

ΕΝΟΡΓΑΝΗ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗΣ ΜΕ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ.

Instrumental Monitoring of Dynamic Vibrations Implementing
Experimental Mechanics Techniques and Geodetic Methods.

Ιωάννης ΣΤΡΑΤΑΚΟΣ¹, Βασίλης ΓΚΙΚΑΣ², Μιχάλης ΣΑΚΕΛΛΑΡΙΟΥ³, Σταμάτης
ΔΑΣΚΑΛΑΚΗΣ⁴

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Σε αυτή την εργασία διερευνάται η δυνατότητα εφαρμογής σύγχρονων γεωδαιτικών αισθητήρων και οπτικών ινών για την ψηφιακή καταγραφή και ανάλυση της ταλάντωσης τεχνικών έργων που οφείλεται σε σεισμική φόρτιση. Η προσομοίωση του σεισμικού κύματος κατά την πειραματική διαδικασία επιτυγχάνεται με την βοήθεια σεισμικής τράπεζας με ένα βαθμό ελευθερίας. Η πειραματική διαδικασία περιλαμβάνει την δημιουργία ταλαντώσεων ελεγχόμενης συχνότητας και πλάτους και την καταγραφή τους με χρήση επιταχυνσιογράφου, οπτικών ινών και ζεύγους δεκτών GPS δύο συχνοτήτων. Η ανάλυση των μετρήσεων περιλαμβάνει προεπεξεργασία των μετρήσεων, αναγωγή των μετρημένων μεγεθών σε ενιαίο σύστημα αναφοράς και υπολογισμό των παραμέτρων της ταλάντωσης ξεχωριστά για κάθε αισθητήρα. Χρήσιμα συμπεράσματα προκύπτουν ως προς τις δυνατότητες και τους περιορισμούς που παρουσιάζει κάθε τύπος αισθητήρα. Η εργασία καταλήγει σε αξιόλογες διαπιστώσεις αναφορικά με την χρήση των υπό εξέταση μεθόδων για την εφαρμογή τους στην παρακολούθηση της σεισμικής κίνησης τεχνικών έργων.

ABSTRACT: The scope of this paper is to investigate the usefulness of modern geodetic equipment in common with acceleration and fiber optics sensors in the field of digital recording and analysis of vibrational response due to seismic load. The seismic wave simulation is performed via a seismic table with one degree of freedom. The experimental methodology comprises the creation of a reference vibrational movement of preset frequency and amplitude values and the recording of the response signal with acceleration and fiber optics sensors, as well as two dual-frequency GPS receivers. Data analysis involves pre-processing of the raw data, rectification of the measured units into a common coordinate system and computation of the excitation parameters for every sensor individually. Several interesting issues arise regarding the operational advantages and disadvantages of the sensors used in this study. Finally, useful conclusions are drawn with regard to the techniques and sensors used in relation to the special needs pertain to the monitoring of the seismic behavior of structural works.

¹ Δρ., Σχολή Αγρ. και Τοπογράφων Μηχανικών, ΕΜΠ, email: stratakos@gmail.com

² Λέκτορας, Σχολή Αγρ. και Τοπογράφων Μηχανικών, ΕΜΠ, email: vgikas@central.ntua.gr

³ Καθηγητής, Σχολή Αγρ. και Τοπογράφων Μηχανικών, ΕΜΠ, email: mgsakel@mail.ntua.gr

⁴ Αγρ. Τοπογράφος, Σχολή Αγρ. και Τοπογράφων Μηχανικών, ΕΜΠ, email: stamdask@gmail.com

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ενόργανη παρακολούθηση των τεχνικών έργων έχει καθιερωθεί τα πρόσφατα χρόνια ως ένα μέσο παρατήρησης και καταγραφής της διαχρονικής εξέλιξης των ποιοτικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών των κατασκευών. Σε αυτό το πλαίσιο, η μελέτη των χαρακτηριστικών παραμέτρων απόκρισης των κατασκευών έναντι σεισμικής δράσης είναι ιδιαίτερης σημασίας για την διακρίβωση των προδιαγραφών ασφαλείας μετά από ένα σεισμικό γεγονός. Ειδικές τεχνικές παρακολούθησης έχουν εφαρμοστεί σε ένα πλήθος έργων υποδομής όπως γέφυρες, φράγματα, υψηλά κτίρια, τηλεπικοινωνιακοί σταθμοί, καθώς και υπόγεια τεχνικά έργα όπως δεξαμενές, σήραγγες και εγκαταστάσεις ΜΕΤΡΟ (Brownjohn, 2000, 2001; Büyükoztürk and Yu, 2003; Celebi, 1998, 2006; Lu et al, 2006). Με αυτό τον τρόπο, η μελέτη της συμπεριφοράς των κατασκευών εξ' αιτίας της σεισμικής δράσης έχει αξιοποιηθεί στην πρόληψη καταστροφών, στην βελτίωση των τεχνικών συντήρησης υφιστάμενων κατασκευών, καθώς και στην βελτιστοποίηση των μεθόδων σχεδιασμού νέων υποδομών (Miller et al, 1988; Reinhorn and Manolis, 1989; Sumitro et al, 2004).

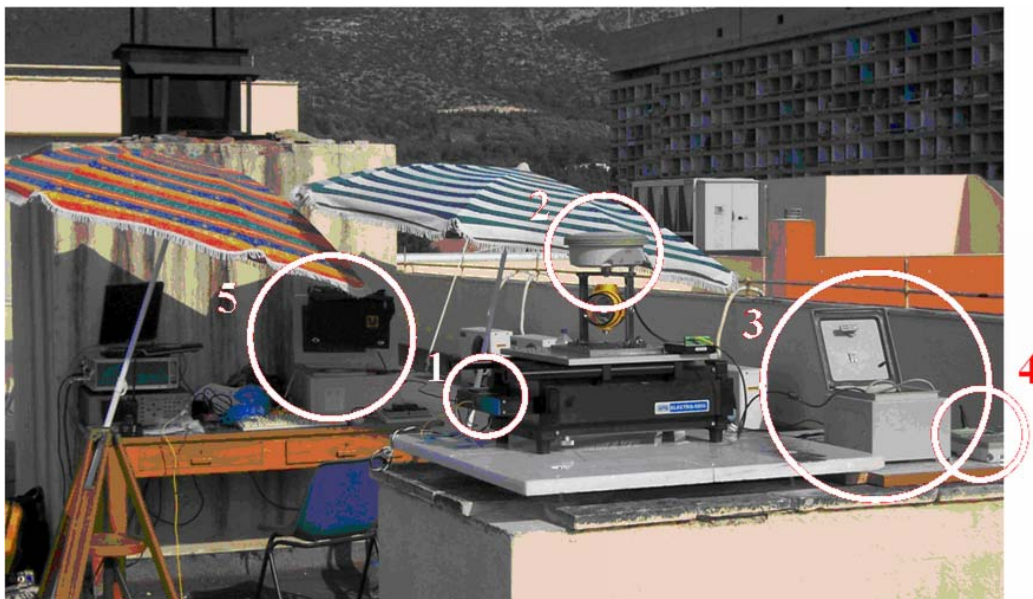
Η εφαρμογή της ενόργανης παρακολούθησης των κατασκευών προϋποθέτει τη χρησιμοποίηση ειδικών μετρητικών μονάδων για την συλλογή της πρωτογενούς πληροφορίας, όπου η κατάλληλη επιλογή αισθητήρων είναι ουσιώδης για την αποτελεσματική εξαγωγή συμπερασμάτων και τη λήψη αποφάσεων. Ανάλογα με τα φυσικά μεγέθη που καθορίζουν την συμπεριφορά της κατασκευής επιλέγονται αισθητήρες καταγραφής θερμοκρασίας, υγρασίας, παραμορφώσεων, φορτίων, κλίσης, θέσης, επιτάχυνσης κ.α. (Soong, 1990; Sumitro et al, 2004). Σε αυτή τη διαδικασία, κάθε επιμέρους μετρητική μονάδα που αποτελεί μέρος ενός συστήματος ενόργανης παρακολούθησης θα πρέπει να υπόκειται υποχρεωτικά σε βαθμονόμηση από τον κατασκευαστή πριν χρησιμοποιηθεί σε κάποιο έργο. Το γεγονός αυτό διασφαλίζει την λήψη μετρήσεων προσδιορισμένης ποιότητας (ακρίβεια και αξιοπιστία) από τον εκάστοτε αισθητήρα, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή. Ωστόσο, η ενσωμάτωση των αισθητήρων σε ένα τεχνικό έργο και η χρησιμοποίησή τους ως μέρος μιας σύνθετης συνδεσμολογίας και μετρητικής μεθοδολογίας επιβάλλουν την βαθμονόμηση της τελικής μετρητικής διάταξης, ως μέρος πλέον του τεχνικού έργου. Στην ειδικότερη περίπτωση όπου επιδιώκεται η ενόργανη παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς μιας κατασκευής έναντι σεισμικής δράσης, είναι καταρχήν απαραίτητο να μελετηθεί η απόκριση των αισθητήρων σε κάποια "πρότυπη διέγερση" και η σύγκριση των μετρήσεων που παρέχουν με τις παραμέτρους της "πρότυπης διέγερσης". Κάτι τέτοιο όμως είναι εξ ορισμού αδύνατο γιατί δεν είναι τεχνικά εφικτό να επιβληθεί σε μία κατασκευή πραγματικών διαστάσεων μια πρότυπη σεισμική διέγερση και επιπλέον το όλο σύστημα της μετρητικής διάταξης και της κατασκευής δεν είναι απομονωμένο από την επιρροή εξωτερικών παρεμβολών και θορύβου, επιρροών που δεν υπάρχουν κατά την εργοστασιακή βαθμονόμηση των αισθητήρων.

