



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΝΙΚΗΣ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑΣ

**ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ
ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΕΝΩΝ
ΡΟΜΠΟΤΙΚΩΝ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΥΨΗΛΗ ΓΕΦΥΡΑ ΤΟΥ ΕΥΡΙΠΟΥ**



ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΣΠΥΡΑΚΗΣ

Διπλωματική εργασία

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ: Ευαγγελία Λάμπρου
Επίκουρος Καθηγήτρια ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ ΙΟΥΛΙΟΣ 2011

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στο τέλος της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας φτάνει η στιγμή εκείνη που θέλω να ευχαριστήσω όλους εκείνους που με βοήθησαν ψυχολογικά και στάθηκαν δίπλα μου σε όλες τις φάσεις των προσπαθειών μου για την ολοκλήρωση της.

Αρχικά θέλω να ευχαριστήσω θερμά την **επιβλέπουσα Επίκουρο Καθηγήτρια του ΕΜΠ κα Ευαγγελία Λάμπρου**, για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου ώστε να μου αναθέσει τη διπλωματική εργασία, για την πολύτιμη συμμετοχή της στις εργασίες πεδίου αλλά και για τις συμβουλές, παρατηρήσεις και προτάσεις της σε ολόκληρη τη διάρκεια της εκπόνησης αυτής.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον **Επίκουρο Καθηγητή του ΕΜΠ κο Γεώργιο Πανταζή** για την αμέριστη βοήθεια του καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής καθώς και για την πολύτιμη συμμετοχή του στις εργασίες πεδίου. Η βοήθεια του ήταν καθοριστική λόγω της συνεχούς επικοινωνίας μας ακόμα και σε ώρες εκτός ωραρίου εργασίας. Η προσπάθεια που κατέβαλλε σε όλες τις φάσεις της διπλωματικής ήταν καταλυτική. Τροφοδοτώντας με, με ενέργεια και έμπνευση βοήθησε ώστε να συνεχίζω παρόλο τις δυσκολίες που προέκυψαν κατά την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Τον αγαπητό φίλο, αξιαγάπητο συνάδελφο και **υποψήφιο διδάκτορα του ΕΜΠ, κο Αθανάσιο Ηλιοδρομίτη** για τον προσωπικό χρόνο που αφιέρωσε και για τις πολύτιμες γνώσεις που μου προσέφερε απλόχερα σε οτιδήποτε χρειάστηκα.

Τον **υποψήφιο διδάκτορα του ΕΜΠ κο Κωνσταντίνο Νικολίτσα** για την βοήθεια του όσον αφορά τον χειρισμό των οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν για την εργασία αυτή.

Τον **κο Γεώργιο Παπαστάμο και την εταιρεία Τοπομετρία Ε.Π.Ε** για την παροχή χρήσιμου υλικού και γνώσεων σχετικό με την γέφυρα της Χαλκίδας και για την στήριξή του στο πρόσωπο μου από την αρχή της γνωριμίας μας.

Τον **Δρ Πολιτικό μηχανικό και ερευνητή του Ινστιτούτου τεχνικής σεισμολογίας και αντισεισμικών κατασκευών κο Χρήστο Καρακώστα** για την αμεσότατη παροχή υλικού βιβλιογραφίας και δημοσιεύσεων καθώς και σημαντικών συμβουλών πάνω στο

αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας.

Τον **Επίκουρο καθηγητή του ΕΜΠ κo Βασίλειο Γκίκα** για τις καίριες συμβουλές του πάνω στο αντικείμενο της διπλωματικής.

Τον αγαπητό φίλο και εκλεκτό **συνάδελφο Σπύρο Κονταλή** του οποίου η συμβολή και ουσιαστική συμμετοχή επιτάχυνε κατά πολύ την εξέλιξη της εργασίας

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω μέσα από τη καρδιά μου τους υπέροχους γονείς μου **Γεώργιο** και **Τριανταφυλλιά** για τη ψυχολογική τους συμπαράσταση καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου και για την υπομονή και εμπιστοσύνη που έδειξαν στο πρόσωπο μου , τον αδελφό μου **Στέλιο**, ο οποίος επιμελήθηκε τμήμα της εργασίας μου, την αδελφή μου **Γεωργία** για την ψυχολογική της υποστήριξη και τη **Σοφία** που ήταν υπομονετικά δίπλα μου σε κάθε στιγμή από την αρχή μέχρι το τέλος της διπλωματικής εργασίας.

Βασίλειος Γ. Σπυράκης

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Την σημερινή εποχή ο ρόλος του σύγχρονου Τοπογράφου Μηχανικού έχει αποκτήσει πολυδιάστατη μορφή αφού μέσω των γνώσεων του καθώς και λόγω της εξέλιξης της τεχνολογίας των γεωδαιτικών οργάνων μπορεί να συμβάλλει σε πληθώρα εφαρμογών όπως η μελέτη των δυναμικών παραμορφώσεων των κατασκευών.

Η στενή συνεργασία των τοπογράφων και πολιτικών μηχανικών είναι πιο δόκιμη από άλλες εποχές, αφού το αντικείμενο των δύο αυτών επιστημών έχει διευρυνθεί αρκετά και οι απαιτήσεις της αγοράς έχουν γίνει πιο υψηλές.

Η σημασία του ελέγχου δυναμικών παραμορφώσεων των τεχνικών έργων είναι πολύτιμη αφού με αυτόν τον τρόπο εξετάζεται η συμπεριφορά τους στις πραγματικές συνθήκες και ελέγχεται κατά πόσο ανταποκρίνονται στις προδιαγραφές των στατικών και δυναμικών μελετών.

Μέσα από αυτή τη διπλωματική εργασία έγινε προσπάθεια να αξιολογηθούν οι δυνατότητες δύο αυτόματα ελεγχόμενων γεωδαιτικών σταθμών (RTS), αφού προηγουμένως συγχρονίστηκαν τα χρονόμετρα τους, στην παρακολούθηση ταλαντώσεων τεχνικών έργων. Οι γεωδαιτικοί σταθμοί που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ο IS της εταιρείας Topcon και ο VX της εταιρείας Trimble. Η εφαρμογή έγινε στη καλωδιωτή γέφυρα του Ευρίπου στη Χαλκίδα με ταυτόχρονη μέτρηση στόχων οι οποίοι βρίσκονται στους πυλώνες και στο κατάστρωμα της γέφυρας.

Τελικός στόχος μέσα από την επεξεργασία και ανάλυση αυτών των μετρήσεων είναι να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα και να γίνουν προτάσεις για περαιτέρω διερευνήσεις σε αυτό το επιστημονικό πεδίο.

**ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ
ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΕΝΩΝ
ΡΟΜΠΟΤΙΚΩΝ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΥΨΗΛΗ ΓΕΦΥΡΑ ΤΟΥ ΕΥΡΙΠΟΥ**

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	I
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	III
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	IV
ΠΙΝΑΚΕΣ	IX
ΣΧΗΜΑΤΑ	XI
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	XV
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ -
ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ**

1.1	Γενικά.....	2
1.2	Παράγοντες δυναμικών παραμορφώσεων τεχνικών έργων.....	5
1.3	Μέθοδοι καταγραφής ταλαντώσεων τεχνικών έργων.....	7
1.3.1	Γεωτεχνικά όργανα	9
1.3.2	Γεωδαιτικά όργανα	10
1.4	Εφαρμογές παρακολούθησης ταλαντώσεων γεφυρών.....	12
1.4.1	Μετρήσεις ταλαντώσεων δύσκαμπτων κατασκευών με τη χρήση δεκτών GPS και ρομποτικών γεωδαιτικών σταθμών (RTS)	12
1.4.2	Μέτρηση ταλαντώσεων της μεταλλικής πεζογέφυρας Λεωφόρου Κηφισού.....	18
1.4.3	Μετρήσεις ταλαντώσεων της σιδηροδρομικής γέφυρας του Γοργοποτάμου	21
1.4.4	Παρακολούθηση ταλαντώσεων της γέφυρας Forth	

	Road	26
1.4.5	Παρακολούθηση ταλαντώσεων της γέφυρας του Ευρίπου	30
1.5	Αντικείμενο της εργασίας	31

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΑΥΤΟΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΟΙ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ - ROBOTIC TOTAL STATIONS (RTS)

2.1	Αρχές λειτουργίας των RTS και παρελκόμενα	32
2.1.1	Αυτόματη περιστροφή του τηλεσκοπίου	33
2.1.2	Αυτόματη αναγνώριση στόχου	34
2.1.3	Κλείδωμα και παρακολούθηση κινούμενου στόχου.....	37
2.1.4	Αυτόματα ελεγχόμενη λειτουργία μέσω ασύρματου τηλεχειριστηρίου	37
2.1.5	Αμφιπρισματικός ανακλαστήρας 360°	38
2.2	Πηγές σφαλμάτων.....	38
2.3	Ο εικονογεωδαιτικός σταθμός TOPCON IS 01.....	40
2.4	Ο χωροεικονογεωδαιτικός σταθμός Trimble VX.....	44

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΤΟ ΠΕΔΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

3.1	Η υψηλή γέφυρα του Ευρίπου.....	47
3.1.1	Το γεωδαιτικό δίκτυο παρακολούθησης της γέφυρας	48
3.2	Η επιλογή των εφαρμογών.....	51
3.3	Προετοιμασία	52
3.4	Μετρήσεις.....	55
3.5	Προσδιορισμός συντεταγμένων και επεξεργασία	59
3.5.1	Υπολογισμός των μεταβολών και των αβεβαιοτήτων για κάθε μεταβλητή.....	61

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΝΑΛΥΣΗ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΩΝ

4.1	Ανάλυση χρονοσειρών 1 ^ο πειράματος.....	64
4.2	Ανάλυση χρονοσειρών 2 ^ο πειράματος.....	74
4.3	Ανάλυση χρονοσειρών 3 ^ο πειράματος	79
4.4	Ανάλυση χρονοσειρών 4 ^ο πειράματος.....	88
4.5	Ανάλυση χρονοσειρών στο πεδίο των συχνοτήτων μέσω φασματικής ανάλυσης.....	94
4.5.1	Μέθοδοι φασματικής ανάλυσης.....	94
4.5.2	Μετασχηματισμοί Fourier.....	94
4.5.3	Κανονικοποιημένο Περιοδόγραμμα Lomb.....	97
4.6	Μεθοδολογία φασματικής ανάλυσης	99
4.7	Ανάλυση των περιοδογραμμάτων των πειραμάτων	101

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

5.1	Γενικά.....	108
5.2	Συμπεράσματα για την αξιοπιστία των ρομποτικών σταθμών IS και VX.....	108
5.3	Συμπεράσματα για την μεθοδολογία της χρήσης δυο συγχρονισμένων γεωδαιτικών σταθμών	109
5.4	Συμπεράσματα για την συμπεριφορά της καλωδιωτής γέφυρας του Ευρίπου.....	110
5.5	Προτάσεις	110
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		112
ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΟΙ ΤΟΠΟΙ (ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ)		115
ABSTRACT		116

EΙΚΟΝΕΣ

Εικόνα 1.1	Ρομποτικός γεωδαιτικός σταθμός Leica TCA 1201	14
Εικόνα 1.2	Διάταξη ταλαντωτή με τον κινητήρα.....	14
Εικόνα 1.3	Διάταξη μονοβάθμιου ταλαντωτή	14
Εικόνα 1.4	Διάταξη τριτοβάθμιου ταλαντωτή	15
Εικόνα 1.5	Διάγραμμα λήψης σήματος του σταθερού δέκτη (πάνω)και του κινούμενου δέκτη (κάτω)	16
Εικόνα 1.6	Οι θέσεις ελέγχου στο πάνω μέρος του μεταλλικού δικτυώματος και η θέση ελέγχου στη κουπαστή στο μέσο του κεντρικού ανοίγματος	20
Εικόνα 1.7	Σημεία παρακολούθησης με γεωδαιτικές μεθόδους.....	30
Εικόνα 2.1	Ασύρματο χειριστήριο Leica (Leica Geosystems)	38
Εικόνα 2.2	Αμφιπρισματικός ανακλαστήρας Leica GRZ4 360°	38
Εικόνα 2.3	Ο εικονογεωδαιτικός σταθμός IS 01 της εταιρείας Topcon	40
Εικόνα 2.4	Οι θέσεις των δύο ενσωματωμένων CCD καμερών του IS.....	42
Εικόνα 2.5	Ο χωροεικονογεωδαιτικός σταθμός VX της εταιρείας Trimble	44
Εικόνα 2.6	Το χειριστήριο TCU του Trimble VX	45
Εικόνα 3.1	Δορυφορική κάτοψη της Υψηλής Γέφυρας του Ευρίπου στη Χαλκίδα.....	47
Εικόνα 3.2	Υλοποιημένο βάθρο του δικτύου της Γέφυρας της Χαλκίδας.....	49
Εικόνα 3.3	Ορειχάλκινη πλακέτα εξαναγκασμένης κέντρωσης πακτωμένη σε βάθρο	49
Εικόνα 3.4	Τοποθετημένα πρίσματα σε πυλώνα της γέφυρας.....	50
Εικόνα 3.5	Πρίσματα τοποθετημένα στη κεφαλοδοκό μεσοβάθρου	50
Εικόνα 3.6	Πρίσμα τύπου GPR111 της εταιρείας Leica.....	51

Εικόνα 3.7	Μορφή εξαγόμενου αρχείου καταγραφών από το VX μέσω του αρχείου Monitoring Report της εταιρείας Trimble	54
Εικόνα 3.8	Ο αμφιπρισματικός ανακλαστήρας GRZ4	55
Εικόνα 3.9	Η στάση Σ1 που ιδρύθηκε για τις ανάγκες των πειραμάτων	57

ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 1.1	Προδιαγραφές ακρίβειας για το GPS (Torcon,2002)	13
Πίνακας 1.2	Τυπικές προδιαγραφές ρομποτικού σταθμού Leica TCA 1201 για την καταγραφή της θέσης κινούμενου στόχου (Leica, 2005)	13
Πίνακας 1.3	Ενδεικτικές μετρήσεις του RTS της καταγραφής της κίνησης του ταλαντωτή	17
Πίνακας 1.4	Μετρήσεις του RTS όπως προέκυψαν μετά την χρήση του λογισμικού.....	18
Πίνακας 1.5	Τυπικές προδιαγραφές ακρίβειας από την Torcon για τους δέκτες GPS GB-1000 (Torcon, 2002)	19
Πίνακας 1.6	Τύποι δεκτών και κεραιών GPS του πειράματος	26
Πίνακας 2.1	Μέγιστες ταχύτητες περιστροφής.....	34
Πίνακας 2.2	Τεχνικά χαρακτηριστικά του γεωδαιτικού σταθμού Torcon IS01.....	43
Πίνακας 2.3	Τεχνικά χαρακτηριστικά του γεωδαιτικού σταθμού Trimble VX.....	46
Πίνακας 3.1	Διάρκεια εκτέλεσης του κάθε πειράματος.....	59
Πίνακας 3.2	Οι συντεταγμένες των κορυφών του τοπικού συστήματος αναφοράς των μετρήσεων	59
Πίνακας 3.3	Οι τιμές των σφαλμάτων για κάθε γεωδαιτικό σταθμό	62
Πίνακας 3.4	Οι τιμές των αβεβαιοτήτων κάθε μεταβλητής σε κάθε πείραμα για κάθε γεωδαιτικό σταθμό.....	63
Πίνακας 4.1	Πίνακας ακραίων τιμών για το 1ο πείραμα των στόχων 128 και 114 για τον εγκάρσιο άξονα της γέφυρας (κατά y)	65
Πίνακας 4.2	Πίνακας ακραίων τιμών για το 2 ^ο πείραμα μεταξύ των δύο οργάνων για τον στόχο 128 στον εγκάρσιο άξονα της γέφυρας.....	75
Πίνακας 4.3	Εύρη ταλάντωσης και χρονική διάρκεια που	

	κατεγράφησαν από τους δύο σταθμούς και η απόκλιση μεταξύ τους	89
Πίνακας 4.4	Οι υπολογισμένες τιμές της στατιστικά σημαντικής ισχύος για κάθε πείραμα και επίπεδο σημαντικότητας 95%	107
Πίνακας 4.5	Βασικές συχνότητες που προέκυψαν με τη μέθοδο του περιοδογράμματος Lomb	107

ΣΧΗΜΑΤΑ

Σχήμα 1.1	Διάγραμμα πειράματος που εκτελέστηκε στην γέφυρα Millennium Bridge στο Λονδίνο	3
Σχήμα 1.2	Διάγραμμα ανάλυσης μετακίνησης σε ημιστατική (Astat) και δυναμική (Adyn) μετακίνηση	5
Σχήμα 1.3	Χρονοσειρά των κατακόρυφων μεταβολών με βάση τις καταγραφές του GPS1 για την συνολική διάρκεια των πειραμάτων.	21
Σχήμα 1.4	Χρονοσειρά των κατακόρυφων μεταβολών με βάση τις καταγραφές του RTS1 για την συνολική διάρκεια των πειραμάτων.	21
Σχήμα 1.5	Χρονοσειρές υπολογισμένων μετακινήσεων των μετρήσεων.....	23
Σχήμα 1.6	Το φαινόμενο της πολλαπλής διαδρομής τους σήματος κατά τη διάρκεια διέλευσης ενός συρμού από τη γέφυρα του Γοργοποτάμου	24
Σχήμα 1.7	Οι θέσεις των δεκτών GPS.....	26
Σχήμα 1.8	Καθ' ύψος παραμορφώσεις της τομής F, της γέφυρας....	27
Σχήμα 1.9	Κατά μήκος παραμορφώσεις της τομής F, της γέφυρας.....	27
Σχήμα 1.10	Εγκάρσιες παραμορφώσεις της τομής F, της γέφυρας	28
Σχήμα 1.11	Σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και μεταβολής του ύψους του καταστρώματος της γέφυρας, στην τομή F	28
Σχήμα 1.12	Υψομετρικές μεταβολές κατά την διέλευση του φορτηγού των 100 τόνων.....	29
Σχήμα 1.13	Υψομετρικές μεταβολές κατά τους ελιγμούς των φορτηγών των 40 τόνων	29
Σχήμα 1.14	Διαγράμματα φασματικών αναλύσεων FFT των κατακόρυφων μεταβολών από RTS και GPS αντίστοιχα	31

Σχήμα 2.1	Η τεχνολογία MagDrive®.....	33
Σχήμα 2.2	Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος σπειροειδούς ανίχνευσης στόχου Leica TCA-1800	36
Σχήμα 2.3	Σύστημα εντοπισμού του RTS από τον ανακλαστήρα της εταιρίας Topcon (Topcon, 2005).....	36
Σχήμα 2.4	Σφάλμα χρονικής διαφοράς καταγραφής γωνίας- απόστασης.....	39
Σχήμα 3.1	Όψη της γέφυρας με τη θέση των στόχων	56
Σχήμα 3.2	Κάτοψη της γέφυρας με τη θέση των στόχων	56
Σχήμα 3.3	Κάτοψη του τοπικού δικτύου που ιδρύθηκε για τις ανάγκες των πειραμάτων	57
Σχήμα 3.4	Διάγραμμα ροής που περιγράφει την χρονική σειρά με την οποία πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα	58
Σχήμα 3.5	Η σχέση των δύο συστημάτων αναφοράς καθώς και η γωνία στροφής	60
Σχήμα 4.1	Χρονοσειρές της διαμήκουσ ταλάντωσης στον ίδιο χρόνο για τους στόχους 128 και 114	66
Σχήμα 4.2	Χρονοσειρές της εγκάρσιας ταλάντωσης στον ίδιο χρόνο για τους στόχους 128 και 114	67
Σχήμα 4.3	Χρονοσειρές της κατακόρυφης ταλάντωσης στον ίδιο χρόνο για τους στόχους 128 και 114	68
Σχήμα 4.4	Οριζοντιογραφίες των στόχων 128 και 114.....	69
Σχήμα 4.5	Χρονοσειρές της διαμήκουσ ταλάντωσης στον ίδιο χρόνο των στόχων 128 και 114	71
Σχήμα 4.6	Χρονοσειρές της εγκάρσιας ταλάντωσης στον ίδιο χρόνο των στόχων 128 και 114	72
Σχήμα 4.7	Χρονοσειρές της κατακόρυφης ταλάντωσης στον ίδιο χρόνο των στόχων 128 και 114	73
Σχήμα 4.8	Χρονοσειρές της διαμήκουσ μεταβολής της θέσης του στόχου 128 από τους δύο γεωδαιτικούς σταθμούς....	76
Σχήμα 4.9	Χρονοσειρές της εγκάρσιας μεταβολής της θέσης του	

	στόχου 128 από τους δύο γεωδαιτικούς σταθμούς.....	77
Σχήμα 4.10	Χρονοσειρές της κατακόρυφης μεταβολής της θέσης του στόχου 128 από τους δύο γεωδαιτικούς σταθμούς	78
Σχήμα 4.11	Οριζοντιογραφίες του στόχου 128 α) με το IS β)με το VX.....	79
Σχήμα 4.12	Χρονοσειρές της διαμήκου μεταβολής της θέσης των στόχων 128(ψηλά) και 126(χαμηλά) στον πυλώνα M6	81
Σχήμα 4.13	Χρονοσειρές της εγκάρσιας μεταβολής της θέσης των στόχων 128(ψηλά) και 126(χαμηλά) στον πυλώνα M6	82
Σχήμα 4.14	Χρονοσειρές της κατακόρυφης μεταβολής της θέσης των στόχων 128(ψηλά) και 126(χαμηλά) στον πυλώνα M6	83
Σχήμα 4.15	Οριζοντιογραφίες του στόχου α)128 (ψηλά) με το IS β)του στόχου 126(χαμηλά) με το VX στον πυλώνα M6.....	84
Σχήμα 4.16	Κοινό γράφημα της διαμήκου μεταβολής των στόχων 128(ψηλά) και 126(χαμηλά) στον πυλώνα M6 ...	85
Σχήμα 4.17	Κοινό γράφημα της εγκάρσιας μεταβολής των στόχων 128(ψηλά) και 126(χαμηλά) στον πυλώνα M6 ...	86
Σχήμα 4.18	Κοινό γράφημα της κατακόρυφης μεταβολής των στόχων 128(ψηλά) και 126(χαμηλά) στον πυλώνα M6 ...	87
Σχήμα 4.19	Χρονοσειρές της διαμήκου μεταβολής της θέσης του αμφιπρισματικού στόχου(GRZ4) από τους δύο γεωδαιτικούς σταθμούς	90
Σχήμα 4.20	Χρονοσειρές της εγκάρσιας μεταβολής της θέσης του αμφιπρισματικού στόχου(GRZ4) από τους δύο γεωδαιτικούς σταθμούς	91
Σχήμα 4.21	Χρονοσειρές της κατακόρυφης μεταβολής της θέσης του αμφιπρισματικού στόχου(GRZ4) από τους δύο	

	γεωδαιτικούς σταθμούς	92
Σχήμα 4.22	Οριζοντιογραφική κίνηση του στόχου GRZ4(OMNI) α) από το IS β) από το VX.....	93
Σχήμα 4.23	Περιοδογράμματα Lomb, διαμήκους, εγκάρσιας και κατακόρυφης μεταβολής των στόχων 114, 128	102
Σχήμα 4.24	Περιοδογράμματα Lomb, διαμήκους, εγκάρσιας και κατακόρυφης μεταβολής του στόχου 128	103
Σχήμα 4.25	Περιοδογράμματα Lomb, διαμήκους, εγκάρσιας και κατακόρυφης μεταβολής των στόχων 128(Ψηλά) και 126(Χαμηλά)	104
Σχήμα 4.26	Περιοδογράμματα Lomb, διαμήκους, εγκάρσιας και κατακόρυφης μεταβολής του στόχου GRZ4-OMNI	106

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο μελέτης αφενός την αξιολόγηση της χρήσης των αυτόματα ελεγχόμενων γεωδαιτικών σταθμών (RTS) στην παρακολούθηση ταλαντώσεων μιας γέφυρας και αφετέρου τη σύγκριση διαφορετικών γεωδαιτικών σταθμών αυτού του είδους, έχοντας πρώτα συγχρονίσει τον χρόνο που καταγράφουν.

Απώτερος σκοπός είναι να γίνει αξιολόγηση των δυνατοτήτων των γεωδαιτικών σταθμών σε τέτοιου είδους εφαρμογές, να γίνει σύγκριση των μετρήσεων τους σε κοινούς στόχους και τέλος να εξαχθούν συμπεράσματα για τη συμπεριφορά της γέφυρας .

Στο *πρώτο κεφάλαιο* γίνεται μια αναφορά στο αντικείμενο της μελέτης ταλαντώσεων κατασκευών, αναφέρονται τα όργανα με τα οποία υλοποιούνται οι διάφορες μεθοδολογίες, επισημαίνονται χρήσιμες έννοιες κατανόησης όρων που χρησιμοποιούνται στην εργασία αυτή και παρουσιάζεται μια σειρά εφαρμογών ελέγχου ταλαντώσεων γεφυρών.

Στο *δεύτερο κεφάλαιο* γίνεται περιγραφή των χαρακτηριστικών των αυτόματα ελεγχόμενων γεωδαιτικών σταθμών (RTS) αφού είναι και τα κύρια όργανα που χρησιμοποιήθηκαν για το σκοπό αυτής της διπλωματικής εργασίας, των σφαλμάτων αυτών και περιγράφονται τα χαρακτηριστικά των αντίστοιχων γεωδαιτικών σταθμών IS της εταιρείας Topcon και VX της εταιρείας Trimble τα οποία χρησιμοποιήθηκαν.

Στο *τρίτο κεφάλαιο* παρέχονται λεπτομέρειες για το πεδίο εφαρμογής, που είναι η καλωδιωτή γέφυρα του Ευρίπου στη Χαλκίδα και για το δίκτυο παρακολούθησής της. Εν συνεχεία γίνεται αναφορά στην επιλογή των πειραμάτων, την προετοιμασία και την διεξαγωγή τους. Στο τέλος του κεφαλαίου περιγράφονται οι απαραίτητοι υπολογισμοί που έγιναν ώστε να γίνει η επεξεργασία των πρωτογενή δεδομένων με σκοπό την ανάλυσή τους και την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων.

Στο *τέταρτο κεφάλαιο* γίνεται ανάλυση όλων των παραγόμενων διαγραμμάτων των χρονοσειρών στα πεδία του χρόνου, χώρου και συχνότητας.

Στο *πέμπτο κεφάλαιο* γίνεται καταγραφή όλων των συμπερασμάτων που εξήχθησαν από όλες τις διαδικασίες της εργασίας αυτής και γίνονται προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τη σημερινή εποχή η παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς των τεχνικών έργων κατέχει σημαντικό ρόλο στον τομέα της μελέτης, της κατασκευής και της συντήρησης των κατασκευών. Ο έλεγχος των τεχνικών έργων έναντι φορτίσεων όπως το λειτουργικό φορτίο, ο άνεμος, οι μεταβολές στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος και η σεισμική δράση, αποτελεί αντικείμενο βασικής και εφαρμοσμένης έρευνας για πολλά επιστημονικά κέντρα.

Μέχρι το πρόσφατο παρελθόν η παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς μιας κατασκευής στηρίζονταν σε γεωτεχνικά όργανα όπως είναι οι επιταχυνσιογράφοι και οι οπτικές ίνες. Τα τελευταία χρόνια η ραγδαία ανάπτυξη γεωδαιτικών οργάνων και μεθόδων (δορυφορικές - GPS και συμβατικές - RTS) εξασφαλίζει νέες δυνατότητες στην παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς των κατασκευών. Οι γεωδαιτικές μέθοδοι εξασφαλίζουν ακριβή και αξιόπιστα αποτελέσματα και μπορούν παράλληλα να συνδυαστούν και με γεωτεχνικές μεθόδους.

Για την επιστημονική κοινότητα των τοπογράφων μηχανικών αντικείμενο έρευνας αποτελεί η ακρίβεια των οργάνων που χρησιμοποιούνται για τη παρακολούθηση κατασκευών, η εφαρμογή νέων μεθοδολογιών καθώς και η επεξεργασία, ανάλυση και αξιολόγηση των δεδομένων που λαμβάνονται από τις διάφορες εφαρμογές.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε προσπάθεια εκτίμησης των δυνατοτήτων δύο αυτόματα ελεγχόμενων γεωδαιτικών σταθμών σε εφαρμογές παρακολούθησης ταλαντώσεων κατασκευών με τη μέθοδο των ταυτόχρονων μετρήσεων σε κοινούς ή μη στόχους αφού προηγουμένως είχαν συγχρονιστεί μεταξύ τους με τον παγκόσμιο χρόνο UTC. Επίσης αξιολογήθηκαν η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε και τα αποτελέσματα των μετρήσεων όσον αφορά την απόκριση της κατασκευής που μελετήθηκε.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ - ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

1.1 Γενικά

Κάθε τεχνικό έργο, ανάλογα με το είδος της κατασκευής, τις συνθήκες λειτουργίας του και τη σκοπιμότητα που εξυπηρετεί, υπόκειται σε στατική ή και δυναμική φόρτιση. Το ίδιο βάρος ενός τεχνικού έργου αποτελεί στατικό φορτίο, ενώ η σεισμική δράση και η επίδραση του ανέμου, χαρακτηρίζονται ως δυναμικά φορτία.

Η φόρτιση ενός τεχνικού έργου έχει ως αποτέλεσμα τη γένεση παραμορφώσεων με ελαστικά ή και μόνιμα χαρακτηριστικά. Σε περίπτωση που οι αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις υπερβούν συγκεκριμένα όρια, τότε το τεχνικό έργο οδηγείται σε αστοχία, με σοβαρές επιπτώσεις που αφορούν στη λειτουργία του φορέα και ενδεχομένως σε ανθρώπινες ζωές.

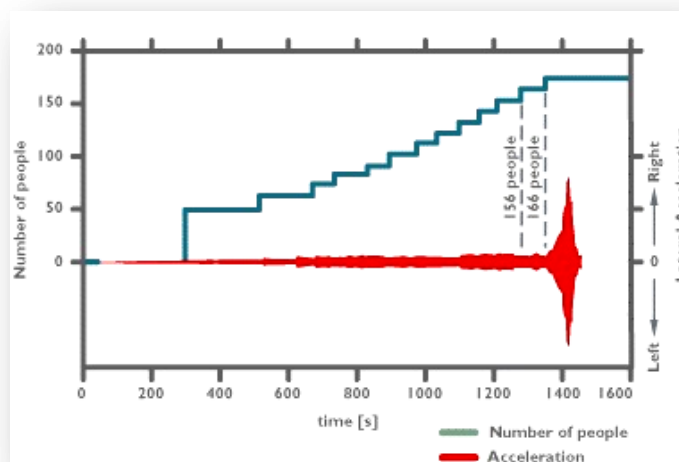
Η μελέτη των κατασκευών στηρίζεται μέχρι τώρα στην υπολογιστική πρόβλεψη της συμπεριφοράς τους βάση υπολογισμού τάσεων, αναμενόμενων φορτίων και υιοθέτηση συντελεστών ασφάλειας για αντιμετώπιση αβεβαιοτήτων, απλουστεύσεων και ατελειών των υλικών και της κατασκευής.

Πρόσφατα, έχει εμφανιστεί νέα τάση σχεδιασμού των κατασκευών με βάση τις ταλαντώσεις, τις μετακινήσεις ή τις παραμορφώσεις. Η ανάγκη μέτρησης των μετακινήσεων και άλλων λοιπών στατικών και δυναμικών χαρακτηριστικών (εύρος ταλάντωσης, ιδιοσυχνότητες και λοιπά) των κατασκευών εμφανίζεται ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια για πολλούς λόγους όπως [Ψιμούλης Π., 2009]:

- Τα χαρακτηριστικά, κυρίως τα δυναμικά (εύρος ταλάντωσης, ιδιοσυχνότητα και λοιπά) μιας κατασκευής πιθανότατα διαφέρουν σε κάποιο βαθμό από αυτά της μελέτης λόγω τροποποιήσεων της μελέτης, ατελειών κατασκευής ή βλαβών, λόγω επεμβάσεων ή επισκευών της ακόμα και λόγω της “κόπωσης” της κατασκευής εξαιτίας της παλαιότητας της.
Αυτό προϋποθέτει ότι πρέπει να είναι γνωστά ποια ήταν τα στοιχεία σχεδιασμού, αλλά κυρίως να μπορούν να μετρηθούν τα πραγματικά χαρακτηριστικά της κατασκευής μετά την κατασκευή ή την επισκευή της.
- Για ορισμένα τεχνικά έργα, όπως είναι οι μεγάλες καλωδιωτές

γέφυρες, υψηλοί πύργοι, απαιτούνται αυτόματα συστήματα ελέγχου των μετακινήσεων-ταλαντώσεων σε πραγματικό χρόνο (real-time) ώστε για παράδειγμα να διακόπτεται η λειτουργία τους σε ειδικές καταστάσεις. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η καλωδιωτή γέφυρα Tsing Ma Bridge στο Χονγκ Κονγκ στην οποία έχει ενσωματωθεί σύστημα GPS το οποίο καταγράφει τις ταλαντώσεις του καταστρώματος, και όταν αυτές υπερβούν ένα όριο ασφαλείας, αυτόματα αποστέλλεται σήμα στο κέντρο έλεγχου και διακόπτεται η κυκλοφορία οχημάτων [Wong et al., 2001], και

- Τέλος, εμφανίζονται περιπτώσεις κατασκευών οι οποίες παρουσιάζουν απρόβλεπτη και ασυνήθιστη συμπεριφορά η οποία πολλές φορές δεν συμφωνεί ή δεν προβλέπεται από τη μελέτη σχεδιασμού. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν:
 - i. Η Millenium Bridge στο Λονδίνο που εμφάνισε επικίνδυνα μεγάλη εγκάρσια ταλάντωση κατά την κατακόρυφη φόρτισή της από πεζούς και δραματική αύξηση των εγκάρσιων επιταχύνσεων μετά από ένα συγκεκριμένο όριο φορτίου (σχήμα 1.1). Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την διακοπή της λειτουργίας της για πολλά χρόνια και διενέργεια σημαντικών επεμβάσεων για την αύξηση της ακαμψίας της [Roberts et al., 2007]



Σχήμα 1.1 Διάγραμμα πειράματος που εκτελέστηκε στην γέφυρα Millennium Bridge στο Λονδίνο

- ii. Η Tacoma Bridge της οποίας είναι πολύ γνωστή η αστοχία, η οποία οφειλόταν σε εμφάνιση αρνητικού συντελεστή απόσβεσης των ταλαντώσεων, χαρακτηριστικό που θα μπορούσε να είχε εντοπιστεί είτε από την αρχική μελέτη είτε από μετρήσεις μετά την κατασκευή της.
- iii. Διάφοροι υψηλοί (ύψος μεγαλύτερο των 100-200m) και εύκαμπτοι

πύργοι όπως ο Calgary Tower οι οποίοι εμφανίζουν μεγαλύτερο εύρος ταλάντωσης στην εγκάρσια διεύθυνση της ανεμοπίεσης από ότι στη διεύθυνση της ανεμοπίεσης λόγω δυνάμεων που δημιουργούνται.

Στο σημείο αυτό αξίζει να γίνει μια καταγραφή της ορολογίας και των ορισμών που χρησιμοποιούνται σε τέτοιου είδους εργασίες με στόχο την ευκολότερη κατανόηση από τον αναγνώστη.

Οι **καλωδιωτές γέφυρες (Cable-stayed bridge)** αποτελούν μια σχετικά πρόσφατη μέθοδο κατασκευής γεφυρών. Οι γέφυρες αυτές αποτελούνται από έναν ή περισσότερους πυλώνες, στους οποίους μεταφέρονται μέσω καλωδίων στήριξης, οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στο κατάστρωμα της γέφυρας. Οι αποστάσεις που μπορούν να καλυφθούν με την κατασκευή μιας τέτοιας γέφυρας, είναι εξαιρετικά μεγάλες, ξεπερνώντας σήμερα τα 2400 m κρεμαστού καταστρώματος (γέφυρα *Millau Viaduct*, Γαλλία, 2460 m) [Νησωτάκης, 2007].

Υψίσυχνες ταλαντώσεις είναι οι ταλαντώσεις που έχουν συχνότητα μεγαλύτερη των 0.5-1Hz. Τέτοιες ταλαντώσεις εκτελούν οι πιο **δύσκαμπτες** κατασκευές όπως είναι οι πεζογέφυρες.[Ψιμούλης, 2009]

Χαμηλόσυχνες ταλαντώσεις είναι οι ταλαντώσεις που έχουν συχνότητα μικρότερη του 0.5Hz. Τέτοιες ταλαντώσεις εκτελούν οι πιο **εύκαμπτες** κατασκευές όπως είναι οι καλωδιωτές ή οι κρεμαστές γέφυρες που το κατάστρωμα τους αναρτάται από μεταλλικά καλώδια[Ψιμούλης, 2009].

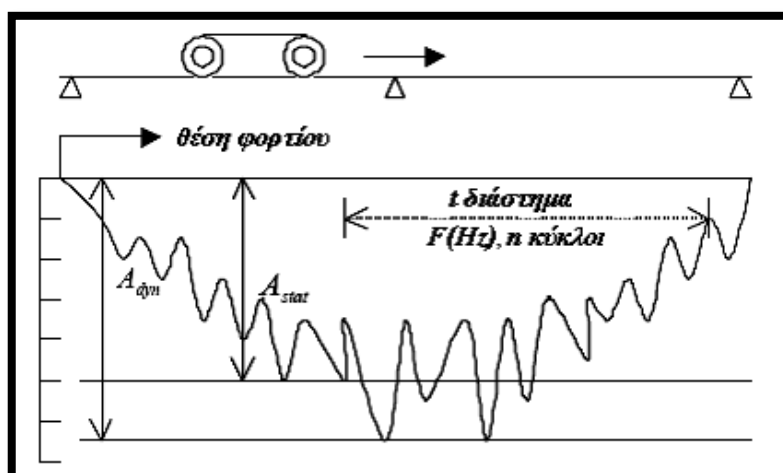
Με τον όρο **ημιστατική μετακίνηση (Astat)** ορίζεται η μετακίνηση που προκαλείται από σταθερές ή χαμηλόσυχνες διεγέρσεις, των οποίων ο ρυθμός (συχνότητα) εφαρμογής τους είναι εκτός του πεδίου των κύριων ιδιοσυχνοτήτων της κατασκευής (σχήμα 1.2). Αντίθετα, ως **δυναμικές μετακινήσεις (Adyn)** ορίζονται αυτές που προκαλούνται από σχετικά υψίσυχνες διεγέρσεις οι οποίες έχουν ρυθμό (συχνότητα) εφαρμογής εντός του πεδίου των κύριων ιδιοσυχνοτήτων της κατασκευής.

Παραδείγματα ημιστατικής φόρτισης είναι αυτές που οφείλονται σε θερμοκρασιακές μεταβολές (διάρκεια 24 ωρών) και δυναμικής φόρτισης αυτές που οφείλονται σε σεισμό.

Ωστόσο, υπάρχουν και διεγέρσεις, όπως οι ανεμοπιέσεις, που προκαλούν συνδυασμό ημιστατικής και δυναμικής μετακίνησης, οπότε εμφανίζεται ελαστική ημιστατική μετακίνηση από την θέση ισορροπίας η οποία διαρκεί έως και ώρες και μετά το πέρας της διέγερσης. Επιπλέον, παρατηρείται και ταλάντωση γύρω από κάθε προσωρινή θέση ισορροπίας λόγω της αυξομείωσης της έντασης της ανεμοπίεσης, η οποία αντιστοιχεί σε δυναμική μετακίνηση [Ψιμούλης, 2009].

Για κάθε σύστημα (κατασκευή) υπάρχουν ορισμένες μόνο συχνότητες στις οποίες αυτό έχει τη δυνατότητα να ταλαντώνεται ελεύθερα. Σε κάθε τέτοια φυσική συχνότητα ελεύθερης ταλάντωσης (**ιδιοσυχνότητα**) το

σύστημα διατηρεί καθ' όλη τη διάρκεια της ταλάντωσης μια σταθερή παραμορφωμένη μορφή την ιδιομορφή του συστήματος για τη συγκεκριμένη φυσική συχνότητα.



Σχήμα 1.2 Διάγραμμα ανάλυσης μετακίνησης σε ημιστατική (A_{stat}) και δυναμική (A_{dyn}) μετακίνηση

Ένα σύστημα με n βαθμούς ελευθερίας κινήσεως έχει n φυσικές συχνότητες ελεύθερης ταλάντωσης (ιδιοσυχνότητες) και n ιδιομορφές, κάθε μια από τις οποίες είναι ανεξάρτητη από τις άλλες και αντιστοιχεί σε μια ιδιοσυχνότητα.

Αυτές οι n ιδιομορφές αποτελούν ένα βασικό σύνολο από διανύσματα μετατοπίσεων της κάθε κατασκευής, διότι η μορφή κάθε ελαστικής παραμόρφωσης της κατασκευής είναι δυνατόν να θεωρηθεί ως συνδυασμός των ιδιομορφών και να αναλυθεί σε αυτές. Η συμμετοχή της κάθε ιδιομορφής είναι διαφορετική σε κάθε παραμόρφωση, αλλά είναι δυνατόν να προσδιοριστεί με κατάλληλη διαδικασία.

Συνήθως η συμμετοχή των πρώτων ιδιομορφών στην κάθε παραμορφωσιακή κατάσταση μιας κατασκευής, περιγράφει κατά μεγάλο ποσοστό τη συνολική της παραμόρφωση. Γι' αυτό το λόγο κατά τον σχεδιασμό των κατασκευών οι μηχανικοί λαμβάνουν υπόψη συνήθως μόνο τις τρεις πρώτες χαμηλότερες ιδιοσυχνότητες οι οποίες είναι και οι δεσπόζουσες [Καραγιάννης Χ., 2008].

Τέλος με τον όρο **χρονοσειρά** ορίζεται μια σειρά από παρατηρήσεις που λαμβάνονται σε ορισμένες χρονικές στιγμές ή περιόδους που ισαπέχουν μεταξύ τους.

1.2 Παράγοντες δυναμικών παραμορφώσεων τεχνικών έργων

Τα τεχνικά έργα είναι αποδέκτες δυναμικών φορτίσεων που προκαλούν παραμορφώσεις-ταλαντώσεις των οποίων οι πηγές ανάλογα τον τύπο και το μέγεθος του έργου πρέπει να μελετηθούν πριν την

κατασκευή τους, έτσι ώστε να γίνει ποσοτική περιγραφή των φαινομένων αυτών και των επιπτώσεων που θα έχουν στην κατασκευή σε όλη την διάρκεια της ζωής της [Νησωτάκης, 2007].

Οι κυριότεροι παράγοντες δυναμικών παραμορφώσεων των κατασκευών παρουσιάζονται παρακάτω αναλυτικότερα.

➤ **Σεισμική δράση**

Με τον όρο "σεισμός", νοείται η απότομη απελευθέρωση συσσωρευμένης ενέργειας από τα στρώματα του φλοιού της Γης προς την επιφάνεια. Οι σεισμοί που σχετίζονται με τις κινήσεις των τεκτονικών πλακών του στερεού φλοιού της Γης, ονομάζονται τεκτονικοί. Επίσης, σεισμοί εκδηλώνονται από την έκρηξη ηφαιστείων (ηφαιστειογενείς), την κατάρρευση υπόγειων σπηλαίων (κατακρημνησιγενείς), ενώ μπορούν να εκδηλωθούν και μικρότερης κλίμακας σεισμοί από ανθρώπινη παρέμβαση, όπως η έκρηξη μιας ατομικής βόμβας.

Κατά την εκδήλωση ενός σεισμού γίνεται μετατροπή της δυναμικής ενέργειας σε κινητική και η εξάπλωση της στον χώρο γίνεται μέσω των σεισμικών κυμάτων. Τα σεισμικά κύματα διαχωρίζονται στις εξής κατηγορίες [Μ. Σακελλαρίου, 2008]:

- i. Κύματα Χώρου (Body Waves)
 - α) Διαμήκη κύματα τύπου P
 - β) Εγκάρσια κύματα τύπου S

- ii. Κύματα Επιφανείας (Surface waves)
 - α) Κύματα επιφανείας τύπου Love
 - β) Κύματα επιφανείας τύπου Rayleigh

Τα τεχνικά έργα, εφόσον εξ' ορισμού συνδέονται με το υλικό μέσο μετάδοσης των ανωτέρω κυμάτων, επηρεάζονται άμεσα από την ενέργεια που αυτά μεταφέρουν και πρέπει να έχει γίνει εκ των προτέρων μελέτη για την όσο το δυνατόν καλύτερη αντίδραση του φορέα σε περίπτωση εκδήλωσης σεισμού.

➤ **Άνεμος**

Άνεμος ονομάζεται η κίνηση των αερίων μαζών που αποτελούν την ατμόσφαιρα της Γης. Η κίνηση αυτή, επηρεάζεται από παράγοντες όπως η διαφορά της ατμοσφαιρικής πίεσης και η δύναμη Coriolis. Ο άνεμος επηρεάζει άμεσα τις κατασκευές που βρίσκονται πάνω από την επιφάνεια της Γης ή της θάλασσας ασκώντας πίεση στον φορέα της κατασκευής, η

οποία μεταβάλλεται συναρτήσει του εμβαδού της μετωπικής επιφάνειας στην οποία προσκρούει ο άνεμος, και της έντασης του ανέμου.

➤ *Μεταβολές στην θερμοκρασία περιβάλλοντος*

Χαρακτηριστικό στοιχείο των στερεών υλικών είναι η μεταβολή των διαστάσεων τους (μήκος, επιφάνεια, όγκος) με την μεταβολή της θερμοκρασίας (συστολή-διαστολή). Το φαινόμενο αυτό έχει άμεση επίδραση στη δυναμική συμπεριφορά των κτηρίων και γενικότερα των τεχνικών έργων αφού ο συνδυασμός διαφορετικών τύπων υλικών στην εκάστοτε κατασκευή επιβάλλει εκ των προτέρων (πριν την κατασκευή του τεχνικού έργου) την προσεκτική μελέτη της συμπεριφοράς της κατασκευής στις θερμοκρασιακές μεταβολές, με σκοπό την αντιμετώπιση εμφάνισης φαινομένων ασυνέχειας (ρωγμές) σε κρίσιμα για την λειτουργική ικανότητα σημεία του φορέα της κατασκευής. Για ιδιόρρυθμες κατασκευές κρίνεται απαραίτητη και η εκ των υστέρων (μετά την κατασκευή του τεχνικού έργου) παρακολούθηση του κτηρίου (ή τεχνικού έργου) για την έγκαιρη αντιμετώπιση φαινομένων αστοχίας του φορέα.

➤ *Λειτουργικό φορτίο*

Σε ένα τεχνικό έργο ασκούνται δυναμικά φορτία από το μέσο για το οποίο έχει σχεδιαστεί το έργο να εξυπηρετεί. Σε μια γέφυρα για παράδειγμα, τα διερχόμενα οχήματα, αποτελούν τη βασική δύναμη που καλείται να ανταπεξέλθει η κατασκευή. Σε αυτή την περίπτωση γίνεται επίσης μελέτη του φαινομένου του συντονισμού του φορέα.

1.3 Μέθοδοι καταγραφής ταλαντώσεων τεχνικών έργων

Η ασφαλής λειτουργία των τεχνικών έργων αποτελεί ένα βασικό αντικείμενο μελέτης των κατασκευών. Προκειμένου λοιπόν να αναλυθούν διάφοροι τύποι των μηχανικών κατασκευών παραδείγματος χάριν ψηλά κτήρια, καπνοδόχοι, γέφυρες και να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα όσον αφορά τη συμπεριφορά και τη δυναμική παραμόρφωση στην οποία υπόκεινται έχουν εφαρμοσθεί μέχρι σήμερα αρκετές μέθοδοι με ποικίλα όργανα παρακολούθησης.

Οι μέθοδοι που εφαρμόζονται σήμερα για την παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς κατασκευών διακρίνονται σε δυο βασικές κατηγορίες, τις γεωτεχνικές και τις γεωδαιτικές. Οι γεωτεχνικές μέθοδοι περιλαμβάνουν τεχνικές που αφορούν τη χρήση οργάνων, όπως είναι οι επιταχυνσιογράφοι και οι οπτικές ίνες. Οι γεωδαιτικές μέθοδοι, οι οποίες έρχονται να καλύψουν τις αδυναμίες των πρώτων, περιλαμβάνουν τις

επίγειες μεθόδους και εξοπλισμό όπως είναι οι αυτόματα ελεγχόμενοι γεωδαιτικοί σταθμοί (RTS) και τις *δορυφορικές* που αφορούν παρατηρήσεις με τη χρήση δεκτών GPS.

