Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών
Τομέας Τοπογραφίας
Εργαστήριο Γενικής Γεωδαισίας

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ LEICA TCA-1800 ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΡΑΠΕΖΑΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΩΝ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Νησωτάκης Γεώργιος

Υπεύθυνος
Βασίλειος Γκίκας
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα 2008

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον λέκτορα κ. Βασίλειο Γκίκα για την υποστήριξη και την βοήθεια που έλαβα κατά την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής καθώς και τον καθηγητή κ. Μ. Σακελλαρίου, διευθυντή του Εργαστηρίου Δομικής Μηχανικής και Στοιχείων Τεχνικών Έργων για την διάθεση της σεισμικής τράπεζας και των παρελκόμενων αυτής. Επίσης ευχαριστώ πολύ τον κ. Δασκαλάκη Σταμάτη και τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Στρατάκο Ιωάννη για την πολύτιμη συνδρομή τους κατά την εκπόνηση του πειράματος, καθώς και όλους τους διδάσκοντες καθηγητές της Σ.Α.Τ.Μ. που με βοήθησαν να ολοκληρώσω τον κύκλο των πτυχιακών σπουδών μου.

Τέλος ένα μεγάλο ΕΥΧΑΡΙΣΤΩ στους ανθρώπους που με στηρίζουν σε όλες μου τις δυσκολίες και είναι πάντα δίπλα μου χωρίς ποτέ να ζητούν ανταλλάγματα: στην Αγγελική, στα αδέρφια μου Αντώνη, Αφροδίτη, Μαρία και Καλλιόπη-Ειρήνη, καθώς και στους γονείς μου Ελένη και Χαράλαμπο που με τους κόπους τους κατάφερα να φτάσω μέχρι εδώ και να έχω δύναμη να συνεχίσω παραπέρα.

Γεώργιος Χ. Νησωτάκης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συστηματική παρακολούθηση και ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς των τεχνικών έργων έναντι σεισμικής δράσης, των εναλλασσόμενων φορτίσεων του ανέμου και των μεταβολών της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος αποτελεί βασική προϋπόθεση για την ασφαλή λειτουργία τους. Παραδοσιακά, ο προσδιορισμός των κινηματικών χαρακτηριστικών μιας κατασκευής επιτυγχάνεται με έμμεσο τρόπο με χρήση αισθητήρων, όπως επιταχυνσιόμετρα και κλισίμετρα. Τα τελευταία χρόνια η εφαρμογή του συστήματος GPS (Global Positioning System) σε σχετικές εφαρμογές κατέδειξε τις δυνατότητες και τη συνεισφορά των γεωδαιτικών μεθόδων στην παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς των τεχνικών έργων. Παράλληλα, εκτιμάται ότι οι πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία των σύγχρονων γεωδαιτικών σταθμών αυτόματης αναγνώρισης και παρακολούθησης στόχου (Tracking Total Stations), μπορούν να συμβάλλουν προς αυτή την κατεύθυνση.

Σε αυτή την εργασία διερευνάται διεξοδικά η δυνατότητα χρησιμοποίησης σύγχρονων γεωδαιτικών σταθμών για την καταγραφή και ανάλυση των κινηματικών χαρακτηριστικών τεχνικών έργων λόγω δυναμικής φόρτισης που εκδηλώνονται με την μορφή ταλαντώσεων. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε ταλαντωτής μονής διεύθυνσης όπου προσαρμόσθηκε κατάλληλα κυκλικό πρίσμα. Ο ταλαντωτής τέθηκε σε παλινδρομική κίνηση για προκαθορισμένα ζεύγη συχνότητας και εύρους, ενώ ο γεωδαιτικός σταθμός εγκαταστάθηκε σε απόσταση μερικών εκατοντάδων μέτρων από τον ταλαντωτή.

Από την ανάλυση των παρατηρήσεων προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα ως προς την ακρίβεια και αξιοπιστία της μεθόδου να παρακολουθήσει την ονομαστική κίνηση. Ειδικότερα αναφέρεται ότι για εύρος ταλάντωσης έως και ±5 cm, ο προσδιορισμός της συχνότητας ταλάντωσης προκύπτει ότι δεν υπερβαίνει το 4% της ονομαστικής τιμής για συχνότητες ταλάντωσης έως 2 Hz.

ABSTRACT

The systematic monitoring and analysis of dynamic behavior of engineering structures against seismic action, alternating charge of wind and changes of environmental temperature constitute a basic condition for their safe operation. Traditionally, the determination of kinematic characteristics of constructions is achieved indirectly using sensors such as accellerometers and inclinometers. In the past few years, the use of GPS (Global Positioning System) in relative applications showed the possibilities and the contribution of geodetic methods to monitor the dynamic behavior of engineering structures. At the same time, it is appreciated that the recent developments in the technology of modern total stations with automatic target recognition (Tracking Total Stations), can contribute to this direction.

In this diploma thesis, it is thoroughly investigated the utilisation of modern total stations for the recording and analysis of kinematic characteristic of engineering structures due to dynamic charge, which are expressed with the form of oscillations. For this purpose, a single-dimension oscillator with a suitably adapted circular prism was used. The oscillator was forced in reciprocation for predetermined pairs of frequency and amplitude, while the total station was installed in distance of certain hundreds of metres from the oscillator.

Useful conclusions, concerning the presicion and accurancy of this method to monitor the nominal movement, result from the analysis of these observations. More specifically, it is reported that for amplitudes up to ±5 cm, the determination of oscillation frequency does not exceed the 4% of nominal value for frequencies up to 2 Hz.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ 3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ 5
ABSTRACT 6
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ 7
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ 11
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ 15
ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ 17

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ
ΚΥΡΙΕΣ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ

1.1 Γενικά 21
1.2 Είδη Τεχνικών Έργων 22
1.2.1 Σήραγγες 22
1.2.1α Παραμορφώσεις σηράγγων 22
1.2.2 Γέφυρες (Bridges) 24
1.2.2α Παραμορφώσεις γεφυρών 25
1.2.3 Φράγματα 26
1.2.3α Παραμορφώσεις φραγμάτων 28
1.2.4 Κτήρια 29
1.2.4α Παραμορφώσεις κτηρίων 29
1.3 Δυναμική Παραμόρφωση Τεχνικών Έργων 29
1.3.1 Σεισμική δράση 30
1.3.2 Άνεμος 31
1.3.3 Μεταβολές στην θερμοκρασία περιβάλλοντος 31
1.3.4 Άλλα φορτία 31

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ
ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ
ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

2.1 Γενικά 35
2.2 Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσης (Global Positioning System-GPS) 36
2.2.1 Στατικός σχετικός εντοπισμός (Static positioning) 38
2.2.2 Κινηματικός εντοπισμός (Kinematic positioning) 39
2.2.3 Πηγές σφαλμάτων των μετρήσεων με GPS 40
2.3 Ολοκληρωμένοι Γεωδαιτικοί Σταθμοί Αυτόματης Αναγνώρισης και Παρακολούθησης Στόχου 41
2.3.1 Γενικά 41
2.3.2 Αρχές λειτουργίας 42
2.3.2α Αυτόματη περιστροφή τηλεσκοπίου 42
2.3.2β Αυτόματη αναγνώριση και παρακολούθηση στόχου 44
2.3.2γ Ασύρματο χειριστήριο (Ρομποτική λειτουργία) 45
2.3.2δ Περίβλεπτο κατάφωτο 46

2.3.3 Πηγές σφαλμάτων 46
2.4 Άλλες Τεχνικές Παρακολούθησης 48
2.4.1 Επιταχυνσιόμετρα (accelerometers) 48
2.4.2 Οπτικές ίνες (Fiber-optics) 48

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

3.1 Παρακολούθηση Παραμορφώσεων της Γέφυρας Forth Road, με Χρήση τού Παγκόσμιου Συστήματος Εντοπισμού Θέσης (GPS) 53
3.1.1 Εισαγωγή 53
3.1.2 Διάταξη οργάνων και στοιχεία πειράματος 53
3.1.3 Αποτελέσματα 54

3.2 Παρακολούθηση Παραμορφώσεων της Γέφυρας Rio Pelotas στη Νότια Βραζιλία, με Χρήση Ρομποτικού Γεωδαιτικού Σταθμού (RTS) 59
3.2.1 Εισαγωγή 59
3.2.2 Όργανα και παρελκόμενα 59
3.2.3 Εργαστηριακές μετρήσεις 60
3.2.4 Μετρήσεις στην γέφυρα Rio Pelotas 62

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

4.1 Γενική Περιγραφή Πειραματικής Διάταξης 67

4.2 Σεισμική Τράπεζα 69
4.2.1 Γενικά 69
4.2.2 Σεισμική τράπεζα ELECTRO-SEIS 400 69

4.3 Γεωδαιτικός Σταθμός Leica TCA 1800 71
4.3.1 Σερβομηχανισμοί 72
4.3.2 Αυτόματη αναγνώριση και παρακολούθηση στόχου 72

4.4 Λογισμικό Χειρισμού Γεωδαιτικού Σταθμού 76

4.5 Σύστημα Εντοπισμού Θέσης Leica GPS 1200 77

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

5.1 Σχεδιασμός Πειράματος 83
5.1.1 Γεωμετρία πειράματος 83
5.1.2 Στήριξη κατάφωτου και κεραίας συστήματος GPS 85
5.1.3 Μαρμάρινη πλάκα έδρασης σεισμικής τράπεζας 86
5.1.4 Χάραξη διευθύνσεων σκόπευσης και κίνησης στόχου 87

5.2 Διεξαγωγή Πειράματος 89
5.2.1 Αρχικά δεδομένα και περιβαλλοντικές συνθήκες 89
5.2.2 Βασικά στοιχεία πειράματος 91
5.2.3 Προβλήματα κατά την διεξαγωγή του πειράματος 92

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ
ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

6.1 Προεπεξεργασία Μετρήσεων 95
6.1.1 Πρωτογενείς μετρήσεις 95
6.1.2 Στροφή υπολογισμένων θέσεων 96
6.1.3 Διαδικασία στροφής και μετάθεσης 96

6.2 Στοιχεία Στατιστικής Επεξεργασίας Μετρήσεων 100
6.2.1 Διαγράμματα οριζοντιογραφίας 100
6.2.2 Διαγράμματα πλήθους εμφανίσεων 100
6.2.3 Υπολειμματικές διαφορές 101

6.3 Στοιχεία Φασματικής Επεξεργασίας Μετρήσεων 103
6.3.1 Εισαγωγή 103
6.3.2 Σειρές Fourier 104
6.3.3 Ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier (Discreet Fourier Transform) 106
6.3.3α Ο Ταχύς Μετασχηματισμός Fourier FFT (Fast Fourier Transform) 108
6.3.4 Περιοδόγραμμα Lomb 110

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΒΔΟΜΟ
ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

7.1 Εισαγωγή 115

7.2 Στατιστική Επεξεργασία Μετρήσεων 115
7.2.1 Διαγράμματα οριζοντιογραφίας 115
7.2.2 Ιστογράμματα πλήθους εμφανίσεων 116
7.2.3 Διαγράμματα χρονοσειρών κατά τον άξονα κίνησης 116
7.2.4 Διαγράμματα χρονοσειρών κατά τον κάθετο άξονα στον άξονα κίνησης 117

7.3 Φασματική Επεξεργασία Μετρήσεων 118
7.3.1 Διαγράμματα κύριας συχνότητας 118
7.3.2 Διαγράμματα αναπαραγωγής κυρίου σήματος και υπολειμματικών διαφορών 118

7.4 Παραμετρικά Διαγράμματα 119
7.4.1 Παραμετρικά διαγράμματα με άγνωστα πραγματικά μεγέθη 119
7.4.2 Παραμετρικά διαγράμματα με γνωστά πραγματικά μεγέθη 121
7.4.2α Διαγράμματα συναρτήσει πλάτους ταλάντωσης 121
7.4.2β Διαγράμματα συναρτήσει συχνότητας ταλάντωσης 124

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΟΓΔΟΟ
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

8.1 Γενικά 131

8.2 Συμπεράσματα ως προς την Ακρίβεια Καταγραφής του Αρχικού Σήματος 131

8.3 Συμπεράσματα ως προς την Ορθότητα Καταγραφής του Αρχικού Σήματος 131

8.4 Συμπεράσματα ως προς την Λειτουργία του Γεωδαιτικού Σταθμού 132

8.5 Γενικές Παρατηρήσεις - Επισημάνσεις 134

8.6 Προτάσεις για Περαιτέρω Διερεύνηση 134

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 135
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 139
Έντυπα Μετρήσεων 141
Αναλυτικά Αποτελέσματα Επεξεργασίας Μετρήσεων 145

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΧΗΜΑΤΟΣ	Σελίδα
Σχ. 1.1 Κατάρρευση της γέφυρας 35W στην Μινεάπολη των Η.Π.Α	21
Σχ. 1.2 Τυπική διατομή σήραγγας	22
Σχ. 1.3 Κατανομή επιφανειακών καθιζήσεων κατά την διάνοιξη σηράγγων	23
Σχ. 1.4α Γέφυρα δοκών	25
Σχ. 1.4β Αψιδωτή γέφυρα	25
Σχ. 1.4γ Πλωτή γέφυρα	25
Σχ. 1.4δ Κινητή γέφυρα	25
Σχ. 1.4ε Αρθρωτή γέφυρα	25
Σχ. 1.4στ Κρεμαστή γέφυρα	25
Σχ. 1.5 Κατάρρευση καταστρώματος γέφυρας	26
Σχ. 1.6 Τοξοτό φράγμα	26
Σχ. 1.7 Κατανομή δυνάμεων σε τοξοτό φράγμα	27
Σχ. 1.8 Φράγμα βαρύτητας	27
Σχ. 1.9α Σεισμικά κύματα χώρου	30
Σχ. 1.9β Σεισμικά κύματα επιφανείας	30
Σχ. 2.1 Οι τροχιές των δορυφόρων του συστήματος GPS	37
Σχ. 2.2 Σχετικός κινηματικός εντοπισμός σε πραγματικό χρόνο	40
Σχ. 2.3 Η τεχνολογία MagDrive®	43
Σχ. 2.4 Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος σπειροειδούς ανίχνευσης στόχου Leica TCA-1800	45
Σχ. 2.5 Ασύρματο χειριστήριο Leica	46
Σχ. 2.6 Περίβλεπτο πρίσμα Leica GRZ122	46
Σχ. 2.7 Σφάλμα χρονικής διαφοράς καταγραφής γωνίας-απόστασης	47
Σχ. 2.8 Αισθητήρας οπτικών ινών (μπλε), τοποθετημένος σε σεισμική τράπεζα	49
Σχ. 3.1 Οι θέσεις των δεκτών GPS	54
Σχ. 3.2 Καθ'ύψος παραμορφώσεις της τομής F, της γέφυρας	55
Σχ. 3.3 Επιμήκεις παραμορφώσεις της τομής F, της γέφυρας	55
Σχ. 3.4 Εγκάρσιες παραμορφώσεις της τομής F, της γέφυρας	56

Σχ. 3.5 Σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και μεταβολής του ύψους του καταστρώματος της γέφυρας, στην τομή F 56
Σχ. 3.6 Υψομετρικές μεταβολές κατά την διέλευση του φορτηγού των 100 τόνων 57
Σχ. 3.7 Βασική συχνότητα κατά την διέλευση του φορτηγού των 100 τόνων 58
Σχ. 3.8 Υψομετρικές μεταβολές κατά τους ελιγμούς των φορτηγών των 40 τόνων 58
Σχ. 3.9 Σταθμός TCRA 1205 59
Σχ. 3.10 Σταθμός TC2002 59
Σχ. 3.11 Πρίσμα 360º 59
Σχ. 3.12 Συσκευή ταλάντωσης στόχου 60
Σχ. 3.13 Αποτελέσματα εργαστηριακού πειράματος 61
Σχ. 3.14 Τοποθεσία της γέφυρας 62
Σχ. 3.15 Θέση Γεωδαιτικού Σταθμού και Πρισμάτων 63
Σχ. 3.16α Μετακινήσεις του πρίσματος P1 64
Σχ. 3.16β Μετακινήσεις του πρίσματος P2 64
Σχ. 4.1 Τοποθέτηση κυκλικού πρίσματος και δέκτη GPS 67
Σχ. 4.2 Σημείο εγκατάστασης γεωδαιτικού σταθμού και παρελκόμενων αυτού 69
Σχ. 4.3 Σεισμική τράπεζα ELECTRO-SEIS 400 70
Σχ. 4.4 Φαινόμενο ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής 70
Σχ. 4.5 Ο ρομποτικός γεωδαιτικός σταθμός Leica TCA 1800 72
Σχ. 4.6 Διάγραμμα διάταξης CCD 73
Σχ. 4.7 Απόκλιση κέντρου πρίσματος-σταυρονήματος 74
Σχ. 4.8 Σπειροειδής ανίχνευση στόχου Leica TCA 1800 74
Σχ. 4.9α Οθόνη εισαγωγής αρχικών στοιχείων 77
Σχ. 4.9β Οθόνη επικοινωνίας οργάνου και παρακολούθησης μετρήσεων 77
Σχ. 4.10 Σύστημα Leica GPS 1200 78
Σχ. 5.1 Αμοιβαία ορατότητα οργάνου – στόχου 84
Σχ. 5.2 Σχηματική αναπαράσταση γεωμετρίας πειράματος 84
Σχ. 5.3 Μεταλλική βάση στήριξης στόχου και κεραίας GPS 85
Σχ. 5.4 Κατασκευή έδρασης μαρμάρινης πλάκας 87
Σχ. 5.5 Στόχος χάραξης κύριας διεύθυνσης 88
Σχ. 5.6 Προσχέδιο χάραξης διευθύνσεων και κύριος άξονας πειράματος y 88

Σχ. 5.7 Μέσες τιμές θερμοκρασίας την ημέρα του πειράματος 90
Σχ. 5.8 Μέσες τιμές σχετικής υγρασίας την ημέρα του πειράματος 90
Σχ. 5.9 Μέσες τιμές βαρομετρικής πίεσης την ημέρα του πειράματος 90
Σχ. 6.1 Γραφική αναπαράσταση αναλογικού σήματος 95
Σχ. 6.2 Κίνηση του στόχου 96
Σχ. 6.3 Μετάθεση συστημάτων αναφοράς 97
Σχ. 6.4 Στροφή συστημάτων αναφοράς 98
Σχ. 6.5 Γραφική απεικόνιση μετασχηματισμού στροφής 99
Σχ. 6.6 Διάγραμμα οριζοντιογραφίας (30°, 0.2Hz, ±3cm) 100
Σχ. 6.7 Ιστόγραμμα συχνότητας (30°, 0.2Hz, ±3cm) 101
Σχ. 6.8 Διάγραμμα υπολειμματικών διαφορών (45°, 0.1Hz, ±3cm) 103
Σχ. 6.9 Χρονοσειρά μετρήσεων (30°, 0.1Hz, ±1cm) 104
Σχ. 6.10 Σχηματική αναπαράσταση του Κανόνα του Τραπεζίου 106
Σχ. 6.11 Γραφική αναπαράσταση του μιγαδικού επιπέδου 109
Σχ. 6.12 Γραφική αναπαράσταση φάσματος συχνοτήτων 110
Σχ. 6.13 Περιοδόγραμμα Lomb (60°, 1.0Hz, ±5cm) 111
Σχ. 7.1 Διάγραμμα οριζοντιογραφίας (45°, ± 5 cm, 0.5 Hz) 115
Σχ. 7.2 Ιστόγραμμα πλήθους εμφανίσεως (30°, ± 5 cm, 0.2 Hz) 116
Σχ. 7.3 Διάγραμμα χρονοσειρών κατά τον άξονα κίνησης (45°, ± 2 cm, 0.5 Hz) 116
Σχ. 7.4 Διάγραμμα χρονοσειρών κατά τον x-άξονα (45°, ± 2 cm, 0.2 Hz) 117
Σχ. 7.5 Διάγραμμα κύριας συχνότητας (0°, ± 3 cm, 0.5 Hz) 117
Σχ. 7.6 Διάγραμμα αναπαραγωγής κυρίου σήματος και υπολειμματικών διαφορών (30°, ± 5 cm, 0.1 Hz) 118
Σχ. 7.7 Μέσος όρος απόλυτων τιμών υπολειμματικών διαφορών συναρτήσει συχνότητας ταλάντωσης 120
Σχ. 7.8 Τετραγωνικός μέσος όρος υπολειμματικών διαφορών συναρτήσει συχνότητας ταλάντωσης 120
Σχ. 7.9 Απόλυτη μεταβολή πλάτους (ΔΑ) έναντι ονομαστικού πλάτους ταλάντωσης 122
Σχ. 7.10 Απόλυτη μεταβολή συχνότητας (Δf) έναντι ονομαστικού πλάτους ταλάντωσης 123

Σχ. 7.11 Ποσοστιαία μεταβολή πλάτους (ΔΑ/Α %) έναντι ονομαστικού πλάτους ταλάντωσης 123
Σχ. 7.12 Ποσοστιαία μεταβολή συχνότητας (Δf/f %) έναντι ονομαστικού πλάτους ταλάντωσης 123
Σχ. 7.13 Απόλυτη μεταβολή πλάτους (ΔΑ) έναντι ονομαστικής συχνότητας ταλάντωσης 124
Σχ. 7.14 Απόλυτη μεταβολή συχνότητας (Δf) έναντι ονομαστικής συχνότητας ταλάντωσης 125
Σχ. 7.15 Ποσοστιαία μεταβολή πλάτους (ΔΑ/Α %) έναντι ονομαστικής συχνότητας ταλάντωσης 125
Σχ. 7.16 Ποσοστιαία μεταβολή συχνότητας (Δf/f %) έναντι ονομαστικής συχνότητας ταλάντωσης 126

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΙΝΑΚΑ	Σελίδα
Πίνακας 2.1 Μέθοδοι παρακολούθησης δυναμικής συμπεριφοράς τεχνικών έργων	35
Πίνακας 2.2 Μέγιστες ταχύτητες περιστροφής	43
Πίνακας 3.1 Τύποι δεκτών και κεραιών του πειράματος	54
Πίνακας 3.2 Εσωτερική ακρίβεια μέτρησης μήκους και γωνίας Γεωδαιτικών Σταθμών	60
Πίνακας 3.3 Μέγιστες σχετικές αποκλίσεις συντεταγμένων	61
Πίνακας 3.4 Αποτελέσματα μετρήσεων στον υπαίθριο χώρο του Πανεπιστημίου	62
Πίνακας 3.5 Τυπικές αποκλίσεις και μετακινήσεις της γέφυρας	63
Πίνακας 4.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά σεισμικής τράπεζας ELECTRO SEIS-400	71
Πίνακας 4.2 Ακρίβειες μέτρησης και απόδοσης οργάνου Leica TCA 1800	75
Πίνακας 4.3α Γενικά τεχνικά χαρακτηριστικά συστήματος Leica GPS 1200	78
Πίνακας 4.3β Ονομαστικές τιμές μετρήσεων ποιότητας προσδιορισμού θέσης με χρήση του συστήματος Leica GPS 1200	79
Πίνακας 5.1 Αρχικές ρυθμίσεις λογισμικού Leica Tracking Controller	89
Πίνακας 5.2 Παράμετροι και πλήθος πειραμάτων	92
Πίνακας 6.1 Γωνίες στροφής για κάθε ομάδα πειραμάτων	98
Πίνακας 7.1 Ελάχιστες και μέγιστες τιμές των $RMS_{residual}$ και $Mean_{residual}$, για όλα τα πλάτη ταλάντωσης	121
Πίνακας 7.2 Ελάχιστες και μέγιστες απόλυτες τιμές των ΔΑ και Δf για όλες τις συχνότητες ταλάντωσης	124
Πίνακας 7.3 Ελάχιστες και μέγιστες ποσοστιαίες τιμές των ΔΑ και Δf για όλες τις συχνότητες ταλάντωσης	124
Πίνακας 7.4 Ελάχιστες και μέγιστες απόλυτες τιμές των ΔΑ και Δf για όλα τα πλάτη ταλάντωσης	126
Πίνακας 7.5 Ελάχιστες και μέγιστες ποσοστιαίες τιμές των ΔΑ και Δf για όλα τα πλάτη ταλάντωσης	126

Πίνακας 7.6 Πειράματα με υψηλό ποσοστό χονδροειδών σφαλμάτων 127
Πίνακας 8.1 Ποσοστό πειραμάτων με υψηλό ποσοστό χονδροειδών σφαλμάτων 133

ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρακολούθηση της δυναμικής συμεριφοράς των τεχνικών έργων έναντι φορτίσεων όπως ο άνεμος, μεταβολές στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος και η σεισμική δράση, αποτελεί αντικείμενο βασικής και εφαρμοσμένης έρευνας για πολλά επιστημονικά κέντρα. Μέχρι σήμερα η παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς μιας κατασκευής στηρίζονταν σε μεθόδους πειραματικής μηχανικής. Οι μέθοδοι αυτές κάνουν χρήση αισθητήρων όπως κλισίμετρα, επιταχυνσιόμετρα και πιό πρόσφατα 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 σε συνδυασμό με τις μη γεωδαιτικές μεθόδους εξασφαλίζουν ακριβή και αξιόπιστα αποτελέσματα.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο πειραματικός έλεγχος του ολοκληρωμένου ρομποτικού γεωδαιτικού σταθμού Leica TCA-1800 όταν χρησιμοποιείται σε εφαρμογές δυναμικής παρακολούθησης τεχνικών έργων. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιείται ταλαντωτής ακριβείας στον οποίο προσαρμόζεται κατάλληλα γεωδαιτικός στόχος (κατάφωτο), του οποίου υλοποιείται παρατήρηση και καταγραφή θέσεως από τον γεωδαιτικό σταθμό. Έπειτα, με δεδομένα τα ονομαστικά μεγέθη κίνησης του στόχου (πλάτος και συχνότητα ταλάντωσης), εξάγονται συμπεράσματα που αφορούν στην ακρίβεια και στην αξιοπιστία του γεωδαιτικού σταθμού στην παρακολούθηση δυναμικών παραμορφώσεων. Πρέπει να αναφερθεί ότι για την καταγραφή της τροχιάς του στόχου, έγινε πρόσθετη χρήση του Συστήματος Παγκόσμιου Εντοπισμού Θέσης (GPS), χωρίς ωστόσο να γίνεται ανάλυση των δεδομένων που συνελέγησαν στα πλάσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η δομή της εργασίας είναι η εξής:

Στο Πρώτο Κεφάλαιο, γίνεται αναφορά στα βασικότερα είδη των τεχνικών έργων (γέφυρες, φράγματα, κτήρια, κ.α.) καθώς και στις κυριότερες αιτίες πρόκλησης δυναμικών και στατικών παραμορφώσεων στα τεχνικά έργα.

Το Δεύτερο Κεφάλαιο παρουσιάζει τις μεθόδους παρακολούθησης των δυναμικών παραμορφώσεων και τα χαρακτηριστικά αυτών. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στο

Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσης και στα συστήματα Ολοκληρωμένων Ρομποτικών Γεωδαιτικών Σταθμών.

Στο Τρίτο Κεφάλαιο αναφέρονται παραδείγματα παρακολούθησης δυναμικών παραμορφώσεων τεχνικών έργων από την βιβλιογραφία.

Στο Τέταρτο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα όργανα και τα παρελκόμενα που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα και αναλύονται τα βασικότερα χαρακτηριστικά τους (τεχνικά χαρακτηριστικά, πλεονεκτήματα, μειονεκτήματα, πηγές σφαλμάτων).

Στο Πέμπτο Κεφάλαιο περιγράφεται η πειραματική διαδικασία (γεωμετρία, βασικά στοιχεία που αφορούν στα δεδομένα που επρόκειτο να συλλεχθούν, αρχικές ρυθμίσεις οργάνων, κ.α.).

Στο Έκτο Κεφάλαιο παρατίθεται το θεωρητικό υπόβαθρο βάση του οποίου γίνεται ανάλυση των μεθόδων επεξεργασίας των μετρήσεων που αφορούν στην προεπεξεργασία, στατιστική και φασματική ανάλυση των δεδομένων.

Στο Έβδομο Κεφάλαιο παρατίθενται τα τελικά αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία των δεδομένων, γίνεται παρουσίαση των διαγραμμάτων που προέκυψαν από στατιστική και φασματική ανάλυση, καθώς και παραμετρικών διαγραμμάτων από τα οποία εξάγονται τα τελικά συμπεράσματα.

Τέλος στο Όγδοο Κεφάλαιο, αναφέρονται τα τελικά συμεράσματα που προκύπτουν από την μελέτη των αποτελεσμάτων και αφορούν στην ακρίβεια του γεωδαιτικού σταθμού και στην ορθότητα των αποτελεσμάτων, καθώς και συμπεράσματα που αφορούν στην λειτουργία του. Τέλος αναφέρονται ορισμένες γενικές παρατηρήσεις και επισημάνσεις, ενώ γίνονται και προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΚΥΡΙΕΣ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

ΚΥΡΙΕΣ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ

1.1 Γενικά

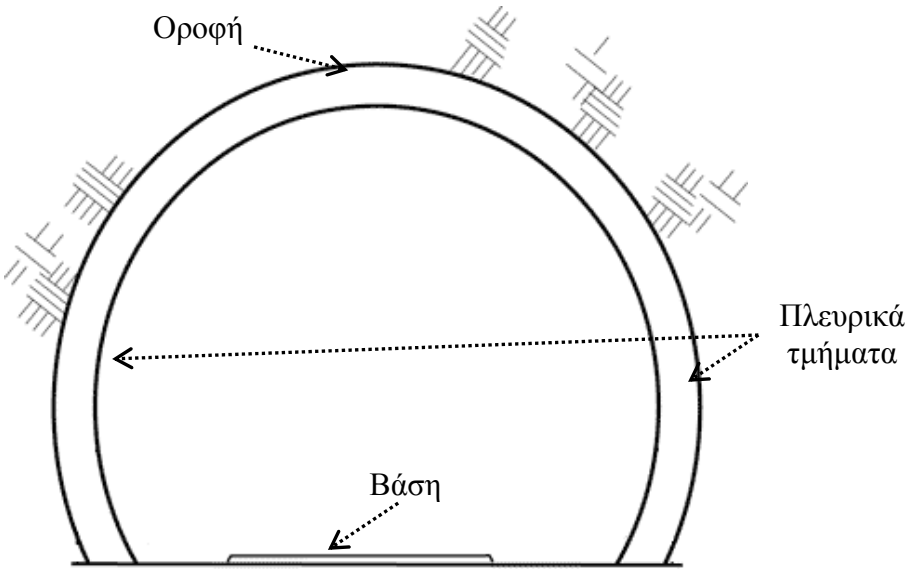
Κάθε τεχνικό έργο, ανάλογα με το είδος της κατασκευής, τις συνθήκες λειτουργίας του και τη σκοπιμότητα που εξυπηρετεί, υπόκειται σε στατική ή και δυναμική φόρτιση. Το ίδιο βάρος ενός τεχνικού έργου αποτελεί στατικό φορτίο, ενώ η σεισμική δράση και η επίδραση του ανέμου, χαρακτηρίζονται ως δυναμικά φορτία. Η φόρτιση ενός τεχνικού έργου έχει ως αποτέλεσμα τη γέννεση παραμορφώσεων με ελαστικά ή και μόνιμα χαρακτηριστικά. Σε περίπτωση που οι αναπτυσόμενες 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. Στη συνέχεια αναφέρονται συνήθεις κατηγορίες τεχνικών έργων και τα χαρακτηριστικά των παραμορφώσεων που αναπτύσσονται σε αυτά.

Σχ. 1.1 Κατάρρευση της γέφυρας 35W στην Μινεάπολη των Η.Π.Α
Fig. 1.1 Collapse of the 35W bridge in Minneapolis, USA.

1.2 Είδη Τεχνικών Έργων

1.2.1 Σήραγγες

Σήραγγα ονομάζεται η οριζόντια, υπόγεια εκσκαφή γαιών, με σκοπό την διάνοιξη οδού για την διέλευση οχημάτων, συρμών και ανθρώπων. Όταν η εκσκαφή γίνεται κατά τον κατακόρυφο άξονα, τότε η σήραγγα ονομάζεται φρέαρ. Τα κύρια μέρη μιάς σήραγγας είναι η βάση, τα πλευρικά τμήματα και η οροφή (Σχήμα 1.2).



Σχ. 1.2 Τυπική διατομή σήραγγας
Fig. 1.2 Typical tunnel cross-section

1.2.1α Παραμορφώσεις σηράγγων

Η διάνοιξη μιας σήραγγας αποτελεί από τα πλέον δύσκολα και απαιτητικά εγχειρήματα όσον αφορά στην κατασκευή τεχνικών έργων. Αυτό γιατί εκτός από τις τεχνικές δυσκολίες που συνεπάγεται, εγκυμονεί κινδύνους παραμορφώσεων, τόσο στο εσωτερικό, όσο και στο εξωτερικό περιβάλλον της σήραγγας. Οι παραμορφώσεις μπορούν να διαχωριστούν σε εσωτερικές (εντός της σήραγγας) και εξωτερικές (κυρίως υπέργειες καθιζήσεις), οι οποίες είναι αλληλοσυνδεόμενες.

Παραμορφώσεις στο εσωτερικό της σήραγγας μπορεί να οδηγήσουν σε υποχώρηση του μετώπου της σήραγγας, υπερβολικές τιμές σύγκλισης στα τοιχώματα, στην ανύψωση της βάσης λόγω αρνητικών δυνάμεων, καθώς και αστοχία στην οροφή της σήραγγας. Για την πρόληψη τέτοιων συμβάντων επιλέγεται η κατάλληλη μέθοδος

διάνοιξης, ανάλογα με την γεωλογία του υπεδάφους, το μέγεθος του έργου, την ύπαρξη κατασκευών άνωθεν της σήραγγας κτλ.

Οι επιφανειακές (εξωτερικές) παραμορφώσεις είναι άμεσο αποτέλεσμα των παραμορφώσεων στο εσωτερικό της σήραγγας και με την θεώρηση ότι δεν υπάρχουν επιπρόσθετα φορτία (π.χ. κτήρια) στην επιφάνεια έχουν τη μορφή του Σχήματος 1.3, ενώ μαθηματικά ακολουθούν την καμπύλη Gauss (*Γ. Γεωργόπουλος, 2003*).

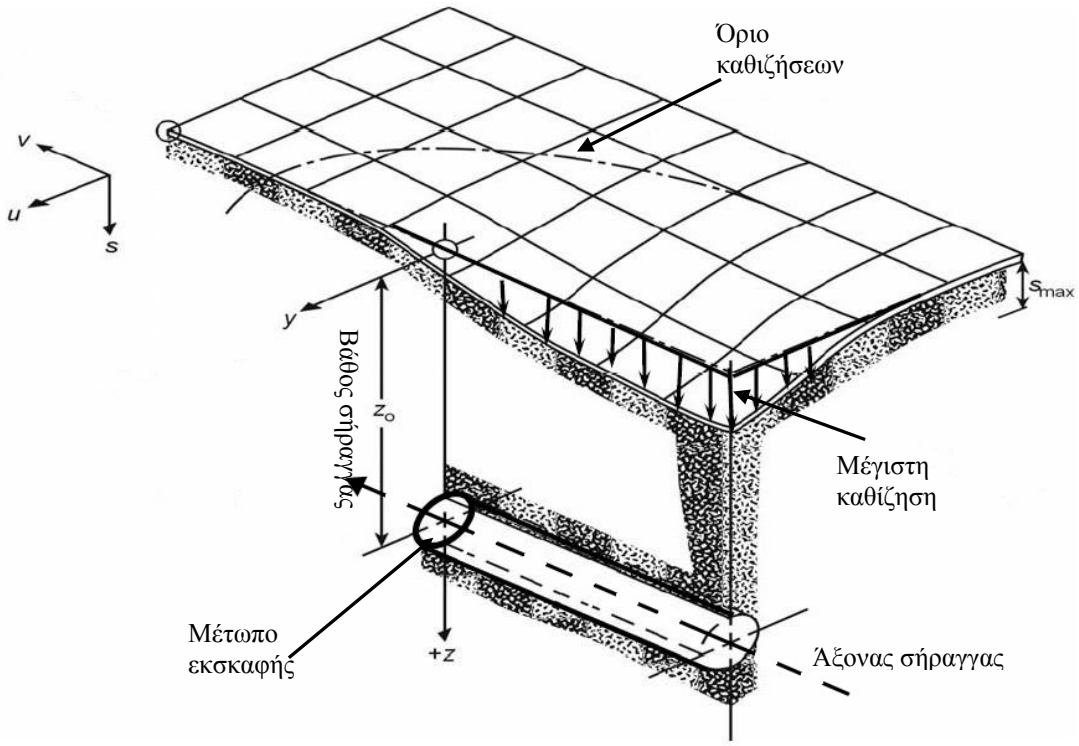
$$S = S_{\max} \cdot e^{\left(-\frac{\psi^2}{2 \cdot i^2}\right)} \tag{1.1}$$

όπου:

S , η καθίζηση στην επιφάνεια του εδάφους σε απόσταση ψ από τον κατακόρυφο άξονα συμμετρίας της σήραγγας

$S_{\max}$, η μέγιστη καθίζηση στην επιφάνεια του εδάφους, πάνω από τον κατακόρυφο άξονα της σήραγγας (ψ=0).

i, η τυπική απόκλιση της καμπύλης των επιφανειακών καθιζήσεων.



Σχ. 1.3 Κατανομή επιφανειακών καθιζήσεων κατά την διάνοιξη σηράγγων
Fig. 1.3 Distribution of surface subsidence due to tunnel excavation

1.2.2 Γέφυρες (Bridges)

Γέφυρα, είναι η δομική κατασκευή, με την οποία επιτυγχάνεται η ζεύξη δύο θέσεων, μεταξύ των οποίων μεσολαβεί ένα εμπόδιο (ποτάμι, χαράδρα, δρόμος, κτλ). Ο σχεδιασμός, η κατασκευή και η λειτουργία μιάς γέφυρας ποικίλουν, με κυριότερα κριτήρια την τοπογραφία και τα χαρακτηριστικά του εδάφους που πρόκειται να κατασκευαστεί, ενώ λαμβάνονται υπόψην και δευτερεύοντα στοιχεία όπως η αισθητική και η αρμονική σύνδεση με τον περιβάλλοντα χώρο. Οι κυριότεροι τύποι γεφυρών είναι (*www.wikipedia.org*):

- **Γέφυρα με δοκούς (Beam bridge)** (Σχήμα 1.4α), η οποία στατικά, λειτουργεί όπως μία δοκός. Είναι ο απλούστερος τύπος γέφυρας και χρησιμοποιείται συχνά για την κατασκευή πεζοδιαβάσεων και τμημάτων δρόμων.
- **Αψιδωτή γέφυρα (Arch bridge)** (Σχήμα 1.4β). Είναι ίσως η παλαιότερη μέθοδος κατασκευής γεφυρών, δεδομένου ότι χρονολογούνται από το 2500 π.Χ. Η αρχή στατικής λειτουργίας μιάς αψιδωτής γέφυρας, στηρίζεται στο γεγονός ότι μέσω των τόξων που σχηματίζονται κάτω από το κατάστρωμα της γίνεται εξ'ολοκλήρου μεταφορά των δυνάμεων στα θεμέλια της.
- **Πλωτή γέφυρα (Pontoon bridge)** (Σχήμα 1.4γ). Αποτελείταιι από ειδικά πλωτά θεμέλια, πάνω στα οποία εδράζεται το κατάστρωμα της γέφυρας. Τα πλεονεκτήματα αυτού του τύπου γέφυρας είναι ότι η συναρμολόγηση και αποσυναρμολόγηση τους γίνεται εύκολα, καθώς επίσης και το μικρό κόστος κατασκευής σχετικά με τις άλλες γέφυρες. Μειονέκτημα αυτών είναι η σταθερότητα τους, καθώς τα θεμέλια τους είναι πλωτά.
- **Κινητή γέφυρα (Moveable bridge)** (Σχήμα 1.4δ). Οι κινητές γέφυρες διαχωρίζονται σε περιστρεφόμενες και ανυψούμενες. Αυτού του τύπου οι γέφυρες, μετακινούνται με σκοπό να επιτρέψουν την διέλευση σκαφών και πλοίων. Βασικό μειονέκτημα τους, είναι ότι η κίνηση των οχημάτων διακόπτεται όταν η γέφυρα είναι ανοιχτή.
- **Αρθρωτή γέφυρα (Cantilever bridge)** (Σχήμα 1.4ε). Λειτουργεί με την βοήθεια αρθρώσεων και αντιβάρων επιτυγχάνοντας την εξισορρόπηση των φορτίων που ασκούνται στο σώμα της γέφυρας.
- **Κρεμαστή γέφυρα (Cable-stayed bridge)** (Σχήμα 1.4στ). Οι γέφυρες αυτού του τύπου 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 μιάς τέτοιας γέφυρας, είναι εξαιρετικά μεγάλες, ξεπερνώντας σήμερα τα 2400 m κρεμαστού καταστρώματος (γέφυρα *Millau Viaduct*, Γαλλία, 2460 m**).**

Επίσης γίνεται συχνά συνδυασμός των παραπάνω τύπων, ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή ή/και τα τεχνικά προβλήματα που πρέπει να επιλυθούν.

Σχ. 1.4α Γέφυρα δοκών
Fig. 1.4α Beam bridge

Σχ. 1.4β Αψιδωτή γέφυρα
Fig. 1.4β Arch bridge

Σχ. 1.4γ Πλωτή γέφυρα
Fig. 1.4γ Pontoon bridge

Σχ. 1.4δ Κινητή γέφυρα
Fig. 1.4δ Moveable bridge

Σχ. 1.4ε Αρθρωτή γέφυρα
Fig. 1.4ε Cantilever bridge

Σχ. 1.4στ Κρεμαστή γέφυρα
Fig. 1.4στ Cable-stayed bridge

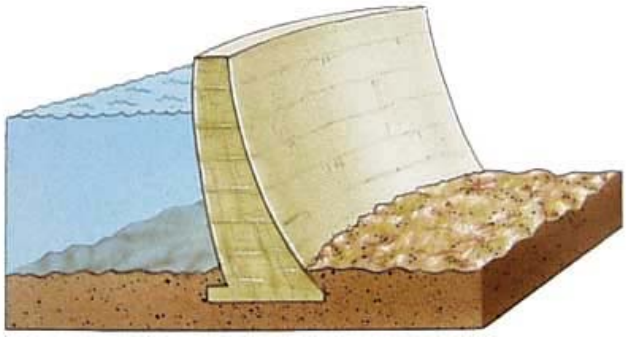
1.2.2α Παραμορφώσεις γεφυρών

Οι παραμορφώσεις που υφίστανται οι γέφυρες, κατά μείζονα λόγο χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τις μόνιμες και τις δυναμικές (παροδικού χαρακτήρα). Οι μόνιμες παραμορφώσεις οφείλονται στην "κόπωση" του καταστρώματος της γέφυρας λόγω παλαιότητας, στην χαλάρωση των στοιχείων του φορέα (καλώδια, δοκοί) κτλ. Στις δυναμικές κατατάσσονται οι παραμορφώσεις λόγω ανέμου, σεισμικής δράσης, κίνησης των αυτοκινήτων, παλίρροιας, κτλ.

Σχ. 1.5 Κατάρρευση καταστρώματος γέφυρας
Fig. 1.5 Collapse of bridge deck

1.2.3 Φράγματα

Φράγμα ονομάζεται ένα τεχνικό έργο, το οποίο κατασκευάζεται κάθετα στην κοίτη ενός υδατορεύματος και αποσκοπεί στην δέσμευση του νερού για την περαιτέρω αξιοποίηση του σε άρδευση, ύδρευση ή την κίνηση υδροστρόβιλων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η τεχνική μελέτη ενός φράγματος γίνεται ανάλογα με τον σκοπό που πρόκειται να εξυπηρετήσει με βάση τον οποίο προκύπτει τόσο ο κατάλληλος τύπος φράγματος όσο και οι απαιτούμενες διαστάσεις του. Τα σημαντικότερα είδη φραγμάτων περιγράφονται παρακάτω (*www.wikipedia.org*):

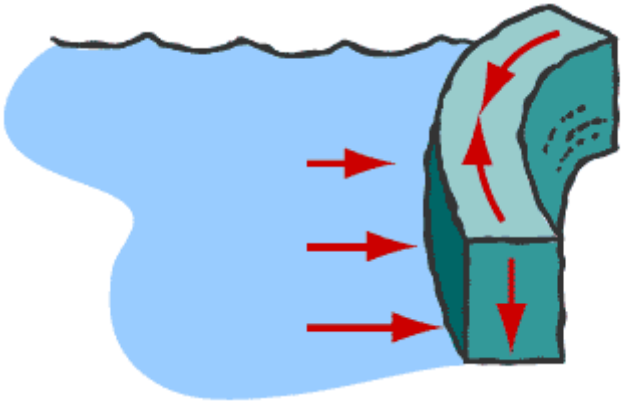


Σχ. 1.6 Τοξοτό φράγμα
Fig. 1.6 Arch dam

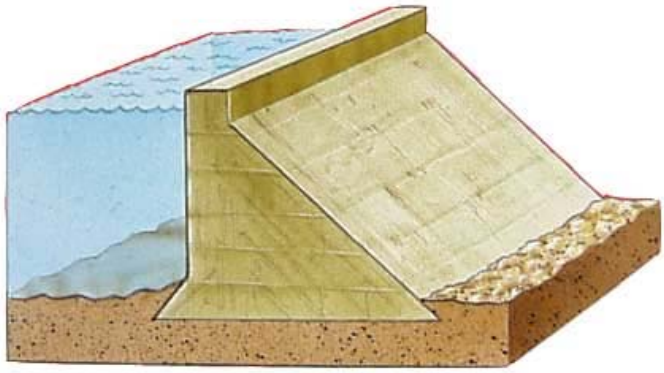
- **Τοξοτά φράγματα (Arch dams)**. Τα τοξοτά φράγματα, όπως γίνεται αντιληπτό από το όνομα τους έχουν το σχήμα ενός τόξου (Σχήμα 1.6). Τα φράγματα αυτά κατασκευάζονται είτε μονολιθικά από οπλισμένο σκυρόδεμα, είτε κτίζονται με

ξεχωριστά στοιχεία. Επίσης, υπάρχουν και χαλύβδινα φράγματα αυτού του τύπου, αλλά δεν συνηθίζεται να κατασκευάζονται πολύ μεγάλων διαστάσεων χαλύβδινα φράγματα, σε αντίθεση με τα φράγματα οπλισμένου σκυροδέματος.

Χαρακτηριστικό των τοξοτών φραγμάτων είναι ο τρόπος κατανομής των δυνάμεων στο μέτωπο τους. Οι δυνάμεις ασκούνται πάνω στην επιφάνεια του φράγματος λόγω της υδροστατικής πίεσης του νερού και αυξάνονται με το βάθος, ενώ η μέγιστη παραμόρφωση παρουσιάζεται στο μέσο του μήκους του φράγματος (Σχήμα 1.7). Με το σχήμα τόξου που δίνεται στο φράγμα και με την κυρτή επιφάνεια να εφάπτεται με το νερό, επιτυγχάνεται καταμερισμός και μεταφορά των ασκούμενων δυνάμεων στα πλευρικά στηρίγματα του φράγματος. Έτσι η καταπόνηση στον κυρίως φορέα είναι μικρότερη και έχει ώς συνέπεια, αφενός την αύξηση της αντοχής και αφετέρου την μείωση του πάχους του φράγματος.



Σχ. 1.7 Κατανομή δυνάμεων σε τοξοτό φράγμα
Fig. 1.7 Forces's distribution in an arch dam



Σχ. 1.8 Φράγμα βαρύτητας
Fig. 1.8 Massive dam

- **Φράγματα βαρύτητας (Gravity dams).** Τα φράγματα αυτού του τύπου (Σχήμα 1.8) κατά μείζονα λόγο εκμεταλλεύονται τις βαρυτικές δυνάμεις, για την επιτυχή αντιστάθμιση των υδροστατικών πιέσεων. Το ίδιον βάρος του φράγματος είναι υπολογισμένο, έτσι ώστε οι δυνάμεις να μεταφέρονται κάτω από το κέντρο ισορροπίας του φράγματος, με συνέπεια να αποτρέπεται τυχόν ανατροπή ή μετατόπισή του. Μειονέκτημα αυτού του είδους φραγμάτων αποτελεί ο εξαιρετικά μεγάλος όγκος υλικών και επομένως κόστους κατασκευής.

- **Χωμάτινα φράγματα (Embankment/Earthen dams).** Τα αναχώματα είναι φράγματα, κατασκευασμένα από γαιώδη υλικά (χώμα και πετρώδη υλικά). Τα φράγματα αυτού του τύπου, όπως και τα φράγματα βαρύτητας, χρησιμοποιούν το βάρος τους ως αντιστήριξη στις πιέσεις του νερού.

1.2.3α Παραμορφώσεις φραγμάτων

Τα φράγματα καλούνται να ανταπεξέλθουν στην πίεση των δυνάμεων που ασκούνται σε αυτά, ενώ θα πρέπει από τον σχεδιασμό τους να έχει προβλεφθεί η επίδραση καταπονήσεων λόγω σεισμικής δράσης, θερμοκρασιακών μεταβολών κτλ. Οι κυριότερες μορφές παραμορφώσεων ενός φράγματος είναι (*www.wikipedia.org*):

- Θραύση ή/και ολίσθηση της θεμελίωσης,
- Εσωτερικές διαβρώσεις και ανάπτυξη υποπίεσης στο πέλμα του φράγματος,
- Εξασθένηση της θεμελίωσης λόγω διαβροχής και αποσάθρωση,
- Μετακίνηση και ερπυσμός πάνω σε επιφάνειες ρηγμάτων,
- Ολισθήσεις, μετακινήσεις ή παραμορφώσεις στα αντερίσματα,
- Διάβρωση-υποσκαφή από πλημμύρες,
- Υπερβολικές παραμορφώσεις στη θεμελίωση του φράγματος,
- Υπερβολικές παραμορφώσεις στο σώμα του φράγματος.

Μεταξύ των κυριότερων αιτίων που προκαλούν παραμορφώσεις σε ένα φράγμα είναι η πίεση που ασκείται μετωπικά στο φράγμα και στο υπέδαφος από τις αυξημένες ποσότητες νερού, οι οποίες δημιουργούν προβλήματα διαβρώσεων, διαρροών ή ακόμα και κατολισθήσεων στην περιοχή του φράγματος.

1.2.4 Κτήρια

Τα κτήρια είναι κατασκευές σταθερά επί του εδάφους με σκοπό να στεγάσουν τον άνθρωπο και τις δραστηριότητες του. Δομικά ένα κτήριο, κατασκευάζεται από οπλισμένο σκυρόδεμα, από χάλυβα ή ξύλο, ενώ υπάρχουν και περιπτώσεις εφαρμογής συνθετικών υλικών (π.χ. ανθρακονήματα) και κραμάτων άλλων μετάλλων (π.χ. αλουμίνιο) ή συνδυασμός τους. Τα κτήρια μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε κτήρια για κατοικία, κτήρια για εργασιακή χρήση, βιομηχανικά κτήρια, καθώς και ειδικά κτήρια (π.χ. πύργοι ελέγχου αεροδρομίων).

1.2.4α Παραμορφώσεις κτηρίων

Μια κτηριακή κατασκευή υπόκειται σε πλήθος διαφορετικών τύπων παραμορφώσεων, εκ των οποίων αναφέρονται:

- *Καθίζηση*. Η καθίζηση προκαλείται από την υποχώρηση του εδάφους κάτω από τα θεμέλια της κατασκευής, ενώ το επίπεδο της θεμελίωσης παραμένει οριζόντιο και η πίεση του εδάφους παραμένει ίση σε όλη την επιφάνεια της θεμελίωσης.
- *Διαφορική καθίζηση*. Στην διαφορική καθίζηση, με την υποχώρηση του εδάφους παρατηρείται άνιση κατανομή των δυνάμεων στο επίπεδο της θεμελίωσης με αποτέλεσμα την ανάπτυξη δυνάμεων εφελκυσμού, θλίψης και στρέψης σε στοιχεία της κατασκευής.
- *Γωνιακή στροφή*. Σε αυτή την περίπτωση, η κατασκευή περιστρέφεται γύρω από κάποιον άξονα, κάθετο στο επίπεδο θεμελίωσης, χωρίς να υπάρχει καθίζηση.
- *Γωνιακή παραμόρφωση*. Το κτίριο περιστρέφεται με ταυτόχρονη καθίζηση, ή διαφορική καθίζηση. Μαζί με το φαινόμενο της διαφορικής καθίζησης, αποτελούν τις δυσμενέστερες περιπτώσεις παραμόρφωσης κατασκευών.

1.3 Δυναμική Παραμόρφωση Τεχνικών Έργων

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

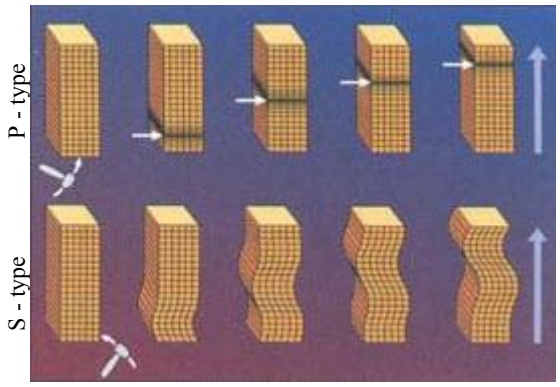
1.3.1 Σεισμική δράση

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.

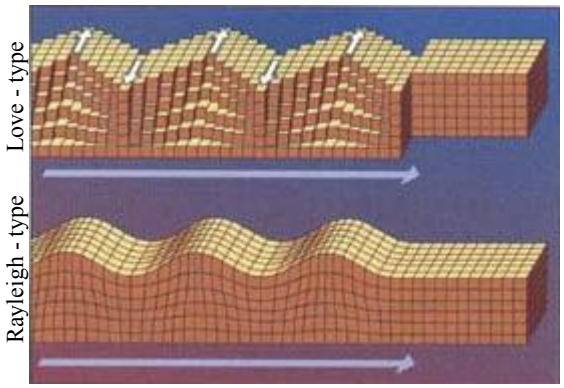
Κατά την εκδήλωση ενός σεισμού γίνεται μετατροπή της δυναμικής ενέργειας σε κινητική και η εξάπλωση της στον χώρο γίνεται μέσω των σεισμικών κυμάτων. Τα σεισμικά κύματα διαχωρίζονται στις εξής κατηγορίες (*Μ. Σακελλαρίου, 2008*):

- *Κύματα Χώρου* (*Body Waves*) (Σχήμα 1.9α)
  α) Διαμήκη κύματα τύπου *P*
  β) Εγκάρσια κύματα τύπου *S*

- *Κύματα Επιφανείας* (*Surface waves*) (Σχήμα 1.9β)
  α) Κύματα επιφανείας τύπου *Love*
  β) Κύματα επιφανείας τύπου *Rayleigh*



Σχ. 1.9α Σεισμικά κύματα χώρου
Fig. 1.9α Body seismic waves



Σχ. 1.9β Σεισμικά κύματα επιφανείας
Fig. 1.9β Surface seismic waves

Τα τεχνικά έργα εφόσον εξ'ορισμού συνδέονται με το υλικό μέσο μετάδοσης των ανωτέρω κυμάτων, επηρρεάζονται άμεσα από την ενέργεια που αυτά μεταφέρουν και

πρέπει να έχει γίνει εκ των πρωτέρων μελέτη για την όσο το δυνατόν καλύτερη αντίδραση του φορέα σε περίπτωση εκδήλωσης σεισμού.

1.3.2 Άνεμος

Άνεμος ονομάζεται η κίνηση των αερίων μαζών που αποτελούν την ατμόσφαιρα της Γης. Η κίνηση αυτή, επηρρεάζεται απο 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 μεταβάλεται συναρτήσει του εμβαδού της μετωπικής επιφάνειας στην οποία προσκρούει ο άνεμος, και της έντασης του ανέμου.

1.3.3 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 (πρίν την κατασκευή του τεχνικού έργου) την προσεκτική μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς της κατασκευής στις θερμοκρασιακές μεταβολές, για την αντιμετώπιση εμφάνισης φαινομένων ασυνέχειας (ρωγμές) σε κρίσιμα για την λειτουργική ικανότητα σημεία του φορέα της κατασκευής, ενώ για ιδιόρυθμες 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.