Η εργασία αυτή αποσκοπεί στη διερεύνηση των δυνατοτήτων που προσφέρουν τεχνικές πειραματικής μηχανικής σε συνδυασμό με γεωδαιτικές μεθόδους στη μελέτη παρακολούθησης ελεγχόμενης δυναμικής ταλάντωσης. Στο παρελθόν έχουν εφαρμοσθεί ξεχωριστά και οι δύο προσεγγίσεις σε πειραματικό στάδιο (Gikas and Daskalakis, 2006; Nickitopoulou et al, 2006; Roberts et al, 2000). Σε αυτή την εργασία μελετάται η

συνδυασμένη χρήση τους και η συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που παρέχουν. Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την καταγραφή των κινηματικών χαρακτηριστικών και παραμορφώσεων περιλαμβάνουν τη χρήση οπτικών ινών, δύο αισθητήρων επιτάχυνσης και ζεύγους γεωδαιτικών δεκτών GPS για τον προσδιορισμό θέσης του κινούμενου φορέα. Η κίνηση που επιβάλλεται στους αισθητήρες δημιουργείται με την βοήθεια σεισμικής τράπεζας και με ειδική μεθοδολογία εξασφαλίζεται ότι έχει συγκεκριμένο εύρος και συχνότητα. Ο συνδυασμός παραδεδεγμένων μεθόδων πειραματικής μηχανικής και γεωδαιτικών μεθόδων καθιστά δυνατή την βαθμονόμηση και την αξιολόγηση της μετρητικής διάταξης σε συνθήκες φυσικού περιβάλλοντος, με τις συνακόλουθες πηγές θορύβου, αλλά αξιοποιώντας πηγή κίνησης με χαρακτηριστικά αναφοράς.

ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗΣ

Το σύστημα παρακολούθησης προσομοίωσης σεισμικής ταλάντωσης αποτελείται από τέσσερα επιμέρους υποσυστήματα (Σχήμα 1). Ειδικότερα, συνίσταται από τον φορέα γένεσης της ταλάντωσης και τους αισθητήρες καταγραφής της κίνησης (επιταχυνσιογράφος / επιταχυνσιόμετρα, αισθητήρες οπτικών ινών και γεωδαιτικοί δέκτες GPS).



Σχήμα 1. Σύστημα καταγραφής δυναμικής ταλάντωσης με μεθόδους πειραματικής μηχανικής και χρήση της τεχνολογίας GPS: (1) οπτική ίνα, (2) κεραία δέκτη GPS, (3) επιταχυνσιογράφος, (4) δέκτης GPS, (5) Η/Υ.

Η διαμόρφωση του σήματος που επιβάλλεται στην σεισμική τράπεζα για την δημιουργία της κίνησης αναφοράς δημιουργείται χρησιμοποιώντας έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή. Ο υπολογιστής αυτός ελέγχει την δημιουργία της κίνησης και διενεργεί την επεξεργασία της ανάδρασης σήματος, το οποίο αφορά το εύρος και τη συχνότητα κίνησης. Η διαμόρφωση ενός συστήματος αυτόματου ελέγχου αποδείχθηκε απαραίτητη τόσο για την επίλυση ζητημάτων συγχρονισμού των επί μέρους μετρητικών συστημάτων όσο και αυτοματισμού της μεθοδολογίας βαθμονόμησης της διάταξης. Εξάλλου, η δυνατότητα επεξεργασίας σημάτων ανάδρασης από τον υπολογιστή σε πραγματικό χρόνο έδωσε την δυνατότητα διόρθωσης των παραμέτρων ταλάντωσης της τράπεζας κατά την διάρκεια των μετρήσεων και την

επίτευξη κίνησης αναφοράς υψηλής ακρίβειας. Η ονομαστική ακρίβεια εφαρμογής της συχνότητας από την κάρτα εισόδου-εξόδου (National Instruments Lab-PC+) του υπολογιστή ήταν $\pm 1 \times 10^{-6}$ Hz, ενώ η ακρίβεια προσδιορισμού του εύρους ταλάντωσης βάσει του συστήματος διόρθωσης κλειστού βρόγχου ήταν ± 0.02 mm.

Συσκευή Προσομοίωσης Σεισμικής Διέγερσης

Η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία της κίνησης αναφοράς ήταν μια μικρών διαστάσεων σεισμική τράπεζα κατασκευασμένη από την APS Dynamics (APS Dynamics, 2003). Αποτελείται από δύο κύρια τμήματα, το τμήμα ενίσχυσης του αναλογικού σήματος και το τμήμα κίνησης. Το πρώτο ευθύνεται για την μετατροπή του χαμηλής ισχύος σήματος τροφοδοσίας σε σήμα κατάλληλο για την απ' ευθείας οδήγηση της τράπεζας (τύπος EP-124), ενώ το δεύτερο για την μετατροπή του ηλεκτρικού σήματος υψηλής ισχύος σε κινητική ενέργεια (τύπος ELECTRO-SEIS Shaker 400). Τόσο το πρώτο όσο και το δεύτερο τμήμα χαρακτηρίζονται από λειτουργικούς περιορισμούς, οι οποίοι λήφθηκαν υπόψη κατά το σχεδιασμό της μεθοδολογίας των πειραμάτων. Το τμήμα ενίσχυσης τροφοδοτεί με πεπερασμένη ηλεκτρική ισχύ την τράπεζα, κάτι που σημαίνει πρακτικά ότι όσο η συχνότητα ταλάντωσης αυξάνεται τόσο το εύρος της τείνει να μειωθεί και για το λόγο αυτό απαιτείται διόρθωση. Η δε τράπεζα περιορίζεται από το μέγιστο εύρος ταλάντωσης (± 6 cm) του ελεύθερου πλαισίου. Το δυναμικό εύρος συχνοτήτων ταλάντωσης φτάνει τα 100 Hz με δραστικά μειωμένο το πλάτος της ταλάντωσης. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι όσο μεγαλύτερη είναι η μάζα των αισθητήρων που τοποθετούνται στο φορείο της σεισμικής τράπεζας τόσο μεγαλύτερη αδράνεια παρουσιάζει αυτό και συνακόλουθα μειώνεται το εύρος συχνοτήτων ταλάντωσης.