Τα βασικά κριτήρια με τα οποία επιλέγεται μια συγκεκριμένη μεθοδολογία και ο εξοπλισμός της διαφέρει σε κάθε περίπτωση και εξαρτάται από πολλά κριτήρια όπως:

- Η συχνότητα δειγματοληψίας: Όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα δειγματοληψίας τόσο περισσότερα δεδομένα έχουμε ανά μονάδα χρόνου, οπότε εφόσον υπάρχει περισσότερη πληροφορία εξάγονται ακριβέστερα αποτελέσματα.
- Η ταχύτητα συλλογής των δεδομένων: Μια γρήγορη τεχνική οδηγεί σε ταχεία αξιολόγηση των δεδομένων και έγκαιρη λήψη αποφάσεων.
- Η πληρότητα των δεδομένων: Για τον σχεδιασμό πολύπλοκων κατασκευών με σύνθετη συμπεριφορά, η λήψη μετρήσεων μη επαρκών δεδομένων αυξάνει την πιθανότητα να οδηγηθούμε σε εσφαλμένα συμπεράσματα.
- Η ακρίβεια των δεδομένων: Οι απαιτήσεις ποικίλουν ανάλογα με το αντικείμενο παρακολούθησης και την επιθυμητή ακρίβεια.
- Η δυνατότητα περαιτέρω αξιοποίησης των στοιχείων μέσω σύγχρονων εργαλείων λογισμικού για την παραγωγή επιπλέον χρήσιμων συμπερασμάτων.
- Η ασφάλεια της μεθόδου και του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού: Η μέθοδος πρέπει να είναι απόλυτα ασφαλής για τα συνεργεία που εκτελούν τις μετρήσεις, για τα συνεργεία κατασκευής-συντήρησης και για το κοινό που χρησιμοποιεί το έργο (αν η παρακολούθηση γίνεται σε φάση λειτουργίας).
- Η δυνατότητα αποτύπωσης μη προσβάσιμων περιοχών: ολισθαίνοντα πρηνή, φορείς γεφυρών, μέτωπα και εσωτερικό σηράγγων είναι κατά κανόνα δυσπρόσιτα ή απρόσιτα. Σε πολλές μάλιστα περιπτώσεις το πλησιέστερο σημείο ελέγχου είναι σε απόσταση δεκάδων μέτρων.
- Η δυνατότητα χρήσης της μεθόδου οποιαδήποτε ώρα και με οποιοσδήποτε καιρικές συνθήκες.
- Η δυνατότητα γρήγορης ανάλυσης των στοιχείων για την παραγωγή άμεσων αλλά ταυτόχρονα αξιόπιστων αποτελεσμάτων, που θα οδηγήσουν σε άμεση και ορθή λήψη αποφάσεων.
- Το κόστος της μεθόδου: Τα λειτουργικά έξοδα των διάφορων μεθόδων κατέχουν σημαντικό ρόλο στο να επιτρέψουν στους διαχειριστές μεγάλων έργων να τις εντάξουν μέσα στον προϋπολογισμό τους παρόλο που μπορούν να αναγνωρίσουν τα

προβλήματα στο ξεκίνημα ενός έργου και μπορούν να δώσουν πληροφορίες σχετικά με το πότε θα απαιτηθούν εργασίες συντήρησης.

1.3.1 Γεωτεχνικά όργανα

A) Επιταχυνσιογράφοι

Η χρήση επιταχυνσιογράφου αποτελεί την πιο τυπική μέθοδο μέτρησης των ταλαντώσεων μίας κατασκευής. Οι επιταχυνσιογράφοι είναι όργανα τα οποία χρησιμοποιούνται για την καταγραφή επιταχύνσεων των κατασκευών ή του εδάφους λόγω σεισμών.

Υπάρχουν πολλά είδη επιταχυνσιογράφων με κοινή αρχή λειτουργίας αλλά με διαφορετικά όρια λειτουργίας και πεδία εφαρμογών όπως είναι :

- ο πιεζοηλεκτρικός επιταχυνσιογράφος
- ο πιεζοωμικός επιταχυνσιογράφος
- ο επιμηκνσιομετρικός επιταχυνσιογράφος

Για την παρακολούθηση των επιταχύνσεων των εύκαμπτων κατασκευών του πολιτικού μηχανικού χρησιμοποιούνται επιταχυνσιογράφοι, οι οποίοι αποτελούνται από μάζα που εκτελεί ταλάντωση ενώ συνδέεται με ελατήριο και αποσβεστήρα.

Οι επιταχυνσιογράφοι όσον αφορά τη χρήση τους στην παρακολούθηση ταλαντώσεων και μετακινήσεων κατασκευών παρουσιάζουν τα εξής μειονεκτήματα [Κοκκίνου Ε., 2007]:

- Αδυναμία στην παρακολούθηση στατικών και ημιστατικών κινήσεων, οι οποίες οφείλονται σε δυναμικές φορτίσεις (π.χ. άνεμος), αλλά και σε θερμοκρασιακές μεταβολές κατά την διάρκεια της ημέρας λόγω της δυσκαμψίας του ελατηρίου του
- Σφάλματα κατά τον προσδιορισμό της μετακίνησης, τα οποία είναι συσσωρευτικά και αυξάνονται σημαντικά όταν οι επιταχύνσεις είναι ιδιαίτερα υψηλές
- Αδυναμία παρακολούθησης μετακινήσεων σε πραγματικό χρόνο (real-time), με αποτέλεσμα να μην μπορεί να γνωρίζει ο μηχανικός σε πραγματικό χρόνο τις καταγραφές του επιταχυνσιογράφου και τις μετακινήσεις που προκύπτουν από αυτές καθώς χρειάζονται πρώτα επεξεργασία
- Πρέπει να αναφερθεί πως με την πάροδο του χρόνου τα ρολόγια των οργάνων παρουσιάζουν σφάλμα δηλαδή υπολείπονται κάποιων δευτερόλεπτων(drift)

B) Οπτικές ίνες

Οι οπτικές ίνες είναι όργανα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό διάφορων μεγεθών (μετακίνηση, ταχύτητα κλπ). Οι οπτικές ίνες αποτελούνται από ζεύγος καλωδίων τα οποία συνδέονται με ένα αισθητήρα (sensor) ή ενισχυτή (amplifier). Το ένα καλώδιο εκπέμπει ακτίνα συγκεκριμένης ενέργειας η οποία ανακλάται πάνω στο κινούμενο σώμα και το δεύτερο καλώδιο λαμβάνει την ανακλώμενη ακτίνα και την μεταφέρει στον αισθητήρα. Ανάλογα με την μετακίνηση του σώματος μεταβάλλεται και η ενέργεια της ανακλώμενης ακτίνας και υπολογίζεται η μετακίνηση του σώματος. Ομοίως λειτουργούν και τα transducer, τα οποία αντί για την εκπομπή ακτίνας έχουν ένα εκτεινόμενο σύρμα το οποίο συνδέεται με το κινούμενο σώμα και μέσω της μεταβολής του μήκους του σύρματος μετριέται η μετακίνηση του κινούμενου σώματος.

Τα δύο όργανα μπορούν να μετρήσουν με μεγάλη ακρίβεια μετακινήσεις της τάξης των mm και μικρότερες και γι' αυτό χρησιμοποιούνται στην καταγραφή μετακινήσεων μεταξύ εξαρτημάτων μηχανών [Ψιμούλης Π., 2009].

Τα πλεονεκτήματα των οπτικών ινών είναι τα εξής:

- Δεν περνάει από αυτές ηλεκτρικό ρεύμα επομένως δεν επηρεάζονται από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, οπότε οι μετρήσεις που επιτυγχάνονται είναι σταθερές. Επίσης, επειδή οι οπτικές ίνες δεν είναι αγωγίμες μπορούν με ασφάλεια να χρησιμοποιηθούν σε περιβαλλοντικά εκτεθειμένες κατασκευές (γέφυρες, φράγματα, υψηλά κτήρια και λοιπά).
- Ο σχεδιασμός του δικτύου μπορεί να απλοποιηθεί αρκετά, δεδομένου ότι σε μία οπτική ίνα μπορούν να διαμορφωθούν πολλοί αισθητήρες.
- Έχουν πολύ καλή προσαρμοστικότητα. Με διαφορετικές διαμορφώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μετρήσεις διάφορων μεγεθών. Επίσης, είναι δυνατό να μετρηθούν ταυτόχρονα δύο μεγέθη (πχ. διαμήκεις και εγκάρσιες παραμορφώσεις) από τον ίδιο αισθητήρα.

Ωστόσο, παρουσιάζουν δύο σημαντικά μειονεκτήματα:

- Το πεδίο εφαρμογών τους περιορίζεται σε μετακινήσεις από 1mm έως 3-5cm και δεν καλύπτουν τις μετακινήσεις σε εύκαμπτες κατασκευές με μεγάλα πλάτη ταλαντώσεων όπως είναι οι καλωδιωτές γέφυρες.
- Προσδιορίζουν μόνο σχετικές μετακινήσεις τμημάτων μίας κατασκευής και όχι μετακινήσεις ως προς κάποιο ανεξάρτητο σύστημα αναφοράς.

1.3.2 Γεωδαιτικά όργανα

A) Παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού–Global Positioning System (GPS)

Κατά τη τελευταία εικοσαετία η τεχνολογία δορυφορικών συστημάτων εντοπισμού έχει χρησιμοποιηθεί ευρύτατα σε εφαρμογές δυναμικής παραμόρφωσης τεχνικών έργων. Για το σκοπό αυτό εφαρμόζονται τεχνικές κινηματικού εντοπισμού σε πραγματικό χρόνο (Real Time Kinematic) ή με εκ των υστέρων επεξεργασία (Post processed Kinematic).

Τα βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι:

- υψηλή συχνότητα καταγραφής έως και 20 Hz ώστε να καλύπτει έτσι τις ιδιοσυχνότητες οποιασδήποτε κατασκευής,
- ακρίβεια εντοπισμού οριζοντιογραφικά (1.5-2.0 cm),
- δεν επηρεάζεται από τις καιρικές συνθήκες, και
- παρέχει τη δυνατότητα καταγραφής δεδομένων καθ' όλη τη διάρκεια μια ημέρας.

Τα βασικά μειονεκτήματα της μεθόδου είναι:

- Το σήμα των δορυφόρων επηρεάζεται από την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που μπορεί να υπάρχει κοντά στη περιοχή του δέκτη όπως για παράδειγμα η ύπαρξη μιας ενεργειακής γραμμής παροχής ηλεκτρισμού υψηλής τάσης.
- Εξαιτίας της πιθανής κακής γεωμετρίας των δορυφόρων οι μετρήσεις ενδέχεται να περιέχουν σφάλματα και να μην δίνουν αξιόπιστα αποτελέσματα.
- Το σήμα των δορυφόρων παρουσιάζει το φαινόμενο των πολλαπλών διαδρομών σε περίπτωση που ο δέκτης βρίσκεται σε σημείο που μπορεί αυτό να αντανακλάται όπως για παράδειγμα σε μια μεταλλική πεζογέφυρα. Επίσης σήμα από πολυανάκλαση μπορεί να ληφθεί και από τα διερχόμενα οχήματα.
- Παρέχει μειωμένη ακρίβεια (υψηλός θόρυβος) εντοπισμού στο υψόμετρο (≈ 3.0 cm).
- Δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κλειστούς χώρους ή σε σημεία όπου η ορατότητα της κεραίας προς την ουράνια σφαίρα είναι περιορισμένη.
- Απαιτεί τη χρήση δύο τουλάχιστον ή περισσότερων γεωδαιτικών δεκτών που χαρακτηρίζονται από υψηλό κόστος.
- Η εγκατάσταση ενός δικτύου με δέκτες GPS είναι πιο πολύπλοκη αφού πρέπει να γίνει εγκατάσταση δέκτη στο σημείο ελέγχου και να εξασφαλιστεί η υψηλή αυτονομία του συνδέοντας τον με ηλεκτρικό ρεύμα.
- Η θέση εγκατάστασης της κεραίας του δέκτη πρέπει να

εξασφαλίζει ικανοποιητικό πεδίο ορατότητας προς την ουράνια σφαίρα σε όλες τις διευθύνσεις.

B) Αυτόματα ελεγχόμενοι (ρομποτικοί) γεωδαιτικοί σταθμοί (RTS)

Δεδομένου ότι στην διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν τέτοιου είδους γεωδαιτικοί σταθμοί οι οποίοι αποτέλεσαν το βασικό μέσο αξιολόγησης και παρακολούθησης, γίνεται λεπτομερής αναφορά στα χαρακτηριστικά τους στο 2^ο κεφάλαιο. Σε αυτή τη παράγραφο θα γίνει συνοπτική αναφορά στα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τους ως προς την παρακολούθηση ταλαντώσεων τεχνικών έργων.

Τα πλεονεκτήματα των αυτόματα ελεγχόμενων γεωδαιτικών σταθμών είναι τα εξής:

- Είναι κατάλληλοι για την ακριβή παρακολούθηση αφού μπορούν να καταγράψουν με ακρίβεια (αβεβαιότητες από 1-5mm) το εύρος ταλάντωσης ακόμα και για μικρές ταλαντώσεις της τάξης του 1cm.
- Μπορεί να προσδιορίσει με ακρίβεια η συχνότητα διέγερσης για χαμηλόσυχνες ταλαντώσεις ακόμα και μικρότερες του 1Hz.
- Με κατάλληλη προσθήκη λογισμικού μπορεί να αυξηθεί η συχνότητα καταγραφής τους έως και 10Hz και η ικανότητα τους να μελετήσουν κατασκευές με μεγάλες ιδιοσυχνότητες δηλαδή μεγαλύτερες τους 1Hz [Ψιμούλης Π., Στείρος Ε., 2007].
- Είναι δυνατή η παρακολούθηση οποιουδήποτε σημείου του έργου σε οποιαδήποτε θέση

Τα βασικά μειονεκτήματα τους είναι:

- Επηρεάζονται από τις καιρικές συνθήκες όπως ο ήλιος, η βροχή, η ομίχλη και λοιπά.
- Είναι αναγκαστική η τοποθέτηση πρίσματος στο σημείο ελέγχου αλλιώς δεν λαμβάνονται μετρήσεις ανεξάρτητα από τους σταθμούς.

1.4 Εφαρμογές παρακολούθησης ταλαντώσεων γεφυρών

1.4.1 Μετρήσεις ταλαντώσεων δύσκαμπτων κατασκευών με τη χρήση δεκτών GPS και ρομποτικών γεωδαιτικών σταθμών (RTS)

Στο Εργαστήριο Γεωδαισίας και Γεωδαιτικών Εφαρμογών του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών εκπονήθηκε διδακτορική διατριβή [Ψιμούλης Π., 2009] στην οποία μελετήθηκε η δυνατότητα χρήσης GPS και ρομποτικών γεωδαιτικών

σταθμών και κυρίως ο συνδυασμός τους για τη μέτρηση ταλαντώσεων όχι μόνο μέχρι 1 Hz, όπως τεκμηριώνεται βιβλιογραφικά, αλλά ενός πολύ μεγαλύτερου φάσματος μέχρι και 4Hz, ως προς ανεξάρτητο σύστημα αναφοράς της μελετώμενης κατασκευής, δηλαδή για κατασκευές που είναι πιο δύσκαμπτες. Στη συγκεκριμένη διατριβή αφού ελέγχθηκαν οι δυνατότητες των οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν εργαστηριακά έγινε εφαρμογή της χρήσης τους σε δυο δύσκαμπτες κατασκευές πρώτα στη μεταλλική πεζογέφυρα μήκους περίπου 60m στη Λεωφόρο Κηφισού στην Αθήνα με προβλεπόμενο εύρος μετακίνησης μικρότερο των 30mm και ιδιοσυχνότητα μεγαλύτερη των 3Hz καθώς και σε ένα από τα 7 ανοίγματα της σιδηροδρομικής γέφυρας του Γοργοποτάμου.

Στα πειράματα που διεξήχθησαν χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις δέκτες του δορυφορικού συστήματος GPS: δύο ζεύγη δεκτών της εταιρείας Javad και δύο ζεύγη δεκτών Hiper-Pro της εταιρείας Topcon.

Μέθοδος μετρήσεων GPS	Ακρίβεια προσδιορισμού συντεταγμένων Javad (mm)		Ακρίβεια προσδιορισμού συντεταγμένων Hiper-Pro (mm)	
	Οριζόντιες	Κατακόρυφη	Οριζόντιες	Κατακόρυφη
Post Process Static, Rapid Static	3mm±0.5ppm	6mm±0.5ppm	3mm±0.5ppm	5mm±0.5ppm
RTK	10mm±1ppm	15mm± 1ppm	10mm±1ppm	15mm± 1ppm

Πίνακας 1.1 Προδιαγραφές ακρίβειας για το GPS (Topcon, 2002)

Ο ρομποτικός γεωδαιτικός σταθμός (Robotic Total Station) που χρησιμοποιήθηκε ήταν της εταιρείας Leica TCA 1201 (εικόνα 1.1) ο οποίος έχει όλες τις δυνατότητες των ρομποτικών σταθμών, (αναγνώριση στόχου, παρακολούθηση κινούμενου στόχου, αυτόματη καταγραφή ανά τακτά χρονικά διαστήματα), με δυνατότητα να αποθηκεύει μετρήσεις σε εσωτερική μνήμη χωρητικότητας 1GB. Χαρακτηριστικές προδιαγραφές που δίνονται από τον κατασκευαστή του και αφορούν την εφαρμογή της καταγραφής ταλαντώσεων παρουσιάζονται στον πίνακα 1.2.

Συχνότητα καταγραφής	έως και 10 Hz
Ακρίβεια μέτρησης tracking	5 mm ± 2 ppm
Μέγιστο μήκος σκόπευσης	3000 m
Ταχύτητα κινούμενου στόχου	5 m/sec όταν ο στόχος βρίσκεται στα 20 m
	25 m/sec όταν ο στόχος βρίσκεται στα 100m

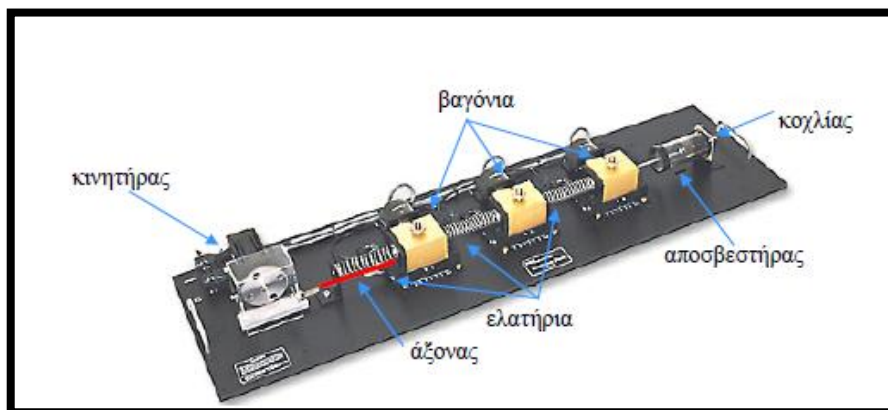
Πίνακας 1.2 Τυπικές προδιαγραφές ρομποτικού σταθμού Leica TCA 1201 για την καταγραφή της θέσης κινούμενου στόχου (Leica, 2005)

Στην αρχή της εργασίας έγιναν πειράματα ταλαντώσεων στα οποία χρησιμοποιήθηκαν τα εξής όργανα :

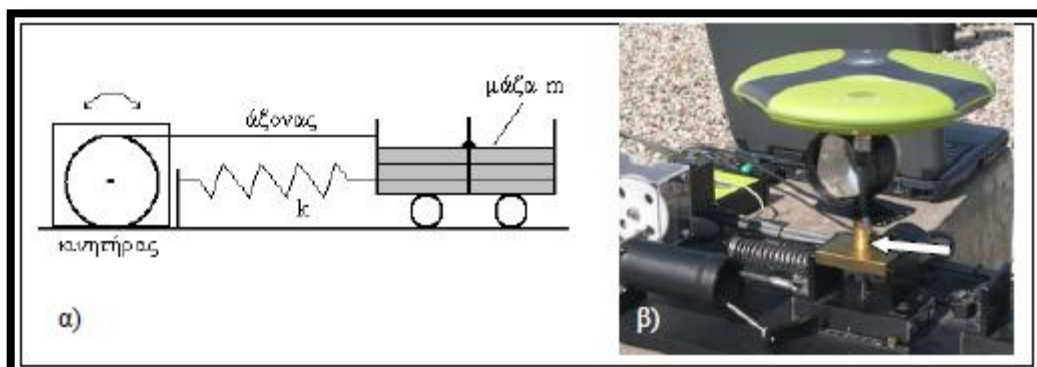


Εικόνα 1.1 Ρομποτικός γεωδαιτικός σταθμός Leica TCA 1201

- μία συσκευή ελεγχόμενων εξαναγκασμένων ταλαντώσεων (εικόνες 1.2, 1.3, 1.4),
- τέσσερις δέκτες GPS διπλής συχνότητας
- δύο ρομποτικοί σταθμοί (RTS)
- δύο ανακλαστήρες AGA.



Εικόνα 1.2 Διάταξη ταλαντωτή με τον κινητήρα



Εικόνα 1.3 Διάταξη μονοβάθμιου ταλαντωτή

Ενδιάμεσα στα πειράματα που διεξήχθησαν μεταβλήθηκε η διάταξη των οργάνων με σκοπό:

- τη διερεύνηση της επίδρασης της απόστασης των δεκτών GPS και
- τη διερεύνηση της επίδρασης της γωνίας σκόπευσης του RTS (τοποθετήθηκε το RTS σε τρεις διαφορετικές γωνίες σκόπευσης ως προς τον άξονα ταλάντωσης: α) $\sim 90^\circ$, β) $\sim 60^\circ$ και γ) $\sim 0^\circ$.



Εικόνα 1.4 Διάταξη τριτοβάθμιου ταλαντωτή

Όλα τα πειράματα που διεξήχθησαν αφορούσαν αποστάσεις μεταξύ του RTS και του στόχου που κυμαίνονταν μεταξύ 40-200m, οι οποίες θεωρήθηκαν και οι πιο αντιπροσωπευτικές για εφαρμογές καταγραφής δυναμικών κινήσεων μίας κατασκευής.

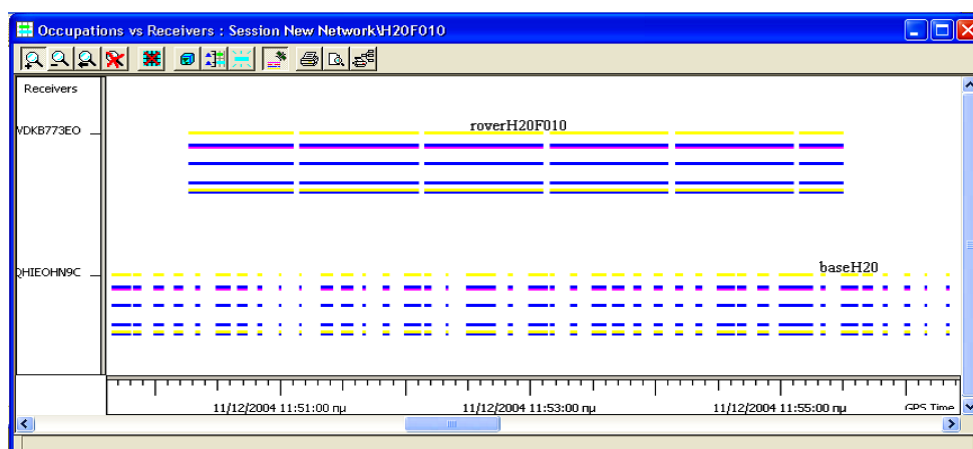
Τα προβλήματα που εντοπίστηκαν στις μετρήσεις του GPS ήταν:

Στις χρονοσειρές GPS των πρώτων πειραμάτων παρατηρήθηκαν διακοπές των καταγραφών χρονικής διάρκειας ακόμα και 10 sec οι οποίες εμφανίστηκαν σε διάφορα πειράματα ανεξάρτητα από την συχνότητα ταλάντωσης, καθώς και ανεξάρτητα από την συχνότητα καταγραφής των συστημάτων GPS.

Κατά τη διερεύνηση του προβλήματος διαπιστώθηκε από το διάγραμμα που φαίνεται στην εικόνα 1.5 το οποίο δείχνει τη λήψη σήματος από τους δορυφόρους του κινούμενου (rover) και του σταθερού δέκτη(base) πως υπήρχαν κενά στις καταγραφές. Επιπλέον επειδή τα κενά που παρουσίαζε το GPS βάσης σε σχέση με το rover ήταν μεγαλύτερα έγινε σύγκριση της συνδεσμολογίας των δύο δεκτών. Ο σταθερός και ο κινούμενος δέκτης συνδέονταν με τις κεραίες τους με καλώδια 30 m και 1 m αντίστοιχα εξαιτίας της διαφορετικής απόστασης που απείχε κάθε δέκτης από τον αντίστοιχο Η/Υ. Η διερεύνηση κατέληξε στο συμπέρασμα πως το μήκος του καλωδίου επηρέασε την συχνότητα και διάρκεια των διακοπών στις καταγραφές των GPS.

Με το καλώδιο μεγαλύτερου μήκους ενισχύεται το φαινόμενο του «μπουκώματος» των μετρήσεων (φαινόμενο που είναι γνωστό στη διεθνή βιβλιογραφία ως «clipping» [Wilson, 2006]. Έτσι εμφανίζονται μεγαλύτερης διάρκειας διακοπές στις καταγραφές. Πρόκειται για ένα πρόβλημα σχετικά γνωστό στη διεθνή βιβλιογραφία, γι' αυτό σε ανάλογες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται καλώδια με οπτικές ίνες. Τα καλώδια αυτά έχουν δυνατότητα ταχύτατης και ασφαλούς μεταφοράς

μεγάλου όγκου δεδομένων, και θεωρούνται πιο κατάλληλα από τα καλώδια χαλκού για την μεταφορά δεδομένων [Brunner, 2004, Quirion, 2005].



Εικόνα 1.5 Διάγραμμα λήψης σήματος του σταθερού δέκτη (πάνω) και του κινούμενου δέκτη (κάτω)

Όσον αφορά το RTS τα προβλήματα που προέκυψαν ήταν τα εξής :

- η συχνότητα καταγραφής ήταν χαμηλότερη από την προκαθορισμένη (5-7 αντί των 10Hz),
- η συχνότητα καταγραφής δεν ήταν σταθερή, και
- ο χρόνος των καταγραφών στρογγυλοποιείτο στο ακέραιο δευτερόλεπτο με αποτέλεσμα να μην είναι γνωστή η ακριβής χρονική διαφορά των μετρήσεων (πίνακας 1.3).

Τα παραπάνω προβλήματα εμφανίζονταν ακόμα και όταν ο ανακλαστήρας παρέμενε σταθερός, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι δεν οφείλονταν σε αδυναμία του RTS να ακολουθήσει τον στόχο και ταυτόχρονα να καταγράψει. Το πρόβλημα της μη σταθερής συχνότητας καταγραφής δεν εμφανιζόταν σε καταγραφές με συχνότητα μικρότερες του 1Hz, η οποία όμως δεν είναι κατάλληλη για καταγραφή μετακινήσεων υψίσυχνων κινήσεων. Το πρόβλημα του μη σταθερού ρυθμού δειγματοληψίας (γνωστό στη διεθνή βιβλιογραφία ως «jitter», [Chen et al., 2008] είναι πρόβλημα που συναντάται σε πολλά όργανα στο όριο της λειτουργίας τους [Stiros E. et al., 2008].

Το παραπάνω πρόβλημα το οποίο είναι ιδιαίτερα εμφανές όταν το όργανο φτάνει στο όριο λειτουργίας δεν πρέπει να θεωρηθεί αμελητέο γιατί εισάγει σφάλματα τα οποία επηρεάζουν την εκτίμηση της συχνότητας του φαινομένου που μελετάται.

Δεδομένου ότι δεν ήταν δυνατή η επέμβαση στο όργανο για την εξασφάλιση σταθερού ρυθμού δειγματοληψίας, ως λύση επελέγη η δημιουργία ενός κατάλληλου λογισμικού το οποίο ενσωματώθηκε στο όργανο και με το οποίο μπορούσε να προσδιοριστεί ο χρόνος κάθε

μέτρησης με ακρίβεια εκατοστού του δευτερολέπτου, και η αποτύπωσή του σε αρχείο με αντίστοιχη ανάλυση.

Ημερομηνία	Χρόνος	Συντεταγμένη Y (mm)	Συντεταγμένη X (mm)	Συντεταγμένη Z (mm)
05/11/2006	17:42:22	-9,000	0,100	0,100
05/11/2006	17:42:22	-12,200	0,000	0,000
05/11/2006	17:42:22	-13,900	0,100	0,100
05/11/2006	17:42:22	-28,900	-1,000	-0,1000
05/11/2006	17:42:23	-27,500	0,000	0,000
05/11/2006	17:42:23	-26,400	0,000	0,000
05/11/2006	17:42:23	-27,400	0,000	0,000
05/11/2006	17:42:23	-25,500	0,000	0,000
05/11/2006	17:42:24	-13,300	0,100	0,100
05/11/2006	17:42:24	-9,700	0,000	0,000
05/11/2006	17:42:24	-6,500	0,100	0,100
05/11/2006	17:42:24	6,200	0,100	0,100
05/11/2006	17:42:24	16,500	0,000	0,000
05/11/2006	17:42:25	16,100	0,000	0,000
05/11/2006	17:42:25	22,000	0,000	0,000
05/11/2006	17:42:25	37,300	0,000	0,000
05/11/2006	17:42:25	27,900	0,100	0,100

Πίνακας 1.3 Ενδεικτικές μετρήσεις του RTS της καταγραφής της κίνησης του ταλαντωτή

Ενδεικτικά στον πίνακα 1.4 παρουσιάζεται ο ακριβής χρόνος κάθε καταγραφής με την χρήση του λογισμικού που αναπτύχθηκε και επιβεβαιώθηκε ότι οι μετρήσεις ήταν ανισαπέχουσες διαφέροντας από 0.15sec έως 0.35sec και συνεπώς η συχνότητα καταγραφής μεταβαλλόταν συνεχώς.

Με βάση την ανάλυση των πρωτογενών δεδομένων και των συνολικών χρονοσειρών των GPS, RTS προέκυψαν τα εξής:

- Ο προσδιορισμός του εύρους των ταλαντώσεων με τους δέκτες GPS, και τον ρομποτικό γεωδαιτικό σταθμό RTS παρουσίασε τις ίδιες αποκλίσεις και χαρακτηριστικά και στα δυο είδη πειραμάτων σε μονοβάθμιο και τριτοβάθμιο ταλαντωτή.
- Το RTS αποδείχθηκε πιο αξιόπιστο στον προσδιορισμό του εύρους ενώ το GPS κατέγραφε λεπτομερέστερα την ταλάντωση χωρίς να χάνει κύκλους ταλάντωσης.
- Βάσει των καταγραφών του GPS μικρής χρονικής διάρκειας (10sec) που αντιστοιχούν στο πρώτο μέρος της χρονοσειράς προσδιορίστηκαν οι ιδιοσυχνότητες του ταλαντωτή καθώς και η συχνότητα διέγερσης.
- Από τις αντίστοιχες καταγραφές του RTS προσδιορίστηκαν οι δύο πρώτες ιδιοσυχνότητες καθώς και η συχνότητα διέγερσης με μεγαλύτερη απόκλιση, η οποία έφτανε τα $\pm 0.15\text{Hz}$, από τις πραγματικές τιμές.
- Ο προσδιορισμός των ιδιοσυχνοτήτων - συχνοτήτων ήταν πιο δύσκολος λόγω του υψηλού επίπεδου θορύβου της ανάλυσης που

πιθανότητα οφείλεται στη μη λεπτομερειακή καταγραφή της ταλάντωσης με το RTS.

Ημερομηνία	Χρόνος συμβατικής μέτρησης	Διορθωμένος Χρόνος	Συντεταγμένη Y (mm)	Συντεταγμένη X (mm)
05/11/2006	17:42:22	17:42:22,120	-9,000	0,100
05/11/2006	17:42:22	17:42:22,270	-12,200	0,000
05/11/2006	17:42:22	17:42:22,520	-13,900	0,100
05/11/2006	17:42:22	17:42:22,780	-28,900	-1,000
05/11/2006	17:42:23	17:42:23,090	-27,500	0,000
05/11/2006	17:42:23	17:42:23,310	-26,400	0,000
05/11/2006	17:42:23	17:42:23,640	-27,400	0,000
05/11/2006	17:42:23	17:42:23,890	-25,500	0,000
05/11/2006	17:42:24	17:42:24,120	-13,300	0,100
05/11/2006	17:42:24	17:42:24,350	-9,700	0,000
05/11/2006	17:42:24	17:42:24,580	-6,500	0,100
05/11/2006	17:42:24	17:42:24,740	6,200	0,100
05/11/2006	17:42:24	17:42:24,980	16,500	0,000
05/11/2006	17:42:25	17:42:25,150	16,100	0,000
05/11/2006	17:42:25	17:42:25,370	22,000	0,000
05/11/2006	17:42:25	17:42:25,530	37,300	0,000
05/11/2006	17:42:25	17:42:25,770	27,900	0,100

Πίνακας 1.4 Μετρήσεις του RTS όπως προέκυψαν μετά την χρήση του λογισμικού.

- Το εύρος των ταλαντώσεων προσδιορίζεται πρακτικά και σε όλες τις περιπτώσεις καταγραφής υπό γωνία 0°, 60° και 90° εξίσου αξιόπιστα.
- Εμφανίστηκε πιο έντονα το φαινόμενο των απωλειών κύκλων ταλάντωσης και μέγιστων μετακινήσεων (clipping effect) στις χρονοσειρές του RTS που αντιστοιχούσαν στην θέση της κάθετης σκόπευσης από ότι στις χρονοσειρές του RTS που αντιστοιχούσαν στη θέση κατά την προέκταση του άξονα ταλάντωσης.

Αυτό ήταν αναμενόμενο, καθώς στις καταγραφές κάθετα στον άξονα ταλάντωσης και κυρίως για υψηλές μέσες ταχύτητες ταλάντωσης (μεγαλύτερες των 15m/sec) υπάρχει μεγαλύτερη αδυναμία του σταθμού στην καταγραφή ταλάντωσης λόγω της συνεχόμενης στροφής που υπόκειται, σε αντίθεση με τις καταγραφές κατά τον άξονα, όπου το όργανο δεν υπόκειται σε στροφή

1.4.2 Μέτρηση ταλαντώσεων της μεταλλικής πεζογέφυρας Λεωφόρου Κηφισού

Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιήθηκαν πέντε δέκτες GPS, δύο τύπου Hiper-Pro και δύο GB-1000 της εταιρείας Topcon (πίνακας 1.5) καθώς και ένας Javad (πίνακας 1.1), ενώ υπήρχαν διαθέσιμες και δύο επιπλέον κεραίες choke-ring. Οι πέντε δέκτες είναι διπλής συχνότητας (L1 και L2) και έχουν δυνατότητα καταγραφής έως 10 Hz, εκτός από τον Javad που έχει δυνατότητα καταγραφής έως 20Hz. Οι ρομποτικοί σταθμοί που χρησιμοποιήθηκαν ήταν δύο TCA 1201 της εταιρείας Leica

(πίνακας 1.2) με δύο ανακλαστές υψηλής ακριβείας τύπου AGA.

Επιπλέον χρησιμοποιήθηκε ένας επιταχυνσιογράφος τύπου AC-23 της GeoSIG ο οποίος είναι ψηφιακός με σύστημα καταγραφής σε τρεις άξονες (τριτοβάθμιος ταλαντωτής). Το βασικό χαρακτηριστικό του είναι η συχνότητα καταγραφής η οποία φτάνει τα 250Hz, η οποία υπερκαλύπτει τις ανάγκες των πειραμάτων αλλά και όλων των εφαρμογών παρακολούθησης των τεχνικών κατασκευών.

Οι μετρήσεις που διεξήχθησαν στην πεζογέφυρα του Κηφισού αφορούσαν τις ταλαντώσεις που προέκυψαν από διέγερση της γέφυρας από συντονισμένο βηματισμό και άλματα. Οι καταγραφές αφορούσαν το μέσο του κεντρικού ανοίγματος (εικόνα 1.6).

Μέθοδος μετρήσεων GPS	Ακρίβεια προσδιορισμού συντεταγμένων GB-1000 (mm)	
	Οριζόντιες	Κατακόρυφη
Post-Process kinematic	3mm ± 0.5ppm	6mm ± 0.5ppm
RTK	10mm ± 1.0ppm	15mm ± 1.0ppm

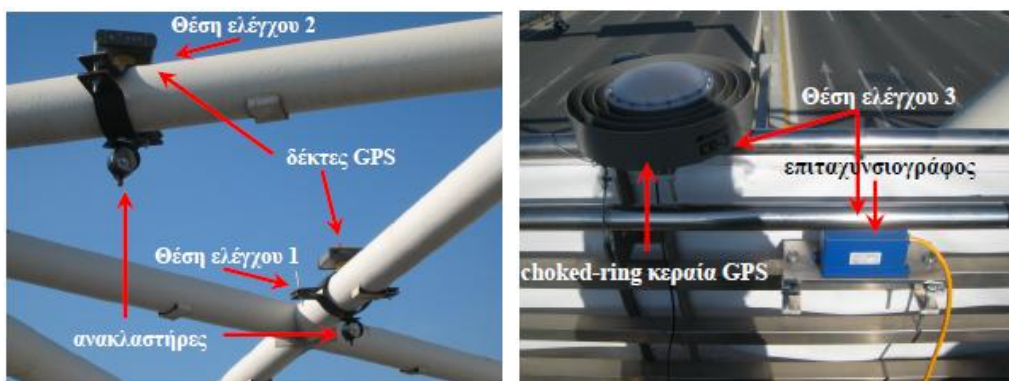
Πίνακας 1.5 Τυπικές προδιαγραφές ακρίβειας από την Topcon για τους δέκτες GPS GB-1000 (Topcon, 2002)

Παρόλο που ο αριθμός των οργάνων GPS και RTS επέτρεπε την επιλογή παραπάνω του ενός σημείου για θέσεις ελέγχου θεωρήθηκε σκόπιμο να εστιαστούν οι μετρήσεις πρακτικά σε παρακολούθηση ενός σημείου κατά μήκος της γέφυρας, με στόχο την δημιουργία ενός «υπερστατικού» («highly redundant») δικτύου καταγραφής (δηλαδή παραπάνω του ενός οργάνου για κάθε σημείο ελέγχου) με ανεξάρτητα όργανα (GPS, RTS και επιταχυνσιογράφο) με στόχο την καλύτερη εκτίμηση των ταλαντώσεων αλλά και τον καλύτερο δυνατό έλεγχο της αξιοπιστίας των μετρήσεων των οργάνων [Psimoulis, 2007].

Με τον παραπάνω τρόπο, όχι μόνο ελέγχεται η απόδοση ενός οργάνου με άλλο όργανο ίδιου τύπου αφού οι καταγραφές δύο δεκτών GPS αλληλοελέγχονται, αλλά και με όργανα άλλου τύπου με στόχο ασυσχέτιστες μετρήσεις, δηλαδή μετρήσεις που προέρχονται από όργανα με διαφορετικές αρχές λειτουργίας και που επηρεάζονται από διαφορετικούς παράγοντες για παράδειγμα δορυφορικές μετρήσεις GPS και επίγειες μετρήσεις RTS.

Στο συγκεκριμένο πείραμα προκλήθηκε διέγερση της γέφυρας από πεζούς συνολικής μάζας 400kgf (4KN), οι οποίοι διέγειραν την γέφυρα με δύο διαφορετικούς τρόπους:

- α) επιτόπια, συντονισμένα άλματα με συχνότητα περίπου 1 - 1.5Hz
- β) συντονισμένη κίνηση τροχάδην κατά μήκος της γέφυρας.



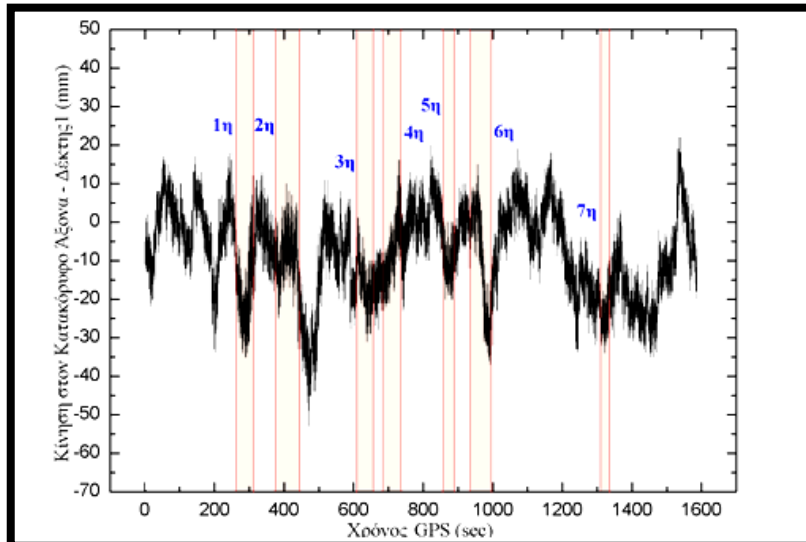
Εικόνα 1.6 Οι θέσεις ελέγχου στο πάνω μέρος του μεταλλικού δικτυώματος και η θέση ελέγχου στη κουπαστή στο μέσο του κεντρικού ανοίγματος

Πραγματοποιήθηκαν συνολικά επτά διεγέρσεις της γέφυρας χρονικής διάρκειας 60 δευτερολέπτων η καθεμία. Στα σχήματα που ακολουθούν (σχήμα 1.3, 1.4) απεικονίζονται οι χρονοσειρές που περιγράφουν την κίνηση της πεζογέφυρας του Κηφισού στον κατακόρυφο άξονα με βάση τις καταγραφές των GPS1 και RTS1 για την συνολική διάρκεια των πειραμάτων.

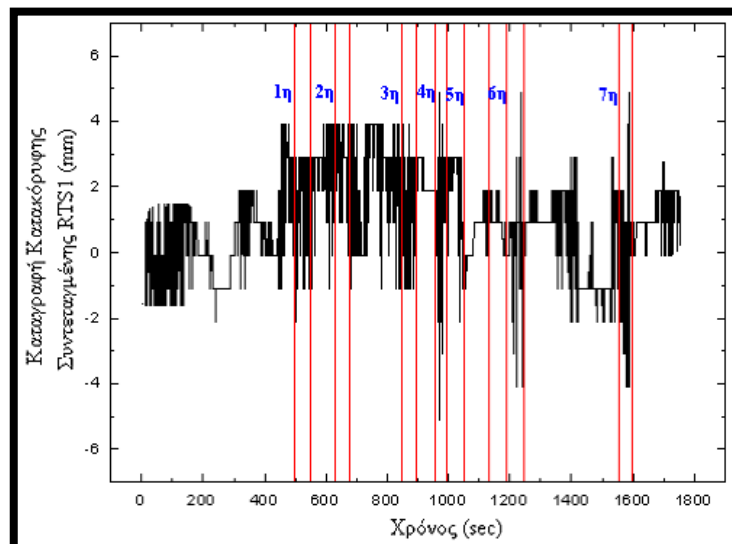
Η προσεγγιστική ανάλυση της γέφυρας είχε δείξει ότι η γέφυρα είναι δύσκαμπτη κατασκευή με κύρια ιδιοσυχνότητα 4.3Hz με μικρή ημιστατική (1-2mm) και δυναμική μετακίνηση (4-5mm). Από τα πειράματα που διεξήχθησαν προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Με βάση τις εκτιμήσεις του εύρους των χαμηλόσυχνων-ημιστατικών χρονοσειρών των GPS προέκυψε ότι οι εκτιμήσεις μετακίνησης είναι εντός ορίων θορύβου και δεν είναι δυνατή η εκτίμηση του εύρους ημιστατικής και δυναμικής μετακίνησης. Εξάλλου τα όρια θορύβου (περίπου 6.8mm) ήταν μεγαλύτερα από τις αναμενόμενες μετακινήσεις (ημιστατική 1-2mm, δυναμική 4-5mm) όπως προέκυψαν από την ανάλυση FEM του θεωρητικού μοντέλου.
- Οι δέκτες GPS κατέγραψαν την μορφή της κίνησης, παρόλο που οι μετρήσεις περιείχαν θόρυβο, το οποίο οδήγησε και στην αξιόπιστη εκτίμηση της κύριας ιδιοσυχνότητας περίπου 4.3Hz της γέφυρας.
- Βάση των μετρήσεων των ρομποτικών σταθμών (RTS), εκτιμήθηκε η ημιστατική και δυναμική μετακίνηση ίση με 2mm και 4mm αντίστοιχα, τιμές οι οποίες συμφωνούσαν με τις εκτιμήσεις της ανάλυσης FEM.
- Λόγω της απώλειας κύκλων της υψίσυχνης κίνησης της γέφυρας κατά την διέγερσή της οι ρομποτικοί σταθμοί αδυνατούσαν να καταγράψουν τη μορφή της ταλάντωσης (φαινόμενο «clipping») και να προσδιορίσουν τις συχνότητες της κίνησης αξιόπιστα καθώς εμφάνιζαν απόκλιση έως και $\pm 0.2\text{Hz}$.
- Τέλος, από την πειραματική καταγραφή των ταλαντώσεων της

πεζογέφυρας του Κηφισού, που αποτελεί μία δύσκαμπτη κατασκευή, διαπιστώθηκε ότι με την χρήση ενός «υπερστατικού» συστήματος οργάνων, το οποίο αποτελείται από όργανα πολλά σε πλήθος και διαφορετικών αρχών λειτουργίας (GPS, RTS), είναι δυνατός ο προσδιορισμός των μετακινήσεων καθώς και των ιδιοσυχνοτήτων-συχνοτήτων που εμφανίζονται στις διεγέρσεις τους.



Σχήμα 1.3 Χρονοσειρά των κατακόρυφων μεταβολών με βάση τις καταγραφές του GPS1 για την συνολική διάρκεια των πειραμάτων.



Σχήμα 1.4 Χρονοσειρά των κατακόρυφων μεταβολών με βάση τις καταγραφές του RTS1 για την συνολική διάρκεια των πειραμάτων.

1.4.3 Μετρήσεις ταλαντώσεων της σιδηροδρομικής γέφυρας του Γοργοποτάμου

Το συγκεκριμένο πείραμα πραγματοποιήθηκε σε δύο περιόδους γεωδαιτικών μετρήσεων GPS, RTS στις 7 Απριλίου 2006 (1η φάση) και

στις 7 Ιουλίου 2006 (2η φάση) για τον προσδιορισμό της απόκρισης της γέφυρας στη διέλευση των συρμών. Στόχος των μετρήσεων των GPS, RTS ήταν εκτός από τη μελέτη των ταλαντώσεων της γέφυρας κατά τη διάρκεια της διέλευσης των συρμών

- να διερευνηθεί αν και κατά ποιον τρόπο επηρεάζονται οι μετρήσεις του GPS από την διέλευση ενός συρμού,
- να διερευνηθεί τυχόν μεταβολή της απόκρισης της γέφυρας σε σχέση με το είδος και την ταχύτητα του συρμού, καθώς και την εποχή, διότι σε περιόδους υψηλής υγρασίας αναμένεται να είναι διαφορετικά τα μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους τα οποία αντικατοπτρίζονται στις ταλαντώσεις της κατασκευής μέσω της αλληλεπίδρασης εδάφους - κατασκευής.