1.3.4 Άλλα φορτία

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

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

2.1 Γενικά

Η παρακολούθηση (dynamic monitoring) της δυναμικής συμπεριφοράς ενός τεχνικού έργου συνίσταται στη διεξαγωγή αναγκαίων μετρήσεων, επεξεργασία, ανάλυση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Ανάλογα με το είδος της κατασκευής, τα αποτελέσματα της παρακολούθησης (μικρομετακινήσεις και κινηματικά χαρακτηριστικά) θα πρέπει να συνδυάζονται με συμπεράσματα που απορρέουν από μετρήσεις πειραματικής μηχανικής, γεωτεχνικής κ.α. Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι ο έλεγχος της δυναμικής συμπεριφοράς ενός τεχνικού έργου είναι σύνθετο πρόβλημα που απαιτεί τη διεπιστημονική προσέγγιση. Ένας τρόπος κατηγοριοποίησης της παρακολούθησης της δυναμικής συμπεριφοράς τεχνικών έργων, αποτελεί ο διαχωρισμός τους σε γεωδαιτικές και μη γεωδαιτικές μεθόδους.

Στις γεωδαιτικές μεθόδους κατατάσσεται η παρακολούθηση με χρήση ολοκληρωμένων γεωδαιτικών σταθμών, δορυφορικές μέθοδοι με χρήση του Παγκόσμιου Συστήματος Εντοπισμού Θέσης (GPS), καθώς ποιο πρόσφατα επιχειρείται και η χρήση σαρωτών laser (laser scanners). Στις μη γεωδαιτικές μεθόδους κατατάσσονται οι τεχνικές παρακολούθησης με την βοήθεια οπτικών ινών (fiber optics), επιταχυνσιομέτρων (accelerometers), φωτογραμμετρικές τεχνικές κ.α. Συγκεντρωτικά παρουσιάζονται οι μέθοδοι και τεχνικές στον Πίνακα 2.1.

Γεωδαιτικές μέθοδοι	Μη Γεωδαιτικές μέθοδοι
Ολοκληρωμένοι γεωδαιτικοί σταθμοί	Επιταχυνσιόμετρα
Ρομποτικοί γεωδαιτικοί σταθμοί	Κλισίμετρα
Δορυφορικές μέθοδοι	Οπτικές ίνες
Σαρωτές laser	Φωτογραμμετρία

Πίνακας 2.1 Μέθοδοι παρακολούθησης δυναμικής συμπεριφοράς τεχνικών έργων
Table 2.1 Dynamic monitoring methods of technical works

2.2 Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσης (Global Positioning System-GPS)

Το σύστημα GPS αναπτύχθηκε και λειτουργεί υπό τον έλεγχο του Υπουργείου Άμυνας των ΗΠΑ. Πρόκειται για ένα σύστημα τρισδιάστατου (X, Y, Z) προσδιορισμού θέσης, το οποίο έχει ως πλαίσιο αναφοράς το γεωκεντρικό σύστημα καρτεσιανών συντεταγμένων WGS 84. Το GPS αναπτύχθηκε αρχικά, αποκλειστικά για στρατιωτικούς σκοπούς, όμως με την πάροδο των ετών, έγινε ευρεία η πολιτική χρήση του συστήματος, ενώ νέες μέθοδοι και τεχνικές μετρήσεων έχουν καταφέρει να προσεγγίσουν ακρίβειες προσδιορισμού θέσης της τάξης των 10^{-3}m.

Τα τμήματα που απαρτίζουν το σύστημα GPS, είναι τρία: το τμήμα διαστήματος, το τμήμα χρηστών και το τμήμα ελέγχου. Το τμήμα διαστήματος περιλαμβάνει 24 δορυφόρους σε επιχειρησιακή λειτουργία και επιπλέον εφεδρικούς. Οι δορυφόροι του συστήματος περιστρέφονται γύρω από τη Γη σε ύψος περίπου 20000 km από την επιφάνεια της σε συνολικά έξι τροχιακά επίπεδα με κλίση 55° ως προς τον Ισημερινό και περίοδο περιστροφής 12 h. Οι δορυφόροι είναι εξοπλισμένοι με ατομικά χρονόμετρα ρουβιδίου και καισίου πολύ υψηλής ακρίβειας (10^{-12}sec και 10^{-13}sec αντίστοιχα) για την μέτρηση του χρόνου, ενώ διαθέτουν πομπούς και δέκτες για αφενός την εκπομπή του σήματος στους χρήστες και αφετέρου την αποστολή δεδομένων στους δορυφόρους από το τμήμα ελέγχου. Το τμήμα χρηστών περιλαμβάνει τους διάφορους χρήστες (δορυφορικούς δέκτες) του συστήματος προσδιορισμού θέσης, ενώ οι εφαρμογές που περιλαμβάνει είναι ναυσιπλοία, μέτρηση ταχύτητας, γεωδαιτικές εφαρμογές και πλήθος ακόμη χρήσεων και εφαρμογών. Το τμήμα ελέγχου είναι επίγειο και αποτελείται από 5 σταθμούς παρακολούθησης, 3 σταθμούς επικοινωνίας και ένα κεντρικό σταθμό ελέγχου. Το τμήμα αυτό είναι υπεύθυνο για την ομαλή λειτουργία των δορυφόρων, την διόρθωση της τροχιάς τους, την εκπομπή εφημερίδων κτλ.

Σχ. 2.1 Οι τροχιές των δορυφόρων του συστήματος GPS
Fig. 2.1 GPS satellites constellation

Το εκπεμπόμενο σήμα των δορυφόρων του συστήματος ανήκει στην κατηγορία των μικροκυμάτων με βασική συχνότητα τα 10.23 MHz. Η βασική αυτή συχνότητα μετασχηματίζεται σε συνολικά 5 συχνότητες (L1, L2, L3, L4 και L5), με βασικές συχνότητες την L1 και L2. Η L1 έχει συχνότητα 1575.42 MHz (10.23 MHz x154) και μεταφέρει τον κώδικα C/A (Coarse/Acquisition code), καθώς και τον κώδικα P(Y) (Precise ή Protected code), ενώ η L2 είναι διαμορφωμένη στα 1227.60 MHz και μεταφέρει αποκλειστικά τον κώδικα P(Y).

Απαραίτητη προϋπόθεση για να γίνει εντοπισμός θέσης με την βοήθεια του συστήματος GPS, είναι ο δέκτης να λαμβάνει σήμα από τουλάχιστον τέσσερις δορυφόρους ταυτόχρονα, έτσι ώστε να υπάρξει λύση του συστήματος 2.1 το οποίο έχει τέσσερις αγνώστους (συντεταγμένες X, Y, Z και τον χρόνο t). Εξαίρεση αποτελεί ο απόλυτος προσδιορισμός θέσης στην επιφάνεια της θάλασσας, όπου το υψόμετρο θεωρείται γνωστό και ίσο με μηδέν, επομένως απαιτούνται κατ'ελάχιστον τρείς και όχι τέσσερις δορυφόροι.

$$\begin{aligned} PRN_{27} &= \sqrt{\left(x_{27}-x_r\right)^2+\left(y_{27}-y_r\right)^2+\left(z_{27}-z_r\right)^2}-c\cdot t_r \\ PRN_{18} &= \sqrt{\left(x_{18}-x_r\right)^2+\left(y_{18}-y_r\right)^2+\left(z_{18}-z_r\right)^2}-c\cdot t_r \\ PRN_{16} &= \sqrt{\left(x_{16}-x_r\right)^2+\left(y_{16}-y_r\right)^2+\left(z_{16}-z_r\right)^2}-c\cdot t_r \\ PRN_{26} &= \sqrt{\left(x_{16}-x_r\right)^2+\left(y_{16}-y_r\right)^2+\left(z_{16}-z_r\right)^2}-c\cdot t_r \end{aligned} \qquad (2.1)$$

Ο προσδιορισμός θέσης μπορεί να γίνει είτε με απόλυτο, είτε με σχετικό εντοπισμό θέσης. Στην περίπτωση του απόλυτου εντοπισμού γίνεται χρήση ενός μόνο δέκτη GPS, όπου μετρώνται οι ψευδοαποστάσεις προς τους διαθέσιμους δορυφόρους και από την τομή των σφαιρών με ακτίνα τις αποστάσεις αυτές, προκύπτει η θέση του παρατηρητή με συντεταγμένες στο σύστημα WGS84. Στον σχετικό εντοπισμό θέσης, χρησιμοποιούνται δυο δέκτες της μίας (L1) ή και των δύο συχνοτήτων (L1/L2). Συνήθως ο ένας δέκτης λειτουργεί ως δέκτης αναφοράς (base) και τοποθετείται σε σημείο του οποίου οι συντεταγμένες είναι γνωστές, ενώ ο δεύτερος δέκτης (rover) καταλαμβάνει διαδοχικά τα προς μέτρηση σημεία. Οι συντεταγμένες του δεύτερου δέκτη που είναι και το ζητούμενο, προσδιορίζονται από τον υπολογισμό του τρισδιάστατου διανύσματος (βάση) που συνδέει τα κέντρα των κεραιών των δύο δεκτών. Με αυτό τον τρόπο εξαλείφονται τα συστηματικά σφάλματα που προέρχονται από την αλλοίωση του σήματος λόγω της διέλευσης του από την ατμόσφαιρα της γης, τα σφάλματα μέτρησης του χρόνου που προέρχονται από τα χρονόμετρα των κοινών δορυφόρων και άλλα σφάλματα.

Οι τεχνικές μέτρησης σχετικού εντοπισμού με το σύστημα GPS χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες : τον στατικό εντοπισμό θέσης και τον κινηματικό εντοπισμό θέσης, ενώ και οι δύο αυτές τεχνικές χωρίζονται σε υποκατηγορίες ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες του προβλήματος που αντιμετωπίζεται. Ειδικότερα, στην περίπτωση μελέτης παραμορφώσεων τεχνικών έργων, η τεχνική του στατικού εντοπισμού εφαρμόζεται για τον υπολογισμό μικρομετακινήσεων, ενώ η τεχνική του κινηματικού εντοπισμού για την παρακολούθηση δυναμικών φαινομένων.

2.2.1 Στατικός σχετικός εντοπισμός (Static positioning)

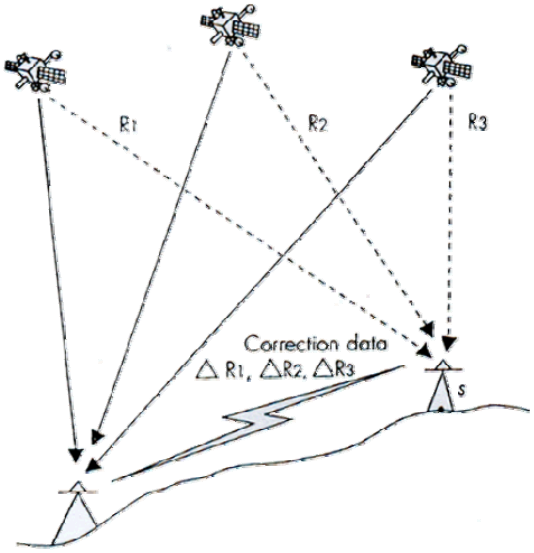
Η τεχνική του στατικού σχετικού εντοπισμού, προϋποθέτει τη χρήση τουλάχιστον δύο δορυφορικών δεκτών GPS οι οποίοι να έχουν τη δυνατότητα λήψης σήματος σε μία (L1) ή και στις δύο συχνότητες (L1/L2), έτσι ώστε να εξαλειφθεί το σφάλμα της ιονοσφαιρικής διάθλασης. Ανάλογα με το μήκος της βάσης που θέλουμε να επιλύσουμε, τον διαθέσιμο χρόνο, αλλά και την τελική ακρίβεια που επιζητούμε, μπορούμε να επιλέξουμε ανάμεσα στον κλασσικό στατικό εντοπισμό και στον ταχύ στατικό εντοπισμό.

Ο μεν στατικός εντοπισμός εφαρμόζεται σε βάσεις που το μήκος τους αγγίζει ή ξεπερνά τα 100 km, και ο χρόνος κατάληψης του κάθε σημείου πρέπει να υπερβαίνει τα 30 min. Η επίλυση γίνεται εκ των υστέρων (post processed), με χρήση των διαφορών φάσης, ενώ χρησιμοποιείται κυρίως στον έλεγχο μικρομετακινήσεων ρηγμάτων του φλοιού της γης. Η τεχνική του ταχέως στατικού εντοπισμού, χρησιμοποιείται ευρέως σε κοινές τοπογραφικές αποτυπώσεις, αφού το μήκος της μετρούμενης βάσης, δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 15 km, ενώ ο χρόνος κατάληψης κάθε σημείου κυμαίνεται από 8-20 min, ανάλογα τους διαθέσιμους δορυφόρους.

2.2.2 Κινηματικός εντοπισμός (Kinematic positioning)

Ο κινηματικός εντοπισμός, όπως και ο στατικός προϋποθέτει τη χρήση ενός (απόλυτος εντοπισμός) ή δύο (σχετικός εντοπισμός) δορυφορικών δεκτών. Ο σχετικός κινηματικός εντοπισμός στηρίζεται στο γεγονός ότι ο ένας δέκτης παραμένει ακίνητος σε σημείο με γνωστές συντεταγμένες, ενώ ο δεύτερος κινείται στα προς αποτύπωση σημεία. Οι τεχνικές του κινηματικού εντοπισμού ανάλογα με το αν η επίλυση γίνεται ταυτόχρονα ή έπεται των παρατηρήσεων, διαχωρίζονται σε *Real-Time Kinematic (RTK)* και *Post Processed Kinematic (PPK)* αντίστοιχα, ενώ ανάλογα με την κινητική κατάσταση του δεύτερου δέκτη, σε *Stop and Go Kinematic* και *Continuous Kinematic*, αν αντίστοιχα ο δέκτης παραμένει ή όχι για κάποιο χρονικό διάστημα στα μετρούμενα σημεία.

Στην περίπτωση του *Real Time Kinematic* οι δυο δορυφορικοί δέκτες είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους με ραδιοζεύξη. Με αυτό τον τρόπο και εφόσον οι δέκτες παρακολουθούν ταυτόχρονα τουλάχιστον τέσσερις κοινούς δορυφόρους, επιτυγχάνεται συγχρονισμένη μετάδοση των σφαλμάτων των μετρήσεων και γίνεται απεσφαλμάτωση των μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο. Ο σχετικός κινηματικός εντοπισμός σε πραγματικό χρόνο συνδυάζει την υψηλή ταχύτητα μετρήσεων με την αυξημένη ακρίβεια, αφού η ακρίβεια είναι λίγο χειρότερη από 1-2 cm + (2-3) ppm στον προσδιορισμό θέσης για την περίπτωση μέτρησης με επίλυση διαφορών φάσης (*Α. Φωτίου – Χ. Πικριδάς, 2004*).



Σχ. 2.2 Σχετικός κινηματικός εντοπισμός σε πραγματικό χρόνο
Fig. 2.2 Real Time Kinematic (RTK) positioning

2.2.3 Πηγές σφαλμάτων των μετρήσεων με GPS

Οι κυριότερη "φυσική αιτία" εισαγωγής σφάλματος στις μετρήσεις με GPS, είναι η ακρίβεια προσδιορισμού του χρόνου. Το δορυφορικό σήμα ταξιδεύει με ταχύτητα περίπου 300000 km/sec. Κατά συνέπεια, προκειμένου να επιτευχεί μια ακρίβεια προσδιορισμού θέσης με απόλυτο εντοπισμό της τάξεως των ±3 m, απαιτείται αντίστοιχη ακρίβεια στον χρόνο 10^{-8} sec, ενώ για ±3 mm, 10^{-11} sec. Τα χρονόμετρα των δορυφόρων έχουν θεωρητικά τη δυνατότητα να υπερβούν αυτή την ακρίβεια, πράγμα το οποίο όμως δεν ισχύει και για τα χρονόμετρα των δεκτών λόγω του υψηλού κόστους. Το δεύτερο μεγαλύτερο "φυσικό" πρόβλημα στην ακρίβεια προσδιορισμού θέσης, είναι η καθυστέρηση και αλλαγή πορείας των εκπεμπόμενων σημάτων, λόγω της διέλευσης του από τα στρώματα της ατμόσφαιρας (τροπόσφαιρα, ιονόσφαιρα). Το πρόβλημα αυτό, επιλύεται με τη χρήση δεκτών δύο συχνοτήτων, με τη χρήση μοντέλων της ατμόσφαιρας και με την επίλυση χρησιμοποιώντας διαφορές φάσης. Επίσης άλλα "φυσικά" αίτια είναι:

- Η ανάκλαση του σήματος σε γειτονικές επιφάνειες (π.χ. ψηλά κτήρια) και η επιστροφή του στην κεραία του δέκτη, έχοντας διανύσει λόγω της ανάκλασης μεγαλύτερη απόσταση από την κανονική. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να επιλυθεί σε μεγάλο βαθμό με τη χρήση ειδικά σχεδιασμένων κεραιών (Choke Ring) και με την προσεκτική τοποθέτηση των δεκτών μακρυά από επιφάνειες ανάκλασης του σήματος.

- Η γεωμετρία του σχηματισμού των ορατών δορυφόρων (PDOP), κατά πόσο δηλαδή υπάρχει ισχυρή γεωμετρία των ορατών δορυφόρων ως προς το δέκτη. Καλύτερη γεωμετρία συνεπάγεται μικρότερα σφάλματα και επιτυγχάνεται με σωστό προγραμματισμό των μετρήσεων.
- Η απώλεια αγνώστου αριθμού ακέραιων κύκλων, κατά την αρχική μέτρηση, η οποία ορίζεται ως ασάφεια φάσης και αντιμετωπίζεται με την επίλυση τριπλών διαφορών.
- Η αποχή του ηλεκτρικού κέντρου της κεραίας από το φυσικό της κέντρο. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με τον προσανατολισμό των κεραιών όλων των δεκτών στην ίδια κατεύθυνση.

Τέλος, μπορούν να αναφερθούν και ανθρωπογενή αίτια παραμόρφωσης του εκπεμπόμενου σήματος, τα οποία δημιουργούνται εσκεμμένα από τους διαχειριστές του συστήματος GPS. Τέτοια είναι η Επιλεκτική Διαθεσιμότητα (Selective Availability), και η Κρυπτογράφηση (Anti-Spoofing). Στη μεν Επιλεκτική Διαθεσιμότητα γίνεται σκόπιμος υποβιβασμός της ακρίβειας που παρέχει ο κώδικας C/A με την εισαγωγή θορύβου στο εκπεμπόμενο σήμα και υποβάθμιση της ακρίβειας της εκπεμπόμενης τροχιάς. Η λειτουργία της Επιλεκτικής Διαθεσιμότητας έχει πάψει να ισχύει από την $1^{η}$ Μαίου του έτους 2000. Σφάλματα κρυπτογράφησης αφορούν σε αντικατάσταση του ακριβούς κώδικα P(t) με άγνωστο Y(t) με συνέπεια να μην είναι δυνατή η χρήση του για πολιτικούς σκοπούς.

2.3 Ολοκληρωμένοι Γεωδαιτικοί Σταθμοί Αυτόματης Αναγνώρισης και Παρακολούθησης Στόχου

2.3.1 Γενικά

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 αυτόνομης 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 ρομποτικό (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 γεωργικές εφαρμογές (καθοδήγηση αγροτικών μηχανημάτων).

2.3.2 Αρχές λειτουργίας

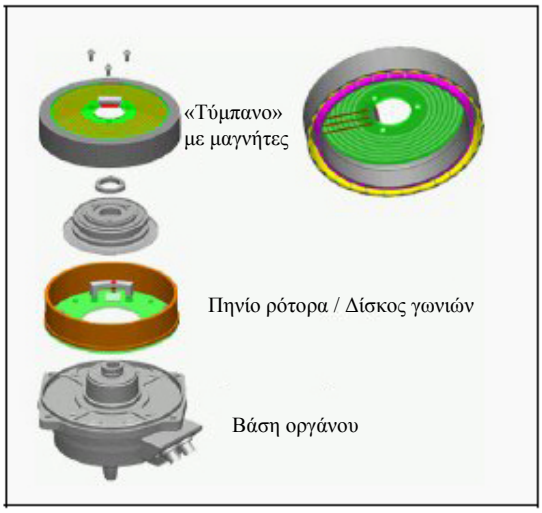
Η λειτουργία των ρομποτικών γεωδαιτικών σταθμών βασίζεται στην ενσωμάτωση τριών διαφορετικών χαρακτηριστικών:

- στην αυτόματη περιστροφή του τηλεσκοπίου του οργάνου κατά τον πρωτεύοντα και δευτερεύοντα άξονα,
- στην αυτόματη αναγνώριση και παρακολούθηση στόχων,
- στον εξ'αποστάσεως τηλεχειρισμό του οργάνου.

2.3.2α Αυτόματη περιστροφή τηλεσκοπίου

Η αυτόματη περιστροφή του τηλεσκοπίου υλοποιείται με δύο διαφορετικές τεχνολογίες. Η πρώτη αποτελεί ευρεσιτεχνία της εταιρείας Trimble και είναι γνωστή με το όνομα MagDrive® (Σχήμα 2.3) Η βασική αρχή λειτουργίας στηρίζεται στην χρήση ενός ομοαξονικά τοποθετημένου "τυμπάνου" 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.



Σχ. 2.3 Η τεχνολογία MagDrive® (Πηγή: *Lemmon & Jung, 2005*)
Fig. 2.3 The MagDrive® technology (Source: *Lemmon & Jung, 2005*)

Γεωδαιτικός σταθμός	Μέγιστη ταχύτητα περιστροφής
Trimble S6	115º/sec
Leica TPS-1200	45º/sec
Topcon GTP-8200	50º/sec

Πίνακας 2.2 Μέγιστες ταχύτητες περιστροφής (Πηγή: *Dennis Garget*, 2005)
Table 2.2 Maximum turning speeds (Source: *Dennis Garget*, 2005)

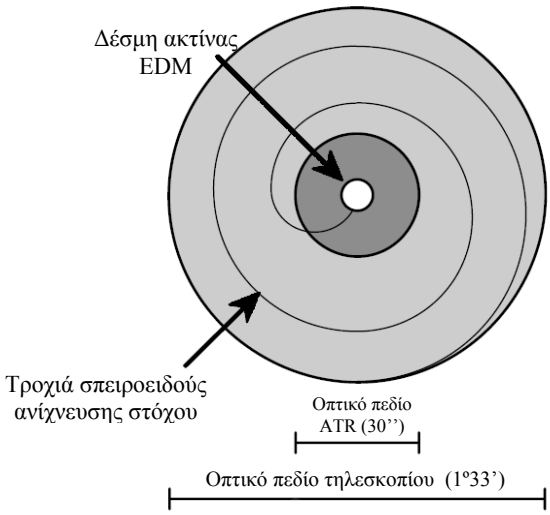
Η δεύτερη τεχνολογία εισήχθει και χρησιμοποιείται από τις εταιρείες Topcon και Leica Geosystems. Βασίζεται στην χρήση σερβομηχανισμών (servomotors), οι οποίοι είναι ηλεκτρικοί κινητήρες με δυνατότητα πλήρους ελέγχου της ταχύτητας και της γωνίας περιστροφής του άξονα τους. Οι μηχανισμοί αυτοί δεν είναι συνδεμένοι 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.

2.3.2β Αυτόματη αναγνώριση και παρακολούθηση στόχου

Στηριζόμενοι οι κατασκευαστές των οργάνων στο χαρακτηριστικό της αυτόματης κίνησης του τηλεσκοπίου, το επόμενο βήμα αφορά στην δυνατότητα αναγνώρισης ενός γεωδαιτικού στόχου και να συνεχίζουν την 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* παρακολούθησης στόχου (Leica) και το σύστημα *παθητικής* παρακολούθησης στόχου (Trimble).

Το σύστημα *ενεργητικής* αναγνώρισης και παρακολούθηση 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 φώς), προσπίπτει σε μιά 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 του σκοπευτικού άξονα από το σταυρόνημα, να μην ξεπερνά μια προκαθορισμένη τιμή. Πρακτικά για την έναρξη της λειτουργίας ATR, απαιτείται ο αρχικός εντοπισμός του στόχου από τον παρατηρητή. Η αναγνώριση του στόχου γίνεται άμεσα με την τοποθέτηση του στο οπτικό πεδίο του τηλεσκοπίου. Στη συνέχεια το όργανο, εκτελεί σπειροειδείς κινήσεις διάρκειας 2-4 δευτερολέπτων, απομακρυνόμενο από το κέντρο του άξονα σκόπευσης, έως ότου μπορέσει να λάβει την ανακλανώμενη από τον στόχο ακτίνα ATR (Σχήμα 2.4). Εάν κάτι τέτοιο δεν καταστεί εφικτό, δηλαδή εάν ο στόχος είναι εκτός του πεδίου του τηλεσκοπίου, τότε η διαδικασία αναγνώρισης στόχου αποτυγχάνει.



Σχ. 2.4 Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος σπειροειδούς ανίχνευσης στόχου Leica TCA-1800

Fig. 2.4 Schematic representation of Leica TCA-1800 spiral target recognition system

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.

Στην περίπτωση της *παθητικής* αναγνώρισης, το όργανο λειτουργεί πλέον ως δέκτης μια 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.

2.3.2γ Ασύρματο χειριστήριο (Ρομποτική λειτουργία)

Τέλος, με την προσθήκη του χαρακτηριστικού του ασύρματου τηλεχειρισμού του οργάνου σε πραγματικό χρόνο, ο χρήστης μπορεί να εκτελέσει εργασίες όπως η χάραξη ή η αποτύπωση σημείων, από τη θέση του κατάφωτου. Ένα τυπικό τηλεχειριστήριο ρομποτικού οργάνου παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.5.

Σχ. 2.5 Ασύρματο χειριστήριο Leica (Πηγή: *Leica Geosystems*)
Fig. 2.5 Leica remote control (Source: *Leica Geosystems*)

2.3.2δ Περίβλεπτο κατάφωτο

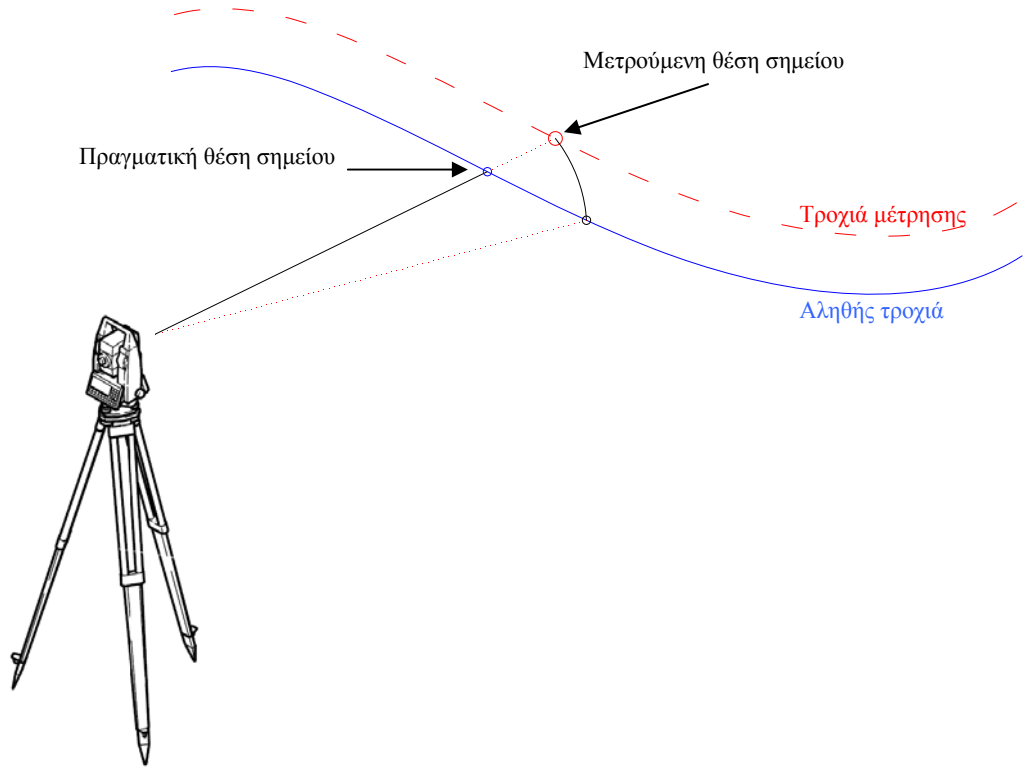
Το χαρακτηριστικό αυτού του τύπου πρίσματος είναι ότι δεν είναι απαραίτητη η μετωπική περιστροφή του προς τον γεωδαιτικό σταθμό. Ένα περίβλεπτο πρίσμα όπως του Σχήματος 2.6, διαθέτει έξι πρίσματα τοποθετημένα ομοαξονικά σε ίσες γωνίες, με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι δυνατή η επιστροφή της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, στον γεωδαιτικό σταθμό ανεξάρτητα από την γωνία πρόσπτωσης.

Σχ. 2.6 Περίβλεπτο πρίσμα Leica GRZ122 (*Πηγή: www.leica-geosystems.com*)
Fig. 2.6 Leica GRZ122 Smartpole 360º reflector (*Source: www.leica-geosystems.com*)

2.3.3 Πηγές σφαλμάτων

Όλα τα είδη σφαλμάτων που παρουσιάζονται κατά τις μετρήσεις με έναν απλό γεωδαιτικό σταθμό (σφάλματα οριζοντίωσης, κέντρωσης, διάθλασης, κατάφωτου, καμπυλότητας της Γης, κτλ), 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 θέση για το μετρηθέν σημείο (Σχήμα 2.7).



Σχ. 2.7 Σφάλμα χρονικής διαφοράς καταγραφής γωνίας-απόστασης
Fig. 2.7 Synchronization error between angle and distance recording

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.

2.4 Άλλες Τεχνικές Παρακολούθησης

Στη συνέχεια περιγράφονται συνοπτικά επιπλέον μέθοδοι παρακολούθησης της δυναμικής συμπεριφοράς στα τεχνικά έργα, οι οποίες μπορούν να εφαρμοσθούν αυτόνομα ή σε συνδυασμό μεταξύ τους ανάλογα τις απαιτήσεις της εργασίας.

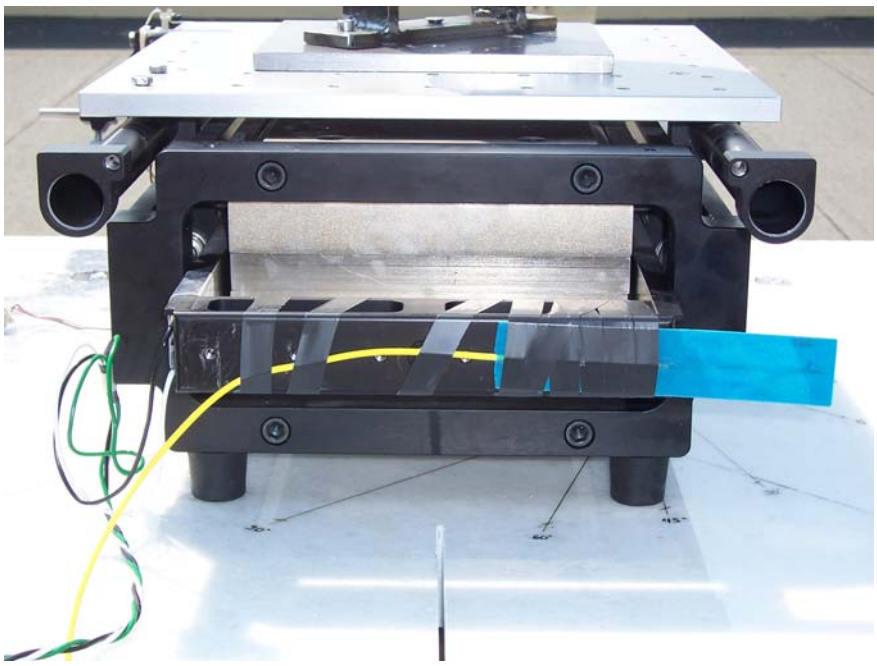
2.4.1 Επιταχυνσιόμετρα (accelerometers)

Τα επιταχυνσιόμετρα, είναι μικρές (λίγα cm ή μικρότερες) ηλεκτρο-μηχανικές συσκευές, οι οποίες όπως δηλώνει και η ονομασία τους, μετρούν επιταχύνσεις σε έναν, δύο ή τρείς άξονες. Η λειτουργία τους βασίζεται στην αρχή της αδράνειας, ειδικότερα στη μεταβολή της θέσης μιας μάζας που βρίσκεται στο εσωτερικό τους κατά την εμφάνιση επιτάχυνσης. Η μεταβολή αυτή μετράται από ειδικούς, κατάλληλα βαθμονομημένους, ηλεκτρονικούς αισθητήρες και μετατρέπεται σε μονάδες επιτάχυνσης. Τα επιταχυνσιόμετρα συναντώνται σε πολλές μορφές ανάλογα την τεχνολογία κατασκευής τους (οπτικά, πιεζοηλεκτρικά, θερμικά, μαγνητικά, laser κ.α.), και η χρήση τους είναι ευρεία σε πολλές εφαρμογές. Όσον αφορά την παρακολούθηση των τεχνικών έργων, υπάρχει δυνατότητα τοποθέτησης πλήθους επιταχυνσιομέτρων, σταθερά επάνω στην κατασκευή που μελετάται, σχηματίζοντας ουσιαστικά ένα δίκτυο και εξάγονται αποτελέσματα για μικροδονήσεις και επιταχύνσεις της κατασκευής.

2.4.2 Οπτικές ίνες (Fiber-optics)

Οι αισθητήρες οπτικών ινών χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση μεταβολών κάποιας ποσότητας, όπως θερμοκρασία, μηχανική καταπόνηση, δονήσεις, επιταχύνσεις, πίεση κλπ. Η αρχή λειτουργίας τους, βασίζεται στην εκπομπή μιας ακτίνας laser μέσω της οπτικής ίνας που τοποθετείται στο αντικείμενο προς μελέτη. Η αλλαγή των

χαρακτηριστικών της ακτίνας μετράται από έναν ευαίσθητο αισθητήρα και τα αποτελέσματα μετά από τις κατάλληλες μετατροπές, δίνουν τα επιθυμητά μεγέθη. Το κυριότερο πλεονέκτημα των αισθητήρων οπτικών ινών, είναι ότι εγγενώς δεν αλληλεπιδρούν με ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία, κάτι το οποίο εφιστά δυνατή τη χρήση τους σε περιβάλλοντα υψηλής τάσης, εύφλεκτα περιβάλλοντα, θέσεις ευαίσθητες σε ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές, κ.α. Άλλα πλεονεκτήματα, είναι η μη διαβρωσιμότητα του υλικού κατασκευής τους από οξέα και το μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας τους, σε σύγκριση με άλλου τύπου ηλεκτρονικούς αισθητήρες και όργανα.



Σχ. 2.8 Αισθητήρας οπτικών ινών (μπλε), τοποθετημένος σε σεισμική τράπεζα
Fig. 2.8 Fiber-optic sensor (blue), attached on a seismic oscillator

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΈΡΓΩΝ

Στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρονται αρκετά παραδείγματα μελέτης της δυναμικής συμπεριφοράς τεχνικών έργων. Σε αυτή την ενότητα αναφέρονται περιληπτικά αντιπροσωπευτικά παραδείγματα.

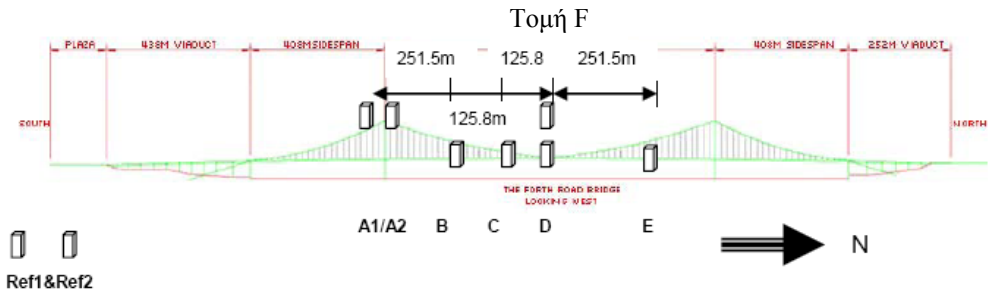
3.1 Παρακολούθηση Παραμορφώσεων της Γέφυρας Forth Road, με Χρήση τού Παγκόσμιου Συστήματος Εντοπισμού Θέσης (GPS)

3.1.1 Εισαγωγή

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 της γέφυρας προκειμένου να υπολογιστούν οι μετατοπίσεις του καταστρώματος σε πραγματικές συνθήκες κυκλοφοριακού φόρτου (*Gethin Wyn Roberts[1], Chris Brown[2], Xiaolin Meng, Institute of Engineering Surveying and Space Geodesy, The University of Nottingham, UK, School of Engineering and Design, Brunel University, Uxbridge, UK).*

3.1.2 Διάταξη οργάνων και στοιχεία πειράματος

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 κτίριο. Η διάταξη όλων των δεκτών GPS, απεικονίζεται στο Σχήμα 3.1, ενώ ο τύπος των δεκτών και των κεραιών φαίνεται στον Πίνακα 3.1.



Σχ. 3.1 Οι θέσεις των δεκτών GPS
Fig. 3.1 GPS receiver mounting points

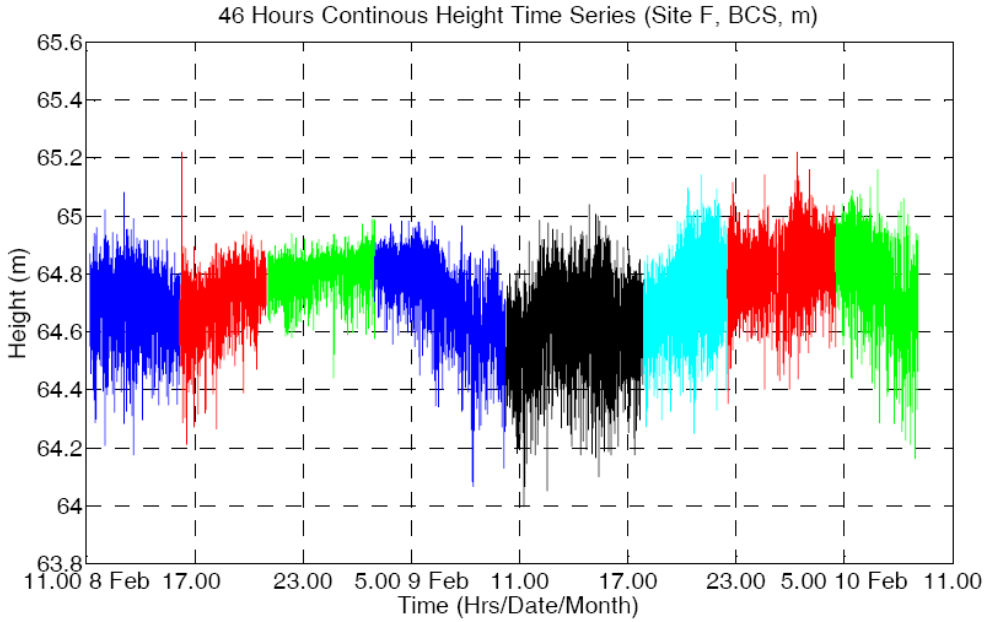
Σημείο τοποθέτησης	Τύπος δέκτη	Τύπος κεραίας	Σημείο τοποθέτησης
B	Leica SR530	AT503	E ¼ span
C	Leica SR530	AT503	E 3/8 span
D	Leica SR530	AT503	E ½ span
E	POS RS	NovAtel600	E ¾ span
F	Leica GX1230	AT504	W ½ span
A1	Leica SR530	AT504	Tower
A2	Leica SR530	AT501	Tower
R1	Leica SR530	AT503	Reference
R2	Leica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

Πίνακας 3.1 Τύποι δεκτών και κεραιών GPS του πειράματος
Table 3.1 GPS receiver and antenna types in the experiment

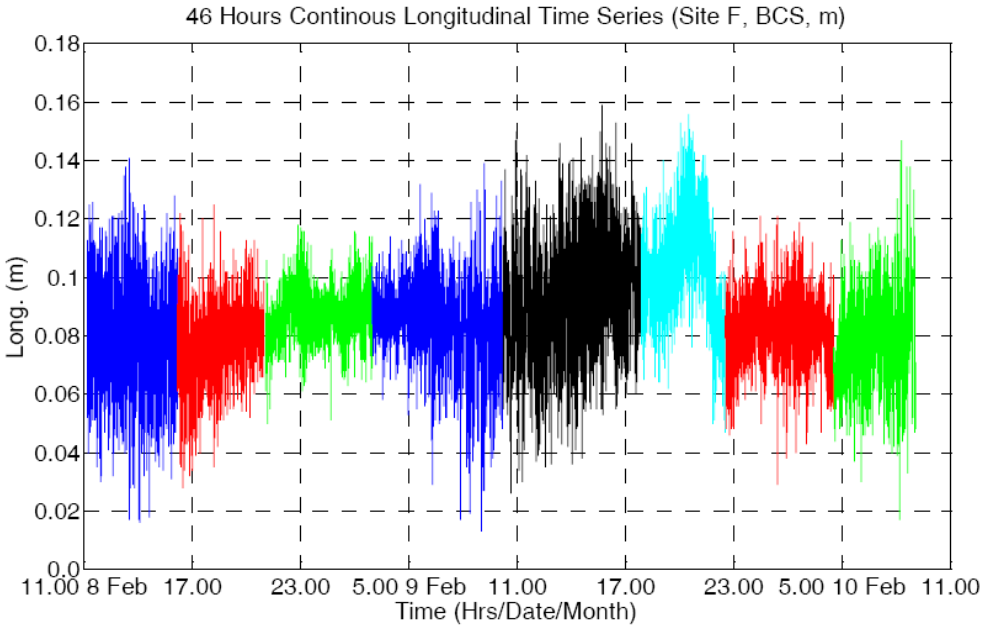
Το πείραμα διήρκεισε συνολικά 46 ώρες και τα δεδομένα συνελλέγησαν με ρυθμό καταγραφής τα 10 Hz. Η επίλυση έγινε με την "Εν κινήσει επίλυση ασαφειών" (On The Fly), ενώ οι συντεταγμένες υπολογίστηκαν στο σύστημα αναφοράς WGS84. Επίσης κατεγράφησαν και δεδομένα θερμοκρασίας, πίεσης, ταχύτητας, σχετικής υγρασίας, καθώς και κατεύθυνσης ανέμου με την βοήθεια του μετεωρολογικού σταθμού Omni Instrument και ρυθμό καταγραφής δεδομένων ανά 15 sec.

3.1.3 Αποτελέσματα

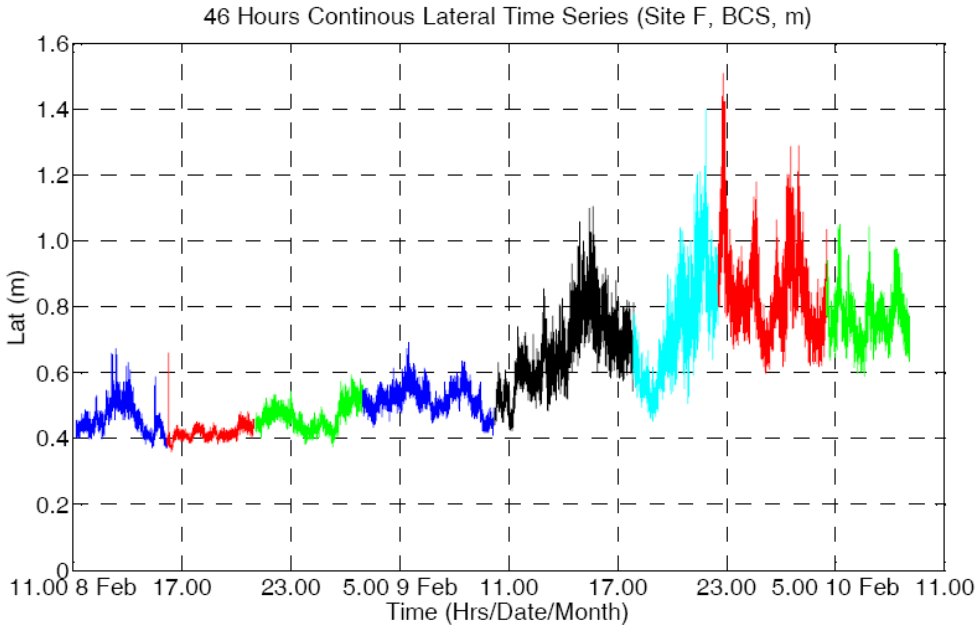
Στα Σχήματα 3.2, 3.3 και 3.4 παρουσιάζεται η μεταβολή που υπέστη η γέφυρα κατά τον διαμήκη, τον εγκάρσιο και τον κατακόρυφο άξονα της καθόλη την 46ωρη διάρκεια του πειράματος:



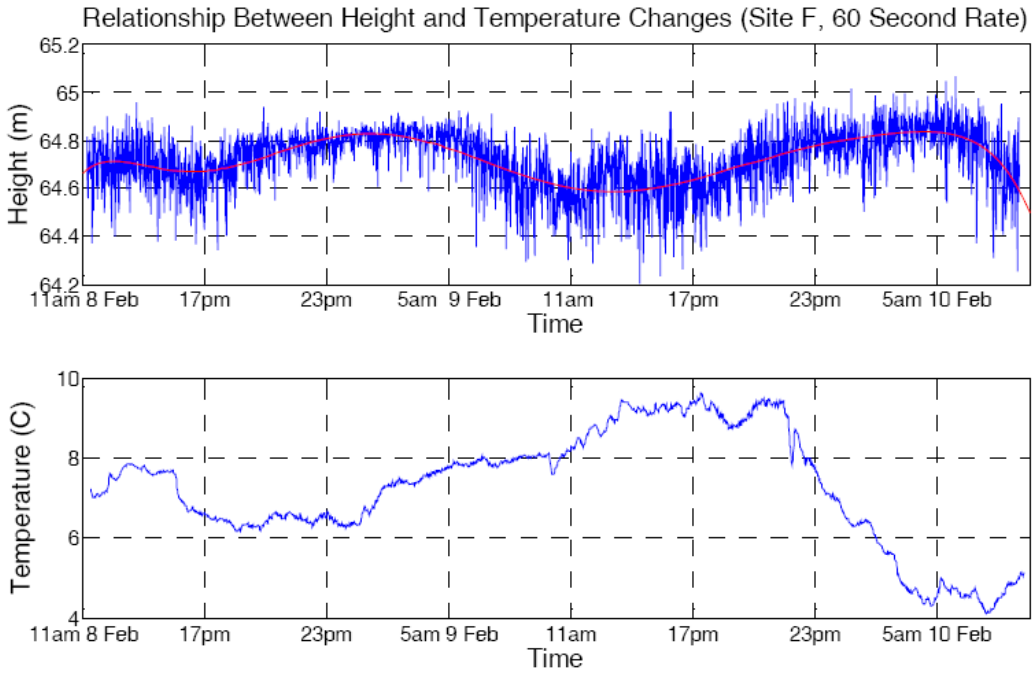
Σχ. 3.2 Καθ'ύψος παραμορφώσεις της τομής F, της γέφυρας
Fig. 3.2 Height deflections of bridge site F



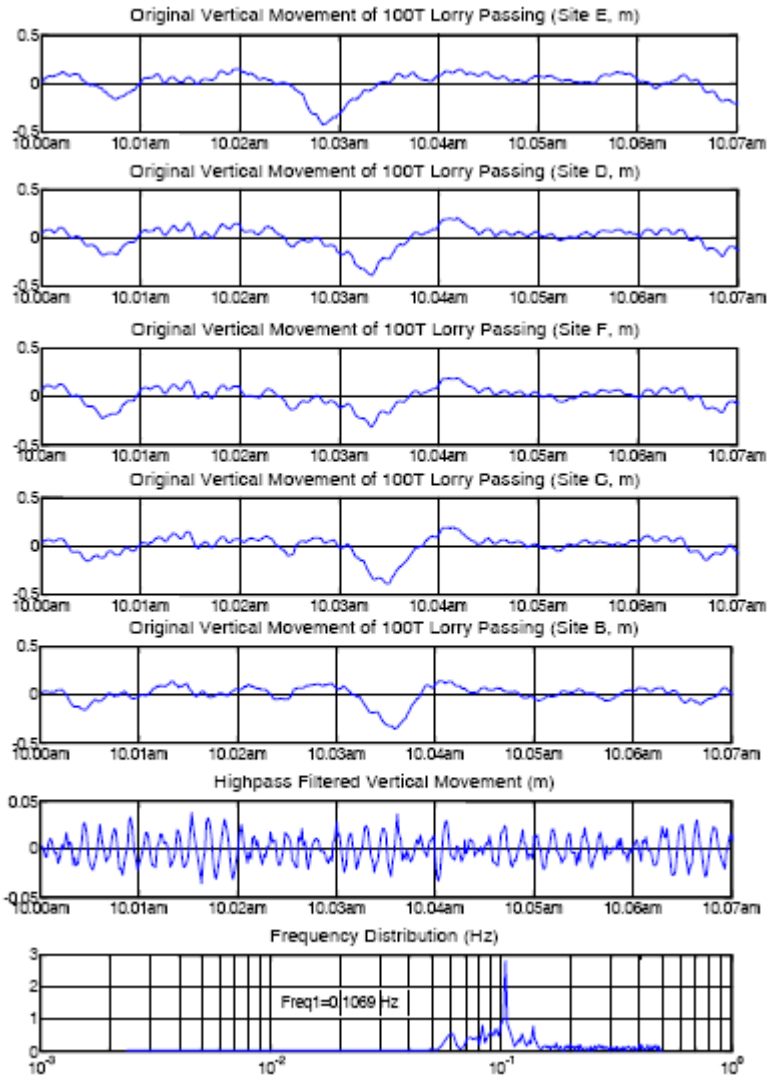
Σχ. 3.3 Επιμήκεις παραμορφώσεις της τομής F, της γέφυρας
Fig. 3.3 Longitudinal deflections of bridge site F



Σχ. 3.4 Εγκάρσιες παραμορφώσεις της τομής F, της γέφυρας
Fig. 3.4 Lateral deflections of bridge site F



Σχ. 3.5 Σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και μεταβολής του ύψους του καταστρώματος της γέφυρας, στην τομή F
Fig. 3.5 Relationship between air temperature and height location of the bridge deck at site F

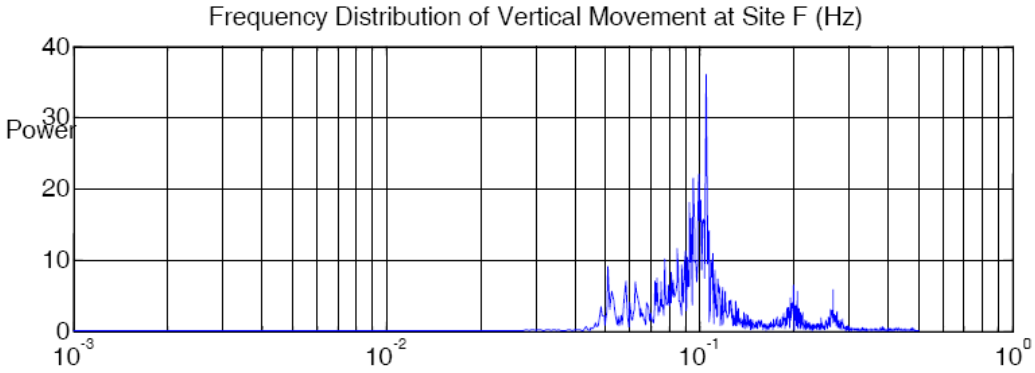


Σχ. 3.6 Υψομετρικές μεταβολές κατά την διέλευση του φορτηγού των 100 τόνων

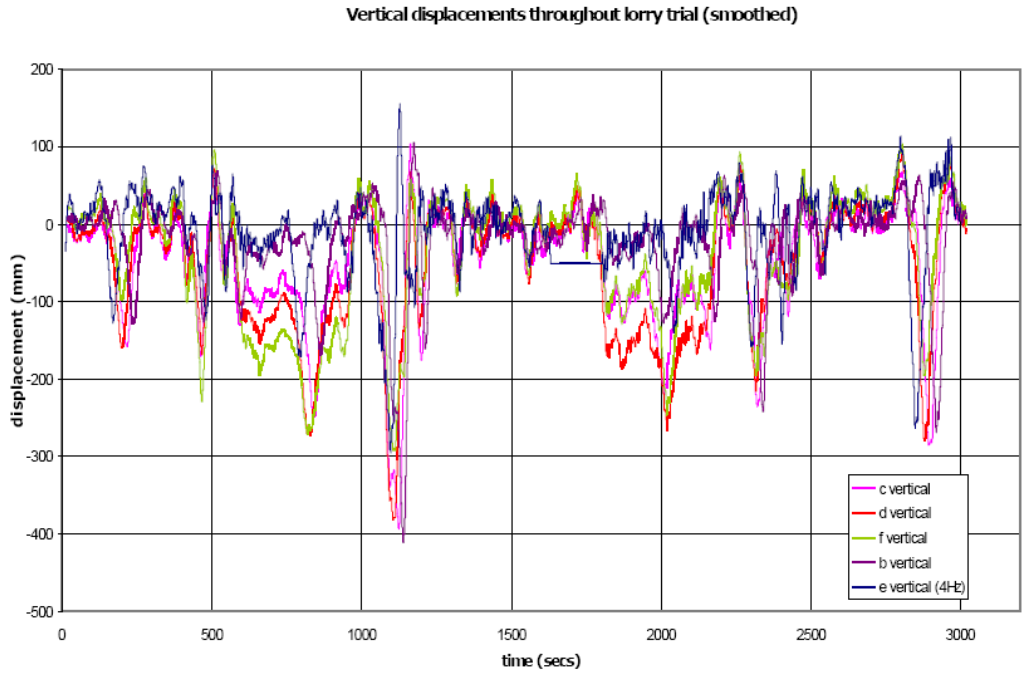
Fig. 3.6 Height deflections during the 100 tone lorry pass

Από τα παραπάνω διαγράμματα γίνεται αντιληπτό οτι οι μετακινήσεις του καταστρώματος της γέφυρας ήταν της τάξεων των δεκατόμετρων. Επίσης, από το Σχήμα 3.4, 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. Με το Σχήμα 3.5, 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.

Επιπλέον πειράματα διεξήχθησαν με την τοποθέτηση ελεγχόμενου φορτίου στο κατάστρωμα της γέφυρας και συγκεκριμένα ενός φορτηγού 100 tones και δύο φορτηγών 40 tones έκαστο τα οποία διέσχησαν τη γέφυρα χωρίς άλλο κυκλοφοριακό φόρτο, και εκτελώντας διάφορους ελιγμούς επάνω στο κατάστρωμα αυτής. 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 tones στα Σχήματα 3.6 και 3.7, ενώ για τα οχήματα των 40 tones, στο Σχήμα 3.8.



Σχ. 3.7 Βασική συχνότητα κατά την διέλευση του φορτηγού των 100 τόνων
Fig. 3.7 Basic frequency during the 100 tonne lorry pass



Σχ. 3.8 Υψομετρικές μεταβολές κατά τους ελιγμούς των φορτηγών των 40 τόνων
Fig. 3.8 Height deflections during the 40 tonne lorry trials

3.2 Παρακολούθηση Παραμορφώσεων της Γέφυρας Rio Pelotas στη Νότια Βραζιλία, με Χρήση Ρομποτικού Γεωδαιτικού Σταθμού (RTS)

3.2.1 Εισαγωγή

Το υπόψην πείραμα πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο LAIG (Geodetic Instrumentation Laboratory) του Federal University of Paraná και περιελάμβανε δύο σκέλη: Το πρώτο σκέλος αφορά στην παρακολούθηση ενός ελεγχόμενα κινούμενου στόχου από το όργανο σε εργαστηριακό επίπεδο περιλαμβάνοντας μετρήσεις σε εσωτερικό και εξωτερικό χώρο, ενώ το δεύτερο σκέλος περιελάμβανε τη δυναμική παρακολούθηση σε πραγματικές συνθήκες της γέφυρας Rio Pelotas με το ίδιο όργανο. Σκοπός του εγχειρήματος είναι η εφαρμογή ρομποτικού γεωδαιτικού σταθμού προκειμένου να γίνει μια εκτίμηση της ακρίβειας προσδιορισμού των δυναμικών παραμορφώσεων που μπορεί να υποστεί μια κατασκευή και κυρίως μια γέφυρα.