Αισθητήρες Καταγραφής Επιτάχυνσης

Η καταγραφή των τιμών επιτάχυνσης έγινε με δύο αισθητήρες, διαφορετικών προδιαγραφών και δυνατοτήτων. Ο πρώτος αισθητήρας (QDR της Kinemetrics) παρέχει την ικανότητα καταγραφής τιμών επιτάχυνσης με συχνότητα 50 Hz σε τρεις διαστάσεις και με ακρίβεια ± 0.001 g (Kinemetrics, 2001). Η καταγραφή γίνεται στην εσωτερική μνήμη της συσκευής, δυνατότητα που διευκολύνει τη λειτουργική αξιοποίηση της μονάδας καθώς λειτουργεί ανεξάρτητα υμέτερου συστήματος καταγραφής. Ταυτόχρονα, το χαρακτηριστικό αυτό αποτελεί και μειονέκτημα, καθώς δεν υπάρχει τρόπος ταυτοποίησης σε πραγματικό χρόνο της τιμής της τρέχουσας επιτάχυνσης. Μόνο μετά την ολοκλήρωση του κύκλου μέτρησης μπορεί να γίνει άντληση των δεδομένων από την εσωτερική μνήμη της συσκευής προς έναν υπολογιστή. Η εσωτερική μνήμη της συσκευής έχει χωρητικότητα καταχώρησης μετρήσεων διάρκειας της τάξης των 15 min. Η μετατροπή των δεδομένων γίνεται με ειδικό λογισμικό της Kinemetrics το οποίο αποδίδει τα μετρούμενα μεγέθη είτε με μονάδες ηλεκτρικής τάσης είτε ως ποσοστό της επιτάχυνσης της βαρύτητας (g).

Πλέον του επιταχυνσιογράφου, χρησιμοποιήθηκε ένας ακόμα αισθητήρας, ο οποίος παρείχε την δυνατότητα μέτρησης της επιτάχυνσης σε πραγματικό χρόνο. Αυτή η μετρητική μονάδα, βασισμένη στον αισθητήρα MXD2020EF της Memsic παρείχε την δυνατότητα μέτρησης τιμών επιτάχυνσης σε δύο διευθύνσεις με συχνότητα 17 Hz. Η έξοδος καθενός από τα δύο κανάλια δίνει ψηφιακούς παλμούς διαμορφωμένους κατά διάρκεια (Pulse Width Modulation). Η τιμή της επιτάχυνσης αντιστοιχεί στο λόγο διάρκειας του θετικού παλμού προς τη συνολική διάρκεια του παλμού. Η αποκωδικοποίηση του μεγέθους γίνεται από ηλεκτρονικό

υπολογιστή σε περιβάλλον LabView, όπου το σήμα του αισθητήρα ψηφιοποιείται με συχνότητα 44.1kHz και ανάλυση 16 bit. Η τελική τιμή επιτάχυνσης καταγράφεται με συχνότητα 10Hz και αποτελεί το μέσο όρο 5 μετρήσεων. Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό του αισθητήρα είναι οι μικρές διαστάσεις και το μικρό του βάρος σε σχέση με τον αισθητήρα QDR. Ενώ ο αισθητήρας Memsic έχει διαστάσεις 2x2x1mm, ο αισθητήρας QDR έχει διαστάσεις 12x1.5x5cm και βάρος 2gr και 150gr αντίστοιχα. Ακόμα και μέσα στο προστατευτικό κουτί του, το βάρος του αισθητήρα Memsic δεν ξεπερνά τα 10gr. Τα χαρακτηριστικά αυτά τον καθιστούν ιδανικό για εφαρμογές όπου απαιτείται αισθητήρας μικρών διαστάσεων και βάρους. Το τελικά μετρούμενο μέγεθος από τον αισθητήρα αποδίδεται και αυτό ως ποσοστό της επιτάχυνσης της βαρύτητας g με ακρίβεια $\pm 0.002g$ (Memsic, 2007).

Η χρήση δυο αισθητήρων επιτάχυνσης κρίθηκε απαραίτητη για την πραγματοποίηση της παρούσας εργασίας αφενός γιατί στη σεισμική μηχανική η επιτάχυνση είναι το μέγεθος με την πλέον ιδιάζουσα σημασία και αφετέρου γιατί οι δύο αισθητήρες εκπροσωπούν τις δύο μεγαλύτερες κατηγορίες αισθητήρων επιτάχυνσης, των μηχανικών και των θερμικών, οι οποίες ανταποκρίνονται διαφορετικά σε θερμικές, ηλεκτροστατικές και ηλεκτρομαγνητικές πηγές θορύβου.

Σύστημα Αισθητήρων Οπτικών Ινών

Η συσκευή οπτικών ινών, η οποία χρησιμοποιήθηκε, είναι τύπου W3/4250 Swept Laser Interrogator και παρέχει γρήγορες και ακριβείς μετρήσεις σε πλήθος διασυνδεδεμένων οπτικών αισθητήρων σε πραγματικό χρόνο. Το συγκεκριμένο μοντέλο μπορεί να μετρήσει ταυτόχρονα μέχρι 512 οπτικούς αισθητήρες με <0.2 nm ανάλυση, 5 nm επαναληπτικότητα και 50Hz συχνότητα δειγματοληψίας. Επίσης, το εύρος του μήκους κύματος κυμαίνεται από 1520 μέχρι 1570 nm ή 1510 μέχρι 1590 nm και η συσκευή αυτή μπορεί να ελεγχθεί και να ελεγχθεί και να παρακολουθηθεί τόσο από την ενσωματωμένη οθόνη και το πληκτρολόγιο που διαθέτει όσο και από απόσταση μέσω εντολών TCP/IP. Για την τελευταία επιλογή διατίθεται ειδική εφαρμογή ελέγχου η οποία πραγματοποιεί και την καταγραφή των μετρημένων ποσοτήτων.

Η συσκευή καταγράφει την ταλάντωση του αισθητήρα οπτικής ίνας ως ταλάντωση της τιμής του μήκους κύματος γύρω από μια τιμή αναφοράς, η οποία είναι χαρακτηριστική για τον κάθε αισθητήρα. Οι τιμές μήκους κύματος μπορούν να αναχθούν στη συνέχεια σε ανηγμένη παραμόρφωση χρησιμοποιώντας μια γραμμική σχέση. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή, η συσκευή δεν χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση παραμορφώσεων αλλά για την επαλήθευση τιμών συχνοτήτων. Έμφαση δόθηκε στο μέγεθος αυτό, καθώς οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται πλέον για την μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς κατασκευών και της καταγραφής φαινομένων με μικρή διάρκεια, εργασία απαιτητική στο χώρο των συχνοτήτων και στην καταγραφή με ακρίβεια του φασματικού περιεχομένου της διέγερσης.