Για το συγκεκριμένο πείραμα χρησιμοποιήθηκαν :

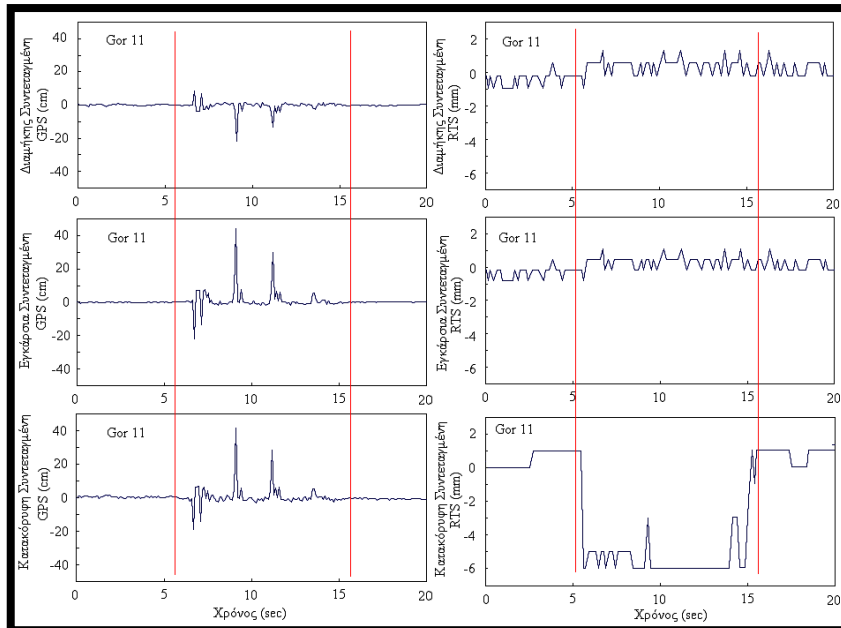
- δύο GPS δέκτες τύπου Javad (πίνακας 1.1)
- ένα RTS Leica TCA 1201 (πίνακας 1.2)
- τρεις ανακλαστήρες AGA

Το πρώτο συμπέρασμα που προέκυψε από την εξέταση των δεδομένων αυτών είναι ότι οι χρονοσειρές του GPS εμφάνιζαν φαινομενικές μεταβολές στις συντεταγμένες της τάξης δεκάδων ή ακόμα και εκατοντάδων cm σε ορισμένες περιπτώσεις (σχήμα 1.5) με ανυψώσεις στον κατακόρυφο άξονα, ενώ αντίθετα αυτές του RTS στον κατακόρυφο άξονα είναι της τάξης των λίγων mm.

Επειδή σε μια γέφυρα του συγκεκριμένου τύπου δεν αναμένονταν μετακινήσεις μεγαλύτερες των 10-15mm και μάλιστα ανυψώσεις, εξήχθη το συμπέρασμα της ύπαρξης σφάλματος κλίμακας (με θετικές και αρνητικές τιμές) στις μετρήσεις GPS. Τα σφάλματα αυτά (θόρυβος) παρατηρήθηκαν συστηματικά σε όλες τις χρονοσειρές του GPS σε όλες τις διελεύσεις συρμών. Είναι προφανές ότι είναι απαραίτητο να διερευνηθεί και απαλειφθεί ο θόρυβος αυτός.

Από τη λεπτομερή εξέταση του προβλήματος προέκυψε ότι ο θόρυβος αυτός συνδεόταν προφανώς με το γεγονός ότι ο συρμός ήταν ψηλότερος από το σημείο ελέγχου της κουπαστής, καλύπτοντας ένα τμήμα της ουράνιας σφαίρας από την ορατότητα της κεραίας του δέκτη, προκαλώντας παρεμβολές στην πορεία των κυμάτων που εκπέμπονται από τους δορυφόρους και λαμβάνονται από το δέκτη ελέγχου και οδηγώντας στα εξής πιθανά προβλήματα (σχήμα 1.6):

- ✓ παρεμπόδιση της λήψης σήματος από δορυφόρους που βρίσκονται στο αντίστοιχο (καλυπτόμενο) ουράνιο τμήμα με αποτέλεσμα δραματική αλλαγή της γεωμετρίας των παρατηρούμενων δορυφόρων και του συστήματος παρατήρησης



Σχήμα 1.5 Χρονοσειρές υπολογισμένων μετακινήσεων των μετρήσεων

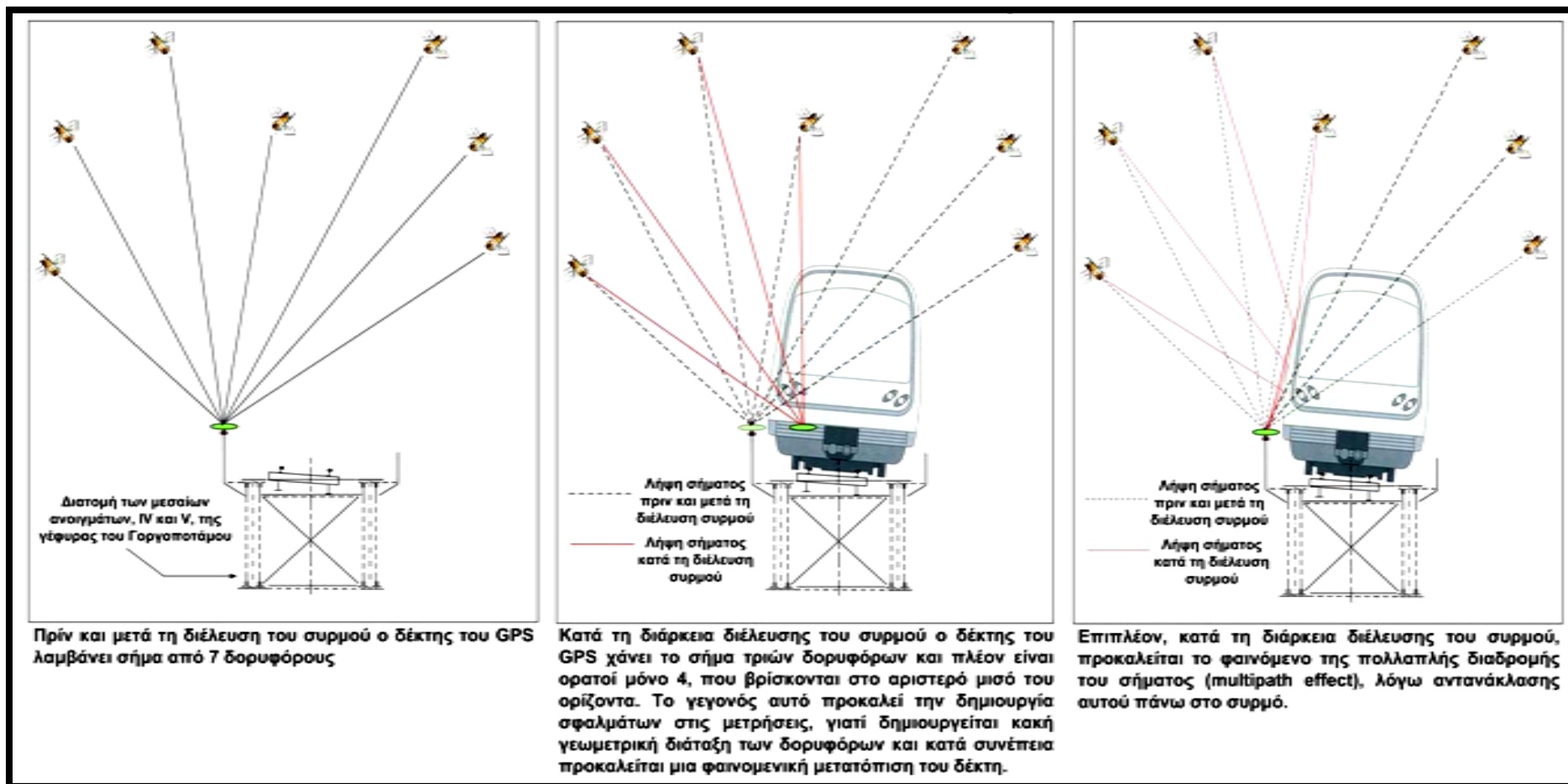
- ✓ αδυναμία του χρησιμοποιούμενου λογισμικού να επιλύσει με ακρίβεια το σύστημα των παρατηρήσεων (ambiguities resolution) λόγω απότομης αλλαγής του συστήματος παρατήρησης εξ' αιτίας της παρεμπόδισης της λήψης σήματος από ορισμένους δορυφόρους
- ✓ πρόκληση σφάλματος πολλαπλών διαδρομών του σήματος των δορυφόρων λόγω της κοντινής απόστασης της κεραίας του GPS και της μεταλλικής επιφάνειας του βαγονιού.

Για τον λόγο αυτό έγινε διερεύνηση αιτιών του προβλήματος και εξετάστηκαν τέσσερις περιπτώσεις στις οποίες πιθανότατα οφειλόταν το σφάλμα κλίμακας των χρονοσειρών του GPS :

- α) η επίδραση μεταβολής γεωμετρίας και πλήθους δορυφόρων
- β) η πιθανή αδυναμία επίλυσης αβεβαιοτήτων από το λογισμικό
- γ) διερεύνηση με επίλυση των καταγραφών GPS με χρήση μόνο της συχνότητας L1
- δ) η πειραματική διερεύνηση για την εξακρίβωση του αιτίου μεγάλων φαινομενικών μετακινήσεων της κατακόρυφης συντεταγμένης

Με βάση τις διερευνήσεις που πραγματοποιήθηκαν για την εξήγηση των υψηλών τιμών των χρονοσειρών στις χρονοσειρές του GPS προέκυψε ότι:

- Ο θόρυβος των χρονοσειρών της κατακόρυφης συντεταγμένης μειώνεται με την αφαίρεση των δορυφόρων των οποίων διακόπτεται το σήμα από το διερχόμενο συρμό, εάν απομένουν αρκετοί δορυφόροι.



Σχήμα 1.6 Το φαινόμενο της πολλαπλής διαδρομής του σήματος κατά τη διάρκεια διέλευσης ενός συρμού από τη γέφυρα του Γοργοποτάμου

- Ο θόρυβος των χρονοσειρών GPS μειώνεται και με την χρήση βελτιωμένου λογισμικού (GeoOffice) του οποίου ο αλγόριθμος κινηματικής επίλυσης φαίνεται να μειώνει τα σφάλματα επίλυσης αβεβαιοτήτων.
- Σε κάθε περίπτωση η χρονοσειρά "waveform" καταγράφει με «κωδικό τρόπο» την απόκριση του φορέα στο δυναμικό φορτίο, με τη μορφή διάκρισης της διέλευσης κάθε βαγονιού ξεχωριστά.
- Η μετρούμενη μετακίνηση φαίνεται να επηρεάζεται από σφάλμα κλίμακας το οποίο δεν μπορεί να εκτιμηθεί από τα δεδομένα GPS.

Η ανάλυση όλων των χρονοσειρών των GPS, RTS ανέδειξε τα εξής συμπεράσματα:

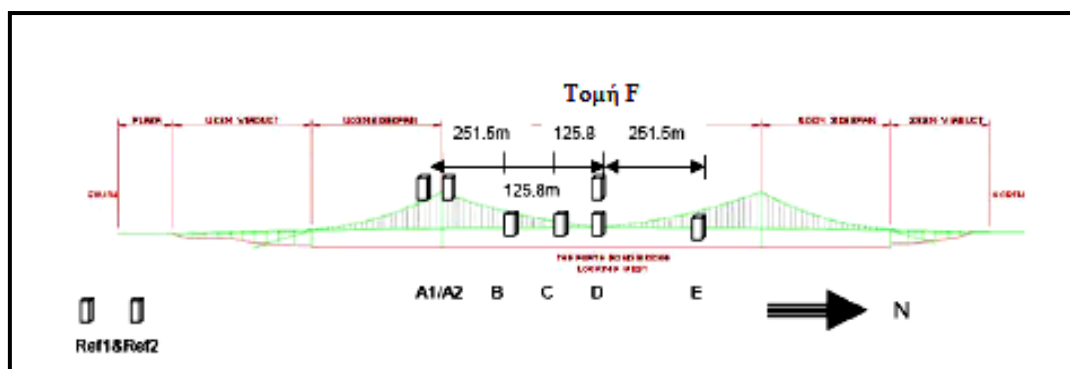
- Το RTS κατέγραψε την μετακίνηση του μέσου του ανοίγματος της γέφυρας και κυρίως την ημιστατική (2.4-6.5mm) και συνολική μετακίνηση της, με την τελευταία να αγγίζει και τα 10mm. Υπήρξαν περιπτώσεις διελεύσεων στις οποίες προσδιορίστηκε και η δυναμική απόκριση της γέφυρας (4-5mm) και αυτό επιτεύχθηκε όταν η συχνότητα καταγραφής του RTS ήταν περίπου ίση με 7Hz.
- Το GPS κατέγραψε την μορφή της υψίσυχνης κίνησης του σημείου ελέγχου όπως αποδείχθηκε και από τον προσδιορισμό των δεσποζουσών συχνοτήτων της κίνησης (0.39-0.60Hz) και (3.1 - 3.2Hz).
Όπως αποδείχθηκε στα πειράματα ταλαντώσεων και στις μετρήσεις της πεζογέφυρας του Κηφισού, το GPS κατέγραψε την μορφή της υψίσυχνης κίνησης, αλλά λόγω του μικρού εύρους μετακίνησης, μικρότερη του 1cm, και του θορύβου που υπεισερχόταν στις μετρήσεις, ο οποίος ενισχυόταν από την ανάκλαση του σήματος στους διερχόμενους συρμούς, δεν ήταν δυνατός ο προσδιορισμός του εύρους.
- Ο συνδυασμός δεδομένων RTS και αναγόμενων τιμών GPS επέτρεψε να εκτιμηθεί ότι η μετακίνηση του μέσου του ανοίγματος της γέφυρας (θέση ελέγχου κουπαστή) που κυμαίνεται 5-7mm ενώ καταγράφηκε μετακίνηση 10mm στον στρωτήρα. Η διαφορά αυτή οφείλεται στην άμεση διέγερση του στρωτήρα σε σχέση με την κουπαστή.
- Οι κύριες συχνότητες που εμφανίζονται στην απόκριση της γέφυρας είναι η διεγείρουσα συχνότητα του συρμού που εξαρτάται από την ταχύτητά του (0.35 - 0.60Hz) και η κύρια ιδιοσυχνότητα του φορέα που εκτιμήθηκε περίπου ίση με 3.3Hz.
- Με βάση τις καταγραφές του RTS παρατηρήθηκε ότι οι επιβατικοί συρμοί προκαλούν μεγαλύτερη ημιστατική κίνηση, ενώ η αντίθετα οι εμπορικοί προκαλούν μεγαλύτερη δυναμική μετακίνηση λόγω

μικρότερης ταχύτητας και βάρους. Η ταχύτητα εκφράζεται με τη συχνότητα διέλευσης των συρμών.

1.4.4 Παρακολούθηση ταλαντώσεων της γέφυρας Forth Road

Το πείραμα αυτό διεξήχθη από τα πανεπιστήμια Nottingham και Brunel του Λονδίνου, στην γέφυρα Forth road της Σκωτίας, τον Φεβρουάριο του 2005. Σκοπός του πειράματος ήταν η παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς του καταστρώματος της γέφυρας σε πραγματικές συνθήκες κυκλοφοριακού φόρτου [Roberts et.al, 2005].

Η παρακολούθηση του καταστρώματος της γέφυρας έγινε με την βοήθεια επτά δεκτών GPS δύο συχνοτήτων, οι οποίοι τοποθετήθηκαν κατά μήκος του καταστρώματος καθώς και δυο δεκτών οι οποίοι λειτούργησαν ως σταθμοί αναφοράς και είχαν τοποθετηθεί σε κοντινό κτήριο. Η διάταξη όλων των δεκτών GPS, απεικονίζεται στο σχήμα 1.7, ενώ ο τύπος των δεκτών και των κεραιών φαίνεται στον πίνακα 1.6.



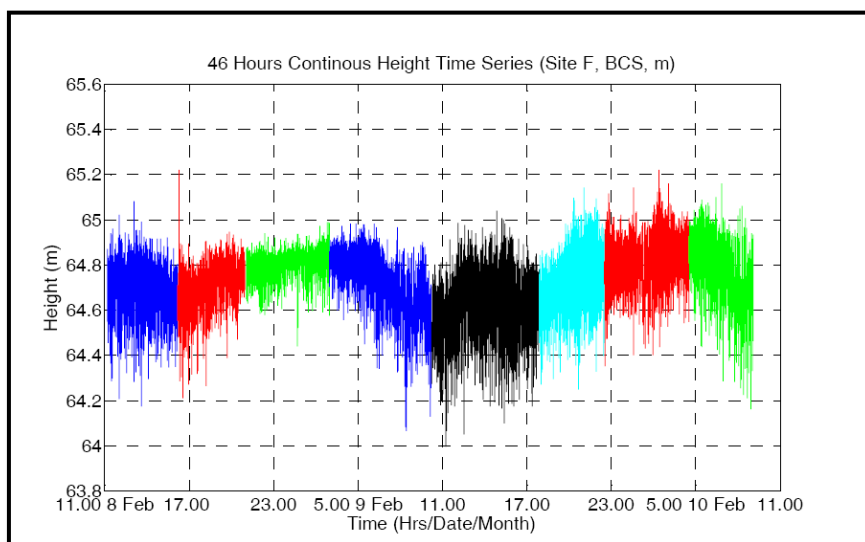
Σχήμα 1.7 Οι θέσεις των δεκτών GPS

Σημείο τοποθέτησης	Τύπος δέκτη	Τύπος κεραιάς	Σημείο τοποθέτησης
B	Leica SR530	AT503	E ¼ span
C	Leica SR530	AT503	E 3/8 span
D	Leica SR530	AT503	E ½ span
E	POS RS	NovAtel600	E ¾ span
F	Leica GX1230	AT504	W ½ span
A1	Leica SR530	AT504	Tower
A2	Leica SR530	AT501	Tower
R1	Leica SR530	AT503	Reference
R2	Leica SR530	AT503	Reference

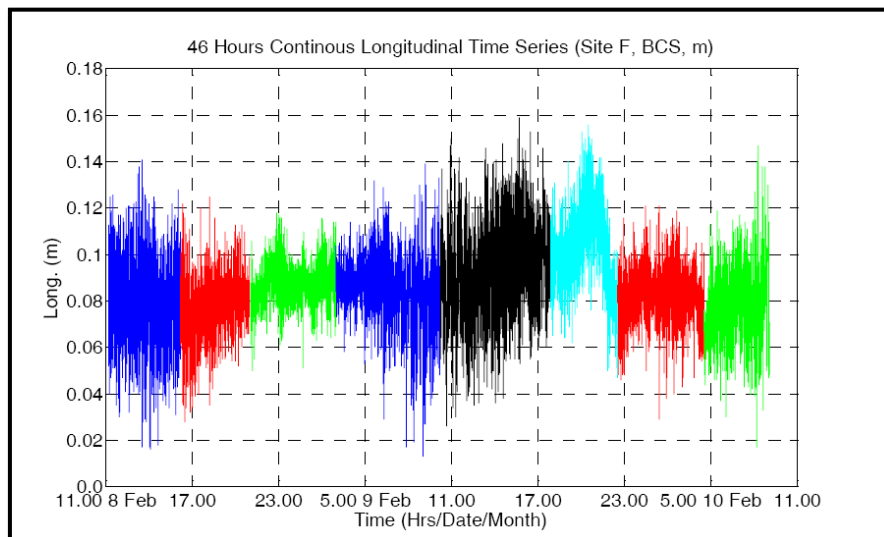
Πίνακας 1.6 Τύποι δεκτών και κεραιών GPS του πειράματος

Το πείραμα διήρκησε συνολικά 46 ώρες και τα δεδομένα συνελέγησαν με ρυθμό καταγραφής 10Hz. Η επίλυση έγινε με την

μέθοδο της “Έν κινήσει επίλυση ασαφειών” (On The Fly), ενώ οι συντεταγμένες υπολογίστηκαν στο σύστημα αναφοράς WGS84. Επίσης κατεγράφησαν και δεδομένα θερμοκρασίας, πίεσης, ταχύτητας, σχετικής υγρασίας, καθώς και κατεύθυνσης ανέμου με την βοήθεια του μετεωρολογικού σταθμού Omni Instrument και ρυθμό καταγραφής δεδομένων ανά 15 sec.



Σχήμα 1.8 Καθ' ύψος παραμορφώσεις της τομής F, της γέφυρας

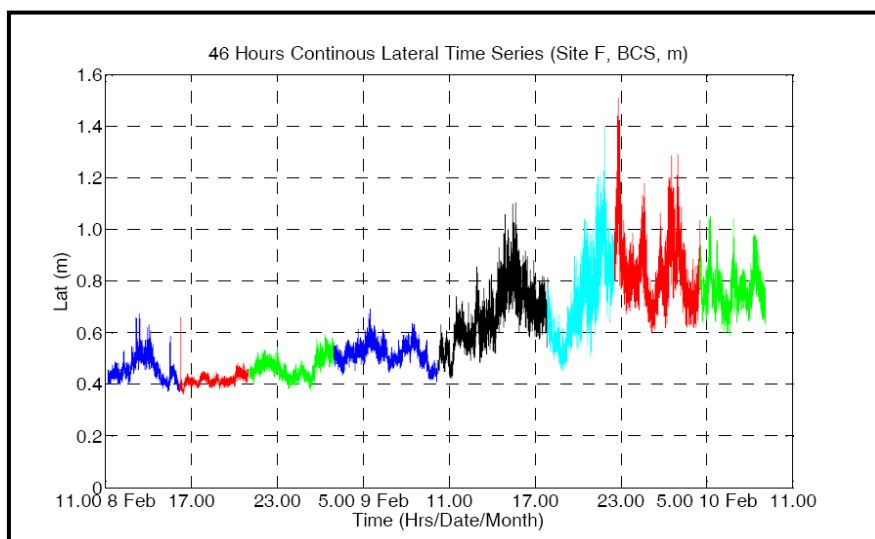


Σχήμα 1.9 Κατά μήκος παραμορφώσεις της τομής F, της γέφυρας

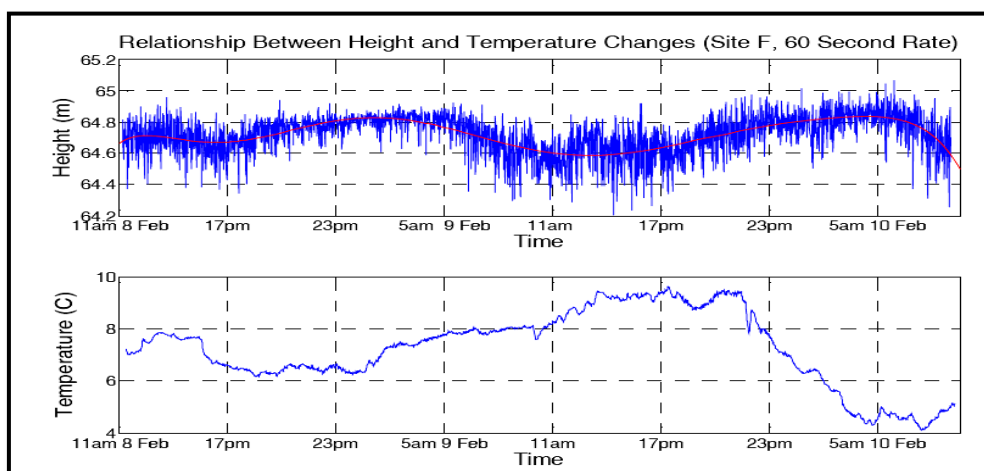
Στα σχήματα 1.8, 1.9 και 1.10 παρουσιάζονται οι μεταβολές που υπέστη η γέφυρα κατά τον διαμήκη, τον εγκάρσιο και τον κατακόρυφο άξονα της καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος και από τα οποία διαγράμματα γίνεται αντιληπτό ότι οι μετακινήσεις του καταστρώματος της γέφυρας ήταν της τάξεων των δεκατόμετρων.

Επίσης, από το σχήμα 1.10, φαίνεται ότι κατά τη διάρκεια της

δεύτερης νύχτας, οι παραμορφώσεις ήταν εντονότερες από την πρώτη, γεγονός που οφείλεται στην ύπαρξη ισχυρών ανέμων που έπνεαν στην περιοχή. Στο σχήμα 1.11, γίνεται μια σύγκριση της μεταβολής του ύψους του καταστρώματος της γέφυρας στην τομή F, συναρτήσει της θερμοκρασιακής μεταβολής, η οποία έφτασε τους 5.5 °C. Η μεταβολή στο ύψος της γέφυρας σχετίζεται με το φαινόμενο συστολής-διαστολής των καλωδίων υποστήριξης του καταστρώματος.

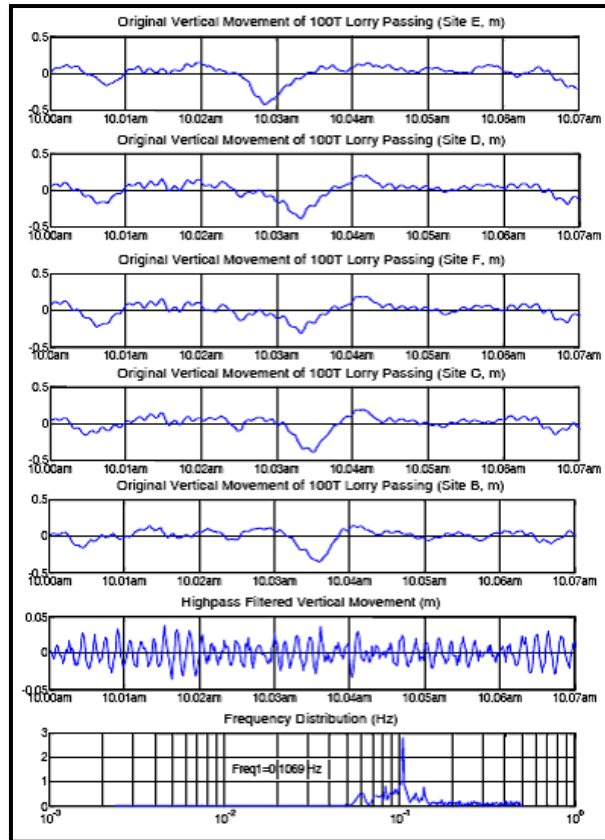


Σχήμα 1.10 Εγκάρσιες παραμορφώσεις της τομής F, της γέφυρας

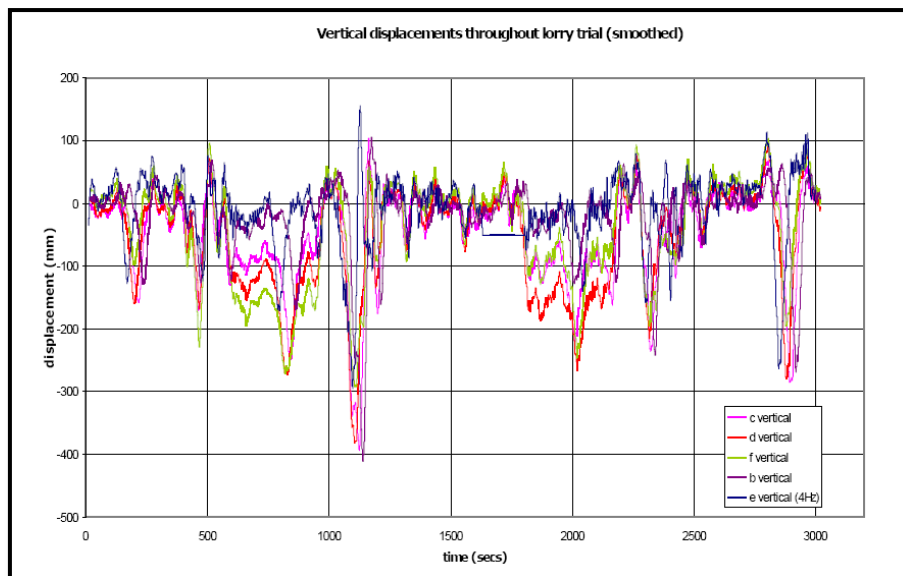


Σχήμα 1.11 Σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και μεταβολής του ύψους του καταστρώματος της γέφυρας, στην τομή F

Επιπλέον πειράματα διεξήχθησαν με την τοποθέτηση ελεγχόμενου φορτίου στο κατάστρωμα της γέφυρας και συγκεκριμένα ενός φορτηγού 100 τόνων και δύο φορτηγών 40 τόνων το καθένα από τα οποία διέσχισαν τη γέφυρα χωρίς άλλο κυκλοφοριακό φόρτο, και εκτελώντας διάφορους ελιγμούς επάνω στο κατάστρωμα αυτής.



Σχήμα 1.12 Υπομετρικές μεταβολές κατά την διέλευση του φορτηγού των 100 τόνων



Σχήμα 1.13 Υπομετρικές μεταβολές κατά τους ελιγμούς των φορτηγών των 40 τόνων

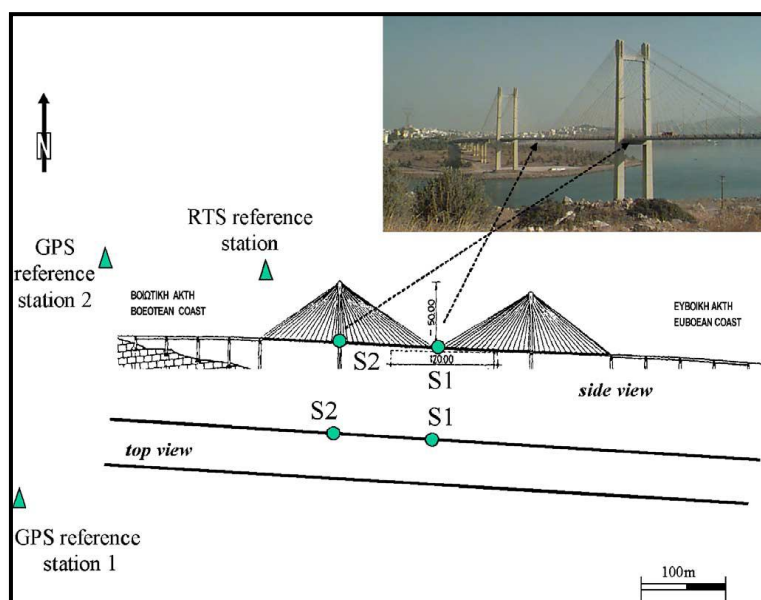
Σκοπός αυτής της διαδικασίας ήταν να υπολογιστεί η σχέση μεταξύ των ταλαντώσεων του καταστρώματος της γέφυρας και του φορτίου που την διασχίζει, κάτι το οποίο δεν ήταν εφικτό να υπολογιστεί σε συνθήκες

πραγματικής κυκλοφορίας οχημάτων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συνοπτικά για το όχημα των 100 τόνων στο σχήμα 1.12, ενώ για τα οχήματα των 40 τόνων, στο σχήμα 1.13.

1.4.5 Παρακολούθηση ταλαντώσεων της γέφυρας του Ευρίπου

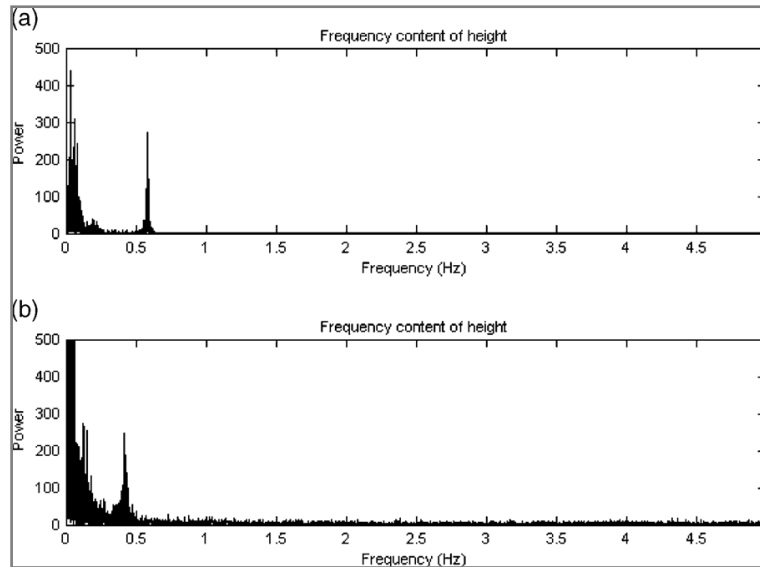
Για την καταγραφή των μετακινήσεων λόγω κυκλοφοριακού φόρτου τοποθετήθηκαν ένας δέκτης GPS και ένας ανακλαστήρας στο μέσο του κεντρικού ανοίγματος, ενώ παραπλεύρως τοποθετήθηκαν ένα δεύτερο GPS (σταθερός δέκτης) και ένα RTS τύπου LEICA TCA 1800 (εικόνα 1.7).

Σύμφωνα με την συγκεκριμένη δημοσίευση από τις καταγραφές του RTS προέκυψαν μετρήσεις με ακρίβεια περίπου 5mm για τις οριζόντιες συντεταγμένες και 3mm για την κατακόρυφη.



Εικόνα 1.7 Σημεία παρακολούθησης με γεωδαιτικές μεθόδους

Με φασματική ανάλυση FFT προέκυψε κύρια συχνότητα στα 0.56Hz, καθώς και άλλες μη στατιστικά σημαντικές περίπου στα 0.35Hz (σχήμα 1.15). Από την αντίστοιχη ανάλυση FFT των καταγραφών του GPS προέκυψε κύρια συχνότητα στα 0.45Hz, ενώ από τις καταγραφές επιταχυνσιογράφων περίπου στα 0.40Hz. Η διαφορά των εκτιμημένων συχνοτήτων οφείλεται πιθανότατα σε σφάλμα της συχνότητας δειγματοληψίας [Lekidis, Tsakiri et.al, 2005].



Σχήμα 1.14 Διαγράμματα φασματικών αναλύσεων FFT των κατακόρυφων μεταβολών από RTS και GPS αντίστοιχα

1.5 Αντικείμενο της εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι αφενός η αξιολόγηση της χρήσης των αυτόματα ελεγχόμενων γεωδαιτικών σταθμών (RTS) στην παρακολούθηση ταλαντώσεων γεφυρών και αφετέρου η σύγκριση διαφορετικών σταθμών αυτού του είδους.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε ήταν οι μετρήσεις να γίνουν με τη χρήση δύο αυτόματα ελεγχόμενων γεωδαιτικών σταθμών αφού προηγήθηκε ο συγχρονισμός των χρονομέτρων τους. Με αυτό τον τρόπο, ο οποίος δεν έχει μελετηθεί βάσει των γνώσεων του συγγραφέα, έγινε προσπάθεια να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων για κάθε σταθμό μεμονωμένα αλλά και να γίνει σύγκριση των κοινών τους μετρήσεων.

Πραγματοποιήθηκε μέτρηση στόχων οι οποίοι είναι πακτωμένοι σε συγκεκριμένη θέση πάνω στο σώμα της υψηλής γέφυρας της Χαλκίδας.

Οι στόχοι που επιλέχθηκαν λόγω της θέσης τους βρίσκονται :

- ✓ σε κορυφές πυλώνων της καλωδιωτής γέφυρας της Χαλκίδας
- ✓ στο μέσο του ανοίγματος του καταστρώματος της γέφυρας.

Οι θέσεις αυτές επιλέχθηκαν επειδή θεωρήθηκε ότι οι συγκεκριμένοι στόχοι δεν είναι ακίνητοι και ότι εκτελούν κάποιου είδους ταλάντωση.

Οι σταθμοί που χρησιμοποιήθηκαν για την πραγματοποίηση των πειραμάτων της εργασίας είναι :

- Ο IS της εταιρείας Topcon
- Ο VX της εταιρείας Trimble

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΑΥΤΟΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΟΙ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ - ROBOTIC TOTAL STATIONS (RTS)

2.1 Αρχές λειτουργίας των RTS και παρελκόμενα

Οι ολοκληρωμένοι γεωδαιτικοί σταθμοί με στοιχεία αυτόματης αναγνώρισης και παρακολούθησης στόχου παρουσιάστηκαν για πρώτη φορά από την εταιρεία Geodimeter το 1990. Χαρακτηριστικό των οργάνων αυτής της γενιάς είναι ότι για πρώτη φορά συνδύασαν ένα σύνολο σερβομηχανισμών και εξελιγμένων αισθητήρων, οι οποίοι επέτρεψαν στους γεωδαιτικούς σταθμούς, να ανιχνεύουν και να παρακολουθούν αυτόνομα έναν στόχο σε κίνηση.

Η βασική αρχή μέτρησης και καταγραφής των γωνιών και μηκών, είναι ίδια με αυτή για τους κοινούς γεωδαιτικούς σταθμούς. Η διαφορά τους έγκειται στο ότι υπάρχει η δυνατότητα αυτόματης κίνησης του συστήματος παρατήρησης του οργάνου κατά τον οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα.

Παράλληλα η εφαρμογή τεχνικών ασύρματης τεχνολογίας, επιτρέπει τον πλήρη χειρισμό του οργάνου εξ' αποστάσεως καθιστώντας το πλέον αυτόματα ελεγχόμενο (Robotic Total Station). Το χαρακτηριστικό αυτό ενίσχυσε σημαντικά την χρήση των γεωδαιτικών σταθμών σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών, τόσο στην κατασκευή και παρακολούθηση τεχνικών έργων, καθώς και σε άλλους τομείς όπως οι χωματουργικές ή γεωργικές εφαρμογές (καθοδήγηση αγροτικών, χωματουργικών μηχανημάτων).

Η λειτουργία των αυτόματα ελεγχόμενων ή ρομποτικών γεωδαιτικών σταθμών βασίζεται στην ενσωμάτωση τριών διαφορετικών χαρακτηριστικών:

- της **αυτόματης περιστροφής** του τηλεσκοπίου του οργάνου γύρω από τον πρωτεύοντα και δευτερεύοντα άξονα,
- της **αυτόματης αναγνώρισης** και **παρακολούθησης στόχου**,
- του **εξ' αποστάσεως χειρισμού** του οργάνου μέσω ασύρματου τηλεχειριστηρίου.

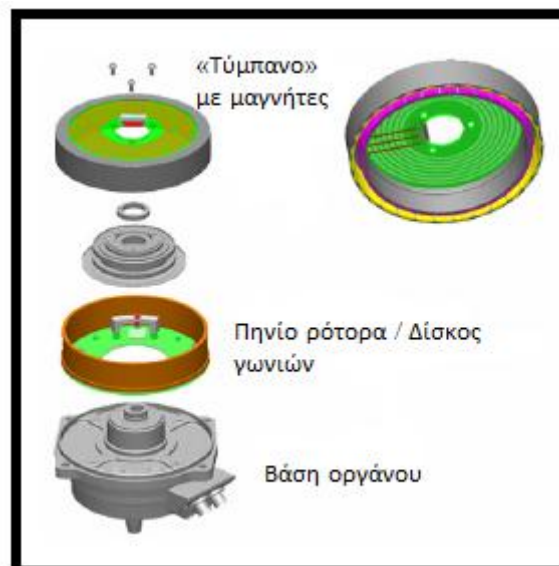
Στην αγορά των γεωδαιτικών σταθμών οι ρομποτικοί σταθμοί κατέχουν πια εξέχουσα θέση αφού υπάρχει ευρεία ποικιλία τέτοιων σταθμών από τις περισσότερες σχετικές εταιρείες στον χώρο αυτόν. Οι διαφορές τους έγκεινται στην ακρίβεια τους, στην ποιότητα κατασκευής, στις δυνατότητες που παρέχουν στον χρήστη καθώς και στα παρελκόμενα με τα οποία συνοδεύονται.

2.1.1 Αυτόματη περιστροφή του τηλεσκοπίου

Η αυτόματη περιστροφή του τηλεσκοπίου υλοποιείται με τρεις διαφορετικές τεχνολογίες.

Η πρώτη αποτελεί ευρεσιτεχνία της εταιρείας Trimble και είναι γνωστή με το όνομα MagDrive® (σχήμα 2.1). Η βασική αρχή λειτουργίας στηρίζεται στην χρήση ενός ομοαξονικά τοποθετημένου “τύμπανου” με ενσωματωμένους μαγνήτες, το οποίο περιστρέφεται γύρω από ένα πηνίο σταθερά συνδεδεμένο με την βάση του οργάνου. Στο πηνίο διέρχεται ηλεκτρικό ρεύμα που παράγει ηλεκτρομαγνητική δύναμη η οποία περιστρέφει το “τύμπανο” με τους μαγνήτες, το οποίο με τη σειρά του είναι σταθερά συνδεδεμένο με το όργανο. Πάνω στον ίδιο μηχανισμό είναι επίσης ομοαξονικά τοποθετημένος και ο δίσκος ανάγνωσης των γωνιών. Αντίστοιχα επιτυγχάνεται και η περιστροφή γύρω από τον δευτερεύοντα άξονα του οργάνου.

Βασικό πλεονέκτημα του συστήματος αυτού, αφενός είναι ότι η ίδια διάταξη μπορεί να επιταχύνει ή να επιβραδύνει γωνιακά την κίνηση του οργάνου χωρίς να γίνεται απαραίτητη η χρήση επιπλέον μηχανισμού επιβράδυνσης, γεγονός που συνεπάγεται απλούστερα μηχανικά μέρη, μικρότερο αναρτώμενο βάρος, και μειωμένη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, και αφετέρου, ότι η συγκεκριμένη τεχνολογία, έχει εν γένει την ικανότητα επίτευξης πολύ υψηλών γωνιακών ταχυτήτων, συγκρινόμενη με την κίνηση των κλασικών σερβομηχανισμών. [Lemmon, Jung, 2005]



Σχήμα 2.1 Η τεχνολογία MagDrive®

Η δεύτερη τεχνολογία εισήχθη και χρησιμοποιείται από τις εταιρείες Topcon και Leica Geosystems και η οποία βασίζεται στην χρήση

σερβομηχανισμών (servomotors), οι οποίοι είναι ηλεκτρικοί κινητήρες με δυνατότητα πλήρους ελέγχου της ταχύτητας και της γωνίας περιστροφής του άξονα τους. Οι μηχανισμοί αυτοί δεν είναι συνδεδεμένοι ομοαξονικά με τον πρωτεύοντα και δευτερεύοντα άξονα των οργάνων, αλλά συνδέονται με αυτούς μέσω ενός συστήματος μετάδοσης της κίνησης (gearbox).

Τα βασικότερα μειονεκτήματα τους σε σχέση με την τεχνολογία MagDrive®, είναι ότι με την προσθήκη επιπλέον μηχανικών μερών αυξάνεται το βάρος και η πολυπλοκότητα του συστήματος, ενώ απαιτείται μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας για την λειτουργία τους. Σημαντικό όμως πλεονέκτημα των σερβομηχανισμών είναι το χαμηλότερο κόστος τους λόγω της ευρείας χρήσης τους σε πληθώρα μηχανημάτων.

Η τρίτη τεχνολογία η οποία εισήχθη πρόσφατα από την εταιρεία Leica βασίζεται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει απειροελάχιστες μικροκινήσεις της τάξης των νανομέτρων στον οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα του γεωδαιτικού σταθμού με πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Επιπλέον έχει πολύ αθόρυβη κίνηση και αρκετά μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής (180°/sec) από τους μέχρι σήμερα αντίστοιχους γεωδαιτικούς σταθμούς (πίνακας 2.1). Τέλος μια καινοτομία αυτών των σταθμών όπως ο Leica TS30 μπορούν να περιστραφούν με επιλογή από τον χρήστη με 3 διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής [White paper, 2009].

Στον πίνακα 2.1 παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποιοι ρομποτικοί σταθμοί με τις αντίστοιχες ταχύτητες περιστροφής τους.

Γεωδαιτικός σταθμός	Μέγιστη ταχύτητα περιστροφής
Leica TS30	180°/sec
Trimble VX	115°/sec
Trimble S6	115°/sec
Topcon IS	85°/sec
Leica TPS-1200	45°/sec
Topcon GTP-8200	50°/sec

Πίνακας 2.1 Μέγιστες ταχύτητες περιστροφής

2.1.2 Αυτόματη αναγνώριση στόχου (ATR - Automatic Target Recognition)

Στηριζόμενοι οι κατασκευαστές των οργάνων στο χαρακτηριστικό της αυτόματης κίνησης του τηλεσκοπίου, το επόμενο βήμα αφορά στην δυνατότητα αναγνώρισης ενός γεωδαιτικού στόχου και στην παρακολούθηση του όσο είναι σε κίνηση. Όπως και στην παραπάνω

περίπτωση οι εταιρείες κατασκευής των οργάνων, έχουν αναπτύξει δύο διαφορετικές τεχνολογίες αυτόματης αναγνώρισης και παρακολούθησης στόχου, το σύστημα ενεργητικής αναγνώρισης στόχου και το σύστημα παθητικής αναγνώρισης στόχου.

Το σύστημα **ενεργητικής αναγνώρισης και παρακολούθησης στόχου** (Automatic Target Recognition-ATR) βασίζεται στην εκπομπή μιας αόρατης ακτίνας laser χαμηλής ισχύος από το όργανο, η οποία ανακλώμενη στο στόχο, επιστρέφει στο όργανο πάνω στον ίδιο άξονα εκπομπής της (ομοαξονικά). Κατόπιν, αφού διαχωριστεί από τις υπόλοιπες ακτίνες (ακτίνα EDM και ορατό φως), προσπίπτει σε μια διάταξη CCD (Charged Couple Device). Ανάλογα με τη θέση της προσπίπτουσας ακτίνας laser ως προς το κέντρο της διάταξης CCD, δίδεται εντολή στους σερβομηχανισμούς να εκτελέσουν μικροδιορθώσεις στις γωνιακές θέσεις του οργάνου (οριζόντια και κατακόρυφη γωνία), έως ότου η απόκλιση της προσπίπτουσας ακτίνας από τον σκοπευτικό άξονα δηλαδή από το κέντρο του σταυρονήματος, να μην ξεπερνά μια προκαθορισμένη τιμή.

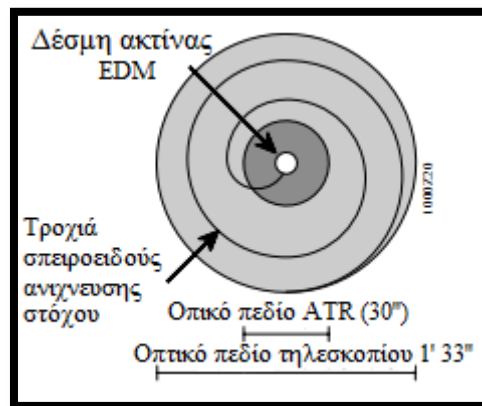
Πρακτικά για την έναρξη της λειτουργίας ATR, απαιτείται ο αρχικός εντοπισμός του στόχου από τον παρατηρητή. Αν ο ανακλαστήρας βρίσκεται στο 1/3 του οπτικού πεδίου του τηλεσκοπίου του γεωδαιτικού σταθμού, η αναγνώριση γίνεται αυτόματα και στιγμιαία. Σε διαφορετική περίπτωση το όργανο εκτελεί σπειροειδείς κινήσεις διάρκειας 2-4 δευτερολέπτων, απομακρυνόμενο από το κέντρο του άξονα σκόπευσης, έως ότου μπορέσει να λάβει την ανακλώμενη από τον στόχο ακτίνα (σχήμα 2.2). Εάν κάτι τέτοιο δεν καταστεί εφικτό, δηλαδή εάν ο στόχος είναι εκτός του πεδίου του τηλεσκοπίου, τότε η διαδικασία αναγνώρισης στόχου αποτυγχάνει. Η εμβέλεια λειτουργίας της διαδικασίας ATR εξαρτάται από τον γεωδαιτικό σταθμό, τον ανακλαστήρα, τις ατμοσφαιρικές συνθήκες και στη μέγιστη τιμή της φτάνει σήμερα περίπου τα 3000m.

Στην περίπτωση που η οριζόντια και η κατακόρυφη γωνιακή απόσταση του κέντρου του σταυρονήματος από το κέντρο του στόχου είναι μικρότερη από 50° , τότε το όργανο υπολογίζει τη διόρθωση και παράγει τις τιμές των διευθύνσεων διορθωμένες, χωρίς να βρίσκεται στο κέντρο του στόχου. Έτσι ενώ η μέτρηση λαμβάνεται έκκεντρα η καταγραφή της τιμής είναι η σωστή.

Η αβεβαιότητα με την οποία τοποθετείται το κέντρο του σταυρονήματος στο κέντρο του ανακλαστήρα κυμαίνεται από $\pm 2\text{mm}$ έως $\pm 5\text{mm}$ και εξαρτάται από:

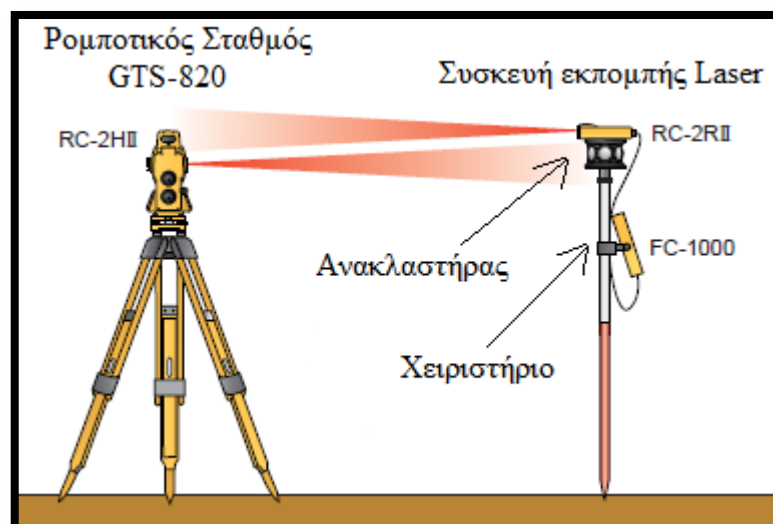
- την εσωτερική ακρίβεια του ATR, η οποία εξαρτάται κυρίως από την ποιότητα της διάταξης CCD που διαθέτει ο γεωδαιτικός σταθμός,
- την εξωτερική ακρίβεια του ATR, που είναι συνάρτηση του τύπου του

ανακλαστήρα και των ατμοσφαιρικών συνθηκών τη στιγμή της μέτρησης και της απόστασης του ανακλαστήρα από το γεωδαιτικό σταθμό [Λάμπρου Ε., Πανταζής Γ. ,2010].