3.2.2 Όργανα και παρελκόμενα

Τα όργανα και τα παρελκόμενα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν:

- ρομποτικός Γεωδαιτικός Σταθμός Leica TCRA 1205 (Σχημα 3.9),
- γεωδαιτικός Σταθμός Leica TC2002 (Σχήμα 3.10),
- πρίσμα 360º (Σχήμα 3.11),
- κυκλικό πρίσμα,
- συσκευή ελεγχόμενης ταλάντωσης του στόχου κατά τον κατακόρυφο άξονα (Σχήμα 3.12).

Σχ. 3.9 Σταθμός TCRA 1205
Fig. 3.9 TCRA 1205 Total Station

Σχ. 3.10 Σταθμός TC2002
Fig. 3.10 TC2002 Total Station

Σχ. 3.11 Πρίσμα 360º
Fig. 3.11 360º prism

Οι ακρίβειες που επιτυγχάνουν τα δύο όργανα σε στατική και δυναμική λειτουργία παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2.

	Μέτρηση	Leica TCRA 1205	Leica TC2002
Στατική λειτουργία	*Απόσταση*	2mm+2ppm	1mm+1ppm
	Γωνία	5”	0.5”±0.1”
Δυναμική λειτουργία	*Απόσταση*	5mm+2ppm	--------
	Γωνία	5”	--------

Πίνακας 3.2 Εσωτερική ακρίβεια μέτρησης μήκους και γωνίας Γεωδαιτικών Σταθμών
Table 3.2 Total Stations length and angle measurement accuracy

Η συσκευή ταλάντωσης του στόχου παρείχε την δυνατότητα ταλάντωσης του στόχου κατά τον κατακόρυφο άξονα με μέγιστο πλάτος ταλάντωσης τα 1.4 m και περίοδο ταλάντωσης από 1 sec έως 25 sec (1 Hz - 0.04 Hz).

Σχ. 3.12 Συσκευή ταλάντωσης στόχου
Fig. 3.12 Oscillator device

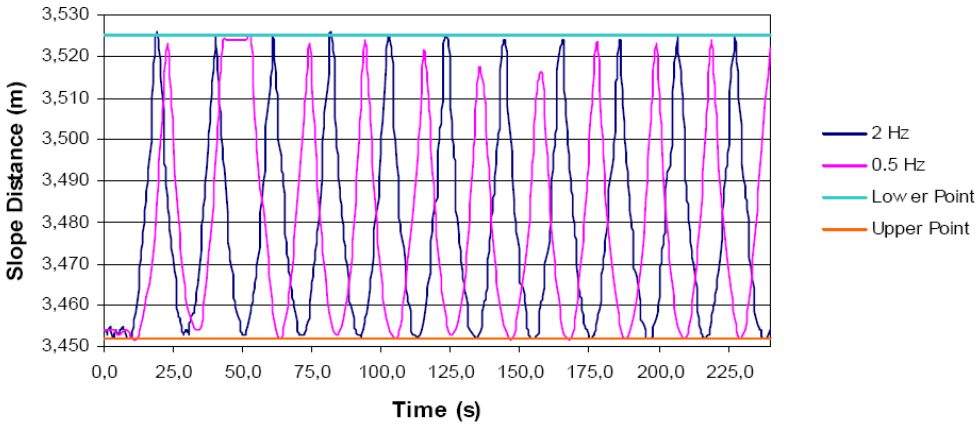
3.2.3 Εργαστηριακές μετρήσεις

Στον χώρο του εργαστηρίου, τοποθετήθηκε το πρίσμα επάνω στην συσκευή ταλάντωσης, της οποίας το μέγιστο πλάτος περιορίστηκε στα 0.6 m, ενώ ο ρομποτικός γεωδαιτικός σταθμός, τοποθετήθηκε σε απόσταση 3.45 m από τον στόχο, λόγω φυσικών περιορισμών στις διαστάσεις του εργαστηρίου. Αφού έγινε μια σειρά μετρήσεων με ρυθμούς καταγραφής τα 0.5 Hz και τα 2 Hz, μετρήθηκε εν συνεχεία η κεκλιμένη απόσταση στο ανώτερο και κατώτερο σημείο ταλάντωσης με τον γεωδαιτικό σταθμό TC2002, του οποίου τα αποτελέσματα θεωρήθηκαν σαν σημεία αναφοράς, εφόσον είναι ακριβέστερος από τον TCRA 1205. Οι μέγιστες αποκλίσεις στις συντεταγμένες του άνω και κάτω σημείου του στόχου, σχετικά με τις μετρήσεις

του TC2002, φαίνονται στον Πίνακα 3.3, ενώ στο Σχήμα 3.13, αναπαρίσταται η ταλάντωση σε κυματοειδή μορφή:

Ρυθμός καταγραφής	Μέγιστη Απόκλιση (mm)		
	X	*Y*	*Z*
0.5Hz	1.5	0.4	2.2
2.0Hz	1.9	0.2	1.6

Πίνακας 3.3 Μέγιστες σχετικές αποκλίσεις συντεταγμένων
Table 3.3 Maximum coordinate relative deviations



Σχ. 3.13 Αποτελέσματα εργαστηριακού πειράματος
Fig. 3.13 Results of laboratory tests

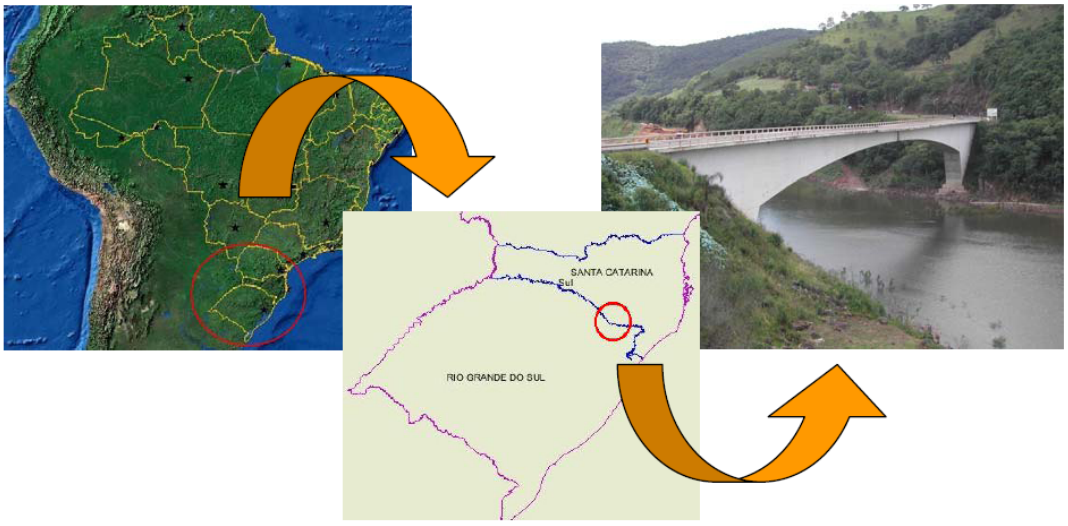
Επίσης πραγματοποιήθηκαν και μετρήσεις σε εξωτερικό χώρο και συγκεκριμένα στο προαύλιο του Πανεπιστημίου. Σε αυτή την περίπτωση το πείραμα περιελάμβανε μετρήσεις με το όργανο TCRA 1205, με δύο διαφορετικά πρίσματα (κυκλικό και περίοπτο) με ρυθμούς καταγραφής 1 Hz, 2 Hz και 10 Hz, ενώ το όργανο τοποθετήθηκε σε τρείς διαφορετικές αποστάσεις από τον στόχο (40.574 m, 100.773 m και 146.435 m) και η παρακολούθηση του στόχου για την κάθε ομάδα μετρήσεων διήρκησε περίπου 150 δευτερόλεπτα. Ως σταθερά μεγέθη θεωρήθηκαν και σε αυτήν την περίπτωση οι μετρήσεις μηκών και γωνιών από τον γεωδαιτικό σταθμό TC2002 λόγω της υψηλής, ακρίβειας και απόδοσης του. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων και οι αποκλίσεις μεταξύ των μετρήσεων των δυο γεωδαιτικών σταθμών παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.4.

Prism	Sampling Rate	TCRA1205 Amplitude	TC2002 Amplitude	Discrepancy between TCRA1205 and TC2002	TCRA1205 Mean Slope Distance	TC2002 Mean Slope Distance	Discrepancy between TCRA1205 and TC2002
	(Hz)	(mm)	(mm)	(mm)	(m)	(m)	(mm)
Standard	1,0	301,7	291,00	10,70	40,575	40,574	1
Standard	2,0	306,0		15,00	40,574		0
Standard	10,0	310,1		19,10	40,574		0
360	1,0	307,1	293,1	14,00	40,574	40,551	23
360	2,0	306,2		13,10	40,574		23
360	10,0	309,7		16,60	40,574		23
Standard	1,0	310,7	294,9	15,80	100,773	100,773	0
Standard	2,0	314,2		19,30	100,773		0
Standard	10,0	305,4		10,50	100,773		0
360	1,0	302,4	294,5	7,90	100,773	100,749	24
360	2,0	331,7		37,20	100,773		24
360	10,0	330,8		36,30	100,773		24
Standard	1,0	304,3	295,7	8,60	146,436	146,435	1
Standard	2,0	324,2		28,50	146,436		1
Standard	10,0	354,7		59,00	146,436		1
360	1,0	340,4	297,2	43,20	146,436	146,411	25
360	2,0	352,5		55,30	146,436		25
360	10,0	351,2		54,00	146,436		25

Πίνακας 3.4 Αποτελέσματα μετρήσεων στον υπαίθριο χώρο του Πανεπιστημίου
Table 3.4 Results of the tests on the University Campus

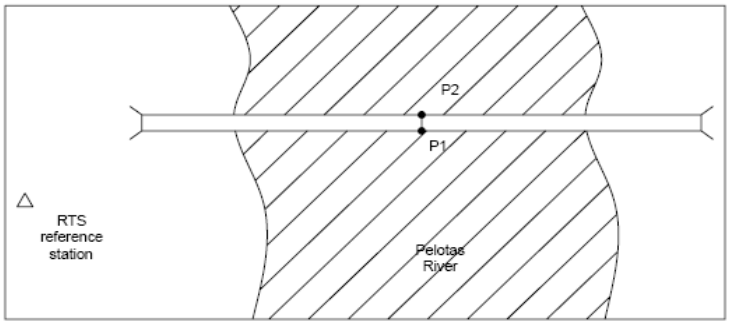
3.2.4 Μετρήσεις στην γέφυρα Rio Pelotas

Η γέφυρα Rio Pelotas συνδέει τις πολιτείες Rio Grande και Santa Catarina στην Νότια Βραζιλία (Σχ. 3.14). Η γέφυρα είναι κατασκευασμένη από προεντεταμένο σκυρόδεμα, και έχει συνολικό μήκος 250 m. Το κατάστρωμά της, έχει μήκος 189 m και πλάτος 7.5 m.



Σχ. 3.14 Τοποθεσία της γέφυρας
Fig. 3.14 Bridge location

Για το πείραμα εγκαταστάθηκαν δύο κυκλικά πρίσματα P_1 και P_2 στα κιγκλιδώματα της γέφυρας στο μέσο του καταστρώματος της όπως φαίνονται στο Σχήμα 3.15. Το πείραμα περιελάμβανε μετρήσεις 85 sec προς κάθε πρίσμα με συχνότητα καταγραφής περίπου 7 Hz.



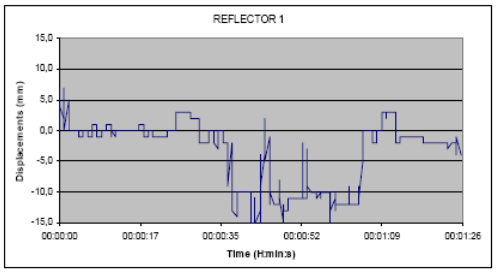
Σχ. 3.15 Θέση Γεωδαιτικού Σταθμού και Πρισμάτων
Fig. 3.15 RTS and prisms mounting points

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.5, δείχνουν ότι υπάρχει μια σημαντική διαφορά ανάμεσα στα αποτελέσματα από το πρίσμα P1 και από το P2, όσον αφορά το εύρος της ταλάντωσης και στους τρείς άξονες, πράγμα που οφείλεται στα διαφορετικού τύπου δυναμικά φορτία που υπέστει η γέφυρα κατά την διάρκεια των μετρήσεων, όπου στην πρώτη περίπτωση τα φορτία προέρχονταν από επιβατηγά, ενώ στην δεύτερη από φορτηγά αυτοκίνητα.

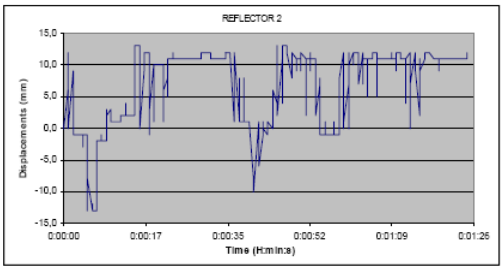
Πρίσμα	Τυπική απόκλιση (mm)			Μετακίνηση (mm)		
	σ_N	σ_E	σ_Z	N	E	Z
P1	0.5	1.0	5.4	3.0	5.0	18.0
P2	2.6	1.2	6.2	13.0	11.0	26.0

Πίνακας 3.5 Τυπικές αποκλίσεις και μετακινήσεις της γέφυρας
Table 3.5 Standard deviations and displacement amplitudes of bridge test

Στα Σχήματα 3.16α και 3.16β παρουσιάζονται τα διαγράμματα αποκλίσεων από τον άξονα Z, συναρτήσει του χρόνου καταγραφής, για τα πρίσματα P1 και P2.



Σχ. 3.16α Μετακινήσεις του πρίσματος P1
Fig. 3.16α Displacements of reflector P1



Σχ. 3.16β Μετακινήσεις του πρίσματος P2
Fig. 3.16β Displacements of reflector P2

Τα γενικά συμπεράσματα που προέκυψαν από το πείραμα αυτό είναι ότι οι ρομποτικοί γεωδαιτικοί σταθμοί με αυτόματη αναγνώριση στόχου όπως το TCRA 1205 της εταιρείας Leica, μπορούν να συνεισφέρουν για τη μέτρηση της δυναμικής συμπεριφοράς των κατασκευών.

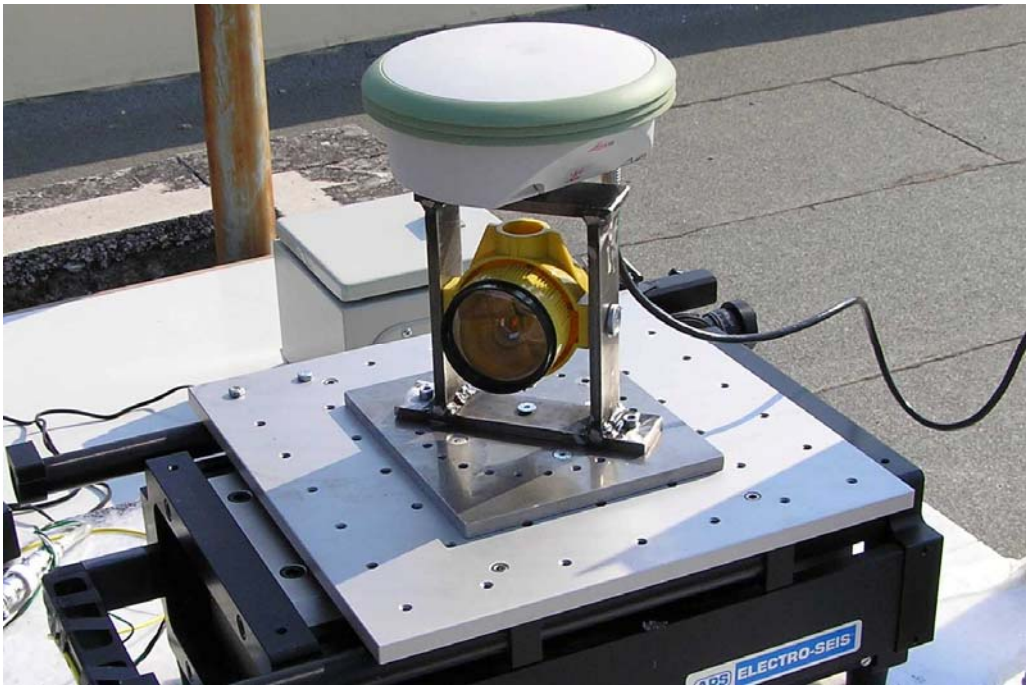
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

4.1 Γενική Περιγραφή Πειραματικής Διάταξης

Σκοπός της πειράματος είναι να ελεγθεί η ακρίβεια και η αξιοπιστία του ρομποτικού γεωδαιτικού σταθμού Leica TCA-1800, όταν αυτός λειτουργεί σε συνθήκες αυτόματης αναγνώρισης και παρακολούθησης στόχου και στην ιδιαίτερη περίπτωση περιοδικών κινήσεων (ταλαντώσεις). Για την επίτευξη του σκοπού αυτού, υπαγορεύεται η παρακολούθηση ενός στόχου από τον γεωδαιτικό σταθμό (Leica TCA-1800), ο οποίος ταλαντώνεται σε γνωστά εκ των προτέρων μεγέθη εύρους και συχνότητας με τη βοήθεια ειδικής συσκευής (σεισμική τράπεζα). Στη συνέχεια ακολουθεί σύγκριση των μετατοπίσεων που προκύπτουν από τις μετρήσεις, με τα ονομαστικά δεδομένα κίνησης του στόχου (πλάτος ταλάντωσης, συχνότητα), και από τις διαφορές τους (Δα και Δf) εκτιμάται η λειτουργία του οργάνου σε συνθήκες περιοδικής κίνησης.



Σχ. 4.1 Τοποθέτηση κυκλικού πρίσματος και δέκτη GPS
Fig. 4.1 Total station target and GPS receiver mounting

Η περιοδική κίνηση δημιουργήθηκε με την βοήθεια μιάς σεισμικής τράπεζας. Ο ταλαντωτής διαθέτει μια μεταλλική πλάκα, η οποία έχει την δυνατότητα να εκτελεί

κινήσεις κατά τον διαμήκη άξονα, απλές (*σταθερό πλάτος και συχνότητα ταλάντωσης*), ή σύνθετες (*σύνθετο μοντέλο ταλάντωσης*) και χρησιμοποιείται κυρίως για τον έλεγχο της δυναμικής συμπεριφοράς δομικών στοιχείων έναντι φορτίσεων, όπως η σεισμική δράση. Στο πλαίσιο της Διπλωματικής Εργασίας, το δοκίμιο αποτέλεσε ο στόχος (κυκλικό πρίσμα), ο οποίος τοποθετήθηκε σε ειδική βάση επάνω στη μεταλλική πλάκα της σεισμικής τράπεζας, προκειμένου να εκτελέσει περιοδικές κινήσεις σταθερού πλάτους και συχνότητας (Σχήμα 4.1).

Η σεισμική τράπεζα ήταν συνδεδεμένη με διάφορα περιφερειακά όργανα (μετασχηματιστές, ενισχυτές, Η/Υ), μέσω των οποίων έγινε ο χειρισμός της. Επάνω στην τράπεζα τοποθετήθηκαν εκτός από τον στόχο του γεωδαιτικού σταθμού και μια κεραία GPS, ένα επιταχυνσιόμετρο και μια διάταξη οπτικών ινών, για την συλλογή πρόσθετων δεδομένων και την εξαγωγή συμπερασμάτων για την κίνηση του στόχου και προκειμένου να καταστεί εφικτή η σύγκριση των δεδομένων αυτών με τα δεδομένα του γεωδαιτικού σταθμού. Τέλος, η τοποθέτηση της σεισμικής τράπεζας με τα παρελκόμενα της έγινε επάνω σε ειδικό βάθρο, κατασκευασμένο για τον συγκεκριμένο σκοπό, πάνω στην οροφή του κτηρίου Λαμπαδάριου της ΣΑΤΜ.

Ο γεωδαιτικός σταθμός που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα, είναι ο ρομποτικός γεωδαιτικός σταθμός TCA-1800 της εταιρείας Leica Geosystems με δυνατότητα αυτόματης αναγνώρισης και παρακολούθησης στόχου. Ο χειρισμός του οργάνου έγινε εξ'ολοκλήρου από φορητό ηλεκτρονικό υπολογιστή, ο οποίος συνδέθηκε σειριακά με τον γεωδαιτικό σταθμό μέσω θύρας RS-232 και με την βοήθεια κατάλληλα ανεπτυγμένου λογισμικού (Leica TCA-1800 Tracking Controller) μέσω του οποίου ήταν εφικτός ο πλήρης έλεγχος των λειτουργιών του γεωδαιτικού σταθμού και η δυνατότητα εξαγωγής των κατάλληλων δεδομένων (χρόνος, συντεταγμένες), στοιχεία απαραίτητα για την ανάλυση των αποτελεσμάτων. Ο γεωδαιτικός σταθμός τοποθετήθηκε σε ειδική βάση στερέωσης στην οροφή του κτηρίου Μαθηματικών της Πολυτεχνειούπολης, σε σημείο τέτοιο ώστε υπήρχε οπτική επαφή με τον στόχο, ενώ από τον ίδιο χώρο έγινε και ο χειρισμός του οργάνου (Σχήμα 4.2).

Σχ. 4.2 Σημείο εγκατάστασης γεωδαιτικού σταθμού και παρελκόμενων αυτού
Fig. 4.2 Robotic Total Station setup site

4.2 Σεισμική Τράπεζα

4.2.1 Γενικά

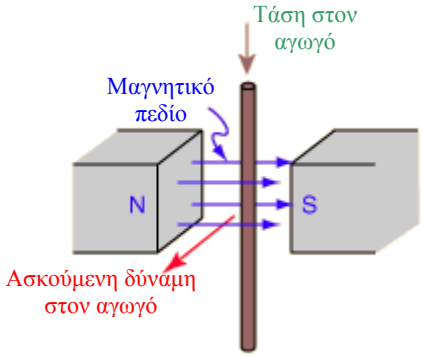
Η σεισμικές τράπεζες είναι συσκευές οι οποίες έχουν την δυνατότητα να εκτελούν παλινδρομικές κινήσεις, ελεγχόμενης συχνότητας και πλάτους ταλάντωσης. Δεδομένης αυτής τους της ιδιότητας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση σεισμών και άλλων φαινομένων, όπου ελέγχονται οι δυναμικές παραμορφώσεις δοκιμίων.

4.2.2 Σεισμική τράπεζα ELECTRO-SEIS 400

Στο υπόψη πείραμα χρησιμοποιήθηκε η σεισμική τράπεζα ELECTRO-SEIS 400 (Σχήμα 4.3), της εταιρείας APS Dynamics. Η συσκευή χρησιμοποιείται για την προσομοίωση ταλάντωσης μοντέλων κατασκευών σε διαφορετικές συνθήκες φόρτισης.

Σχ. 4.3 Σεισμική τράπεζα ELECTRO-SEIS 400
Fig. 4.3 ELECTRO-SEIS 400 shaker

Η λειτουργία της βασίζεται στην αρχή του ηλεκτρομαγνητισμού και ειδικότερα στο φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Με βάση το φαινόμενο της επαγωγής, μπορεί να παραχθεί ρεύμα στα άκρα πηνίου που κινείται μέσα σε μαγνητικό πεδίο, είτε αντίστροφα, αν εφαρμοστεί τάση στα άκρα πηνίου ευρισκόμενου εντός μαγνητικού πεδίου, να δημιουργηθεί δύναμη F στο πηνίο, η οποία τείνει να το κινήσει σε διεύθυνση ανάλογη της φοράς της έντασης του ρεύματος και του μαγνητικού πεδίου (Σχήμα 4.4).



Σχ. 4.4 Φαινόμενο ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής
Fig. 4.4 Electromagnetic induction principle

Στο εσωτερικό της σεισμικής τράπεζας, υπάρχουν μαγνήτες, τοποθετημένοι με τέτοιο τρόπο ώστε καθόλο το μήκος της διαδρομής του πηνίου, αυτό να παραμένει εντός μαγνητικού πεδίου με σταθερό μέτρο έντασης. Με αυτό τον τρόπο εφαρμόζοντας την κατάλληλη κυματομορφή τάσης στα άκρα του πηνίου μπορούμε να αναπαράγουμε την αντίστοιχη κίνηση της μεταλλικής πλάκας της σεισμικής τράπεζας.

Για τις ανάγκες της δοκιμής το κατάφωτο (στόχος), καθώς και η κεραία GPS, τοποθετήθηκαν σε ειδική διάταξη επάνω στην μεταλλική πλάκα της σεισμικής

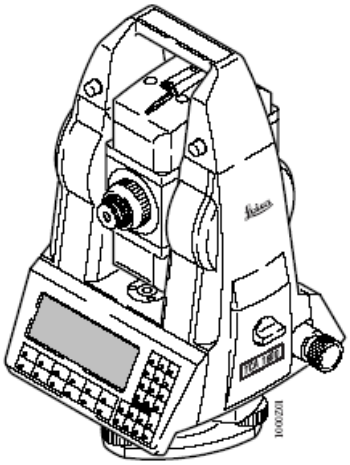
τράπεζας και μάλιστα με τέτοιο τρόπο, ώστε το κέντρο βάρους του συστήματος βάση-κατάφωτο-κεραία, να συμπίπτει με τον άξονα συμμετρίας της κινούμενης πλάκας της σεισμικής τράπεζας. Η τράπεζα είχε ως έργο να αναπαραστήσει ημιτονοειδείς κινήσεις, των οποίων το πλάτος και η συχνότητα ήταν προκαθορισμένα. Θεωρητικά, η απόκλιση από τις ονομαστικές τιμές του πλάτους και της συχνότητας ήταν αμελητέες, με συνέπεια τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις του γεωδαιτικού σταθμού να είναι άμεσα συγκρίσιμα, με τις ονομαστικές τιμές συχνότητας και πλάτους κάθε ομάδας πειραμάτων.

ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΡΑΠΕΖΑΣ APS ELECTRO SEIS-400	
Μέγιστη δύναμη	445 N
Μέγιστη ταχύτητα	750 mm/s
Μέγιστο εύρος ταλάντωσης	±79 mm
Συνολικό βάρος ταλαντωτή	73 kg
Διαστάσεις ταλαντωτή ΜxΠxΥ	526x314x178 mm
Διαστάσεις βάσης	356x356 mm
Φορτίο λειτουργίας	23 kg

Πίνακας 4.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά σεισμικής τράπεζας ELECTRO SEIS-400
Table 4.1 ELECTRO SEIS-400 technical specifications

4.3 Γεωδαιτικός Σταθμός Leica TCA 1800

Ο γεωδαιτικός σταθμός Leica TCA-1800 (Σχήμα 4.5), ανήκει στην οικογένεια των σερβοκινούμενων γεωδαιτικών σταθμών με δυνατότητα αυτόματης αναγνώρισης και παρακολούθησης στόχου. Τα κύρια χαρακτηριστικά του οργάνου, είναι:



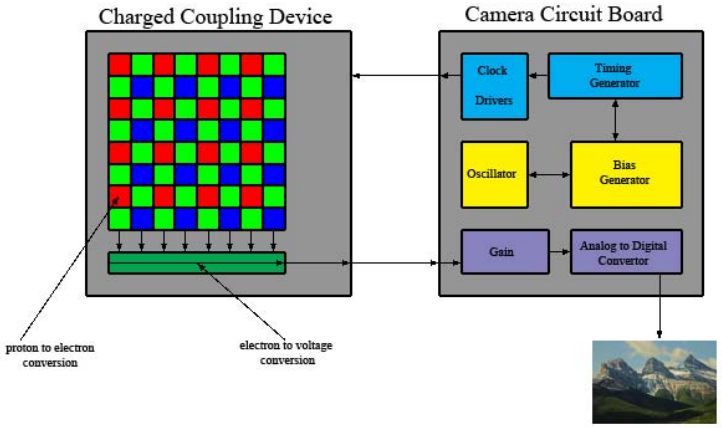
Σχ. 4.5 Ο ρομποτικός γεωδαιτικός σταθμός Leica TCA 1800
Fig. 4.5 Leica TCA 1800 robotic total station

4.3.1 Σερβομηχανισμοί

Οι σερβομηχανισμοί που διαθέτει ο γεωδαιτικός σταθμός TCA 1800, του προσδίδουν την ικανότητα να περιστρέφεται αυτόματα γύρω από τον οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα του. Η περιστροφή αυτή μπορεί να γίνει είτε εισάγοντας στο όργανο δεδομένα για την εκτέλεση προκαθορισμένων κινήσεων, είτε αντίστροφα, ενεργοποιώντας την λειτουργία ATR, με την οποία το όργανο μπορεί να παρακολουθήσει αυτόνομα και να καταγράψει την τροχιά ενός κινούμενου στόχου.

4.3.2 Αυτόματη αναγνώριση και παρακολούθηση στόχου

Η λειτουργία της αυτόματης αναγνώρισης και παρακολούθησης στόχου (ATR), είναι ενεργητικής φύσης και βασίζεται στην εκπομπή μιας αόρατης ακτίνας laser χαμηλής ισχύος (max 780μW) από τον γεωδαιτικό σταθμό, η οποία ανακλάται στο στόχο και επιστρέφει στο όργανο πάνω στον ίδιο άξονα εκπομπής της (ομοαξονικά). Στη συνέχεια όταν διαχωριστεί από τις υπόλοιπες ακτίνες (ακτίνα EDM και ορατό φώς), προσπίπτει σε μιά διάταξη CCD (Charged Coupling Device) (Σχήμα 4.6).

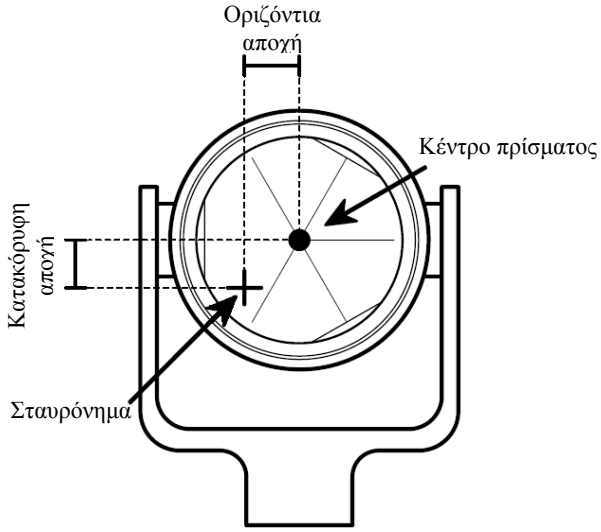


Σχ. 4.6 Διάγραμμα διάταξης CCD
Fig. 4.6 CCD device diagram

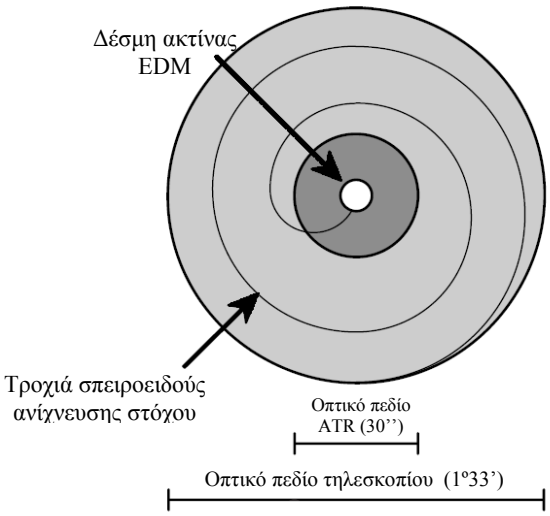
Ανάλογα με την εκκεντρότητα των εικονοστοιχείων (pixels) ως προς το κέντρο της διάταξης CCD, που λαμβάνουν την ανακλώμενη δέσμη φωτός, δίδεται εντολή στους σερβομηχανισμούς να εκτελέσουν μικροδιορθώσεις στις γωνιακές θέσεις του οργάνου (οριζόντια και κατακόρυφη γωνία), έως ότου η απόκλιση του σκοπευτικού άξονα από το σταυρόνημα να μην ξεπερνά τα ±5 mm (Σχήμα 4.7). Σε αυτό το σημείο οι σερβομηχανισμοί σταματούν τις διορθώσεις για την ταχύτερη εκτέλεση των μετρήσεων. Η εναπομείνουσα εκκεντρότητα υπολογίζεται αναλυτικά από το όργανο και συμβάλει στην διόρθωση των μετρήσεων. Για την εξαγωγή των τελικών μεγεθών λαμβάνονται υπόψη: α) η εκκεντρότητα του ίχνους της δέσμης στην διάταξη CCD, β) η σχέση μεταξύ του σκοπευτικού άξονα και CCD διάταξης και γ) λοιπές διορθώσεις οριζοντίωσης, καθετότητας αξόνων, ατμοσφαιρικών συνθηκών κ.α.

Πρακτικά για την έναρξη της λειτουργίας ATR, απαιτείται ο αρχικός εντοπισμός του στόχου από το όργανο. Η αναγνώριση του στόχου γίνεται άμεσα με την τοποθέτηση του στο πεδίο της εκπεμπόμενης ακτίνας ATR, το οποίο καταλαμβάνει το $^1/_3$ του οπτικού πεδίου του τηλεσκοπίου του οργάνου, ακτινικά από τον σκοπευτικό άξονα. Επειδή όμως κάτι τέτοιο είναι πρακτικά δύσκολο να γίνει, αρκεί η τοποθέτηση του στόχου στο οπτικό πεδίο του τηλεσκοπίου. Στη συνέχεια το όργανο εκτελεί σπειροειδείς κινήσεις διάρκειας 2 έως 4 sec, απομακρυνόμενο από το κέντρο του άξονα σκόπευσης έως ότου μπορέσει να λάβει την ανακλανώμενη από τον στόχο ακτίνα laser (Σχήμα 4.8). Εάν κάτι τέτοιο δεν καταστεί εφικτό, δηλαδή εάν ο στόχος

είναι εκτός του πεδίου του τηλεσκόπιου, τότε η διαδικασία αναγνώρισης στόχου ακυρώνεται.



Σχ. 4.7 Απόκλιση κέντρου πρίσματος-σταυρονήματος
Fig. 4.7 Crosshair-centre of prism tolerance



Σχ. 4.8 Σπειροειδής ανίχνευση στόχου Leica TCA 1800
Fig. 4.8 Leica TCA 1800 spiral target recognition

Κατά την λειτουργία παρακολούθησης στόχου η διαδικασία αναγνώρισης στόχου (ATR) επαναλαμβάνεται με μορφή βρόγχου, ενώ για τον ακριβέστερο αναλυτικό υπολογισμό των μετρημένων στοιχείων εμπλέκονται στη διαδικασία ειδικοί αλγόριθμοι παρεμβολής. Στην φάση αυτή, το όργανο παρέχει δύο επιλογές: την επιλογή TRK (TRacKing) και την επιλογή RTRK (Rapid TRacKing). Στην πρώτη περίπτωση (TRK) το όργανο λαμβάνει μετρήσεις ανά 0.3 sec, με ακρίβεια

5 mm + 5 ppm για την απόσταση, ενώ στην περίπτωση του RTRK, οι μετρήσεις εκτελούνται ανά 0.15 sec, με την ακρίβεια να μειώνεται αισθητά και να φτάνει τα 10 mm + 5 ppm (*Leica TPS1100 Professional Series User Manual, Version 2.2, Leica Geosystems*).

Άλλα αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά του οργάνου είναι:

- Πλήρης προγραμματισμός για έλεγχο του οργάνου από Η/Υ, μέσω της γλώσσας προγραμματισμού GEObasic και του πρωτόκολλου GeoCOM της Leica Geosystems,
- Πληθώρα έτοιμων προγραμμάτων από την κατασκευαστική εταιρεία, για εξειδικευμένο χειρισμό και παραμετροποίηση του οργάνου,
- Δυνατότητα ελέγχου του σημείου σκόπευσης κατά την λειτουργία χωρίς πρίσμα με την εκπομπή ορατής ακτίνας laser στο σημείο σκόπευσης,
- Ατέρμονοι μηχανισμοί μικρορυθμίσεων,
- Ένδειξη με μεταβαλλόμενης φωτεινότητας ακτίνα laser, του σημείου κέντρωσης.

Είδος μέτρησης		Ακρίβεια μέτρησης	Χρονική διάρκεια μέτρησης
Αποστάσεις	Τυπική μετρήση	1 mm + 2 ppm	3 sec.
	Γρήγορη μέτρηση	3 mm + 2 ppm	1.5 sec.
	Λειτουργία TRK	5 mm + 2 ppm	0.3 sec.
	Λειτουργία RTRK	10 mm + 2 ppm	0.15 sec.
	Ακριβής μέτρηση	1 mm + 2 ppm	3 sec.
	Απόδοση	0.1 mm	
Γωνίες	Ακρίβεια (κατά DIN 18732)	3^{cc}	
	Απόδοση	1^{cc}	

Πίνακας 4.2 Ακρίβειες μέτρησης και απόδοσης οργάνου Leica TCA 1800
(*Πηγή: www.leica-geosystems.com*)
Table 4.2 Leica TCA 1800 accuracy characteristics (*Source: www.leica-geosystems.com*)

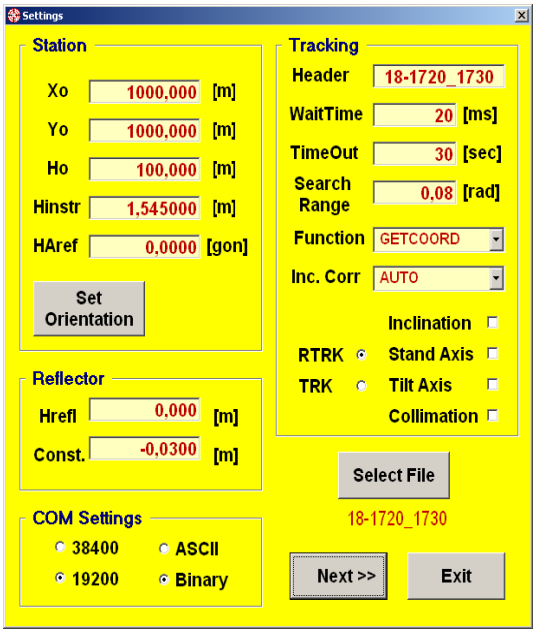
4.4 Λογισμικό Χειρισμού Γεωδαιτικού Σταθμού

Τα βασικά δεδομένα που μετρήθηκαν από τον γεωδαιτικό σταθμό για τις ανάγκες του πειράματος είναι η οριζόντια και κατακόρυφη γωνία, η απόσταση και ο χρόνος καταγραφής κάθε μέτρησης ως πρωτογενείς μετρήσεις, καθώς και οι συντεταγμένες των θέσεων του στόχου. Για τον σκοπό αυτό αναπτύχθηκε από τους Σ. Δασκαλάκη και Β. Γκίκα το λογισμικό " Leica TCA1800 Tracking Controller ". Το λογισμικό αναπτύχθηκε στη γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic 6.0 / C++, με βάση το πρωτόκολλο επικοινωνίας GeoCOM v1.07 της εταιρείας Leica. Το λογισμικό αρχικά απαιτεί την σειριακή σύνδεση του οργάνου με τον υπολογιστή και εφόσον γίνει επιτυχής ανίχνευση και αναγνώριση του οργάνου εμφανίζονται διαδοχικά στην οθόνη του υπολογιστή και σε γραφικό περιβάλλον (GUI) τρείς οθόνες επικοινωνίας του λογισμικού με τον χρήστη μέσω των οποίων γίνεται η αρχικοποίηση και ο χειρισμός του οργάνου.

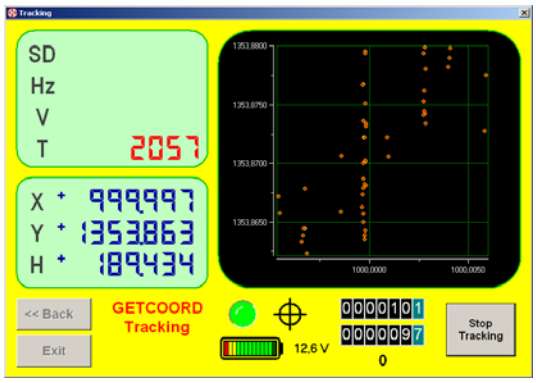
Στην πρώτη οθόνη επικοινωνίας εκτελείται η διαδικασία ανίχνευσης του οργάνου από το λογισμικό. Στην επόμενη οθόνη (Σχήμα 4.9α) εισάγονται τα στοιχεία (x, y, z) που αφορούν τις συντεταγμένες στάσης του γεωδαιτικού σταθμού, το ύψος οργάνου, καθώς και η αρχική γωνία μηδενισμού. Επίσης, εισάγονται και στοιχεία που αφορούν το ύψος σκόπευσης και την σταθερά του στόχου (κατάφωτο), καθώς και στοιχεία που αφορούν την διαδικασία παρακολούθησης (tracking) του στόχου, όπως είναι η περιγραφή (header) του αρχείου καταγραφής, η συνάρτηση καταγραφής δεδομένων (καρτεσιανές ή πολικές συντεταγμένες), η αυτόματη ή μη διόρθωση των ισοσταθμιστών (incline correction), το εύρος εντοπισμού του στόχου (search range), και τέλος, καθορίζονται στοιχεία όπως η μέθοδος μέτρησης (TRK ή RTRK) και η διεύθυνση και το όνομα του αρχείου εξαγωγής ".txt", όπου γίνεται η αποθήκευση των δεδομένων.

Τέλος, στην τρίτη οθόνη του λογισμικού (Σχήμα 4.9β) εμφανίζονται στοιχεία που αφορούν την κατάσταση της ισχύος ενέργειας (μπαταρία) και την θερμοκρασία, καθώς και έναν αριθμό, ο οποίος υποδηλώνει την ποιότητα του αποτελέσματος της κάθε μέτρησης (Retcode) που προκύπτει από τις επιστρεφόμενες τιμές των συναρτήσεων του συστήματος αποσφαλμάτωσης του πρωτοκόλλου GeoCOM, ενώ παρέχεται και η δυνατότητα σχεδίασης σε πραγματικό χρόνο (real-time) των

μετρημένων σημείων στο σχεδιαστικό πακέτο AutoCAD. Ο συνδυασμός των δεδομένων της τρίτης οθόνης, δίνει στον χρήστη σε πραγματικό χρόνο την πληροφορία για την ποιότητα των μετρήσεων, τον συνολικό αριθμό καταγεγραμμένων σημείων και άλλα χαρακτηριστικά.



Σχ. 4.9α Οθόνη εισαγωγής αρχικών στοιχείων
Fig. 4.9α Initial data registration panel



Σχ. 4.9β Οθόνη επικοινωνίας οργάνου και παρακολούθησης μετρήσεων
Fig. 4.9β Instrument communication and observation panel

4.5 Σύστημα Εντοπισμού Θέσης Leica GPS 1200

Το σύστημα εντοπισμού θέσης που χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες του πειράματος, ήταν το GPS-1200 της εταιρείας Leica (Σχήμα 4.10). Το σύστημα αποτελείται από δύο κεραίες ATX1230 (GG), δύο δέκτες GX1230 (GG) και δύο χειριστήρια AX1250. Για τις ανάγκες του πειράματος, εφαρμόστηκε η τεχνική του κινηματικού εντοπισμού με εκ των υστέρων επίλυση (Post Processed Kinematic). Για το σκοπό αυτό, ο ένας δέκτης προγραμματίστηκε ως σταθερός δέκτης (base), ενώ ο δεύτερος τοποθετήθηκε ομοαξονικά με το κατάφωτο, επάνω στην σεισμοτράπεζα (Σχήμα 4.1), αναλαμβάνοντας το ρόλο του κινούμενου δέκτη (rover). Τα δεδομένα κατεγράφησαν με ρυθμό 20 Hz, οποίος είναι και ο μέγιστος δυνατός ρυθμός καταγραφής του συστήματος Leica GPS-1200. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος, παρουσιάζονται στους Πίνακες 4.3α και 4.3β.

Σχ. 4.10 Σύστημα Leica GPS 1200
Fig. 4.10 Leica GPS 1200 system

	Δέκτης (receiver)	Κεραία (antenna)	Χειριστήριο (controller)
Τύπος	GX1230(GG)	ATX1230(GG)	RX1250(GG)
Διαστάσεις	212 x 166 x 79 mm (*Μ x Π x Υ*)	186 x 89 mm (*Διάμετρος x Υ*)	
Βάρος	1.2 kg	1.12 kg	0.75 kg
Θερμοκρασία λειτουργίας	-40 °C έως +65 °C	-40 °C έως +70 °C	-30 °C έως +65 °C
Θερμοκρασία αποθήκευσης	-40 °C έως +80 °C	-55 °C έως +85 °C	-40 °C έως +80 °C
Αντοχή σε υγρασία περιβάλλοντος	Έως 100%	Έως 100%	Έως 100%
Προστασία από νερό/άμμο/σκόνη	Ναι	Ναι	Ναι
Αντοχή σε πτώση	Έως 1 m ύψος σε σκληρή επιφάνεια	Έως 1.5 m ύψος σε σκληρή επιφάνεια	Έως 1.5 m ύψος σε σκληρή επιφάνεια
Επιπλέον χαρακτηριστικά	12 κανάλια στην L1 και 12 στην L2, καταγραφή στην L1 ή/και στην L2, τροφοδοσία 12V DC,	Επικοινωνία μέσω Bluetooth®	Αλφαριθμητικό πληκτρολόγιο τύπου QWERTY, οθόνη αφής, Επικοινωνία μέσω Bluetooth®

Πίνακας 4.3α Γενικά τεχνικά χαρακτηριστικά συστήματος Leica GPS 1200 (Πηγή: Leica GPS 1200 Series Technical Data)
Table 4.3α General technical data of Leica GPS 1200 system (Source: Leica GPS 1200 Series Technical Data)

Είδος/Τεχνική μέτρησης		Ορθότητα rms (Accuracy)
Εκ των υστέρων επίλυση (Post-processing)	Στατικός εντοπισμός με μετρήσεις φάσης	H 3 mm + 0.5 ppm V 6 mm + 0.5 ppm
	Ταχύς στατικός εντοπισμός με μετρήσεις φάσης	H 5 mm + 0.5 ppm V 10 mm + 0.5 ppm
	Κινηματικός εντοπισμός με μετρήσεις φάσης	H 10 mm + 1 ppm V 20 mm + 1 ppm
	Μετρήσεις κώδικα	≈ 25 cm
Επίλυση σε πραγματικό χρόνο (Real-time/RTK)	Ταχύς στατικός εντοπισμός με μετρήσεις φάσης	H 5 mm + 0.5 ppm V 10 mm + 0.5 ppm
	Κινηματικός εντοπισμός με μετρήσεις φάσης	H 10 mm + 1 ppm V 20 mm + 1 ppm
	Μετρήσεις κώδικα	≈ 25 cm
Διαφορικός εντοπισμός (DGPS/RTCM)		≈ 25 cm
Ναυσιπλοΐα με έναν δέκτη (Single receiver Navigation)		5-10 m για κάθε συντεταγμένη

Πίνακας 4.3β Ονομαστικές τιμές μετρήσεων ποιότητας προσδιορισμού θέσης με χρήση του συστήματος Leica GPS-1200 (Πηγή: *Leica, 2005*)

Table 4.3β Nominal quality measures in positioning using GPS-1200 system (Source: *Leica, 2005*)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

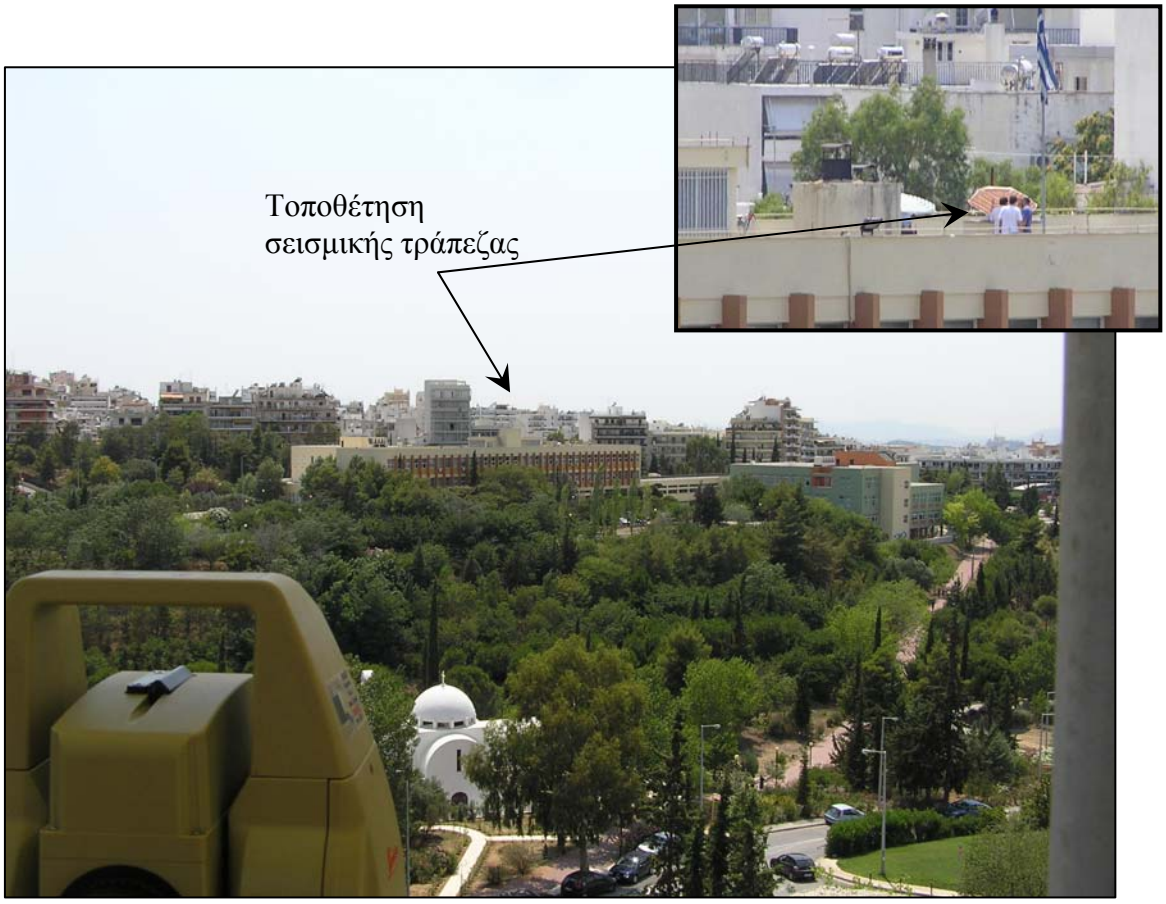
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

5.1 Σχεδιασμός Πειράματος

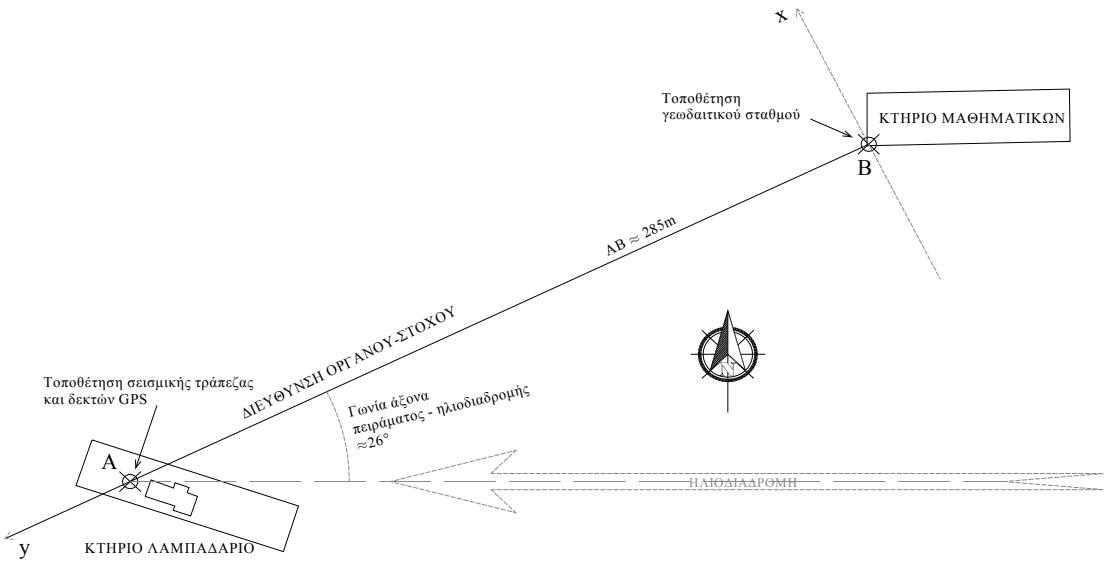
5.1.1 Γεωμετρία πειράματος

Το πείραμα διεξήχθει την 3η Ιουλίου 2007, στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου (κτήριο Λαμπαδάριο της ΣΑΤΜ και κτήριο Μαθηματικών). Η προετοιμασία του πειράματος ξεκίνησε αρκετό καιρό πριν, με την συλλογή του απαραίτητου υλικού (όργανα, παρελκόμενα, λογισμικό). Κατά τον αρχικό σχεδιασμό επελέγει το κτήριο της Κεντρικής Βιβλιοθήκης για την τοποθέτηση του ρομποτικού σταθμού και το κτήριο Λαμπαδάριο της ΣΑΤΜ για την τοποθέτηση της σεισμικής τράπεζας και των δεκτών GPS. Η επιλογή αυτή έγινε με κριτήρια την απόσταση, την δυνατότητα αμοιβαίας ορατότητας στόχου-οργάνου (Σχήμα 5.1), και τη διεύθυνση της τροχιάς του Ήλιου κατά την διάρκεια του πειράματος. Η επιλογή του κτηρίου της Κεντρικής Βιβλιοθήκης δεν κατέστει δυνατή λόγω πρακτικών δυσκολιών. Το επόμενο κτήριο που πληρεί με επάρκεια τα κριτήρια απόστασης και αμοιβαίας ορατότητας ήταν το κτήριο των Μαθηματικών της Πολυτεχνειούπολης. Το κτήριο κάλυπτε πλήρως τα δύο κριτήρια (ορατότητα, απόσταση) και η μοναδική αναμενόμενη δυσκολία κατά την διάρκεια του πειράματος ήταν η πορεία του Ήλιου κατά την διάρκεια της ημέρας. Αυτό γιατί η διεύθυνση που όριζε ο άξονας όργανο-στόχος, έπρεπε θεωρητικά να είναι κάθετη με την διεύθυνση Ανατολής-Δύσης, προκειμένου να μειωθεί στο ελάχιστο η επίδραση του Ήλιου στη λειτουργία του γεωδαιτικού σταθμού.

Η απόσταση μεταξύ του γεωδαιτικού σταθμού και του στόχου επιλέχθηκε με κριτήριο προηγούμενο πείραμα και με γνώμονα το πεδίο ορατότητας του μηχανισμού ATR (30") (§4.3.3), έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι κινήσεις των σερβομηχανισμών και οι συντεταγμένες να υπολογίζονται μόνο από την ακρίβεια της LCD διάταξης του οργάνου. Στο Σχήμα 5.2 παρουσιάζεται η γεωμετρία του πειράματος. Οι αποστάσεις, οι γωνίες και τα αζιμούθια είναι χονδρικά υπολογισμένα, από το λογισμικό *Google® Earth*, με επαρκή όμως ακρίβεια για την σχηματική αναπαράσταση της γεωμετρίας του πειράματος.