Δέκτες Δορυφορικού Εντοπισμού GPS Υψηλής Ακρίβειας

Σε αντιδιαστολή με τις μεθόδους πειραματικής μηχανικής, βάσει των οποίων τα χαρακτηριστικά της ταλάντωσης προσδιορίζονται από μετρήσεις μη χωρικών (μονοδιάστατων) μεγεθών, η χρήση του δορυφορικού συστήματος εντοπισμού GPS παρέχει

άμεσα την θέση (3-Δ συντεταγμένες) του κινούμενου βραχίονα σε χρονικές στιγμές που καθορίζονται από τη συχνότητα δειγματοληψίας των δεκτών GPS. Η αρχή υπολογισμού του κινούμενου δέκτη στηρίζεται στη μέτρηση των φάσεων του φέροντος κύματος του σήματος GPS στις συχνότητες L1 ή L1/L2 στους δύο δέκτες. Η τεχνική του σχετικού κινηματικού εντοπισμού παρέχει τον προσδιορισμό της θέσης του κινούμενου δέκτη ως προς τον σταθμό αναφοράς, όταν ο κινούμενος και ο σταθερός δέκτης παρατηρούν ταυτόχρονα τους ίδιους δορυφόρους - οπότε τα κοινά σφάλματα στις πρωτογενείς παρατηρήσεις (λόγω της διάδοσης του σήματος GPS στην ατμόσφαιρα, ατέλειες στη λειτουργία των χρονομέτρων των δεκτών και των δορυφόρων) ελαχιστοποιούνται (Leick, 2004; Sickel, 2001).

Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας χρησιμοποιήθηκε ένα ζεύγος γεωδαιτικών δεκτών GPS (L1/L2) της εταιρείας Leica Geosystems (model GX1230 GG) με δυνατότητα δειγματοληψίας 20 Hz. Ο προσδιορισμός των παραμέτρων (βασική συχνότητα και εύρος κίνησης) της ταλάντωσης του κινούμενου δέκτη προέκυψε με εφαρμογή μεθόδων φασματικής ανάλυσης στις μετρημένες θέσεις του κινούμενου στόχου - κεραία GPS (Proakis and Manolakis, 1996).

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Προπαρασκευαστικές Εργασίες

Ο χώρος που έγιναν οι δοκιμές ήταν το δώμα του κτιρίου «Λαμπαδαρίου» της σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Ε.Μ.Π. Η σεισμική τράπεζα τοποθετήθηκε σε ειδικό υπερυψωμένο βάθρο με κατάλληλη σταθεροποίηση ώστε η ταλάντωση του φορείου της τράπεζας να μην προκαλεί την κίνηση ολόκληρου του σώματος της τράπεζας. Επί του φορείου της τράπεζας τοποθετήθηκαν κατάλληλα ο επιταχυνσιογράφος, το επιταχυνσιόμετρο, η κεραία του GPS και ο αισθητήρας των οπτικών ινών. Το περιβάλλον μετρήσεων μπορεί να χαρακτηριστεί ιδιαίτερα επιβαρυνόμενο τόσο για το δέκτη GPS όσο και για τις οπτικές ίνες, εφόσον οι κεραίες εκπομπής που βρίσκονται εγκατεστημένες στον Υμητό παρεμποδίζουν με υψηλά επίπεδα θορύβου τη λειτουργία των δεκτών GPS, ενώ οι υψηλές θερμοκρασίες κατά την διάρκεια της ημέρας που έγιναν οι μετρήσεις δημιούργησαν σχετικές αποκλίσεις πολύ χαμηλής συχνότητας (drift) της τιμής του μετρούμενου μήκους κύματος από το μήκος κύματος αναφοράς του αισθητήρα οπτικών ινών.

Ιδιαίτερης σημασίας ήταν το ζήτημα συγχρονισμού των αισθητήρων. Η οποιαδήποτε ύπαρξη υστέρησης ανάμεσα στα ρολόγια των συσκευών καταγραφής θα οδηγούσε σε ύπαρξη διαφοράς φάσης στις καταγραφόμενες κυματομορφές. Για την απαλοιφή τέτοιων φαινομένων χρησιμοποιήθηκε συγχρονισμός των εμπλεκόμενων υπολογιστών με σύστημα συγχρονισμού μέσω σήματος GPS. Αν και θα μπορούσε να γίνει πιο εύκολα συγχρονισμός με κάποιον εξυπηρετητή ώρας (time server) επιλέχθηκε η προηγούμενη μέθοδος ώστε να είναι εφικτή η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις καταγραφές του GPS οι οποίες ήταν ήδη συγχρονισμένες με το εν λόγω σύστημα μέτρησης χρόνου αναφοράς.

Περιγραφή Πειράματος

Η διεξαγωγή του πειράματος περιελάμβανε την τοποθέτηση της σεισμικής τράπεζας σε σταθερή βάση και σε θέση με ανοικτό ορίζοντα για την ανεμπόδιστη λήψη του σήματος GPS

και την λήψη μετρήσεων για συγκεκριμένες τιμές ονομαστικής συχνότητας και εύρους ταλάντωσης. Ειδικότερα, συνολικά εκτελέστηκαν είκοσι επιμέρους πειράματα, διάρκειας περίπου 1.5 min, για πέντε τιμές συχνοτήτων (0.1, 0.2, 0.5, 1.0 και 2.0 Hz) και τέσσερις τιμές μέγιστου εύρους κίνησης (± 0.01 , ± 0.02 , ± 0.03 και ± 0.05 m).

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΡΩΤΟΓΕΝΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

4.1 Μετρήσεις Επιτάχυνσης

Για τη μέτρηση των τιμών επιτάχυνσης χρησιμοποιήθηκαν οι δύο αισθητήρες που περιγράφηκαν. Αρχικά, έγιναν μετρήσεις επιτάχυνσης με ακίνητη τη σεισμική τράπεζα προκειμένου να καταγραφεί ο θόρυβος από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, θερμικό θόρυβο και ενδεχόμενες μικροδονήσεις του κτιρίου. Η καταγραφή και επεξεργασία του θορύβου έδωσε αποτέλεσμα $\pm 0.0015g$ και $\pm 0.0025g$, ποσότητες ικανοποιητικά μικρές, μεγαλύτερες όμως από αυτές που δίνονται ως τεχνικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων.

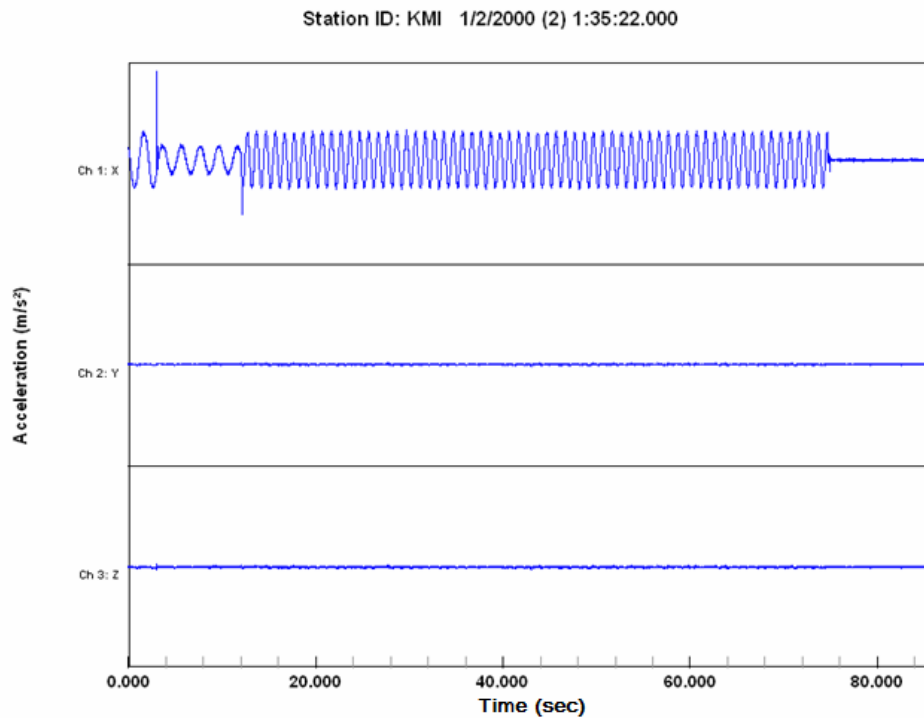
Για κάθε συνδυασμό εύρους ταλάντωσης και συχνότητας έγινε καταγραφή της επιτάχυνσης και σύγκριση των αποτελεσμάτων. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του αισθητήρα QDR ενώ στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μέτρησης του αισθητήρα Memsic. Τυπικό διάγραμμα εξόδου του αισθητήρα QDR παρουσιάζεται στο Σχήμα 2. Τα αποτελέσματα έχουν ίδιας μορφής μεταβολή, η οποία παρουσιάζεται ως γραφική απεικόνιση στο Σχήμα 3, αλλά ο αισθητήρας Memsic εμφανίζει αισθητά μειωμένες τιμές επιτάχυνσης. Οι τιμές απομείωσης κυμαίνονται από 0.003m/sec^2 έως 0.3 m/sec^2 .