Σχήμα 2.2 Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος σπειροειδούς ανίχνευσης στόχου Leica TCA-1800

Στην περίπτωση της **παθητικής αναγνώρισης** όπως συμβαίνει με το ρομποτικό σταθμό GTS-820 της εταιρείας Topcon (σχήμα 2.3), το όργανο λειτουργεί πλέον ως δέκτης μιας ακτινοβολίας που εκπέμπεται από τον στόχο (ενεργός στόχος) και όχι από το ίδιο το όργανο. Επίσης στα παθητικά συστήματα, η ακτίνα δεν εκπέμπεται ομοαξονικά με τον άξονα σκόπευσης, αλλά παρουσιάζει μια εκκεντρότητα ως προς αυτόν, με αποτέλεσμα να μην επιτρέπεται η λειτουργία του συστήματος σε δεύτερη θέση τηλεσκοπίου.



Σχήμα 2.3 Σύστημα εντοπισμού του RTS από τον ανακλαστήρα της εταιρείας Topcon (Topcon, 2005)

2.1.3 Κλείδωμα και παρακολούθηση κινούμενου στόχου - Auto Lock mode

Από τις πιο σημαντικές λειτουργίες των ρομποτικών σταθμών που τους κάνει να ξεχωρίζουν από τους απλούς ολοκληρωμένους γεωδαιτικούς σταθμούς είναι το κλείδωμα και η παρακολούθηση στόχου η οποία αποτελεί πραγματικό εργαλείο για τον Τοπογράφο Μηχανικό αφού έχει πολλές εφαρμογές.

Σε αυτή τη λειτουργία αφού ανιχνευτεί ο στόχος, πραγματοποιηθεί η πρώτη μέτρηση και αφού ενεργοποιηθεί στον σταθμό η κατάσταση παρακολούθησης στόχου τότε αυτό κλειδώνει τον στόχο και ανάλογα με τις δυνατότητες του ρομποτικού σταθμού μπορεί να συνεχίσει τη λήψη μετρήσεων ανά κάποιο χρονικό διάστημα ή ανά τακτή απόσταση. Κατά την λειτουργία παρακολούθησης στόχου (tracking), η διαδικασία αναγνώρισης στόχου (ATR), επαναλαμβάνεται με μορφή βρόγχου, ενώ για τον ακριβέστερο αναλυτικό υπολογισμό των μετρημένων στοιχείων, εμπλέκονται στη διαδικασία ειδικοί αλγόριθμοι παρεμβολής.

Όμως προηγείται ο καθορισμός της επιθυμητής αβεβαιότητας της κάθε μέτρησης που είναι συνάρτηση της ταχύτητας του στόχου. Αν ο στόχος κινείται πολύ γρήγορα ο σταθμός δεν λαμβάνει μέτρηση, εφόσον δεν καλύπτεται η επιθυμητή αβεβαιότητα. Συνεχίζει όμως να παρακολουθεί τον στόχο και να λαμβάνει μέτρηση όταν η ταχύτητα του και η επιθυμητή αβεβαιότητα γίνουν συμβατές.

Η λειτουργία της αυτόματης εύρεσης και παρακολούθησης στόχου, βρίσκει σήμερα εφαρμογή σε χαράξεις κυρίως τεχνικών έργων οδοποιίας, όπου με αυτόν τον τρόπο παρέχεται η δυνατότητα καθοδήγησης του μηχανήματος διάνοιξης μιας οδού [Λάμπρου Ε. και Πανταζής Γ., 2010].

2.1.4 Αυτόματα ελεγχόμενη λειτουργία (Robotic) μέσω ασύρματου τηλεχειριστηρίου

Με την προσθήκη του χαρακτηριστικού του ασύρματου τηλεχειρισμού του οργάνου σε πραγματικό χρόνο καθιστά τους γεωδαιτικούς αυτούς σταθμούς αυτόματα ελεγχόμενους από απόσταση (robotic).

Ο χειρισμός τους μπορεί να γίνεται για πεπερασμένη απόσταση (της τάξης των 800 m) μέσω ενός πληκτρολογίου αντίστοιχου με αυτό του γεωδαιτικού σταθμού ή και του ίδιου του πληκτρολογίου, το οποίο έχει τη δυνατότητα να αποσπάται από το όργανο και να τοποθετείται πάνω σε ειδικό στυλεό (εικόνα 2.1) μαζί με τον ανακλαστήρα.

Η επικοινωνία του πληκτρολογίου με το γεωδαιτικό σταθμό γίνεται ασύρματα μέσω ενός radio-modem, που είναι ενσωματωμένο στον γεωδαιτικό σταθμό. Έτσι οι μετρήσεις μπορούν να πραγματοποιούνται

από μόνο ένα άτομο. Το όργανο παρακολουθεί τον ανακλαστήρα που κινείται με τον στοχοφόρο. Λαμβάνοντας εντολή από αυτόν εκτελεί την μέτρηση αποθηκεύοντάς την αυτόματα στη μνήμη του. Με αυτόν τον τρόπο ο χρήστης μπορεί να εκτελέσει εργασίες όπως η χάραξη ή η αποτύπωση σημείων, από τη θέση του κατάφωτου. Ένα τυπικό τηλεχειριστήριο ρομποτικού οργάνου παρουσιάζεται στην εικόνα 2.1.



Εικόνα 2.1 Ασύρματο τηλεχειριστήριο Leica (Leica Geosystems)

2.1.5 Αμφιπρισματικός ανακλαστήρας 360°

Το χαρακτηριστικό αυτού του τύπου πρίσματος είναι ότι δεν είναι απαραίτητη η μετωπική στροφή του προς τον γεωδαιτικό σταθμό. Ένας αμφιπρισματικός ανακλαστήρας όπως της εικόνας 2.2, διαθέτει έξι πρίσματα τοποθετημένα ομοαξονικά σε ίσες γωνίες, με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι δυνατή η επιστροφή της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, στον γεωδαιτικό σταθμό ανεξάρτητα από την γωνία πρόσπτωσης [Λάμπρου Ε., Πανταζής Γ. ,2010].



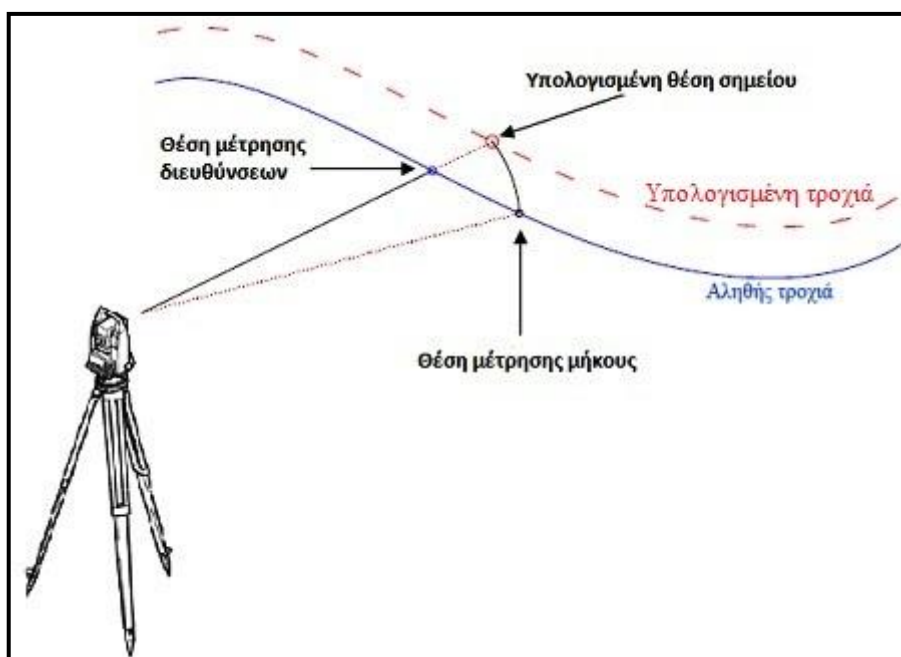
Εικόνα 2.2 Αμφιπρισματικός ανακλαστήρας Leica GRZ4 360° (Leica Geosystems)

2.2 Πηγές σφαλμάτων

Όλα τα είδη σφαλμάτων που παρουσιάζονται κατά τις μετρήσεις με έναν απλό γεωδαιτικό σταθμό (σφάλματα οριζοντίωσης, κέντρωσης, διάθλασης, κατάφωτου, καμπυλότητας της Γης, και λοιπά),

παρουσιάζονται και σε έναν ρομποτικό γεωδαιτικό σταθμό. Αυτά τα σφάλματα μέσω της μοντελοποίησης και των ειδικών τεχνικών μέτρησης μπορούν σε μεγάλο βαθμό να περιοριστούν.

Ωστόσο στους ρομποτικούς γεωδαιτικούς σταθμούς εισάγονται σφάλματα στις μετρήσεις, τα οποία προέρχονται από τη λειτουργία των μηχανισμών αυτοματοποίησης της λειτουργίας του οργάνου (σερβομηχανισμοί, σύστημα αυτόματης αναγνώρισης στόχου). Το κυριότερο σφάλμα που παρουσιάζεται σε αυτά τα όργανα είναι κατά την λειτουργία TRK (TRacKing) και RTRK (Rapid TRacKing) όταν ο στόχος βρίσκεται σε συνεχή κίνηση. Τότε παρουσιάζεται μια καθυστέρηση στην μέτρηση και καταγραφή του μήκους, σε σχέση με την γωνία. Η αιτία αυτού του φαινομένου στηρίζεται στο γεγονός ότι η τιμή της γωνίας καταγράφεται “ακαριαία” από τους δίσκους του οργάνου, ενώ η μέτρηση της απόστασης και η καταγραφή της τιμής του μήκους απαιτεί περισσότερο χρόνο. Το αποτέλεσμα αυτής της καθυστέρησης είναι να καταγράφεται λανθασμένο ζεύγος γωνίας-σημείου και να προκύπτει τελικώς λανθασμένη υπολογισμένη θέση για το μετρηθέν σημείο (σχήμα 2.4).



Σχήμα 2.4 Σφάλμα χρονικής διαφοράς καταγραφής γωνίας-απόστασης

Ένα άλλο είδος σφάλματος προκύπτει από την ακρίβεια ταύτισης του σταυρονήματος με το κέντρο του στόχου και εξαρτάται τόσο από τις δυνατότητες των σερβομηχανισμών, όσο και από την απόδοση των αλγορίθμων που συμβάλουν στην λειτουργία αυτή.

Τέλος σφάλματα και περιορισμοί στη λειτουργία του ρομποτικού συστήματος, παρουσιάζονται εξ' αιτίας:

- της παρεμβολής εμποδίων ανάμεσα στο όργανο και στον στόχο, με αποτέλεσμα την “απώλεια” του στόχου από το όργανο,
- της ηλεκτρονικής οριζοντίωσης και των εμπλεκόμενων αλγορίθμων,
- της εξασθένησης του σήματος παρακολούθησης του στόχου λόγω απόστασης.

2.3 Ο εικονογεωδαιτικός σταθμός TOPCON IS 01

Ο ρομποτικός σταθμός IS0 (εικόνα 2.3) είναι ένας εικονογεωδαιτικός ρομποτικός σταθμός. Αποτελεί μέρος της νέας σειράς Ρομποτικών Γεωδαιτικών Σταθμών της εταιρίας Topcon η οποία παρουσιάστηκε το 2008 και συνδυάζει τα πιο σύγχρονα τεχνολογικά χαρακτηριστικά της εποχής με εξελιγμένες δυνατότητες τηλεχειρισμού και σάρωσης. Τα υπόλοιπα όργανα που συμπληρώνουν την σειρά αυτή είναι οι Ρομποτικοί Γεωδαιτικοί Σταθμοί Imaging Station, {IS 03(9cc)} [Λάμπρου Ε., Πανταζής Γ. ,2010].



Εικόνα 2.3 Ο εικονογεωδαιτικός σταθμός IS 01 (Imaging Station) της εταιρείας Topcon

Το Topcon IS διαθέτει διπλή ψηφιακή κάμερα απεικόνισης, και διπλή έγχρωμη οθόνη αφής για την ευκολία χειρισμού του και από τις δύο πλευρές, και ενσωματώνει σε πραγματικό χρόνο εικόνες από το πεδίο με χωρικά δεδομένα. Αυτή η διπλή ψηφιακή κάμερα, 1.3Mp η καθεμία, καταγράφει την πραγματικότητα με ευρεία γωνία και οπτικό ζουμ 30x που εγγυάται την καλύτερη δυνατή ακρίβεια. Μέσω των οθονών αυτών επιτυγχάνεται η εύκολη περιήγηση στις επιλογές του γεωδαιτικού σταθμού, αλλά και η σκόπευση των σημείων μέσω ενός ηλεκτρονικού σταυρονήματος που εμφανίζεται πάνω σε αυτές. Το τηλεσκόπιο έχει μήκος 165mm, με αντικειμενικούς φακούς διαμέτρου 45mm. Αυτό σημαίνει ότι με βάση τον προσεγγιστικό τύπο (εξίσωση 2.1) $\delta^{\circ} = 37.5/d$ για την διακριτική ικανότητα του τηλεσκοπίου προκύπτει:

$$\delta^{cc} = 37.5 / d = 37.5 / 4.5 = 8.3^{cc} \quad (2.1)$$

Δηλαδή σε αποστάσεις των 10 m μπορούν να διακριθούν σημεία που απέχουν 0.1mm, ενώ για αποστάσεις των 60m μπορούν να διακριθούν σημεία που απέχουν 0.8mm.

Όταν χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με την ενσωματωμένη δυνατότητα σάρωσης, δημιουργείται ένα δυναμικό σύστημα το οποίο παρέχει την αυτοματοποίηση ενός light laser σαρωτή. Με τη λειτουργία αυτή ορίζεται ένα παράθυρο (ορθογώνιο παραλληλόγραμμο, πολύγωνο, κ.α.) και το όργανο σαρώνει αυτήν την περιοχή δημιουργώντας σύννεφο σημείων.

Η σάρωση μπορεί να γίνει με τρεις διαφορετικούς τρόπους:

- Σύμφωνα με γωνιακό βήμα μέτρησης των σημείων (επιλογή angle).
- Σύμφωνα με τον αριθμό των σημείων που θα μετρηθούν (επιλογή points).
- Σύμφωνα με την απόσταση των σημείων πάνω στο προς σάρωση αντικείμενο(επιλογή distances).

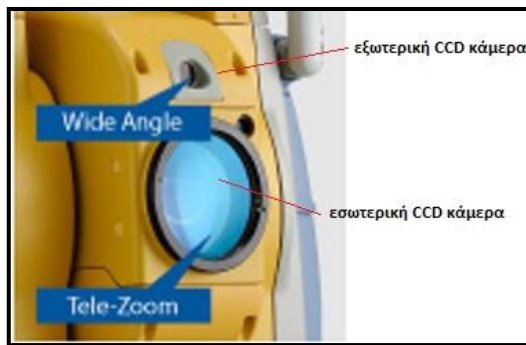
Επομένως το όργανο αυτό συνδυάζει την ρομποτική λειτουργία, την τρισδιάστατη σάρωση (3D), και τις νέες τεχνολογίες video σε ένα μικρό, εύελκτο και εύκολο στην χρήση γεωδαιτικό σταθμό.

Το λειτουργικό σύστημα του οργάνου είναι Microsoft Windows, γεγονός που καθιστά ικανή τη χρήση του ως ηλεκτρονικού υπολογιστή, καθώς και την εγκατάσταση οποιουδήποτε συμβατού προγράμματος στο λειτουργικό του σύστημα το οποίο βοηθά το χρήστη στην ταχύτερη και πιο αποδοτική ολοκλήρωση των εργασιών του.

Διαθέτει αντισταθμιστή εύρους 6' που υπάρχει και στους δύο άξονες με ακρίβεια διορθώσεων της τάξης του 1" (1mgon). Η εμβέλεια επικοινωνίας είναι 900m, ενώ η επικοινωνία μέσω του Bluetooth φτάνει μέχρι τα 5m. Το βασικότερο είναι ότι διαθέτει πολλές δυνατότητες αυτοελέγχου. Επίσης το IS Imaging Station παρέχει μέτρηση στην λειτουργία reflectorless μέχρι τα 2000m.

Ακόμη είναι δυνατή η ταυτόχρονη λήψη εικόνων για κάθε σημείο που μετράται, οι οποίες αποθηκεύονται ταυτόχρονα με τις μετρήσεις στον H/Y του σταθμού. Η επικοινωνία του σταθμού με H/Y ή άλλα περιφερειακά μπορεί να γίνει ενσύρματα (RS232, USB) ή ασύρματα μέσω Bluetooth.

Το IS έχει την δυνατότητα αυτόματης αναγνώρισης στόχου (ATR). Με αυτή τη λειτουργία του και τον κατάλληλο στόχο, το όργανο μπορεί να βρίσκει την ακριβή θέση του στόχου εφόσον του έχει οριστεί μια συγκεκριμένη περιοχή μέσα στην οποία βρίσκεται ο στόχος. Σε συνέχεια αυτής της λειτουργίας, μπορεί να ακολουθεί έναν κινούμενο στόχο ο οποίος κινείται με κάποια ορισμένη ταχύτητα.



Εικόνα 2.4 Οι θέσεις των δύο ενσωματωμένων CCD καμερών του IS

Η λειτουργία του ATR βασίζεται στην ύπαρξη μιας CCD κάμερας μέσα στο όργανο. Η συσκευή στέλνει μια ακτίνα laser και κατά την επιστροφή της ελέγχει κατά πόσο αποκλίνει από το κέντρο της κάμερας CCD, επιβάλλοντας τις ανάλογες διορθώσεις ή κινώντας τους σερβομηχανισμούς. Η ακρίβεια της λειτουργίας αυτής είναι 30', η ταχύτητα εντοπισμού του στόχου είναι 15°/sec, και η εμβέλεια εντοπισμού είναι 1000 m με το βασικό πρίσμα. Βέβαια η ακρίβεια του ATR εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις συνθήκες του περιβάλλοντος μέσα στο οποίο εκτελείται η εργασία αυτή, την απόσταση του στόχου, το είδος και την κατάσταση του στόχου.

Επίσης πολύ σημαντικό πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα πλοήγησης στο διαδίκτυο που παρέχει στον χρήστη μέσω κινητού τηλεφώνου. [<http://www.treecomp.gr>].

Όλα τα παραπάνω τεχνικά χαρακτηριστικά φαίνονται συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα 2.2:

TOPCON IS-01			
Μέθοδος μέτρησης γωνιών		Απόλυτη Ανάγνωση	
Ελάχιστη ανάγνωση		1'' / 5'' (0,2 / 1 ^{cc})	
Ακρίβεια		1'' (3 ^{cc})	
Αντισταθμιστής οριζοντίωσης		Δύο Αξόνων	
Εύρος αντισταθμιστή		±6''	
Μήκος		165mm	
Αντικειμενικός φακός		40mm	
Μεγέθυνση		30x	
Field of view		1°30'	
Διακριτική ικανότητα		3''	
Ελάχιστη εστίαση		1.5m	
Μέτρηση αποστάσεων			
Με πρίσμα Εμβέλεια 1/3/9 πρίσ/τα		3000m /4000m /5000m	
Ακρίβεια Fine	± 2mm±2ppm	Χρόνος μέτρησης	1.2sec
Ακρίβεια tracking	± 5mm±2ppm	Χρόνος μέτρησης	0.5sec
Χωρίς πρίσμα			
-Μικρές αποστάσεις	1.5m – 250m	±5mm m.s.e.	
-Μεγάλες αποστάσεις	5m – 2000m	±10mm±10ppm	
Ταχύτητα scanning	Έως 20Hz	±5mm m.s.e.	
Αυτόματος Εντοπισμός Στόχου (ATR)			
Ταχύτητα εντοπισμού ATR	15°/sec		
Εμβέλεια ATR	1000m (με το στάνταρ πρίσμα)		
Ταχύτητα παρακολούθησης	85° /sec		
Συχνότητα δειγματοληψίας	3-4Hz		
IMAGING			
Ψηφιακή φωτογραφική μηχανή	(2ccd) 1.3M pixel		
Ταχύτητα εικόνας	Έως 15fps		
Scanning	Μέγιστο 20 points /sec		
Λειτουργικό(OS)	Microsoft Windows CE NET 4.2		
Επεξεργαστής	Intel PXA255 400 MHz		
Οθόνη	2 Έγχρωμες οθόνες αφής		
Εμβέλεια επικοινωνίας	Έως 900m		
Στόχευση laser pointer	LD (ορατό Laser)		
Μνήμη	128 MB/RAM 2 MB Flash Rom 1 GB micro SD Card		

Πίνακας 2.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά του γεωδαιτικού σταθμού Topcon IS01

2.4 Ο χωροεικονογεωδαιτικός σταθμός Trimble

Ο γεωδαιτικός σταθμός απεικόνισης VX (εικόνα 2.5) της εταιρείας Trimble ενσωματώνει γεωδαιτικό σταθμό και ένα είδος τρισδιάστατου σαρωτή (light scanner) σε μία μονάδα. Διαθέτει:

- εξαιρετικής ποιότητας οπτικά συστήματα,
- δυνατότητα τρισδιάστατης σάρωσης,
- τεχνολογία ψηφιακής απεικόνισης.



Εικόνα 2.5 Ο χωροεικονογεωδαιτικός σταθμός VX της εταιρείας Trimble

Ο σταθμός Trimble VX συλλέγει δεδομένα με επίγεια μέθοδο, όπως ένας συμβατικός γεωδαιτικός σταθμός. Χρησιμοποιεί την τεχνολογία laser, για τη σάρωση του αντικειμένου, συλλέγοντας μεγάλο όγκο δεδομένων για την πιστή απόδοση αυτού. Επίσης διαθέτει ενσωματωμένη video camera για την απόδοση της πραγματικής υφής του αντικειμένου. Οι τρεις τεχνολογίες αυτές, γεωδαιτικός σταθμός, σαρωτής laser και ψηφιακή video camera, χρησιμοποιούνται παράλληλα και ελέγχονται από ένα και μόνο χειριστήριο. Το όργανο διαθέτει 1 MB μνήμη, γεγονός που επιτρέπει στον μηχανικό να πάρει μαζί του στο ύπαιθρο όλα τα βασικά στοιχεία που θα του χρειαστούν (κατάλογοι σημείων, χάρτες υποβάθρου).

Το τηλεσκόπιο έχει μήκος 165mm, με αντικειμενικούς φακούς διαμέτρου 45mm. Αυτό σημαίνει ότι με βάση τον προσεγγιστικό τύπο(εξίσωση 2.2) $\delta^{\text{cc}} = 37.5/d$ για την διακριτική ικανότητα του τηλεσκοπίου προκύπτει:

$$\delta^{\text{cc}} = 37.5 / d = 37.5 / 4.5 = 8.3^{\text{cc}} \quad (2.2)$$

Το λειτουργικό σύστημα του σταθμού είναι Microsoft Windows, γεγονός που καθιστά ικανή τη χρήση του ως ηλεκτρονικού υπολογιστή, καθώς και την εγκατάσταση οποιουδήποτε συμβατού προγράμματος στο λειτουργικό του σύστημα το οποίο βοηθά το χρήστη στην ταχύτερη και

πιο αποδοτική ολοκλήρωση των εργασιών του.

Ο VX της εταιρείας Trimble έχει ακόμα την δυνατότητα να εκτελεί και άλλα προγράμματα εργασιών όπως, οπισθοτομία, εμπροσθοτομία, χάραξη, σάρωση, αποτύπωση με laser. Μπορεί να συνδεθεί με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω θύρας USB ή ασύρματα μέσω τεχνολογίας Bluetooth. Επίσης έχει τη δυνατότητα να μπορεί να αποθηκεύσει τα μετρούμενα στοιχεία σε κάρτα μνήμης ή στον σκληρό δίσκο του. Οι κοχλίες μετακίνησης είναι ατέρμονοι και λειτουργούν ταυτόχρονα και για μικροκινήσεις.



Εικόνα 2.6 Το χειριστήριο TCU(Trimble Control Unit) του Trimble VX

Το χειριστήριο TCU έχει τα ακόλουθα κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά:

- Ενσωματώνει τεχνολογία επικοινωνίας Bluetooth και έγχρωμη οθόνη γραφικών TFT υψηλής ανάλυσης.
- Έχει εσωτερική μνήμη 256 Mb.
- Προσφέρεται με ενσωματωμένο το λογισμικό Trimble Survey Controller που επιτρέπει τον έλεγχο της λειτουργίας γεωδαιτικών σταθμών και συστημάτων GPS. Το λογισμικό αυτό είναι συμβατό και με γεωδαιτικούς σταθμούς άλλων εταιρειών.

Στα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου λογισμικού περιλαμβάνονται:

- Ο έλεγχος λειτουργίας συστημάτων GPS και γεωδαιτικών σταθμών.
- Η αποθήκευση ανεξάρτητων εργασιών καθώς και μεθόδων αποτύπωσης σύμφωνα με την επιθυμία του χειριστή.
- Η επιλογή του επιθυμητού συστήματος αναφοράς και προβολής.
- Η παρουσίαση χάρτη με όλα τα διαθέσιμα δεδομένα πεδίου και γραφείου.
- Η υποστήριξη προγραμμάτων υπολογισμού γεωμετρικών στοιχείων.
- Η εισαγωγή αρχείων από γνωστά CAD και GIS λογισμικά είτε ως γραφικό υπόβαθρο είτε ως ενεργό αρχείο δεδομένων.
- Η καταγραφή ιδιοτήτων στα στοιχεία που συλλέγονται και η επεξεργασία και απόδοση αυτών.

Όλα τα παραπάνω τεχνικά χαρακτηριστικά φαίνονται συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα 2.3 [<http://www.geotech.gr>]:

TRIMBLE VX			
Μέθοδος μέτρησης γωνιών		Απόλυτη Ανάγνωση	
Ακρίβεια διεύθυνσης		±1'' (3 ^{cc})	
Αντισταθμιστής οριζοντίωσης		Δύο Αξόνων	
Εύρος αντισταθμιστή		±6''	
Αντικειμενικός φακός		45mm (EDM 50mm)	
Μεγέθυνση		30x	
Field of view		1°30'	
Διακριτική ικανότητα		3''	
Ελάχιστη εστίαση		1.4m	
Μέτρηση αποστάσεων			
Εμβέλεια 1/3 πρίσματα		2500m /5500m	
Ακρίβεια	± (3mm±2ppm)	Χρόνος μέτρησης	1,2 sec
Ακρίβεια tracking	±(7mm±2ppm)	Χρόνος μέτρησης	0.4 sec
-Μικρές αποστάσεις		1.5– 300m	
Ακρίβεια		±3 mm+ 2p.p.m	
-Μεγάλες αποστάσεις		>300m	
Ακρίβεια		±10mm±2ppm	
Συχνότητα καταγραφής scanning		Έως 20Hz	
Τάξη laser E.D.M		Τάξη 1	
Αυτόματος Εντοπισμός Στόχου (ATR)			
Ταχύτητα εντοπισμού		15°/sec	
Εμβέλεια ATR		500-700 m (με το βασικό πρίσμα)	
Ταχύτητα παρακολούθησης		115° /sec	
Συχνότητα δειγματοληψίας		1Hz	
Ψηφιακή φωτογραφική μηχανή		Colour Digital Image Sensor 3 Mp	
Ανάλυση		2048x1536	
Ταχύτητα εικόνας		Έως 15 fps	
Scanning		Μέγιστο 20 points /sec	
Λειτουργικό(OS)		Microsoft Windows CE NET 4.2	
Επεξεργαστής			
Οθόνη		Έγχρωμη οθόνη τεχνολογίας αφής	
Εμβέλεια επικοινωνίας		Έως 900m	
Μνήμη		256Mb	

Πίνακας 2.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά του γεωδαιτικού σταθμού
Trimble VX [VX Datasheet, Trimble]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΤΟ ΠΕΔΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

3.1 Η υψηλή γέφυρα του Ευρίπου

Με στόχο την απομάκρυνση της υπεραστικής κυκλοφορίας της Χαλκίδας, που σήμερα αποτελεί το κατ' εξοχή πρόβλημα της πόλης, το Υπουργείο Δημοσίων Έργων μελέτησε την παράκαμψη της με νέο δρόμο που αρχίζει περίπου στο ύψος του τοπικού τσιμεντεργοστασίου, στη βοιωτική ακτή, γεφυρώνει τον θαλάσσιο διάυλο στη θέση Στενό και συνεχίζεται στην χερσόνησο Μπαταριά στην ευβοϊκή ακτή.

Το πρώτο και σημαντικότερο τμήμα του όλου έργου, που περιλαμβάνει την βοιωτική προσπέλαση και την υψηλή γέφυρα, ολοκληρώθηκε το 1993(εικόνα 3.1).



Εικόνα 3.1 Δορυφορική κάτοψη της Υψηλής Γέφυρας του Ευρίπου στη Χαλκίδα

Το εντυπωσιακότερο στοιχείο του δρόμου αποτελεί η υψηλή αυτή γέφυρα, που είναι η δεύτερη σημαντικότερη σ' όλη την Ελλάδα μετά

αυτής του Ρίου - Αντίρριου και ασφαλώς μία από τις πιο μεγάλες της Ευρώπης.

Το συνολικό της μήκος είναι 694.5m με κεντρικό άνοιγμα 215m και ελεύθερο ύψος 34.20m (ελεύθερο ύψος ναυσιπλοΐας) .

Η γέφυρα αποτελείται από τις γέφυρες προσβάσεως και το κεντρικό τμήμα. Τα στοιχεία του κεντρικού ανοίγματος επιτρέπουν τη διέλευση μεγάλων πλοίων που πλέουν προς και από Χαλκίδα. Η γέφυρα προβλέπεται καλωδιωτή στο κεντρικό και τα παράπλευρα προς αυτό ανοίγματα σε μήκος 395 m και συμβατική στο υπόλοιπο μήκος των 299.5 m.

Το κατάστρωμα της γέφυρας, που είναι κατασκευασμένο από σκυρόδεμα, αναρτάται με χαλύβδινα καλώδια κάθε 6m από δύο πυλώνες ύψους περίπου 90m πάνω από τη θάλασσα.

Οι γέφυρες προσβάσεως, μήκους 143m (Βοιωτία) και 156m (Εύβοια) αποτελούνται από προκατασκευασμένες προεντεταμένες δοκούς διατομής T(ταυ) και από επί τόπου σκυροδετηθείσα εγκάρσια προεντεταμένη πλάκα κυκλοφορίας. Η έδραση των δοκών γίνεται σε δίδυμα κιβωτοειδή βάθρα.

Σύμφωνα με την τεχνική περιγραφή της επιθεώρησης και συντήρησης της καλωδιωτής Γέφυρας του Ευρίπου οι δεσπόζουσες ιδιοπερίοδοι του συστήματος έχουν ως εξής [Τεχνική περιγραφή, 2009]:

- $T_1 = 2.84\text{sec}$, $f_1=0.35\text{Hz}$ (κατακόρυφη συμμετρική ταλάντωση καταστρώματος)
- $T_2 = 2.44\text{sec}$, $f_2=0.41\text{Hz}$ (κατακόρυφη αντισυμμετρική διέγερση καταστρώματος)
- $T_3 = 1.89\text{sec}$, $f_3=0.53\text{Hz}$ (εγκάρσια ταλάντωση)
- $T_4 = 1.66\text{sec}$, $f_4=0.60\text{Hz}$ (στρεπτική ταλάντωση καταστρώματος)

Η θεμελίωση των δύο πυλώνων του κεντρικού τμήματος έγινε με σύστημα φρεατοπασσάλων Φ120 σε βάθος περί των 27m στη βοιωτική ακτή και 15m στην ευβοϊκή ακτή.

3.1.1 Το γεωδαιτικό δίκτυο παρακολούθησης της γέφυρας

Λόγω της ιδιαίτερης τεχνικής και κυκλοφοριακής αξίας του έργου, το Υπουργείο Περιβάλλοντος Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων αποφάσισε τη συστηματική παρακολούθηση και συντήρησή του, με τελικό στόχο την αύξηση του ενεργού χρόνου ζωής του.

Στο πλαίσιο αυτό ιδρύθηκε γεωδαιτικό δίκτυο για τον επίγειο έλεγχο των μετακινήσεων της γέφυρας αποτελούμενο από οκτώ (8) κορυφές εγκατεστημένες επί μονίμων βάθρων. Τα βάθρα αυτά απέχουν από τον διαμήκη άξονα της γέφυρας απόσταση μικρότερη των 200m.

Η υλοποίηση των βάθρων έχει γίνει από οπλισμένο σκυρόδεμα (εικόνα 3.2), ύψους περίπου 1.10m, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του

ΠΔ 696/74 για τριγωνομετρικά σημεία. Στη στέψη κάθε βάθρου είναι πακτωμένη ορειχάλκινη πλακέτα εξαναγκασμένης κέντρωσης, έτσι ώστε να είναι δυνατή η απευθείας τοποθέτηση του τριχογλίου του γεωδαιτικού σταθμού (εικόνα 3.3)



Εικόνα 3.2 Υλοποιημένο βάθρο του δικτύου της Γέφυρας της Χαλκίδας.

Επίσης, στη στέψη του κάθε νέου βάθρου, είναι τοποθετημένος σε απόσταση περίπου 12cm από τον κοχλία κέντρωσης, ήλος ημισφαιρικής κεφαλής, έτσι ώστε η μέτρηση του ύψους οργάνου να γίνεται από ένα συγκεκριμένο σημείο.



Εικόνα 3.3 Ορειχάλκινη πλακέτα εξαναγκασμένης κέντρωσης πακτωμένη σε βάθρο

Για τη μελέτη των μετακινήσεων του συστήματος της Γέφυρας έγινε εγκατάσταση μόνιμων στόχων σε υποδειχθείσες θέσεις βάσει των προδιαγραφών της μελέτης για την επιθεώρηση της γέφυρας.

Στη γέφυρα εγκαταστάθηκαν 144 μόνιμοι στόχοι (στρογγυλά πρίσματα) οι οποίοι μετά από την τοποθέτηση ειδικού αντάπτορα στο σώμα της γέφυρας πακτώθηκαν με ρητίνη και στράφηκαν έτσι ώστε να

είναι κάθετοι στον σκοπευτικό άξονα του γεωδαιτικού σταθμού και είναι ορατοί μόνο από ένα συγκεκριμένο βάθρο. Η τοποθέτησή τους έγινε στα εξής σημεία :

- Καθ' ύψος των πυλώνων στις 2 ακμές της εξωτερικής επιφάνειάς τους (εικόνα 3.4). Στον μεν πυλώνα Μ5 τοποθετήθηκαν στις στάθμες +6.00, +22.65, +39.30 (στάθμη καταστρώματος), +59.35, +79.40 +88.71 (στέψη κεφαλής), στον δε πυλώνα Μ6 στις στάθμες +6.00, +20.60, +35.25 (στάθμη καταστρώματος), +55.30, +75.30, +84.62 (στέψη κεφαλής).



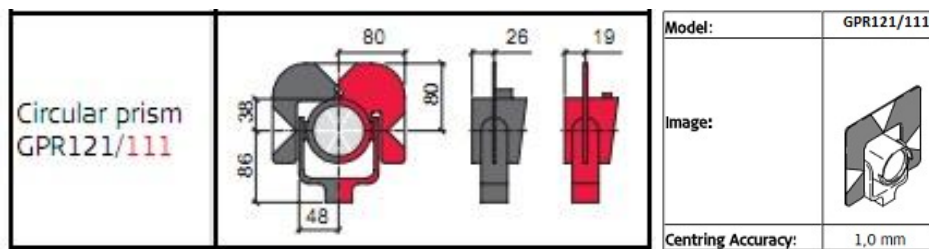
Εικόνα 3.4 Τοποθετημένα πρίσματα σε πυλώνα της γέφυρας

- Στο κατάστρωμα της κεντρικής γέφυρας και συγκεκριμένα στις αγκυρώσεις των αναρτήρων 1, 4, 7, 10, 13, 18, 21, 24, 27, 30, 33, 34, 37, 40, 43, 46, 49, 54, 57, 60, 63 και 66, τόσο στη βόρεια (N) παρυφή της γέφυρας όσο και στη νότια (S) και σε σταθερό ύψος 20 - 30cm από το πεζοδρόμιο.



Εικόνα 3.5 Πρίσματα τοποθετημένα στη κεφαλοδοκό μεσοβάθρου

- Στις γέφυρες προσβάσεως και συγκεκριμένα στον άξονα κάθε βάθρου και το μέσον κάθε ανοίγματος· έχει τοποθετηθεί ένα ζεύγος στόχων επί του αριστερού (N) και του δεξιού (S) πεζοδρομίου, σε σταθερό ύψος 20 - 30cm.
- Στα μεσόβαθρα των γεφυρών προσβάσεως και συγκεκριμένα 1 στη βάση τους και 2 στην κεφαλοδοκό (εικόνα 3.5).
- Στα ακρόβαθρα και συγκεκριμένα 2 στη βάση τους και 2 στη στάθμη έδρασης των δοκών.
Οι στόχοι που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ανακλαστήρας τύπου GPR111 (εικόνα 3.6) της εταιρείας Leica.



Εικόνα 3.6 Ανακλαστήρας τύπου GPR111 της εταιρείας Leica (Leica circular prism) (Leica Geosystems)

3.2 Η επιλογή των εφαρμογών

Προκειμένου να υλοποιηθεί το αντικείμενο της εργασίας όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 1.4 οργανώθηκαν οι παρακάτω πειραματικές μετρήσεις, κάθε μια από τις οποίες είχε ξεχωριστό στόχο και αντικείμενο μελέτης.

Πιο αναλυτικά:

1. Μέτρηση ταυτόχρονα δυο στόχων που βρίσκονται στο ψηλότερο σημείο δύο διαφορετικών πυλώνων της γέφυρας.
Σκοπός του συγκεκριμένου πειράματος ήταν η σύγκριση της συμπεριφοράς των δύο στόχων για την ίδια χρονική στιγμή καθώς και η μελέτη της απόκρισης των δύο πυλώνων.
2. Μέτρηση ενός στόχου, ο οποίος βρίσκεται στο ψηλότερο σημείο ενός πυλώνα, ταυτόχρονα από τα δύο όργανα.
Σκοπός του συγκεκριμένου πειράματος ήταν η σύγκριση των

αποτελεσμάτων των οργάνων για τον ίδιο στόχο υπό δύσκολες συνθήκες σκόπευσης και η μελέτη της απόκρισης του πυλώνα.

3. Μέτρηση δύο στόχων οι οποίοι βρίσκονται στον ίδιο πυλώνα αλλά σε διαφορετικό ύψος. Ο ένας στόχος βρίσκεται σε ψηλό σημείο ενός πυλώνα και ο άλλος στόχος στον ίδιο πυλώνα αλλά σε χαμηλότερο ύψος.

Σκοπός σε αυτό το πείραμα ήταν να βρεθεί τυχόν ύπαρξη διαφοράς του είδους ταλάντωσης που εκτελείται ξεχωριστά σε κάθε σημείο του ίδιου πυλώνα την ίδια στιγμή ανάλογα με το ύψος.

4. Μέτρηση ενός αμφιπρισματικού ανακλαστήρα που πακτώθηκε στο κιγκλίδωμα προστασίας των πεζών κατά μήκος της γέφυρας. Ο ανακλαστήρας μετρήθηκε και από τα δύο όργανα ταυτόχρονα.

Σκοπός να συγκριθούν οι παρατηρήσεις τους και να συμπεράνουμε σε ποιο βαθμό συγκλίνουν τα αποτελέσματα των δύο οργάνων για τον μετρούμενο στόχο.

Βασική προϋπόθεση όλων των πειραμάτων είναι η ταυτόχρονη μέτρηση. Έτσι σημαντικό ρόλο παίζει ο χρόνος που καταγράφουν οι δύο γεωδαιτικοί σταθμοί.

Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν οι σταθμοί IS και VX που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 2 (§2.3,2.4)

3.3 Προετοιμασία

Προκείμενου να χρησιμοποιηθούν οι ρομποτικοί γεωδαιτικοί σταθμοί στα παραπάνω πειράματα και να πληρούν τα κριτήρια της μεθοδολογίας των ταυτόχρονων μετρήσεων εκτελέστηκαν οι εξής διαδικασίες :

➤ *Εξοικείωση με την λειτουργία των δύο ρομποτικών σταθμών*

Στην προσπάθεια να διερευνηθούν οι λειτουργίες των γεωδαιτικών σταθμών και ιδιαίτερα αυτές που χρειάστηκαν για τις ανάγκες της εργασίας πραγματοποιήθηκαν πολλές εργαστηριακές μετρήσεις.

Οι λειτουργίες που εξετάστηκαν για κάθε όργανο ήταν

- ✓ *Η λειτουργία αναγνώρισης - κλειδώματος στόχου*
- ✓ *Η λειτουργία παρακολούθησης κινούμενου στόχου και ταυτόχρονης λήψης και καταγραφής μετρήσεων*

Οι λειτουργίες αυτές παρουσιάζονται στην επιλογή ContinuousTopo για το VX και στην επιλογή Autotopo για το IS.

Μια από τις διαφορές των δύο οργάνων όσον αφορά την παρακολούθηση στόχων είναι πως το IS έχει τη δυνατότητα να λαμβάνει 3 - 4 μετρήσεις το δευτερολέπτο, δηλαδή έχει συχνότητα καταγραφής ίση με 3-4Hz) ενώ το VX έχει τη δυνατότητα καταγραφής μιας μέτρησης το δευτερόλεπτο(συχνότητα καταγραφής 1Hz. Για να μην υπάρχει

ασυμφωνία στις καταγραφές των πειραμάτων αποφασίστηκε να μετρήσουν και τα δύο όργανα με συχνότητα 1 Hz.

➤ ***Συγχρονισμός των γεωδαιτικών σταθμών με τον παγκόσμιο χρόνο UTC (Coordinated Universal Time)***

Δεδομένου ότι η έρευνα όπως ορίστηκε έχει ως βασική παράμετρο τον χρόνο που γίνεται η κάθε καταγραφή και τη σύγκριση των μετρήσεων στον ίδιο χρόνο πρέπει οι σταθμοί να έχουν και να καταγράφουν τον ίδιο χρόνο, δηλαδή να είναι συγχρονισμένοι μεταξύ τους.

Ο συγχρονισμός θα μπορούσε να γίνει σε κάποιο τυχαίο χρόνο ή στον παγκόσμιο χρόνο UTC Time. Επιλέχτηκε ο συγχρονισμός να γίνει στον παγκόσμιο χρόνο UTC Time ως πιο ασφαλής διαδικασία.

Αρχικά συνδέθηκε ο υπολογιστής, με τον οποίο συγχρονίστηκαν οι δύο γεωδαιτικοί σταθμοί μέσω του προγράμματος NIST time με τον server www.nist.gov (Colorado) και συγχρονίστηκε το ρολόι του στον Παγκόσμιο Χρόνο UTC (Universal Coordinated Time). Ακολούθως συνδεθήκαν το μεν IS απευθείας με καλώδιο θύρας USB με τον H/Y, το δε VX συνδέθηκε μέσω του αποσπώμενου controller του επίσης με καλώδιο θύρας USB.

Στη συνέχεια μέσω του προγράμματος ActiveSynch της εταιρείας Microsoft το οποίο ήταν εγκατεστημένο στον H/Y συγχρονίστηκαν οι σταθμοί με τον παγκόσμιο χρόνο UTC.

Στη περίπτωση των εφαρμογών αυτής της εργασίας ο συγχρονισμός με τον παγκόσμιο χρόνο δεν είχε ιδιαίτερη σημασία αλλά θα είχε σημαντική χρησιμότητα αν απαιτείτο σύγκριση και με άλλα γεωδαιτικά (GPS) ή γεωτεχνικά όργανα που χρησιμοποιούν τον παγκόσμιο χρόνο.

Τέλος είναι σημαντικό να αναφερθεί πως με την πάροδο του χρόνου τα ρολόγια των οργάνων παρουσιάζουν σφάλμα δηλαδή υπολείπονται κάποιων δευτερόλεπτων(drift). Πρέπει να επισημανθεί ότι παρατηρήθηκε κατά την διαδικασία της εξοικείωσης πως τα όργανα έχαναν λιγότερο από 1 δευτερόλεπτο ανά ημέρα. Για τον λόγο αυτό ο συγχρονισμός των οργάνων έγινε στο γραφείο την ημέρα διεξαγωγής των πειραμάτων.

➤ ***Καθορισμός της μορφής (format) των αρχείων κατά τη μεταφορά τους από τους γεωδαιτικούς σταθμούς στον H/Y***

Προκειμένου να εξαχθούν από τα όργανα τα μετρούμενα μεγέθη τα οποία ήταν αναγκαία για τους μετέπειτα υπολογισμούς έπρεπε να καθοριστεί η μορφή των αρχείων των μετρήσεων, η οποία θα έπρεπε να είναι συγκεκριμένη ώστε να εξυπηρετεί τις ανάγκες του πειράματος.

Το πρόγραμμα με το οποίο έγινε η επεξεργασία των μετρήσεων του IS ήταν το Topcon Link της εταιρείας Topcon. Μέσω αυτού του

προγράμματος συντάχτηκε συγκεκριμένη φόρμα εξαγωγής στοιχείων η οποία συμπεριλάμβανε τον αύξοντα αριθμό κάθε σημείου, την κατακόρυφη γωνία, την οριζόντια γωνία, το κεκλιμένο μήκος και τον χρόνο με ακρίβεια δευτερολέπτου.

Για το VX η μεταφορά των μετρήσεων έγινε με το πρόγραμμα TGOOffice της εταιρείας Trimble. Και σε αυτό συντάχτηκε ειδική φόρμα (format) που να εξάγει από τον σταθμό τα συγκεκριμένα δεδομένα. Από τις δοκιμές που διεξήχθησαν διαπιστώθηκε το εξής:

Ενώ ο γεωδαιτικός σταθμός VX κατέγραφε τον χρόνο, στο συγκεκριμένο πρόγραμμα δεν υπήρχε η επιλογή για εξαγωγή της τιμής του χρόνου στα πρωτογενή δεδομένα. Για αυτόν τον λόγο χρησιμοποιήθηκε ειδικό αρχείο με την ονομασία Monitoring report. Αυτό το αρχείο επέτρεπε την εξαγωγή του χρόνου όμως το εξαγόμενο αρχείο ήταν σε μορφή html. Τα συγκεκριμένα αρχεία ενώ είναι επεξεργάσιμα μέσω του προγράμματος Excel της Microsoft έχουν πολύπλοκη μορφή (εικόνα 3.7) και χρειάστηκε αρκετή επεξεργασία μέχρι να αποκτηθεί η επιθυμητή δομή.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
39										
40	Point Name	1011	Point Code		Class	Measurement (Normal)				
41	North	? East			? Elevation					
42	Obs	Hz Angle	Vt Angle	Sl Dist	Delta HA	Delta VA	Delta N	Delta E	Delta Z	Time
43	F1	320.2131	78.7971	251.382						13:39:18
44										
45	Point Name	1012	Point Code		Class	Measurement (Normal)				
46	North	? East			? Elevation					
47	Obs	Hz Angle	Vt Angle	Sl Dist	Delta HA	Delta VA	Delta N	Delta E	Delta Z	Time
48	F1	320.2127	78.797	251.384						13:39:19
49										
50	Point Name	1013	Point Code		Class	Measurement (Normal)				
51	North	? East			? Elevation					
52	Obs	Hz Angle	Vt Angle	Sl Dist	Delta HA	Delta VA	Delta N	Delta E	Delta Z	Time
53	F1	320.2128	78.7967	251.382						13:39:20
54										
55	Point Name	1014	Point Code		Class	Measurement (Normal)				
56	North	? East			? Elevation					
57	Obs	Hz Angle	Vt Angle	Sl Dist	Delta HA	Delta VA	Delta N	Delta E	Delta Z	Time
58	F1	320.2129	78.7972	251.383						13:39:21
59										
60	Point Name	1015	Point Code		Class	Measurement (Normal)				
61	North	? East			? Elevation					
62	Obs	Hz Angle	Vt Angle	Sl Dist	Delta HA	Delta VA	Delta N	Delta E	Delta Z	Time

Εικόνα 3.7 Μορφή εξαγόμενου αρχείου καταγραφών από το VX μέσω του αρχείου Monitoring Report της εταιρείας Trimble

➤ **Τέλος, στο πλαίσιο της προετοιμασίας, στις 30 Δεκεμβρίου 2010 έγινε επίσκεψη στον χώρο του πεδίου εφαρμογής στην Χαλκίδα** ώστε να καταγραφεί η υπάρχουσα κατάσταση των βάθρων και των μόνιμων στόχων που ήταν ήδη εγκατεστημένοι από προηγούμενη εργασία.