Σχ. 5.1 Αμοιβαία ορατότητα οργάνου – στόχου
Fig. 5.1 Total station – target mutual visibility

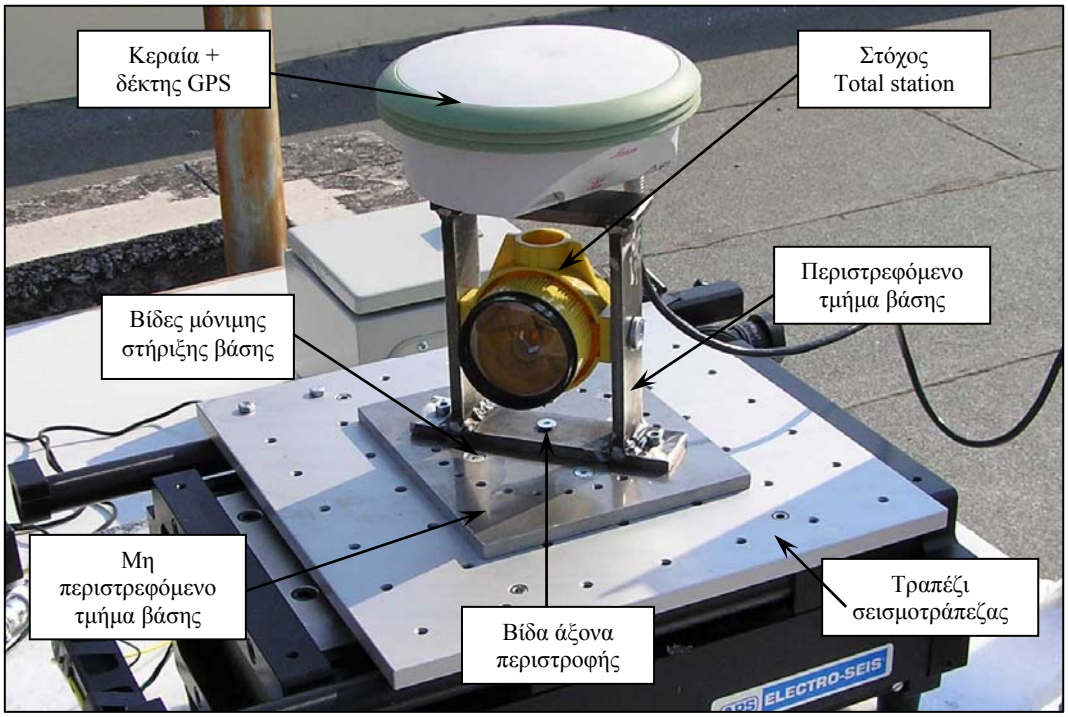


Σχ. 5.2 Σχηματική αναπαράσταση γεωμετρίας πειράματος
Fig. 5.2 Schematic representation of experiment's geometry

5.1.2 Στήριξη κατάφωτου και κεραίας συστήματος GPS

Σύμφωνα με το σχεδιασμό του πειράματος, το κατάφωτο και η κεραία GPS όσον αφορά στην τοποθέτηση τους επάνω στη σεισμική τράπεζα, έπρεπε να πληρούν τις παρακάτω προϋποθέσεις:

- Τα κέντρα των δύο διατάξεων να είναι ομοαξονικά τοποθετημένα στο επίπεδο xy (η προβολή των κέντρων στο επίπεδο xy να είναι ένα σημείο).
- Σε κάθε διαφορετική γωνία πειράματος, εφόσον η σεισμοτράπεζα στρέφεται κατά την αντίστοιχη γωνία, το πρίσμα και η κεραία GPS, έπρεπε να περιστραφούν κατά την ίση και αντίθετη γωνία, έτσι ώστε να διατηρείται η καθετότητα του άξονα σκόπευσης με την όψη του πρίσματος και ο σταθερός προσανατολισμός για την κεραία του συστήματος GPS. Παράλληλα, κατά τη στροφή αυτή είναι αναγκαίο να διατηρείται η ομοαξονικότητα του συστήματος στόχος-κεραία-τράπεζα.
- Η στήριξη του πρίσματος και της κεραίας GPS έπρεπε να είναι αρκετά σταθερή, ώστε να αποφεχθούν φαινόμενα σχετικής μετακίνησης του συστήματος τράπεζα-πρίσμα-κεραία, προκαλούμενα από την ταλάντωση της τράπεζας (ιδιαίτερα σε υψηλές συχνότητες ≥2 Hz).



Σχ. 5.3 Μεταλλική βάση στήριξης στόχου και κεραίας GPS
Fig. 5.3 Target and GPS metallic mounting base

Για την εκπλήρωση αυτών των προϋποθέσεων κατασκευάστηκε μια μεταλλική (σιδερένια) βάση (Σχήμα. 5.3), η οποία αποτελείται από δύο τμήματα. Το πρώτο τμήμα βιδώνεται μόνιμα επάνω στο τραπέζι της σεισμικής τράπεζας, σε σημείο που το κέντρο του τραπεζιού της να συμπίπτει με το κέντρο του μεταλλικού τμήματος της βάσης. Το δεύτερο τμήμα έχει την δυνατότητα να περιστρέφεται γύρω από μια βίδα που αποτελεί τον φυσικό άξονα του συστήματος και να πακτώνεται με βίδες επάνω στο πρώτο τμήμα σε διάφορες γωνιακές θέσεις. Επίσης, στο κατάφωτο παρέχεται η δυνατότητα να μεταβολής της ζενίθιας γωνίας του έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η καλύτερη δυνατή οπτική επαφή με το όργανο.

5.1.3 Μαρμάρινη πλάκα έδρασης σεισμικής τράπεζας

Η θέση που επελέγει για την τοποθέτηση της σεισμικής τράπεζας είναι μιά ειδική κατασκευή, πάνω στην οποία είναι χαραγμένοι οι άξονες περιστροφής της σεισμικής τράπεζας. Οι προϋποθέσεις που έπρεπε να τηρηθούν είναι:

- Η κατασκευή που στηρίζει την σεισμική τράπεζα πρέπει να αντέχει το βάρος του συστήματος σεισμική τράπεζα-βάση-στόχος-κεραία GPS (>80 Kg) ιδιαίτερα, λόγω των δυνάμεων που αναπτύσσονταν λόγω ταλάντωσης.
- Η επιφάνεια τοποθέτησης της σεισμικής τράπεζας πρέπει να είναι επίπεδη και θεωρητικά “απόλυτα” οριζοντιωμένη, για να επιτυχθεί σε δύο διαστάσεις η φυσική κίνηση του στόχου.
- Η όλη κατασκευή πρέπει να υπερβαίνει το ύψος του περιμετρικού τοιχίου της ταράτσας του Λαμπαδάριου (1.10 m), έτσι ώστε να υπάρχει οπτική επαφή με το όργανο.

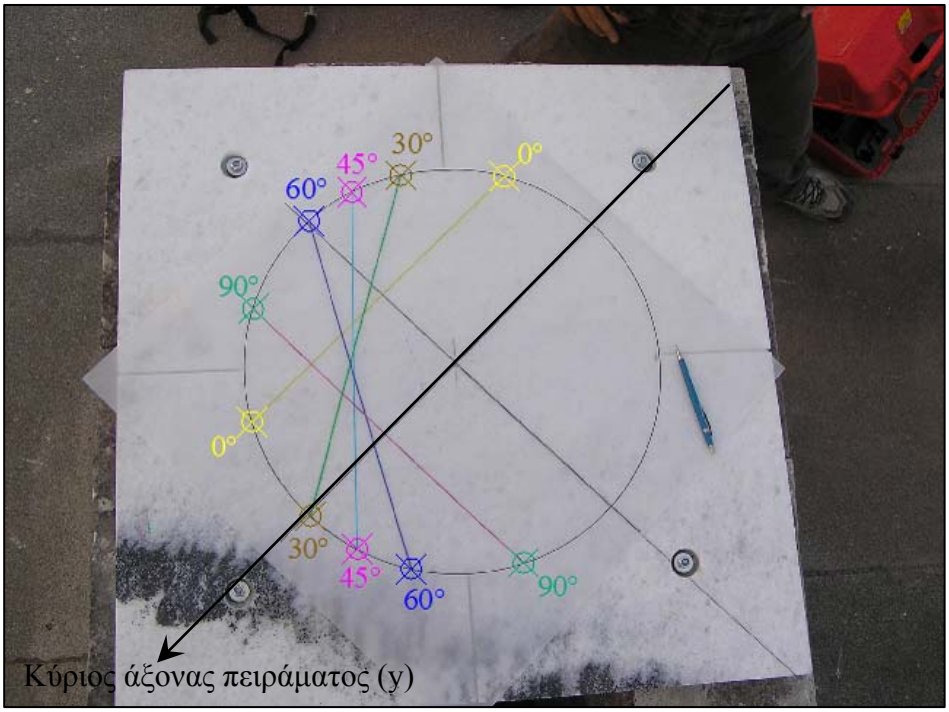
Τελικά, η επιλογή της θέσης έγινε στην απόληξη του φωταγωγού, πίσω από το δώμα του κτηρίου, η οποία είναι τέσσερις τοίχοι πάχους ≈0.2 m και ύψους 1.1 m, οι οποίοι σχηματίζουν ένα ορθογώνιο διαστάσεων 1.85 m x 0.85 m. Επάνω στο πλαίσιο τοποθετήθηκε μια μαρμάρινη πλάκα (επιλέχθηκε το μάρμαρο για αντοχή στο βάρος της τράπεζας και στις καιρικές συνθήκες καθώς και για το μικρό του κόστος σχετικά με άλλα υλικά), διαστάσεων 80 x 80 x 2.8 cm και βάρους περίπου 40 kg, η οποία με ειδική διάταξη οριζοντιώθηκε και αγκυρώθηκε μόνιμα επάνω στο πλαίσιο (Σχήμα 5.4).

Σχ. 5.4 Κατασκευή έδρασης μαρμάρινης πλάκας
Fig. 5.4 Marble plate mounting construction

5.1.4 Χάραξη διευθύνσεων σκόπευσης και κίνησης στόχου

Η βασική διεύθυνση σκόπευσης ταυτίζεται κατά τον άξονα Υ του συστήματος συντεταγμένων που ορίστηκε, με αφετηρία το σημείο στάσης του οργάνου και πέρας το κέντρο περιστροφής της σεισμικής τράπεζας. Για την χάραξη της βασικής διεύθυνσης, κεντρώθηκε και οριζοντιώθηκε ο γεωδαιτικός σταθμός στο κέντρο της μαρμάρινης πλάκας. Σκοπεύοντας την μύτη ενός μηχανικού μολυβιού στην μελλοντική στάση του οργάνου στο κτήριο Μαθηματικών (Σχήμα 5.5), χαράκτηκε επάνω στην μαρμάρινη πλάκα η κύρια διεύθυνση στόχου-οργάνου. Περιστρέφοντας το γεωδαιτικό σταθμό στα 100 grad, χαράκτηκε και η κάθετη στην κύρια διεύθυνση. Για την χάραξη των θέσεων της τράπεζας στις 0°, 30°, 45°, 60° και 90° χρησιμοποιήθηκε προσχέδιο από διάφανο χαρτί πάνω στο οποίο είχαν εκτυπωθεί οι θέσεις που θα "πατούσαν" τα πόδια της σεισμικής τράπεζας κατά την περιστροφή της στις αντίστοιχες γωνίες (Σχήμα 5.6).

Σχ. 5.5 Στόχος χάραξης κύριας διεύθυνσης
Fig. 5.5 Main direction targeting point



Σχ. 5.6 Προσχέδιο χάραξης διευθύνσεων και κύριος άξονας πειράματος y
Fig. 5.6 Directions printed pattern and experiment main axis y

5.2 Διεξαγωγή Πειράματος

5.2.1 Αρχικά δεδομένα και περιβαλλοντικές συνθήκες

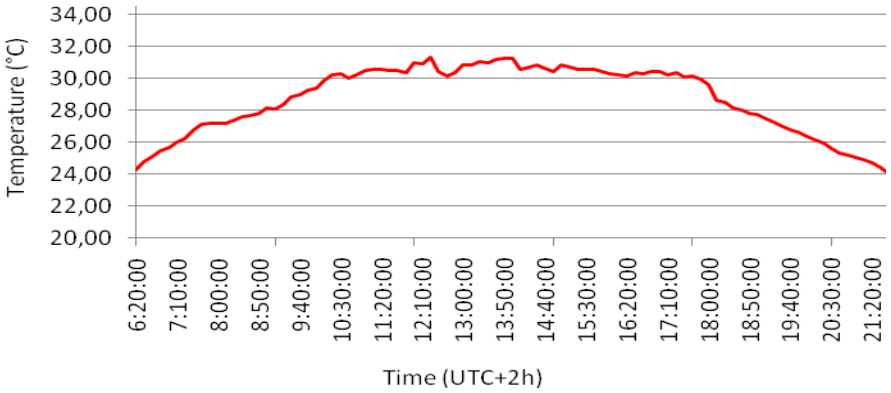
Τα απαραίτητα δεδομένα και οι ρυθμίσεις του λογισμικού Leica Tracking Controller, για την εκκίνηση του πειράματος, παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1, ενώ την ρύθμιση και τον χειρισμό της σεισμοτράπεζας, του επιταχυνσιόμετρου και του αισθητήρα οπτικών ινών, είχε αναλάβει εξ'ολοκλήρου ο υποψήφιος διδάκτωρ κ. Στρατάκος Ιωάννης.

Στοιχείο	Τιμή
Αρχική τιμή X	100.000 m
Αρχική τιμή Y	0.000 m
Αρχική τιμή Z	100.000 m
Com port	19200 bps binary
Measuring Mode	Getcoord
Incline correction	Auto
Mode	RTRK
Μορφή αρχείου καταγραφής	*x* grad - *x.xx* m – *x.x* Hz.txt

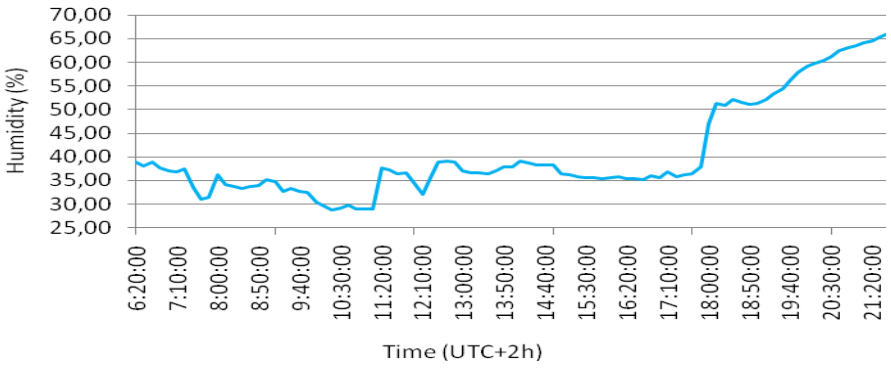
Πίνακας 5.1 Αρχικές ρυθμίσεις λογισμικού Leica Tracking Controller
Table 5.1 Leica Tracking Controller software initial settings

- Οι τιμές +100.000 m στα αρχικά x και z, δόθηκαν για την αποφυγή καταγραφής αρνητικών τιμών στα αρχεία συντεταγμένων.
- Η ρύθμιση της θύρας Com, αφορά στην επικοινωνία του οργάνου με τον Η/Υ.
- Η συνάρτηση Getcoord δίνει εντολή στο πρόγραμμα να εξάγει τις μετρήσεις σε μορφή καρτεσιανών συντεταγμένων.
- Η τιμή Auto στην παράμετρο Incline correction, δίνει εντολή στο όργανο να "αποφασίσει" αυτόνομα πότε θα διορθώσει αυτόματα την οριζοντίωση του και πότε όχι.
- Η επιλογή RTRK, δηλώνει ότι το όργανο λειτουργεί σε κατάσταση Rapid Tracking.

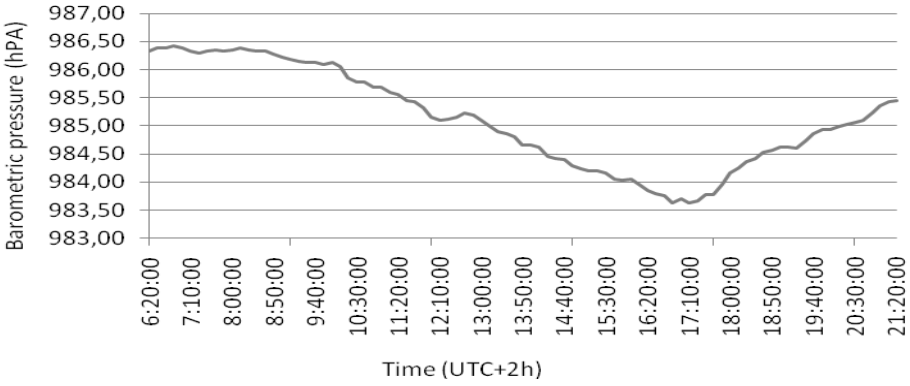
Οι τιμές των ατμοσφαιρικών στοιχείων αντλήθηκαν από μετρητές του αυτόματου μετεωρολογικού σταθμού του Ε.Μ.Π., οι οποίοι βρίσκονται στο χώρο της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου. Οι μέσες τιμές θερμοκρασίας, βαρομετρικής πίεσης και σχετικής υγρασίας για την ημέρα του πειράματος παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.7, 5.8 και 5.9.



Σχ. 5.7 Μέσες τιμές θερμοκρασίας την ημέρα του πειράματος
Fig. 5.7 Mean temperature values in experiment day



Σχ. 5.8 Μέσες τιμές σχετικής υγρασίας την ημέρα του πειράματος
Fig. 5.8 Mean relative humidity values in experiment day



Σχ. 5.9 Μέσες τιμές βαρομετρικής πίεσης την ημέρα του πειράματος
Fig. 5.9 Mean barometric values in experiment day

5.2.2 Βασικά στοιχεία πειράματος

Όπως αναφέρθηκε ήδη, ο έλεγχος της λειτουργίας tracking έγινε σε διαφορετικές γωνίες που σχηματίζει η διεύθυνση στόχου-οργάνου, με την διεύθυνση κίνησης του στόχου, προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση της μέτρησης γωνίας και απόστασης. Για το σκοπό αυτό, το πείραμα χωρίστηκε σε πέντε κύριες ομάδες, όπου κάθε ομάδα αφορά σε μια από τις πέντε διαφορετικές γωνίες στροφής. Η κάθε ομάδα χωρίστηκε σε πέντε υποομάδες για ισάριθμες τιμές συχνότητας και για κάθε τιμή συχνότητας αντιστοιχούσαν τέσσερα διαφορετικά πλάτη ταλάντωσης. Η διάρκεια κάθε πειράματος ήταν τόση ώστε να γίνει επιτυχής καταγραφή περισσότερων από 500 μετρήσεων-οπότε με δεδομένη την μέση συχνότητα καταγραφής του οργάνου στην λειτουργία RTRK (≈ 5.5 Hz), προέκυψε ότι η μέση διάρκεια κάθε πειράματος ήταν περίπου 100 sec. Η ώρα έναρξης του πειράματος ήταν στις 07:40 (UTC +2 h) και διήρκησε περίπου 10 h συμπεριλαμβανομένου του χρόνου εγκατάστασης και ρύθμισης του εξοπλισμού. Συνολικά διεξήχθησαν 100 πειράματα τα οποία παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 5.2.

Η επιλογή των τιμών συχνοτήτων (0.1, 0.2, 0.5, 1.0 και 2.0 Hz) και του εύρους (1.0, 2.0, 3.0 και 5.0 cm) ταλάντωσης έγινε με κριτήριο την κάλυψη του φάσματος συχνοτήτων ταλαντώσεων υψηλών κτηρίων, γεφυρών, καμινάδων εργοστασίων, πυλώνων κτλ. Η μέγιστη συχνότητα κίνησης του στόχου (2 Hz) προκύπτει από την συχνότητα Nyquist, κατά την οποία η μέγιστη συχνότητα παρατήρησης πρέπει να είναι μικρότερη ή ίση με το ήμισυ της ελάχιστης συχνότητας καταγραφής $\left(f_{observed} \le \frac{1}{2} \cdot f_{recorded} \right)$, έτσι ώστε να υπολογιστεί σωστά ο μετασχηματισμός Fourier στο στάδιο της φασματικής ανάλυσης των μετρήσεων. Στην περίπτωση μας είναι $2Hz \le \frac{5.5Hz}{2} \Rightarrow 2Hz \le 2.75Hz$, το οποίο μας περιορίζει σε μια μέγιστη συχνότητα κίνησης του στόχου ίση με 2 Hz (συμπεριλαμβανομένου και ενός περιθώριου ασφαλείας). Αντίστοιχα το μέγιστο εύρος ταλάντωσης (5 cm) προκύπτει από τον φυσικό περιορισμό του εύρους ταλάντωσης της σεισμικής τράπεζας (7.9 cm). Οι τιμές των γωνιών (0º, 30º, 45º, 60º και 90º), καθώς και οι ενδιάμεσες τιμές εύρους (1, 2 και 3cm) και συχνότητας (0.1, 0.2, 0.5 και 1 Hz) επιλέχθηκαν έτσι ώστε να καλυφθούν επαρκώς όλα τα πιθανά σενάρια συνδυασμού διευθύνσεων.

Γωνία (º)	***0º***																			
Συχνότητα (Hz)	*0.1^{Hz}*				*0.2^{Hz}*				*0.5^{Hz}*				*1.0^{Hz}*				*2.0^{Hz}*			
Πλάτος (cm)	*1*	*2*	*3*	*5*	*1*	*2*	*3*	*5*	*1*	*2*	*3*	*5*	*1*	*2*	*3*	*5*	*1*	*2*	*3*	*5*
Α/Α πειράματος	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Γωνία (º)	***30º***																			
Συχνότητα (Hz)	*0.1^{Hz}*				*0.2^{Hz}*				*0.5^{Hz}*				*1.0^{Hz}*				*2.0^{Hz}*			
Πλάτος (cm)	*1*	*2*	*3*	*5*	*1*	*2*	*3*	*5*	*1*	*2*	*3*	*5*	*1*	*2*	*3*	*5*	*1*	*2*	*3*	*5*
Α/Α πειράματος	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Γωνία (º)	***45º***																			
Συχνότητα (Hz)	*0.1^{Hz}*				*0.2^{Hz}*				*0.5^{Hz}*				*1.0^{Hz}*				*2.0^{Hz}*			
Πλάτος (cm)	*1*	*2*	*3*	*5*	*1*	*2*	*3*	*5*	*1*	*2*	*3*	*5*	*1*	*2*	*3*	*5*	*1*	*2*	*3*	*5*
Α/Α πειράματος	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
Γωνία (º)	***60º***																			
Συχνότητα (Hz)	*0.1^{Hz}*				*0.2^{Hz}*				*0.5^{Hz}*				*1.0^{Hz}*				*2.0^{Hz}*			
Πλάτος (cm)	*1*	*2*	*3*	*5*	*1*	*2*	*3*	*5*	*1*	*2*	*3*	*5*	*1*	*2*	*3*	*5*	*1*	*2*	*3*	*5*
Α/Α πειράματος	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
Γωνία (º)	***90º***																			
Συχνότητα (Hz)	*0.1^{Hz}*				*0.2^{Hz}*				*0.5^{Hz}*				*1.0^{Hz}*				*2.0^{Hz}*			
Πλάτος (cm)	*1*	*2*	*3*	*5*	*1*	*2*	*3*	*5*	*1*	*2*	*3*	*5*	*1*	*2*	*3*	*5*	*1*	*2*	*3*	*5*
Α/Α πειράματος	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100

Πίνακας 5.2 Παράμετροι και πλήθος πειραμάτων
Table 5.2 Parameters and number of experiments

5.2.3 Προβλήματα κατά την διεξαγωγή του πειράματος

Κατά την έναρξη του πειράματος διαπιστώθηκε ότι το όργανο λάμβανε μεγάλο αριθμό ανεπιτυχών μετρήσεων, ακόμη και για μικρές συχνότητες ταλάντωσης του στόχου. Το πρόβλημα αυτό, όπως διαπιστώθηκε στη συνέχεια, οφείλονταν στην επίδραση του Ήλιου, ο οποίος δημιουργούσε ανακλάσεις στην επιφάνεια του πρίσματος παρεμποδίζοντας τη λειτουργία του EDM. Η λύση δόθηκε με την τοποθέτηση μιάς ομπρέλας πίσω από το στόχο. Σημειώνεται ότι το συγκεκριμένο πρόβλημα ήταν αναμενόμενο, εφόσον ο άξονας στόχου-οργάνου, σχημάτιζε μικρή σχετικά γωνία (≈26º) με τον άξονα της διαδρομής του Ήλιου. Περαιτέρω, δεν διαπιστώθηκαν άλλα προβλήματα ιδιαίτερης σημασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

6.1 Προεπεξεργασία Μετρήσεων

6.1.1 Πρωτογενείς μετρήσεις

Οι πρωτογενείς μετρήσεις όπως καταγράφονται από το όργανο, είναι πολικές συντεταγμένες (μήκος, γωνία), οι οποίες μέσω της συνάρτησης GETCOORD, μετατρέπονται σε καρτεσιανές συντεταγμένες, ανάλογα με το σύστημα αναφοράς που έχει οριστεί. Επομένως, στα αρχεία που εξήχθησαν από το όργανο, οι συντεταγμένες ήταν σε καρτεσιανή μορφή x, y, z και αντιστοιχούν σε σημεία της τροχιάς κίνησης του στόχου η οποία θεωρητικά περιγράφεται από μια περιοδική ημιτονοειδή συνάρτηση της μορφής:

$$y = A \cdot \sin\left(2\pi \cdot f \cdot t + \varphi\right) \tag{6.1}$$

όπου:

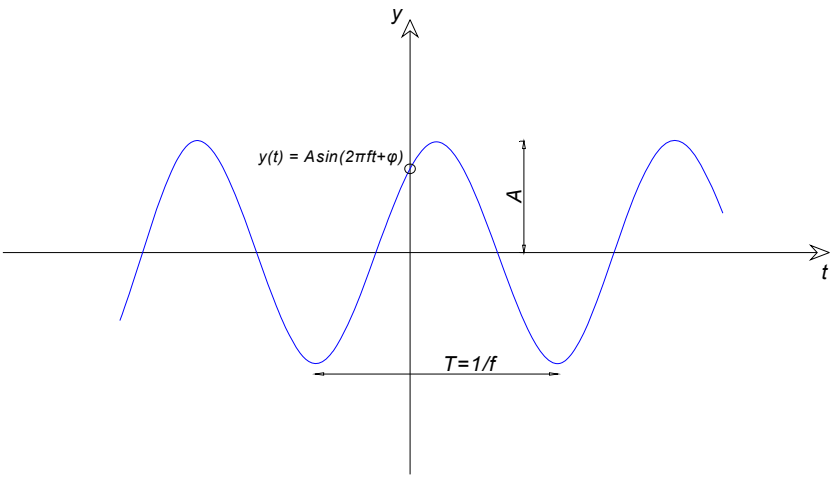
y, η απόσταση από τον άξονα x (η y-συνιστώσα),

A, το πλάτος του σήματος,

f, η συχνότητα του σήματος,

t, η χρονική στιγμή της παρατήρησης,

φ, η αρχική διαφορά φάσης.

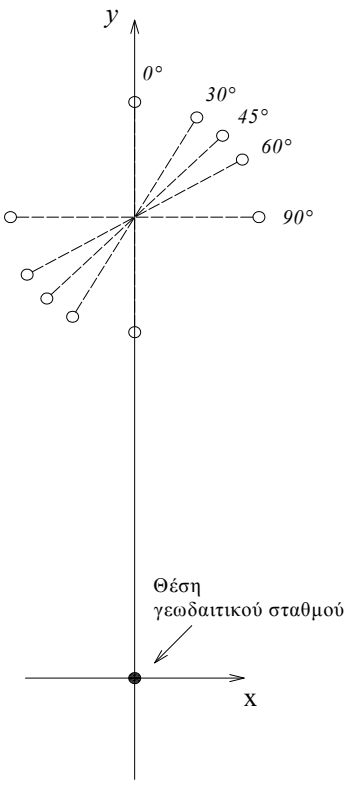


Σχ. 6.1 Γραφική αναπαράσταση αναλογικού σήματος
Fig. 6.1 Analog signal graphical representation

Η παραπάνω εξίσωση σήματος, είναι περιοδική, οπότε αν θέσουμε $\Omega = 2\pi \cdot f = \frac{2\pi}{T}$, η τιμή του y, είναι ίδια για κάθε χρονικό διάστημα T_0 που είναι ίσο με την βασική περίοδο του σήματος.

6.1.2 Στροφή υπολογισμένων θέσεων

Οι μετρήσεις που παρήχθησαν αφορούν την κίνηση του στόχου σε γωνίες 0°, 30°, 45°, 60° και 90°, σχετικά με τον άξονα y, όπως αυτός ορίστηκε κατά τον σχεδιασμό του πειράματος. Επομένως, αν εξαιρέσουμε τις δυο ακραίες γωνίες 0° και 90°, σε όλες τις άλλες εμπλέκονται και οι δύο συντεταγμένες x και y για τον προσδιορισμό της κίνησης του στόχου (Σχήμα 6.2) (η συντεταγμένη z, δεν λαμβάνεται υπόψην, καθώς αφορά στην κίνηση του στόχου κατά τον κατακόρυφο άξονα, η οποία θεωρείται αμελητέα).



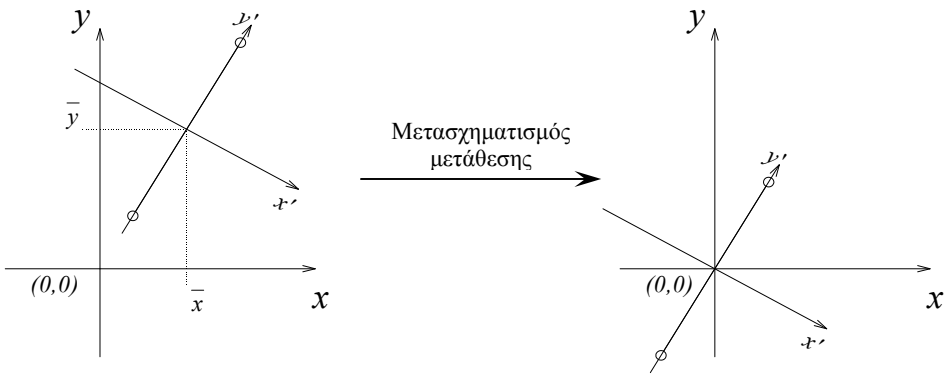
Σχ. 6.2 Κίνηση του στόχου
Fig. 6.2 Target movement

Για τις ανάγκες περαιτέρω επεξεργασίας των μετρήσεων και την εξαγωγή των τελικών αποτελεσμάτων, είναι απαραίτητο η κίνηση του στόχου να περιγραφεί σε ένα άξονα για όλες τις ομάδες πειραμάτων, κατά συνέπεια τα υπόλοιπα στον κάθετο άξονα θα περιγράφουν την απόκλιση των δεδομένων από τα ονομαστικά στοιχεία της κίνησης. Επομένως, πρέπει να εφαρμοστεί μια διαδικασία στροφής των μετρήσεων, αφού πρωτίστως μετατεθεί το κέντρο των αξόνων στο κέντρο βάρους κίνησης του στόχου.

6.1.3 Διαδικασία στροφής και μετάθεσης

Για τη μετάθεση του κέντρου του συστήματος συντεταγμένων (Σχήμα 6.3), πρέπει να ληφθεί υπόψην ο μέσος όρος των συντεταγμένων x, y όλων των μετρήσεων. Όμως απο πείραμα σε πείραμα υπήρχε διαφορά μέχρι και 5 mm μεταξύ των κέντρων, οπότε έπρεπε να υπολογιστεί το κέντρο βάρους ξεχωριστά για κάθε πείραμα. Στη συνέχεια

έγινε αφαίρεση των μέσων τιμών από τις τιμές των μετρήσεων κάθε πειράματος, για να γίνει αναγωγή στο κέντρο βάρους (0,0).



Σχ. 6.3 Μετάθεση συστημάτων αναφοράς
Fig. 6.3 Reference system transfer

Οι σχέσεις που δίνουν τις συντεταγμένες κάθε σημείου για κάθε πείραμα, είναι:

$$x'_{ij} = x_{ij} - \left(\frac{\sum_{j=1}^{N_i} x_{ij}}{N_i} \right) \qquad (6.2)$$

$$y'_{ij} = y_{ij} - \frac{\sum_{j=1}^{N_i} y_{ij}}{N_i} \qquad (6.3)$$

όπου:

$i = 1...100$ Ο αριθμός των πειραμάτων που εκτελέστηκαν,

N_i = Ο αριθμός των μετρήσεων του i πειράματος,

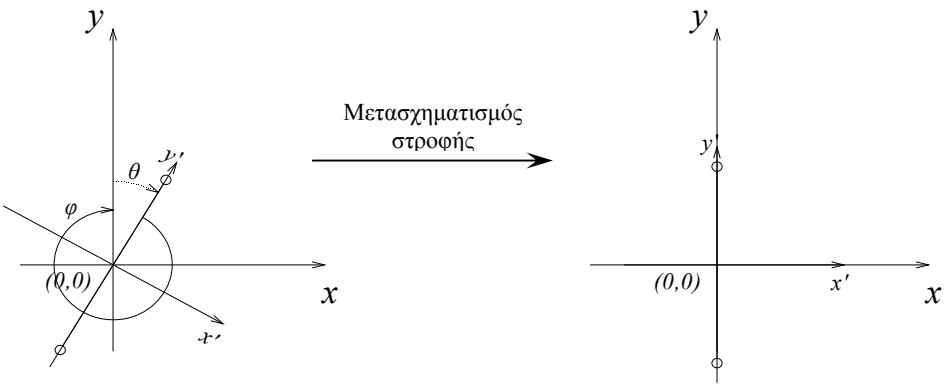
$j = 1 \ldots N_i$ Η j-μέτρηση του i πειράματος.

και:

$$\left(\frac{\sum_{j=1}^{N_i} x_{ij}}{N_i} \right) = \overline{x}_i \qquad (6.4)$$

$$\left(\frac{\sum_{j=1}^{N_i} y_{ij}}{N_i} \right) = \overline{y}_i \qquad (6.5)$$

Στη συνέχεια τα δεδομένα υπέστησαν στροφή γύρω από τα νέα κέντρα, έτσι ώστε ο άξονας y του παλαιού συστήματος, να συμπίπτει με τον άξονα y' του νέου (Σχήμα 6.4).



Σχ. 6.4 Στροφή συστημάτων αναφοράς
Fig. 6.4 Reference system rotation

Οι γωνίες στροφής που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε ομάδα πειράματος είναι:

$$\hat{\theta}_i = \left(360° - \hat{\varphi}_i\right) \tag{6.6}$$

όπου:

$\hat{\theta}_i$, η γωνία στροφής της *i* ομάδας πειράματος,

φ_i , η γωνία κατά την οποία εκτελέστηκε το πείραμα *i*.

Στον Πίνακα 6.1 παρουσιάζονται οι γωνίες στροφής για κάθε ομάδα πειραμάτων:

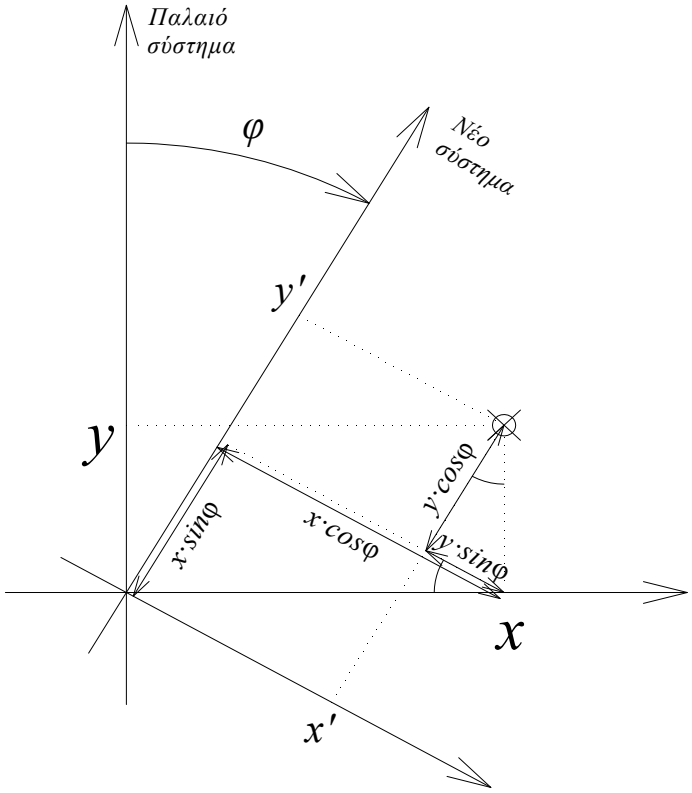
Γωνία πειράματος *(θ_i^o)*	Γωνία στροφής *(φ_i^o)*
0º	360º
30º	330º
45º	315º
60º	300º
90º	270º

Πίνακας 6.1 Γωνίες στροφής για κάθε ομάδα πειραμάτων
Table 6.1 Rotation angles for each experiment group

Η διαδικασία στροφής βασίζεται στον πίνακα:

$$R = \begin{bmatrix} \cos\varphi_i & -\sin\varphi_i \\ \sin\varphi_i & \cos\varphi_i \end{bmatrix} \tag{6.7}$$

ο οποίος προκύπτει γραφικά από το Σχήμα 6.5.



Σχ. 6.5 Γραφική απεικόνιση μετασχηματισμού στροφής
Fig. 6.5 Graphical representation of rotation transformation

Οι τελικές συντεταγμένες προκύπτουν από την σχέση:

$$\begin{bmatrix} x''_{ij} \\ y''_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi_i & -\sin\varphi_i \\ \sin\varphi_i & \cos\varphi_i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x'_{ij} \\ y'_{ij} \end{bmatrix} \tag{6.8}$$

όπου τα x' και y', προκύπτουν από τις σχέσεις (6.2) και (6.3) αντίστοιχα.

Ομαδοποιώντας τις διαδικασίες μετάθεσης και στροφής σε μία σχέση, έχουμε:

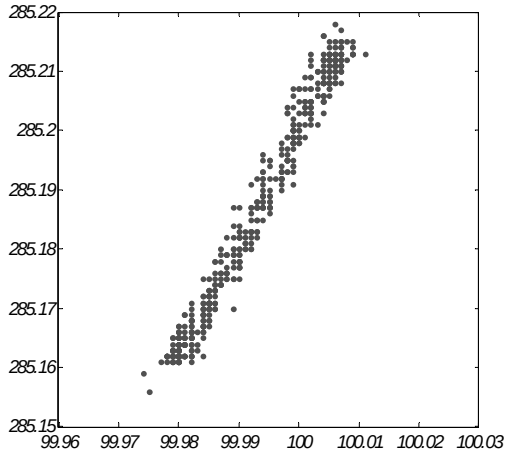
$$\begin{bmatrix} x''_{ij} \\ y''_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi_i & -\sin\varphi_i \\ \sin\varphi_i & \cos\varphi_i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{ij} - \overline{x}_{ij} \\ y_{ij} - \overline{y}_{ij} \end{bmatrix} \tag{6.9}$$

όπου x''_{ij}, y''_{ij}, οι τελικές καρτεσιανές συντεταγμένες των σημείων που προκύπτουν μετά από την εφαρμογή των μετασχηματισμών στροφής και μετάθεσης στα αρχικά δεδομένα. Η διαδικασία μετάθεσης και στροφής, έγινε αυτοματοποιημένα με λογισμικό που δημιουργήθηκε σε περιβάλλον Visual Basic. Το λογισμικό "διάβαζε" τα αρχικά αρχεία μετρήσεων, και επέστρεφε σε μορφή ".txt" τα αποτελέσματα. Στην πρώτη στήλη του εξαγόμενου αρχείου αναγράφεται ο χρόνος λήψης (t) κάθε μέτρησης, στην δεύτερη η απόκλιση κάθε μέτρησης από την ευθυγραμμία και στην τρίτη στήλη, δίνεται η κίνηση του στόχου κατά τον άξονα y.

6.2 Στοιχεία Στατιστικής Επεξεργασίας Μετρήσεων

6.2.1 Διαγράμματα οριζοντιογραφίας

Τα διαγράμματα οριζοντιογραφίας, είναι διαγράμματα δύο διαστάσεων (x, y), στα οποία απεικονίζονται σε καρτεσιανές συντεταγμένες τα σημεία που περιγράφουν την κίνηση του στόχου. Η απόδοση τους γίνεται με την πραγματική γωνία στροφής, όπως αυτή προκύπτει κατά την διάρκεια της μέτρησης, σχετικά με τον άξονα y (άξονας στόχου-οργάνου). Στους άξονες απεικονίζονται τα πραγματικά μεγέθη, ενώ το μόνο που μεταβάλλεται είναι η κλίμακα του διαγράμματος (ανεξάρτητα για κάθε άξονα), αποκλειστικά για λόγους απεικόνισης και εκτύπωσης αυτών (Σχήμα 6.6).



Σχ. 6.6 Διάγραμμα οριζοντιογραφίας (30°, 0.2Hz, ±3cm)
Fig. 6.6 x-y scatter graph (30°, 0.2Hz, ±3cm)

6.2.2 Διαγράμματα πλήθους εμφανίσεων

Τα διαγράμματα πλήθους εμφανίσεων ή ιστογράμματα συχνότητας, ομαδοποιούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε κλάσεις. Ο αριθμός των κλάσεων που δημιουργούνται εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος του δείγματος και από την λεπτομέρεια που θέλουμε να έχει η απεικόνηση των αποτελεσμάτων. Το ιστόγραμμα συχνοτήτων δείχνει ουσιαστικά ποιά τιμή του δείγματος κατηγοριοποιείται σε κάποια συγκεκριμένη κλάση, (Σχήμα 6.7). Για παράδειγμα αν έχουμε ένα δείγμα 500 μετρήσεων με μεγέθη τιμών από 1 έως 100 (τυχαίες μονάδες), αντί να απεικονίσουμε στο διάγραμμα και τις 500 παρατηρήσεις, το χωρίζουμε σε κλάσεις (έστω 10) με εύρος κλάσης 10 μονάδες (η πρώτη κλάση από 1 έως 10, η δεύτερη από 11 έως 20 κτλ.) και μέσα σε αυτές τις κλάσεις κατανέμουμε τις παρατηρήσεις. Το αποτέλεσμα είναι η σαφώς «ευκρινέστερη» γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων με συνέπεια όμως τη μείωση της λεπτομέρειας και της πληροφορίας που μας παρέχει το

διάγραμμα. Οι μαθηματικές σχέσεις που χρησιμοποιούνται για την εύρεση του αριθμού των κλάσεων σε δείγματα διακριτών δεδομένων είναι:

$$k = 1 + 3.3 \cdot \log N \tag{6.10}$$

$$k = \frac{\max(x) - \min(x)}{h} \tag{6.11}$$

$$k = \log_2 N + 1 \tag{6.12}$$

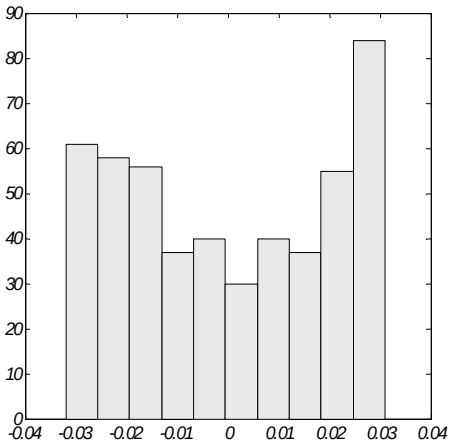
όπου:

k, ο αριθμός των κλάσεων,

N, το πλήθος των παρατηρήσεων,

x, η τιμή της παρατήρησης,

h, το εύρος της κλάσης.



Σχ. 6.7 Ιστόγραμμα συχνότητας (30°, 0.2Hz, ±3cm)
Fig. 6.7 Frequency histogram (30°, 0.2Hz, ±3cm)

6.2.3 Υπολειμματικές διαφορές

Υπολειμματική διαφορά ονομάζεται η διαφορά της τιμής κάθε μέτρησης από την μέση τιμή των μετρήσεων και εκφράζει την ακρίβεια (precision) των παρατηρήσεων. Χρησιμοποιώντας μαθηματική ορολογία, οι υπολειμματικές διαφορές ορίζονται ως:

$$\hat{\varepsilon}_i = x_i - \hat{x} \tag{6.13}$$

όπου:

$\hat{\varepsilon}_i$, η υπολειμματική διαφορά της μέτρησης i,

x_i , η τιμή της μέτρησης i,

$\hat{x}$, ο μέσος όρος των τιμών των μετρήσεων.

Για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας, προηγήθηκε η φασματική ανάλυση των μετρήσεων και αφού προσδιορίστηκαν τα απαραίτητα στοιχεία για την αναπαραγωγή του κυρίου σήματος (§6.3), έγινε ο υπολογισμός των υπολειμματικών διαφορών (residuals) στην διεύθυνση ταλάντωσης καθώς και των τυπικών αποκλίσεων $\left(\sigma^2_{\mathrm{Re}\,siduals}\right)$ αυτών. Η αναλυτική διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό των υπολειμματικών διαφορών είναι η παρακάτω:

- Υπολογισμός των συντελεστών A και B για την αναπαραγωγή του κυρίου σήματος (προϊόντα φασματικής ανάλυσης),
- Μετάθεση των μετρήσεων στο κέντρο του άξονα x, μέσω της σχέσης (6.14),

$$h_{ji} = \left(h_{m_{ji}} - mean_j\right) \tag{6.14}$$

όπου:

h_{ji}, η μετατεθημένη τιμή κάθε μέτρησης,

h_{mi}, η πραγματική τιμή κάθε μέτρησης,

$mean_j$, η μέση τιμή όλων των μετρήσεων του κάθε πειράματος,

i, ο αύξων αριθμός της μέτρησης,

j, ο αύξων αριθμός κάθε πειράματος.

- Υπολογισμός των υπολειμματικών διαφορών μέσω της σχέσης (6.15):

$$residual_{ji} = h_{ji} - y_{ji}^{Lomb} \tag{6.15}$$

όπου:

$residual_{ji}$, η τιμή της υπολειμματικής διαφοράς για κάθε μέτρηση,

h_{ji}, η μετατεθημένη τιμή κάθε μέτρησης,

y_{ji}^{Lomb}, η τιμή που έχει προκύψει από την αναπαραγωγή του κυρίως σήματος,

i, ο αύξων αριθμός της μέτρησης,

j, ο αύξων αριθμός κάθε πειράματος.

- Τέλος έγινε και υπολογισμός της τυπικής απόκλισης των υπολειμματικών διαφορών μέσω της σχέσης (6.16).

$$\sigma^2_{residual_j} = \sqrt{\frac{1}{N_j - 1} \cdot \left[\sum_{i=1}^{N_j}\left(residual_{ji} - mean_j^{residuals}\right)^2\right]} \tag{6.16}$$

όπου:

$\sigma^2_{residual_j}$, η τυπική απόκλιση των υπολειμματικών διαφορών του πειράματος j,

$residual_{ji}$, η τιμή της υπολειμματικής διαφοράς για κάθε μέτρηση,

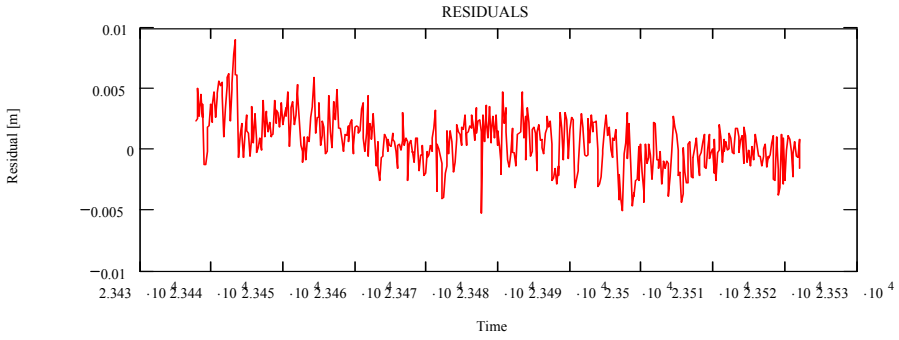
$mean_j^{residuals}$, ο μέσος όρος των υπολειμματικών διαφορών του πειράματος j,

N_j, ο αριθμός των παρατηρήσεων του πειράματος j,

i, ο αύξων αριθμός της μέτρησης,

j, ο αύξων αριθμός κάθε πειράματος.

Στο Σχήμα 6.8 παρουσιάζεται ένα τυπικό διάγραμμα υπολειμματικών διαφορών του πειράματος.

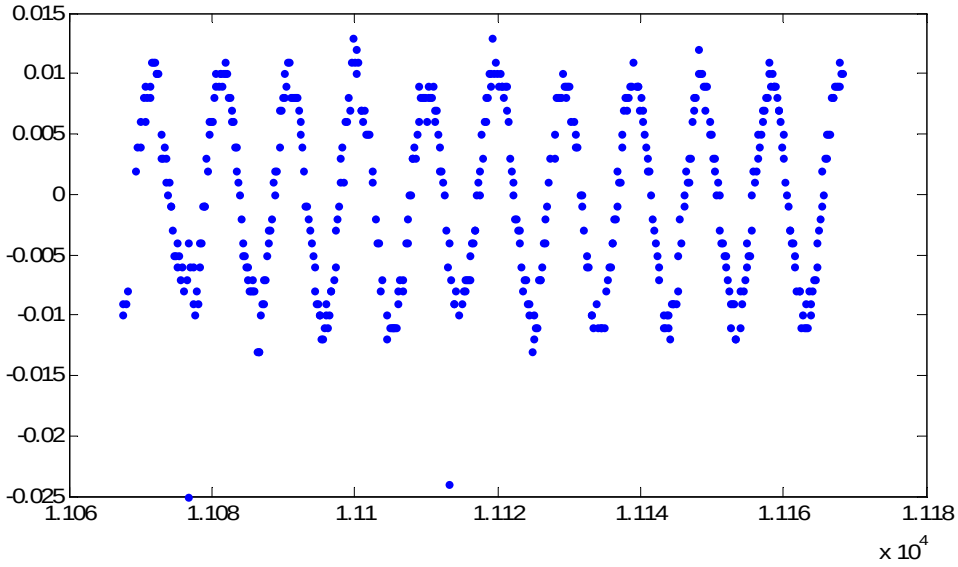


Σχ. 6.8 Διάγραμμα υπολειμματικών διαφορών (45°, 0.1Hz, ±3cm)
Fig. 6.8 Residuals chart (45°, 0.1Hz, ±3cm)

6.3 Στοιχεία Φασματικής Επεξεργασίας Μετρήσεων

6.3.1 Εισαγωγή

Με την φασματική ανάλυση επιτυγχάνεται η μετάβαση από το πεδίο του χρόνου, στο πεδίο των συχνοτήτων. Αν υποθέσουμε ότι έχουμε διακριτές μετρήσεις για ένα φαινόμενο το οποίο μεταβάλλεται με τον χρόνο περιοδικά, η χρονοσειρά που το περιγράφει μπορεί να είναι ανάλογη με αυτή του Σχήματος 6.9.



Σχ. 6.9 Χρονοσειρά μετρήσεων (30°, 0.1Hz, ±1cm)
Fig. 6.9 Timeseries of measurements (30°, 0.1Hz, ±1cm)

Παρατηρούμε ότι τα πρωτογενώς εξαγόμενα μεγέθη (χρόνος, συντεταγμένες), δεν επαρκούν για την πλήρη περιγραφή του φαινομένου. Σε αυτό το στάδιο εφαρμόζεται η φασματική ανάλυση των δεδομένων, μέσω της οποίας γίνεται μεταφορά στο πεδίο των συχνοτήτων, και είναι πλέον δυνατή η αναλυτική αναπαράσταση του Σχήματος 6.9, ως εξίσωση ενός αναλογικού σήματος (§6.1.1) η οποία προκύπτει από προσαρμογή καμπύλης στα διακριτά δεδομένα και μας παρέχει τα ζητούμενα χαρακτηριστικά της συνάρτησης (εύρος και συχνότητες ταλάντωσης).

6.3.2 Σειρές Fourier

Η ανάλυση Fourier, πήρε το όνομα της από τον Γάλλο μαθηματικό Joseph Fourier (1768-1830), ο οποίος κατά την διεξαγωγή ενός πειράματος, αναφέρθηκε σε μια εξίσωση που αποτέλεσε θεμέλιο για τις σειρές και τους μετασχηματισμούς Fourier. Οι σειρές Fourier βασίζονται στην παραδοχή ότι κάθε περιοδική συνάρτηση αποτελείται από το άθροισμα συναρτήσεων ημιτόνων και συνημιτόνων πολλαπλάσιας συχνότητας από την αρχική, οι οποίες ονομάζονται αρμονικές. Επομένως, μια περιοδική συνάρτηση μπορεί να αναπαρασταθεί με ανάπτυγμα σειράς Fourier ως εξής:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(nx) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(nx) \qquad (6.17)$$

όπου:

x, περιοδικό όρισμα (π.χ. $x = 2\pi t$),

a_0, a_n και b_n, συντελεστές.

Ο συντελεστής $\frac{a_0}{2}$, αναφέρεται ως μέση τιμή του σήματος ή αλλιώς τιμή DC, η οποία τις περισσότερες φορές είναι πρακτικά μηδενική. Οι συντελεστές a_n και b_n, εκφράζουν τον βαθμό συμβολής της κάθε αρμονικής στην αναπαραγωγή του κυρίου σήματος. Η δυσκολία στην διάσπαση ενός σήματος σε αρμονικές εστιάζεται στον υπολογισμό των δύο αυτών συντελεστών. Ο υπολογισμός τους στηρίζεται στο γεγονός ότι οι συναρτήσεις $\cos(nx)$ και $\sin(nx)$, πληρούν τις παρακάτω ιδιότητες ορθογωνιότητας[(1)]:

$$\int_{-\pi}^{+\pi} \cos(mx)\sin(nx)\,dt = 0 \qquad \forall m,n \in \mathbb{Z} \tag{6.18}$$

$$\int_{-\pi}^{+\pi} \cos(mx)\cos(nx)\,dt = \begin{cases} 0 & m \neq n \\ 2\pi & m = n = 0 \\ \pi & (m = n) > 0 \end{cases} \tag{6.19}$$

$$\int_{-\pi}^{+\pi} \sin(mx)\sin(nx)\,dt = \begin{cases} 0 & m \neq n \\ \pi & (m = n) > 0 \end{cases} \qquad \forall m,n \in \mathbb{Z} \tag{6.20}$$

Πολλαπλασιάζοντας και τα δύο μέλη της εξίσωσης (6.17) με $\cos(nx)$ ή $\sin(nx)$ και ολοκληρώνοντας στο διάστημα [-π, π], καταλήγουμε σε μια σχέση της οποίας οι όροι, λαμβάνοντας υπόψην μας τις ιδιότητες της ορθογωνιότητας, μηδενίζονται, εκτός από τους όρους των συντελεστών a_0, a_n και b_n, οι οποίοι είναι:

$$a_0 = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{+\pi} f(x)\,dx \tag{6.21}$$

$$a_n = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{+\pi} f(x)\cos(nx)\,dx \tag{6.22}$$

$$b_n = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{+\pi} f(x)\sin(nx)\,dx \tag{6.23}$$

(1) Δυο συναρτήσεις καλούνται ορθογώνιες, όταν το εσωτερικό τους γινόμενο είναι ίσο με μηδέν.