Πίνακας 1: Αποτελέσματα μέσω των μέγιστων τιμών επιτάχυνσης με τον αισθητήρα QDR.

	L(m)= ± 0.02	± 0.04	± 0.06	± 0.1
F(Hz)=0.1	0.0217	0.0230	0.0276	0.0315
0.2	0.0294	0.0417	0.0577	0.0812
0.5	0.1105	0.1991	0.3088	0.4972
1	0.4004	0.8003	1.1943	1.9839
2	1.5872	3.1560	4.7455	7.8950

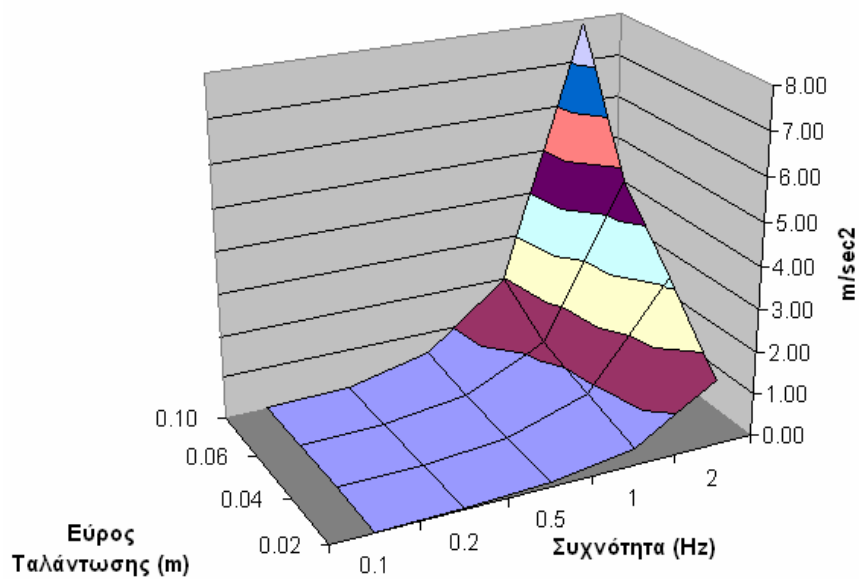
Πίνακας 2: Αποτελέσματα μέσω των μέγιστων τιμών επιτάχυνσης με τον αισθητήρα Memsic.

	L(m)= ± 0.02	± 0.04	± 0.06	± 0.1
F(Hz)=0.1	0.0119	0.0153	0.0250	0.0299
0.2	0.0260	0.0332	0.0503	0.0775
0.5	0.1033	0.1935	0.2912	0.4833
1	0.3896	0.7641	1.1479	1.9039
2	1.5242	3.0324	4.5560	7.5853



Σχήμα 2. Τυπικό διάγραμμα καταγραφής επιτάχυνσης με τον αισθητήρα QDR. Στο κανάλι του άξονα X έχει καταγραφεί το σημείο μεταβολής της συχνότητας και του εύρους ενώ ακολουθεί στη συνέχεια ταλάντωση με $A_{nom} = \pm 0.01m$, $f_{nom} = 2Hz$, $T_{nom} = 0.5sec$. Στα άλλα κανάλια η καταγραφή της επιτάχυνσης είναι μηδενική καθώς ο άξονας κίνησης είναι παράλληλος με τον άξονα X.

Μετρήσεις Επιτάχυνσης (QDR)



Σχήμα 3. Μοντέλο μεταβολής της μέγιστης επιτάχυνσης ως προς το εύρος A και τη συχνότητα f της ταλάντωσης. Η μεταβολή έχει τετραγωνική μορφή ως προς τη συχνότητα.

Αίτιο της ύπαρξης αυτής της διαφοράς είναι η μη απόλυτη ευθυγράμμιση μεταξύ των δύο αισθητήρων και η συνακόλουθη ύπαρξη γωνίας μεταξύ των δύο συστημάτων αναφοράς των αισθητήρων. Οι διαστάσεις του αισθητήρα της QDR ήταν τέτοιες ώστε η ευθυγράμμιση ενός από τους άξονες μέτρησης με τον άξονα κίνησης ήταν εφικτή με μεγάλη ακρίβεια. Στο Σχήμα 1 μπορεί να παρατηρηθεί ότι η ευθυγράμμιση του αισθητήρα είναι τέτοια ώστε στους άξονες Y και Z δεν εμφανίζεται συνιστώσα επιτάχυνσης. Ωστόσο, για τον αισθητήρα Memsic, λόγω των μικρών διαστάσεων, η ακρίβεια προσανατολισμού δεν ήταν εφικτό να είναι υψηλή. Έχοντας όμως τις μετρήσεις και από τους δύο αισθητήρες, για τα ίδια καταγεγραμμένα δυναμικά φαινόμενα είναι δυνατός ο υπολογισμός της οριζόντιας γωνίας των διανυσμάτων μέτρησης. Ύστερα από τον υπολογισμό αυτής της γωνίας έγινε διόρθωση των μετρήσεων επιτάχυνσης με τον αισθητήρα Memsic. Η γωνία μεταξύ των δύο αξόνων υπολογίστηκε ίση με $\delta\varphi=2.51\text{deg}$. Η ποσοστιαία διαφορά των αποτελεσμάτων των δύο αισθητήρων πριν την αναγωγή ήταν 4.3% ενώ μετά την αναγωγή περιορίστηκε στο 0.4%, τιμή που αντιπροσωπεύει ουσιαστικά το άθροισμα των τυπικών σφαλμάτων των δύο μετρητικών μονάδων.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι στις χαμηλές τιμές συχνότητας και εύρους η επιτάχυνση ήταν μικρότερη από το κατώφλι θορύβου, μικρότερη ακόμη και από την απαιτούμενη επιτάχυνση σκανδαλισμού του αισθητήρα QDR. Η παρατήρηση αυτή είναι σημαντική καθώς ένα αξιόλογο ποσοστό της ισχύος ενός πραγματικού σεισμικού φαινομένου κατανέμεται φασματικά σε συχνότητες μικρότερες των 0.2Hz. Ως αποτέλεσμα, οι εκάστοτε χρησιμοποιούμενοι επιταχυνσιογράφοι σκανδαλίζονται από το υψηλόσυχο τμήμα του φάσματος, το οποίο όμως ενδέχεται να μην έχει την απαραίτητη ισχύ για να ενεργοποιήσει τους αισθητήρες. Συνεπώς, κατά τη χρήση σκανδαλιζόμενων αισθητήρων επιτάχυνσης (event triggered) θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το κατώφλι θορύβου που μπορεί να καταγραφεί στο πεδίο, το κατώφλι σκανδαλισμού του αισθητήρα και η κλίμακα τιμών επιτάχυνσης που είναι επιθυμητό να καταγραφούν. Το κατώφλι θορύβου θα πρέπει να είναι σημαντικά χαμηλότερο από το κατώφλι σκανδαλισμού, το οποίο με τη σειρά του θα πρέπει να είναι μικρότερο από τις τιμές που πρέπει να καταγραφούν.