Έγινε ένας σχεδιασμός για την οργάνωση των πειραμάτων στο ύπαιθρο ώστε να μην σπαταληθεί χρόνος την μέρα διεξαγωγής των πειραμάτων. Αφού επιλέχθησαν τα διάφορα σενάρια για τα πειράματα

διεξήχθη επί τόπου έλεγχος της κατάστασης των βάθρων καθώς και των μόνιμων στόχων. Αφού διαπιστώθηκε η αρτιότητα τους από τυχόν φυσιολογικές φθορές ή βανδαλισμούς έγινε έλεγχος των ορατοτήτων μεταξύ των βάθρων και μεταξύ των βάθρων-στόχων και διασφαλίστηκε ότι οι ορατότητες ήταν άριστες αφού η βλάστηση της περιοχής δεν είχε αλλάξει.

3.4 Μετρήσεις

Οι μετρήσεις εκτελέστηκαν την Τετάρτη 5 Ιανουαρίου του 2011. Επιλέχθηκε η συγκεκριμένη μέρα μετά από εξέταση των καιρικών συνθηκών από τους ιστότοπους <http://www.meteo.gr> και <http://poseidon.hcmr.gr>. Οι συγκεκριμένοι διαδικτυακοί τόποι ανέφεραν ηλιοφάνεια και κατά διαστήματα κάποιες νεφώσεις. Επίσης δεν προβλέπονταν ισχυροί άνεμοι στην ευρύτερη περιοχή της Χαλκίδας.

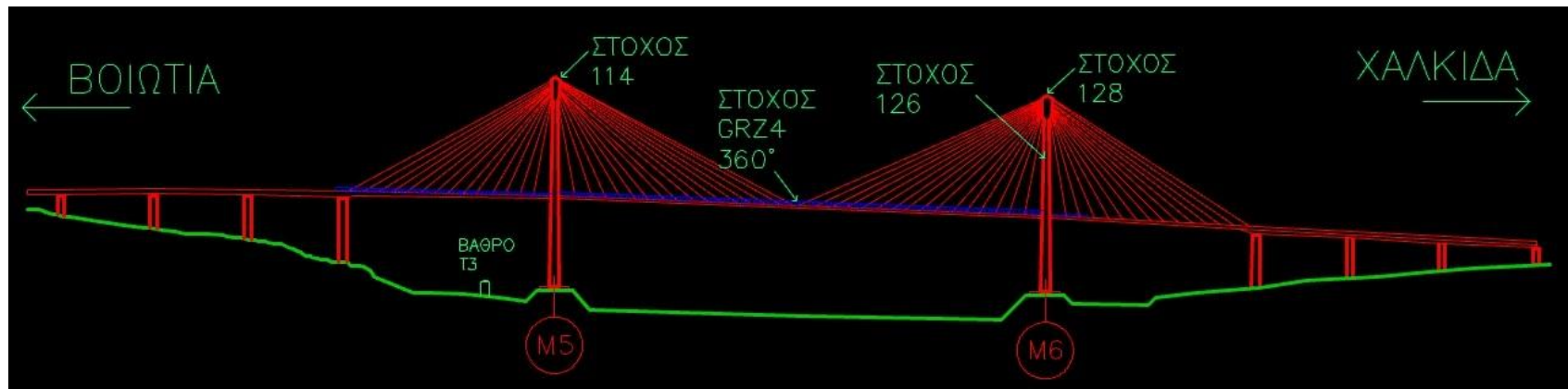
Αποφασίστηκε να μετρηθούν οι μόνιμοι στόχοι 114,128,126 και ένα σημείο στο μέσο του ανοίγματος του καταστρώματος με τον αμφιπρισματικό ανακλαστήρα GRZ4 της εταιρείας Leica (εικόνα 3.8).



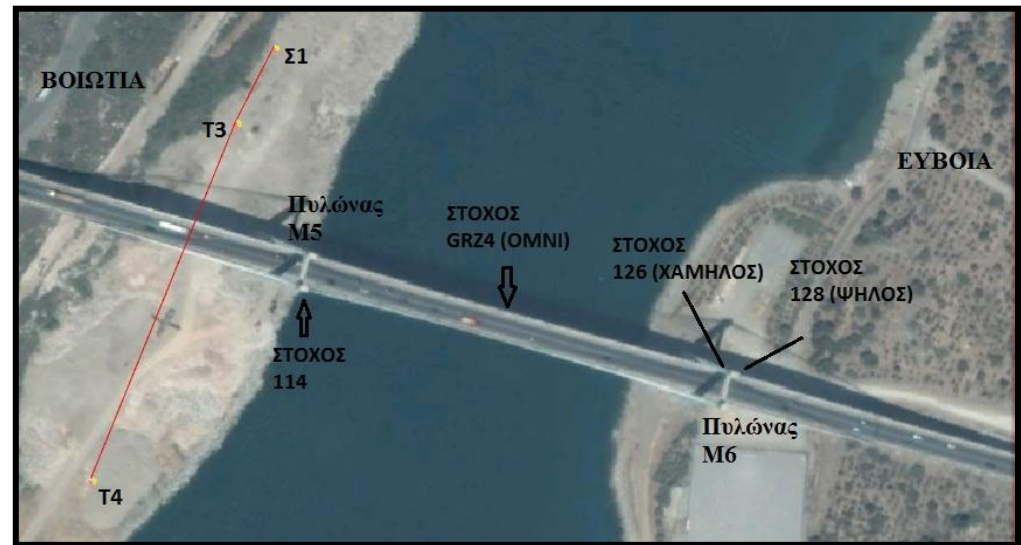
Εικόνα 3.8 Ο αμφιπρισματικός ανακλαστήρας GRZ4 360° της εταιρείας Leica

Οι συγκεκριμένοι στόχοι πληρούσαν όλα τα κριτήρια για την επίτευξη των πειραμάτων. Η θέση τους στη γέφυρα φαίνεται στην όψη και κάτοψη που παρατίθενται στα σχήματα 3.1 και 3.2. Η αρίθμηση των στόχων καθώς και των βάθρων προήλθε από προγενέστερη αποτύπωση η οποία είχε πραγματοποιηθεί για τις ανάγκες των εργασιών με σκοπό την επιθεώρηση της γέφυρας.

Τα βάθρα που χρησιμοποιήθηκαν από το υπάρχον τριγωνομετρικό δίκτυο της γέφυρας ήταν τα T3 και T4 των οποίων οι θέσεις φαίνονται στο σχήμα 3.3. Για την εκτέλεση όλων των προγραμματισμένων πειραμάτων κρίθηκε απαραίτητη η ίδρυση μιας στάσης, της Σ1 (εικόνα 3.9), γιατί όπως έχει προαναφερθεί στο υποκεφάλαιο 3.1.1 κάθε στόχος



Σχήμα 3.1 Όψη της γέφυρας με τη θέση των στόχων



Σχήμα 3.2 Κάτοψη της γέφυρας με τη θέση των στόχων

ήταν στραμμένος κάθετα σε ένα μόνο βάθρο του δικτύου της γέφυρας.

Η ίδρυση της Σ1 επέτρεψε να εκτελεστούν όσα πειράματα είχαν ως αντικείμενο την από κοινού και ταυτόχρονη σκόπευση του ίδιου στόχου από δύο όργανα.

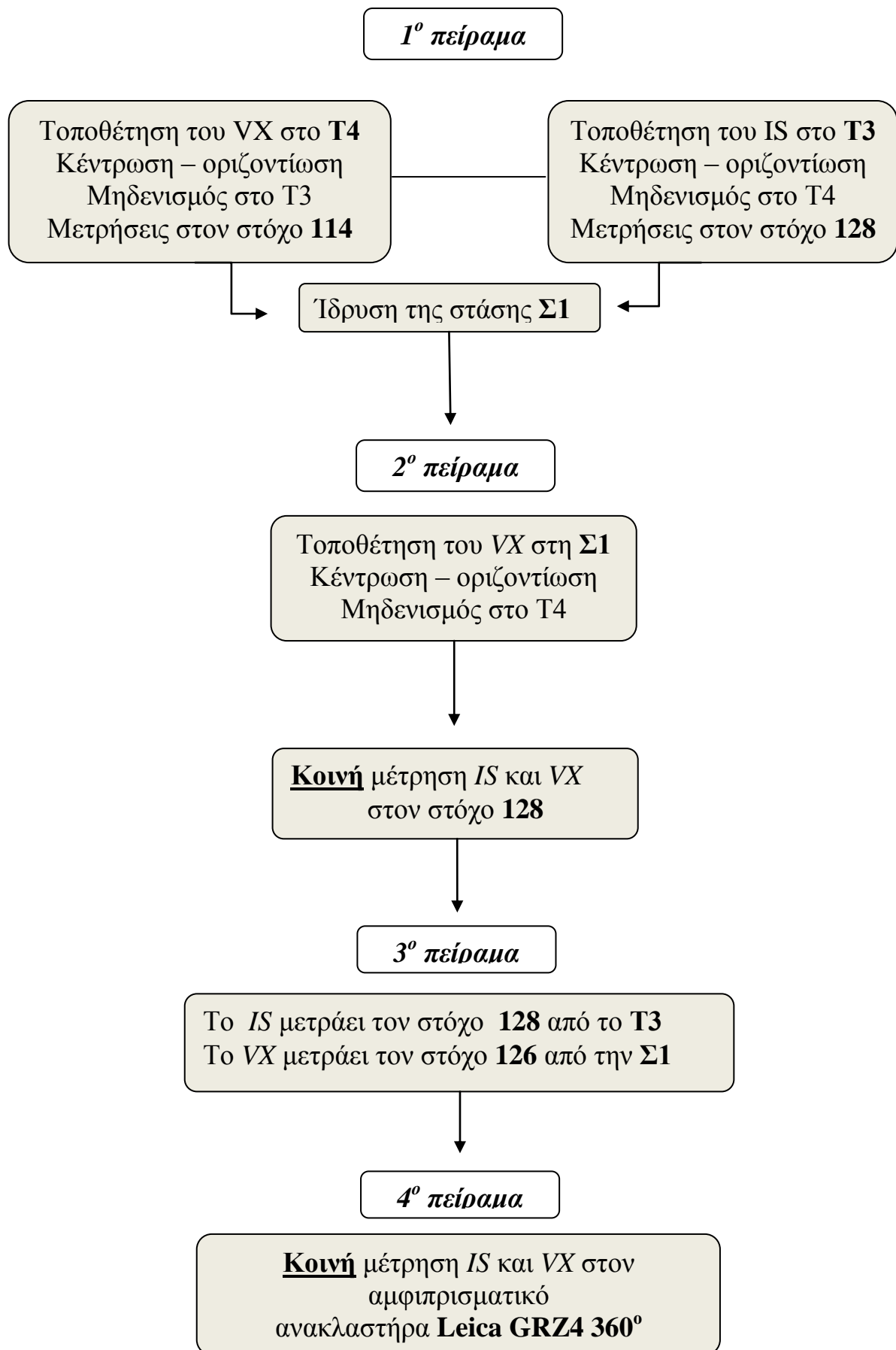


Σχήμα 3.3 Κάτοψη του τοπικού δικτύου που ιδρύθηκε για τις ανάγκες των πειραμάτων



Εικόνα 3.9 Η στάση Σ1 που ιδρύθηκε για τις ανάγκες των πειραμάτων

Στον πίνακα 3.1 φαίνεται η σειρά με την οποία διεξήχθησαν τα πειράματα, η στάση στην οποία ήταν τοποθετημένοι οι ρομποτικοί σταθμοί καθώς και ποιον στόχο σκόπευε ο καθένας τους. Επίσης αναφέρεται και ο χρόνος εκκίνησης και τερματισμού του κάθε πειράματος. Επιπλέον παρατίθεται και ένα διάγραμμα ροής στο οποίο περιγράφεται η εξέλιξη των πειραμάτων με την σειρά που διεξήχθησαν (σχήμα 3.4).



Σχήμα 3.4 Διάγραμμα ροής που περιγράφει την χρονική σειρά με την οποία πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα

Πείραμα	Σταθμός	Στάση	Στόχος	Διάρκεια πειράματος	
				Αρχή	Τέλος
1 ^ο	IS	T3	128	13:02:53	13:20:18
	VX	T4	114	13:03:21	13:20:02
2 ^ο	IS	T3	128	13:53:57	14:04:19
	VX	Σ1	128	13:53:39	14:03:35
3 ^ο	IS	T3	128	14:05:10	14:14:12
	VX	Σ1	126	14:05:16	14:13:51
4 ^ο	IS	T3	GRZ4	14:32:40	14:46:38
	VX	Σ1	GRZ4	14:32:48	14:46:44

Πίνακας 3.1 Διάρκεια εκτέλεσης του κάθε πειράματος

3.5 Προσδιορισμός συντεταγμένων και επεξεργασία

Οι πρωτογενείς μετρήσεις που κατέγραφαν τα όργανα ήταν η οριζόντια γωνία (β), η κατακόρυφη γωνία (z) καθώς και τα κεκλιμένα μήκη (D) σύμφωνα με την μέθοδο των πολικών συντεταγμένων. Όμως για την διευκόλυνση της περαιτέρω επεξεργασίας των μετρήσεων έπρεπε να γίνει η μετατροπή των μετρούμενων μεγεθών σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων(x,y,z).

Πρώτα ορίστηκαν αυθαίρετες συντεταγμένες στη κορυφή T3 με τιμές (500,500,10) καθώς και αυθαίρετη γωνία διεύθυνσης α_{T3T4} ίση με 150 grad. Έτσι μέσω των σχέσεων του 1^{ου}, 2^{ου} και 3^{ου} θεμελιώδους προβλήματος καθώς και της σχέσης της τριγωνομετρικής υψομετρίας προσδιορίστηκαν οι ορθογώνιες συντεταγμένες των κορυφών T4 και Σ1 (πίνακας 3.2).

Κορυφή	x (m)	y (m)	z (m)
T3	500	500	10
T4	633.427	366.573	9.440
Σ1	473.525	531.695	8.163

Πίνακας 3.2 Οι συντεταγμένες των κορυφών του τοπικού συστήματος αναφοράς των μετρήσεων

Ακολούθως προσδιορίστηκαν οι συντεταγμένες στο σύστημα αναφοράς των μετρήσεων όλων των χρονοσειρών.

Αφού προσδιορίστηκαν όλες τις χρονοσειρές στο σύστημα των μετρήσεων έπρεπε να μετασχηματισθούν ώστε να συσχετιστούν με το σύστημα της γέφυρας και να είναι δυνατή η εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων για την συμπεριφορά της γέφυρας.

Για να είναι άμεσα αντιληπτά τα αποτελέσματα κρίθηκε σκόπιμο να

γίνει στροφή των συντεταγμένων σε ένα σύστημα αναφοράς όπου ο άξονας των x θα ταυτίζεται με τον κατά μήκος άξονα της γέφυρας ο άξονας των y με τον εγκάρσιο άξονα ενώ ο άξονας των z με τον κατακόρυφο άξονα.

Τα τελικά αποτελέσματα της διαδικασίας του μετασχηματισμού ήταν να αναχθούν οι χρονοσειρές και των δύο οργάνων σε ένα σύστημα αναφοράς έτσι ώστε :

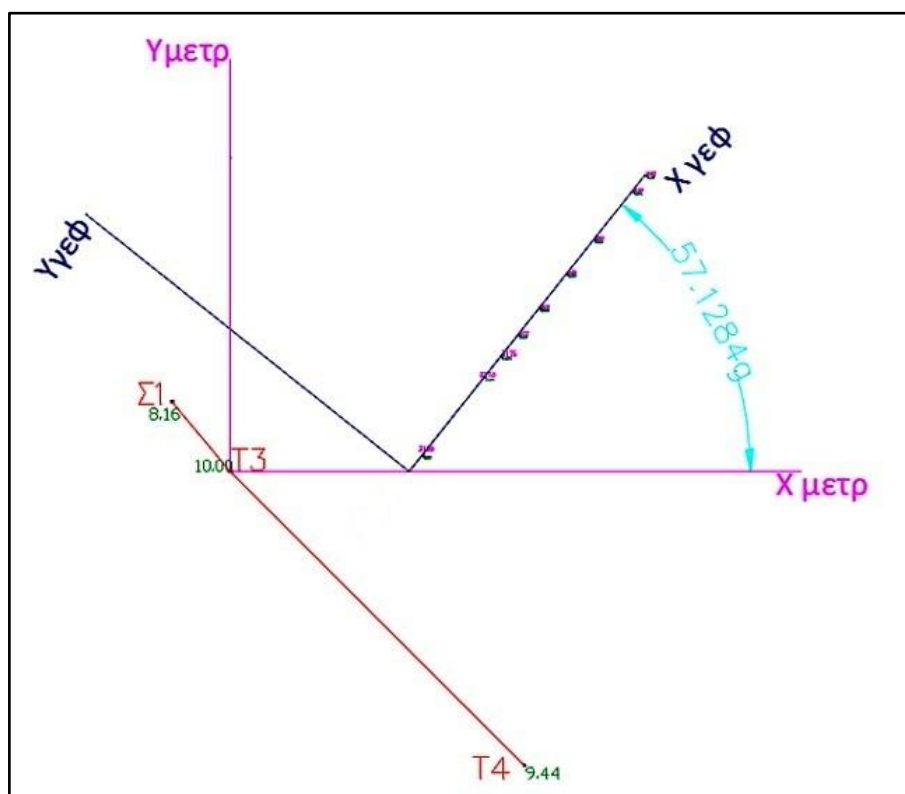
- Ο άξονας των x να συμπίπτει με τον κατά μήκος άξονα της γέφυρας
- Ο άξονας των y να συμπίπτει με τον εγκάρσιο άξονα της γέφυρας
- Ο άξονας των z να συμπίπτει με τον κατακόρυφο άξονα της γέφυρας

Αυτό είχε ως αποτέλεσμα οι μετρήσεις των δύο ρομποτικών γεωδαιτικών σταθμών να αναφέρονται σε μεταβολές συντεταγμένων σε σχέση με τους άξονες της γέφυρας.

Αυτό επετεύχθη με την στροφή των συντεταγμένων από το σύστημα των μετρήσεων στο σύστημα της γέφυρας μέσω των σχέσεων 3.1 και 3.2 για τη στροφή αξόνων.

$$\mathbf{x}^{\text{II}}_A = x^{\text{I}}_A \cdot \cos\varphi - y^{\text{I}}_A \cdot \sin\varphi \quad (3.1)$$

$$\mathbf{y}^{\text{II}}_A = y^{\text{I}}_A \cdot \cos\varphi + x^{\text{I}}_A \cdot \sin\varphi \quad (3.2)$$



Σχήμα 3.5 Η σχέση των δύο συστημάτων αναφοράς καθώς και η γωνία στροφής

Στο σχήμα 3.5 απεικονίζεται η σχέση των δύο συστημάτων αναφοράς.

Με χρώμα magenta εμφανίζεται το σύστημα αναφοράς των μετρήσεων και με σκούρο μπλε χρώμα το σύστημα της γέφυρας.

Θα πρέπει να αναφερθεί πως η γωνία διεύθυνσης του κατά μήκος άξονα της γέφυρας προέκυψε μετά από τη μέτρηση 12 σημείων τα οποία είχαν αποτυπωθεί την ημέρα διεξαγωγής των μετρήσεων. Τα σημεία αυτά βρίσκονται στο κατάστρωμα στη βόρεια όψη της γέφυρας. Η γωνία στροφής υπολογίστηκε γραφικά μέσω σχεδιαστικού προγράμματος εφόσον η απόκλιση μεταξύ των μετρούμενων σημείων δεν ξεπερνούσε τα 5mm, οπότε δεν χρειάστηκε να υπολογιστεί η βέλτιστη ευθεία με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.

3.5.1 Υπολογισμός των μεταβολών και των αβεβαιοτήτων για κάθε μεταβλητή

Το επόμενο βήμα επεξεργασίας των χρονοσειρών ήταν η εύρεση της μεταβολής (δx_i , δy_i , δz_i) για κάθε μεταβλητή (x_i , y_i , z_i) όλων των μετρήσεων των δύο οργάνων σε κάθε πείραμα.

Πρώτα έγινε η ταύτιση των χρονοσειρών των δυο γεωδαιτικών σταθμών αφού δεν συνέπιπταν ακριβώς χρονικά η αρχή και το τέλος του κάθε πειράματος.

Κατόπιν αφαιρέθηκε από την χρονοσειρά κάθε μεταβλητής (x_i, y_i, z_i) η πρώτη μέτρηση (x_o, y_o, z_o) ώστε να υπολογιστεί η μεταβολή τους σε κάθε χρονική στιγμή.

$$\delta x_i = x_i - x_o \quad (3.3)$$

$$\delta y_i = y_i - y_o \quad (3.4)$$

$$\delta z_i = z_i - z_o \quad (3.5)$$

Υπολογίστηκαν επίσης οι αβεβαιότητες των συντεταγμένων (x_i, y_i, z_i) μέσω των σχέσεων αβεβαιότητας προσδιορισμού των συντεταγμένων (εξίσωση 3.6, 3.7, 3.8) :

$$\sigma_{x_i} = \sqrt{\sigma_{x_{\Sigma}}^2 + (\sin z_{\Sigma_i} \cdot \sin \alpha_{\Sigma_i})^2 \cdot \sigma_D^2 + (D_{\Sigma_i} \cdot \cos z_{\Sigma_i} \cdot \sin \alpha_{\Sigma_i})^2 \cdot \left(\frac{\sigma_z}{\rho_{cc}}\right)^2 + \sqrt{(D_{\Sigma_i} \cdot \sin z_{\Sigma_i} \cdot \cos \alpha_{\Sigma_i})^2 \cdot \left(\frac{\sigma_{\alpha_{\Sigma_i}}}{\rho_{cc}}\right)^2}} \quad (3.6)$$

$$\sigma_{y_i} = \sqrt{\sigma_{y_\Sigma}^2 + (\sin z_{\Sigma_i} \cdot \cos \alpha_{\Sigma_i})^2 \cdot \sigma_D^2 + (D_{\Sigma_i} \cdot \cos z_{\Sigma_i} \cdot \sin \alpha_{\Sigma_i})^2 \cdot \left(\frac{\sigma_z}{\rho^{cc}}\right)^2 + \sqrt{+(D_{\Sigma_i} \cdot \sin z_{\Sigma_i} \cdot \sin \alpha_{\Sigma_i})^2 \cdot \left(\frac{\sigma_{\alpha_{\Sigma_i}}}{\rho^{cc}}\right)^2}} \quad (3.7)$$

$$\sigma_{H_i} = \sqrt{\sigma_{H_\Sigma}^2 + \left[\cos z_{\Sigma_i} + (1 - K) \cdot \frac{D_{\Sigma_i}}{2 \cdot R} \cdot \sin^2 z_{\Sigma_i}\right]^2 \cdot \sigma_D^2 + \sqrt{+(D_{\Sigma_i} \cdot \sin z_{\Sigma_i} + \sin 2z_{\Sigma_i} \cdot (1 - K) \cdot \frac{D_{\Sigma_i}^2}{2 \cdot R})^2 \cdot \left(\frac{\sigma_z}{\rho^{cc}}\right)^2 + 2 \cdot \sigma_{Y.0}^2}} \quad (3.8)$$

όπου :

- σ_D = το σφάλμα μέτρησης του μήκους από τον γεωδαιτικό σταθμό
- σ_z, σ_δ = το σφάλμα μέτρησης διευθύνσεων οριζόντιων και κατακόρυφων από τον γεωδαιτικό σταθμό
- $\sigma_{\alpha_{\Sigma_i}}$ = το σφάλμα της γωνίας διεύθυνσης στάσης οργάνου-Σημείου i
- $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ = το σφάλμα των συντεταγμένων x,y,H της στάσης Σ του πολυγωνομετρικού δικτύου
- $\sigma_{Y0} = \sigma_{Y\Sigma}$ = το σφάλμα στη μέτρηση του ύψους οργάνου και του ύψους σκόπευσης [Λάμπρου Ε., 2010]

Στον πίνακα 3.3 παρουσιάζονται οι αβεβαιότητες των δύο οργάνων ενώ στον πίνακα 3.4 αναγράφονται οι τιμές των σφαλμάτων για κάθε μια μεταβλητή, για κάθε πείραμα και για κάθε γεωδαιτικό σταθμό ξεχωριστά.

Σφάλματα	IS	VX
σ_D	5mm+2ppm	7mm+2ppm
σ_z, σ_δ	3 ^{cc}	3 ^{cc}
$\sigma_{\alpha_{\Sigma_i}}$	3 ^{cc}	3 ^{cc}
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	0	0
$\sigma_{Y0} = \sigma_{Y\Sigma}$	0	0

Πίνακας 3.3 Οι τιμές των σφαλμάτων για κάθε γεωδαιτικό σταθμό

Τα σφάλματα $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma_{Y0}, \sigma_{Y\Sigma}$ θεωρήθηκαν μηδενικά στους υπολογισμούς γιατί αυτό που ενδιέφερε ήταν οι αβεβαιότητες των συντεταγμένων οι οποίες οφείλονταν στα σφάλματα των γεωδαιτικών σταθμών για τα μετρούμενα μεγέθη (μήκη και γωνίες).

Επιπλέον επειδή στην εργασία αυτή εξετάστηκαν οι μεταβολές των συντεταγμένων, αφενός τα σφάλματα αυτά εξαλείφονταν και αφετέρου δεν είχαν κάποιο ουσιαστικό ρόλο οι απόλυτες συντεταγμένες των στόχων στην ανάλυση των χρονοσειρών.

Θα πρέπει στο σημείο αυτό να επισημανθεί πως έγινε η παραδοχή ότι η πρώτη μέτρηση (x_0, y_0, z_0) η οποία αφαιρέθηκε από τις υπόλοιπες μετρήσεις σε κάθε πείραμα θεωρήθηκε χωρίς σφάλμα.

Πείραμα	IS			VX		
	σ_x (mm)	σ_y (mm)	σ_z (mm)	σ_x (mm)	σ_y (mm)	σ_z (mm)
1 ^ο	±5	±4.5	±4.4	±6.5	±6	±6
2 ^ο	±5	±4.5	±4.4	±7	±6	±6
3 ^ο	±5	±4.5	±4.4	±7	±6	±5
4 ^ο	±5	±4	±3.9	±7	±6	±5

Πίνακας 3.4 Οι τιμές των αβεβαιοτήτων κάθε μεταβλητής σε κάθε πείραμα για κάθε γεωδαιτικό σταθμό

Στα γραφήματα των χρονοσειρών εισήχθησαν οι τιμές των σφαλμάτων οι οποίες παρουσιάζονται στον πίνακα 3.4 και από όπου διαπιστώνεται ότι η τιμή της αβεβαιότητας των συντεταγμένων είναι της τάξης των ±5mm.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΝΑΛΥΣΗ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΩΝ

4.1 Ανάλυση χρονοσειρών 1^{ου} πειράματος

Στο πρώτο πείραμα έγινε μέτρηση δύο διαφορετικών στόχων, των 128 και 114, που είναι τοποθετημένοι στο ψηλότερο σημείο των δύο πυλώνων M5 και M6 αντίστοιχα. Ο στόχος 128 βρίσκεται στη βόρεια πλευρά του πυλώνα M6 ενώ ο 114 είναι τοποθετημένος στη νότια πλευρά του πυλώνα M5.

Σκοπός του συγκεκριμένου πειράματος ήταν η σύγκριση της συμπεριφοράς των δύο στόχων για την ίδια χρονική στιγμή καθώς και η μελέτη της απόκρισης των δύο πυλώνων.

Στα σχήματα 4.1, 4.2, 4.3 παρουσιάζονται οι χρονοσειρές της κατά μήκους, της εγκάρσιας και της κατακόρυφης ταλάντωσης των δύο στόχων.

Από τις χρονοσειρές της διαμήκους ταλάντωσης των στόχων δεν είναι δυνατό να διαπιστωθεί αν υπάρχει μετακίνηση, αφού οι μεταβολές που φαίνονται στα διαγράμματα (σχήμα 4.1) πλην κάποιων πολύ σποραδικών ακραίων τιμών (κυρίως στις χρονοσειρές του IS) βρίσκονται εντός της αβεβαιότητας των μετρήσεων. Είναι προφανές ότι οι αναρτήσεις που συγκρατούν το κατάστρωμα και είναι πακτωμένοι συμμετρικά εκατέρωθεν από τους πυλώνες δεν επιτρέπουν μεγάλες ταλαντώσεις στον διαμήκη άξονα.

Όσον αφορά την εγκάρσια ταλάντωση των στόχων διαπιστώνεται από τα αντίστοιχα διαγράμματα (σχήμα 4.2) ότι και τα δύο σημεία των πυλώνων εκτελούν κάποιου είδους ταλάντωση αφού υπάρχουν πολλές τιμές οι οποίες είναι εκτός του θορύβου. Διακρίνονται μετατοπίσεις της τάξης των 2-3 cm. Αυτό ήταν αναμενόμενο αφού οι πυλώνες έχουν πολύ μεγαλύτερη ελευθερία στο να μετακινηθούν κατά την εγκάρσια διεύθυνση. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της δύναμης που ασκείται από τα διερχόμενα αυτοκίνητα στο κατάστρωμα, το οποίο συγκρατείται από τους αναρτήρες, και οι οποίοι με τη σειρά τους μεταφέρουν το φορτίο στους πυλώνες στους οποίους είναι πακτωμένοι.

Παρατηρώντας τις χρονοσειρές της υψομετρικής μεταβολής και των δύο οργάνων (σχήμα 4.3) διαπιστώνεται πως βρίσκονται μέσα στα όρια του θορύβου των μετρήσεων. Εξάλλου δεν αναμενόταν ταλάντωση των πυλώνων κατά τον κατακόρυφο άξονα αφού είναι πακτωμένοι στο υπέδαφος και οι ανοχές για κατακόρυφη ταλάντωση είναι πολύ μικρές.

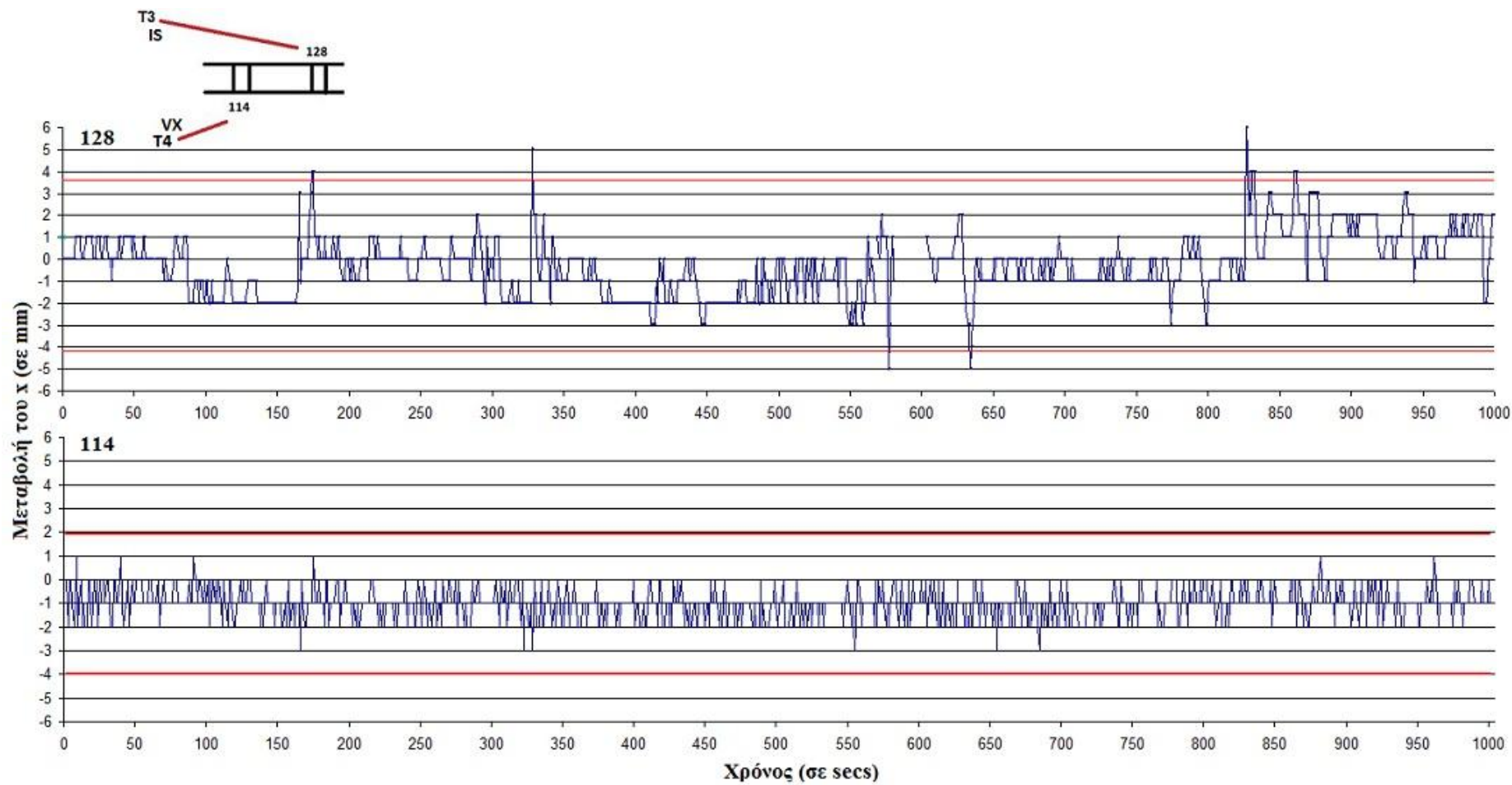
Στον πίνακα 4.1 παρατίθενται οι ακραίες τιμές της μεταβολής της θέσης των στόχων με χρονική αντιπαραβολή. Διαπιστώνεται πως οι

κορυφές (peaks) των χρονοσειρών στα γραφήματα βρίσκονται σχεδόν πάντα αντισυμμετρικά την ίδια περίπου χρονική στιγμή με μια απόκλιση της τάξης των 2-3 δευτερολέπτων.

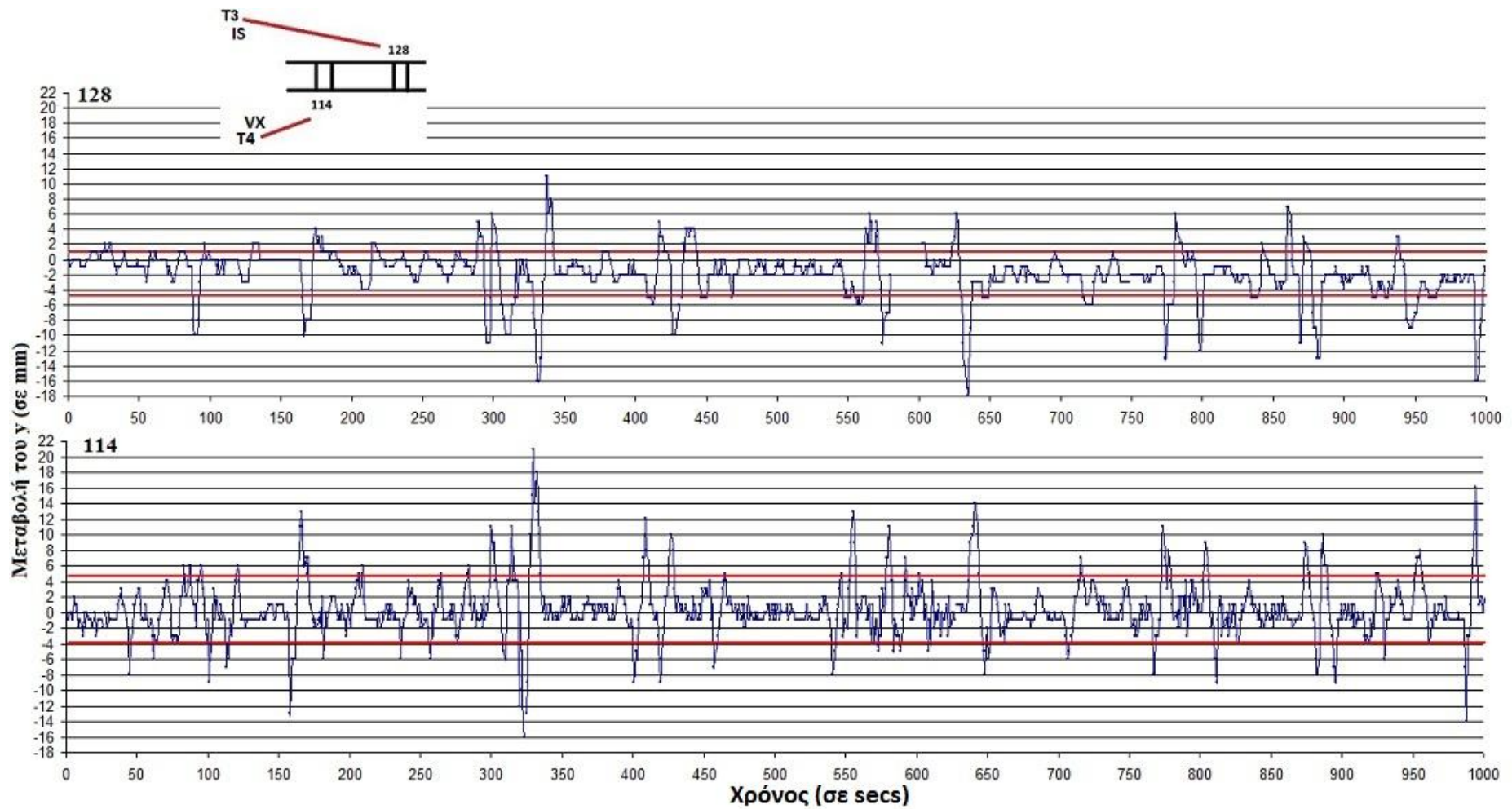
A/A ακραίων τιμών	Χρόνος (sec)	Μετακίνηση στόχου 128 (mm)	Χρόνος (sec)	Μετακίνηση στόχου 114 (mm)
1	83	-12	90	10
2	88	-12	91	10
3	166	-10	166	13
4	209	-6	209	6
5	244	-3	242	4
6	268	-3	265	5
7	297	-11	300	11
8	311	-10	314	10
9	332	-16	330	21
10	413	-6	408	12
11	426	-10	427	10
12	553	-5	555	5
13	574	-11	581	11
14	634	-18	642	14
15	719	-6	716	7
16	773	-13	773	11
17	779	-6	778	8
18	799	-12	803	9
19	835	-5	835	5
20	870	-11	873	9
21	883	-13	886	10
22	923	-5	926	5
23	948	-8	955	8
24	993	-16	993	16

Πίνακας 4.1 Πίνακας ακραίων τιμών για το 1ο πείραμα των στόχων 128 και 114 για τον εγκάρσιο άξονα της γέφυρας (κατά y)

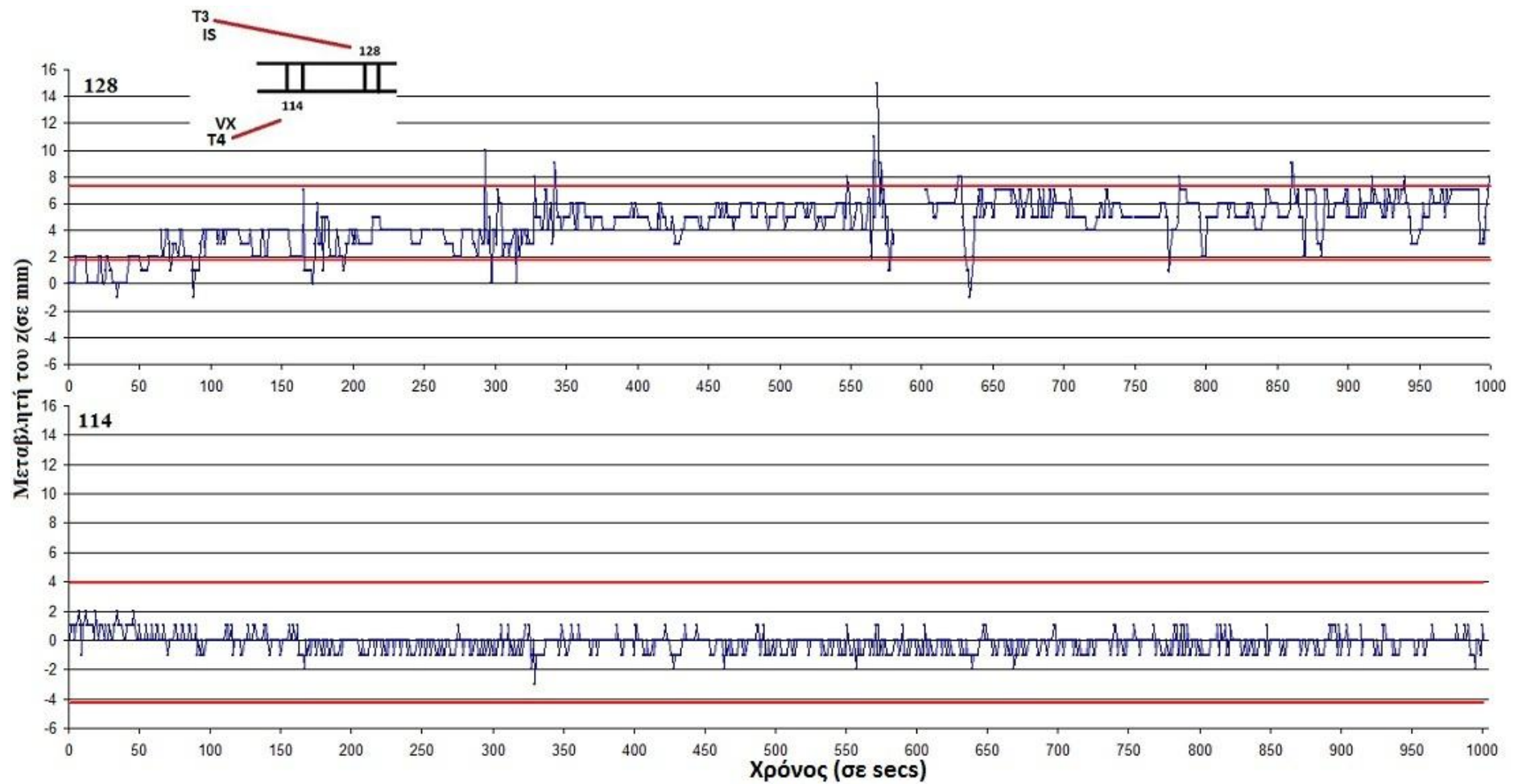
Είναι σημαντικό να επισημανθεί πως σε όλα τα διαγράμματα των μεταβολών των μεταβλητών συναρτήσεως του χρόνου έχουν χαραχθεί με κόκκινο χρώμα οι ζώνες αβεβαιότητας του προσδιορισμού των συντεταγμένων για που απεικονίζονται για κάθε πείραμα και για κάθε γεωδαιτικό σταθμό στον πίνακα 3.4.



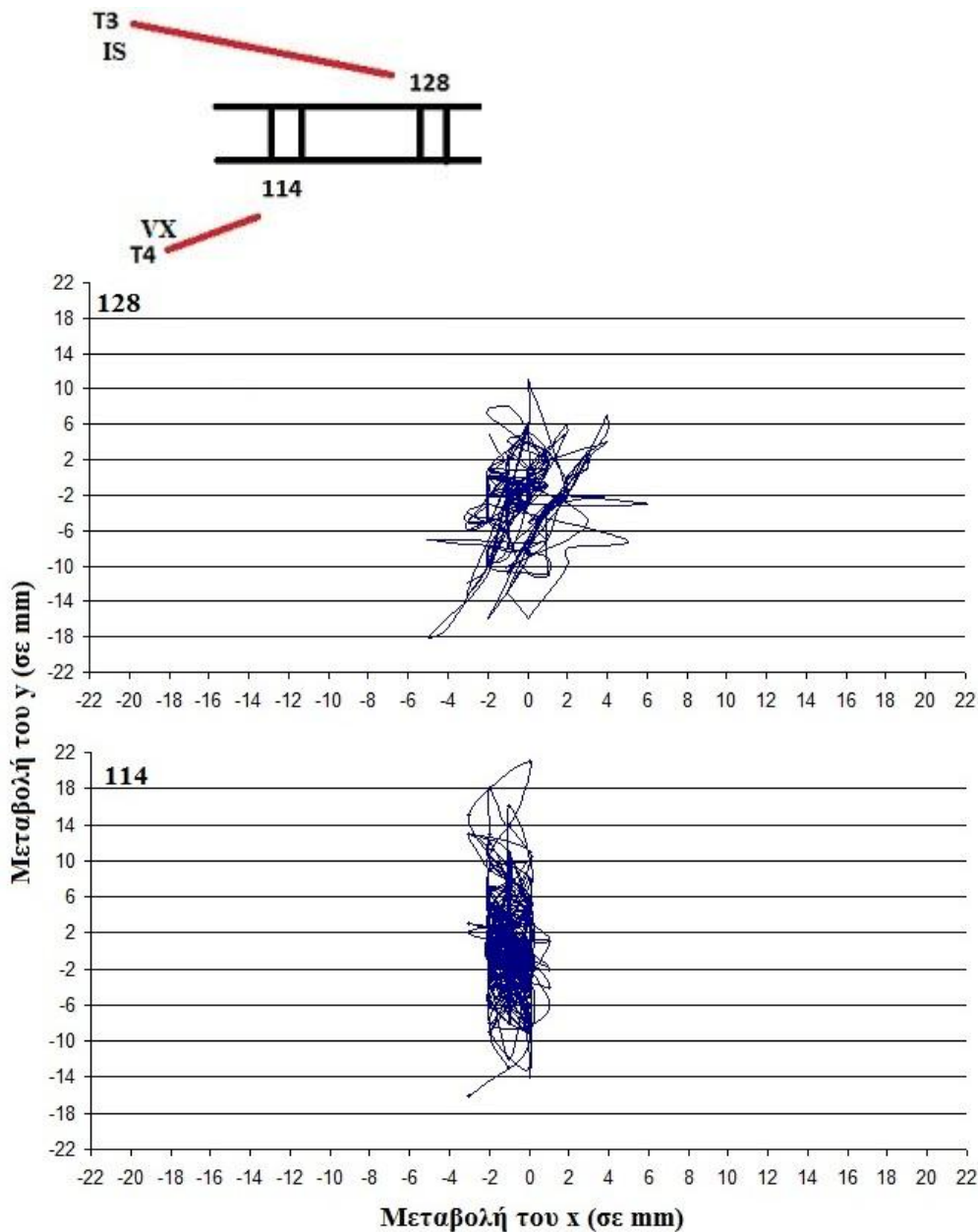
Σχήμα 4.1 Χρονοσειρές της διαμήκουσ ταλάντωσης στον ίδιο χρόνο για τους στόχους 128 και 114



Σχήμα 4.2 Χρονοσειρές της εγκάρσιας ταλάντωσης στον ίδιο χρόνο για τους στόχους 128 και 114



Σχήμα 4.3 Χρονοσειρές της κατακόρυφης ταλάντωσης στον ίδιο χρόνο για τους στόχους 128 και 114



Σχήμα 4.4 Οριζοντιογραφίες των στόχων 128 και 114

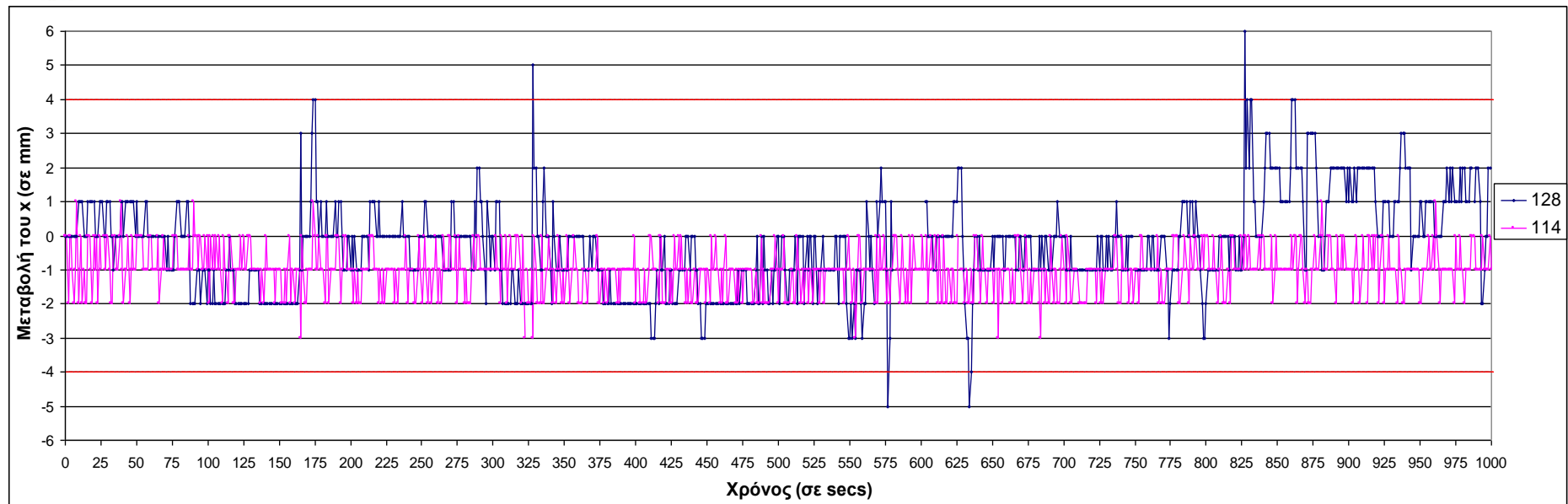
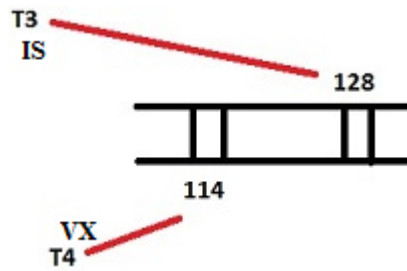
Επίσης σχεδιάστηκαν τα διαγράμματα της συνολικής οριζοντιογραφικής κίνησης του κάθε στόχου (σχήμα 4.4) στα οποία διακρίνονται τα εξής :

- Όσον αφορά τον στόχο 128 ο οποίος μετρήθηκε από το IS διακρίνεται μια μετατόπιση της θέσης ισορροπίας. Το κέντρο βάρους των μετατοπίσεων του στόχου φαίνεται πως άλλαξε κατά τη διάρκεια του πειράματος. Αυτό πρακτικά μπορεί να σημαίνει κάποια αβεβαιότητα του γεωδαιτικού σταθμού ως προς την θέση κλειδώματος του στόχου. Οι μετατοπίσεις στον κατά μήκος άξονα της γέφυρας είναι της τάξης 4mm οι οποίες βρίσκονται μέσα στα όρια του θορύβου, ενώ κατά τον εγκάρσιο άξονα εμφανίζονται μετατοπίσεις της τάξης των 16mm.