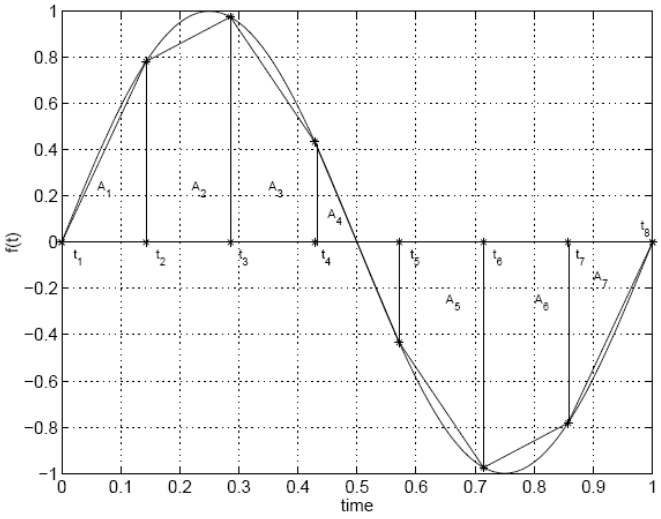
Οι σειρές Fourier, είναι δυνατόν να αναπαρασταθούν και σε εκθετική μορφή, σύμφωνα με την εξίσωση (6.24).

$$e^{-i\theta} = \cos(\theta) + i\sin(\theta) \tag{6.24}$$

μέσω της οποίας, η αρχική εξίσωση (6.17) των σειρών Fourier, γίνεται:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \frac{1}{2}\sum_{n=1}^{\infty} a_i \left(e^{inx} + e^{-inx}\right) + \frac{1}{2i}\sum_{n=1}^{\infty} b_i \left(e^{inx} + e^{-inx}\right) \tag{6.25}$$

6.3.3 Ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier (Discreet Fourier Transform)



Σχ. 6.10 Σχηματική αναπαράσταση του Κανόνα του Τραπεζίου. *(Πηγή: Brian D. Storey)*
Fig. 6.10 Schematic representation of Trapezoidal Rule. *(Source: Brian D. Storey)*

Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, κατά την διεξαγωγή ενός πειράματος τα δεδομένα που καταγράφουμε είναι διακριτά και όχι συνεχή. Για τον σκοπό αυτό είναι αναγκαίο να αναπτύξουμε την μεθοδολογία Fourier στα διακριτά σημεία για την μετάβαση στο πεδίο των συχνοτήτων μέσω του Διακριτού Μετασχηματισμού Fourier (DFT). Ο Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier, βασίζεται στον Κανόνα του Τραπεζίου σύμφωνα με τον οποίο, ανά δύο οι προβολές στον άξονα x των διακριτών σημείων, δημιουργούν τραπέζια. Στο Σχήμα 6.10 παρατηρούμε ότι υπάρχουν οχτώ διακριτά σημεία (t_1, t_2, …,t_8), με συχνότητα δειγματοληψίας 10 Hz, τα οποία περιγράφουν ένα περιοδικό φαινόμενο.

Αν ονομάσουμε τα τραπέζια που σχηματίζονται A_1, A_2, ..., A_n και υποθέσουμε ότι τα δεδομένα έχουν σταθερή συχνότητα δειγματοληψίας (δηλαδή τα διαστήματα $\Delta t = t_{j+1} - t_j$ είναι ίσα), τότε αθροίζοντας τα εμβαδά των τραπεζίων $\left(A_j = \frac{f\left(t_j\right) + f\left(t_{j+1}\right)}{2} \cdot \left(t_{j+1} - t_j\right) \right)$, καταλήγουμε στην γενικευμένη σχέση :

$$\int f\left(t\right) dt = \Delta t \left(\frac{f\left(t_1\right)}{2} + \frac{f\left(t_n\right)}{2} + \sum_{j=2}^{n-1} f\left(t_j\right) \right) \tag{6.26}$$

Αντίστοιχα με τα συνεχή δεδομένα, υπολογίζονται και για τα διακριτά, οι συντελεστές a_n και b_n:

$$a_n = \Delta t \left(\sin\left(2\pi n t_1\right) f\left(t_1\right) + \sin\left(2\pi n t_n\right) f\left(t_n\right) + 2\sum_{j=2}^{n-1} f\left(t_j\right) \right) \tag{6.27}$$

$$b_n = \Delta t \left(\cos\left(2\pi n t_1\right) f\left(t_1\right) + \cos\left(2\pi n t_n\right) f\left(t_n\right) + 2\sum_{j=2}^{n-1} f\left(t_j\right) \right) \tag{6.28}$$

Για την πλήρη αναπαράσταση του σήματος στο πεδίο συχνοτήτων, πρέπει σύμφωνα με το θεώρημα *Nyquist–Shannon*, ο ρυθμός δειγματοληψίας (sampling rate) της συνάρτησης που αναπαριστά το περιοδικό φαινόμενο, να είναι μεγαλύτερος από το διπλάσιο της μέγιστης συχνότηταστου φαινομένου. Πρέπει δηλαδή να ισχύει:

$$f_{sampling} > 2 f_{\max} \quad \text{ή} \quad T_{sampling} < 2 T_{\min} \tag{6.29}$$

όπου:

$f_{sampling}$, η συχνότητα δειγματοληψίας,

$f_{\max}$, η μέγιστη συχνότητα του αναπαραγόμενου σήματος,

$T_{sampling}$, η περίοδος δειγματοληψίας,

$T_{\min}$, η ελάχιστη περίοδος του αναπαραγόμενου σήματος.

Με απλά λόγια, αν επιζητούμε τη μετατροπή ενός αναλογικού σήματος ονομαστικής συχνότητας 10 Hz, σε ψηφιακό, και θελήσουμε έπειτα να αναπαράγουμε ξανά το αρχικό σήμα, θα πρέπει η δειγματοληψία μας να γίνει με ελάχιστη συχνότητα 20 Hz, το οποίο συνεπάγεται την συλλογή τουλάχιστον 20 σημείων/sec. Στη περίπτωση του δικού μας πειράματος, η μέγιστη συχνότητα ταλάντωσης του στόχου ήταν 2 Hz. Επομένως για την σωστή αναπαράσταση του αρχικού σήματος, έπρεπε ο γεωδαιτικός

σταθμός να καταγράψει σε συχνότητα τουλάχιστον 4 Hz. Η συχνότητα καταγραφής σημείων του γεωδαιτικού σταθμού ήταν περίπου 5.5 Hz, τιμή που υπερβαίνει το θεωρητικό όριο.

6.3.3α Ο Ταχύς Μετασχηματισμός Fourier FFT (Fast Fourier Transform)

Ο Ταχύς Μετασχηματισμός Fourier (FFT), είναι μια μεθοδολογία υπολογισμού του Διακριτού Μετασχηματισμού Fourier (DFT), μέσω της οποίας ελαχιστοποιείται ο αριθμός των υπολογισμών που απαιτούνται για την αναπαράσταση ενός σήματος. Ο FFT, σχεδιάστηκε κυρίως για χρήση σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές, όπου το πλήθος των υπολογισμών κοστίζει σε μνήμη και χρόνο. Με την κλασσική μεθοδολογία υπολογισμού των συντελεστών Fourier, ο υπολογιστής χρειάζεται να εκτελέσει N^2 υπολογισμούς, όπου N ο αριθμός των σημείων του δείγματος. Για παράδειγμα η δειγματοληψία ενός τραγουδιού σε 44.100 Hz, απαιτεί περισσότερους από $1.9 \cdot 10^9$ υπολογισμούς για κάθε δευτερόλεπτο μουσικής. Με τον αλγόριθμο FFT, ο αριθμός των απαιτούμενων υπολογισμών μειώνεται σε $N \log_2 N$ υπολογισμούς (Brian D. Storey). Ο αλγόριθμος FFT βασίζεται στην εκθετική αναπαράσταση των σειρών Fourier (Εξίσωση 6.30), κάνοντας παράλληλα χρήση μιγαδικών αριθμών:

$$x_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{2\pi i}{N} nk} \tag{6.30}$$

όπου:

x_k, η τιμή της συνάρτησης του σήματος που προκύπτει μετά την επεξεργασία,

$x_0, x_1, ..., x_{N-1} \in \mathbb{C}$,

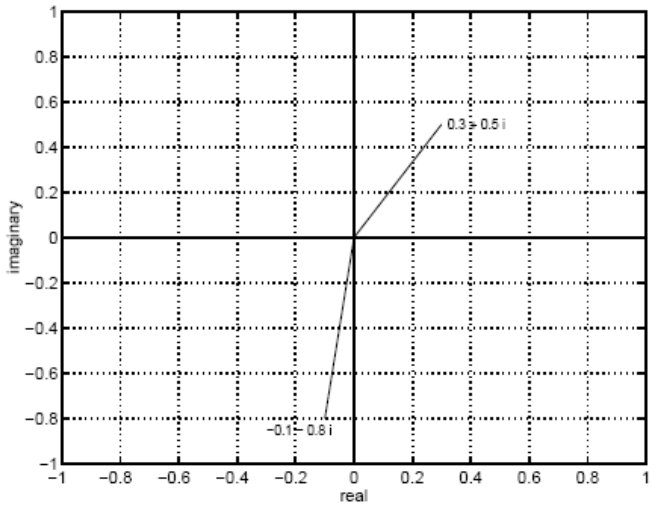
$k = 0, 1, ..., N-1$,

$i = \sqrt{-1}$.

Οι μιγαδικοί αριθμοί είναι της μορφής

$$c = a + bi \tag{6.31}$$

και αποτελούνται από το πραγματικό (real) a και από το φανταστικό (imaginary) b μέρος. Η γραφική τους αναπαράσταση, υλοποιείται στο μιγαδικό επίπεδο (complex plane) (Σχήμα 6.11), όπου το πραγματικό μέρος εκφράζει την τετμημένη, ενώ το φανταστικό την τεταγμένη.

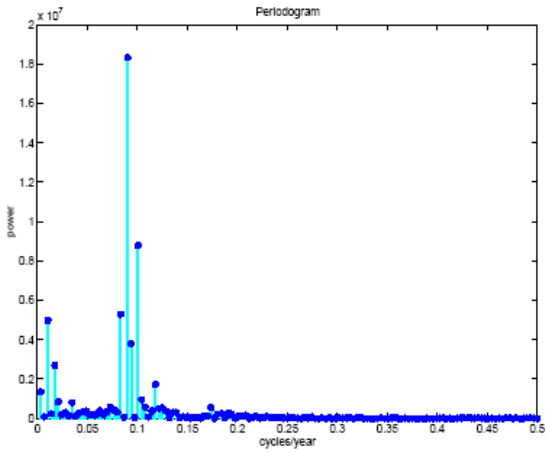


Σχ. 6.11 Γραφική αναπαράσταση του μιγαδικού επιπέδου (*Πηγή: Brian D. Storey*)
Fig. 6.11 Complex plane graphical representation (*Source: Brian D. Storey*)

Η αντιστοιχία των μιγαδικών αριθμών με την ανάλυση Fourier, είναι ότι οι συντελεστές Fourier a_n και b_n εκφράζονται αντίστοιχα από το φανταστικό και το πραγματικό μέρος ενός μιγαδικού αριθμού. Η απόλυτη τιμή ενός μιγαδικού αριθμού είναι ίση με το μέτρο του στο μιγαδικό επίπεδο, δηλαδή:

$$|c| = \sqrt{a^2 + b^2} \tag{6.32}$$

Σε αντιστοιχία με τους συντελεστές Fourier, η παραπάνω ποσότητα (6.32), εκφράζει την *Ένταση* (Magnitude) της συχνότητας που εκφράζεται από τους αντίστοιχους συντελεστές a_n και b_n. Τέλος, ένα ακόμη μέγεθος που απορρέει από την φασματική ανάλυση ενός σήματος είναι η Ισχύς (Power) της εκάστοτε συχνότητας στο φάσμα των συχνοτήτων. Η ισχύς εκφράζεται ως το τετράγωνο της έντασης ($Power = Magnitude^2$) και εκφράζει την ποσότητα συμβολής κάθε συχνότητας στο αναλυόμενο σήμα.



Σχ. 6.12 Γραφική αναπαράσταση φάσματος συχνοτήτων. Στον άξονα x φαίνονται οι υπολογισμένες συχνότητες, ενώ στον y η ισχύς κάθε μιας

Fig. 6.12 Power spectrum graphical representation. x-coordinate represents the analysed frequencies and y represents the power of each one of them

6.3.4 Περιοδόγραμμα Lomb

Ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier και ο υπολογισμός των συντελεστών a_n και b_n, βασίζεται στο γεγονός ότι η δειγματοληψία γίνεται σε ίσα χρονικά διαστήματα $\Delta t = t_{j+1} - t_j$. Στις περισσότερες όμως περιπτώσεις αναλύοντας φυσικά φαινόμενα δεν συμβαίνει κάτι τέτοιο και τα χρονικά διαστήματα ανάμεσα σε δύο διαδοχικές δειγματοληψίες δεν είναι ίσα ($\Delta t_j \neq \Delta t_{j+1}$). Στην περίπτωση αυτή εφαρμόζεται μια άλλη μέθοδος φασματικής ανάλυσης η οποία ονομάζεται Περιοδόγραμμα *Lomb*. Ο Lomb (1976) βασίστηκε στην Μέθοδο Ελαχίστων Τετραγώνων και θεωρώντας τις παρατηρήσεις ισοβαρείς προχώρησε στην προσαρμογή μιας ημιτονικής καμπύλης στα δεδομένα, η οποία περιγράφει τα χαρακτηριστικά περιοδικότητας του φαινομένου το οποίο αναλύεται. Συγκεκριμένα, υπολογίζοντας στατιστικά στοιχεία του δείγματος όπως η μέση τιμή $\hat{x}$ και η τυπική απόκλιση $\hat{\sigma}^2$, το κανονικοποιημένο περιοδόγραμμα Lomb για μια περίοδο T και πλήθος δεδομένων N, δίνεται από την σχέση:

$$P(T) = \frac{1}{2\hat{\sigma}^2}\left\{\frac{\left[\sum_{j=1}^{N}\left(x_j - \hat{x}\right)\cos\frac{2\pi\left(t_i-\tau\right)}{T}\right]^2}{\sum_{j=1}^{N}\cos^2\frac{2\pi\left(t_i-\tau\right)}{T}} + \frac{\left[\sum_{j=1}^{N}\left(x_j - \hat{x}\right)\sin\frac{2\pi\left(t_i-\tau\right)}{T}\right]^2}{\sum_{j=1}^{N}\sin^2\frac{2\pi\left(t_i-\tau\right)}{T}}\right\} \quad (6.33)$$

Το χρονικό διάστημα τ, δίνεται από την σχέση:

$$\tan\left(\frac{4\pi\tau}{T}\right)=\frac{\sum_{j=1}^{N}\sin\left(\frac{4\pi t_i}{T}\right)}{\sum_{j=1}^{N}\cos\left(\frac{4\pi t_i}{T}\right)} \tag{6.34}$$

όπου:

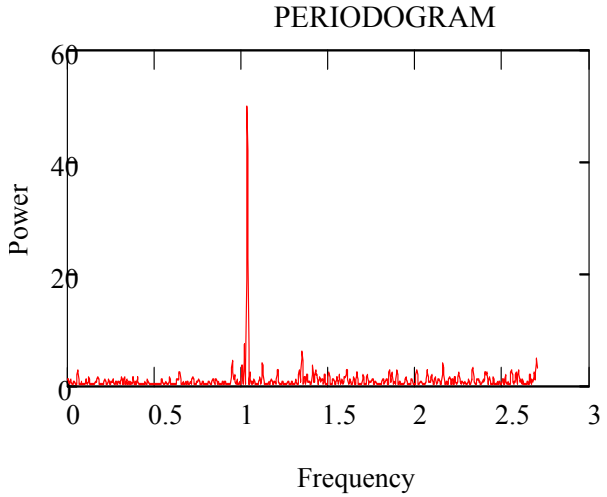
N, ο συνολικός αριθμός παρατηρήσεων,

t_i, η χρονική στιγμή καταγραφής της τιμής x_i,

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

$\hat{\sigma}^2$, η τυπική απόκλιση των δεδομένων $\hat{\sigma}^2=\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}\left(x_i-\hat{x}\right)^2$.

Η τιμή $P(T)$ του περιοδογράμματος Lomb, εκφράζει την πιθανότητα ύπαρξης περιοδικότητας με περίοδο T στα δεδομένα, ενώ γραφικά δείχνει ότι ακριβώς και η ισχύς στον DFT, δηλαδή το μέγεθος συμβολής κάθε συχνότητας στο φάσμα συχνοτήτων. Τέλος, σημαντική προυπόθεση για την εφαρμογή του περιοδογράμματος Lomb είναι ο καθορισμός μιας αρχικής συχνότητας, καθώς και του συνολικού πλήθους των συχνοτήτων που πρόκειται να αναλυθούν.



Σχ. 6.13 Περιοδόγραμμα Lomb (60°, 1.0Hz, ±5cm)
Fig. 6.13 Lomb periodogram (60°, 1.0Hz, ±5cm)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΒΔΟΜΟ

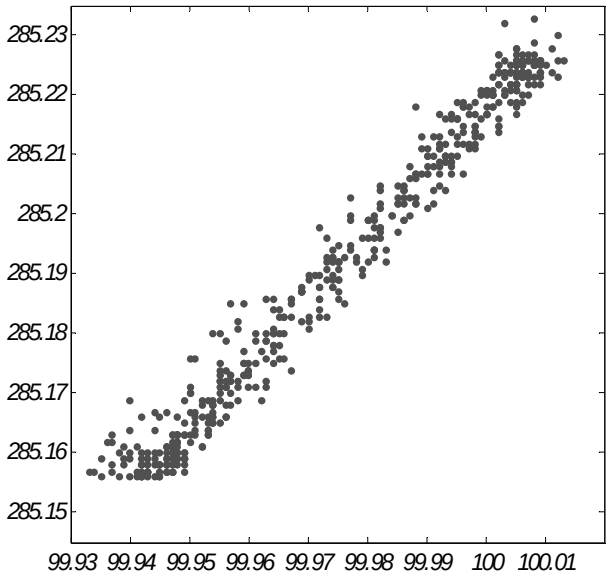
ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

7.1 Εισαγωγή

Το Κεφάλαιο 7 περιλαμβάνει συνοπτική περιγραφή αντιπροσωπευτικών διαγραμμάτων για τα μεγέθη που υπολογίστηκαν σε κάθε πείραμα. Στο δεύτερο μέρος του κεφαλαίου παρουσιάζονται και αναλύονται συγκεντρωτικά αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση όλων των πειραμάτων με τη μορφή παραμετρικών διαγραμμάτων. Λόγω του μεγάλου όγκου των αποτελεσμάτων, τα διαγράμματα που προέκυψαν για το σύνολο των μετρήσεων παρουσιάζονται στο Παράρτημα.

7.2 Στατιστική Επεξεργασία Μετρήσεων

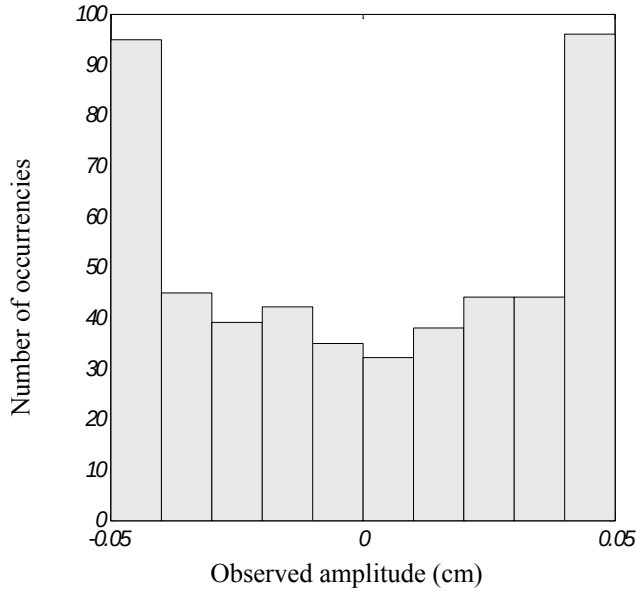
7.2.1 Διαγράμματα οριζοντιογραφίας



Σχ. 7.1 Διάγραμμα οριζοντιογραφίας (45°, ± 5 cm, 0.5 Hz)
Fig. 7.1 x-y scatter diagram (45°, ± 5 cm, 0.5 Hz)

Τα σημεία που απεικονίζονται σε κάθε διάγραμμα οριζοντιογραφίας (Σχήμα 7.1) απεικονίζουν τις καρτεσιανές συντεταγμένες του στόχου ως προς τον γεωδαιτικό σταθμό. Στον x και y άξονα αναγράφονται οι συντεταγμένες σε μέτρα, ως προς την αρχή των αξόνων (x = 100 m, y = 0 m, z = 100 m).

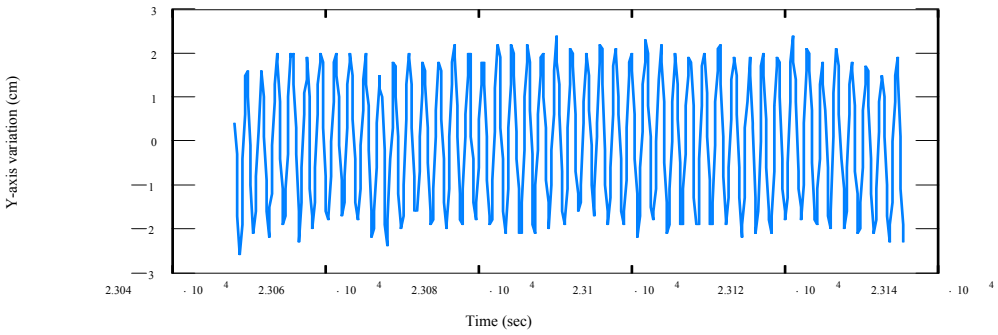
7.2.2 Ιστογράμματα πλήθους εμφανίσεων



Σχ. 7.2 Ιστόγραμμα πλήθους εμφανίσεως (30°, ± 5 cm, 0.2 Hz)
Fig. 7.2 Frequency histogram (30°, ± 5 cm, 0.2 Hz)

Τα ιστογράμματα πλήθους εμφανίσεως απεικονίζουν σε δέκα κλάσεις τις μετρημένες τιμές του πλάτους (κίνηση στον άξονα y του πειράματος). Το πλήθος των κλάσεων προέκυψε από την σχέση (6.10) για διακριτά δεδομένα. Στον άξονα x αναγράφεται το παρατηρηθέν πλάτος ταλάντωσης, ενώ στον άξονα y, αναγράφεται ο αριθμός παρατηρήσεων που οι τιμές τους περιέχονται στο εύρος τιμών κάθε κλάσης.

7.2.3 Διαγράμματα χρονοσειρών κατά τον άξονα κίνησης

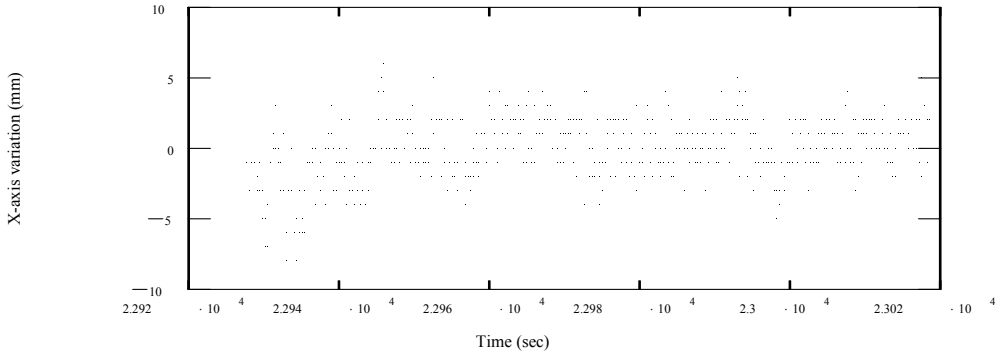


Σχ. 7.3 Διάγραμμα χρονοσειρών κατά τον άξονα κίνησης (45°, ± 2 cm, 0.5 Hz)
Fig. 7.3 Time series along main oscillation axis (45°, ± 2 cm, 0.5 Hz)

Τα διαγράμματα αυτά αφορούν στην αποχή των μετρημένων σημείων κατά τον άξονα y (άξονας κίνησης) του πειράματος, συναρτήσει του χρόνου. Ουσιαστικά πρόκειται για μια χρονοσειρά των μετρήσεων όπου στον άξονα y του διαγράμματος

παρουσιάζεται το πλάτος ταλάντωσης του στόχου και στον άξονα x ο χρόνος. Με τα διαγράμματα αυτά επιχειρείται μια γρήγορη εποπτική περιγραφή της κίνησης του στόχου σε κάθε πείραμα. Επισημαίνεται ότι, οι πρωτογενώς καταγεγραμμένες μετρήσεις έχουν στραφεί έτσι ώστε η κίνηση του στόχου να περιορίζεται σε έναν άξονα (βλ. §6.1.2).

7.2.4 Διαγράμματα χρονοσειρών κατά τον κάθετο άξονα στον άξονα κίνησης

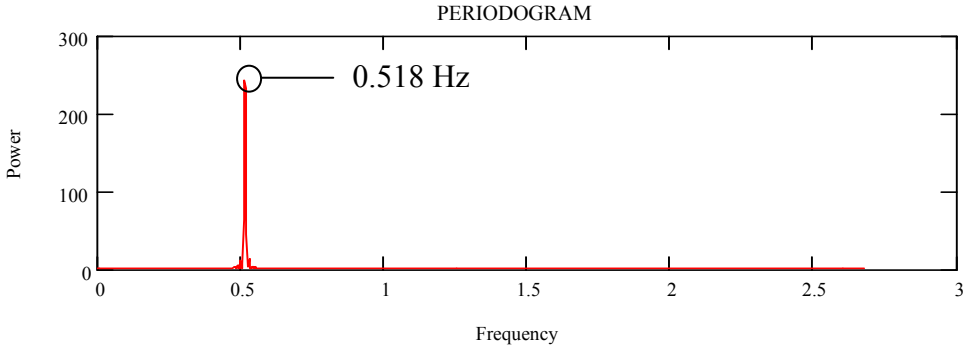


Σχ. 7.4 Διάγραμμα χρονοσειρών κατά τον x-άξονα (45°, ± 2 cm, 0.2 Hz)
Fig. 7.4 x-axis timeseries chart (45°, ± 2 cm, 0.2 Hz)

Στα διαγράμματα κατά τον x-άξονα (κάθετος άξονας στον άξονα κίνησης του στόχου), παρουσιάζεται η αποχή των καταγεγραμμένων σημείων από τον άξονα κίνησης του στόχου, συναρτήσει του χρόνου. Από το διάγραμμα του Σχήματος 7.4, φαίνεται ότι οι αποχές από τον άξονα κίνησης, καταγράφονται με βήμα 1 mm (άξονας y διαγράμματος). Η σταθερή αυτή αποχή, οφείλεται στην διακριτική ικανότητα (ανάλυση) του οργάνου.

7.3 Φασματική Επεξεργασία Μετρήσεων

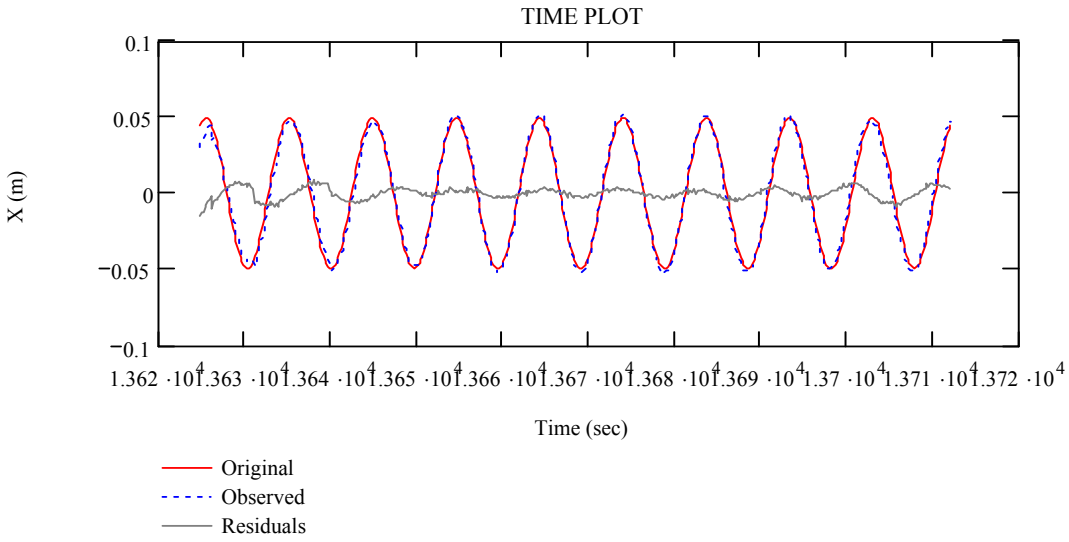
7.3.1 Διαγράμματα κύριας συχνότητας



Σχ. 7.5 Διάγραμμα κύριας συχνότητας (0°, ± 3 cm, 0.5 Hz)
Fig. 7.5 Main frequency chart (0°, ± 3 cm, 0.5 Hz)

Τα διαγράμματα κύριας συχνότητας προέκυψαν από την φασματική επεξεργασία των μετρήσεων και απεικονίζουν την ισχύ (power) συναρτήσει των τιμών των υπολογισμένων συχνοτήτων. Στο διάγραμμα του Σχήματος 7.5 παρουσιάζεται η κύρια συχνότητα ταλάντωσης που προέκυψε για το πείραμα με ονομαστικά στοιχεία 0° για την γωνία στροφής, 3 cm για το πλάτος και 0.5 Hz για την συχνότητα ταλάντωσης.

7.3.2 Διαγράμματα αναπαραγωγής κυρίου σήματος και υπολειμματικών διαφορών



Σχ. 7.6 Διάγραμμα αναπαραγωγής κυρίου σήματος και υπολειμματικών διαφορών (30°, ± 5 cm, 0.1 Hz)
Fig. 7.6 Signal reproduction and residuals chart (30°, ± 5 cm, 0.1 Hz)

Στο διάγραμμα του Σχήματος 7.6, απεικονίζεται το κυρίως σήμα (κόκκινο), όπως αυτό προκύπτει από τα αποτελέσματα της φασματικής ανάλυσης (πλάτος, συχνότητα). Στο ίδιο διάγραμμα απεικονίζεται και η χρονοσειρά των μετρήσεων (μπλε) όπως αυτές κατεγράφησαν από τον γεωδαιτικό σταθμό, καθώς και οι υπολειμματικές διαφορές (γκρι) των δυο παραπάνω συναρτήσεων. Η παρουσίαση των τριών στοιχείων (κυρίως σήμα, μετρήσεις, υπολειμματικές διαφορές), γίνεται ομοαξονικά και στην ίδια κλίμακα, ώστε να είναι εφικτή η μεταξύ τους σύγκριση.

7.4 Παραμετρικά Διαγράμματα

Τα παραμετρικά διαγράμματα είναι τα σημαντικότερα διαγράμματα, καθώς περιέχουν συγκεντρωτική πληροφορία για την εξαγωγή των τελικών συμπερασμάτων από το σύνολο των πειραμάτων. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν για όλες τις γωνίες στροφής του στόχου, ομαδοποιούνται και προκύπτει ο μέσος όρος από όλες τις γωνίες. Η ομαδοποίηση γίνεται προκειμένου να εξαχθούν τα τελικά διαγράμματα μεταβολής πλάτους και συχνότητας συναρτήσει του ονομαστικού πλάτους και συχνότητας ταλάντωσης εφόσον αυτά είναι τα κύρια στοιχεία που χαρακτηρίζουν την δυναμική παραμόρφωση ενός τεχνικού έργου.

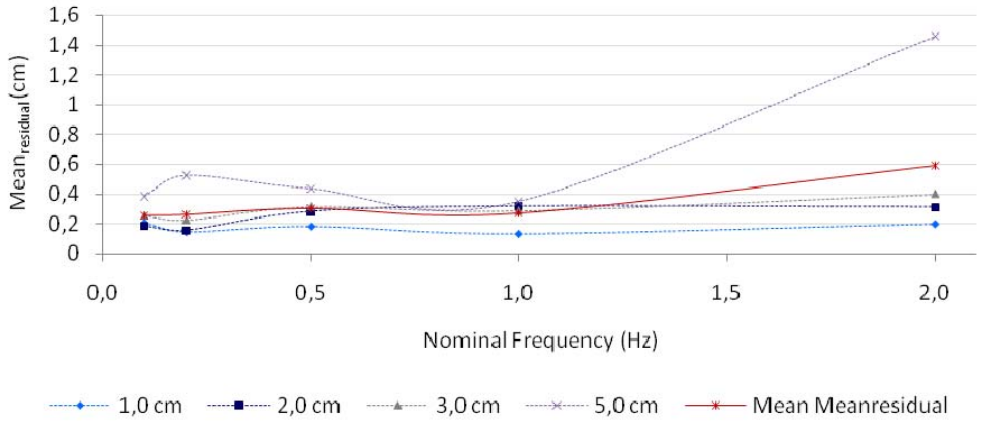
Η τελική ανάλυση χωρίζεται σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος υπολογίζεται η ακρίβεια που μπορεί να επιτύχει ο γεωδαιτικός σταθμός στην παρακολούθηση του στόχου, θεωρώντας τα πραγματικά στοιχεία της ταλάντωσης του στόχου άγνωστα. Με αυτό τον τρόπο υπολογίζεται η ακρίβεια των μετρήσεων (precision). Στο δεύτερο μέρος, γίνεται σύγκριση των πραγματικών (ονομαστικών) στοιχείων έναντι των μετρημένων μεγεθών με σκοπό τον υπολογισμό της ορθότητας (accuracy), των μετρήσεων. Τα τελικά διαγράμματα προκύπτουν από την ομαδοποίηση των αποτελεσμάτων κάθε πειράματος ανάλογα με το επιθυμητό τελικό αποτέλεσμα.

7.4.1 Παραμετρικά διαγράμματα με άγνωστα πραγματικά μεγέθη

Τα παραμετρικά διαγράμματα με άγνωστα τα πραγματικά παρατηρούμενα μεγέθη, εστιάζονται στον υπολογισμό του μέσου όρου (mean) και του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Root Mean Square-RMS) των υπολειμματικών διαφορών των μετρήσεων. Οι μαθηματικές σχέσεις υπολογισμού των δύο όρων είναι αντίστοιχα:

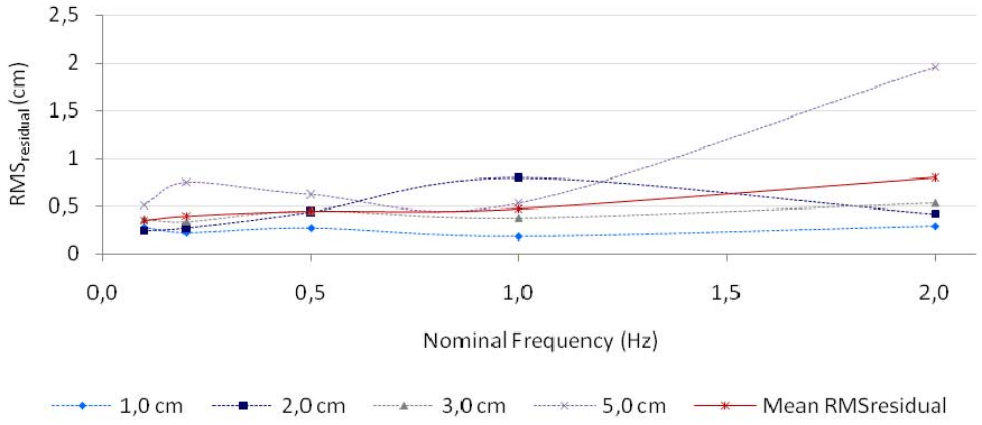
$$Mean_{residual} = \frac{\sum_{i=1}^{N} |residual_i|}{N} \tag{7.1}$$

$$RMS_{residual} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} residual_i^2}{N}} \tag{7.2}$$



Σχ. 7.7 Μέσος όρος απόλυτων τιμών υπολειμματικών διαφορών συναρτήσει συχνότητας ταλάντωσης

Fig. 7.7 Mean of the absolute values of residuals versus oscillation frequency



Σχ. 7.8 Τετραγωνικός μέσος όρος υπολειμματικών διαφορών συναρτήσει συχνότητας ταλάντωσης

Fig. 7.8 Root mean square of residuals versus oscillation frequency

Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου τα δεδομένα ακολουθούν την κανονική κατανομή και εκφράζει την τυπική απόκλιση των μετρήσεων γεγονός που προκύπτει αναλυτικά αν θέσουμε $residual_i^2 = \left(x_i - \overline{x}\right)^2$, η εξίσωση (7.2), γίνεται:

$$RMS_{residual} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(x_i - \overline{x}\right)^2}{N}} = \sigma \tag{7.3}$$

Στον Πίνακα 7.1 παρουσιάζονται οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές του $RMS_{residual}$ και $Mean_{residual}$ ανεξάρτητα από το πλάτος ταλάντωσης.

Τιμή	Ελάχιστη	Μέγιστη
$Mean_{residual}$	0.258 cm	0.592 cm
$RMS_{residual}$	0.349 cm	0.801 cm

Πίνακας 7.1 Ελάχιστες και μέγιστες τιμές των $RMS_{residual}$ και $Mean_{residual}$, για όλα τα πλάτη ταλάντωσης

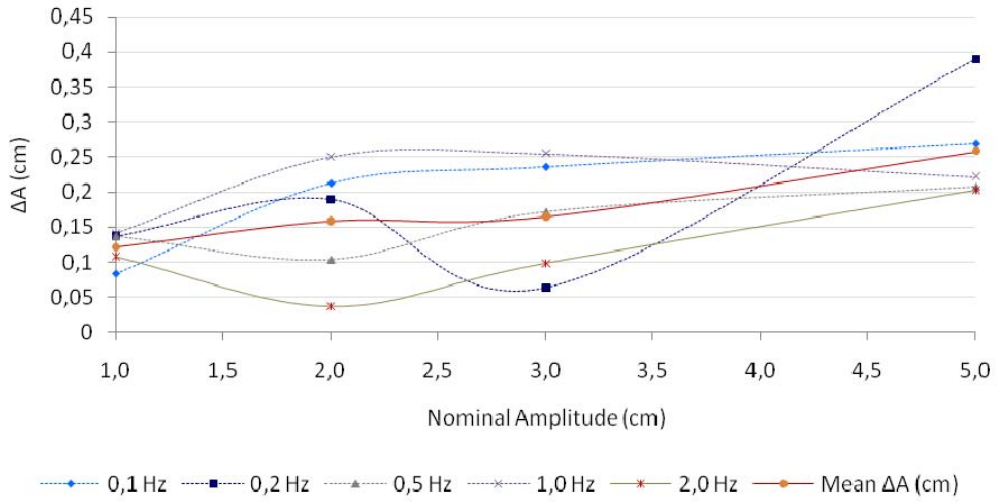
Table 7.1 Minimum and maximum $RMS_{residual}$ and $Mean_{residual}$ values for all oscillation amplitudes

7.4.2 Παραμετρικά διαγράμματα με γνωστά πραγματικά μεγέθη

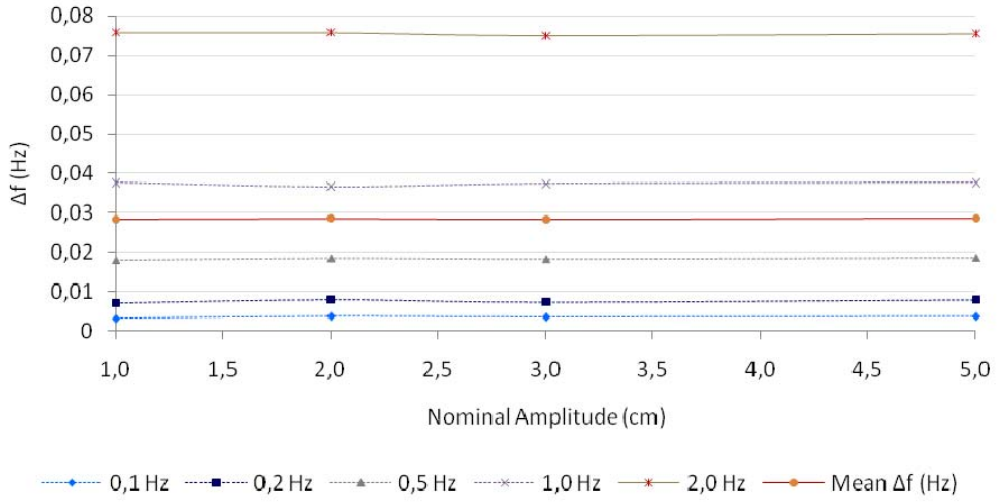
Συγκρίνοντας τις τιμές συχνότητας (f) και πλάτους ταλάντωσης (A) που προέκυψαν από την επεξεργασία των μετρήσεων, με τις πραγματικές (ονομαστικές) τιμές, προκύπτουν οι διαφορές Δf και ΔA οι οποίες εκφράζουν την ορθότητα των μετρήσεων, δηλαδή πόσο "κοντά" είναι οι υπολογισθείσες με τις πραγματικές τιμές πλάτους και συχνότητας ταλάντωσης.

7.4.2α Διαγράμματα συναρτήσει πλάτους ταλάντωσης

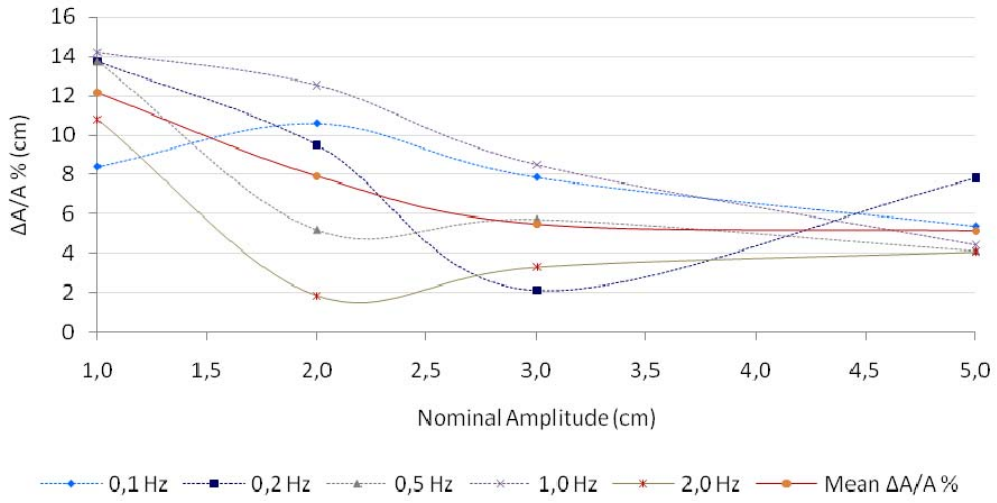
Σε αυτού του είδους τα διαγράμματα, παρουσιάζεται η μεταβολή του πλάτους και της συχνότητας ταλάντωσης έναντι του ονομαστικού πλάτους ταλάντωσης ποσοστιαία και σε απόλυτη κλίμακα, για τον μέσο όρο από όλες τις γωνίες στροφής των πειραμάτων.



Σχ. 7.9 Απόλυτη μεταβολή πλάτους (ΔA) έναντι ονομαστικού πλάτους ταλάντωσης
Fig. 7.9 Absolute amplitude variation (ΔA) vs nominal amplitude

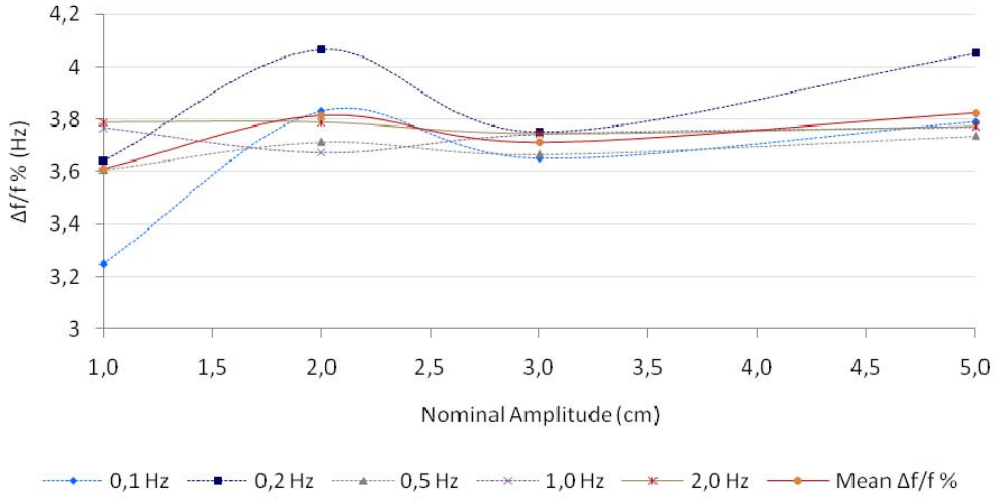


Σχ. 7.10 Απόλυτη μεταβολή συχνότητας (Δf) έναντι ονομαστικού πλάτους ταλάντωσης
Fig. 7.10 Absolute frequency variation (Δf) vs nominal amplitude



Σχ. 7.11 Ποσοστιαία μεταβολή πλάτους (ΔA/A %) έναντι ονομαστικού πλάτους ταλάντωσης
Fig. 7.11 Percentage amplitude variation (ΔA/A %) vs nominal amplitude

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα διαγράμματα αυτά είναι ότι για εύρος ταλάντωσης έως ±5 cm το μέσο ποσοστό μεταβολής του πλάτους δεν υπερβαίνει το 13% του ονομαστικού πλάτους ταλάντωσης (Σχήμα 7.10, Πίνακας 7.4), ενώ για τη μεταβολή της συχνότητας το αντίστοιχο ποσοστό δεν υπερβαίνει το 4% της ονομαστικής συχνότητας ταλάντωσης (Σχήμα 7.12, Πίνακας 7.4).



Σχ. 7.12 Ποσοστιαία μεταβολή συχνότητας (Δf/f %) έναντι ονομαστικού πλάτους ταλάντωσης
Fig. 7.12 Percentage frequency variation (Δf/f %) vs nominal amplitude

Τιμή	Ελάχιστη	Μέγιστη
ΔA	0.122 cm	0.258 cm
Δf	0.028 Hz	0.029 Hz

Πίνακας 7.2 Ελάχιστες και μέγιστες απόλυτες τιμές των ΔA και Δf για όλες τις συχνότητες ταλάντωσης

Table 7.2 Minimum and maximum ΔA and Δf absolute values for all oscillation frequencies

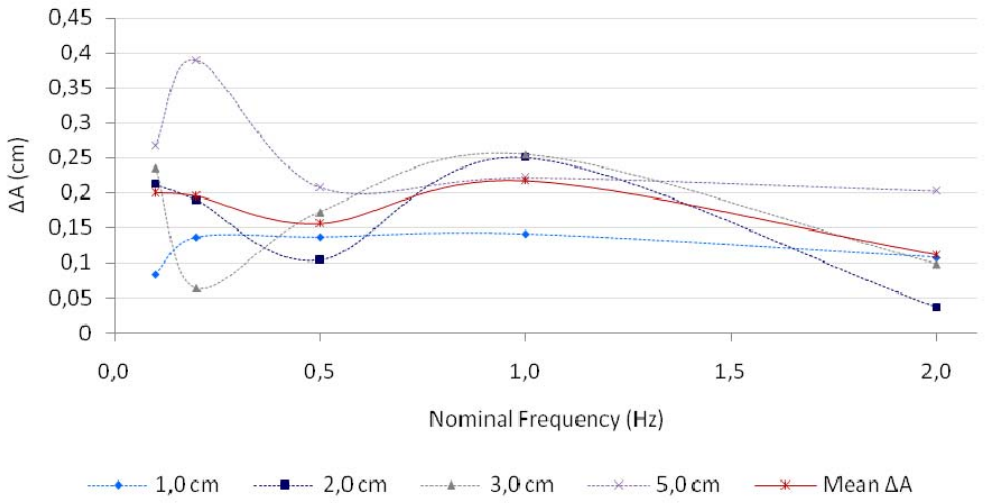
Τιμή	Ελάχιστη	Μέγιστη
ΔA/A %	5.2 %	12.2 %
Δf/f %	3.6 %	3.8 %

Πίνακας 7.3 Ελάχιστες και μέγιστες ποσοστιαίες τιμές των ΔA και Δf για όλες τις συχνότητες ταλάντωσης

Table 7.3 Minimum and maximum ΔA and Δf percentage values for all oscillation frequencies

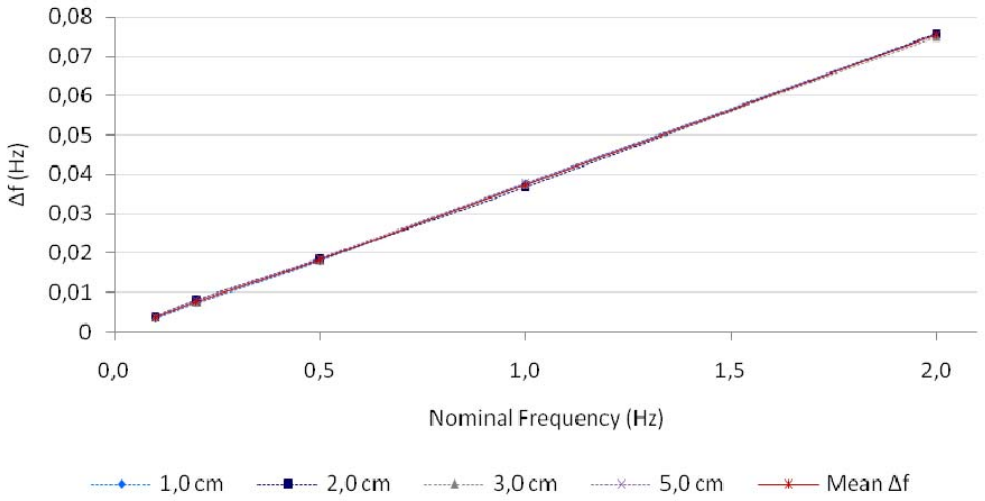
7.4.2β Διαγράμματα συναρτήσει συχνότητας ταλάντωσης

Αντίστοιχα με τα διαγράμματα της §7.4.2α, προκύπτουν και τα διαγράμματα μεταβολής πλάτους και συχνότητας ταλάντωσης, συναρτήσει της ονομαστικής συχνότητας ταλάντωσης του στόχου. Τα διαγράμματα αυτά παρέχουν ουσιαστική πληροφορία για την μελέτη της δυναμικής παραμόρφωσης μιας κατασκευής, καθώς η γνώση της συχνότητας ταλάντωσης διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην στατική ικανότητα του φορέα της κατασκευής.



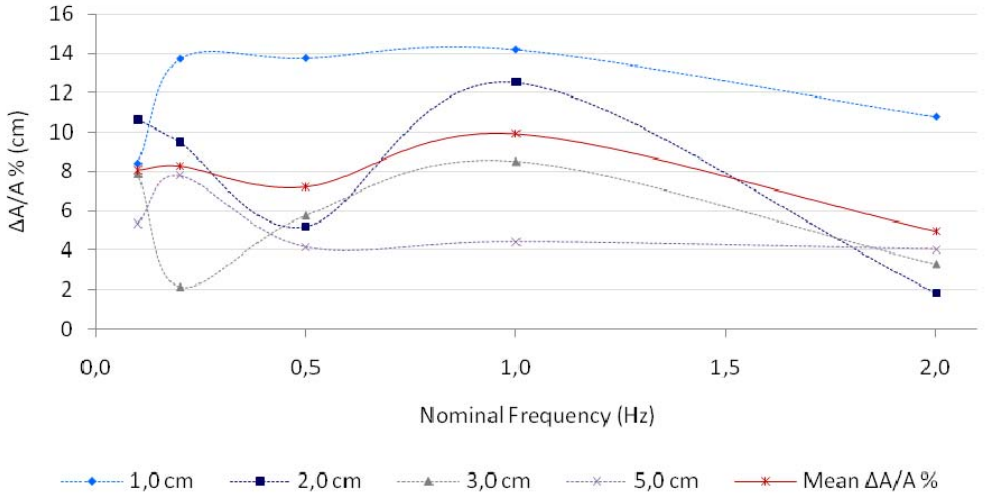
Σχ. 7.13 Απόλυτη μεταβολή πλάτους (ΔA) έναντι ονομαστικής συχνότητας ταλάντωσης

Fig. 7.13 Absolute amplitude variation (ΔA) vs nominal frequency

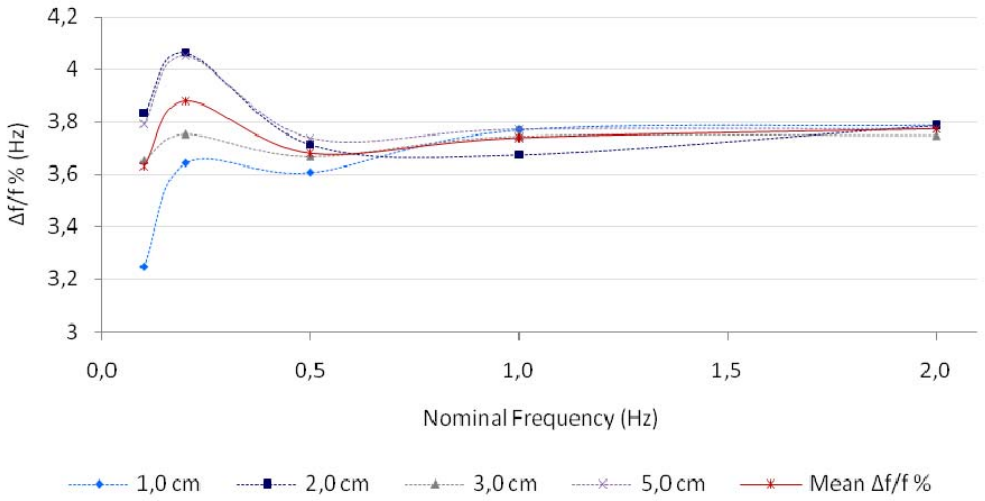


Σχ. 7.14 Απόλυτη μεταβολή συχνότητας (Δf) έναντι ονομαστικής συχνότητας ταλάντωσης
Fig. 7.14 Absolute frequency variation (Δf) vs nominal frequency

Από τα Σχήματα 7.15 και 7.16 και τον Πίνακα 7.5 προκύπτει ότι ο γεωδαιτικός σταθμός έχει τη δυνατότητα να παρακολουθήσει δυναμικά φαινόμενα με απόκλιση της τάξης του 10% του ονομαστικού πλάτους ταλάντωσης και αντίστοιχα το 4% της ονομαστικής συχνότητας ταλάντωσης ανεξάρτητα από τη γωνία στροφής του πειράματος.



Σχ. 7.15 Ποσοστιαία μεταβολή πλάτους (ΔA/A %) έναντι ονομαστικής συχνότητας ταλάντωσης
Fig. 7.15 Percentage amplitude variation (ΔA/A %) vs nominal frequency



Σχ. 7.16 Ποσοστιαία μεταβολή συχνότητας (Δf/f %) έναντι ονομαστικής συχνότητας ταλάντωσης

Fig. 7.16 Percentage frequency variation (Δf/f %) vs nominal frequency

Τιμή	Ελάχιστη	Μέγιστη
ΔA	0.111 cm	0.217 cm
Δf	0.004 Hz	0.078 Hz

Πίνακας 7.4 Ελάχιστες και μέγιστες απόλυτες τιμές των ΔA και Δf για όλα τα πλάτη ταλάντωσης

Table 7.4 Minimum and maximum ΔA and Δf absolute values for all oscillation amplitudes

Τιμή	Ελάχιστη	Μέγιστη
ΔA/A %	5.0 %	9.9 %
Δf/f %	3.6 %	3.9 %

Πίνακας 7.5 Ελάχιστες και μέγιστες ποσοστιαίες τιμές των ΔA και Δf για όλα τα πλάτη ταλάντωσης

Table 7.5 Minimum and maximum ΔA and Δf percentage values for all oscillation amplitudes

Τέλος επισημαίνεται ότι τα παραμετρικά διαγράμματα προέκυψαν έπειτα από εκκαθάριση των πειραμάτων και την αφαίρεση αυτών που περιείχαν χονδροειδή σφάλματα (outliers). Το ποσοστό των "υγειών" πειραμάτων ανέρχεται στο 97% για την συχνότητα και στο 93% για το πλάτος ταλάντωσης. Το συγκεντρωτικό ποροστό επιτυχών πειραμάτων ανεξαρτήτως πλάτους και συχνότητας ταλάντωσης ανέρχεται στο 92%. Στον Πίνακα 7.6 παρουσιάζονται οι ομάδες των πειραμάτων που περιείχαν υψηλό ποσοστό χονδροειδών σφαλμάτων.