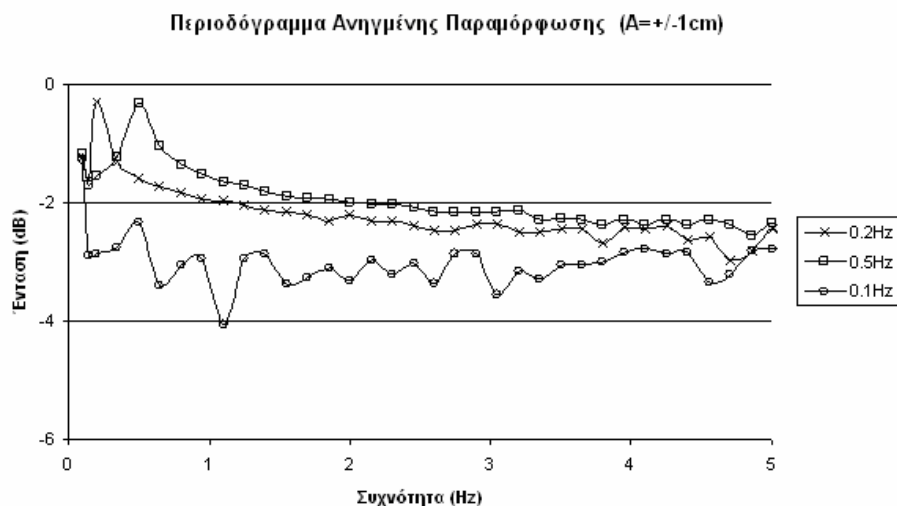
Δεδομένα Οπτικών Ινών

Η ανάδειξη της σημασίας του δυναμικού εύρους των συχνοτήτων που μπορούν να καταγραφούν με επιταχυνσιόμετρο ενισχύει την επιλογή της χρήσης της διάταξης των οπτικών ινών για την καταγραφή του φασματικού περιεχομένου κινήσεων τεχνικών κατασκευών.

Οι καταγραφές των ταλαντώσεων του αισθητήρα οπτικών ινών κατατμήθηκαν κατά διάρκεια σύμφωνα με την διάρκεια του κάθε πειράματος και οδηγήθηκαν σε εφαρμογή του Labview όπου έγινε η φασματική επεξεργασία και ο υπολογισμός της κύριας συχνότητας του δυναμικού φαινομένου. Οι αποκλίσεις της μετρούμενης συχνότητας από την επιβαλλόμενη ήταν για όλους τους συνδυασμούς εύρους και συχνότητας μικρότερες από $\delta f=\pm 400\mu\text{Hz}$. Επιπρόσθετα, η διάταξη των οπτικών ινών παρουσίασε μεγαλύτερη ευαισθησία στις χαμηλές συχνότητες απ' ό,τι οι διατάξεις μέτρησης επιτάχυνσης. Έτσι, ενώ για συχνότητα ταλάντωσης ίση με 0.1Hz και για εύρη $\pm 0.01\text{m}$, $\pm 0.02\text{m}$ και $\pm 0.03\text{m}$, η επιτάχυνση ήταν μικρότερη από την ευαισθησία των αισθητήρων, οι οπτικές ίνες κατάφεραν να καταγράψουν το φαινόμενο με

καλύτερη απόδοση, εφόσον η μετρούμενη παραμόρφωση του αισθητήρα έγινε ορατή για την παραπάνω συχνότητα από το εύρος των $\pm 0.02\text{m}$.

Στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται ο μετασχηματισμός Fourier των καταγραφών για εύρος ταλάντωσης $\pm 1\text{cm}$ και συχνότητες 0.1, 0.2 και 0.5Hz. Όπως είναι εύκολα αντιληπτό, η ευαισθησία της μετρητικής διάταξης καθιστά ικανή την αναγνώριση χαμηλών αρμονικών έως και 0.2Hz. Για την συχνότητα 0.1Hz ο θόρυβος καλύπτει την ωφέλιμη πληροφορία. Η ευαισθησία που παρατηρείται οφείλεται στο ότι οι οπτικές ίνες δεν μετρούν κάποιο πρωτογενές μέγεθος, όπως είναι η επιτάχυνση, αλλά ανηγμένες παραμορφώσεις, οι οποίες εξαρτώνται τόσο από την επιβαλλόμενη επιτάχυνση όσο και από τη θέση του αισθητήρα επί του τεχνικού έργου. Ενώ οι επιταχυσιογράφοι θα καταγράψουν τιμές ανεξάρτητα από την τοποθεσία τους επί του έργου, η ευαισθησία των αισθητήρων οπτικών ινών θα εξαρτάται από το αν στην τοποθεσία στην οποία θα εφαρμοστούν εμφανίζονται αξιόλογες παραμορφώσεις ή η περιοχή είναι αδρανής.



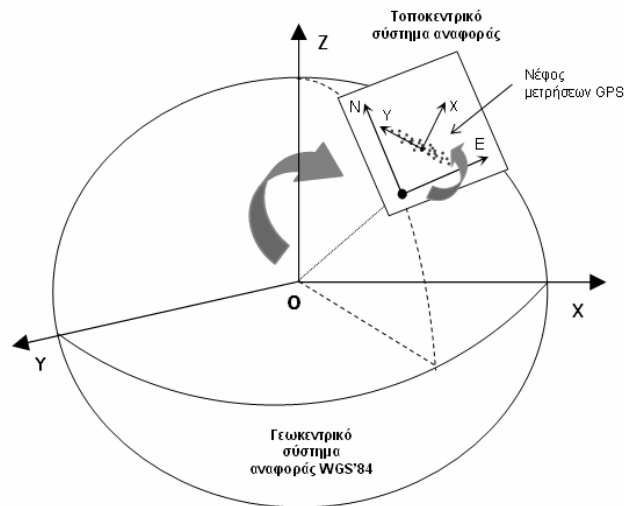
Σχήμα 4. Ενδεικτικό απόσπασμα περιοδογράμματος όπως προέκυψε με χρήση του συστήματος οπτικών ινών ($A_{\text{nom}} = \pm 0.01\text{m}$, $f_{\text{nom}} = 0.1\text{-}0.5\text{Hz}$). Για την συχνότητα $f_{\text{nom}} = 0.1\text{Hz}$ ο θόρυβος υπερσχύει του πραγματικού σήματος.

Κατά συνέπεια, με προσεκτικό σχεδιασμό και τοποθέτηση, οι οπτικές ίνες μπορούν να δώσουν μεγαλύτερο εύρος πληροφοριών από αυτό για το οποίο συνήθως χρησιμοποιούνται, δηλαδή τη μέτρηση ανηγμένων παραμορφώσεων. Το συγκριτικό πλεονέκτημα της καταγραφής ευρύτερου φασματικού περιεχομένου είναι ιδιαίτερα χρήσιμο αλλά μπορεί να αξιοποιηθεί μόνο στις περιπτώσεις όπου το μετρούμενο μέγεθος (παραμόρφωση) έχει έντονες μεταβολές.