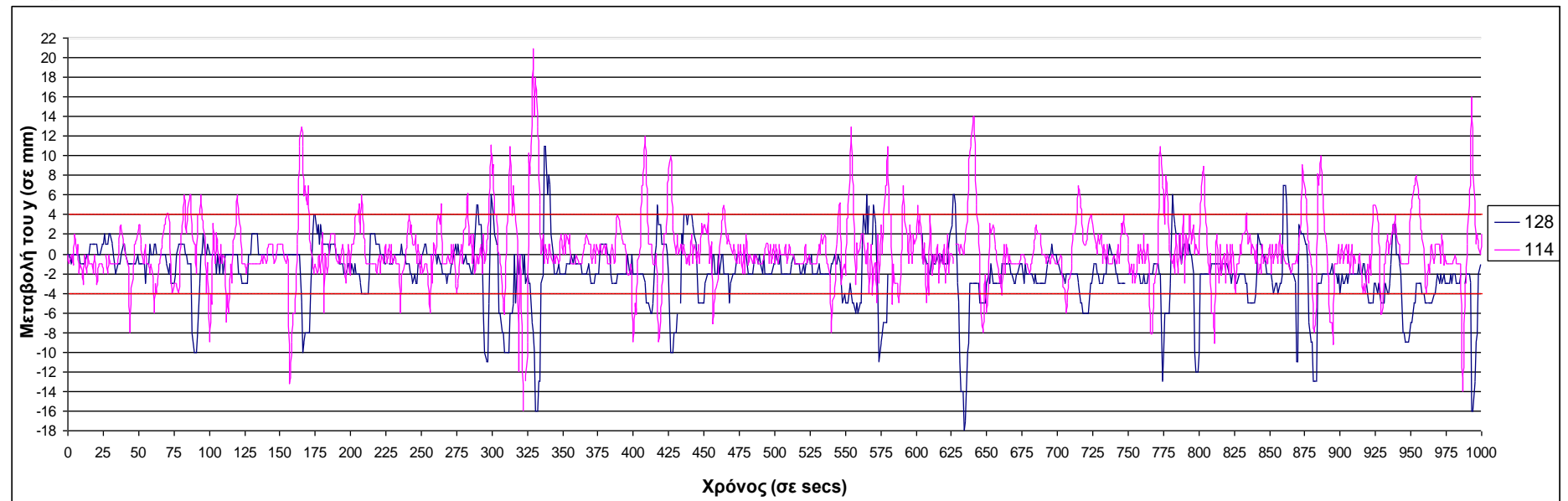
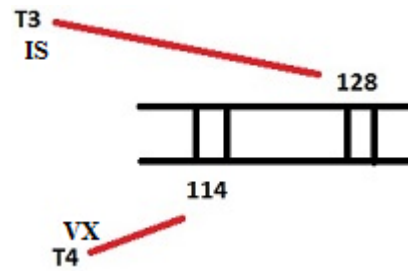
- Στην οριζοντιογραφία του στόχου 114 υπάρχει μια ομοιομορφία και το κέντρο βάρους του γραφήματος είναι πολύ πιο ξεκάθαρο εν αντιθέσει με αυτό του στόχου 128. Σε αυτό το γράφημα οι μετατοπίσεις στον κατά μήκος άξονα είναι της τάξης των 2mm πλην κάποιων ακραίων τιμών και βρίσκονται μέσα στα όρια του θορύβου, ενώ στον εγκάρσιο άξονα έχουμε μετατοπίσεις της τάξης των 18 - 37mm περίπου.

Τέλος, προκειμένου να είναι πιο εποπτική και εύκολα αντιληπτή η διαφορετικότητα της ταλάντωσης των δύο στόχων την ίδια χρονική περίοδο σχεδιάστηκαν στο ίδιο διάγραμμα οι χρονοσειρές των δύο στόχων.

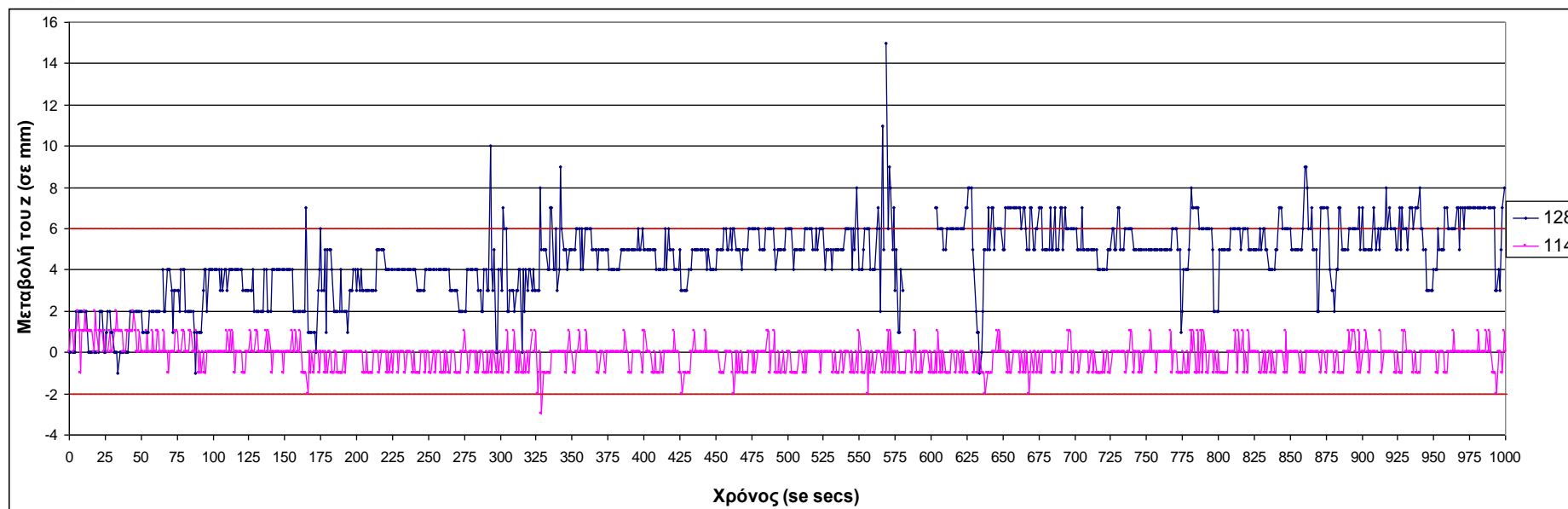
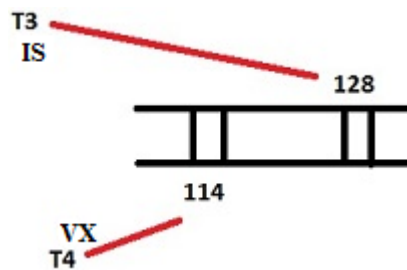
Αξιοσημείωτο είναι πως στο σχήμα 4.6 στο οποίο διακρίνονται οι χρονοσειρές και των δύο οργάνων στην εγκάρσια μεταβολή τους αυτές είναι αντίρροπες. Διαπιστώνεται πως την ίδια χρονική στιγμή οι δύο πυλώνες εμφανίζουν την ίδια σχεδόν συμπεριφορά αλλά προς άλλη κατεύθυνση κάτι που είναι λογικό λόγω της αντιδιαμετρικής θέσης των σημείων που εξετάστηκαν.



Σχήμα 4.5 Χρονοσειρές της διαμήκουσ ταλάντωσης στον ίδιο χρόνο των στόχων 128 και 114



Σχήμα 4.6 Χρονοσειρές της εγκάρσιας ταλάντωσης στον ίδιο χρόνο των στόχων 128 και 114



Σχήμα 4.7 Χρονοσειρές της κατακόρυφης ταλάντωσης στον ίδιο χρόνο των στόχων 128 και 114

4.2 Ανάλυση χρονοσειρών 2^ο πειράματος

Στο δεύτερο πείραμα μετρήθηκε ταυτόχρονα και από τους δύο γεωδαιτικούς σταθμούς IS και VX ο στόχος 128, που βρίσκεται στο ψηλότερο σημείο στη βόρεια πλευρά του πυλώνα M6.

Στις χρονοσειρές της διαμήκου μεταβολής της θέσης του στόχου 128 (σχήμα 4.8) παρατηρείται για το VX ότι είναι πολύ μικρή σε μέγεθος, της τάξης των 2mm με αποτέλεσμα να μην μπορεί να εξαχθεί κάποιο σαφές συμπέρασμα αφού όλες οι μεταβολές βρίσκονται μέσα στα όρια θορύβου. Βέβαια διακρίνεται μια μετατόπιση της θέσης ισορροπίας πριν το 75sec και άλλη μια κοντά στο 375sec. Στο αντίστοιχο γράφημα του IS οι μεταβολές βρίσκονται μέσα στα όρια του θορύβου αλλά διακρίνεται κοντά στο 300sec μια μετατόπιση της θέσης ισορροπίας.

Επιπροσθέτως διαπιστώνεται πως η διαμήκης κίνηση του στόχου και κατ' επέκταση του πυλώνα δεν αποδίδεται το ίδιο από τα δύο όργανα. Αυτό πιθανώς να οφείλεται στο ότι η μεταβολή είναι μέσα στα όρια αβεβαιότητας των οργάνων και γι' αυτό δεν μπορούν να τη προσδιορίσουν επ' ακριβώς.

Εν αντιθέσει με τη διαμήκη συμπεριφορά του στόχου, στην εγκάρσια διεύθυνση παρατηρούνται μεγάλα εύρη ταλάντωσης των οποίων οι κορυφές περιγράφονται και από τους δύο γεωδαιτικούς σταθμούς και εκτός αυτού βρίσκονται εκτός των ορίων θορύβου (σχήμα 4.9). Το εύρος ταλάντωσης κυμαίνεται από 2cm έως 2.5 cm. Όπως και στο πρώτο πείραμα και σε αυτό επιβεβαιώνεται η ελευθερία κίνησης που έχουν οι πυλώνες στο εγκάρσιο άξονα της γέφυρας λόγω των κινητών φορτίων που διέρχονται του καταστρώματος το οποίο και συγκρατούν. Στο ίδιο διάγραμμα είναι εμφανές πως και τα δύο όργανα περιγράφουν τις ίδιες μεταβολές ποιοτικά ενώ έχουμε κάποιες αποκλίσεις στο εύρος των ταλαντώσεων όταν αυτές βρίσκονται εντός του θορύβου των μετρήσεων.

Όσον αφορά χρονοσειρές της κατακόρυφης μεταβολής της θέσης του στόχου 128 (σχήμα 4.10) φαίνεται πως :

- δεν υπάρχει συσχέτιση των χρονοσειρών των δύο οργάνων
- και οι δυο χρονοσειρές των μεταβολών της μεταβλητής z βρίσκονται εντός θορύβου πλην κάποιων ακραίων τιμών IS
- η θέση ισορροπίας του στόχου όσον αφορά το IS αλλάζει κατά τη διάρκεια του πειράματος. Αυτό γίνεται αντιληπτό και από την οριζοντιογραφία (σχήμα 4.11) της θέσης του στόχου 128.

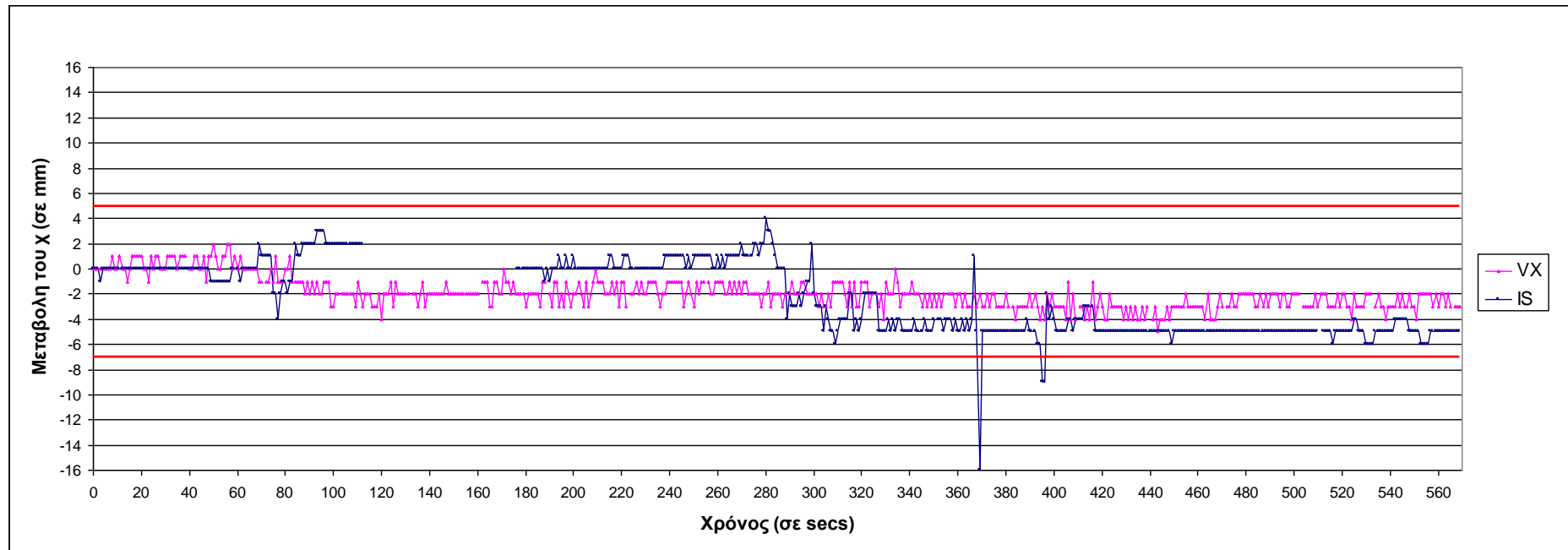
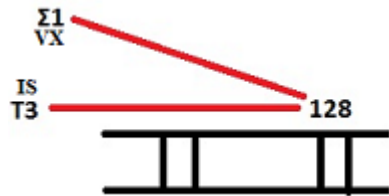
Στον πίνακα 4.2 έχουν καταγραφεί οι ακραίες τιμές των χρονοσειρών των δύο σταθμών ως προς την μεταβολή κατά τον άξονα των y, η χρονική στιγμή που σημειώθηκαν καθώς και οι απόκλιση των τιμών των δύο οργάνων. Παρατηρείται ότι οι :

- οι διαφορές κυμαίνονται από 0 – 5mm,
- το VX για τον κοινό στόχο 128 έχει καταγράψει μεγαλύτερες

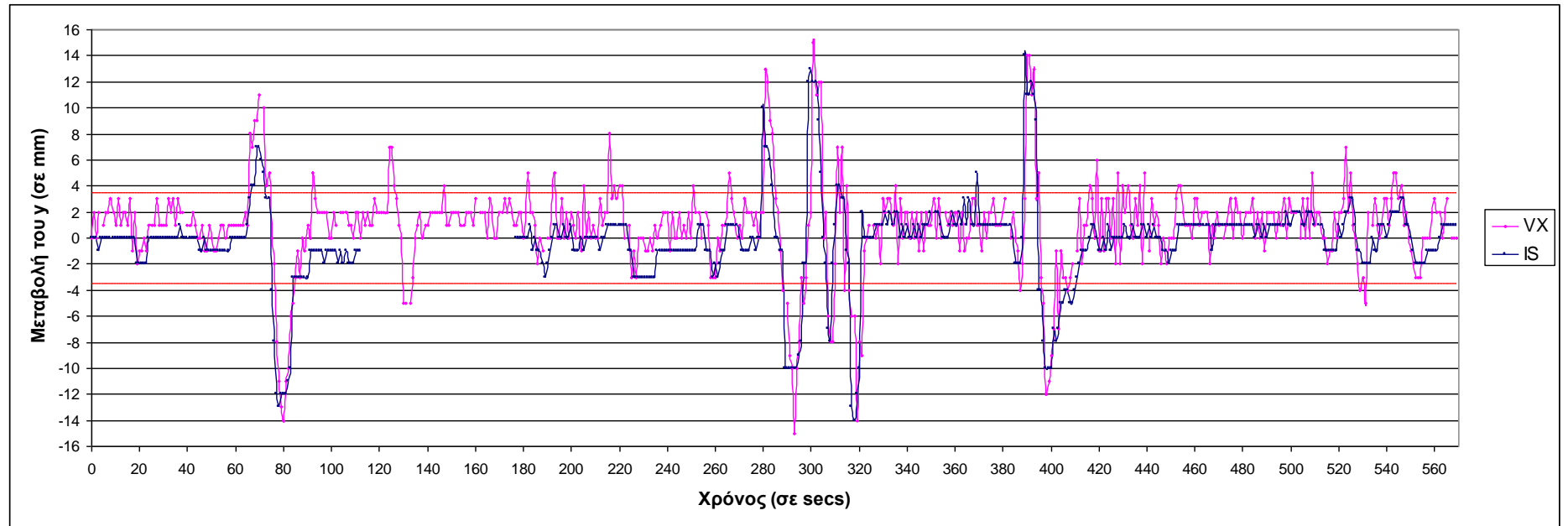
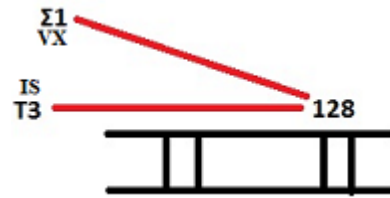
- μεταβολές σε τιμή, και
- και τα δύο όργανα έχουν καταγράψει, με διαφορά της τάξης του 1-2 δευτερολέπτων, αυτές τις ακραίες μεταβολές.

Ακραίες τιμές (A/A)	Χρόνος (sec)	Στόχος 128 (mm)	Χρονος (sec)	Στόχος 128 (mm)	Απόκλιση (mm)
1	69	7	70	11	4
2	79	-13	80	-14	1
3	280	10	280	13	3
4	290	-10	292	-15	5
5	300	13	300	15	2
6	308	-8	307	-8	0
7	318	-14	318	-14	0
8	389	14	390	14	0
9	398	-10	397	-12	2

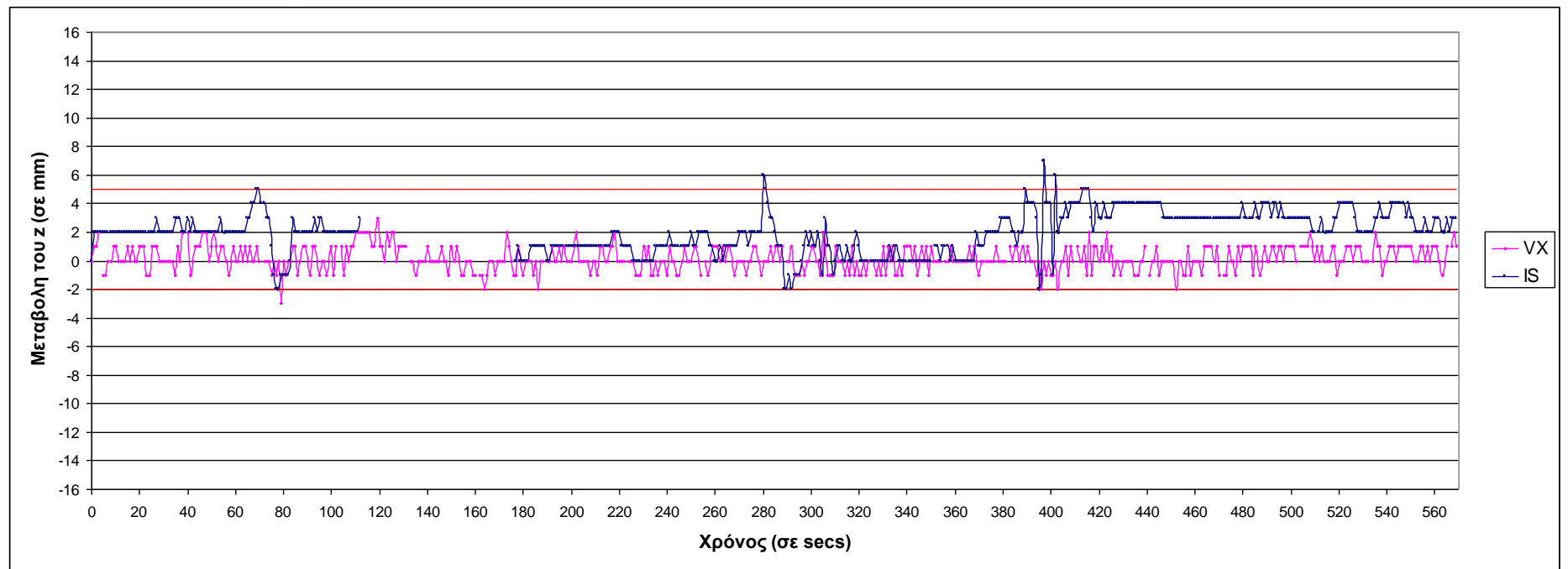
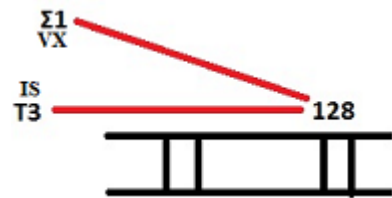
Πίνακας 4.2 Πίνακας ακραίων τιμών για το 2^ο πείραμα μεταξύ των δύο οργάνων για τον στόχο 128 στον εγκάρσιο άξονα της γέφυρας



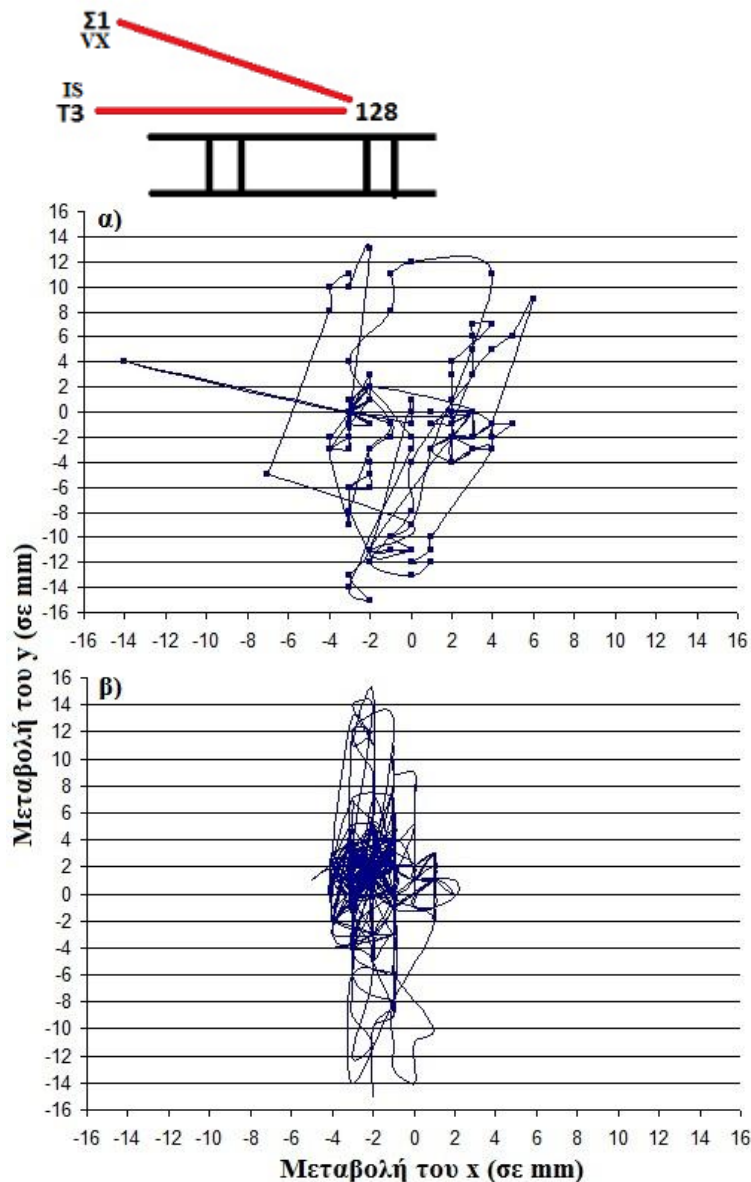
Σχήμα 4.8 Χρονοσειρές της διαμήκουσ μεταβολής της θέσης του στόχου 128 από τους δύο γεωδαιτικούς σταθμούς



Σχήμα 4.9 Χρονοσειρές της εγκάρσιας μεταβολής της θέσης του στόχου 128 από τους δύο γεωδαιτικούς σταθμούς



Σχήμα 4.10 Χρονοσειρές της κατακόρυφης μεταβολής της θέσης του στόχου 128 από τους δύο γεωδαιτικούς σταθμούς



Σχήμα 4.11 Οριζοντιογραφίες του στόχου 128 α) με το IS β) με το VX

4.3 Ανάλυση χρονοσειρών 3^{ου} πειράματος

Στο τρίτο πείραμα μετρήθηκαν οι στόχοι 128 από το IS και 126 από το VX, οι οποίοι βρίσκονται στον ίδιο πυλώνα αλλά σε διαφορετικό ύψος. Ο στόχος 128 βρίσκεται στο ψηλότερο σημείο του πυλώνα ενώ ο στόχος 126 είναι τοποθετημένος 19m χαμηλότερα. Στο πείραμα αυτό επιχειρήθηκε να μελετηθεί η συμπεριφορά του πυλώνα σε δύο διαφορετικά σημεία του.

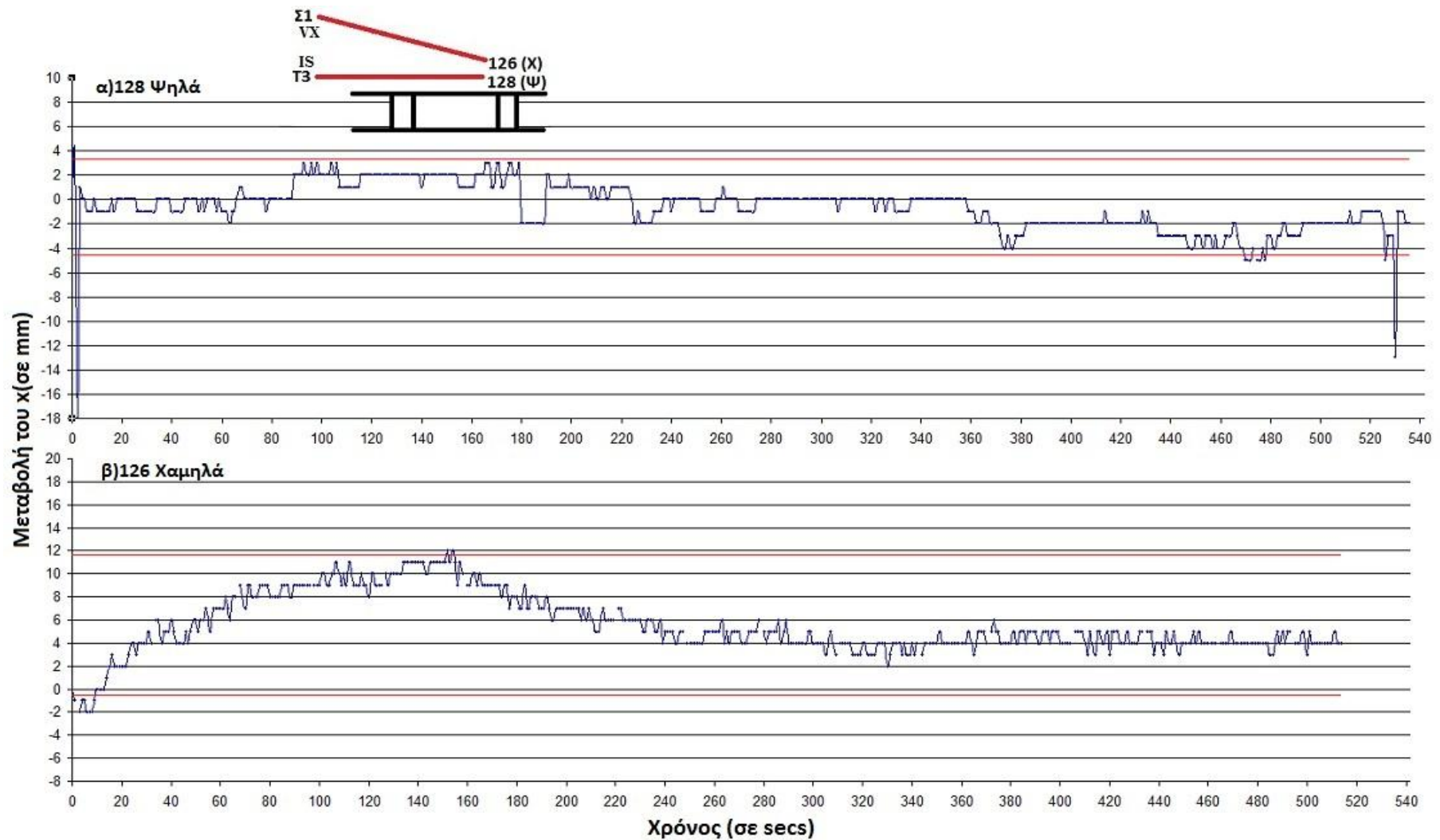
Όσον αφορά τις μεταβολές στον διαμήκη άξονα (σχήμα 4.12) οι μετρήσεις βρίσκονται μέσα στα όρια της αβεβαιότητας των οργάνων και για τους δύο στόχους. Αυτό που προκαλεί εντύπωση είναι το διάγραμμα του στόχου 126. Για τα πρώτα 250 δευτερόλεπτα των μετρήσεων η μετρούμενη θέση στον άξονα των x φαίνεται να αλλάζει συνεχώς μέχρι

το 240sec όπου και αποκτά μια σταθερή θέση ισορροπίας γύρω από την οποία ταλαντώνεται.

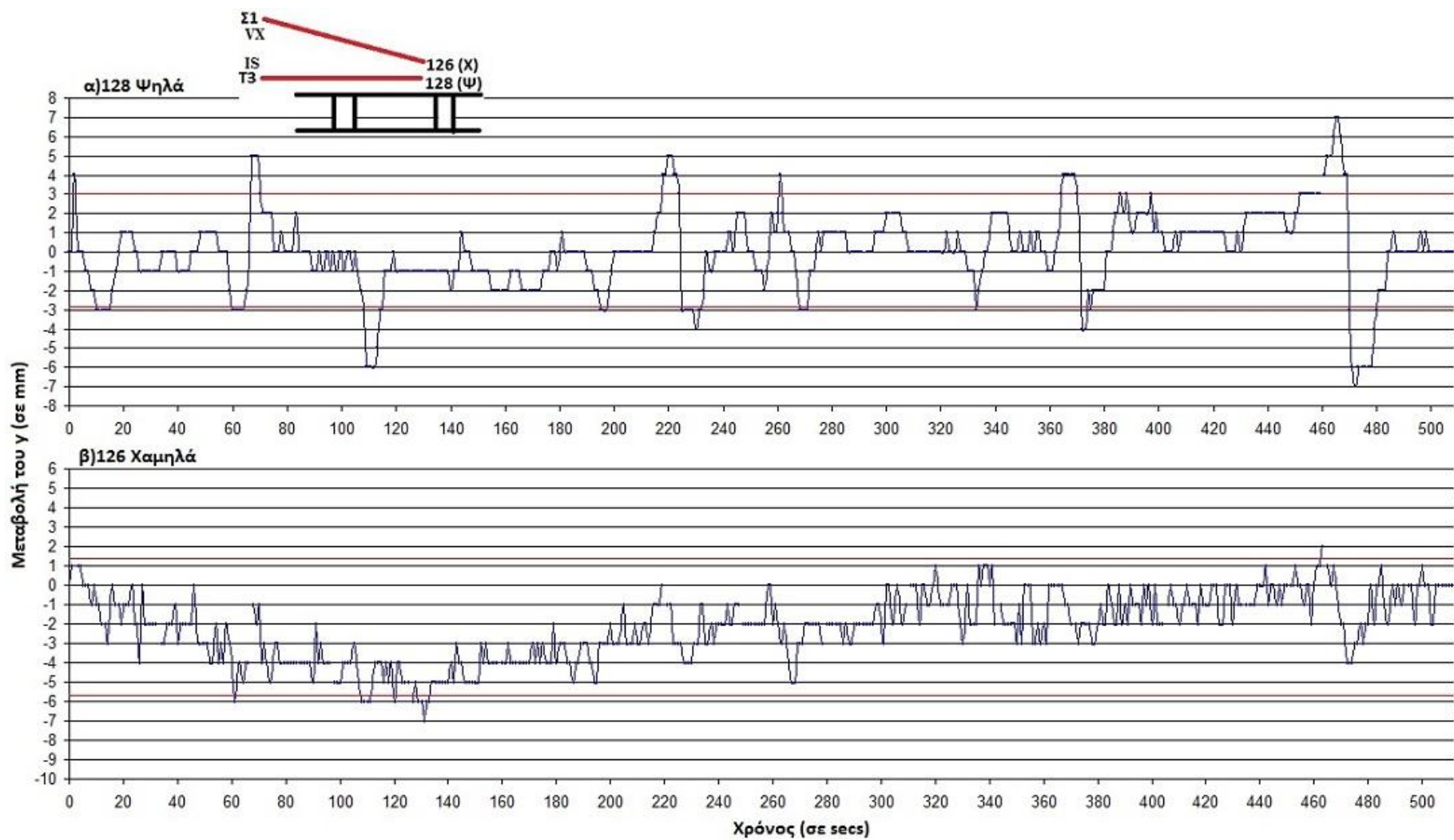
Στα διαγράμματα των μεταβολών κατά τον εγκάρσιο άξονα της γέφυρας (σχήμα 4.13) όσον αφορά τον στόχο 128 παρατηρούνται εύρη μετακινήσεων έξω από τα όρια θορύβου, εν αντιθέσει με τον στόχο 126 που οι μετρήσεις βρίσκονται εντός ορίων θορύβου. Όμως στο κοινό γράφημα (διάγραμμα 4.17) διακρίνεται ότι υπάρχει, ιδιαίτερα σε κάποιες ακραίες τιμές του στόχου 128, μια αντίστοιχη κίνηση και από τον 126 με μικρότερη βέβαια τιμή αφού λόγω της θέσης του αναμένονταν και πολύ μικρότερες μετακινήσεις.

Άξιο παρατήρησης είναι το διάγραμμα 4.13β του στόχου 126 όπου πάλι διακρίνεται κάτι αντίστοιχο με το διάγραμμα 4.12β. Δηλαδή για τα πρώτα 250 δευτερόλεπτα η μεταβολή του y δεν εκτελείται γύρω από μια θέση ισορροπίας αλλά μεταβάλλεται συνεχώς. Εκτιμάται πως για κάποιο λόγο ο γεωδαιτικός σταθμός VX κλείδωνε τον στόχο σε διαφορετική θέση κάτι το οποίο φαίνεται και στο διάγραμμα 4.15β της οριζοντιογραφίας του στόχου 126.

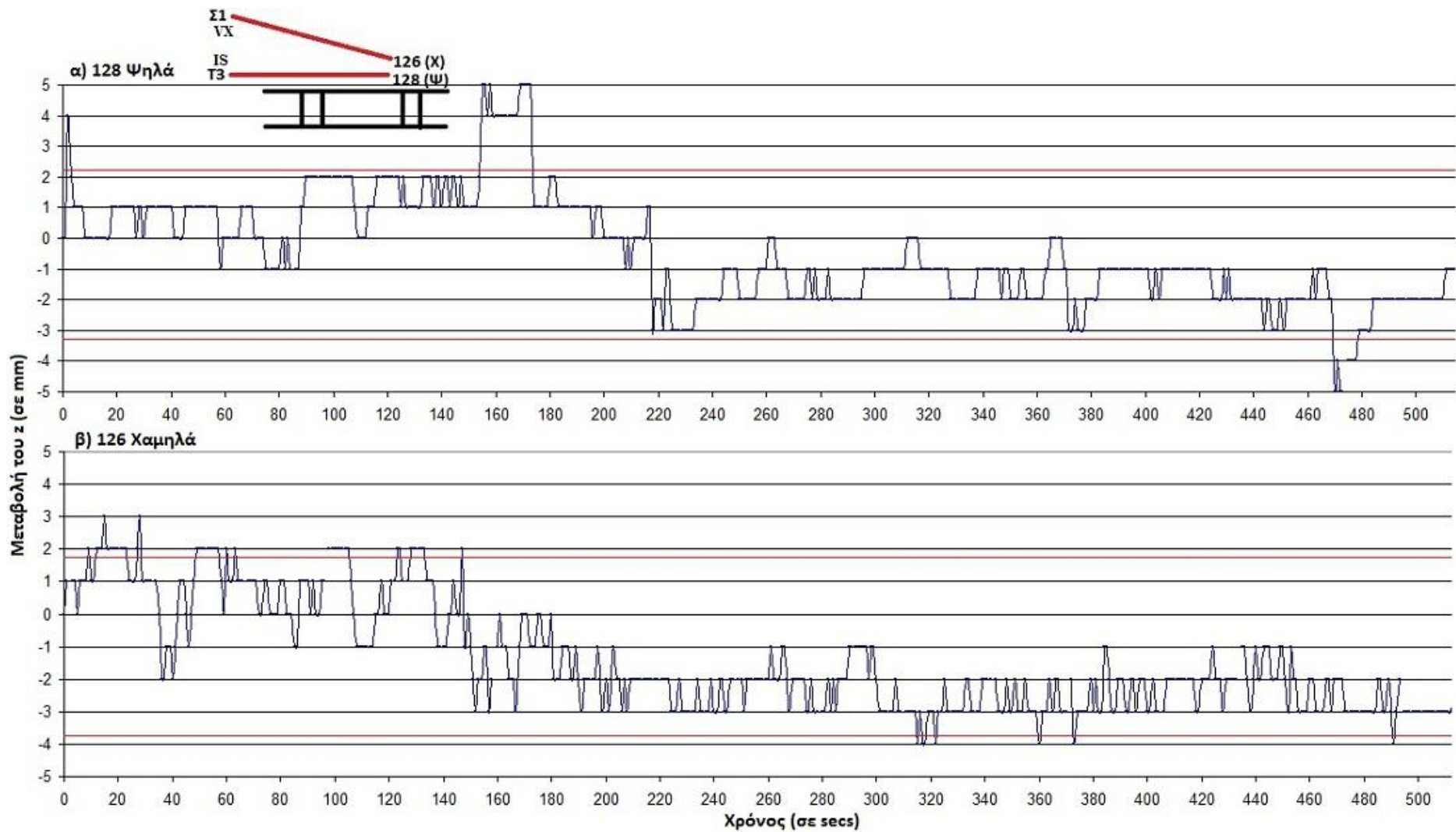
Όσον αφορά τα διαγράμματα των μεταβολών στον κατακόρυφο άξονα των στόχων παρατηρείται πως οι χρονοσειρές και των δύο στόχων είναι μέσα στα όρια θορύβου. Βέβαια εμφανίζεται και σε αυτά τα γραφήματα το φαινόμενο της αλλαγής της θέσης ισορροπίας των στόχων στον κατακόρυφο άξονα.



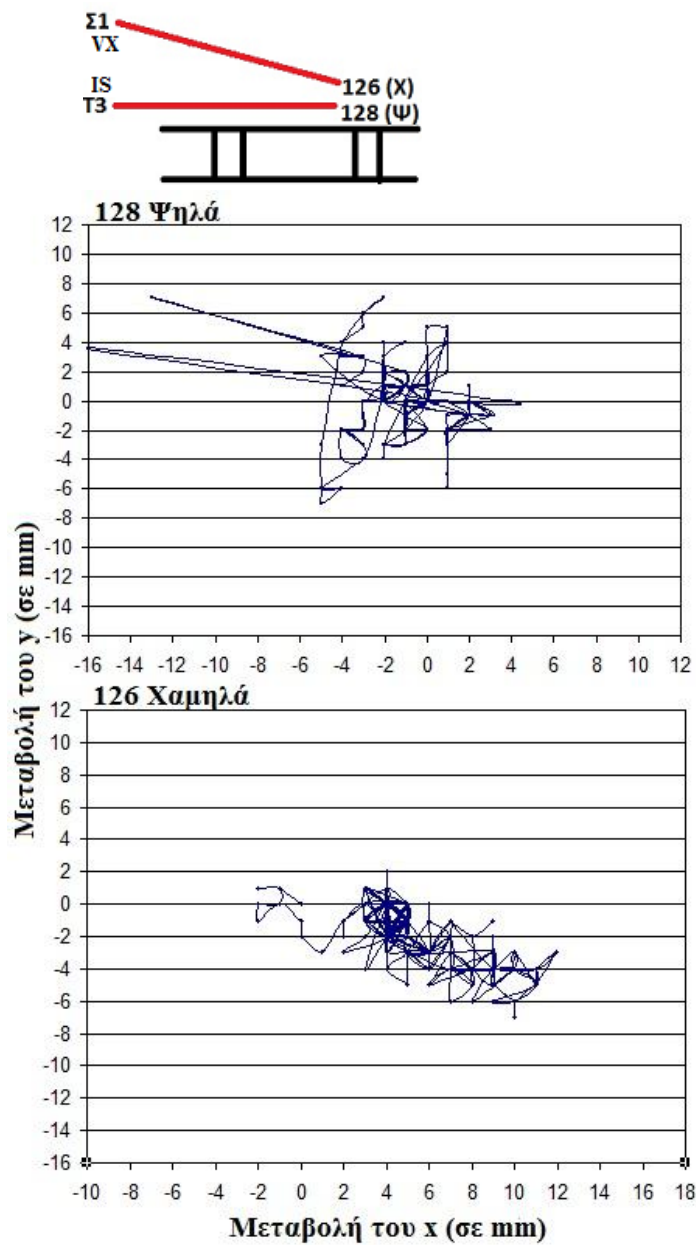
Σχήμα 4.12 Χρονοσειρές της διαμήκουσ μεταβολής της θέσης των στόχων 128(ψηλά) και 126(χαμηλά) στον πυλώνα Μ6



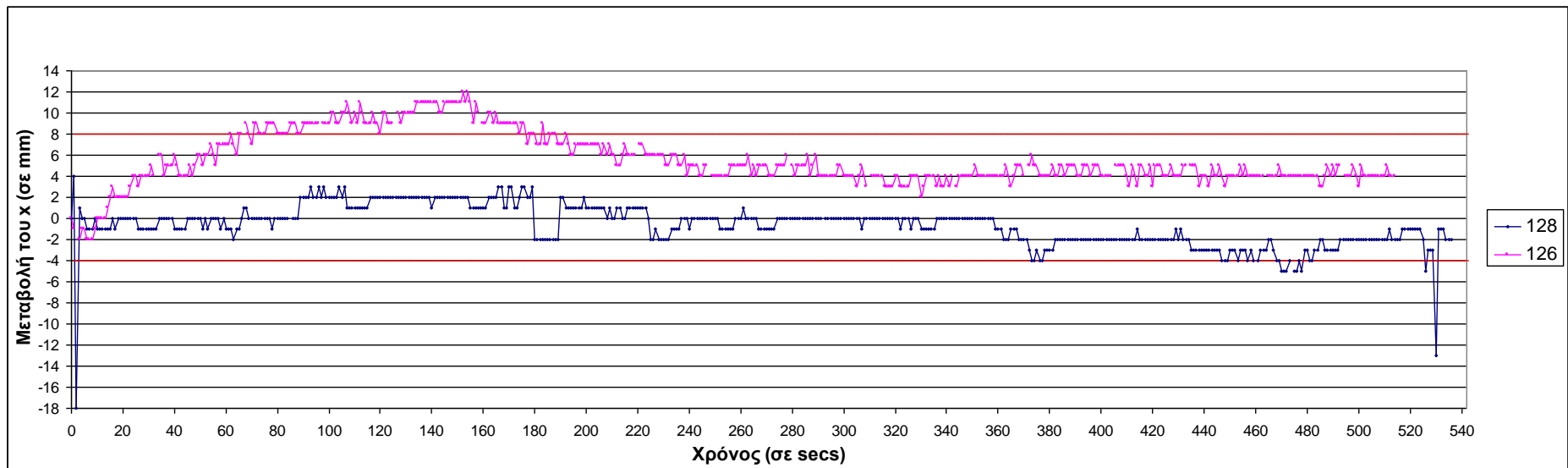
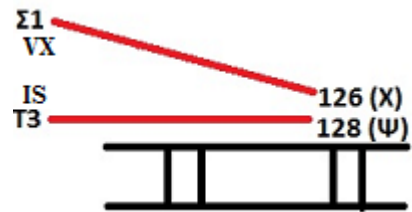
Σχήμα 4.13 Χρονοσειρές της εγκάρσιας μεταβολής της θέσης των στόχων 128(ψηλά) και 126(χαμηλά) στον πυλώνα M6



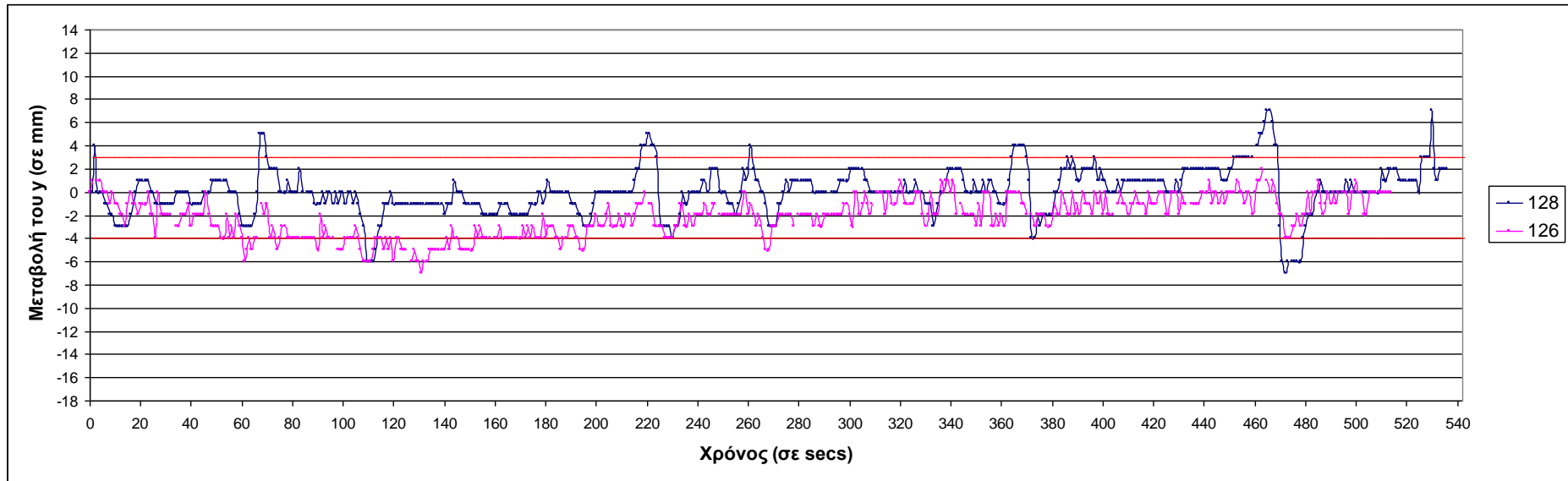
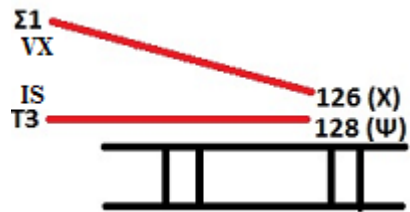
Σχήμα 4.14 Χρονοσειρές της κατακόρυφης μεταβολής της θέσης των στόχων 128(ψηλά) και 126(χαμηλά) στον πυλώνα Μ6



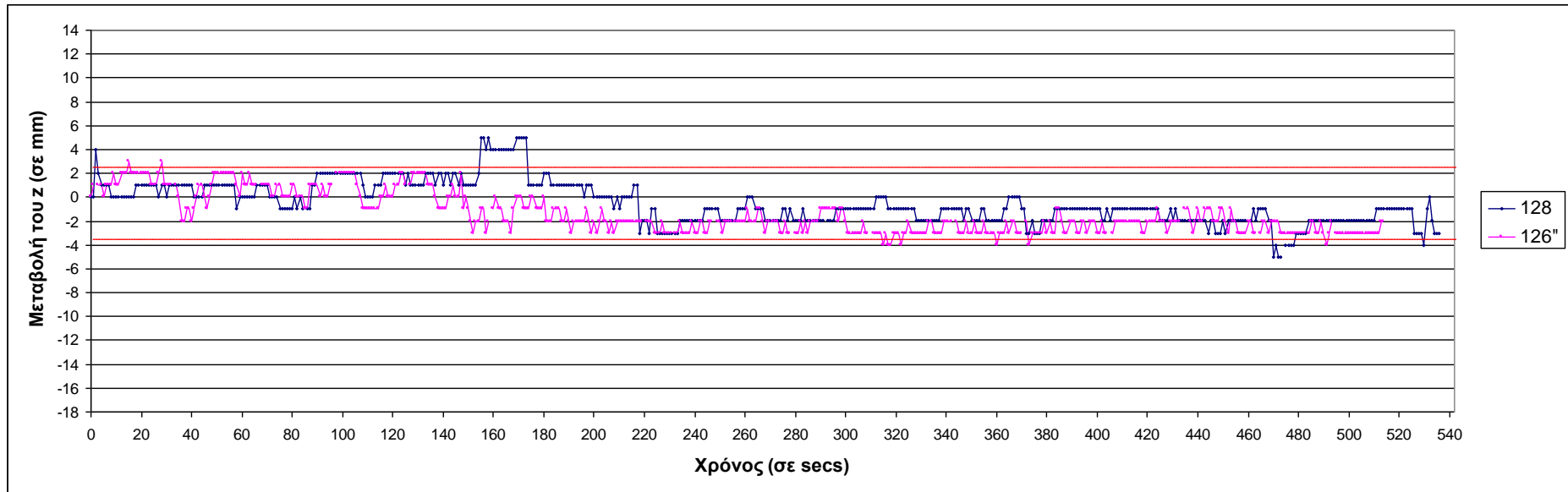
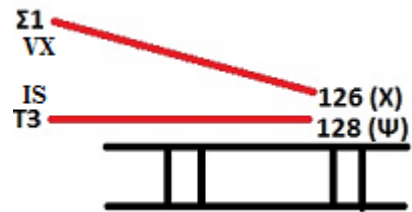
Σχήμα 4.15 Οριζοντιογραφίες του στόχου α) 128 (ψηλά) με το IS β) του στόχου 126(χαμηλά) με το VX στον πυλώνα M6



Σχήμα 4.16 Κοινό γράφημα της διαμήκουσ μεταβολής των στόχων 128(ψηλά) και 126(χαμηλά) στον πυλώνα M6



Σχήμα 4.17 Κοινό γράφημα της εγκάρσιας μεταβολής των στόχων 128(ψηλά) και 126(χαμηλά) στον πυλώνα Μ6



Σχήμα 4.18 Κοινό γράφημα της κατακόρυφης μεταβολής των στόχων 128(ψηλά) και 126(χαμηλά) στον πυλώνα M6

4.4 Ανάλυση χρονοσειρών 4^ο πειράματος

Στο τέταρτο και τελευταίο πείραμα πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε κοινό αμφιπρισματικό στόχο (GRZ4 360°) από τους δύο γεωδαιτικούς σταθμούς. Ο στόχος πακτώθηκε στο εξωτερικό κιγκλίδωμα προστασίας των πεζών στο μέσο του ανοίγματος της γέφυρας. Σκοπός του πειράματος ήταν η σύγκριση των μετρήσεων των δύο οργάνων σε όλους τους άξονες καθώς και η μελέτη της συμπεριφοράς του καταστρώματος της γέφυρας.