Α/Α	Πείραμα			Δα	Δf
	°	Hz	α		
1	30°	0.5 Hz	2.0 cm	•	•
2	45°	1.0 Hz	1.0 cm		•
3	60°	0.5 Hz	5.0 cm	•	
4	60°	1.0 Hz	5.0 cm	•	
5	90°	0.2 Hz	2.0 cm	•	
6	90°	0.5 Hz	5.0 cm	•	
7	90°	1.0 Hz	2.0 cm	•	
8	90°	1.0 Hz	5.0 cm	•	•

Πίνακας 7.6 Πειράματα με υψηλό ποσοστό χονδροειδών σφαλμάτων
Table 7.6 Experiments with high outliers rate

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΟΓΔΟΟ
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

8.1 Γενικά

Το κεφάλαιο αυτό, περιλαμβάνει σύνοψη των βασικών συμπερασμάτων που προκύπτουν από την πειραματική διαδικασία και τη λειτουργία του γεωδαιτικού σταθμού σε συνθήκες "tracking". Επίσης επιχειρείται η εξαγωγή βασικών συμπερασμάτων που αφορούν στην ικανότητα του γεωδαιτικού σταθμού (ακρίβεια και αξιοπιστία) να καταγράψει την κίνηση του στόχου. Τα συμπεράσματα αυτά δίνουν αρχικές ενδείξεις για την ικανότητα του οργάνου να καταγράψει τη δυναμική συμπεριφορά τεχνικών έργων που υπόκεινται σε δυναμική παραμόρφωση. Ειδικότερα, οι παρατηρήσεις και τα συμπεράσματα που προκύπτουν αφορούν:

- μετρήσεις ακρίβειας του γεωδαιτικού σταθμού,
- μετρήσεις ορθότητας των μετρήσεων,
- συμπεράσματα ως προς την λειτουργία του γεωδαιτικού σταθμού,
- γενικές παρατηρήσεις και επισημάνσεις.

8.2 Συμπεράσματα ως προς την Ακρίβεια Καταγραφής του Αρχικού Σήματος

Από το διάγραμμα του Σχήματος 7.8, εξάγεται το συμπέρασμα ότι ανεξάρτητα από το πλάτος ταλάντωσης και τη διεύθυνση σκόπευσης, ο γεωδαιτικός σταθμός μπορεί να επιτύχει ακρίβεια της τάξης των 0.5 cm για συχνότητες έως 1 Hz και πλάτος ταλάντωσης έως 5 cm, ενώ η αντίστοιχη ακρίβεια για μεγαλύτερες συχνότητες έως και 2 Hz μειώνεται στα 0.8 cm. Οι τιμές αυτές σε αντιστοιχία με τα μεγέθη ταλάντωσης μιας υψηλής κατασκευής, η οποία ταλαντώνεται με κύριες συχνότητες μικρότερες από 1 Hz, καταδεικνύουν ικανότητα του γεωδαιτικού σταθμού στην καταγραφή αντίστοιχων ταλαντώσεων.

8.3 Συμπεράσματα ως προς την Ορθότητα Καταγραφής του Αρχικού Σήματος

Από τον Πίνακα 7.5 προκύπτει ότι ο προσδιορισμός της συχνότητας και πλάτους ταλάντωσης, δεν υπερβαίνει το 4% και 10% αντίστοιχα της ονομαστικής τιμής των δύο μεγεθών για συχνότητες ταλάντωσης έως 2 Hz. Οι τιμές αυτές για συχνότητες

ταλάντωσης έως 0.5 Hz, παράγουν μια μέγιστη απόκλιση από την πραγματική τιμή της συχνότητας ταλάντωσης, της τάξης των 0.02 Hz. Επίσης από το διάγραμμα 7.10 εξάγεται το βασικό συμπέρασμα ότι το σφάλμα προσδιορισμού της συχνότητας εξαρτάται μόνο από τη συχνότητα και όχι από το πλάτος ταλάντωσης, και συγκεκριμένα παρατηρείται γραμμική εξάρτηση μεταξύ της συχνότητας και του Δf (Σχήμα 7.14). Το γεγονός αυτό καταδεικνύει σταθερότητα στις μετρήσεις του γεωδαιτικού σταθμού και ενδεχομένως με την διεξαγωγή κατάλληλων πειραμάτων να προκύψει μοντελοποίηση του σφάλματος αυτού στο συγκεκριμένο εύρος τιμών πλάτους και συχνότητας ταλάντωσης. Ο συνδυασμός των παραπάνω καθιστά ιδανική τη χρήση του γεωδαιτικού σταθμού στην παρακολούθηση δυναμικών φαινομένων που οφείλονται σε φορτίσεις όπως η επίδραση του ανέμου. Αντίθετα, φορτίσεις που προκαλούνται από σεισμική δράση εμφανίζουν υψηλότερες συχνότητες ταλάντωσης και δεν καλύπτονται επαρκώς από το παρόν σύστημα.

8.4 Συμπεράσματα ως προς την Λειτουργία του Γεωδαιτικού Σταθμού

Τα πειράματα που περιέχουν χονδροειδή σφάλματα (Πίνακας 7.6) δίνονται στον Πίνακα 8.1. Ως πιθανή αιτία χονδροειδών σφαλμάτων αναφέρεται η χρονική διαφορά καταγραφής της τιμής της γωνίας και της αντίστοιχης τιμής του μήκους από τον γεωδαιτικό σταθμό. Όταν η γωνία που σχηματίζει ο κύριος άξονας ταλάντωσης με τον σκοπευτικό άξονα είναι 0°, τότε η τιμή της γωνίας που καταγράφεται από τον γεωδαιτικό σταθμό παραμένει θεωρητικά αμετάβλητη, με αποτέλεσμα από την ‘‘καθυστερημένη’’ καταγραφή του μήκους, να προκύπτει μια διαφορά φάσης ανάμεσα στο υπολογισμένο και το πραγματικό σήμα, η οποία μάλιστα θα είναι αντίστοιχη της χρονικής διαφοράς ανάμεσα στην καταγραφή του μήκους και της γωνίας. Ωστόσο, το γεγονός αυτό δεν επηρρεάζει τα χαρακτηριστικά του υπολογισμένου σήματος (A, f). Αντίθετα, όταν ο στόχος κινείται σε διεύθυνση κάθετη με τον άξονα σκόπευσης, τότε η επίδραση του φαινομένου στα χαρακτηριστικά του σήματος είναι η μέγιστη.

Γωνία στροφής	Ποσοστό (%)
0°	0%
30°	12.5%
45°	12.5%
60°	25%
90°	50%

Πίνακας 8.1 Ποσοστό πειραμάτων με υψηλό ποσοστό χονδροειδών σφαλμάτων
Table 8.1 Percentage of experiments with high outliers rate

Μιά δεύτερη παρατήρηση αφορά στην επίδραση του μεγέθους της απόστασης του γεωδαιτικού σταθμού από τον στόχο, ως προς το μέγεθος του εύρους ταλάντωσης. Συγκεκριμένα αναφέρεται ότι κατά την διάρκεια του πειράματος, η παρακολούθηση του στόχου έγινε μέσω αναλυτικής διαδικασίας χωρίς να απαιτείται η χρήση των σερβομηχανισμών του γεωδαιτικού σταθμού (§ 4.3.2). Το αποτέλεσμα ίσως επιδρά στη μείωση του πλήθους των χονδροειδών σφαλμάτων (outliers). Παρατηρήθηκε ωστόσο ότι για γωνίες στροφής >60° και για πλάτος ταλάντωσης ±5 cm, οι σερβομηχανισμοί του οργάνου ενεργοποιήθηκαν. Λαμβάνοντας υπόψην την απόσταση του γεωδαιτικού σταθμού από τον στόχο, την γωνία στροφής και το πλάτος ταλάντωσης εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι σερβομηχανοσμοί ενεργοποιούνται για πεδίο παρατήρησης μεγαλύτερο από 1'. Η ενεργοποίηση των σερβομηχανισμών πιθανόν να συνδέεται με τα πειράματα που περιείχαν χονδροειδή σφάλματα. Το γεγονός αυτό είναι σημαντικό γιατί η απόσταση τοποθέτησης του γεωδαιτικού σταθμού από την προς μελέτη κατασκευή, πρέπει να υπολογίζεται έτσι ώστε το πεδίο παρατήρησης να παραμένει κάτω από την τιμή του 1' για να αποτρέπεται η χρήση των σερβομηχανισμών και ενδεχομένως η εισαγωγή χονδροειδών σφαλμάτων στις μετρήσεις. Τέλος για τον προσδιορισμό της πηγής των χονδροειδών σφαλμάτων του πειράματος απαιτείται περαιτέρω πειραματική έρευνα για να διαπιστωθεί αν οφείλονται στην ενεργοποίηση των σερβομηχανισμών του γεωδαιτικού σταθμού ή στο φαινόμενο χρονικής διαφοράς ανάμεσα στην καταγραφή του μήκους και της γωνίας (§2.3.3).

8.5 Γενικές Παρατηρήσεις - Επισημάνσεις

Τέλος, αναφέρονται γενικές παρατηρήσεις και επισημάνσεις που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία στο σύνολο της:

- η τοποθέτηση του γεωδαιτικού σταθμού και του πρίσματος είναι σκόπιμο να γίνεται σε θέση τέτοια ώστε να μην επηρρεάζεται η λειτουργία τους από την επίδραση του Ήλιου (§ 5.2.3).
- η εξασφάλιση τροφοδοσίας του γεωδαιτικού σταθμού από εξωτερική πηγή ενέργειας (μπαταρία αυτοκινήτου) απεδείχθη ότι αρκεί για μετρήσεις διάρκειας έως τουλάχιστον 12 h.
- ο εξοπλισμός που εγκαθιστάται στην προς μελέτη κατασκευή (πρίσμα) είναι αρκετά οικονομικότερος συγκριτικά με τον εξοπλισμό άλλων μεθόδων (GPS) και δεν απαιτεί την παροχή ενέργειας (παθητικός), γεγονός που καθιστά ιδανική την επιλογή του για δυσπρόσιτα σημεία κατασκευών.

8.6 Προτάσεις για Περαιτέρω Διερεύνηση

Από τα παραπάνω συμπεράσματα γεννάται η ανάγκη υλοποίησης περαιτέρω έρευνας και διεξαγωγής κατάλληλων πειραμάτων για:

- προσπάθεια μοντελοποίησης των σφαλμάτων ΔA και Δf συναρτήσει της συχνότητας και του πλάτους ταλάντωσης,
- προσπάθεια μοντελοποίησης του φαινομένου της χρονικής διαφοράς ανάμεσα στην καταγραφή των τιμών γωνίας και απόστασης, συναρτήσει: α) της γωνίας στροφής μεταξύ του σκοπευτικού άξονα και της διεύθυνσης ταλάντωσης και β) του πλάτους ταλάντωσης,
- διερεύνηση της εξάρτησης του σφάλματος από την λειτουργία των σερβομηχανισμών του γεωδαιτικού σταθμού συγκριτικά με τον αναλυτικό υπολογισμό θέσεως του στόχου μόνον μέσω της διάταξης CCD.
- διερεύνηση των δυνατοτήτων των δορυφορικών συστημάτων εντοπισμού θέσης (GNSS-GPS) σε αντίστοιχες εφαρμογές και η σύγκριση τους με κλασσικές μεθόδους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξενόγλωσση

1. Gethin Wyn Roberts - Chris Brown - Xiaolin Meng, Deflection Monitoring of the Forth Road Bridge by GPS, ION GNSS 18th International Technical Meeting of the Satellite Division, Long Beach CA, 13-16 September 2005

2. Daniel R. Palazzo - Raul M. P. Friedmann - Carlos A. Nadal - Mauro L. Santos Filho - Luis A. K. Veiga and Pedro L. Faggion, Dynamic Monitoring of Structures Using a Robotic Total Station, Shaping the Change XXIII FIG Congress Munich, Germany, October 8-13, 2006

3. Panos A. Psimoulis - Stella Pytharouli - Panayiotis Triantafyllidis and Stathis Stiros, Experimental Monitoring of Oscillations of Major Flexible Structures Using GPS and RTS, Geodesy Laboratory, Dept. of Civil Engineering, Patras University, 3rd IAG / 12th FIG Symposium, Baden, May 22-24, 2006

4. Vassilis Gikas and Stamatis Daskalakis, Full Scale Validation of Tracking Total Stations Using a Long Stroke Electrodynamic Shaker, Shaping the Change XXIII International FIG Congress, 2006 Munich, October 8-13, 2006

5. Mehmet Celebi and Ahmet Sanli, GPS in Pioneering Dynamic Monitoring of Long-Period Structures, Earthquake Spectra, Vol. 18, Number 1, February 2002

6. Dennis Garget, Testing of Robotic Total Stations For Dynamic Tracking, University of Southern Queensland, Faculty of Engineering and Surveying, October 2005

7. Iveta Čeryova - Patrik Kubanka - Dr. Alojz Kopacik and Peter Kyrinovic, Dynamic Tests of Robot Stations, FIG XXII International Congress Washington, D.C. USA, April 19-26 2002

8. D. Stathas - O. Arabatzi - S. Dogouris - G. Piniotis - D. Tsini and D. Tsinis, New Monitoring Techniques on the Determination of Structure Deformations, Laboratory of General Geodesy - School of Rural & Surveying Engineering N.T.U.A.

9. Gary R. Searer and Sigmund A. Freeman, Design Drift Requirements for Long-Period Structures, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6 2004, Paper No. 3292

10. Leica Geosystems, GPS Basics – Introduction to GPS, Version 1.0 En

11. Leica Geosystems, Leica GPS 1200 User Manual, Version 4.0 En

12. Leica Geosystems, Leica GPS 1200 Technical Data

13. Leica Geosystems, TPS 1100 Professional Series, System Field Manual, Version 2.2 En

14. Brian D. Storey, Computing Fourier Series and Power Spectrum with MATLAB

15. Nicholas Harrison, Fourier Series & Fourier Transforms, 19th October 2003

16. APS Dynamics, Inc, Electro-Seis Model 400 Shaker, Instruction Manual

Ελληνική

1. Α. Φωτίου – Χ. Πικριδάς, Το Δορυφορικό Σύστημα GPS, Θεσσαλονίκη 2004

2. Δ. Παραδείσης, Σημειώσεις Δορυφορικής Γεωδαισίας, Αθήνα, Νοέμβριος 2000

3. Σ. Δασκαλάκης, Ανάπτυξη Γεωδαιτικής Μεθοδολογίας για τον Προσδιορισμό Γεωμετρικών Χαρακτηριστικών Σιδηροδρομικής Γραμμής, ΔΜΣ Γεωπληροφορική, Αθήνα 2005

4. Μιχαήλ Φωτιάδης, Εξαγωγή Γεωμετρικών Στοιχείων Χάραξης Συγκοινωνιακών Έργων με Χρήση του Συστήματος GPS, Αθήνα, Σεπτέμβριος 2005

5. Γ. Δ. Γεωργόπουλος, Σημειώσεις Υπογείων Έργων, Δεκέμβριος 2003

6. Μιχαήλ Γ. Σακελλαρίου, Γεωτεχνική Μηχανική, Αθήνα 2008

7. Δ. Μπαλοδήμος – Δ. Σταθάς, Γεωδαιτικά Όργανα και Μέθοδοι Μέτρησης Γωνιών και Μηκών, Αθήνα 1993

8. Μ. Τσακίρη, Γεωδαισία ΙΙΙ, Σημειώσεις Μαθήματος - Δίκτυα GPS, Αθήνα 2003

9. Πέτρος Κωμοδρόμος, Ανάλυση Κατασκευών-Σύγχρονες Μέθοδοι με χρήση Η/Υ, 2006

10. Παφίλης Ευθ., Γεωγραφικό Σύστημα Εύρεσης Θέσης GPS, Κοζάνη, Σεπτέμβριος 2003

11. Α. Σκόδρας – Β. Αναστασόπουλος, Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνων και Σημάτων

12. Α. Μ. Αγατζά – Μπαλοδήμου, Θεωρία Σφαλμάτων και Συνορθώσεις Ι, Αθήνα 2004

Διαδίκτυο

1. http://en.wikipedia.org/wiki/Optical_Fiber

2. http://en.wikipedia.org/wiki/Accelerometer

3. http://www.howstuffworks.com/fiber-optic.htm

4. http://www.kowoma.de/en/gps/index.htm

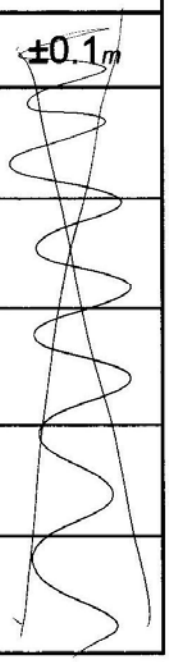
5. www.leica-geosystems.com

6. http://www.mathworks.com/support

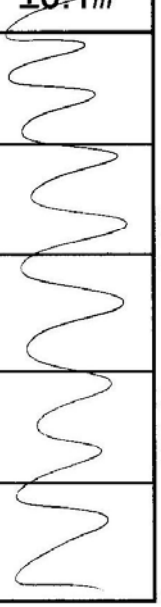
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Έντυπα Μετρήσεων

0°

f \ ±α	±0.01m	±0.02m	±0.03m	±0.05m	±0.1m
0.1Hz	97%	97.7%	85.3%	97,2%	
0.2Hz	95,3%	87.6%	83,3%	98,1%	
0.5Hz	97,4%	90.6%	90,9%	97%	
1.0Hz	95.3%	87.6%	91,3%	98,1%	
2.0Hz	95.8%	87.4%	85,8%	97,6%	

30°

f \ ±α	±0.01m	±0.02m	±0.03m	±0.05m	±0.1m
0.1Hz	88,3%	97,3%	97.9%	97,5%	
0.2Hz	91,4%	93,4%	95,0%	96,8%	
0.5Hz	96,9%	96,1%	97,7%	97.1%	
1.0Hz	96,4%	98,2%	96,1%	96.0%	
2.0Hz	93,9%	98,1%	98,4%	97,3%	

Εναρξη 16:15

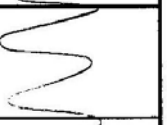
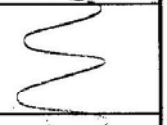
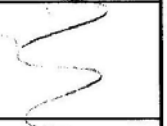
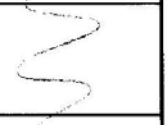
45° (Μετρήσεις και με GPS)

f \ ±α	±0.01m	±0.02m	±0.03m	±0.05m	[illegible]
0.1Hz	χωρίς χρόνο 97.7%	16:25:50 98,9% 16:27:20	16:36:40 98,4% 16:38:10	16:47:10 97,9% 16:48:40	
0.2Hz	χωρίς χρόνο 98,7%	16:28:00 97,6% 16:29:27	16:38:45 98,5% 16:40:15	16:49:15 96,9 16:50:45 ΛΙΓΟ SERVO ΕΞΩ!	
0.5Hz	16:17:52 98,7%	16:30:00 98,6% 16:31:29	16:40:50 98,7% 16:42:20	16:51:15 98,5% 16:52:45	
1.0Hz	16:20:32 98,7% 16:22:05	16:32:15 98,6% 16:33:45	16:42:55 98,7% 16:44:20	16:53:15 98,5% 16:54:45 ΛΙΓΟ SERVO ΕΞΩ!	
2.0Hz	16:23:15 98,7% 16:24:45	16:34:20 97% 16:35:45	16:45:00 98,6% 16:46:25	16:55:25 98,2% 16:57:00 ΛΙΓΟ SERVO ΕΞΩ!	

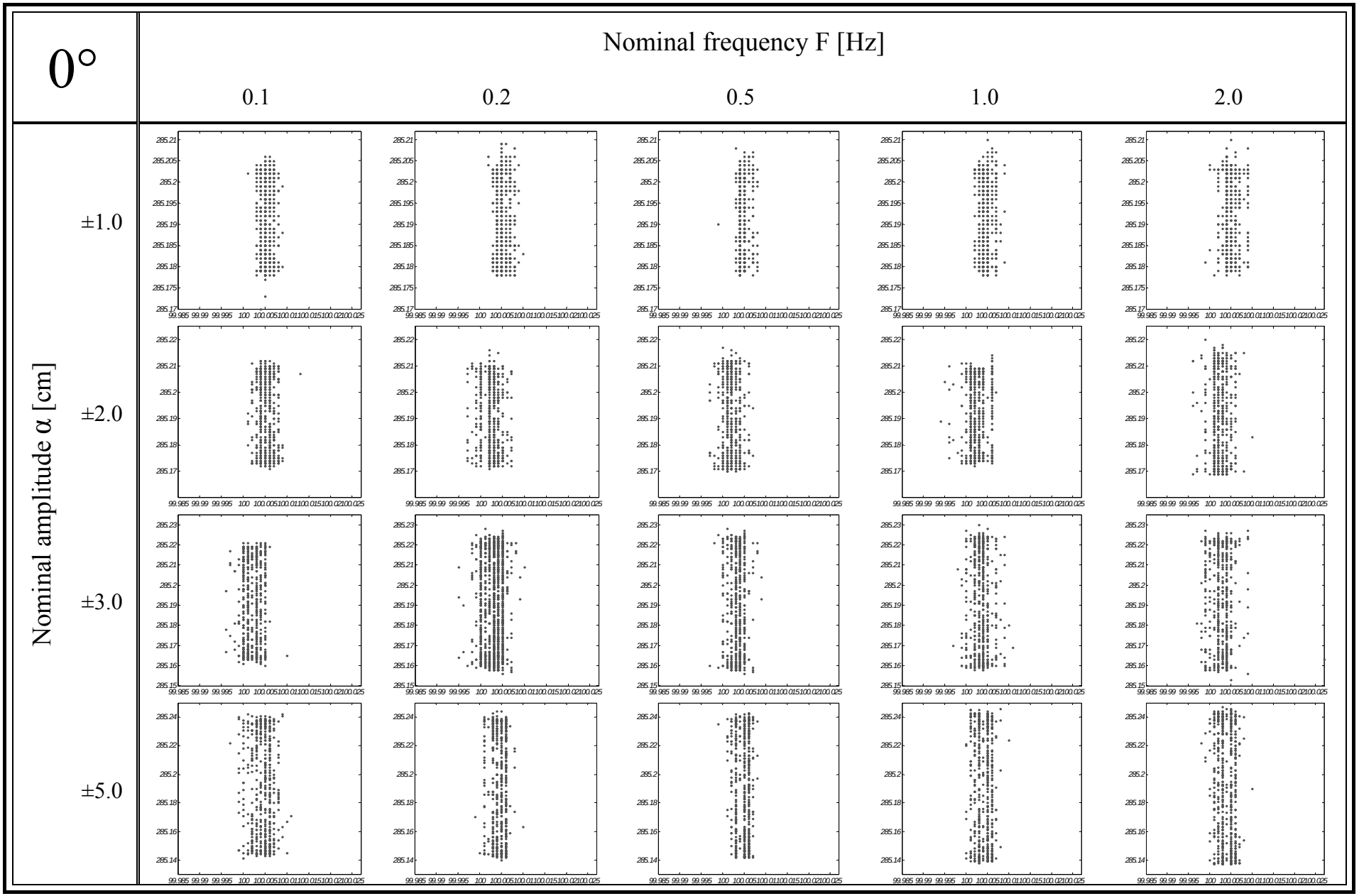
60°

Servo

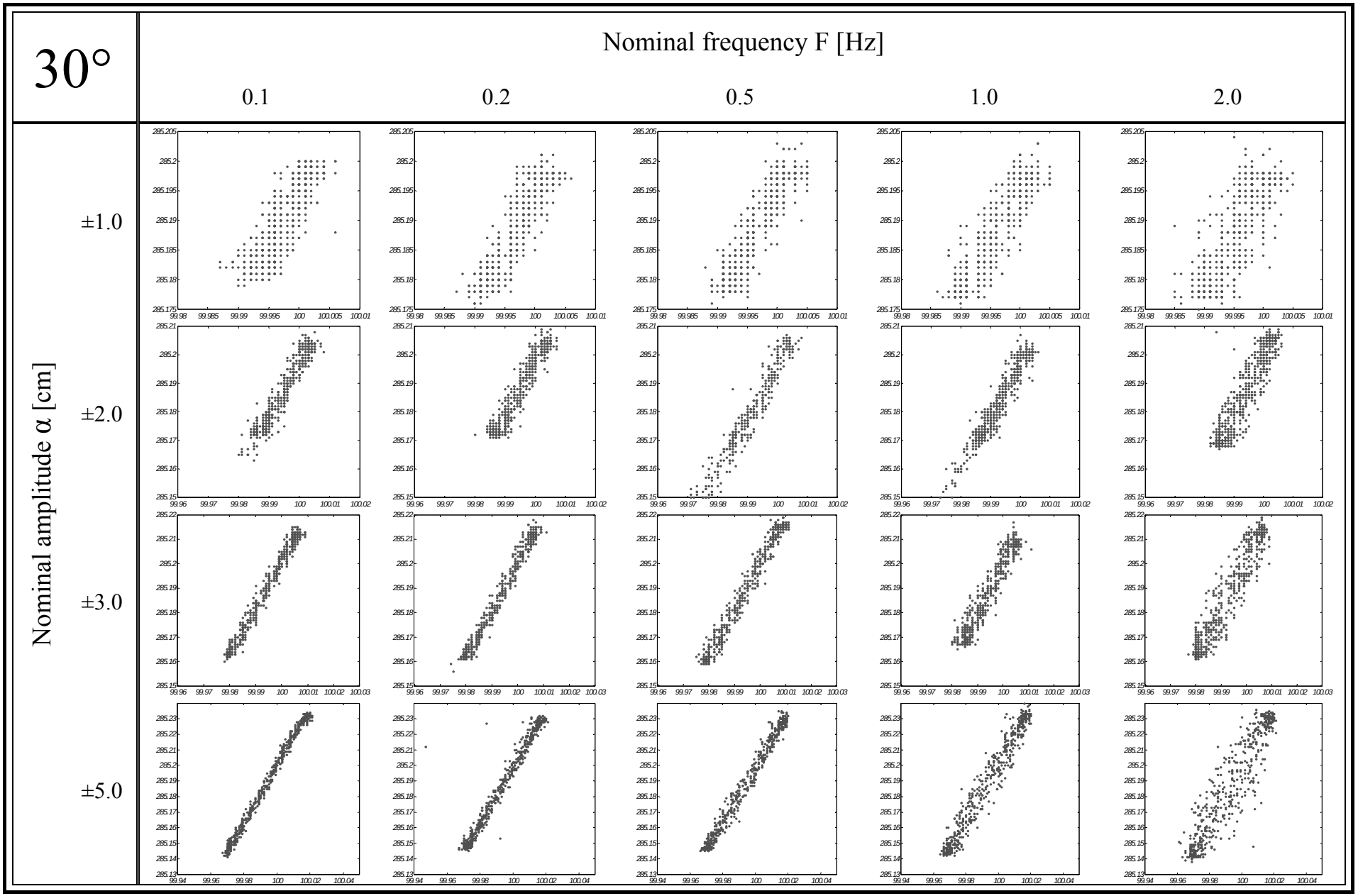
f \ ±α	±0.01m	±0.02m	±0.03m	±0.05m	±0.1m
0.1Hz	92,0%	73,5%	98,3%	89.8%	
0.2Hz	80,3%	85,5%	86,3%	Δ17% HEADER 94,7%	
0.5Hz	91,4%	91,8%	88,4%	96.1%	
1.0Hz	97,7%	97,5%	96.8%	91,6%	
2.0Hz	88,5%	97,5%	97.4% (good tuning)	86,3%	

90° → servo					
f \ $\pm\alpha$	±0.01m	±0.02m	±0.03m	±0.05m	~~±0.1~~m
0.1Hz	97,6%	90,2%	77,0%	95,7%	
0.2Hz	90,0%	88,5%	84,1%	90,2%	
0.5Hz	87,3%	~~88~~,2%	93,5%	91,2%	
1.0Hz	88,7%	81,1%	88,0%	96,8%	
2.0Hz	91,7%	~~77,7~~%	97,7%	90,1%	

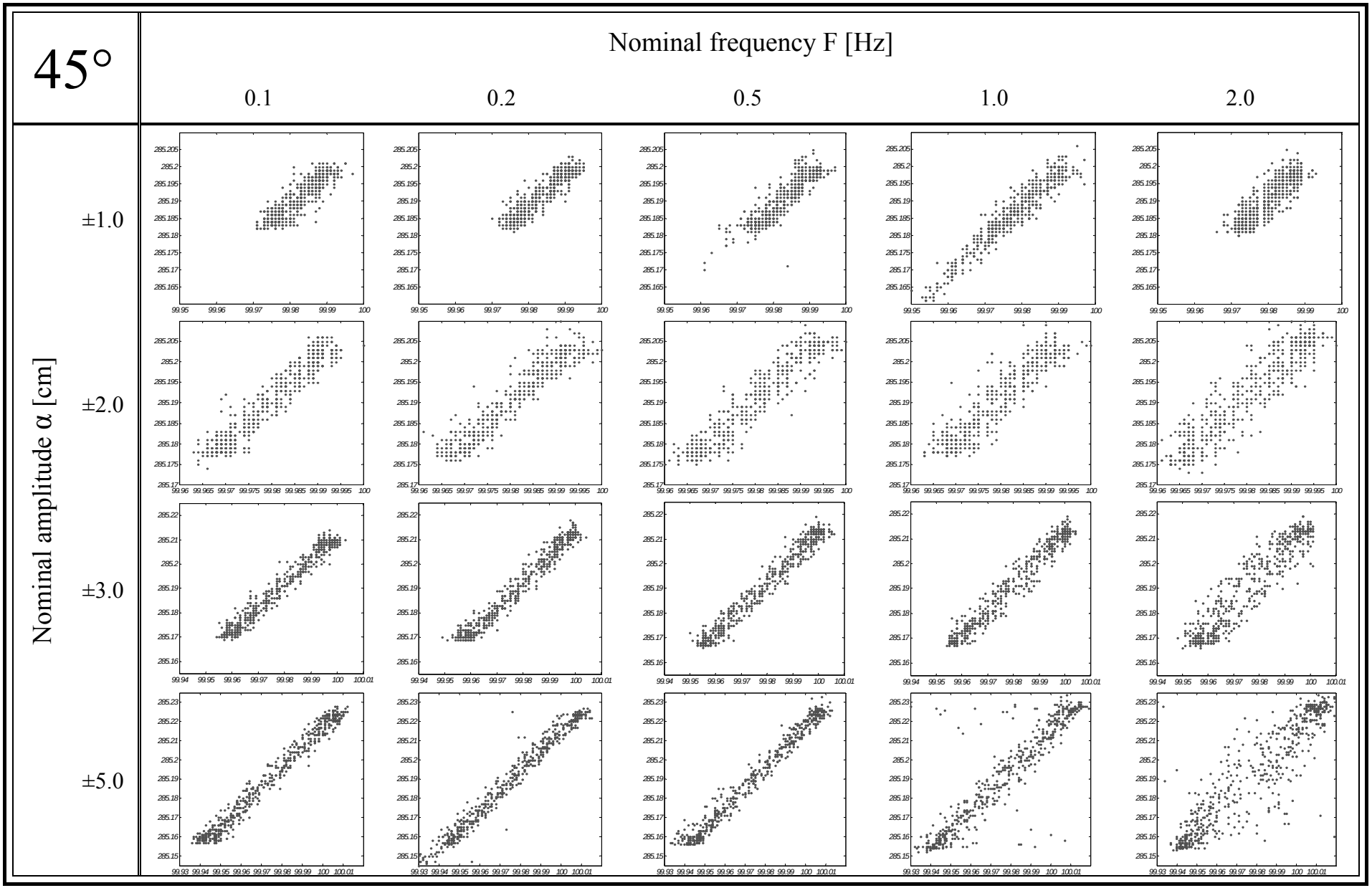
Αναλυτικά Αποτελέσματα Επεξεργασίας Μετρήσεων



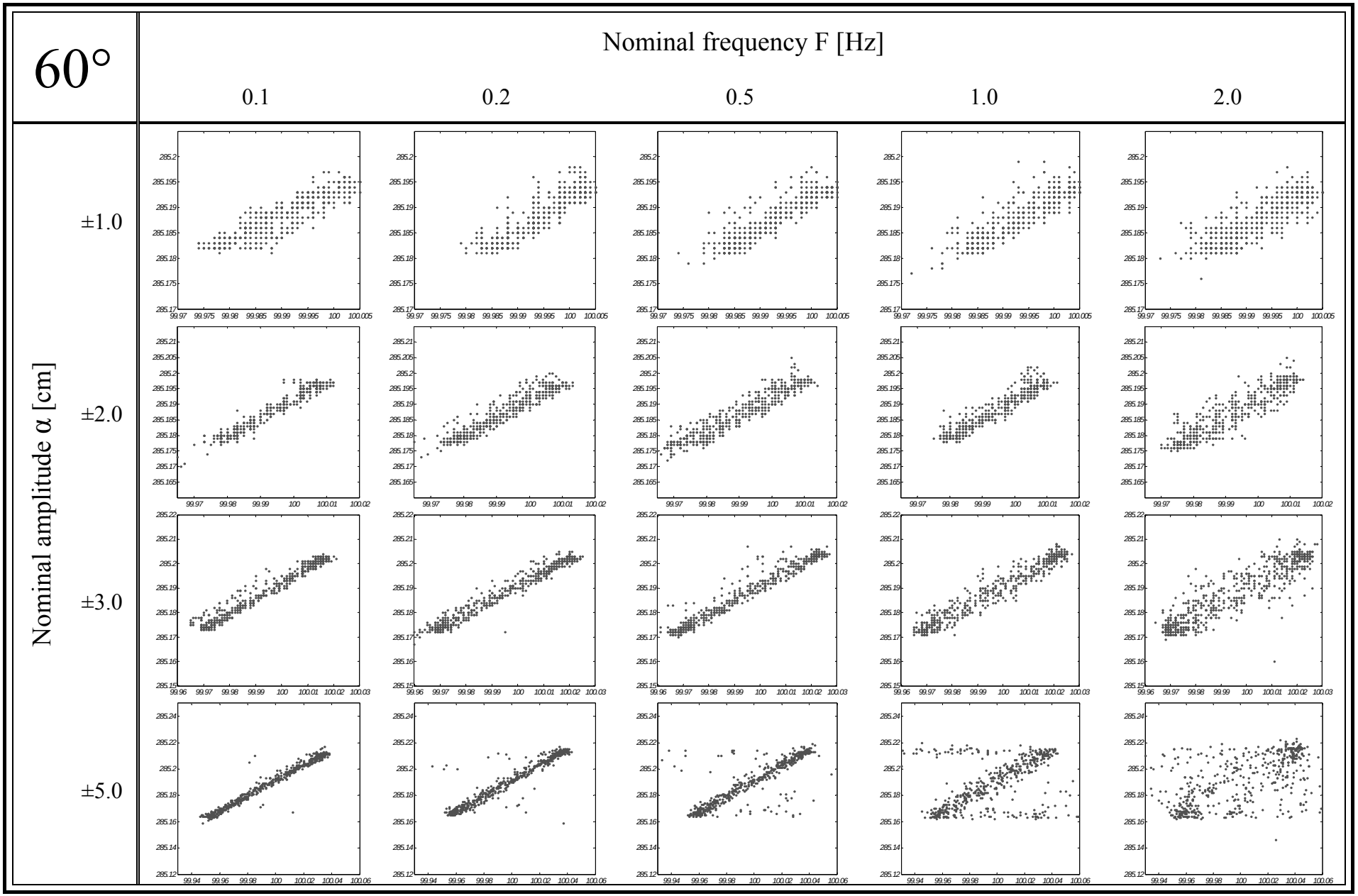
Πίνακας Π1 Διαγράμματα οριζοντιογραφίας για την γωνία των 0°
Table Π1 x-y scatter plot for 0° twist angle



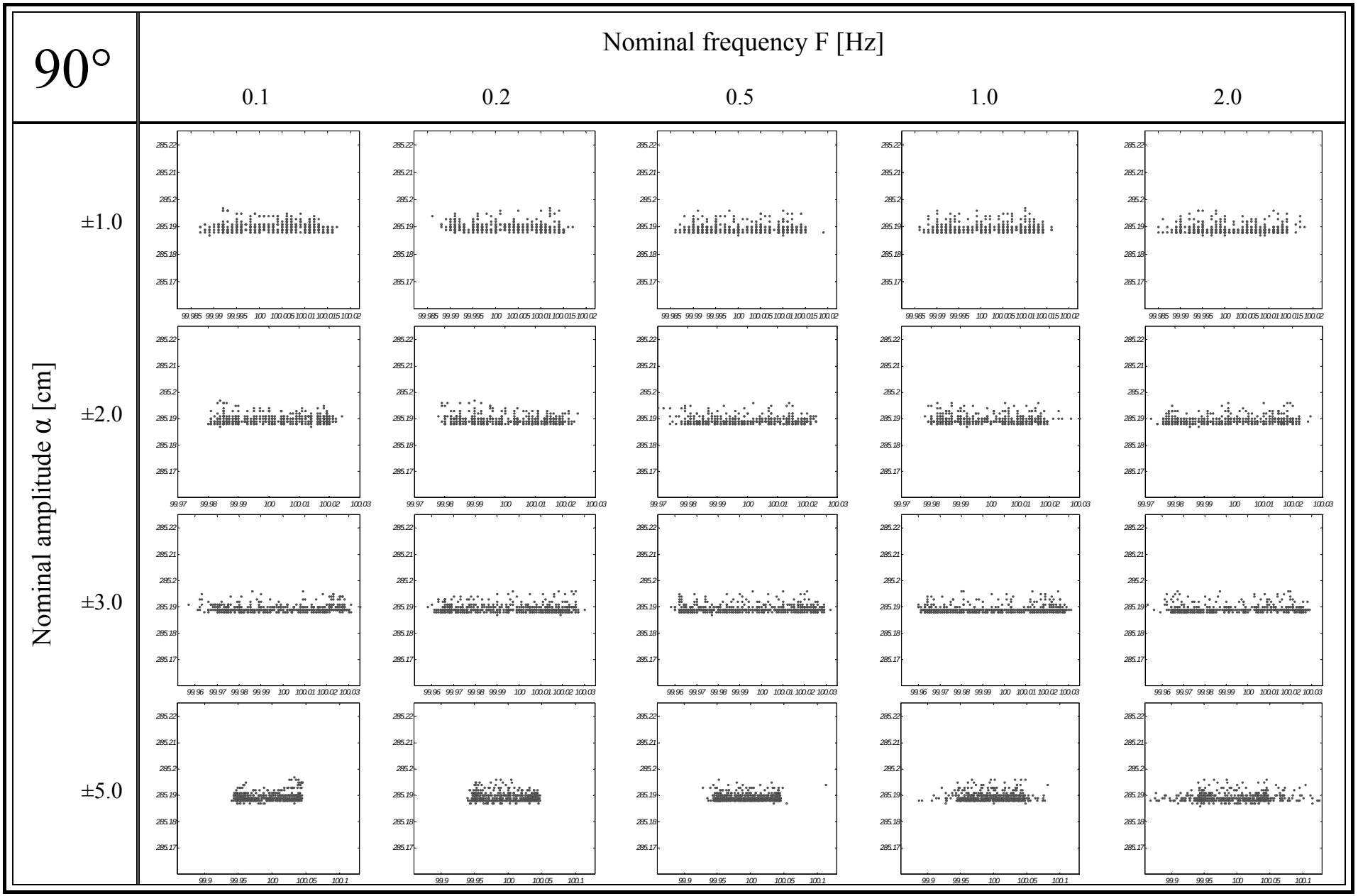
Πίνακας Π2 Διαγράμματα οριζοντιογραφίας για την γωνία των 30°
Table Π2 x-y scatter plot for 30° twist angle



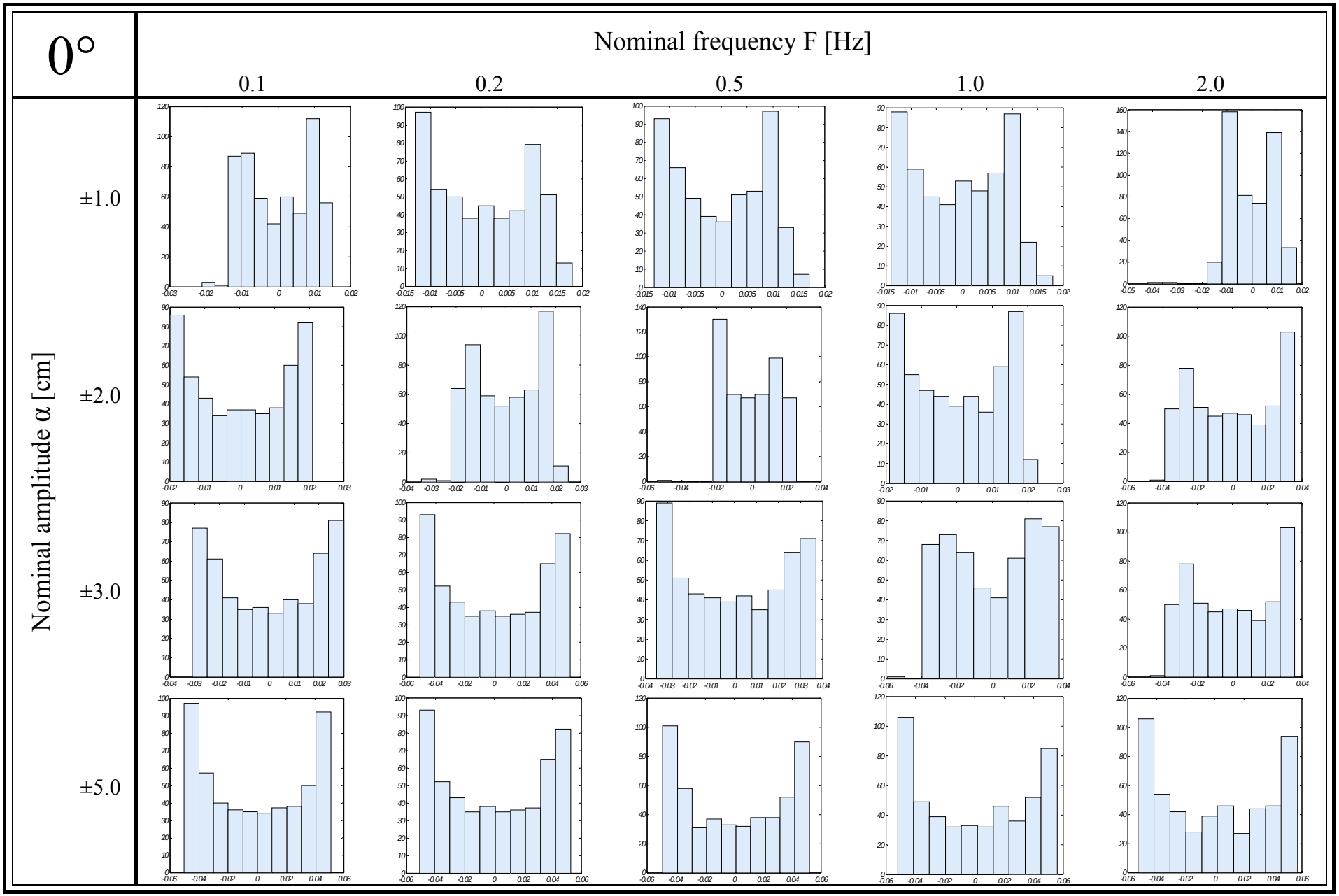
Πίνακας Π3 Διαγράμματα οριζοντιογραφίας για την γωνία των 45°
Table Π3 x-y scatter plot for 45° twist angle



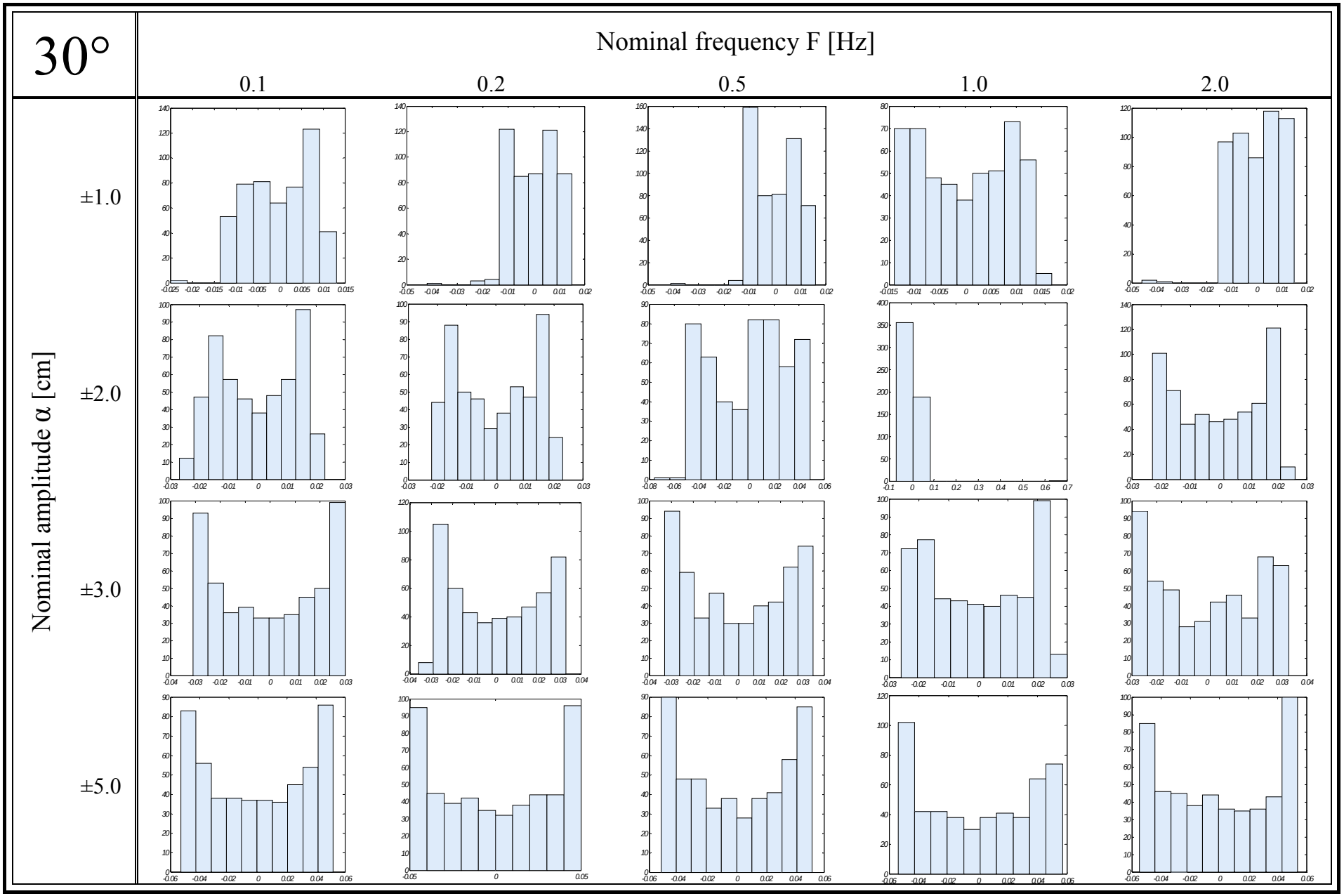
Πίνακας Π4 Διαγράμματα οριζοντιογραφίας για την γωνία των 60°
Table Π4 x-y scatter plot for 60° twist angle



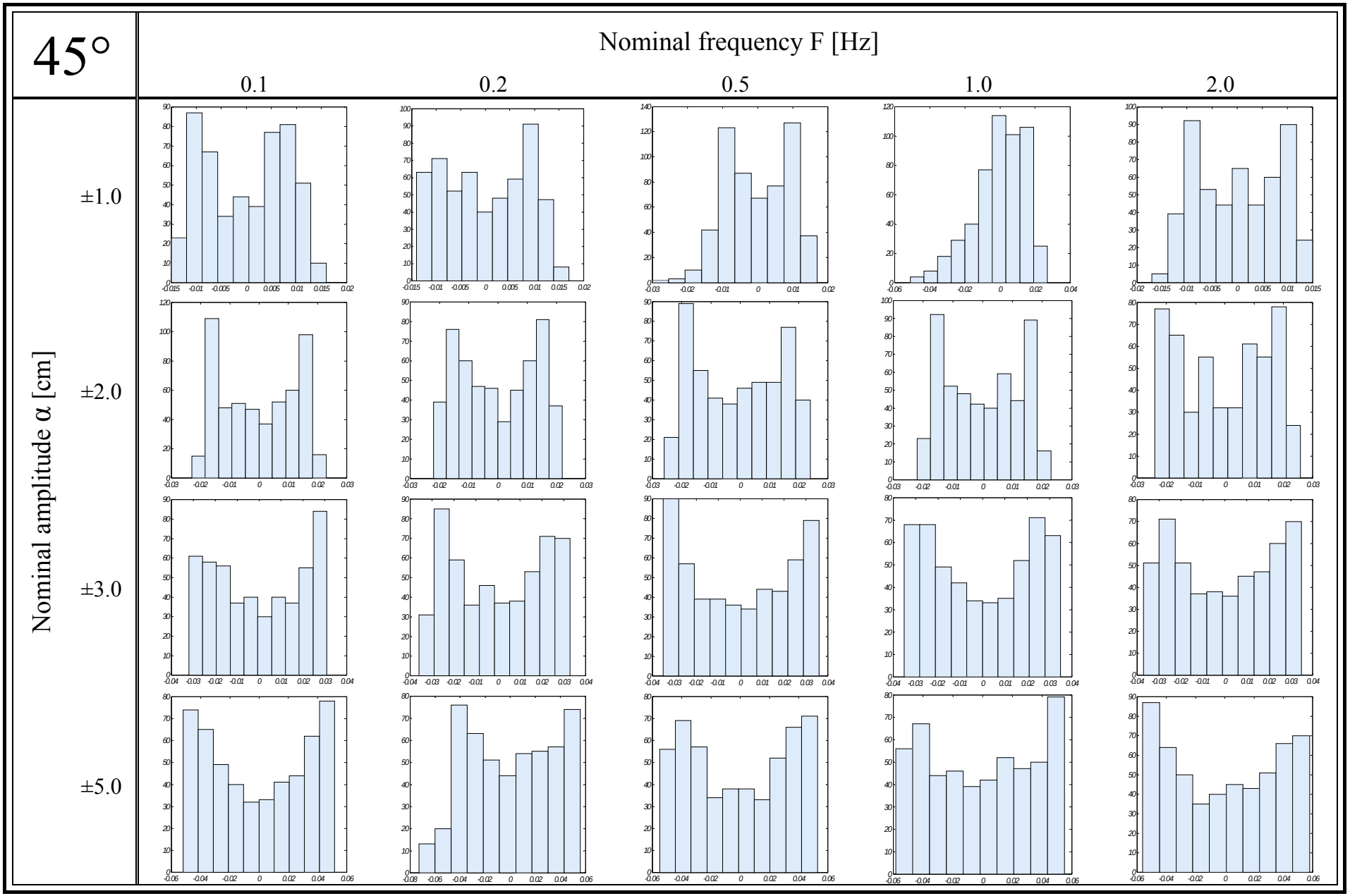
Πίνακας Π5 Διαγράμματα οριζοντιογραφίας για την γωνία των 90°
Table Π5 x-y scatter plot for 90° twist angle



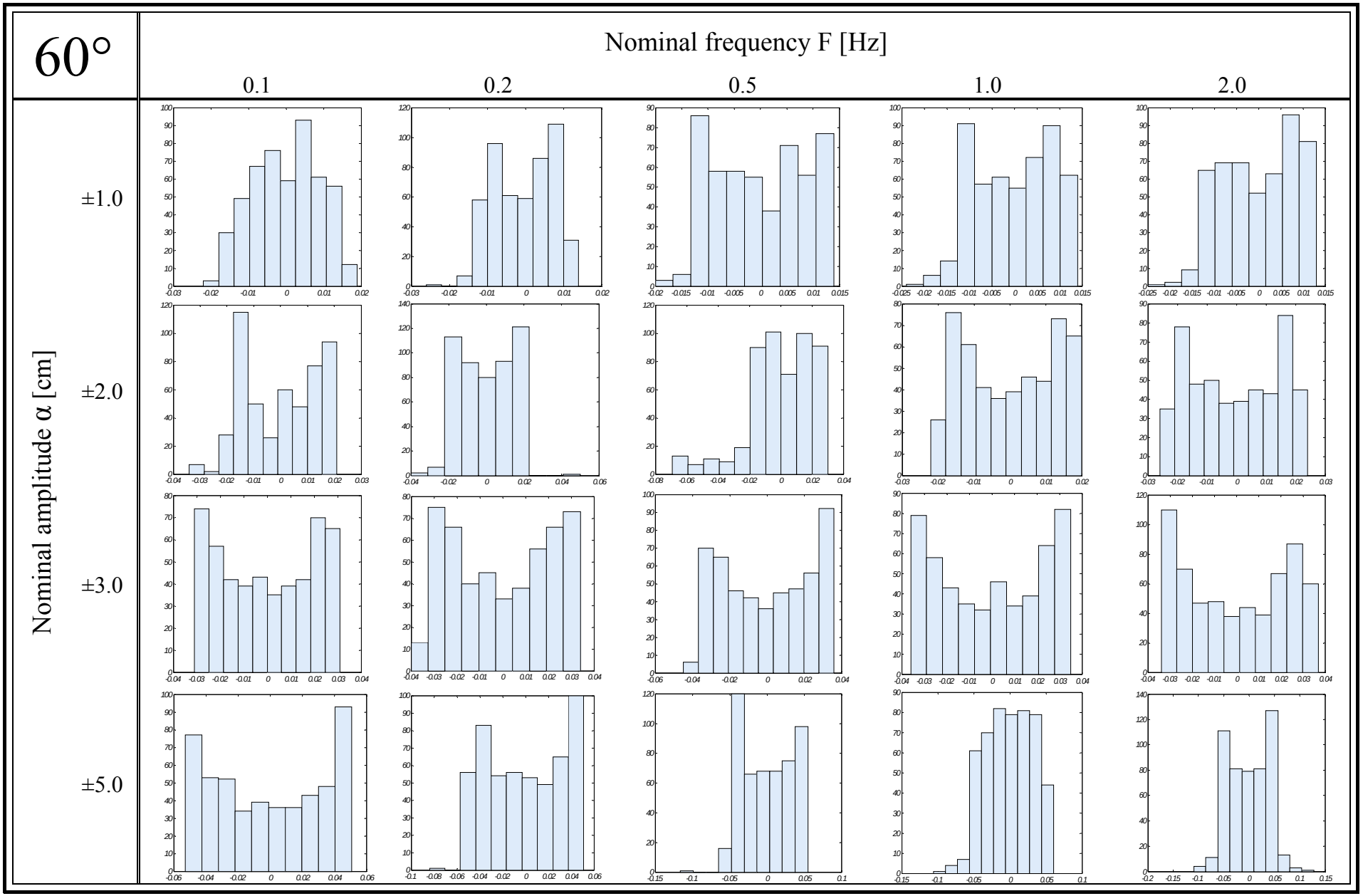
Πίνακας Π6 Ιστογράμματα συχνότητας εμφάνισης για την γωνία των 0°
Table Π6 Frequency histograms for 0° twist angle