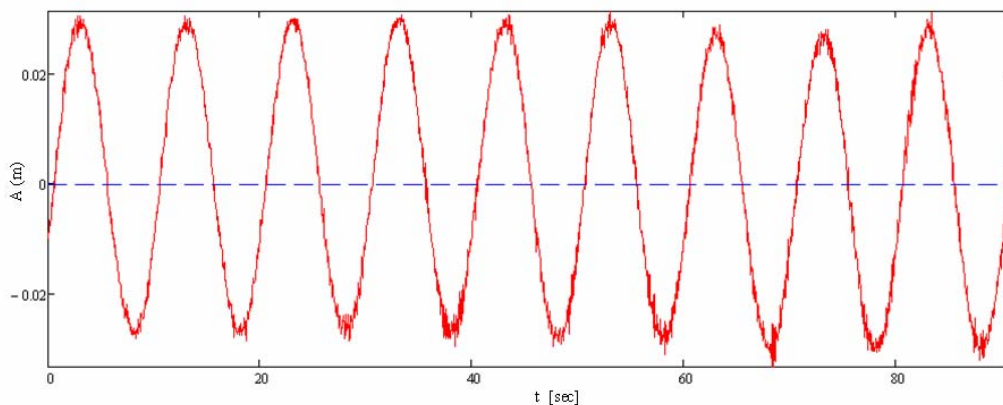
Μετρήσεις Φάσεων GPS

Όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα, η εφαρμογή του συστήματος εντοπισμού GPS παρέχει την θέση της κεραίας του κινούμενου δέκτη. Σε αυτή την εργασία για κάθε επιμέρους πείραμα προσδιορίστηκαν οι διαδοχικές θέσεις της κεραίας του κινητού δέκτη GPS (επί της σεισμικής τράπεζας) με συχνότητα δειγματοληψίας 20Hz. Βάσει της αρχής της μεθόδου, ο υπολογισμός των συντεταγμένων αρχικά έγινε σε καρτεσιανό, γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς (X, Y, Z) – βλ. Σχήμα 5. Ωστόσο, προκειμένου να είναι δυνατή η

σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις μετρήσεις που προέκυψαν από τους αισθητήρες πειραματικής μηχανικής, οι γεωκεντρικές συντεταγμένες της κεραίας GPS μετασχηματίστηκαν σε τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς (E, N) με την επιβολή των αναγκαίων γεωδαιτικών υπολογισμών (Iliffe, 2000). Τέλος, μετά από κατάλληλη στροφή των συντεταγμένων στο οριζόντιο επίπεδο, η κίνηση της κεραίας περιγράφεται πλήρως στον άξονα της κίνησης (άξονας x), όπου η αρχή του συστήματος αναφοράς (x, y) εκφράζει προσεγγιστικά το σημείο ισορροπίας της ταλάντωσης.



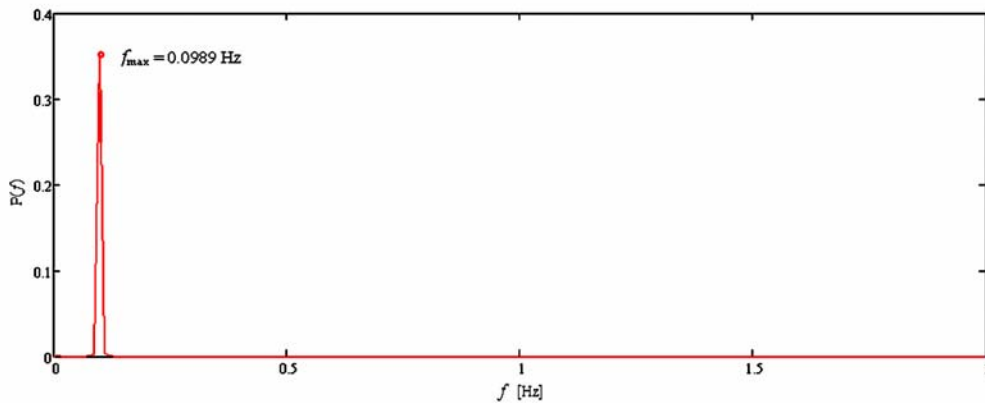
Σχήμα 5. Μετασχηματισμοί συντεταγμένων των μετρήσεων GPS: (OXYZ) - καρτεσιανό, γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς, (EN) - τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς στην περιοχή του πειράματος, (x,y) - σύστημα αναφοράς κίνησης της σεισμικής τράπεζας.



Σχήμα 6. Ενδεικτική χρονοσειρά μετρήσεων ταλάντωσης όπως προέκυψε με χρήση του συστήματος GPS ($A_{nom} = \pm 0.03m$ / $f_{nom} = 0.1Hz$ / $T_{nom} = 10sec$).

Το τελικό αποτέλεσμα όλων των παραπάνω γεωδαιτικών μετασχηματισμών ήταν η δημιουργία διαγραμμάτων μετακινήσεων ως προς το χρόνο, της μορφής $Y_i = f(t_i)$ σε ίσα διαστήματα διάρκειας $1/20sec$ (Σχήμα 6). Με βάση τις υπολογισμένες χρονοσειρές προσδιορίστηκε για κάθε επιμέρους πείραμα, το φάσμα ισχύος κάθε συχνότητας

(περιοδογράμμα) και από αυτό η επικρατέστερη συχνότητα (f) (Σχήμα 7), καθώς και το πλάτος (A) του κύματος που της αντιστοιχεί. Συγκρίνοντας τις υπολογισμένες τιμές με τις ονομαστικές διαπιστώθηκε ότι η αρχική συχνότητα προσδιορίζεται με σχετική ακρίβεια 5-10%, ενώ το εύρος κίνησης με ακρίβεια που κυμαίνεται από 5-35%.



Σχήμα 7. Ενδεικτικό απόσπασμα περιοδογράμματος όπως προέκυψε με χρήση του συστήματος GPS ($A_{nom} = \pm 0.03m$ / $f_{nom} = 0.1Hz$).

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την παρούσα εργασία αναδεικνύονται ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα για την αξιοποίηση των αισθητήρων που περιγράφηκαν και αξιολογήθηκαν. Δεδομένου του ότι χρησιμοποιήθηκε κίνηση αναφοράς υψηλής ακρίβειας, κάνοντας χρήση της σεισμικής τράπεζας, κατέστη εφικτή η μελέτη των εμπλεκόμενων αισθητήρων έναντι προδιαγεγραμμένης δυναμικής συμπεριφοράς. Η ύπαρξη θερμικού, ηλεκτροστατικού και ηλεκτρομαγνητικού θορύβου του φυσικού περιβάλλοντος ήταν ένα κρίσιμο χαρακτηριστικό της μεθοδολογίας καθώς έγινε φανερό ότι οι τελικές ακρίβειες μέτρησης των αισθητήρων ήταν μειωμένες έναντι των ονομαστικών τεχνικών τους προδιαγραφών. Αυτό αποτελεί επιβεβαίωση του ότι απαιτείται η κατάστρωση εξειδικευμένης μεθοδολογίας για την βαθμονόμηση του σύνθετου συστήματος που αποτελείται από το τεχνικό έργο και τους επιλεγμένους αισθητήρες.