Όσον αφορά τις μεταβολές στον διαμήκη άξονα (διάγραμμα 4.19) παρατηρείται ότι βρίσκονται μέσα στα όρια του θορύβου οπότε δεν μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για την ύπαρξη τυχόν ταλάντωσης. Οι καμπύλες των χρονοσειρών των δύο οργάνων δεν έχουν την ίδια μορφή γεγονός το οποίο οφείλεται πιθανόν στο ότι οι μετακινήσεις που μετρήθηκαν βρίσκονται μέσα στα όρια της αβεβαιότητας των δύο σταθμών. Επίσης γίνεται αντιληπτό στο ίδιο διάγραμμα ότι η καμπύλη της χρονοσειράς του IS μετά το 560sec αλλάζει θέση ισορροπίας κάτι που δεν ισχύει για την καμπύλη του VX. Εκτιμάται ότι μπορεί να οφείλεται σε κάποιο σφάλμα στο κλείδωμα του στόχου ο οποίος ήταν αμφιπρισματικός.

Στο διάγραμμα 4.20 που αφορά τις εγκάρσιες μετακινήσεις όπως και στον διαμήκη άξονα, οι τιμές και των δύο σταθμών βρίσκονται μέσα στα όρια θορύβου πλην κάποιων σποραδικών ακραίων τιμών της καμπύλης του IS για τις οποίες δεν μπορεί να εξαχθεί κάποιο συμπέρασμα αφού δεν εμφανίζονται στην καμπύλη του VX.

Στον κατακόρυφο άξονα αναμένονταν σημαντικές μετακινήσεις-ταλαντώσεις αφού το μέσο του ανοίγματος είναι ένα από τα σημεία που καταπονείται περισσότερο στις γέφυρες ειδικά στις καλωδιωτές όπως αυτή που εξετάζεται.

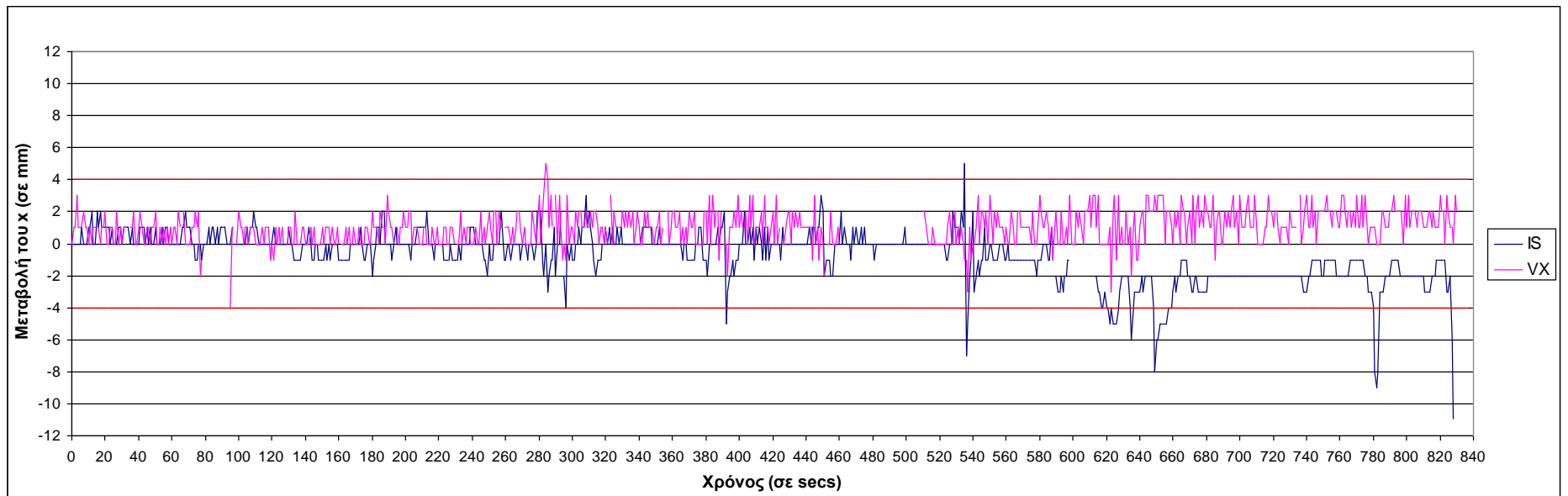
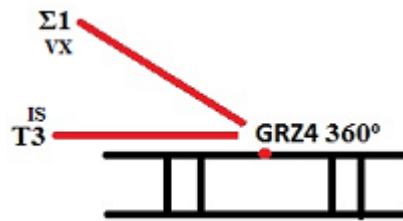
Στο σχήμα 4.21 γίνεται αντιληπτό ότι έχουν καταγραφεί αξιοσημείωτα εύρη ταλαντώσεων και από τα δύο όργανα. Στον πίνακα 4.4 που παρατίθεται γίνεται αντιπαραβολή των εύρων ταλάντωσης που έχουν καταγράψει οι δύο σταθμοί. Γίνεται αντιληπτό ότι έχουν σημειωθεί κοινά καταγεγραμμένα εύρη και από τα δύο όργανα με αποκλίσεις της τάξης 0-5mm. Είναι εμφανής η ομοιότητα στις δύο καμπύλες στα χρονικά διαστήματα που είχαμε καταγραφές και από τους δύο σταθμούς αφού υπάρχουν και κάποια κενά διαστήματα στις καταγραφές τους. Συμπεραίνεται πως έντονες ταλαντώσεις οι οποίες είναι εκτός της αβεβαιότητας των σταθμών μπορούν επάξια να περιγραφούν από αυτόματα ελεγχόμενους γεωδαιτικούς σταθμούς.

Η μεθοδολογία η οποία χρησιμοποιήθηκε σε αυτό το πείραμα ανέδειξε κάποια προβλήματα που παρουσιάζονται στους ρομποτικούς σταθμούς όπως ότι :

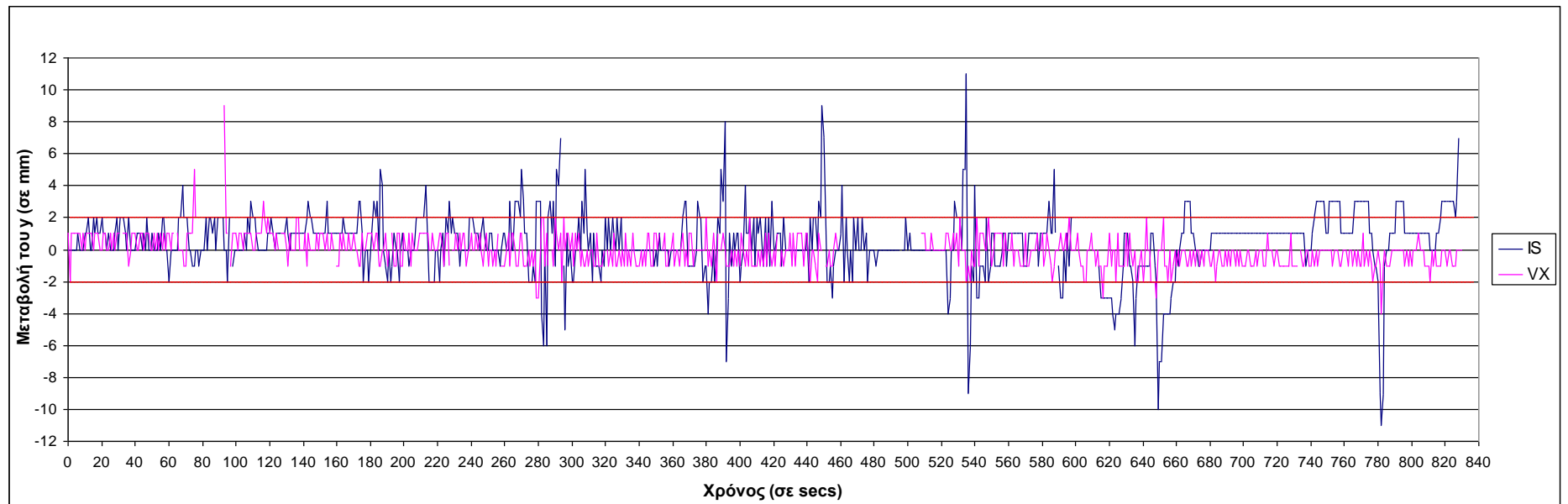
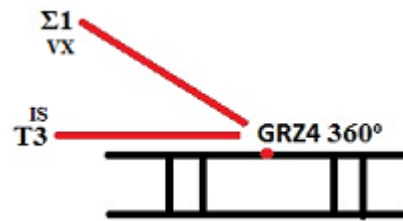
- διαπιστώθηκαν κενά στις καταγραφές για αρκετά δευτερόλεπτα, το οποίο σημαίνει ότι χάνεται σημαντική πληροφορία.
- για μετακινήσεις που βρίσκονται μέσα στα όρια θορύβου των μετρήσεων οι δύο σταθμοί δεν κατέγραψαν τις ίδιες μεταβολές στον διαμήκη και εγκάρσιο άξονα προφανώς λόγω διαφορετικών προδιαγραφών των δύο οργάνων.
- Ιδιαίτερα για το IS κατεγράφησαν ακραίες τιμές στις διαμήκεις και εγκάρσιες μεταβολές του στόχου οι οποίες δεν δικαιολογούσαν την ύπαρξή τους.
- Επιπλέον το IS φαίνεται να σταματά να καταγράφει μετά το 600sec (σχήμα 4.21) τις ταλαντώσεις του καταστρώματος εν αντιθέσει με το VX που δείχνει αξιοσημείωτες μεταβολές
- Κατά την επεξεργασία των μετρήσεων αυτού του πειράματος χρειάστηκε να αφαιρεθούν κάποιες τιμές από τις αρχικές για να συγχρονιστούν πλήρως τις καμπύλες των μεταβολών. Αυτό σημαίνει ότι κατά τη διάρκεια των πειραμάτων εμφανίστηκε μια απόκλιση στους χρόνους των δύο οργάνων της τάξης του 1 sec.

A/A	IS		VX		Απόκλιση (mm)
	Χρονική διάρκεια (sec)	Εύρος Ταλάντωσης (mm)	Χρονική διάρκεια (sec)	Εύρος Ταλάντωσης (mm)	
1	173-176	20	174-177	17	3
2	185-187	19	185-187	20	1
3	210-213	15	210-213	17	2
4	213-217	20	213-217	20	0
5	278-281	23	278-281	28	5
6	391-395	36	391-395	31	5
7	532-535	58	532-535	57	1
8	535-537	37	535-537	37	0
9	539-540	33	539-540	30	3
10	585-587	23	585-587	26	3
11	587-592	33	587-592	35	2
12	-	-	607-611	37	-
13	-	-	611-622	50	-
14	-	-	622-628	49	-
15	-	-	628-634	38	-
16	-	-	634-644	35	-
17	-	-	644-649	46	-
18	-	-	649-664	55	-
19	-	-	771-782	67	-
20	-	-	782-791	65	-

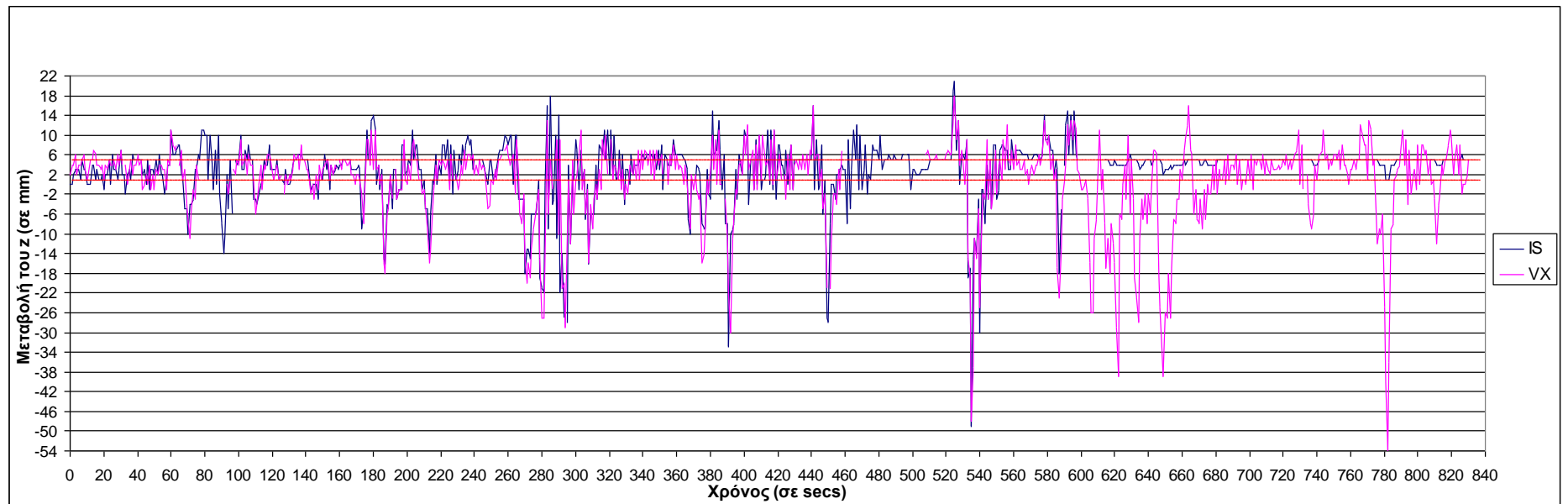
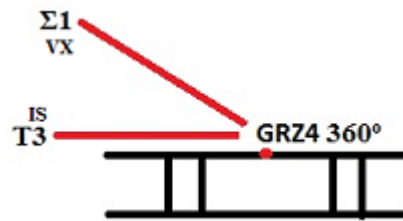
Πίνακας 4.3 Εύρη ταλάντωσης και χρονική διάρκεια που κατεγράφησαν από τους δύο σταθμούς και η απόκλιση μεταξύ τους



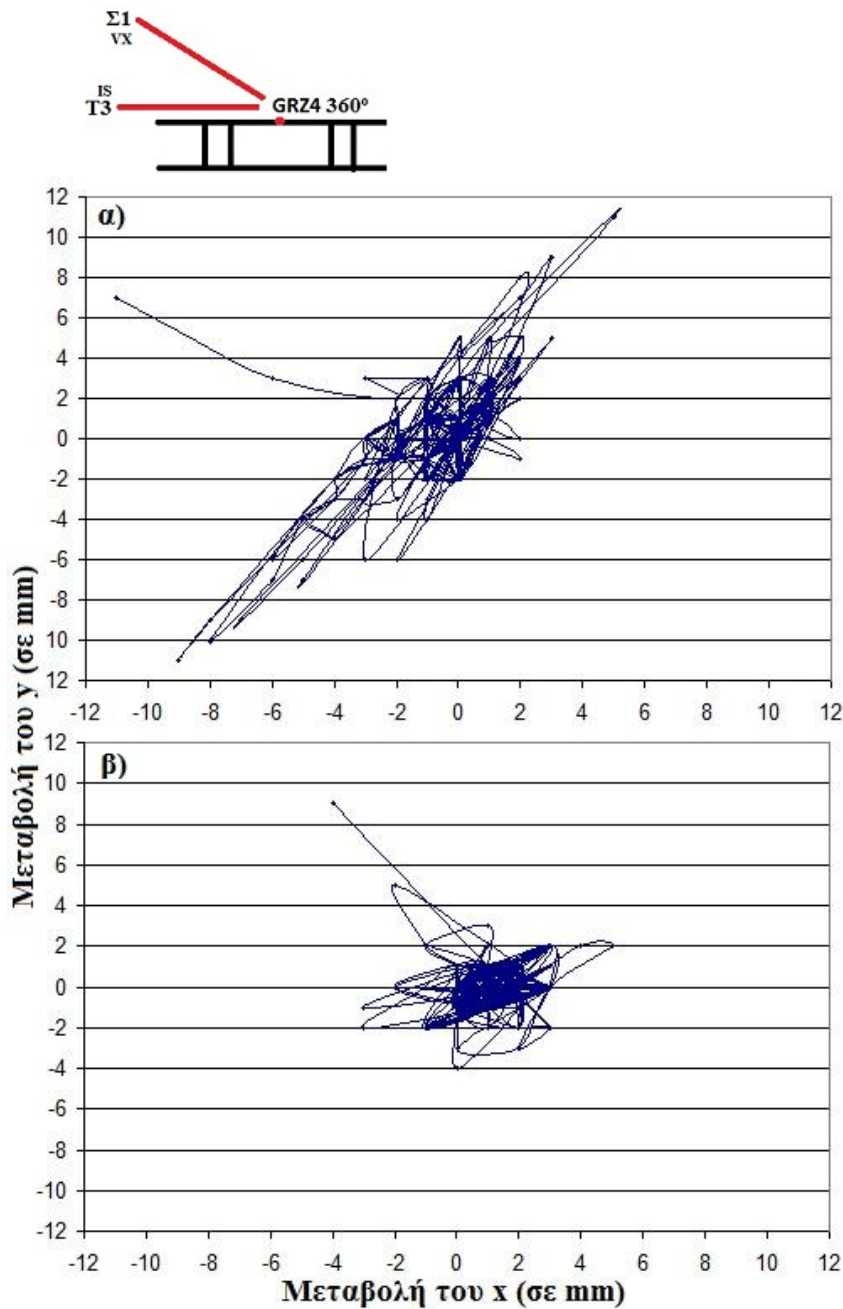
Σχήμα 4.19 Χρονοσειρές της διαμήκουσ μεταβολής της θέσης του αμφιπρισματικού στόχου (GRZ4) από τους δύο γεωδαιτικούς σταθμούς



Σχήμα 4.20 Χρονοσειρές της εγκάρσιας μεταβολής της θέσης του αμφιπρισματικού στόχου(GRZ4) από τους δύο γεωδαιτικούς σταθμούς



Σχήμα 4.21 Χρονοσειρές της κατακόρυφης μεταβολής της θέσης του αμφιπρισματικού στόχου (GRZ4) από τους δύο γεωδαιτικούς σταθμούς



Σχήμα 4.22 Οριζοντιογραφική κίνηση του στόχου GRZ4(OMNI) α) από το IS β) από το VX

Όσον αφορά τα διαγράμματα οριζοντιογραφίας του στόχου (σχήμα 4.22) παρατηρείται πως και από τα δύο όργανα έχουν δοθεί γραφήματα με σταθερό κέντρο βάρους της οριζοντιογραφικής κίνησης του στόχου. Ειδικότερα το VX φαίνεται πως έχει περιγράψει μια πιο ομαλή οριζοντιογραφική κίνηση της θέσης του στόχου με μικρότερη διασπορά από αυτή του IS. Για το VX προκύπτουν μετατοπίσεις 2mm στον διαμήκη άξονα και 3mm στον εγκάρσιο ενώ με το IS 4mm και 6mm αντίστοιχα.

4.5 Ανάλυση χρονοσειρών στο πεδίο των συχνοτήτων μέσω φασματικής ανάλυσης

Η τελευταία φάση της επεξεργασίας των μετρήσεων περιελάμβανε τη φασματική τους ανάλυση ώστε να προκύψει η περίοδος της ταλάντωσης της γέφυρας. Η φασματική ανάλυση είναι μία μαθηματική μέθοδος επεξεργασίας χρονοσειρών η οποία έχει το χαρακτηριστικό ότι μεταφέρει τις μετρήσεις από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο των συχνοτήτων. Έτσι δίνεται η δυνατότητα να αποκαλυφθούν κάποια χαρακτηριστικά της χρονοσειράς, όπως είναι μία πιθανή περιοδικότητα, η οποία με άλλες μαθηματικές μεθόδους θα ήταν δύσκολο να εντοπιστεί.

4.5.1 Μέθοδοι φασματικής ανάλυσης

Η ανάλυση στο πεδίο των συχνοτήτων αποτελεί ένα μέσο για την άντληση πληροφοριών από δεδομένα που χαρακτηρίζουν ένα φαινόμενο, διαδικασία ή μέγεθος για το οποίο η ανάλυση στο πεδίο του χρόνου δεν επαρκεί για να το περιγράψει πλήρως. Κάθε σήμα μπορεί να διασπαστεί σε συνιστώσες κάθε μία από τις οποίες χαρακτηρίζεται από κάποια συχνότητα. Η ανάλυση που πραγματοποιείται για το σκοπό αυτό λέγεται φασματική. Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν μια σειρά από μεθόδους φασματικής ανάλυσης οι κυριότερες από τις οποίες είναι:

- οι **μετασχηματισμοί Fourier** και
- το **Κανονικοποιημένο Περιοδόγραμμα Lomb**, για την περίπτωση που τα δεδομένα είναι μη ισαπέχοντα.

4.5.2 Μετασχηματισμοί Fourier

Η ανάλυση κατά Fourier βασίζεται στην παραδοχή ότι κάθε περιοδικό σήμα μπορεί να εκφραστεί ως άθροισμα κατάλληλα επιλεγμένων ημιτονοειδών κυμάτων. Οι μετασχηματισμοί Fourier διακρίνονται στον Συνεχή, για συνεχή σήματα και στο Διακριτό, για σήματα με διακριτές τιμές.

Ο διακριτός Μετασχηματισμός Fourier (DFT) οδηγεί στον υπολογισμό του φάσματος συχνοτήτων με N τιμές και δίνεται από τη σχέση 4.1 [Harman et al., 2000]

$$F_k = F\left(\frac{k}{NT_s}\right) = \sum_{n=0}^{N-1} f(nT_s)e^{-i2\pi nk / N} \quad (4.1)$$

Όπου,

\mathbf{F}_k = σήμα με N διακριτές τιμές που αποτελεί το μετασχηματισμό DFT ενός άλλου σήματος N διακριτών τιμών, f_n , με $k = 0, \dots, N-1$

N = το πλήθος των διακριτών τιμών του σήματος που αναλύεται

T_s = το χρονικό διάστημα μεταξύ διαδοχικών τιμών

Με τον τρόπο αυτό N σημεία της χρονοσειράς οδηγούν σε N τιμές συχνότητας στο φάσμα συχνοτήτων, που απέχουν μεταξύ τους διαστήματα συχνότητας ίσα με:

$$\mathbf{f}_s = \frac{1}{NT_s} \quad (4.2)$$

Η γενικότερη μορφή του DFT είναι :

$$\mathbf{F}(\mathbf{f}) = F_r(\mathbf{f}) + iF_i(\mathbf{f}) \quad (4.3)$$

όπου,

$\mathbf{F}_r(\mathbf{f})$ = το πραγματικό μέρος του μετασχηματισμού και

$\mathbf{F}_i(\mathbf{f})$ = το φανταστικό μέρος.

Ο πιο συνήθης αλγόριθμος για τον υπολογισμό του DFT, ο FFT (Fast Fourier Transform), μετατρέπει ένα σήμα N σημείων σε δύο σήματα με $N/2 + 1$ σημεία. Ενώ το αρχικό σήμα αναφέρεται σε κλίμακα χρόνου τα σήματα που προκύπτουν από αυτό, μέσω των μετασχηματισμών Fourier, αναφέρονται σε κλίμακα συχνοτήτων.

Ο αριθμός των τιμών του σήματος που αναλύεται συμβολίζεται συνήθως με τη μεταβλητή N. Θεωρητικά το N μπορεί να πάρει οποιαδήποτε θετική ακέραια τιμή, ωστόσο στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ο FFT αποτελεί δύναμη του 2, $N = 2^k$. Τις περισσότερες φορές το N λαμβάνει τιμές από 32 έως 4096 [Smith, 1997].

Το εύρος τιμών των συχνοτήτων DFT είναι [Bath, 1974]:

$$\frac{1}{2t_r} \leq \mathbf{f} \leq \frac{N}{2t_r} \quad (4.4)$$

Όπου,

t_r = το συνολικό διάστημα που καλύπτουν οι παρατηρήσεις και

N = το μήκος της χρονοσειράς.

Το ανώτατο όριο του εύρους του διαστήματος των συχνοτήτων $N/2 \cdot t_r$ εκφράζει τη συχνότητα **Nyquist** f_c , που αποτελεί τη μέγιστη συχνότητα του φάσματος [Proakis, Manolakis, 1996]. Ο υπολογισμός του φάσματος Fourier για συχνότητες μεγαλύτερες από $N/2 \cdot t_r$ μπορεί να προκαλέσει ψεύδιση (aliasing). Ο όρος χαρακτηρίζει το φαινόμενο όπου

κάθε συχνότητα εκτός του διαστήματος $[-f_c, f_c]$ μεταφέρεται εσφαλμένα εντός αυτού [Press et al., 1992].

Για ισαπέχοντα δεδομένα η συχνότητα Nyquist είναι ίση με $0.5 \cdot f_s$, όπου, f_s είναι η συχνότητα δειγματοληψίας [Press et al., 1992].

Το φάσμα συχνοτήτων μπορεί να παρουσιαστεί με διάφορες μορφές όπως η πολική. Σε αυτή τη μορφή παρουσίασης το πραγματικό $F_r(f)$ και το φανταστικό μέρος $F_i(f)$ του μετασχηματισμού DFT αντικαθίστανται από δύο άλλα μεγέθη που ονομάζονται Μέγεθος (Magnitude) $c(f)$ και φάση $\text{Phase} = \theta$, του $F(f)$. Το Μέγεθος $c(f)$ παίρνει εξ' ορισμού πάντα θετικές τιμές. Με τον τρόπο αυτό δεν χάνεται καμιά πληροφορία, ενώ δίνεται η δυνατότητα καλύτερης κατανόησης των χαρακτηριστικών του σήματος [Smith, 1997].

Το φάσμα συχνοτήτων δίνει τη θεμελιώδη συχνότητα f_0 του σήματος που εξετάζεται και την αντίστοιχη φάση θ_n . Με τον τρόπο αυτό το σήμα μπορεί να προσεγγιστεί με τη σχέση:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + c_n \cos(2\pi f_0 t + \theta_n) \quad (4.5)$$

Όπου,

a_0 = η τιμή του φάσματος συχνοτήτων που αντιστοιχεί σε μηδενική συχνότητα

c_n = το μέγεθος του φάσματος συχνοτήτων και ισούται με:

$$c_n = \sqrt{F_r(f_n)^2 + F_i(f_n)^2} \quad (4.6)$$

θ_n = η διαφορά φάσης η οποία υπολογίζεται από την σχέση:

$$\theta_n = \tan^{-1} \left(\frac{F_i(f_n)}{F_r(f_n)} \right) \quad (4.7)$$

Πολλές φορές το φάσμα των συχνοτήτων που υπολογίζεται φαίνεται να παρουσιάζει πολλές και μικρές κορυφές σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων του. Αυτό φανερώνει την παρουσία λευκού θορύβου (white noise). Λευκός θόρυβος σημαίνει ότι κάθε μια από τις τιμές του σήματος δεν παρέχει πληροφορίες για τις υπόλοιπες τιμές. Εκτός από το λευκό θόρυβο, πιο συνηθισμένη είναι η παρουσία του έγχρωμου θορύβου (coloured noise). Αυτός ο τύπος θορύβου απαντάται συνήθως στη μορφή του κόκκινου θορύβου (red noise). Στην περίπτωση αυτή το μέγεθος στο φάσμα των χαμηλών συχνοτήτων μειώνεται σταδιακά κατά $1/f^a$ όπου ο εκθέτης a παίρνει συνήθως την τιμή 1 [Smith, 1997].

4.5.3 Κανονικοποιημένο Περιοδόγραμμα Lomb

Πρόκειται για ένα αλγόριθμο που ανέπτυξε ο Lomb (1976) και αργότερα ο Scargle (1982) με κύριο στόχο τη φασματική ανάλυση όχι μόνο ισαπέχουσων τιμών, όπως γινόταν μέχρι τότε με τους μετασχηματισμούς Fourier αλλά και μη ισαπέχουσων, όπως είναι συνήθως οι περισσότερες χρονοσειρές που περιγράφουν μια φυσική διαδικασία. Το Κανονικοποιημένο Περιοδόγραμμα Lomb επιτρέπει τη φασματική ανάλυση σημάτων ακόμη και στην περίπτωση που αυτά περιέχουν θόρυβο και είναι πεπερασμένα σε μήκος, χωρίς να χάνονται πληροφορίες ή να μειώνεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων [Pytharouli, Stiros, 2007], [Pytharouli et al., 2007]. Αυτός ο αλγόριθμος ισοδυναμεί με την προσαρμογή μιας ημιτονικής καμπύλης της μορφής [Koh, Sarkar, 2005]:

$$\mathbf{h}(t) = a \cos\left(\frac{2\pi}{T}(t - \tau)\right) + b \sin\left(\frac{2\pi}{T}(t - \tau)\right) \quad (4.8)$$

Η όλη διαδικασία περιγράφεται αναλυτικά από τον Lomb (1976). Το «Κανονικοποιημένο Περιοδόγραμμα Lomb» για μια περίοδο T δίνεται από τη σχέση [Press et al., 1992]:

$$\mathbf{P}(T) = \frac{1}{2\sigma^2} \left\{ \begin{array}{l} \left[\frac{\left[\sum_{j=1}^N (x_j - \bar{x}) \cos \frac{2\pi(t_i - \tau)}{T} \right]^2}{\sum_{j=1}^N \frac{\cos^2 2\pi(t_i - \tau)}{T}} \right]^2 + \\ \left[\frac{\left[\sum_{j=1}^N (x_j - \bar{x}) \sin \frac{2\pi(t_i - \tau)}{T} \right]^2}{\sum_{j=1}^N \frac{\sin^2 2\pi(t_i - \tau)}{T}} \right]^2 \end{array} \right\} \quad (4.9)$$

Όπου, η παράμετρος τ ορίζεται από την σχέση:

$$\tan \frac{4\pi\tau}{T} = \frac{\sum_{j=1}^N \sin\left(\frac{4\pi t_j}{T}\right)}{\sum_{j=1}^N \cos\left(\frac{4\pi t_j}{T}\right)} \quad (4.10)$$

N = ο συνολικός αριθμός των παρατηρήσεων

t_i = η χρονική στιγμή κατά την οποία καταγράφηκε η τιμή x_i

\bar{x} = η μέση τιμή των παρατηρήσεων $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$

σ^2 = η τυπική απόκλιση των παρατηρήσεων $\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2$

Η τιμή του περιοδογράμματος $P(T)$ είναι αδιάστατη καθώς έχει κανονικοποιηθεί με χρήση του όρου $1 / 2\sigma^2$ και εκφράζει την πιθανότητα ύπαρξης περιοδικότητας με περίοδο T στα δεδομένα.

Ο όρος δεξιά του παράγοντα $1 / 2\sigma^2$ δεν είναι τίποτε άλλο παρά η εξίσωση 4.8. Οι συντελεστές a και b έχουν αντικατασταθεί από ισοδύναμες εκφράσεις τέτοιες ώστε να ελαχιστοποιείται η διαφορά $(x-h(t))^2$.

Οι εκφράσεις αυτές προέκυψαν με εφαρμογή της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων. Η μέγιστη τιμή του περιοδογράμματος προκύπτει όταν το T πάρει την τιμή που ελαχιστοποιεί το άθροισμα των τετραγώνων των υπολοίπων από την προσαρμογή της εξίσωσης 4.8 στα δεδομένα [Scargle, 1982]. Το επίπεδο σημαντικότητας p κάθε κορυφής δίνεται από τη σχέση :

$$p = 1 - (1 - e^{-P(T)})^N \quad (4.11)$$

Για τον υπολογισμό της τιμής του περιοδογράμματος πάνω από την οποία κάθε κορυφή είναι στατιστικά σημαντική για επιλεγμένο επίπεδο σημαντικότητας p χρησιμοποιείται η εξίσωση 4.12 και επιλύουμε ως προς $P(T)$:

$$z_0 = -\ln[1 - (1 - p)^{1/N}] \quad (4.12)$$

Όπου,

z_0 = η τιμή πάνω από την οποία κάθε κορυφή του περιοδογράμματος είναι στατιστικά σημαντική με $(1-p)*100\%$ επίπεδο εμπιστοσύνης

p = το επίπεδο σημαντικότητας

N = ο συνολικός αριθμός των παρατηρήσεων

Το περιοδόγραμμα δίνεται με τη μορφή γραφήματος όπου ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στη συχνότητα f και ο κατακόρυφος στην τιμή του περιοδογράμματος όπως υπολογίζεται από την εξίσωση 4.9 για συγκεκριμένη τιμή περιόδου T ($T = 1/f$).

Για τον υπολογισμό του είναι αναγκαία η επιλογή μιας αρχικής συχνότητας f_0 καθώς επίσης του συνολικού αριθμού συχνοτήτων για τις οποίες θα γίνουν οι υπολογισμοί. Έχοντας προσδιορίσει τις στατιστικά σημαντικές περιόδους - συχνότητες μέσω του περιοδογράμματος, το εύρος A και η διαφορά φάσης ϕ των περιοδικών σημάτων μέσα στη χρονοσειρά, μπορεί να εκτιμηθεί με εφαρμογή της μεθόδου Ελαχίστων Τετραγώνων [Vanicek, 1969], [Scargle, 1982].

Πιο αναλυτικά, για μια χρονοσειρά με N τιμές και για κάθε μία από τις k προσδιορισμένες συχνότητες μπορούμε να γράψουμε:

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{x}_0 + \sum_{j=1}^k A_j \sin(2\pi t_i f_j + \varphi_j), \quad i=1, \dots, N, j=1, \dots, k \quad (4.13)$$

Η λύση του συστήματος των N εξισώσεων με $2k+1$ αγνώστους (A_j, φ_j, x_0) βασίζεται στα Ελάχιστα Τετράγωνα προϋποθέτοντας αρχικά τη γραμμικοποίηση του συστήματος [Mikail, Ackermann, 1976], [Vanicek, Krakowski, 1982].

Η ψεύδιση (aliasing) που αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα για ισαπέχοντα δεδομένα, πρακτικά δεν επηρεάζει την ανάλυση στην περίπτωση των μη ισαπέχοντων δεδομένων.

Επομένως, η συχνότητα Nyquist δεν αποτελεί το ανώτατο όριο για το εύρος του διαστήματος των συχνοτήτων για τις οποίες υπολογίζεται το Κανονικοποιημένο Περιοδόγραμμα Lomb.

Συνεπώς, ακόμη και αν βρεθούν στο περιοδόγραμμα κορυφές σε συχνότητες μεγαλύτερες της συχνότητας Nyquist, αυτές είναι στατιστικά σημαντικές και όχι αποτέλεσμα της ψεύδισης όπως αναφέρεται από τους Press et al. (1992). Για τα μη ισαπέχοντα δεδομένα ο λόγος

$$f_{c,m} = \frac{N}{2 * t_r} \quad (4.14)$$

Όπου,

N = ο συνολικός αριθμός των παρατηρήσεων

t_r = το συνολικό χρονικό διάστημα που καλύπτει η χρονοσειρά, αντιπροσωπεύει μια «μέση» συχνότητα Nyquist καθώς δεν υπάρχει σταθερό χρονικό διάστημα μεταξύ διαδοχικών παρατηρήσεων [Press et al., 1992].

4.6 Μεθοδολογία φασματικής ανάλυσης

Στην εργασία αυτή εφαρμόστηκε ως μέθοδος φασματικής ανάλυσης των χρονοσειρών το Κανονικοποιημένο περιοδόγραμμα του Lomb για τους εξής λόγους:

- ✓ Οι γεωδαιτικοί σταθμοί κατέγραφαν ανά δευτερόλεπτο (ανά 1 sec) και υπήρχε αβεβαιότητα προσδιορισμού του ακριβούς χρόνου καταγραφής των μετρήσεων της τάξης των $\pm 0.5 \text{sec}$, αφού η καταγραφή γινόταν έως το ακέραιο δευτερόλεπτο.
- ✓ Οι καταγραφές των σταθμών παρουσίασαν σημαντικά κενά άλλοτε μιας μέτρησης (κενό 1sec) άλλοτε μεγαλύτερης χρονικής διάρκειας.

Έτσι για να αξιοποιηθεί όλη η πληροφορία χωρίς να αφαιρεθούν τα διαστήματα που δεν κατέγραφαν οι δυο σταθμοί επιλέχθηκε αυτή

μέθοδος φασματικής ανάλυσης αντί του ταχύ μετασχηματισμού Fourier η οποία απαιτεί ισαπέχοντα δεδομένα και αριθμό καταγραφών ο οποίος να είναι δύναμη του 2 (2^n).

Η εφαρμογή του περιοδογράμματος Lomb στις χρονοσειρές έγινε με συγκεκριμένο αλγόριθμο του μαθηματικού προγράμματος Matlab. Στον συγκεκριμένο αλγόριθμο δόθηκαν ως δεδομένα εισαγωγής οι πίνακες των χρόνων και των αντίστοιχων μεταβολών σε αυτούς τους χρόνους, ο αριθμός της υπερδειγματοληψίας που πραγματοποιήθηκε στις μετρήσεις μας καθώς και ο αριθμός της επανάληψης της διαδικασίας υπολογισμού της **συχνότητας Nyquist** από τα εισαγόμενα δεδομένα.

Δεδομένου ότι αναμένονταν συχνότητες μικρότερες του 0.5Hz, η υπερδειγματοληψία, δηλαδή τα παραπάνω δεδομένα που υπήρχαν για τον υπολογισμό των συχνοτήτων ήταν ίση με 2. Αυτό συνέβαινε γιατί οι σταθμοί κατέγραφαν ανά 1 δευτερόλεπτο οπότε βάσει του θεωρήματος Nyquist η δειγματοληψία ήταν διπλάσια της μέσης συχνότητας 0.5Hz, τιμή μέχρι την οποία θα μπορούσαν να ληφθούν επιστροφές κύριων συχνοτήτων.

Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος μετά την εκτέλεσή του επέστρεφε τις υπολογισμένες συχνότητες (f), την αντίστοιχη ισχύ τους (P) και έναν συντελεστή σπουδαιότητας της κάθε ισχύος (prob) και ο οποίος προειδοποιεί κατ' ουσία για συχνότητες οι οποίες μπορεί να εμπεριέχουν αυξημένη πιθανότητα αβεβαιότητας.

Το γεγονός ότι η δειγματοληψία ήταν οριακά μεγαλύτερη από τις συχνότητες που αναμένονταν προκάλεσε την εμφάνιση θορύβου και γι' αυτόν το λόγο η κύρια συχνότητα υπολογίστηκε μόνο στα πειράματα που λήφθηκαν μεγάλη ποσότητα δεδομένων και σε αυτά που κατεγράφησαν ταλαντώσεις με μεγάλο εύρος, εκτός της αβεβαιότητας των γεωδαιτικών σταθμών που χρησιμοποιήθηκαν.

Στην εργασία αυτή εφαρμόστηκε ο αλγόριθμος για κάθε χρονοσειρά της διαμήκους μεταβολής, της εγκάρσιας μεταβολής και της υψομετρικής μεταβολής και αφού έγινε η απαλοιφή των συχνοτήτων με μεγάλη αβεβαιότητα παράχθηκε για κάθε μια ένα διάγραμμα.

Στον άξονα των x των διαγραμμάτων αυτών απεικονίζονται οι υπολογισμένες συχνότητες και στον άξονα των y η αντίστοιχη ισχύς της κάθε συχνότητας. Τα διαγράμματα αυτά ακολουθούν την κατανομή Gauss και η αιχμή ή οι αιχμές κάθε διαγράμματος υποδηλώνουν τις επικρατούσες κύριες συχνότητες.

Τέλος, υπολογίστηκε με τη χρήση της εξίσωσης 4.12 για κάθε μια ομάδα πειραμάτων η τιμή της ισχύος για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% πάνω από την οποία κάθε κορυφή του διαγράμματος είναι στατιστικά σημαντική. Στα διαγράμματα που σχεδιαστήκαν χηράχθηκε η τιμή αυτή με μια κόκκινη γραμμή παράλληλη στον άξονα των x με την υπολογισμένη κάθε φορά τιμή.

Στον πίνακα 4.4 φαίνονται οι τιμές οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των στατιστικά σημαντικών τιμών της ισχύος για κάθε πείραμα καθώς και οι υπολογισμένες αυτές τιμές.

A/A Πειραμάτων	Επίπεδο σημαντικότητας P(%)	Αριθμός παρατηρήσεων N	Στατιστικά σημαντική τιμή ισχύος z_0
1 ^ο	95	1000	5.2
2 ^ο	95	800	4.7
3 ^ο	95	700	4.5
4 ^ο	95	900	4.9

Πίνακας 4.4 Οι υπολογισμένες τιμές της στατιστικά σημαντικής ισχύος για κάθε πείραμα και επίπεδο σημαντικότητας 95%

4.7 Ανάλυση των περιοδογραμμάτων των πειραμάτων

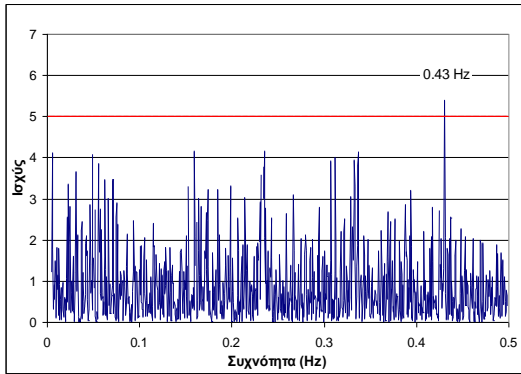
Στο *πρώτο πείραμα* στο οποίο έγινε μέτρηση δύο διαφορετικών στόχων των 128 και 114 που είναι τοποθετημένοι στο ψηλότερο σημείο των δύο πυλώνων M5 και M6 αντίστοιχα, παρατηρείται ότι συχνότητες εξήχθησαν μόνο από τις χρονοσειρές των μεταβολών του στόχου 114.

Στο διάγραμμα της διαμήκους μεταβολής του στόχου 114 (σχήμα 4.23) διακρίνεται συχνότητα με τιμή 0.43Hz εν μέσω υψηλού θορύβου αφού υπάρχουν κορυφές και σε άλλες συχνότητες στατιστικά μη σημαντικές. Το ίδιο ισχύει και για το αντίστοιχο διάγραμμα συχνότητων της εγκάρσιας μεταβολής του ίδιου στόχου στο οποίο ξεχωρίζει η τιμή της συχνότητας 0.43Hz.

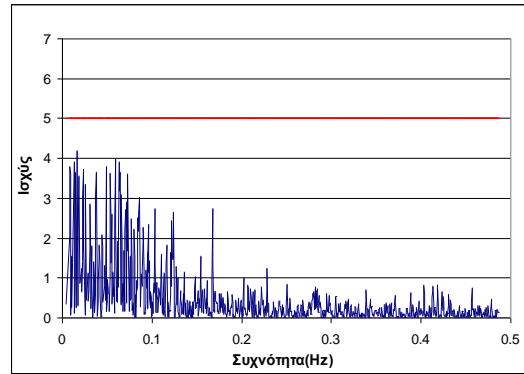
Πρέπει να επισημανθεί πως οι αντίστοιχες χρονοσειρές και για τους δύο σταθμούς βρίσκονταν μέσα στη ζώνη αβεβαιότητας τους. Παρόλο αυτά ήταν δυνατή η άντληση συχνότητας από τις χρονοσειρές του VX κάτι που δεν κατέστη εφικτό από τις αντίστοιχες χρονοσειρές του IS (σχήμα 4.23).