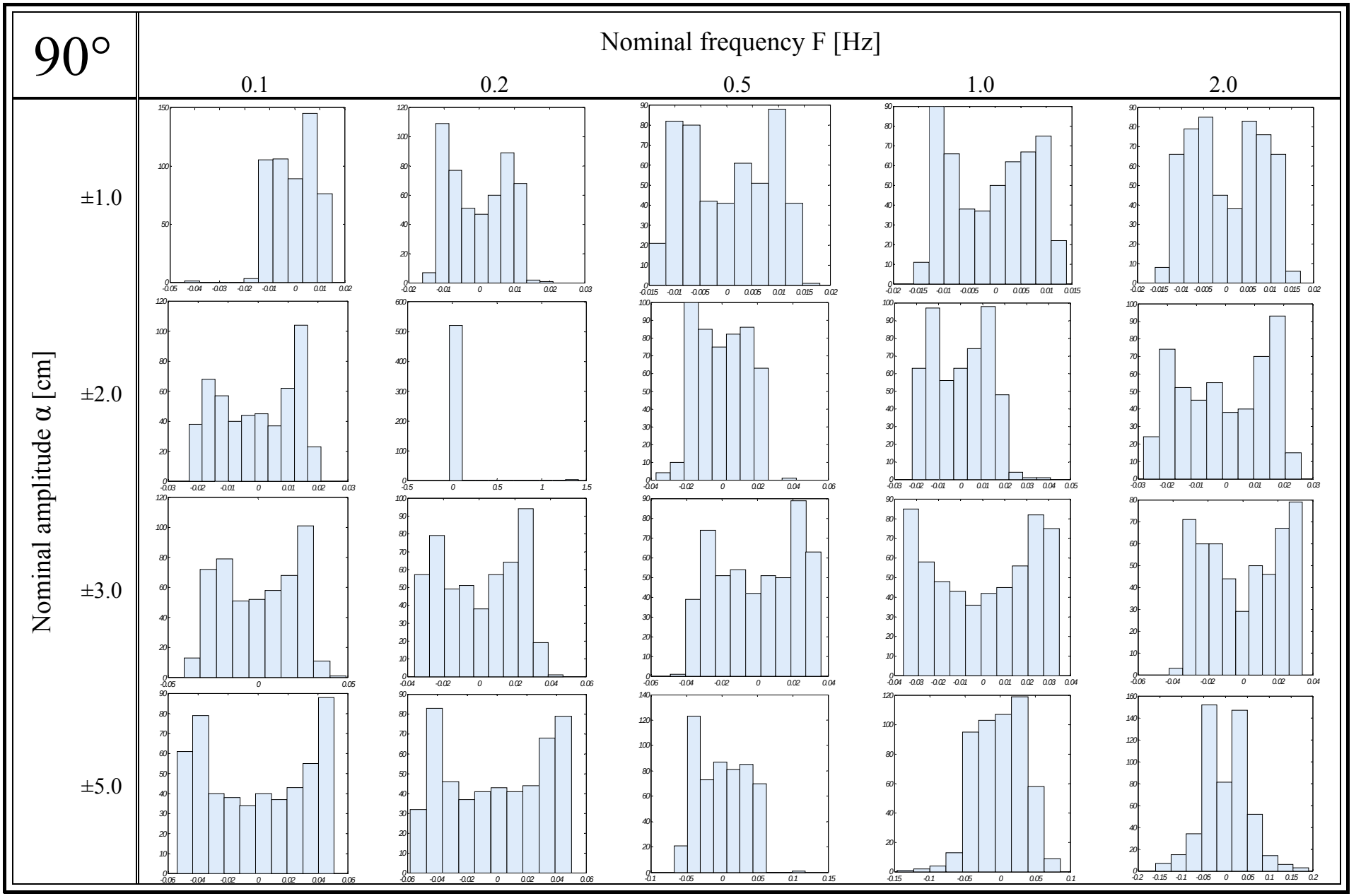
Πίνακας Π7 Ιστογράμματα συχνότητας εμφάνισης για την γωνία των 30°
Table Π7 Frequency histograms for 30° twist angle



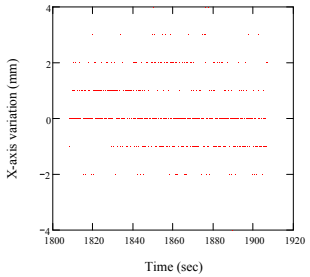
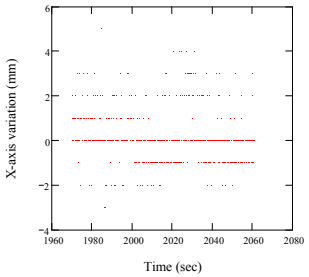
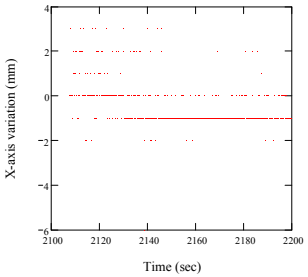
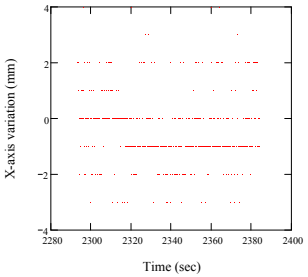
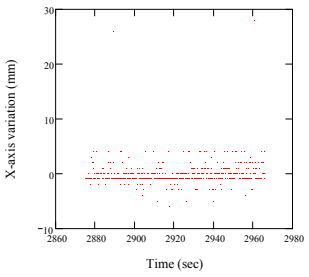
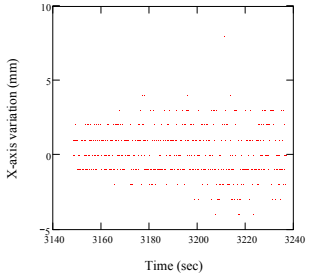
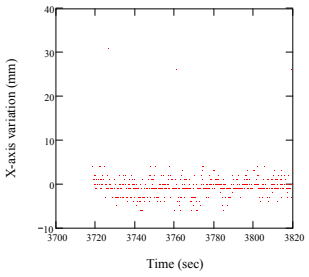
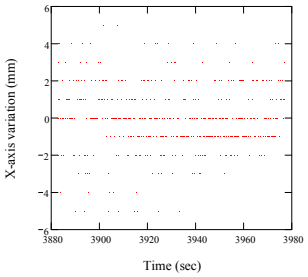
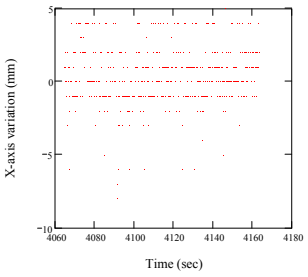
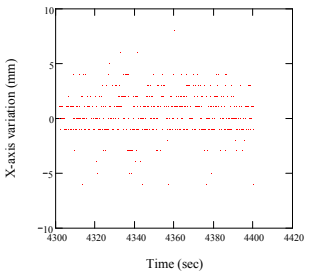
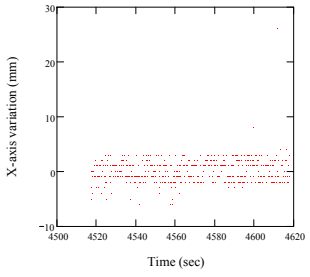
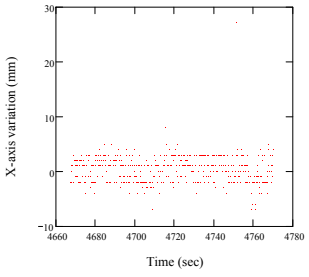
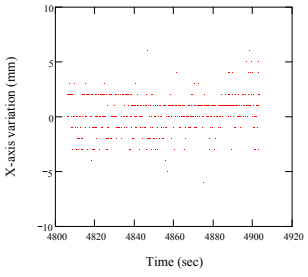
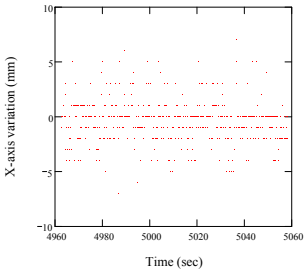
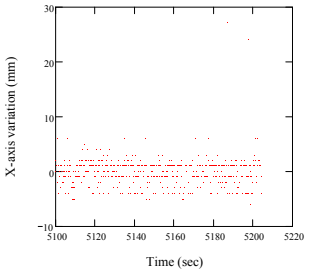
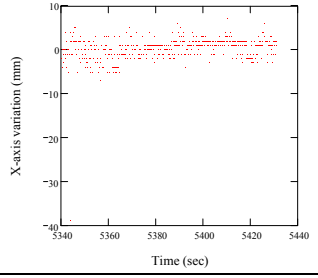
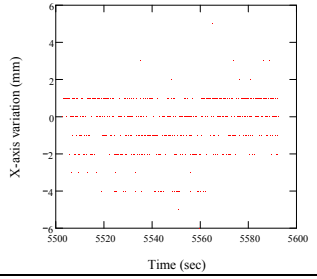
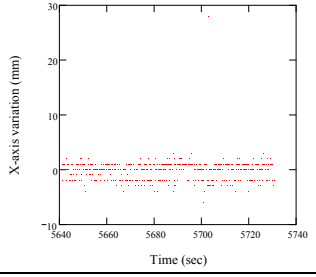
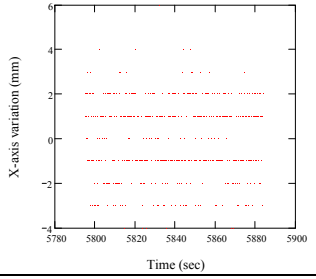
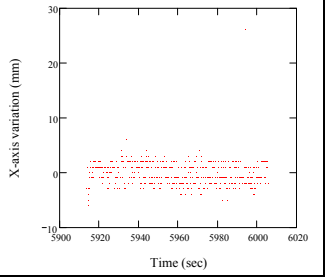
Πίνακας Π8 Ιστογράμματα συχνότητας εμφάνισης για την γωνία των 45°
Table Π8 Frequency histograms for 45° twist angle



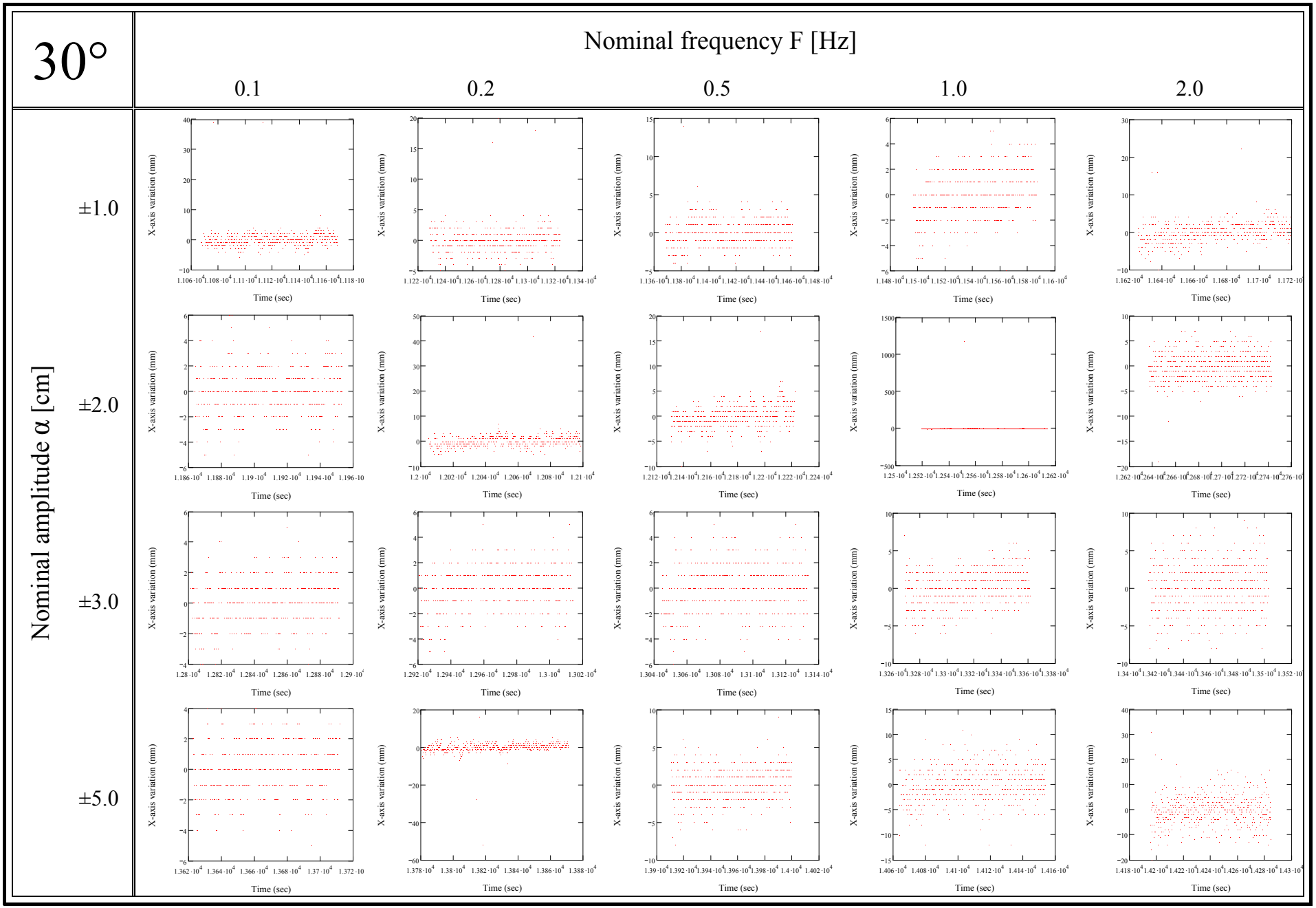
Πίνακας Π9 Ιστογράμματα συχνότητας εμφάνισης για την γωνία των 60°
Table Π9 Frequency histograms for 60° twist angle



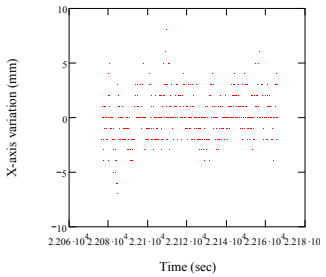
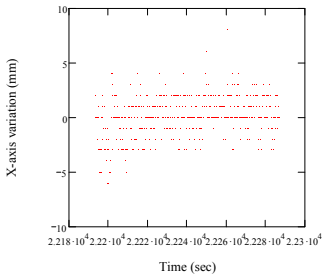
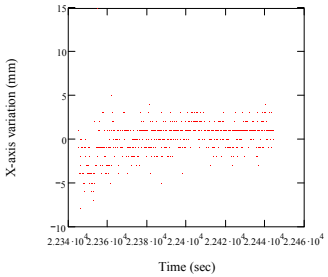
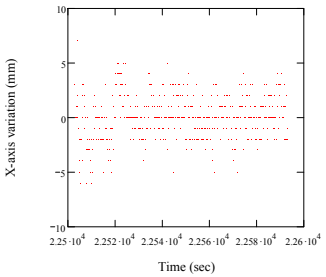
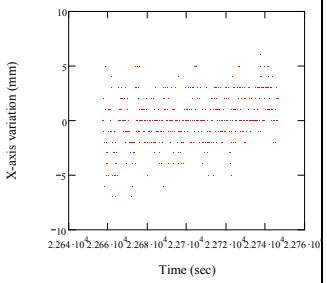
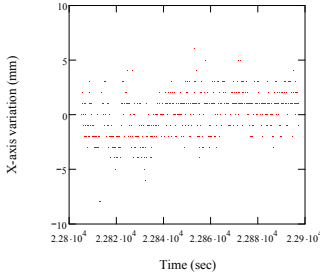
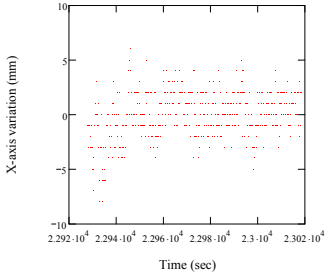
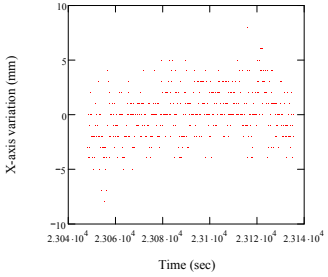
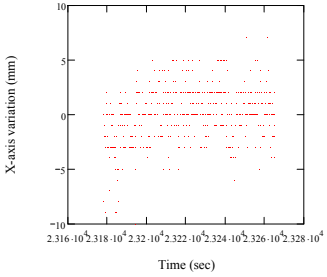
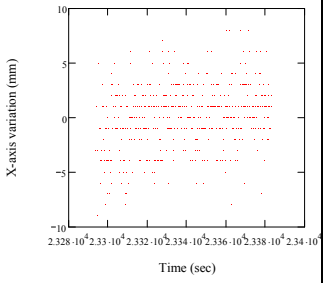
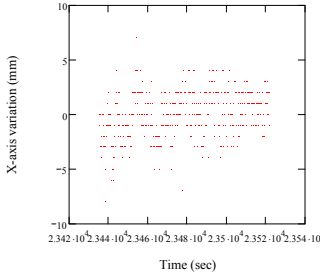
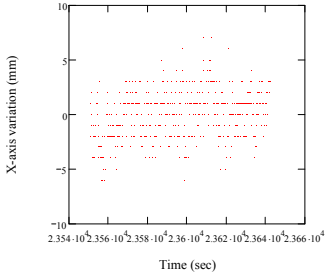
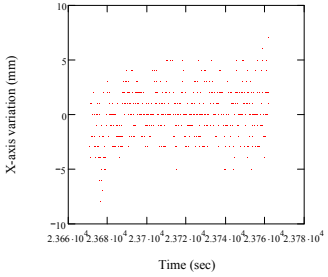
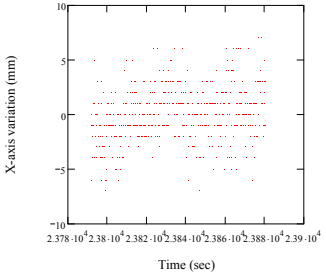
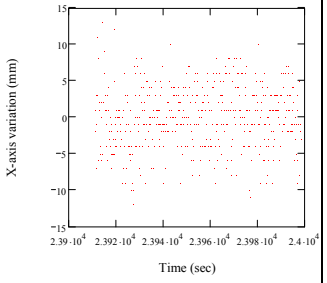
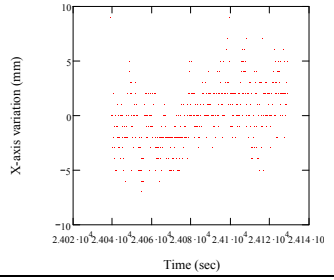
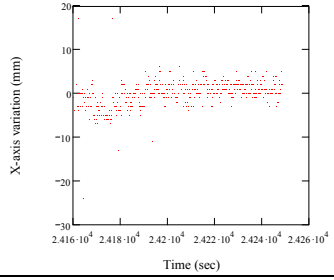
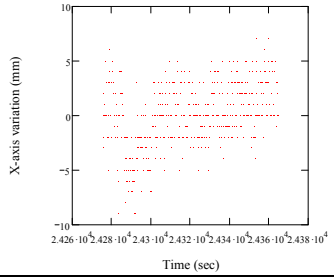
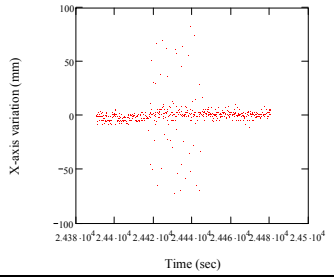
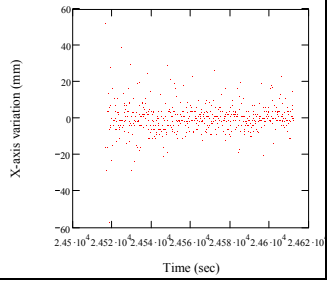
Πίνακας Π10 Ιστογράμματα συχνότητας εμφάνισης για την γωνία των 90°
Table Π10 Frequency histograms for 90° twist angle

0°	Nominal frequency F [Hz]				
	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0
Nominal amplitude α [cm] ±1.0					
±2.0					
±3.0					
±5.0					

Πίνακας Π11 Διαγράμματα εκκεντρότητας από τον y-άξονα για την γωνία των 0°
Table Π11 y-axis eccentricity charts for 0° twist angle

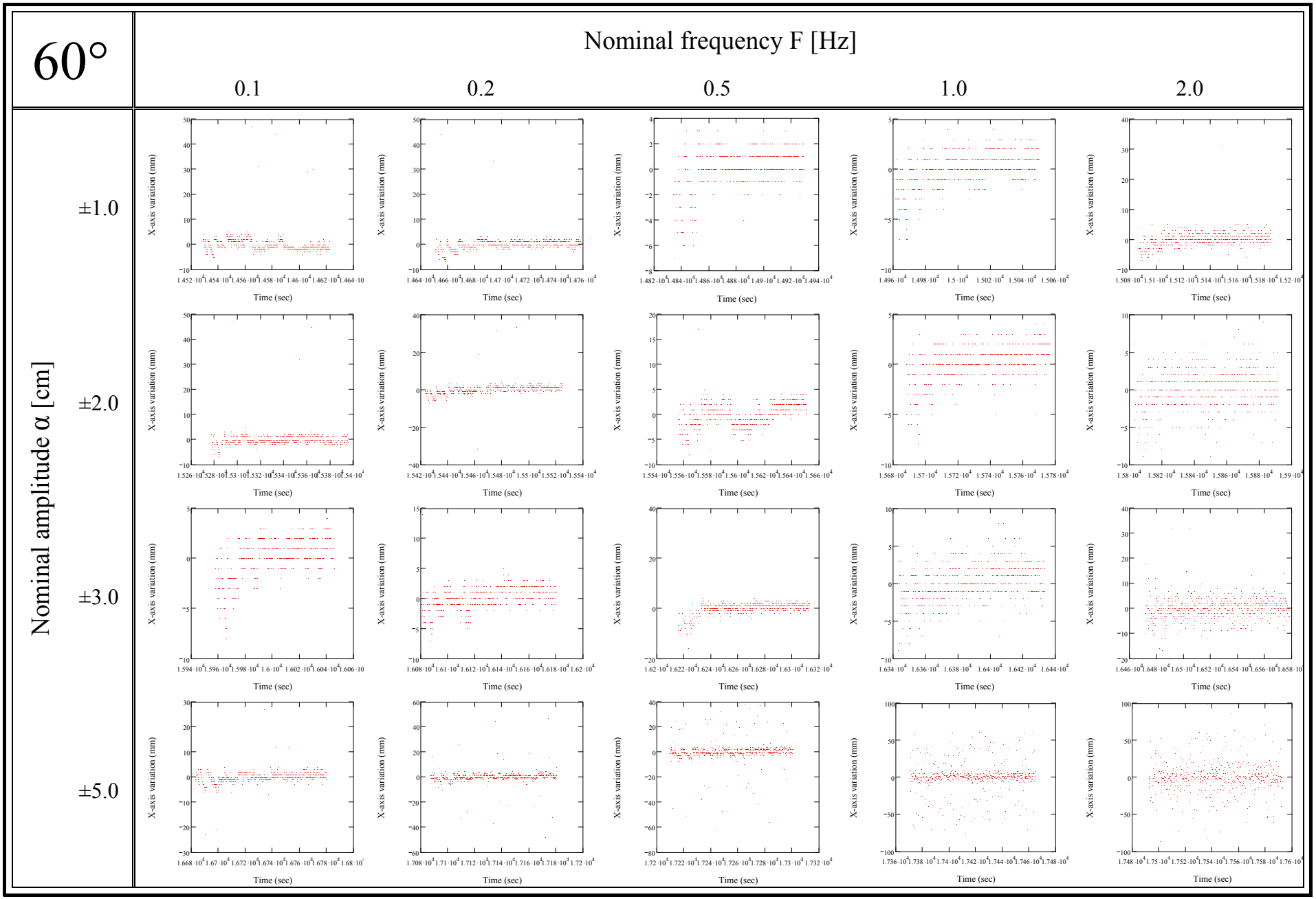


Πίνακας Π12 Διαγράμματα εκκεντρότητας από τον y-άξονα για την γωνία των 30°
Table Π12 y-axis eccentricity charts for 30° twist angle

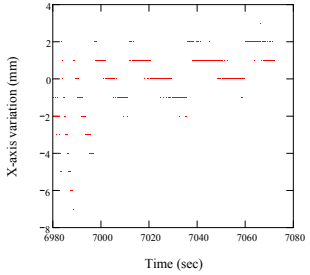
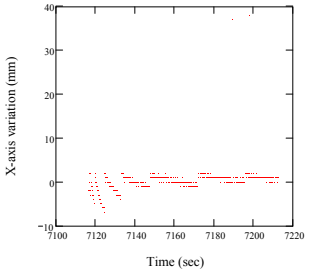
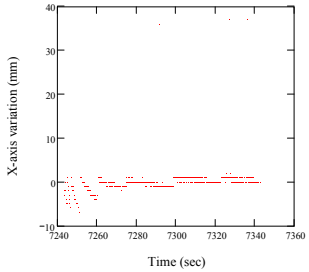
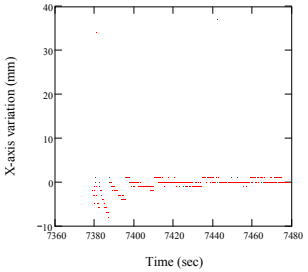
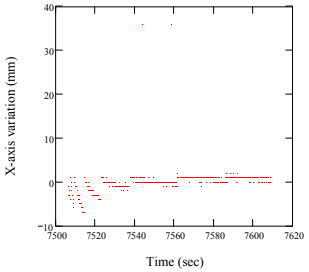
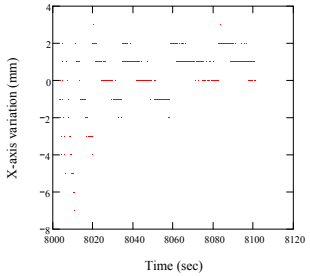
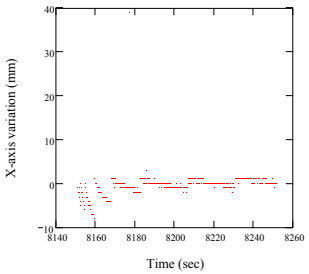
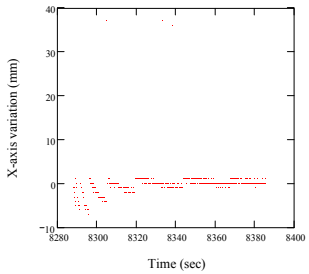
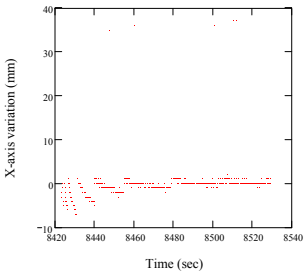
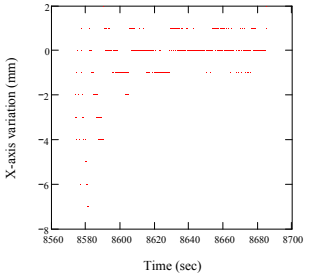
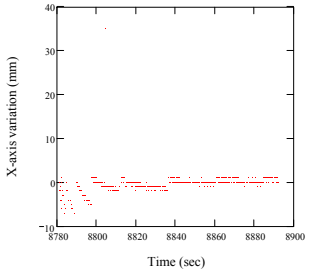
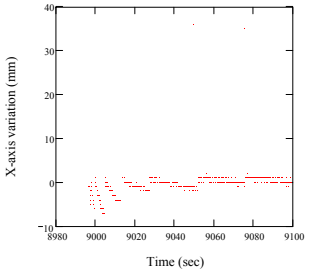
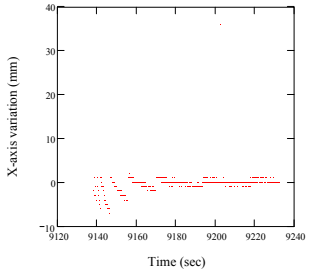
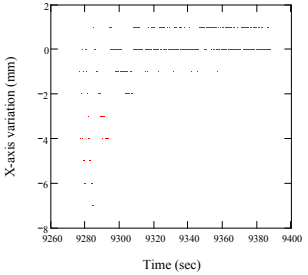
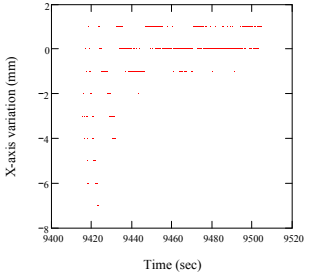
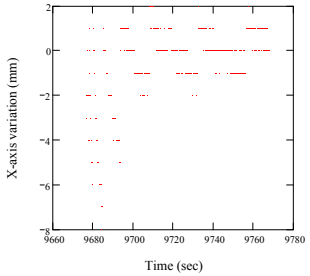
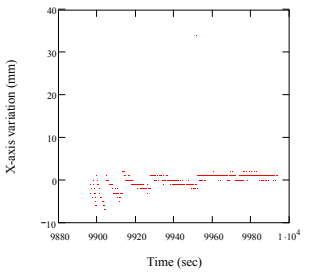
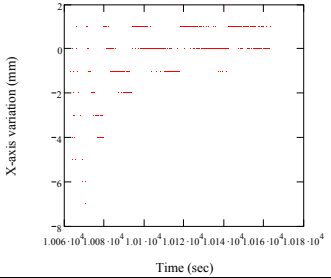
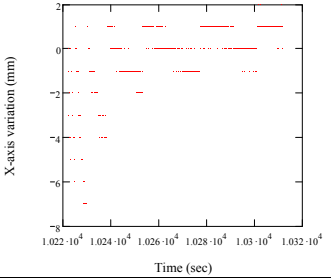
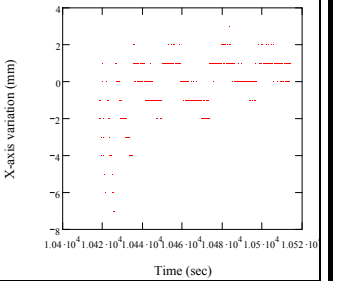
45°	Nominal frequency F [Hz]				
Nominal amplitude α [cm]	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0
±1.0					
±2.0					
±3.0					
±5.0					

Πίνακας Π13 Διαγράμματα εκκεντρότητας από τον y-άξονα για την γωνία των 45°

Table Π13 y-axis eccentricity charts for 45° twist angle

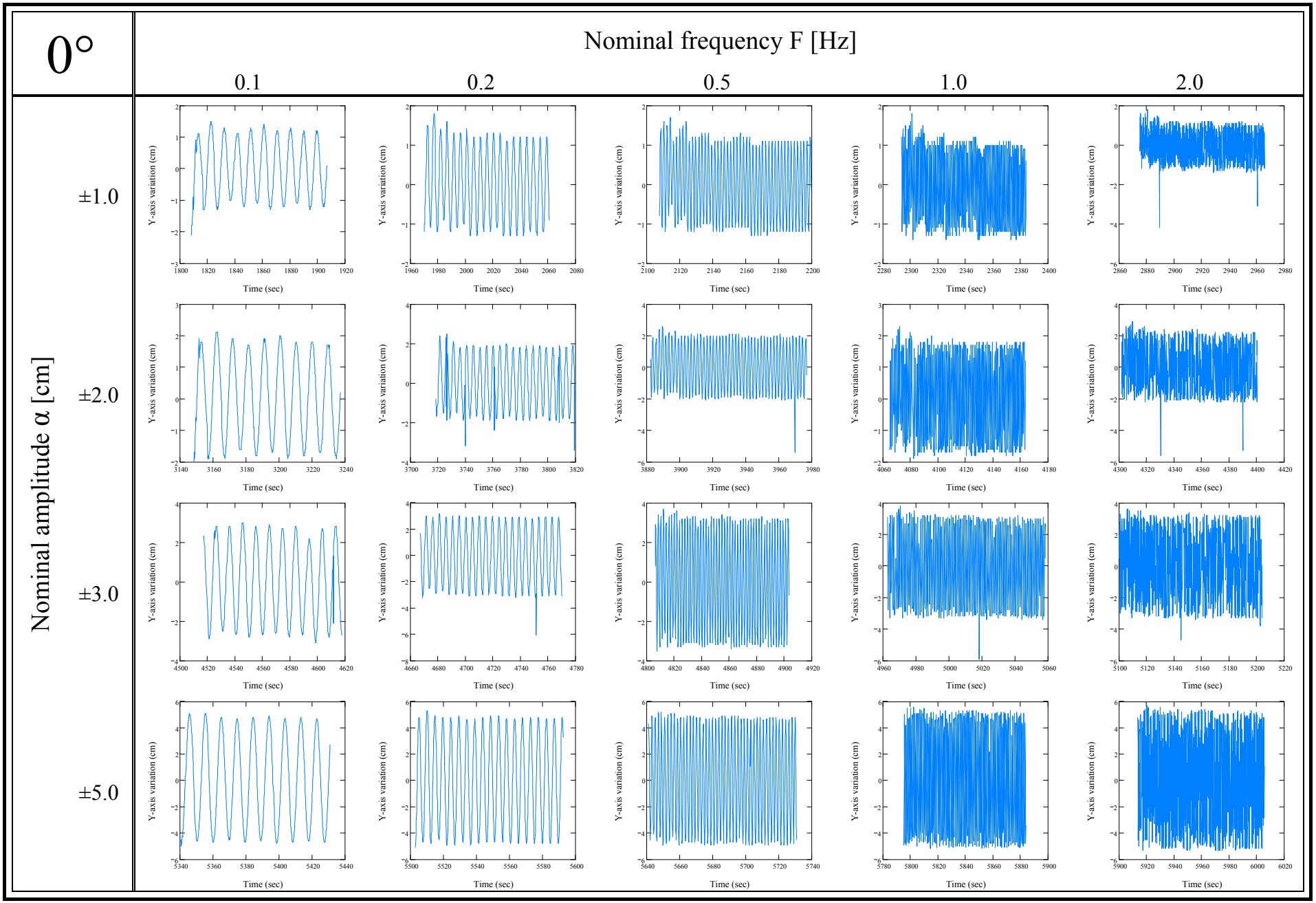


Πίνακας Π14 Διαγράμματα εκκεντρότητας από τον y-άξονα για την γωνία των 60°
Table Π14 y-axis eccentricity charts for 60° twist angle

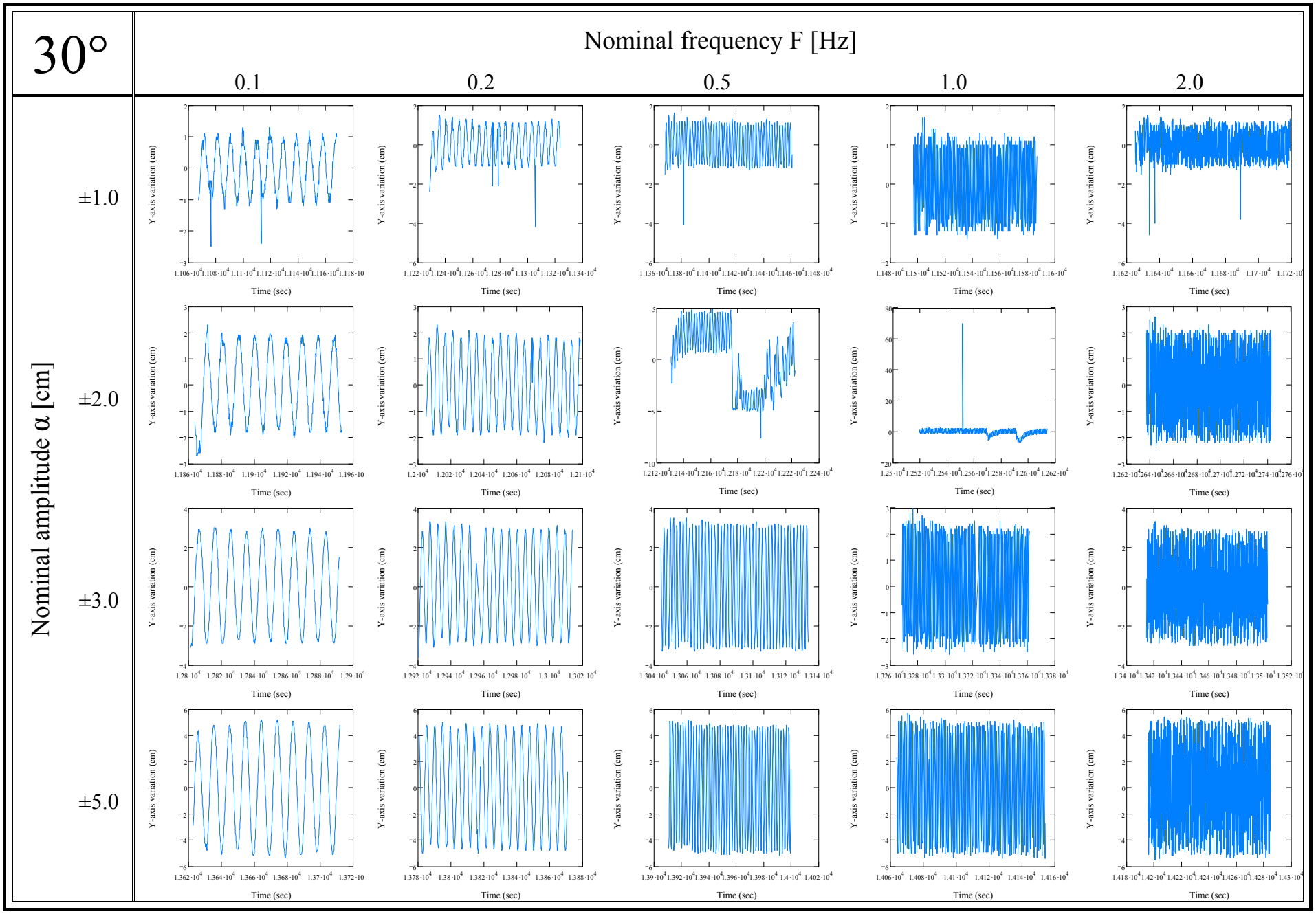
90°	Nominal frequency F [Hz]				
Nominal amplitude α [cm]	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0
±1.0					
±2.0					
±3.0					
±5.0					

Πίνακας Π15 Διαγράμματα εκκεντρότητας από τον y-άξονα για την γωνία των 90°

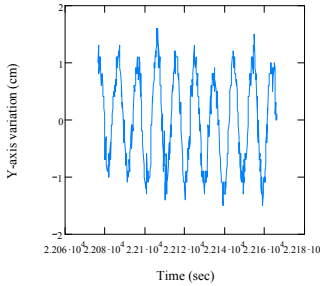
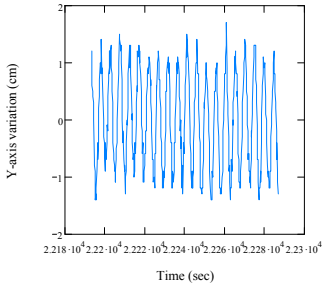
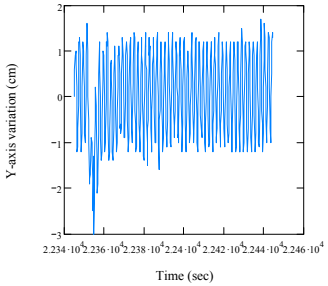
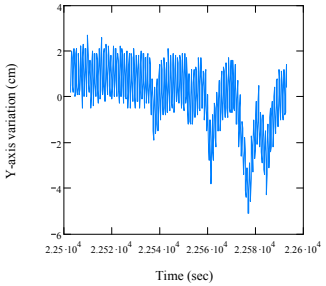
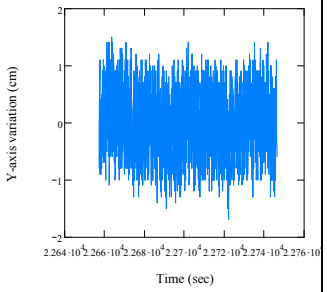
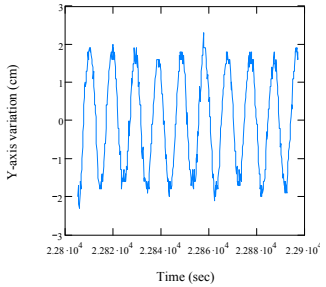
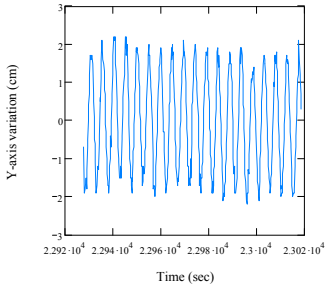
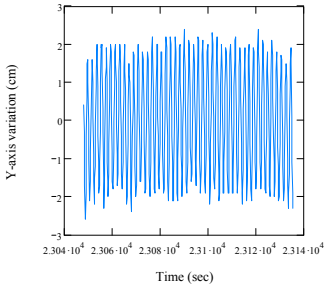
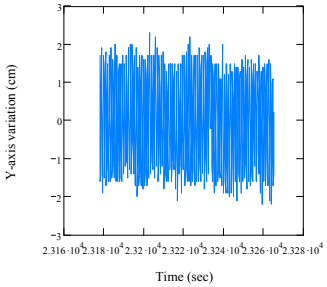
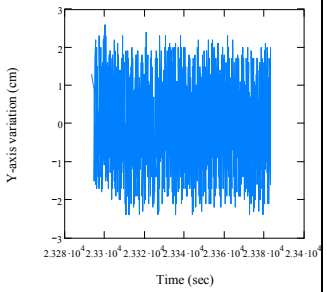
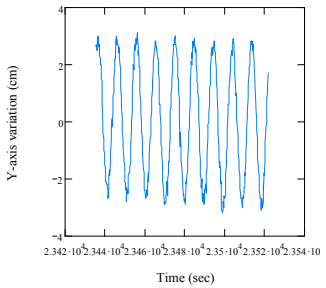
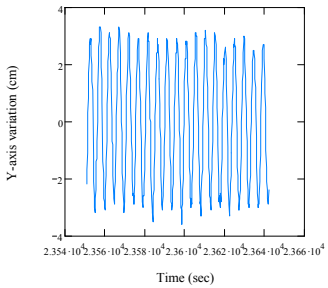
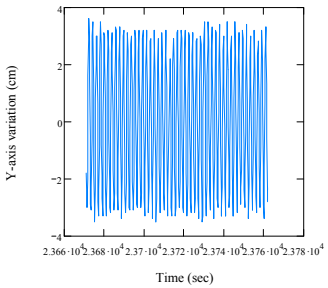
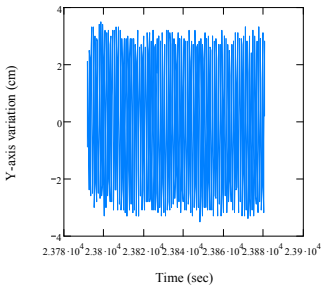
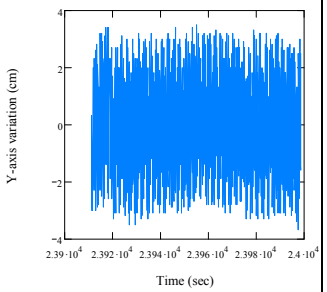
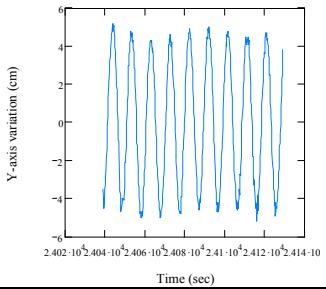
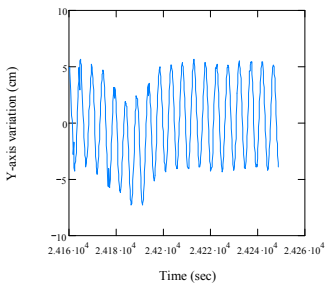
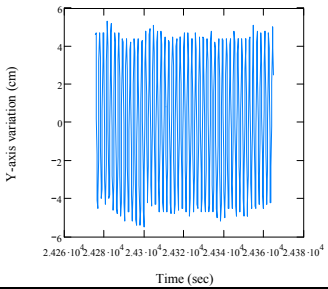
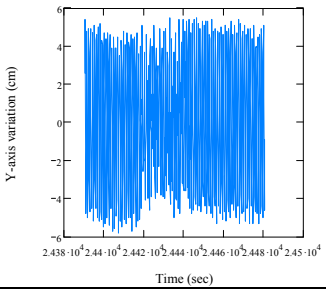
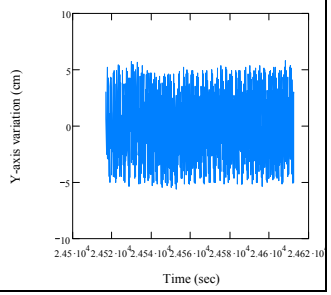
Table Π15 y-axis eccentricity charts for 90° twist angle



Πίνακας Π16 Διαγράμματα εκκεντρότητας από τον x-άξονα για την γωνία των 0°
Table Π16 x-axis eccentricity charts for 0° twist angle

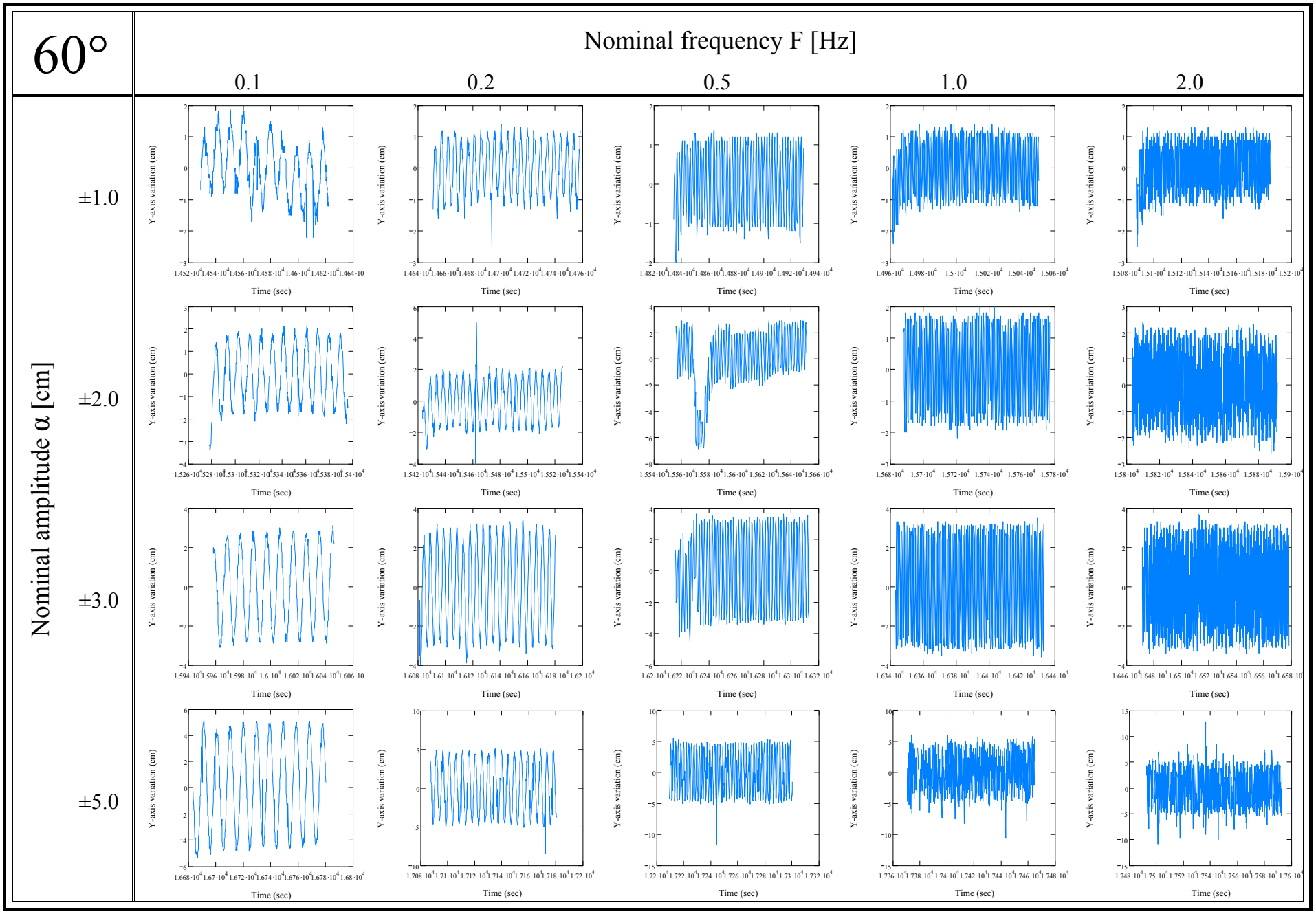


Πίνακας Π17 Διαγράμματα εκκεντρότητας από τον x-άξονα για την γωνία των 30°
Table Π17 x-axis eccentricity charts for 30° twist angle

45°	Nominal frequency F [Hz]				
Nominal amplitude α [cm]	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0
±1.0					
±2.0					
±3.0					
±5.0					

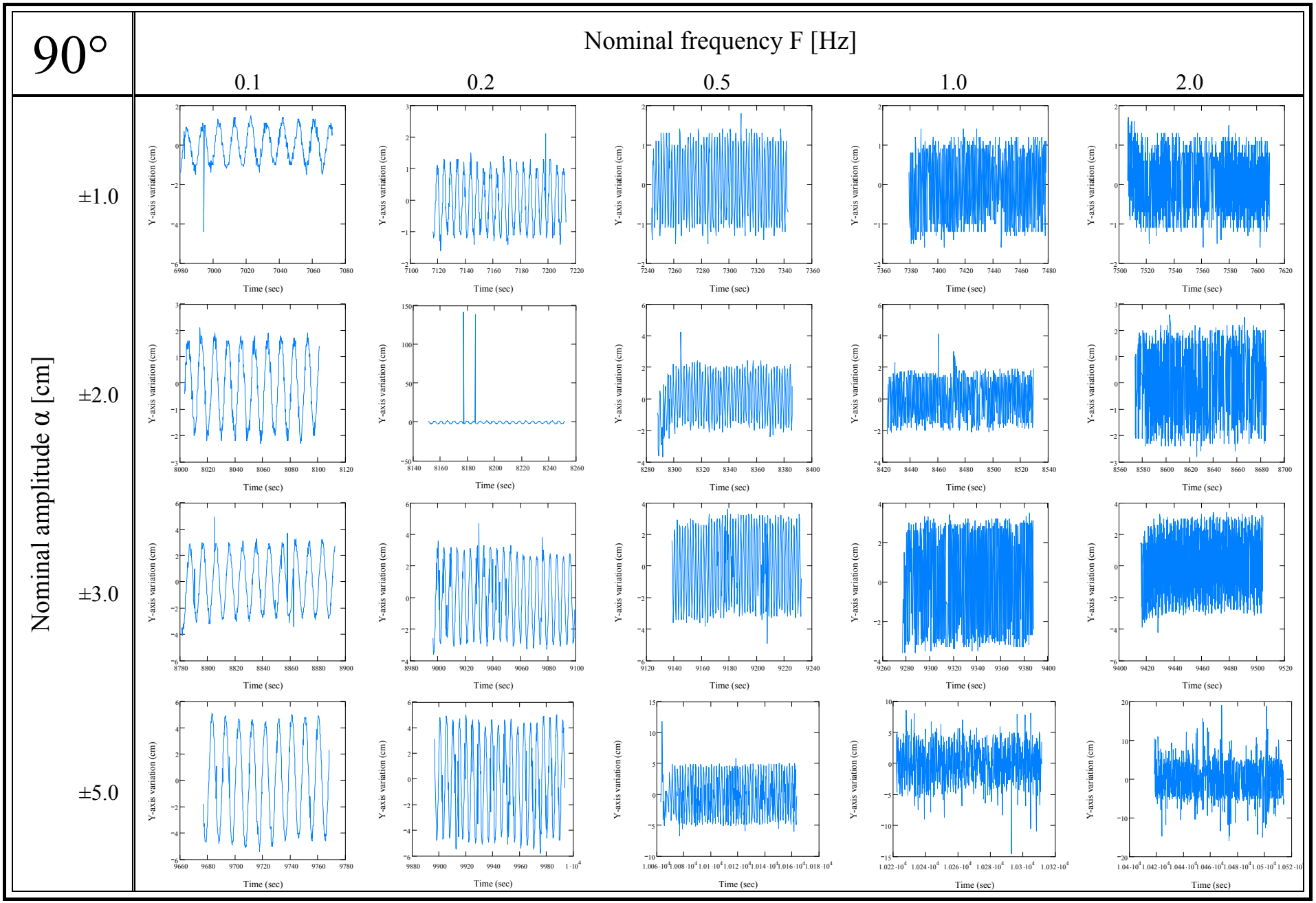
Πίνακας Π18 Διαγράμματα εκκεντρότητας από τον x-άξονα για την γωνία των 45°

Table Π18 x-axis eccentricity charts for 45° twist angle

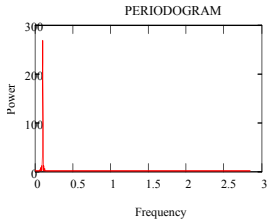
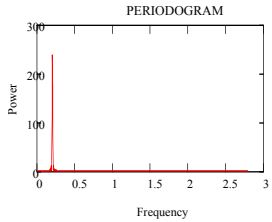
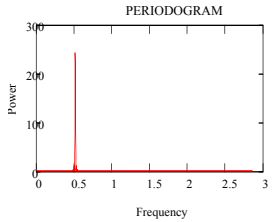
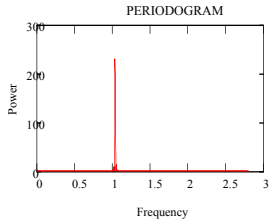
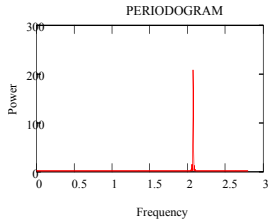
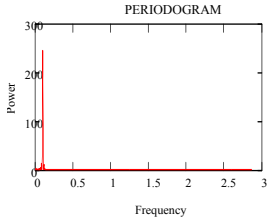
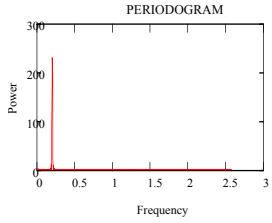
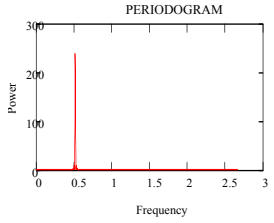
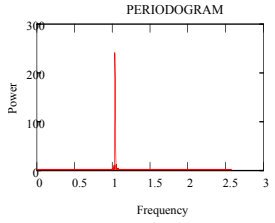
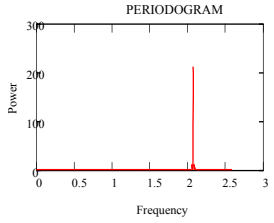
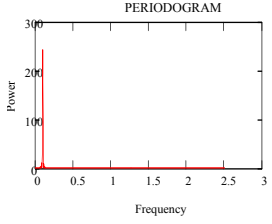
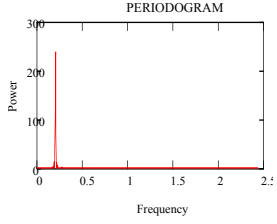
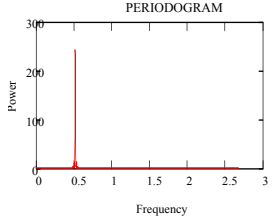
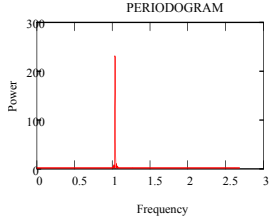
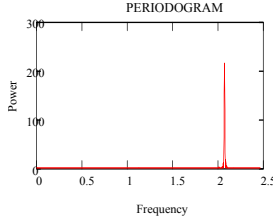
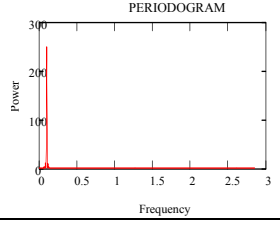
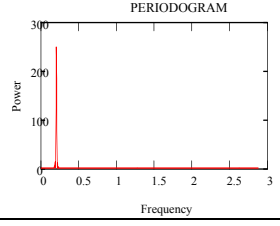
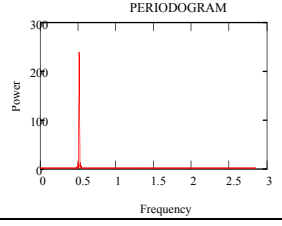
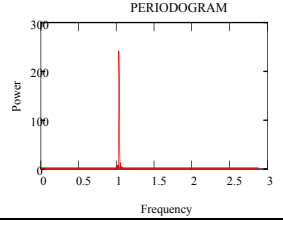
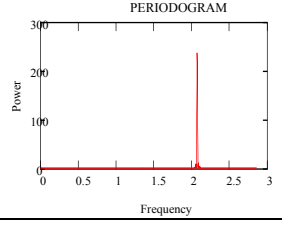