Αναφορικά με τους αισθητήρες επιτάχυνσης διαπιστώθηκε ότι προσδιορίζουν με αξιόπιστο τρόπο τις τιμές επιτάχυνσης, αρκεί αυτή να είναι μεγαλύτερη τόσο από την ευαισθησία της συσκευής όσο και από το κατώφλι του καταγραφώμενου θορύβου. Η ύπαρξη δύο αισθητήρων σε κοντινές μεταξύ τους αποστάσεις σε κάποιο τεχνικό έργο είναι δυνατό να αξιοποιηθεί, όπως περιγράφηκε αναλυτικά, προκειμένου να υπολογιστούν οι γωνίες περιστροφής των αξόνων αναφοράς των αισθητήρων και η αναγωγή των μεταξύ τους μετρήσεων. Δεδομένου του ότι ένα σημαντικό μέρος της ισχύος ενός σεισμικού γεγονότος κατανέμεται φασματικά σε πολύ χαμηλές συχνότητες ($< 0.5Hz$) και ότι η ευαισθησία των αισθητήρων είναι μικρή σε αυτή την περιοχή συχνοτήτων, είναι σκόπιμο για την μελέτη σεισμικών φαινομένων να επιλέγονται αισθητήρες με τη μεγαλύτερη δυνατή ευαισθησία και τη μικρότερη επιρροή από θόρυβο.

Η χρήση οπτικών ινών ανέδειξε τις δυνατότητες που παρέχουν για την καταγραφή δυναμικών φαινομένων ευρέος φάσματος με αποδοτικότητα και αξιοπιστία. Επιπρόσθετα, εκτός από τις δυνατότητες καταγραφής παραμορφώσεων, μεγέθους μείζονος σημασίας για την ασφαλή χρήση κάθε τεχνικού έργου, είναι δυνατός ο προσδιορισμός των δυναμικών χαρακτηριστικών της κατασκευής και της καταγραφής της απόκρισής της σε δυναμικά φαινόμενα με αξιόλογη ευαισθησία. Οι αισθητήρες σε αυτή τη περίπτωση θα πρέπει να τοποθετούνται σε στρατηγικά σημεία της κατασκευής όπου οι δυναμικές μεταβολές των παραμορφώσεων λαμβάνουν μέγιστες τιμές.

Η χρήση δεκτών GPS για την παρακολούθηση μετακινήσεων σε τεχνικά έργα έχει εφαρμοσθεί ευρέως στο παρελθόν. Ωστόσο, η βαθμονόμηση τέτοιων συσκευών σε συνθήκες δυναμικής ταλάντωσης, έδωσε την ευκαιρία της αξιολόγησης των δυνατοτήτων που παρέχουν.

Από όσα εξετάστηκαν γίνεται φανερό ότι οι δυνατότητες καταγραφής δυναμικών φαινομένων κατά την παρακολούθηση τεχνικών κατασκευών υπό σεισμική επιρροή είναι αξιόλογες. Κάνοντας χρήση τεχνικών πειραματικής μηχανικής και γεωδαιτικών μεθόδων, αναδείχθηκαν οι ικανότητες αλλά και τα λειτουργικά μειονεκτήματα των εμπλεκόμενων μεθόδων. Τόσο η χρήση αισθητήρων επιτάχυνσης και οπτικών ινών, όσο και η αξιοποίηση δορυφορικών συστημάτων εντοπισμού αποτελούν τεχνολογίες αιχμής, κρίσιμων για τη σύγχρονη μελέτη της σεισμικής συμπεριφοράς κατασκευών και το σχεδιασμό ανθεκτικότερων τεχνικών έργων.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς επιθυμούν να ευχαριστήσουν τον κ. Ε. Σκάση από την εταιρεία METRICA AE (αντιπρόσωπο της Leica Geosystems στην Ελλάδα) για την παροχή του εξοπλισμού GPS, καθώς και το ενδιαφέρον του για αυτή την εργασία.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- APS Dynamics. (2003), "Electro-Seis Model 400 Shaker", *Instruction Manual*, Carlsbad, CA.
- Brownjohn, J.M., & T.C. Pan (2001). "Response of a tall building to long distance earthquakes", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 30, 709-729.
- Brownjohn, J.M., T.C. Pan & X. Deng (2000), "Correlating dynamic characteristics from field measurements and numerical analysis of a high rise building", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 29(4), 523-543.
- Büyükoztürk O., Yu T.-Y., (2003), "Structural Health Monitoring and Seismic Impact Assessment", *Fifth National Conference on Earthquake Engineering*, 26-30 May 2003, Istanbul, Turkey.
- Çelebi M., (2006), "Recorded Earthquake Responses from the Integrated Seismic Monitoring Network of the Atwood Building, Anchorage, Alaska", *Earthquake Spectra*, Volume 22, No. 4, pages 847-864.
- Celebi, M., W. Prescott, R. Stein, K. Hudnut, J. Behr & S. Wilson (1998). "Structural monitoring using GPS", *11th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the U.S. Inst. of Navigation*, Nashville, Tennessee, 15-18 September, 929-935.

- Gikas V., and Daskalakis S. (2006), "Full scale validation of tracking total stations using a long stroke electrodynamic shaker", *XXIII International FIG Congress*, Munich, Oct 8-13.
- Iliffe J.C., (2000), *Datums and Map Projections*, Whittles Publishing.
- Kinemetrix, (2001), "QDR Manual (302704)", Rev E, *Kinemetrix Inc.*, Pasadena, USA.
- Leick A. (2004), *GPS Satellite Surveying*, John Wiley & Sons, NJ.
- Lu K.-C., Wang Y., Lynch J. P, Loh C.-H., Chen Y.-J., Lin P.-Y., Lee Z.-K., (2006) "Ambient Vibration Study of the Gi-Lu Cable-Stay Bridge: Application of Wireless Sensing Units," *Proceedings of the SPIE 13th Annual Symposium on Smart Structures and Materials*, San Diego, CA, USA, February 26 - March 2, 2006.
- Memsic (2007), "MXD2020E/F Specification Datasheets", Rev H, *MEMSIC, Inc.*, North Andover, USA.
- Miller, R. K., Masri, S. F., Dehghanyar T.J, and Caughey T K. (1988). "Active Vibration Control of Large Civil Structures.", *J. Engrg Mech. Div*, ASCE, Vol. 114, No. 9, pp. 1542-1570.
- Nickitopoulou A., Protopsalti K., and Stiros S. (2006), "Monitoring dynamic and quasi-static deformations of large flexible engineering structures with GPS: Accuracy, limitations and promises", *Engineering Structures*, 28, pp. 1471-1482.
- Proakis J.G., and Manolakis D.G. (1996), *Digital Signal Processing*, Prentice Hall.
- Reinhorn, A. M., and Manolis, G. D. (1989). "Recent Advances in Structural Control.", *Shock and Vibration Digest*, Vol. 21, pp. 3-8.
- Roberts, G.W., A.H. Dodson & V. Ashkenazi (1999). Twist and deflect: monitoring motion of the Humber Bridge. *GPS World*, 10(10), 24~34.
- Roberts, G.W., X. Meng & A.H. Dodson (2000). "Structural dynamic and deflection monitoring using integrated GPS and triaxial accelerometers", *13th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the U.S. Inst. of Navigation*, Salt Lake City, Utah, 19-22 September, 59-68.
- Sickle J.V. (2001), *GPS for Land Surveyors*, Taylor & Francis, NY.
- Soong, T. T. (1990). *Active Structural Control, Theory and Practice*. Longman Scientific and Technical, Harlow, England, and copublished in U.S.A with John Wiley & Sons inc., New York, NY.
- Sumitro S., Okamotoa T., Inaudib D., (2004), "Intelligent Sensory Technology for Health Monitoring Based Maintenance of Infrastructures ", *Proc. of Smart Sensor Technology and Measurement Systems*, SPIE, 5384-19, San Diego, California.