Επιπλέον στα διαγράμματα συχνότητων τη εγκάρσιας μεταβολής των στόχων παρατηρούνται κάποιες τιμές συχνότητων στατιστικά σημαντικές με τιμές μικρότερες των 0.10Hz. Αυτές οι συχνότητες προφανώς οφείλονταν σε κάποιο συστηματικό θόρυβο των μετρήσεων των ρομποτικών σταθμών και εξάλλου είναι εκτός του πεδίου στο οποίο κινούνται οι συχνότητες των εφαρμογών.

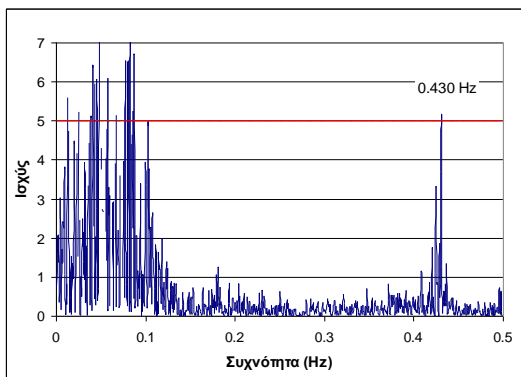
Στα διαγράμματα της κατακόρυφης μεταβολής συχνότητα εμφανίζεται μόνο σε αυτό του στόχου 114 (σχήμα 4.23) πάλι με την ίδια τιμή 0.43Hz εν αντιθέσει με το αντίστοιχο διάγραμμα του στόχου 128 στο οποίο δεν υπήρξε κάποια στατιστικά σημαντική κορυφή.



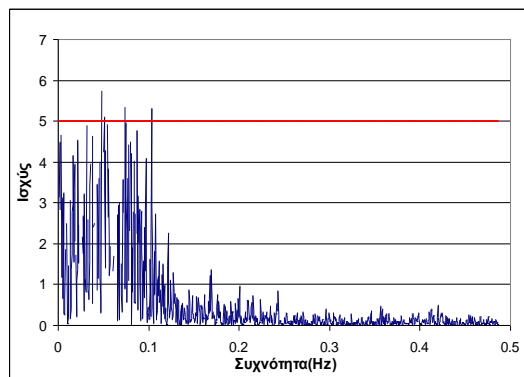
Διαμήκης μεταβολή – VX – στόχος 114



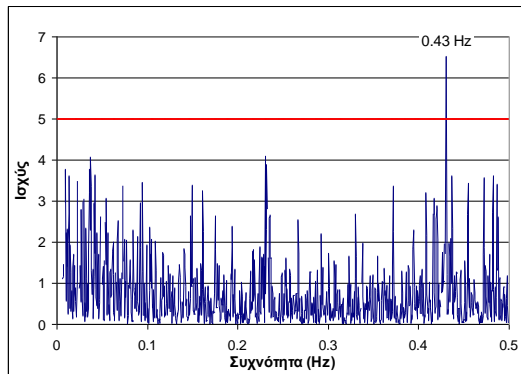
Διαμήκης μεταβολή – IS – στόχος 128



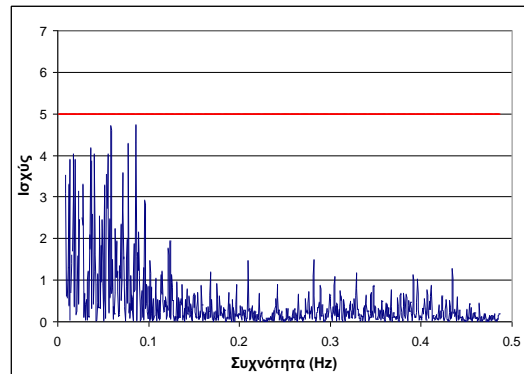
Εγκάρσια μεταβολή – VX – στόχος 114



Εγκάρσια μεταβολή – IS – στόχος 128



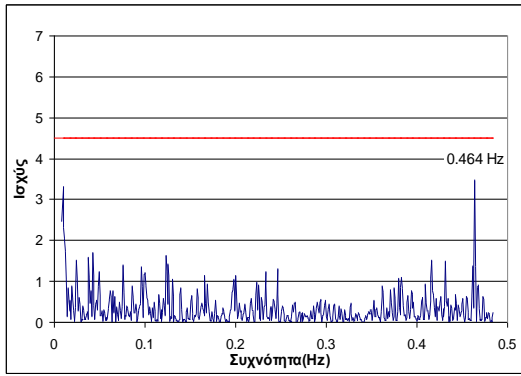
Κατακόρυφη μεταβολή – VX – στόχος 114



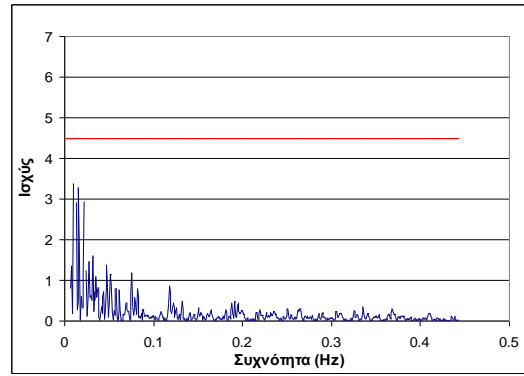
Κατακόρυφη μεταβολή – IS – στόχος 128

Σχήμα 4.23 Περιοδογράμματα Lomb, διαμήκους, εγκάρσιας και κατακόρυφης μεταβολής των στόχων 114, 128

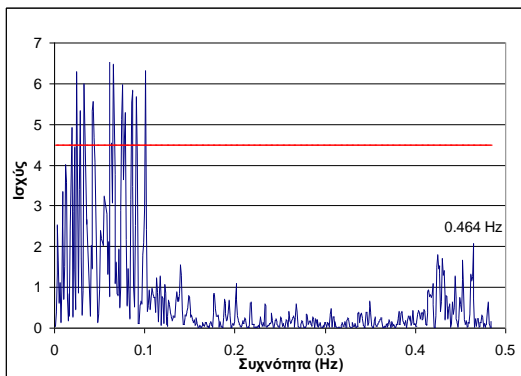
Στο δεύτερο πείραμα μετρήθηκε ταυτόχρονα και από τους δύο γεωδαιτικούς σταθμούς IS και VX ο στόχος 128 που βρίσκεται στο ψηλότερο σημείο στη βόρεια πλευρά του πυλώνα M6.



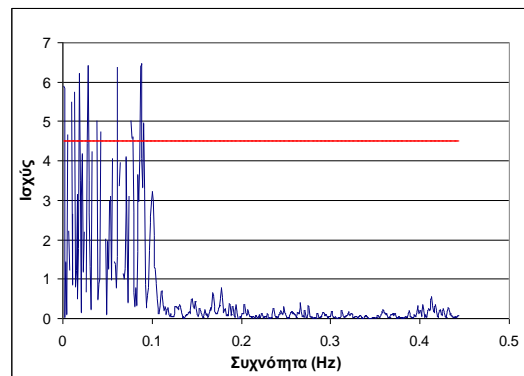
Διαμήκης μεταβολή – VX – στόχος 128



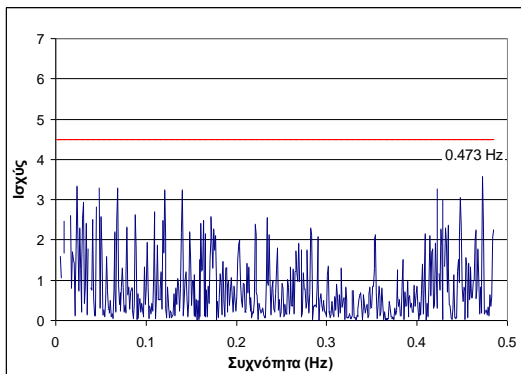
Διαμήκης μεταβολή – IS – στόχος 128



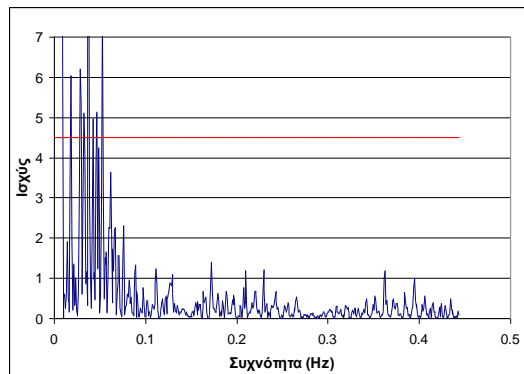
Εγκάρσια μεταβολή – VX – στόχος 128



Εγκάρσια μεταβολή – IS – στόχος 128



Κατακόρυφη μεταβολή – VX – στόχος 128

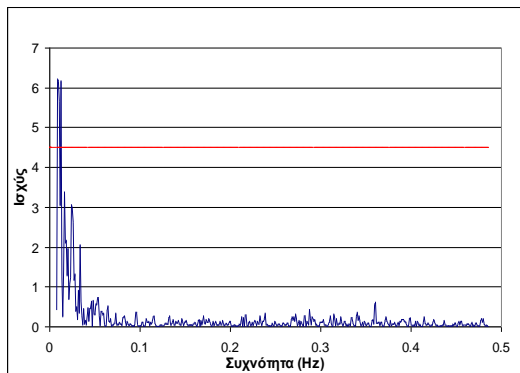


Κατακόρυφη μεταβολή – IS – στόχος 128

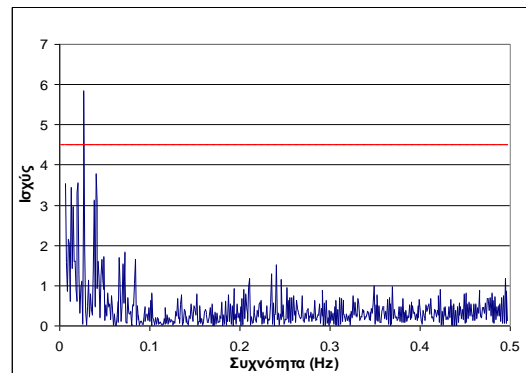
Σχήμα 4.24 Περιοδογράμματα Lomb, διαμήκους, εγκάρσιας και κατακόρυφης μεταβολής του στόχου 128

Σε αυτό το πείραμα δεν προέκυψαν στατιστικά σημαντικές συχνότητες εξαιρουμένου κάποιων συχνοτήτων μικρότερων των 0.10Hz που εμφανίστηκαν στα διαγράμματα της εγκάρσιας μεταβολής και των δύο οργάνων και στο διάγραμμα της κατακόρυφης μεταβολής του IS(σχήμα 4.24).

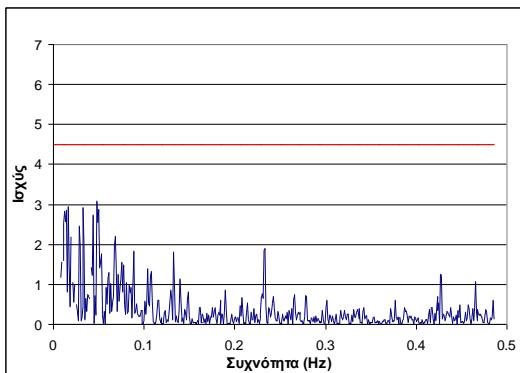
Όπως αναφέρθηκε και για το πρώτο πείραμα αυτές οι συχνότητες οφείλονται στην αβεβαιότητα των οργάνων.



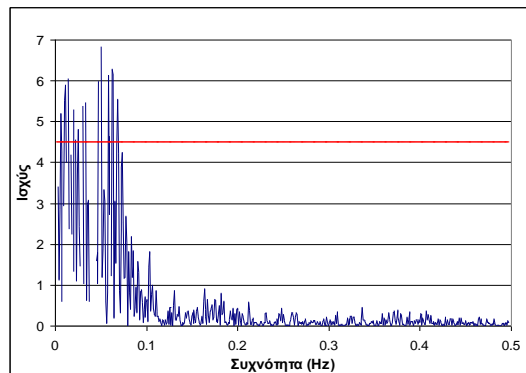
Διαμήκης μεταβολή – VX – στόχος 128(Ψηλά)



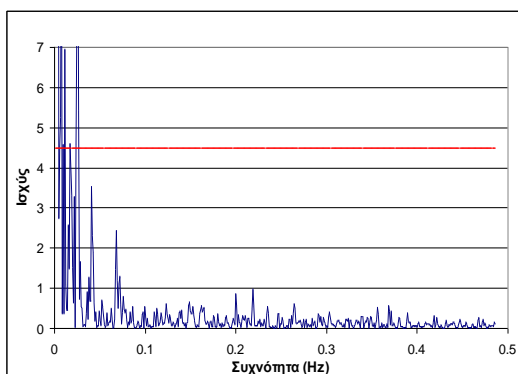
Διαμήκης μεταβολή – IS – στόχος 126(Χαμηλά)



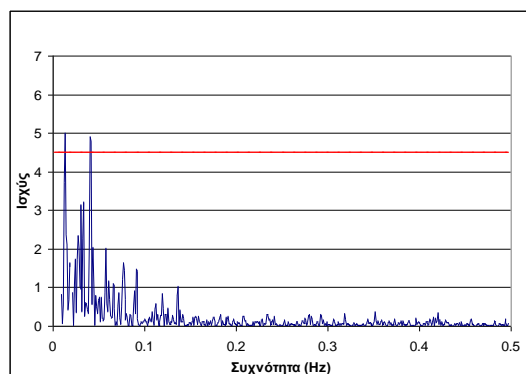
Εγκάρσια μεταβολή – VX – στόχος 128(Ψηλά)



Εγκάρσια μεταβολή – IS – στόχος 126(Χαμηλά)



Κατακόρυφη μεταβολή – VX – στόχος 128(Ψηλά)



Κατακόρυφη μεταβολή – IS – στόχος 126(Χαμηλά)

Σχήμα 4.25 Περιοδογράμματα Lomb, διαμήκους, εγκάρσιας και κατακόρυφης μεταβολής των στόχων 128(Ψηλά) και 126(Χαμηλά)

Θα πρέπει να επισημανθεί πως οι χρονοσειρές του VX απέδωσαν κύρια συχνότητα της οποίας η ισχύς μπορεί να μην είναι στατιστικά

σημαντική, αλλά εφόσον εμφανίστηκε συστηματικά δεν πρέπει να αγνοηθεί.

Στα διαγράμματα της διαμήκους και εγκάρσιας μεταβολής του στόχου 128 η συχνότητα που εμφανίστηκε είχε τιμή 0.464Hz και στο διάγραμμα της κατακόρυφης μεταβολής (σχήμα 4.24) ήταν ίση με 0.474Hz. Στα δύο τελευταία διαγράμματα η κύρια συχνότητα προκύπτει εν μέσω αρκετού θορύβου από τις συχνότητες γύρω από αυτήν.

Στο **τρίτο πείραμα** μετρήθηκαν οι στόχοι 128 από το IS και 126 από το VX οι οποίοι βρίσκονται στον ίδιο πυλώνα αλλά σε διαφορετικό ύψος. Ο στόχος 128 βρίσκεται στο ψηλότερο σημείο του πυλώνα ενώ ο στόχος 126 είναι τοποθετημένος 19m χαμηλότερα.

Στα διαγράμματα συχνοτήτων για αυτό το πείραμα δεν προέκυψαν στατιστικά σημαντικές συχνότητες και αυτό οφείλεται στον μικρό αριθμό καταγραφών (≈ 500 καταγραφές) λόγω της μικρής διάρκειας και των κενών καταγραφών. Εξαιτίας αυτής της μικρής ποσότητας των καταγραφών παρουσιάζονται και εδώ στατιστικά σημαντικές συχνότητες μικρότερες των 0.05Hz λόγω του θορύβου των μετρήσεων και επειδή δεν μπορεί να εξαχθεί αναμενόμενη συχνότητα (σχήμα 4.25).

Στο **τέταρτο πείραμα** πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε κοινό αμφιπρισματικό στόχο (GRZ4 360°) από τους δύο γεωδαιτικούς σταθμούς.

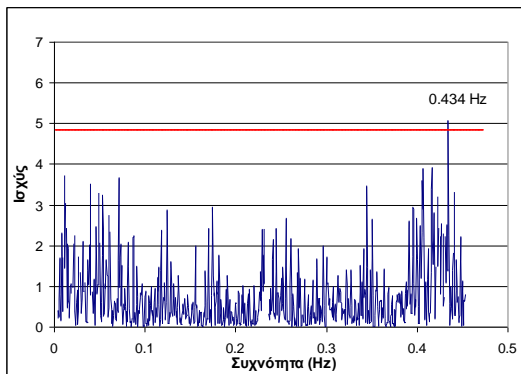
Όσον αφορά τα διαγράμματα της διαμήκους μεταβολής για το VX προέκυψε κύρια συχνότητα 0.434Hz η οποία ήταν και στατιστικά σημαντική ενώ για το IS (σχήμα 4.26) προέκυψε κύρια συχνότητα ίση με 0.433Hz η οποία ήταν κάτω από το διάστημα εμπιστοσύνης. Η συχνότητα αυτή βέβαια δεν μπορεί να αγνοηθεί αφού πλησιάζει σε τιμή αυτή του διαγράμματος του VX (απόκλιση 0.001Hz).

Θα πρέπει να επισημανθεί πως ενώ οι χρονοσειρές και των δύο γεωδαιτικών σταθμών βρίσκονται μέσα στα όρια της αβεβαιότητας των μετρήσεων εξήχθησαν κύριες συχνότητες από την εφαρμογή του περιοδογράμματος του Lomb.

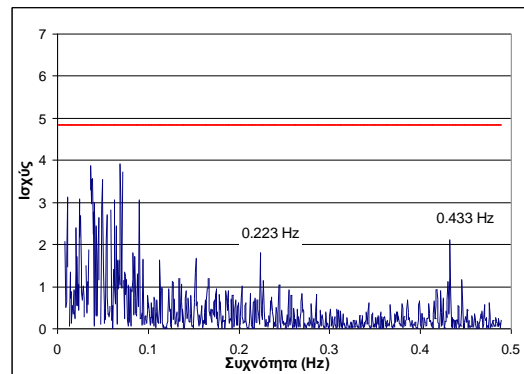
Από τα διαγράμματα συχνοτήτων της εγκάρσιας μεταβολής του στόχου εξήχθησαν κύριες συχνότητες 0.431Hz και 0.43Hz για τον VX και IS καθώς και οι δευτερεύουσες συχνότητες 0.157Hz και 0.153Hz, οι οποίες είναι εκτός επιπέδου εμπιστοσύνης αντίστοιχα (σχήμα 4.26).

Τέλος από τα διαγράμματα συχνοτήτων της κατακόρυφης μεταβολής προέκυψαν οι κύριες συχνότητες 0.431 και 0.433 για VX και IS αντίστοιχα καθώς και η δευτερεύουσα συχνότητα 0.153Hz και από τους δύο σταθμούς (σχήμα 4.26).

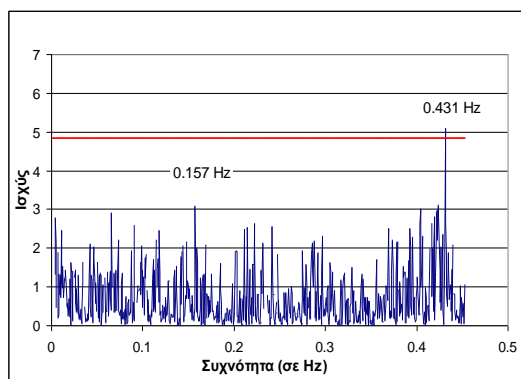
Στον πίνακα 4.4 παρουσιάζονται συνοπτικά οι κύριες και δευτερεύουσες συχνότητες για όλες τις μεταβολές και για τους δύο σταθμούς.



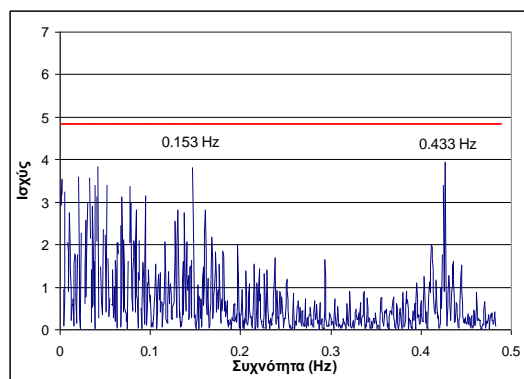
Διαμήκης μεταβολή – VX – στόχος GRZ4(OMNI)



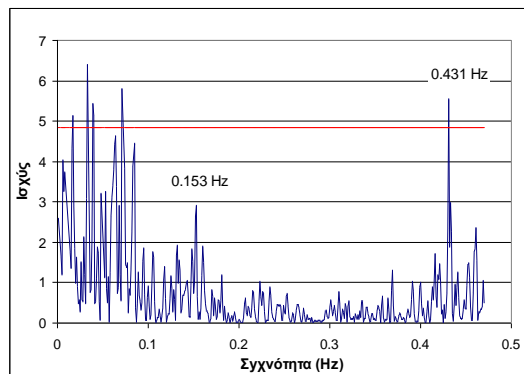
Διαμήκης μεταβολή – IS – στόχος GRZ4(OMNI)



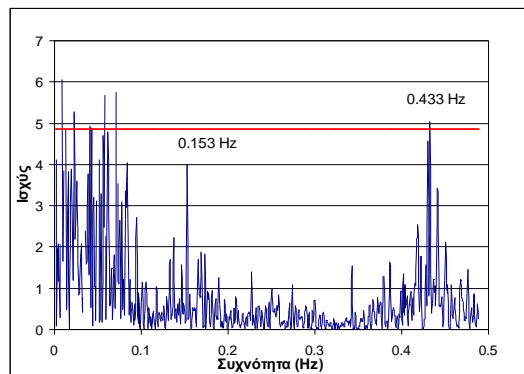
Εγκάρσια μεταβολή – VX – στόχος GRZ4(OMNI)



Εγκάρσια μεταβολή – IS – στόχος GRZ4(OMNI)



Κατακόρυφη μεταβολή – VX – στόχος GRZ4(OMNI)



Κατακόρυφη μεταβολή – IS – στόχος GRZ4(OMNI)

Σχήμα 4.26 Περιοδογράμματα Lomb, διαμήκους, εγκάρσιας και κατακόρυφης μεταβολής του στόχου GRZ4-OMNI

Με κόκκινη γραμματοσειρά διακρίνονται οι συχνότητες οι τιμές ισχύος των οποίων βρίσκονται εκτός του διαστήματος εμπιστοσύνης.

Αυτό που παρατηρείται είναι πως ως κύρια συχνότητα εμφανίζεται η τιμή 0.43Hz ($T=2.33\text{sec}$) για όλα τα πειράματα εκτός από το δεύτερο

πείραμα που πρόεκυψε συχνότητα 0.464Hz για τη διαμήκη και εγκάρσια μεταβολή η οποία βρίσκεται εκτός διαστήματος εμπιστοσύνης.

Στο 4ο πείραμα εμφανίστηκαν για την εγκάρσια και κατακόρυφη μεταβολή του στόχου δευτερεύουσες συχνότητες με τιμή 0.153Hz κατά κύριο λόγο οι οποίες είναι εκτός διαστήματος εμπιστοσύνης και μπορεί να οφείλονται είτε σε κάποια ταλάντωση του κιγκλιδώματος είτε σε κάποια ημιστατική μετακίνηση του καταστρώματος.

	Βασικές συχνότητες (σε Hz)					
	VX			IS		
	x	y	z	x	y	z
1^ο πείραμα	0.43	0.43	0.43	-	-	-
2^ο πείραμα	0.464	0.464	0.474	-	-	-
3^ο πείραμα	-	-	-	-	-	-
4^ο πείραμα	0.434	0.434 0.157	0.431 0.153	0.433	0.433 0.153	0.431 0.153

Πίνακας 4.5 Βασικές συχνότητες που πρόεκυψαν με τη μέθοδο του περιοδογράμματος Lomb

Η τιμή που εξήχθη από τα πειράματα είναι κοντά στην αναμενόμενη (μικρότερη από 0.5Hz) ιδιοσυχνότητα μιας εύκαμπτης κατασκευής όπως είναι η καλωδιωτή γέφυρα του Ευρίπου. Εξάλλου και από άλλες σχετικές εργασίες με εφαρμογή στην ίδια γέφυρα με γεωτεχνικά [Lekidis, et.al, 2001] ή γεωδαιτικά όργανα [Lekidis, et.al, 2005] πρόεκυψαν ιδιοσυχνότητες κοντά στην τιμή που υπολογίστηκε από τις μετρήσεις της εργασίας αυτής (0.48Hz, 0.50Hz με RTS 0.45Hz με GPS) αντίστοιχα.

Θα πρέπει να σημειωθεί πως η κύρια ιδιοσυχνότητα ως τιμή μπορεί να επηρεασθεί από πληθώρα παραγόντων (είδος και ένταση διέγερσης, θερμοκρασία περιβάλλοντος, ταχύτητα ανέμου, βαθμός προέντασης καλωδίων κλπ.). Οι ιδιοσυχνότητες που εξήχθησαν από τις μετρήσεις των πειραμάτων αναφέρονται σε χαμηλό επίπεδο διέγερσης της γέφυρας (λειτουργικό φορτίο) ενώ ο μελετητής εξετάζει τη κάθε κατασκευή για υψηλό επίπεδο διέγερσης (σεισμό σχεδιασμού).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

5.1 Γενικά

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως αντικείμενό της την αξιολόγηση της χρήσης δύο συγχρονισμένων αυτόματα ελεγχόμενων γεωδαιτικών σταθμών (RTS) στη παρακολούθηση ταλαντώσεων τεχνικών έργων, με εφαρμογή στην καλωδιωτή γέφυρα της Χαλκίδας.

Για τον σκοπό αυτό διεξήχθησαν τέσσερα διαφορετικά πειράματα στην καλωδιωτή γέφυρα της Χαλκίδας, με τη χρήση των ρομποτικών σταθμών IS της εταιρείας Topcon και VX της εταιρείας Trimble, αφού προηγουμένως συγχρονίστηκαν τα χρονόμετρά τους με τον παγκόσμιο χρόνο UTC Time.

Από την επεξεργασία και ανάλυση των μετρήσεων προέκυψαν ποικίλα συμπεράσματα τα οποία χωρίστηκαν σε τρεις κατηγορίες :

- σε αυτά που αφορούν στην ακρίβεια και την αξιοπιστία των δύο γεωδαιτικών σταθμών που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα,
- στην αξιολόγηση της μεθοδολογίας που χρησιμοποιήθηκε όσον αφορά την χρήση δύο ρομποτικών σταθμών των οποίων τα χρονόμετρα συγχρονίστηκαν με σκοπό την σύγκριση των αποτελεσμάτων τους, και
- στα συμπεράσματα που προέκυψαν για την κατασκευή που μελετήθηκε, η οποία ήταν η καλωδιωτή γέφυρα της Χαλκίδας, όσον αφορά την συμπεριφορά της και την αντιστοιχία με στοιχεία της μελέτης και με προηγούμενες έρευνες.

5.2 Συμπεράσματα για την αξιοπιστία των ρομποτικών σταθμών IS και VX

Όσον αφορά στην αξιοπιστία των RTS που χρησιμοποιήθηκαν προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- ❖ Οι χρονοσειρές και των δύο ρομποτικών σταθμών εμφάνισαν κενά καταγραφών κυρίως της τάξης της 1 μέτρησης ανά λεπτό και άλλοτε για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.
- ❖ Και οι δύο σταθμοί για κάποια χρονικά διαστήματα αδυνατούσαν να καταγράψουν ολόκληρους κύκλους ταλαντώσεων. Αυτό απεικονίστηκε στα γραφήματα όπου υπήρχαν χρονικά διαστήματα όπου δεν καταγράφονταν

μεταβολές. Το γεγονός αυτό μάλλον οφείλεται στο ότι η απόσταση απαιτεί μεγαλύτερο χρονικό διάστημα για την καταγραφή της από τον σταθμό εν αντιθέσει με τις γωνίες που καταγράφονται απευθείας με τη λήψη της μέτρησης.

- ❖ Η αβεβαιότητα των συντεταγμένων που υπολογίστηκαν ήταν της τάξης του εκατοστού ($\pm 5\text{mm}$).
- ❖ Δεν ήταν ξεκάθαρος ο ακριβής χρόνος της κάθε καταγραφής αφού και οι δυο σταθμοί κατέγραφαν ανά 1sec με ανάλυση στο ακέραιο δευτερόλεπτο, άρα υπάρχει σφάλμα $\pm 0.5\text{sec}$.
- ❖ Οι δύο σταθμοί κλείδωναν σε διαφορετικό σημείο κάποιους από τους στόχους γεγονός που καταγράφηκε ορισμένες φορές και με το απλό αλλά και με το OMNI πρίσμα.

5.3 Συμπεράσματα για την μεθοδολογία της χρήσης δυο συγχρονισμένων γεωδαιτικών σταθμών

Στη διπλωματική εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκαν δυο ρομποτικοί σταθμοί αφού συγχρονίστηκαν τα ρολόγια τους και λήφθησαν ταυτόχρονες μετρήσεις σε κοινούς ή μη στόχους. Από αυτή τη μέθοδο εξήχθησαν χρήσιμα συμπεράσματα όπως :

- ❖ Ο συγχρονισμός των σταθμών είναι επιτυχής και μπορεί να μας δώσει πληροφορίες για διαφορετικούς στόχους ταυτόχρονα
- ❖ Τα δεδομένα μπορούν να συνδυαστούν και με μετρήσεις άλλων γεωδαιτικών οργάνων όπως το GPS είτε γεωτεχνικών οργάνων
- ❖ Με τη χρήση δύο διαφορετικών σταθμών διαπιστώθηκε πως ειδικά σε μετακινήσεις που βρίσκονταν πολύ κοντά ή μέσα στα όρια της αβεβαιότητας των οργάνων τα δύο όργανα δεν κατέγραφαν παρόμοιες μεταβολές.
- ❖ Όσον αφορά τα εύρη ταλαντώσεων διαπιστώθηκε μέσω της μεθόδου συμφωνία των δύο σταθμών σε περιπτώσεις που υπήρχαν μεγάλες και έντονες ταλαντώσεις και μερική ασυμφωνία σε χαμηλού εύρους μετακινήσεις.
- ❖ Στις περιπτώσεις που παρουσιάστηκαν κενά στις καταγραφές του ενός γεωδαιτικού σταθμού -σε χρονικά σημεία που υπήρχαν σημαντικές μεταβολές- εξήχθη η χαμένη πληροφορία από τα δεδομένα του δεύτερου σταθμού εφ' όσον παρακολουθούσαν τον ίδιο στόχο.
- ❖ Η μέθοδος αυτή παρείχε τη δυνατότητα λήψης μετρήσεων σημείων ελέγχου που βρίσκονται σε διαφορετική θέση πάνω στη γέφυρα ώστε μέσα από την επεξεργασία των μετρήσεων να διαπιστωθεί η συμπεριφορά της γέφυρας σε παραπάνω από ένα στοιχείο της για δεδομένο χρονικό διάστημα.

- ❖ Η συχνότητα καταγραφής των μετρήσεων ήταν οριακά επαρκής αφού σύμφωνα με το θεώρημα Nyquist αφού εξετάστηκε μια εύκαμπτη κατασκευή με κύριες ιδιοσυχνότητες μικρότερες του 1Hz θα έπρεπε η δειγματοληψία να είναι της τάξης των 2Hz τουλάχιστον. Για το λόγο αυτό οι κύριες συχνότητες προέκυψαν οριακά και με την ύπαρξη αρκετού θορύβου γύρω από τις τιμές των υπολογισμένων συχνοτήτων.

5.4 Συμπεράσματα για την συμπεριφορά της καλωδιωτής γέφυρας του Ευρίπου

Ένας από τους στόχους της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας ήταν η εξαγωγή συμπερασμάτων για τη δυναμική συμπεριφορά-απόκριση της καλωδιωτής γέφυρας του Ευρίπου και τα οποία είναι:

- ❖ Κατά τον διαμήκη άξονα της γέφυρας δεν κατεγράφησαν σημαντικές ταλαντώσεις ούτε στους πυλώνες ούτε και στο κατάστρωμα και οι περισσότερες τιμές βρίσκονται στα όρια της αβεβαιότητας των δύο σταθμών.
- ❖ Στον εγκάρσιο άξονα της γέφυρας και συγκεκριμένα από τις μετρήσεις των στόχων που είναι τοποθετημένοι στους πυλώνες κατεγράφησαν σημαντικές ταλαντώσεις της τάξης των 3cm
- ❖ Στον κατακόρυφο άξονα και συγκεκριμένα στο μέσο του ανοίγματος του καταστρώματος κατεγράφησαν αξιοσημείωτες ταλαντώσεις της τάξης των 6cm.
- ❖ Η κύρια συχνότητα ταλάντωσης που υπολογίστηκε με τη μέθοδο της φασματικής ανάλυσης μέσω του κανονικοποιημένου περιοδογράμματος Lomb υπολογίστηκε ίση με 0.43Hz και από τους δύο γεωδαιτικούς σταθμούς με μικρές αποκλίσεις της τάξης του χιλιοστού του Hz (0.001Hz).
- ❖ Από τις μετρήσεις που έγιναν σε στόχους σε αντιδιαμετρικά σημεία των δύο πυλώνων M5 και M6 κατεγράφησαν αντίρροπες ταλαντώσεις κατά την διέλευση του λειτουργικού φορτίου (διερχόμενα οχήματα).

5.5 Προτάσεις

Αξιοποιώντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την εκπόνηση αυτής της εργασίας και τους προβληματισμούς που γεννήθηκαν στο πεδίο προτείνονται τα εξής:

- ❖ Είναι σαφές ότι είναι απαραίτητη μικρότερη αβεβαιότητα στη λήψη των στοιχείων και στον υπολογισμό των συντεταγμένων.

Για τον λόγο αυτό κρίνεται απαραίτητη η χρήση ρομποτικών γεωδαιτικών σταθμών με μεγαλύτερη ακρίβεια στη μέτρηση του μήκους και με μεγαλύτερη συχνότητα καταγραφής.

- ❖ Πρέπει να κατασκευαστούν αλγόριθμοι οι οποίοι να εξαλείφουν τη χρονική διαφορά που παρουσιάζουν οι ρομποτικοί σταθμοί στη καταγραφή των γωνιών και των μηκών υπολογίζοντας κάθε φορά την τιμή της έτσι ώστε μετά να γίνεται η κατάλληλη αντιστοίχιση στις μετρήσεις γωνιών και αποστάσεων.
- ❖ Η καταγραφή του χρόνου από τους σταθμούς πρέπει να γίνει με μεγαλύτερη ανάλυση, της τάξης του χιλιοστού του δευτερολέπτου (0.001 sec), ώστε να είναι σαφής ο ακριβής χρόνος της κάθε καταγραφής και να μπορούν οι καταγραφές να είναι πιο λεπτομερώς συγκρίσιμες αλλά και να είναι συγκεκριμένος ο χρόνος αναφοράς τους.
- ❖ Πρέπει να γίνει έλεγχος της σταθερότητας των χρονομέτρων των ρομποτικών σταθμών και προσδιορισμός του συστηματικού (drift) ή τυχαίου σφάλματος τους στο πέρασμα του χρόνου, ώστε να γίνονται οι κατάλληλες διορθώσεις.
- ❖ Θα πρέπει να αυξηθεί η συχνότητα μέτρησης-καταγραφής των σταθμών με σκοπό τη λεπτομερέστερη παρακολούθηση των μετακινήσεων τεχνικών έργων.
- ❖ Προκειμένου να μπορούν να προσδιοριστούν οι συχνότητες της ταλάντωσης με τα περιοδογράμματα Lomb, χρειάζεται μεγαλύτερη συχνότητα δειγματοληψίας-καταγραφής περίπου έως και 10Hz.
- ❖ Με τη χρήση ενός μετεωρολογικού σταθμού θα μπορούσε να μελετηθεί η επίδραση στη δυναμική συμπεριφορά της γέφυρας και των άλλων παραγόντων δυναμικών παραμορφώσεων-πλην του λειτουργικού φορτίου- όπως είναι η θερμοκρασία και ο άνεμος.
- ❖ Ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η διεξαγωγή μετρήσεων με ταυτόχρονη χρήση δεκτών GPS και ρομποτικών σταθμών στα ίδια σημεία ελέγχου με την παρούσα διπλωματική εργασία και η σύγκριση των αποτελεσμάτων τους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Bath M. (1974), *"Spectral analysis in geophysics"*, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 563p

Brunner, F., K., (2004). *"Fiber Optic sensors: an overview"*, *Proc. of 1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Structural Works and Structural Engineering*, Nottingham, UK, June, 2004

Harman T. L., J. Dabney and N. Richert, *"Advanced Engineering Mathematics with Matlab"*, Brooks/Cole, (2000), 750p

Καραγιάννης Χ., *"Σχεδιασμός κατασκευών από ωπλισμένο σκυρόδεμα έναντι σεισμού"*, εκδόσεις Σοφία, Θεσσαλονίκη 2008

Koh J. and T.K. Sarkar (2005), *"Spectral analysis of nonuniformly spaced data using least square method"*, *Digital Signal Processing*, 15, pp. 44-55

Κοκκίνου Ε., *"Καταγραφή ταλαντώσεων σιδηροδρομικής γέφυρας Γοργοποτάμου με ρομποτικό θεοδόλιχο (RTS)"*, ΤΠΜ, Πανεπιστήμιο Πάτρας, Πάτρα 2007, Διατριβή μεταπτυχιακού

Λάμπρου Ε., *Εφαρμοσμένα θέματα γεωδαισίας, Σημειώσεις μαθήματος*, ΕΜΠ, ΣΑΤΜ, Αθήνα 2008

Λάμπρου Ε., Πανταζής Γ., *Εφαρμοσμένη γεωδαισία*, Εκδόσεις Ζήτη, ISBN 978-960-456-205-3, 2010

Lekidis V.A., C. Z. Karakostas and D. G. Talaslidis, *"Instrumentation, Measurements and Numerical Analysis of Bridges : An Example of the Cable-Stayed Bridge on Evripos Channel, Greece"*, *Proceedings of the Advanced NATO Workshop on Strong Motion Instrumentation for Civil Engineering Structures*, M. Erdik et al. (eds.), Istanbul, Turkey, 1999, Kluwer Academic Publishers, 2001, pp.481-493.

Lekidis V., Tsakiri M., Makra K., Karakostas C., Klimis N., Sous I., *"Evaluation of dynamic response and local soil effects of the Evripos cable-stayed bridge using multi-sensor monitoring systems"*, *Engineering Geology*, Vol. 79, 2005, pp.43-59.

Lemmon T., Jung R. , Trimble S6 Mag Drive servotechnology, 2005

Μαριτσούδης Δ., “Παρακολούθηση δυναμικής συμπεριφοράς της υψηλής καπνοδόχου του ΑΗΣ Λαυρίου της ΔΕΗ Α.Ε”, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, Αθήνα 2008, Διπλωματική εργασία

Mikail E. and Ackermann F. (1976), “*Observations and Least Squares*”, A. Dun-Donnelley Publisher, New York, 497p.

Μπακογιάννης Ν., “Μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς ανεμογεννητριών (Α/Γ) μέσω της συνδυασμένης καταγραφής και επεξεργασίας δεδομένων από ρομποτικό γεωδαιτικό σταθμό, 3Δ επίγειο σαρωτή LASER και σύστημα βιντεομετρίας”, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, Αθήνα 2010

Νησωτάκης Γ., “Διερεύνηση λειτουργίας του γεωδαιτικού σταθμού Leica TCS-1800 για την παρακολούθηση κατασκευών σε συνθήκες ταλάντωσης με χρήση σεισμικής τράπεζας ακριβείας και μεθόδων φασματικής ανάλυσης”, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, Αθήνα 2007, Διπλωματική εργασία

Pytharouli S. and Stiros S., “*Spectral analysis of unevenly spaced or discontinuous data using the “Normperiod” code*”, Computers and Structures, 2007

Pytharouli S., Kontogianni V., Psimoulis P. and Stiros S., “*Kremasta Dam (Greece): Long-term Performance and Behaviour of the highest earthfill dam in Europe*”, *Proceedings of 5th International Conference on Dam Engineering*, Lisbon, 16-17 February, pp. 465-471, 2007.

Πυθαρούλη Ι. Σ., “Μελέτη της μακροχρόνιας παραμόρφωσης του φράγματος των κρεμαστών με βάση ανάλυση γεωδαιτικών δεδομένων και μεταβολών στάθμης”, Πανεπιστήμιο Πάτρας, Πάτρα 2007, Διδακτορική διατριβή

Psimoulis P., Stiros E. “*Measurement of deflections and of oscillation frequencies of engineering structures using Robotic Theodolites (RTS)*”, Engineering Structures, 2007, 3312-3324.

Press William H., Teukolsky Saul A., Vetterling William T., Flannery Brian P., “*Numerical Recipes in C The Art of Scientific Computing Second Edition*”, Cambridge University Press, 1988, 1992

Proakis J.G. and Manolakis D.G, “*Digital Signal Processing*”, Prentice Hall, New York, 968p, 1996

- Quirion, M., «Fiber optic sensor technology and applications», 2005
- Roberts G.W, Brown C and Meng X., *"Deflection Monitoring and Frequency Analysis of the Forth Road Bridge Using GPS"*, 3rd IAG/ 12th Symposium, Baden, 2005.
- Σακελλαρίου Μιχαήλ, *"Γεωτεχνική Μηχανική"*, Αθήνα 2008
- Scargle J. D., *"Studies in Astronomical Time Series Analysis. II. Statistical Aspects of Spectral Analysis of Unevenly Spaced Data"*, The Astrophysical Journal, Vol. 263, 1982, pp. 835 – 853
- Smith S. W. (1997), *"The Scientist's and Engineer's Guide to Digital Signal Processing"*, California Technical Publishing
- Τεχνική περιγραφή έργου *"Επιθεώρηση και συντήρηση καλωδιωτής Γέφυρας Ευρίπου"*, Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ, 2009
- Trimble VX, Spatial Station, User Guide, 2007
- Vanicek P, *"Approximate Spectral Analysis by Least – Squares Fit"*, Astrophysics and Space Science, 4, 1969, pp. 387 – 91
- Vanicek P. and E. Krakiwski, *"Geodesy. The concepts"*, North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1982, 691p.
- VX Datasheet, Trimble, 2008*
- Wilson, J.S.. "Ten measurements myths", *Test Engineering and Management*, 2006
- White paper, TS30, Switcher land 2009
- Wong K.-Y., Man K-L and Chan W-Y., *"Monitoring Hong Kong's Brigdes Real-Time Kinematic Spans Gap"*, *GPS World*, 2001, p.10-18
- Ψιμούλης Π., *"Τεκμηρίωση δυνατότητας μετρήσεων ταλαντώσεων δύσκαμπτων κατασκευών με GPS και ρομποτικό θεοδόλιχο (RTS): Πειραματική, αναλυτική προσέγγιση και εφαρμογές"*, Πανεπιστήμιο Πάτρας, Πάτρα 2009, Διδακτορική διατριβή

ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΟΙ ΤΟΠΟΙ (ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ)

<http://www.arup.com/MillenniumBridge/index.html>

<http://www.geotech.gr/index.asp>

<http://www.leica-geosystems.com/en/index.htm>

<http://www.mathworks.com/support>

<http://www.meteo.gr>

<http://poseidon.hcmr.gr>

<http://www.treecomp.gr/1/1/>

<http://www.trimble.com/>

ABSTRACT

MONITORING THE OSCILLATIONS OF THE TECHNICAL STRUCTURES BY USING SYNCHRONISED ROBOTIC TOTAL STATIONS APPLICATION AT THE EVRIPOS HIGH BRIDGE

Aim of this thesis is firstly to evaluate the use of automatically controlled total stations (RTS) to monitor oscillations of a bridge and also the comparison between two different stations of this type having synchronized the time of record with the global time zone UTC.

As an ultimate goal is set to evaluate the abilities of the geodetic stations in those applications, afterwards to compare the measurements in common objectives and finally to draw conclusions about the response of the bridge.

In **the first chapter**, there is a reference to the research of oscillations of the structures and the equipment/instruments used in the various methodologies implemented. Furthermore, there is citation of useful meanings of the terms used in this thesis and presentation of a series of applications in the dynamic deformation of structures.

In **the second chapter**, there is description of the characteristics of automatically controlled total stations (RTS)-since they are the main instruments used for this thesis- and the errors performed. In addition, the technical characteristics used of controlled total station of the IS of Topcon company and the VX of Trimble company are stated.

In **the third section**, there are the details on the scope of the cable bridge Evripos in Chalkida and its network monitoring are provided. Furthermore, the chapter refers to the selection of experiments, the preparation and their conducting. Finally, the necessary calculations are mentioned in detail in order to process the raw data to analyze them and draw useful conclusions.

In **the fourth chapter**, there is the analysis of all generated graphs of time series in the area of time-space-frequencies.

In **the fifth chapter**, there is the recording of all conclusions reached by the majority of processes of this thesis and a number of suggestions are provided for further investigation.

By processing and analyzing the measurements, various conclusions were accrued, which were afterwards divided in three categories:

- The first category refers to those that relate to the accuracy and reliability of two geodetic stations used in the experiments.

- The second category refers to the evaluation of the methodology used with regards to the use of the two robotic stations, whose chronometers were synchronized so as to compare the results, and
- The third category mentions the conclusions reached for the research conducted referring to the cable-stayed bridge of Chalkida in terms of response and correspondence to data of study or previous investigations.

As far as the reliability of RTS used, the following conclusions were revealed:

- ❖ The time series of the two robotic stations presented recording gaps mostly in range of 1 measurement per minute and a number of times for a longer time period.
- ❖ Both stations for some intervals were unable to record entire cycles of oscillations, also reflected in graphs where there were periods with no changes recorded. This fact is probably present due to the reason that the distance requires a longer time period for the recording of the station opposed to the angles immediately recorded by taking the measurement.
- ❖ The uncertainty of the coordinates calculated in the order of centimetres ($\pm 5\text{mm}$).
- ❖ The two stations locked –at a different point– the target recorded in a number of times by both the simple and the OMNI angle.

In the thesis, two robotic stations were used after having their clocks synchronized and having simultaneous measurements in common or not targets taken. The following conclusions were reached by using this method:

- ❖ The synchronization of the stations was successful and it might provide us with information on different targets at the same time.
- ❖ The data can be combined with other measurements of geodetic equipment such as GPS or geotechnical instruments.
- ❖ By using two different stations, it was found that regarding movements close or within the limits of the calibration of the instruments, the equipment used did not record any similar changes.
- ❖ In the cases where gaps were present during the recordings in a geodetic station –in time periods where no significant changes exist– the lost information of the data of the second station was found as long as the same target was aimed.

- ❖ As far as the vibration amplitudes are concerned, there was accordance of the two stations in cases where intense and long vibrations were present and partial inconsistency in low-range movements.
- ❖ This specific method provided the ability of taking measurements checkpoints placed in different positions over the bridge in order through the processing of the measurements to determine the response of the bridge on more than one element in a given time period
- ❖ The exact time of recording was not clearly estimated, since the two stations recorded per second broken in integer seconds, and as a result there is an error of $\pm 0.5\text{sec}$
- ❖ The frequency of recording of the measurements was marginally adequate, as according to Nyquist theorem, the sample taking by examining the flexible structure with natural frequency less than 1Hz should be in the range of at least 2Hz. For this reason, the main frequencies generated marginal and the existence of loud noise of the estimate frequencies.

One of the main objectives of this thesis was the conduct of conclusions for the dynamic response of the cable bridge of Evripos. The results are mentioned below:

- ❖ For the longitudinal axis of the bridge, no significant oscillations were recorded neither on the pillars or the deck and the majority of the values were within the limits of the uncertainty of the two stations.
- ❖ In the transverse axis of the bridge and in specific measurements of the targets placed on pillars recorded, significant oscillations range of 3cm were recorded.
- ❖ On the vertical axis, and specifically the middle of the opening of the deck, notable oscillations of 6cm were recorded.
- ❖ The main oscillation frequency calculated using the spectral analysis using the Lomb normalized periodogram was equal to 0.43Hz from both geodetic stations with small deviations ranged in millimeters of Hz (0.001Hz).
- ❖ The measurements performed on targets in anti-diametrical points of the two pillars M5 and M6 recorded the counter-oscillation during the pass of the operating load (passing vehicles).