών, Αθήνα, 9-10 Μαΐου 2014

Stephen G.A., Brownjohn J.M.W., Taylor C.A. «*Measurements of static and dynamic displacement from visual monitoring of the Humber Bridge.*» Στο *Engineering Structures*, Volume 15, Issue 3, 197-208. 1993

«*Trimble 5800 GPS system Datasheet.*» www.trimble.com. 2004.

http://ww2.trimble.com/5800_ds.asp

Felber A., «*Development of a hybrid bridge evaluation system*», PhD Dissertation, Department of Civil Engineering, The University of British Columbia, 1993

Χ. Περάκης, Γ. Πηνιώτης, Α. Μπίμης, Β. Γκίκας
Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, ΕΜΠ

Πειραματική διερεύνηση & συγκριτική αξιολόγηση αισθητήρων δορυφορικού εντοπισμού, βιντεομετρίας και radar μικροκυματικής συμβολομετρίας στη μελέτη ταλαντώσεων τεχνικών έργων

5^ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας, Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών, Αθήνα, 9-10 Μαΐου 2014