Πίνακας Π19 Διαγράμματα εκκεντρότητας από τον x-άξονα για την γωνία των 60°

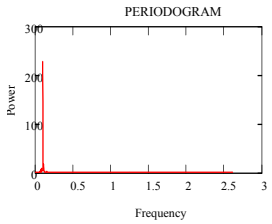
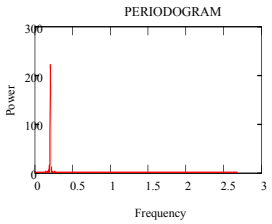
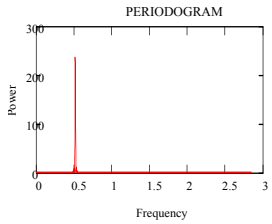
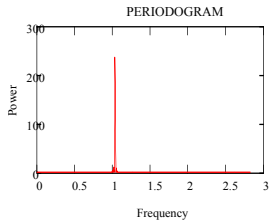
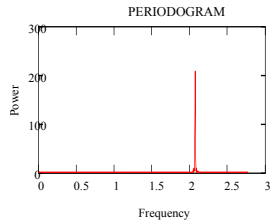
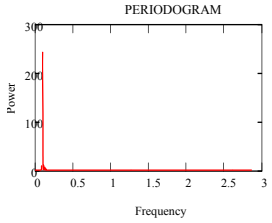
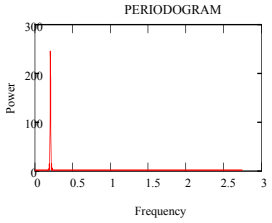
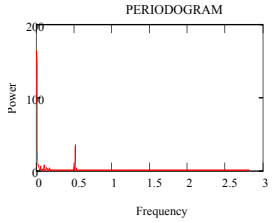
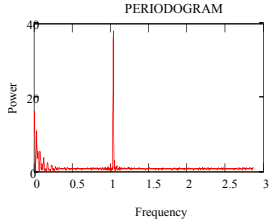
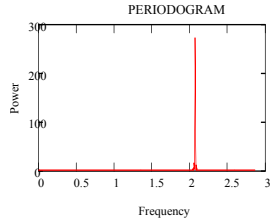
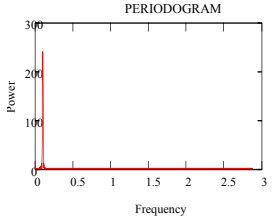
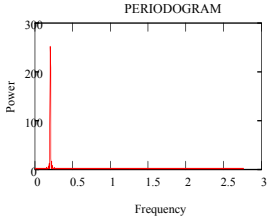
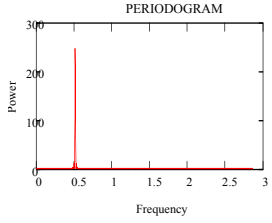
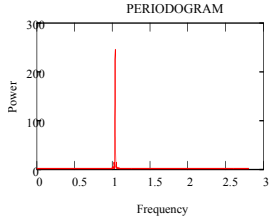
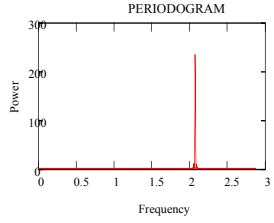
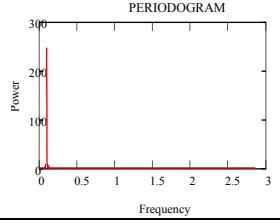
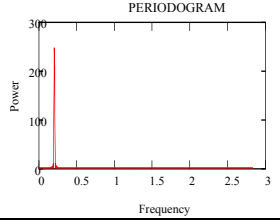
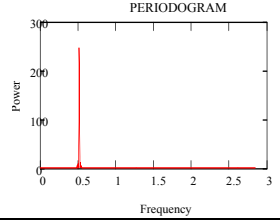
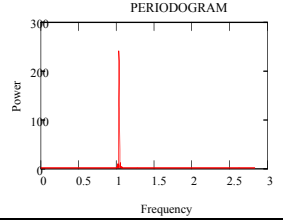
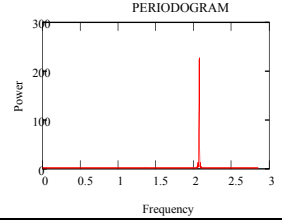
Table Π19 x-axis eccentricity charts for 60° twist angle



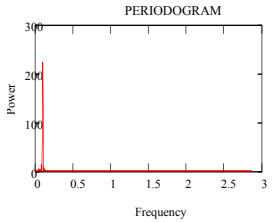
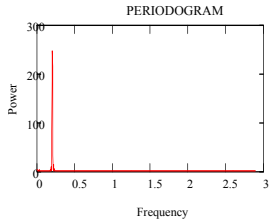
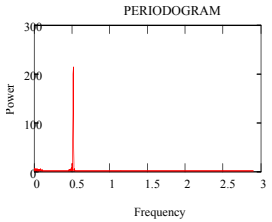
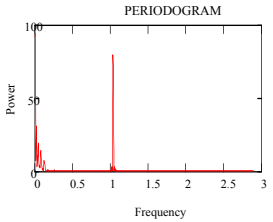
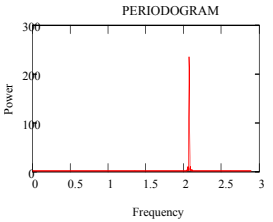
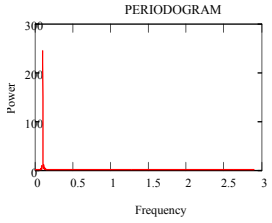
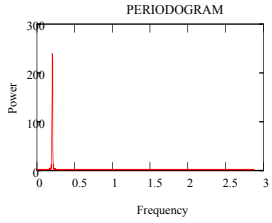
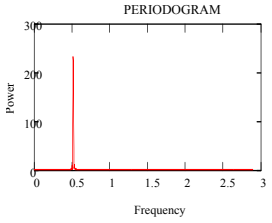
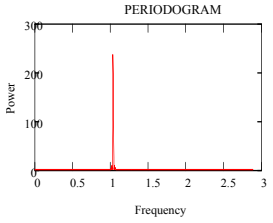
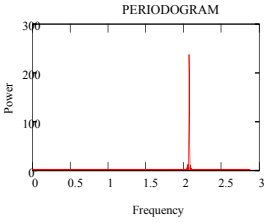
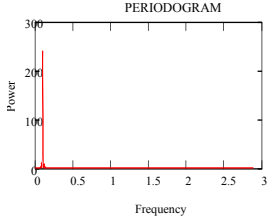
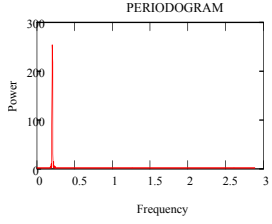
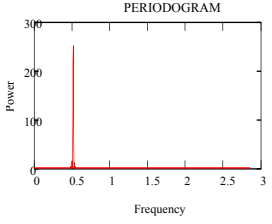
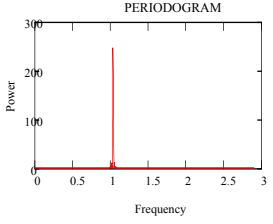
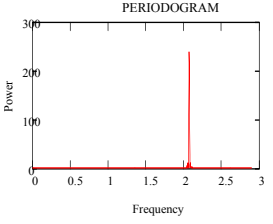
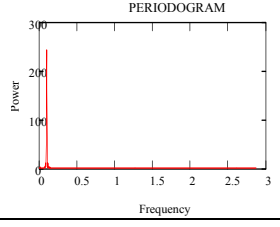
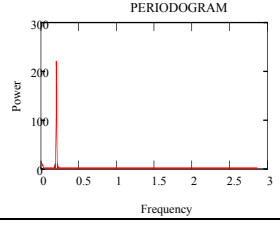
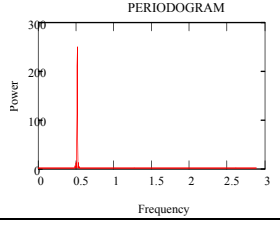
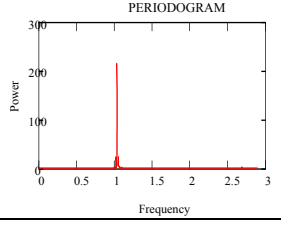
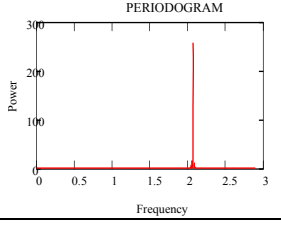
Πίνακας Π20 Διαγράμματα εκκεντρότητας από τον x-άξονα για την γωνία των 90°
Table Π20 x-axis eccentricity charts for 90° twist angle#

0°	Nominal frequency F [Hz]				
	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0
Nominal amplitude α [cm] ±1.0					
±2.0					
±3.0					
±5.0					

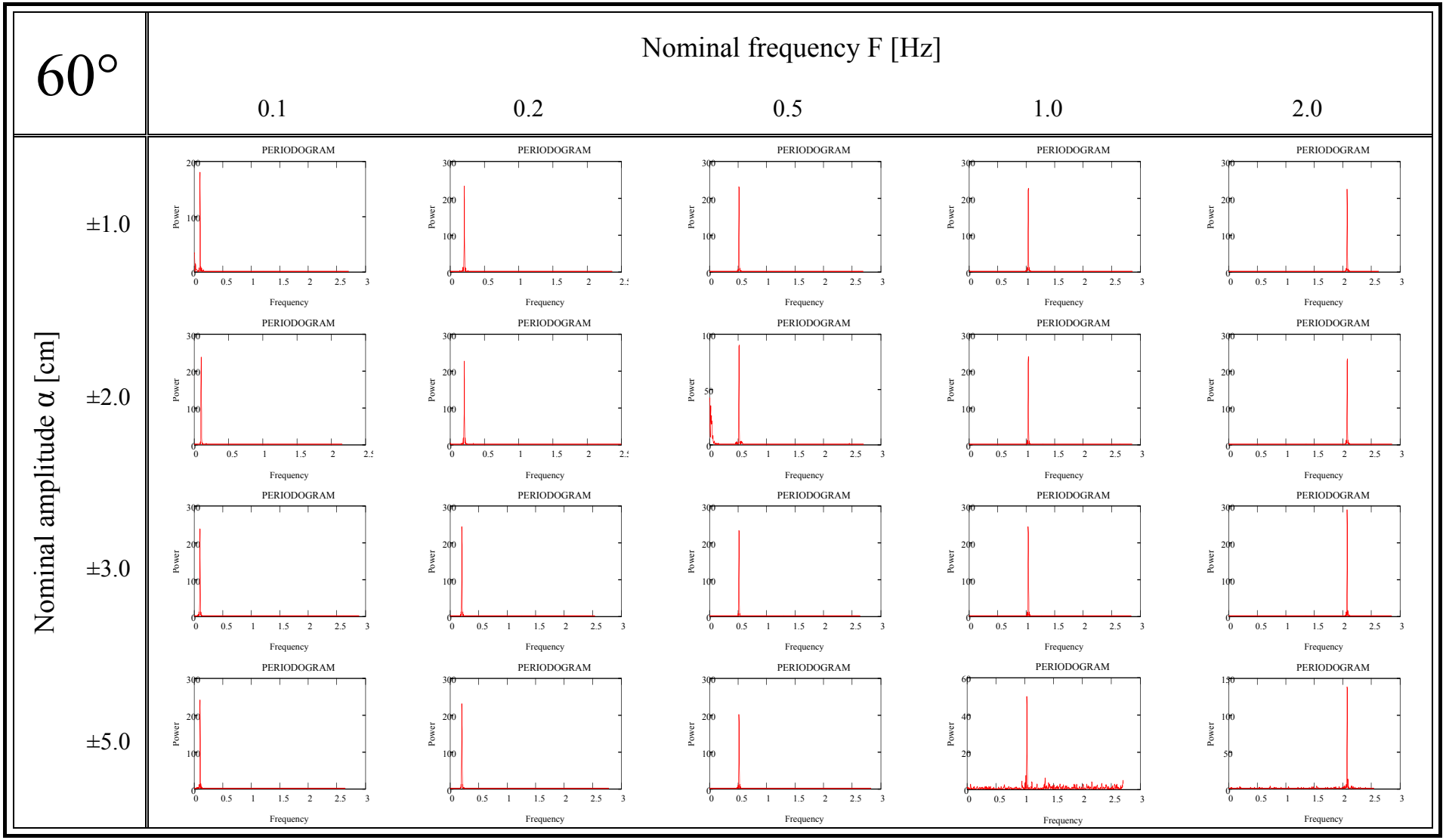
Πίνακας Π21 Διαγράμματα κύριας συχνότητας για την γωνία των 0°
Table Π21 Basic frequency charts for 0° twist angle

30°	Nominal frequency F [Hz]				
Nominal amplitude α [cm]	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0
±1.0					
±2.0					
±3.0					
±5.0					

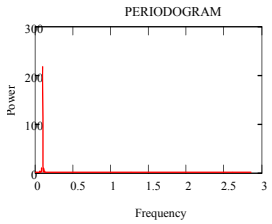
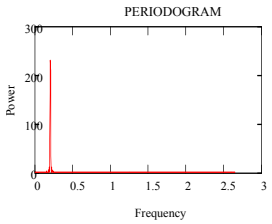
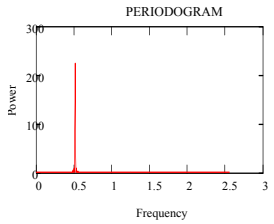
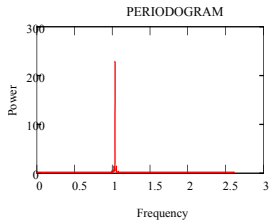
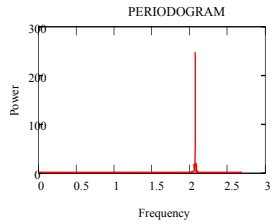
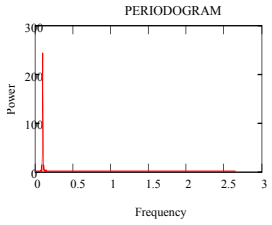
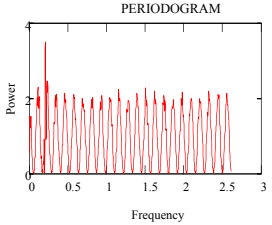
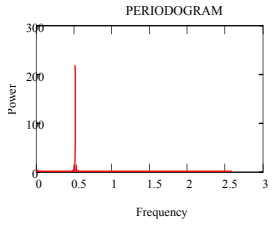
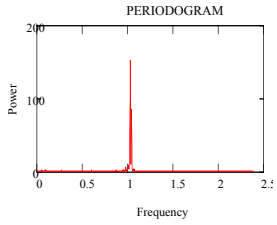
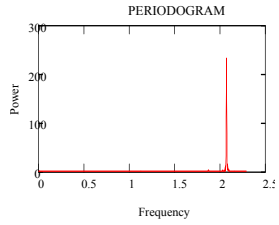
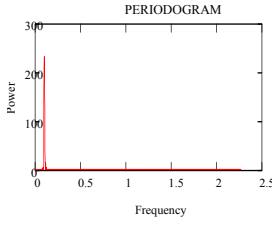
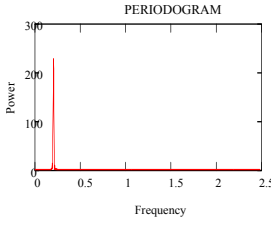
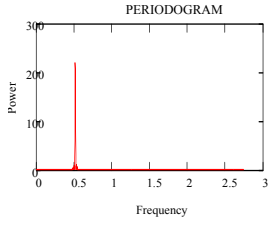
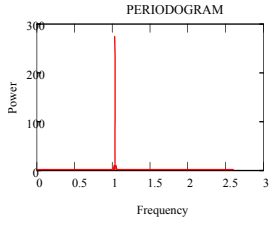
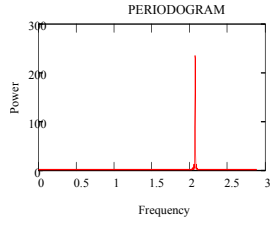
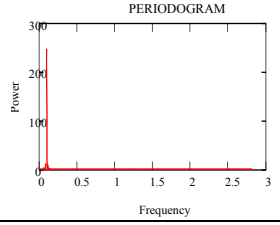
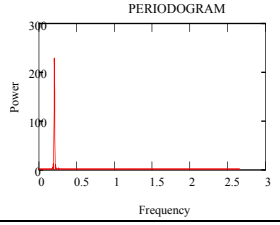
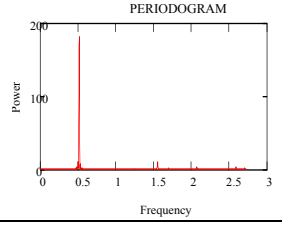
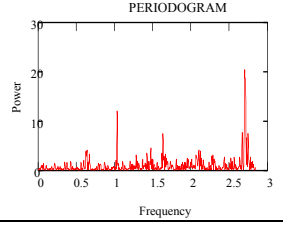
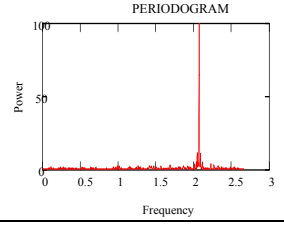
Πίνακας Π22 Διαγράμματα κύριας συχνότητας για την γωνία των 30°
Table Π22 Basic frequency charts for 30° twist angle

45°	Nominal frequency F [Hz]				
	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0
Nominal amplitude α [cm] ±1.0					
±2.0					
±3.0					
±5.0					

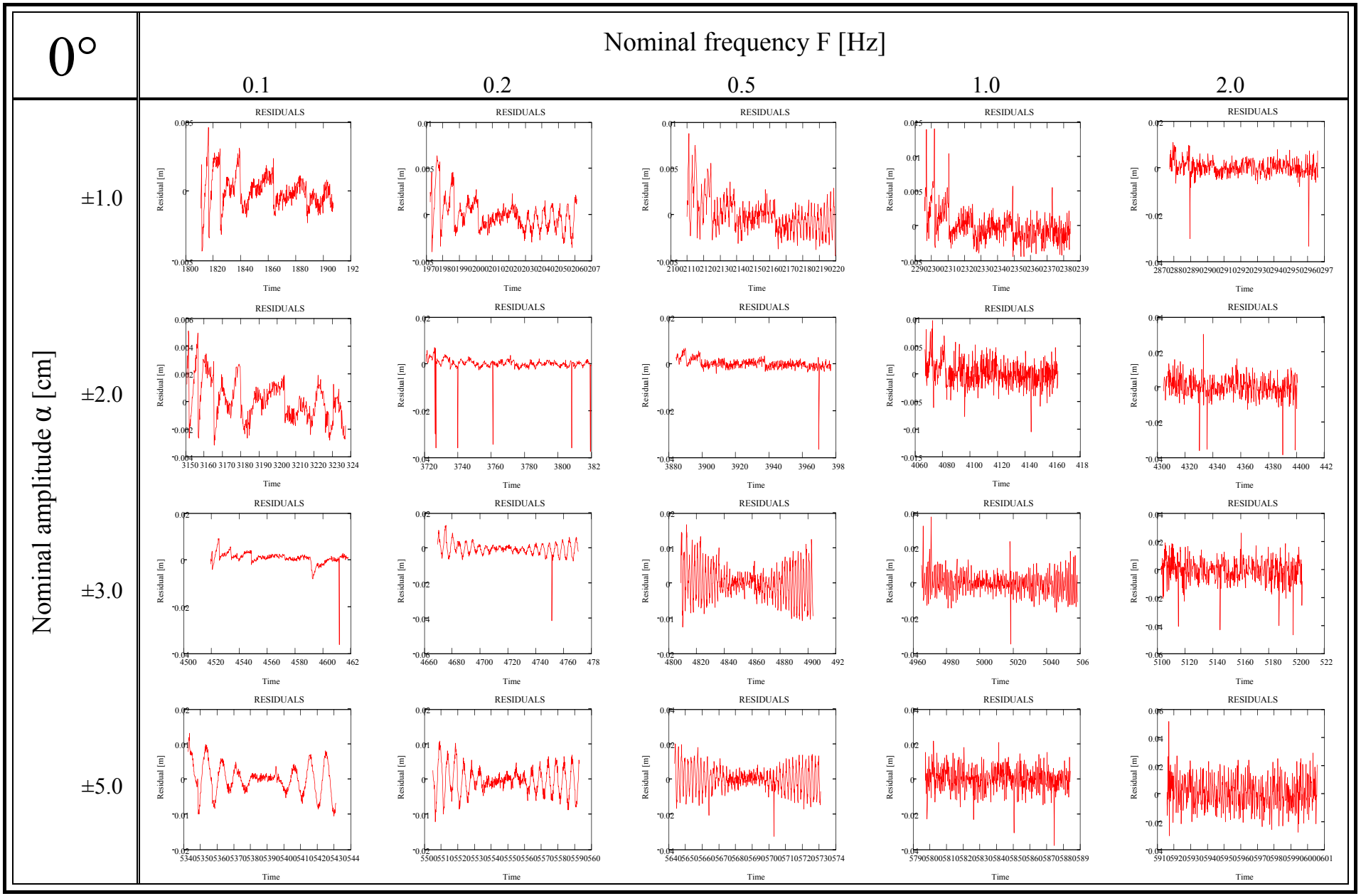
Πίνακας Π23 Διαγράμματα κύριας συχνότητας για την γωνία των 45°
Table Π23 Basic frequency charts for 45° twist angle



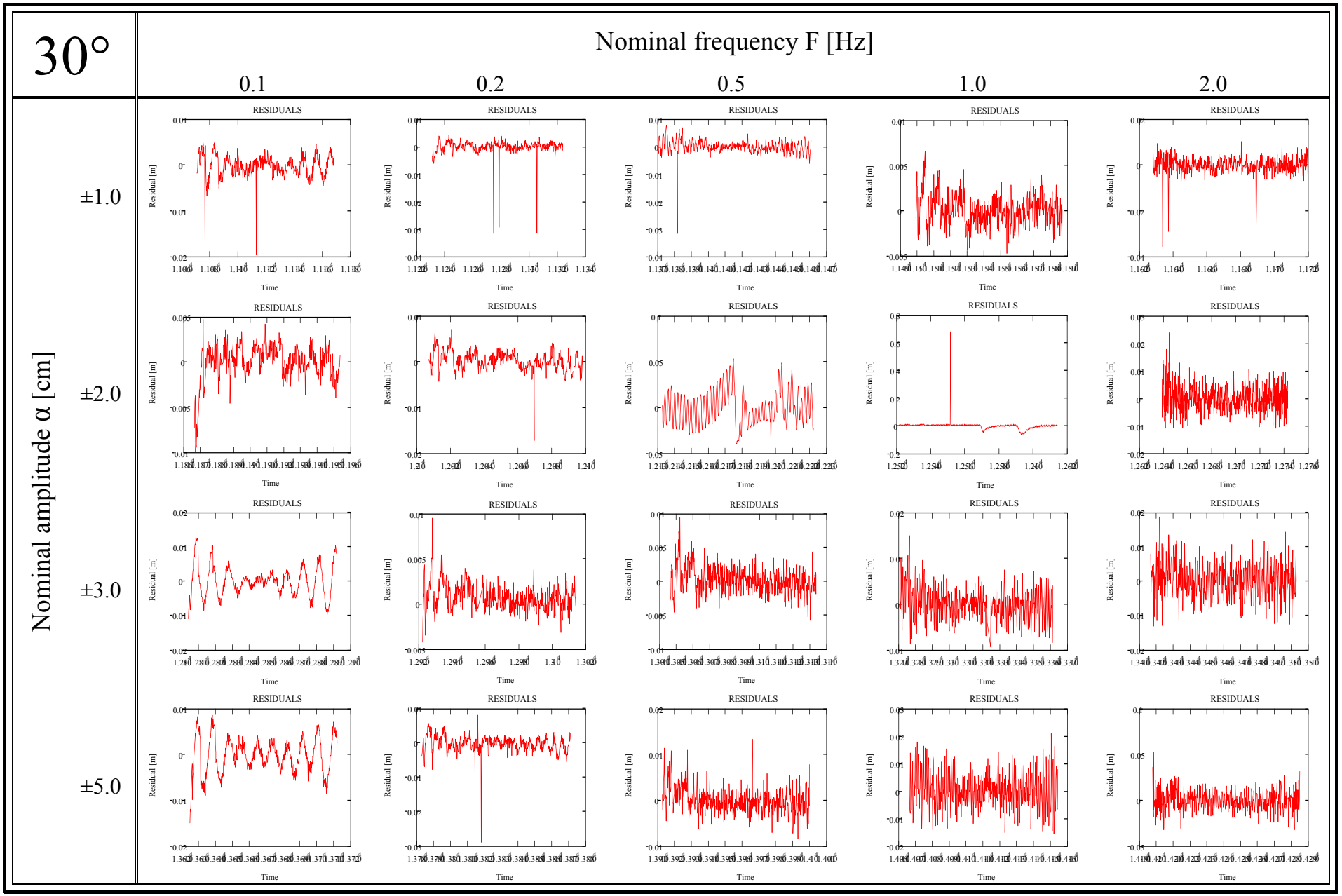
Πίνακας Π24 Διαγράμματα κύριας συχνότητας για την γωνία των 60°
Table Π24 Basic frequency charts for 60° twist angle

90°	Nominal frequency F [Hz]				
Nominal amplitude α [cm]	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0
±1.0					
±2.0					
±3.0					
±5.0					

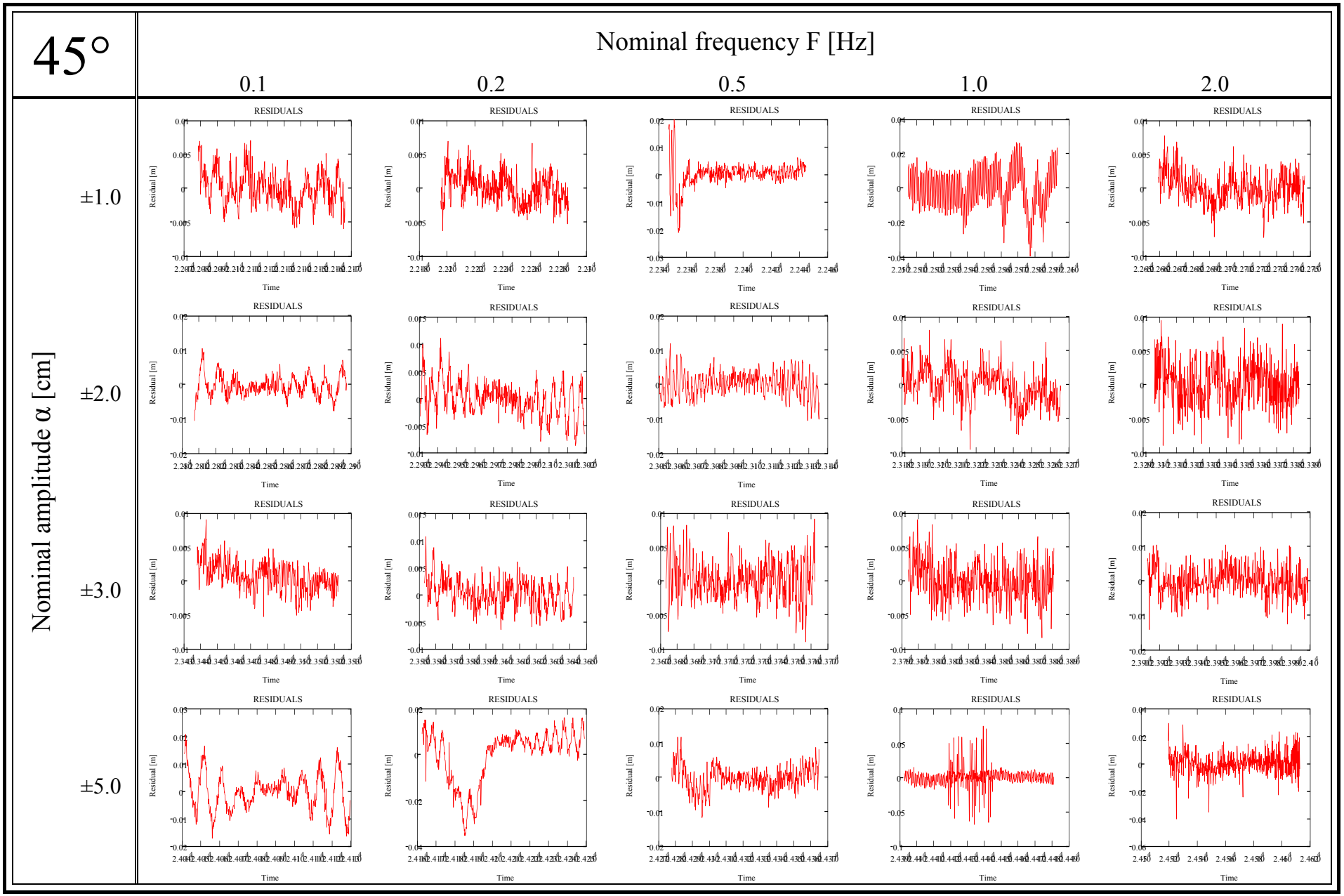
Πίνακας Π25 Διαγράμματα κύριας συχνότητας για την γωνία των 90°
Table Π25 Basic frequency charts for 90° twist angle



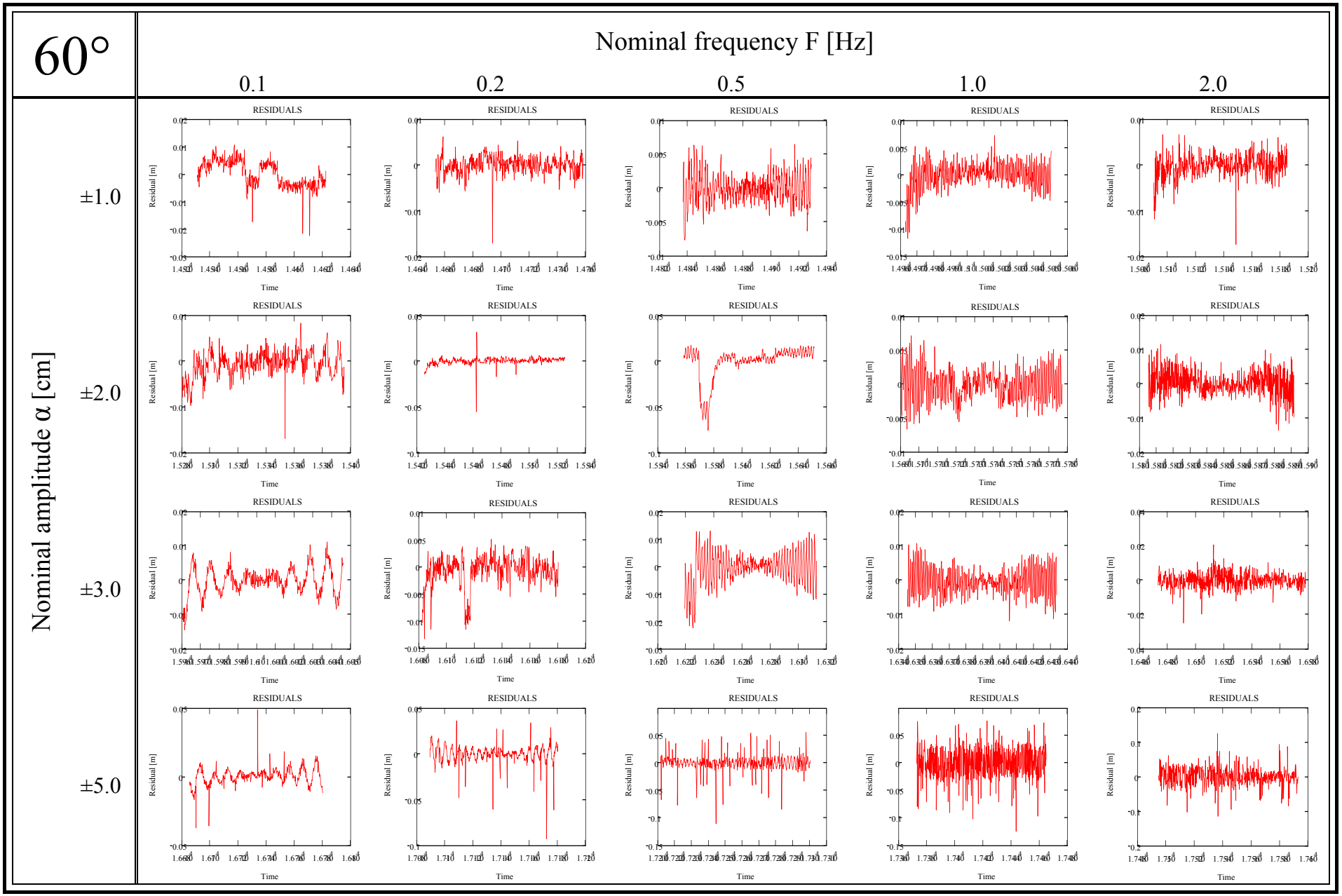
Πίνακας Π26 Διαγράμματα υπολειμματικών διαφορών για την γωνία των 0°
Table Π26 Residuals charts for 0° angle



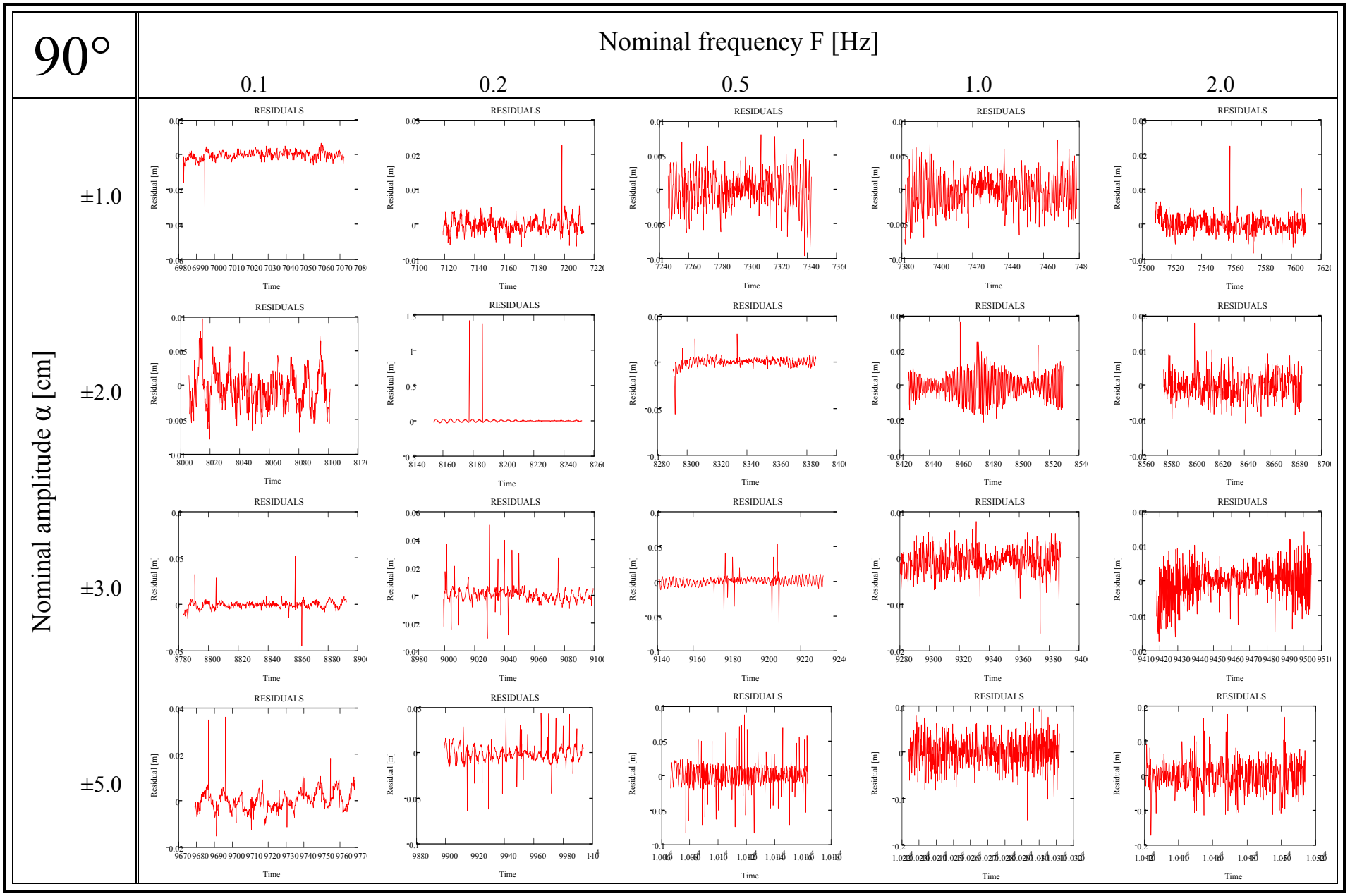
Πίνακας Π27 Διαγράμματα υπολειμματικών διαφορών για την γωνία των 30°
Table Π27 Residuals charts for 30° angle



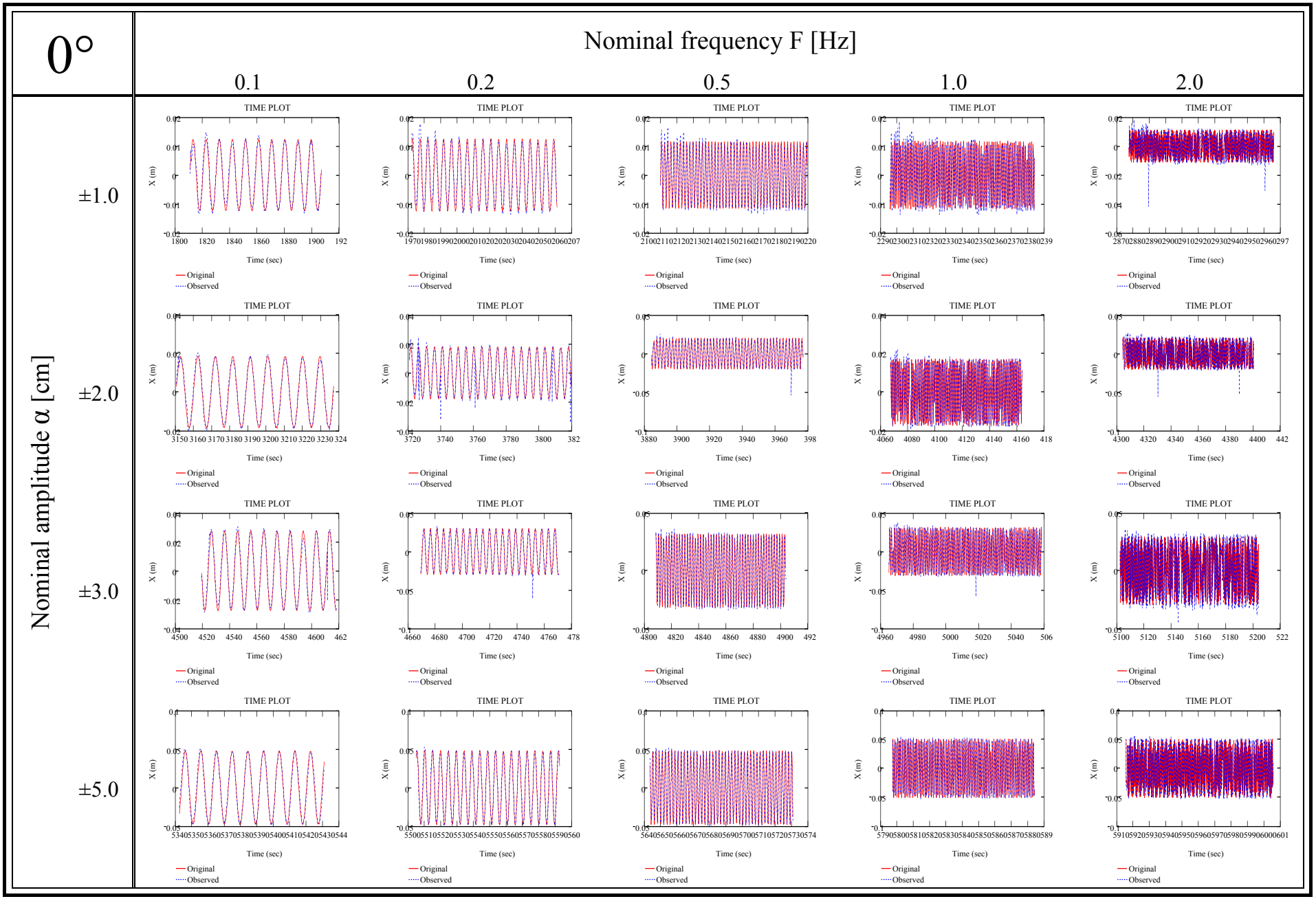
Πίνακας Π28 Διαγράμματα υπολειμματικών διαφορών για την γωνία των 45°
Table Π28 Residuals charts for 45° angle



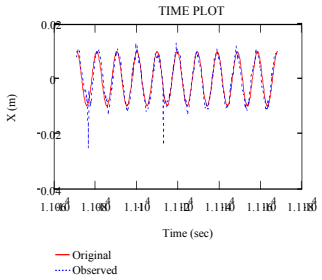
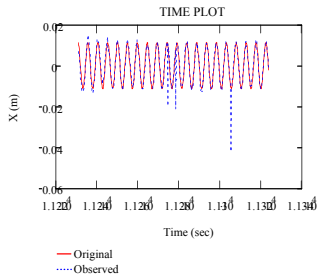
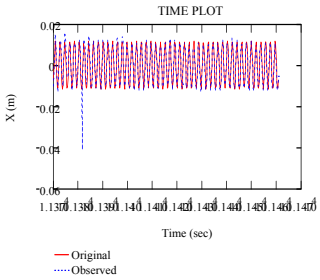
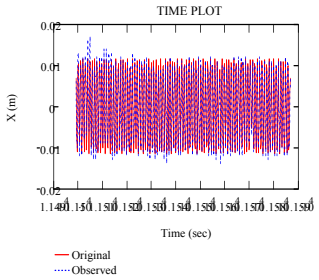
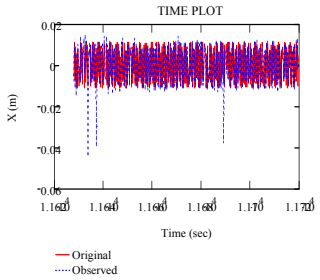
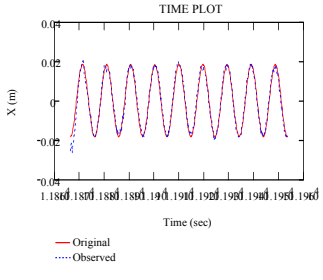
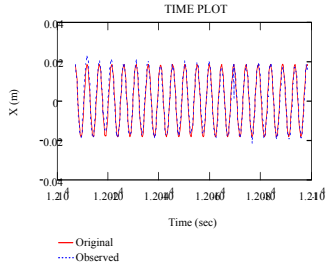
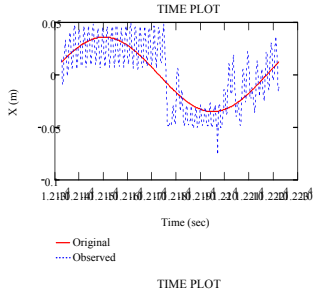
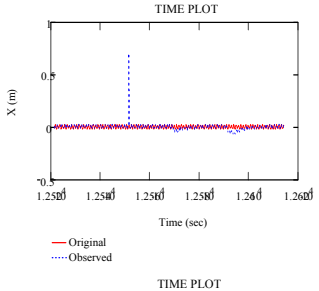
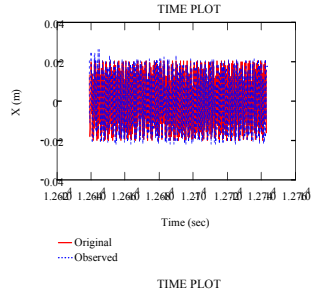
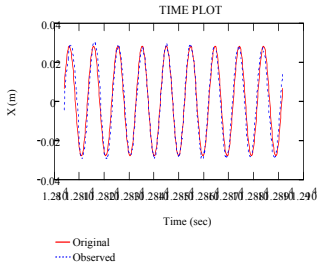
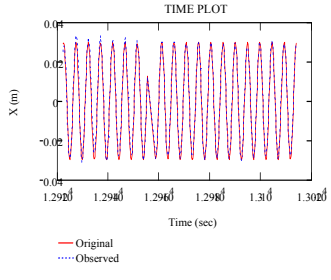
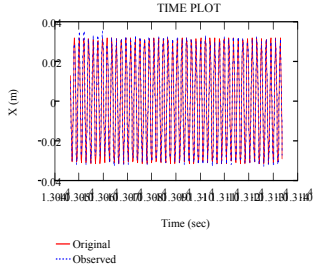
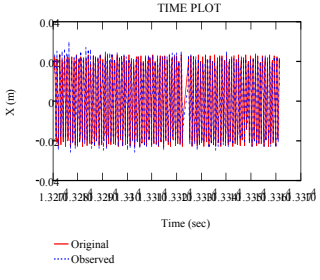
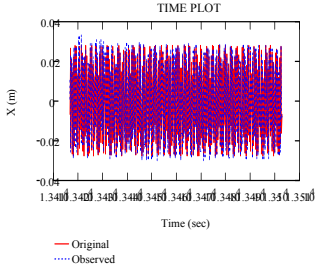
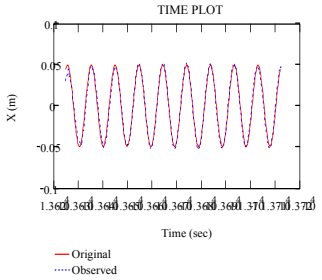
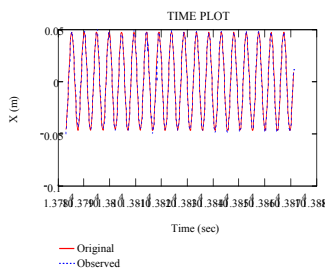
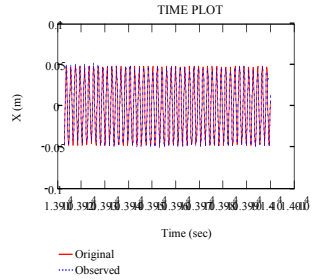
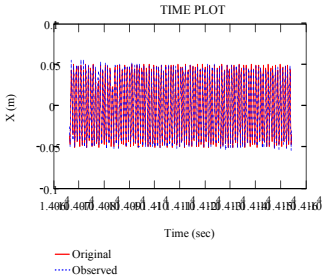
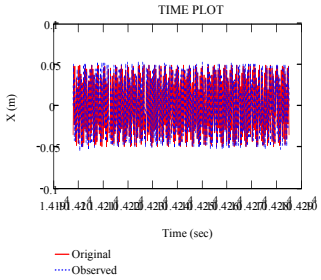
Πίνακας Π29 Διαγράμματα υπολειμματικών διαφορών για την γωνία των 60°
Table Π29 Residuals charts for 60° angle



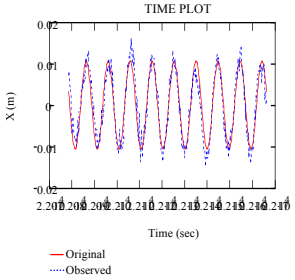
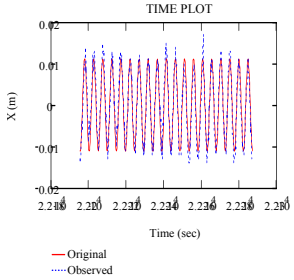
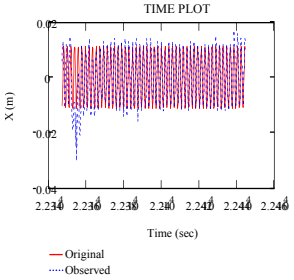
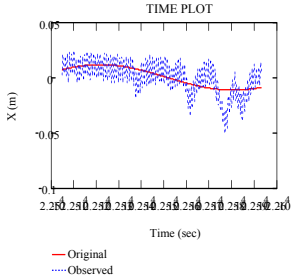
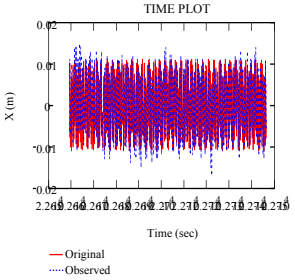
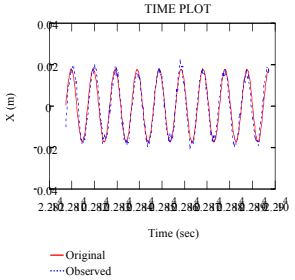
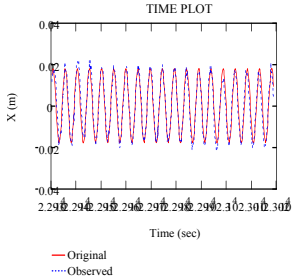
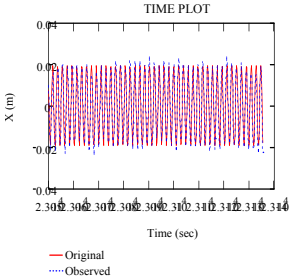
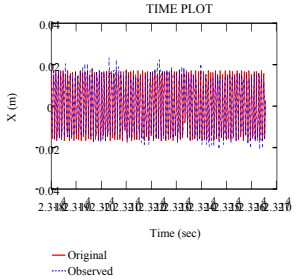
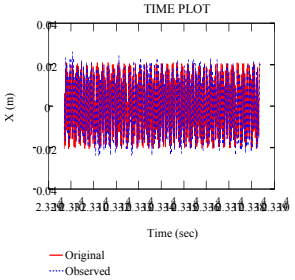
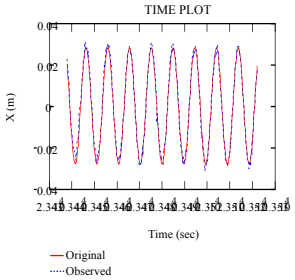
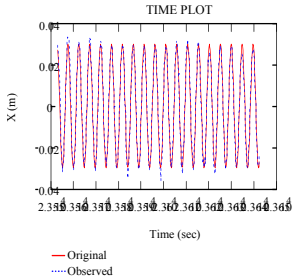
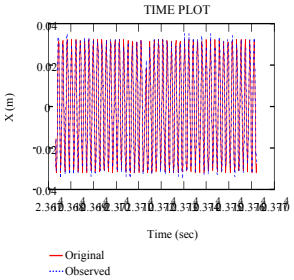
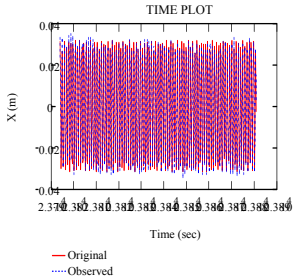
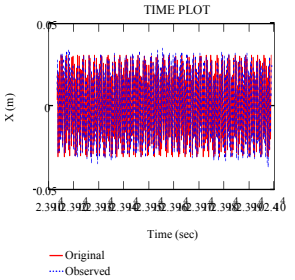
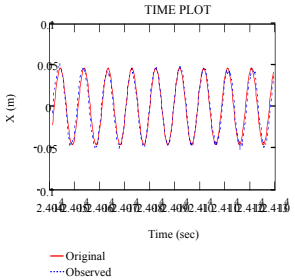
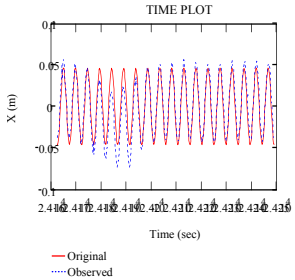
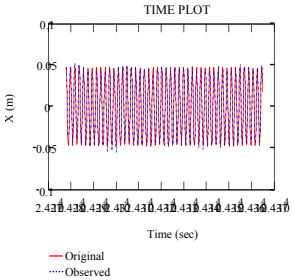
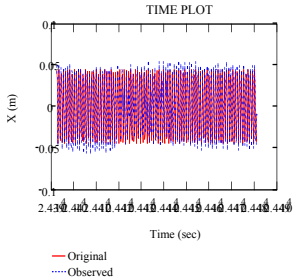
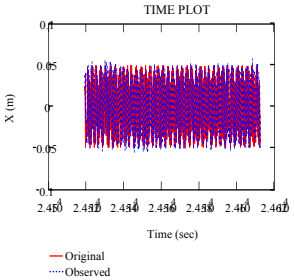
Πίνακας Π30 Διαγράμματα υπολειμματικών διαφορών για την γωνία των 90°
Table Π30 Residuals charts for 90° angle



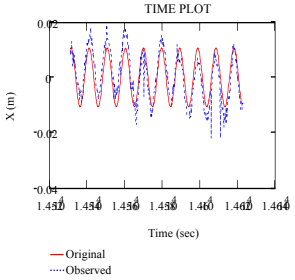
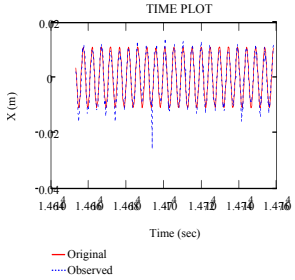
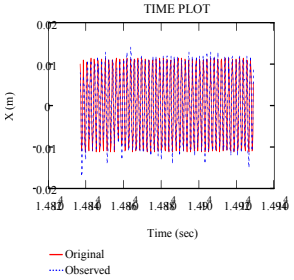
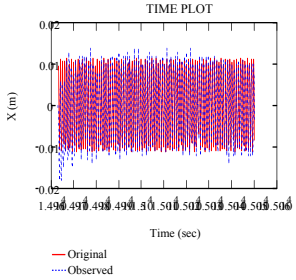
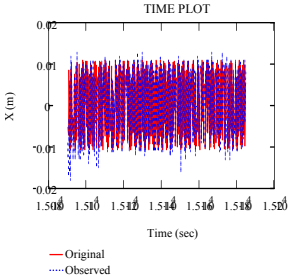
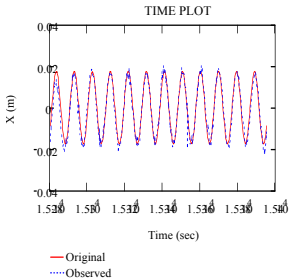
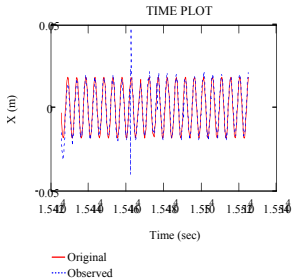
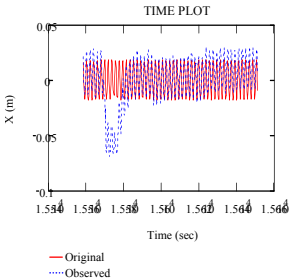
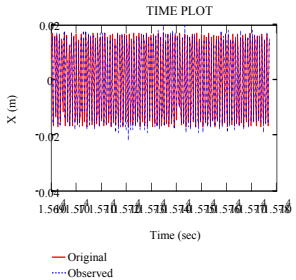
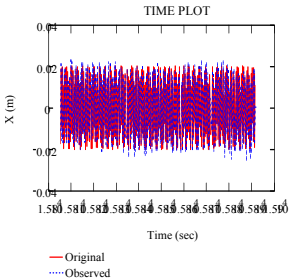
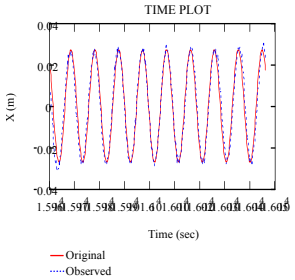
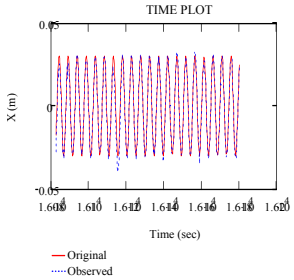
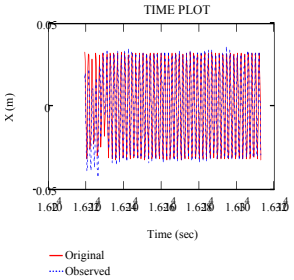
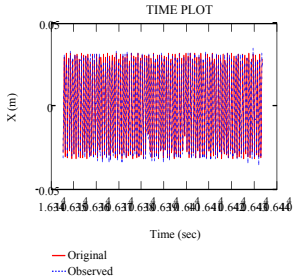
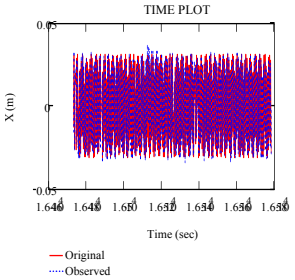
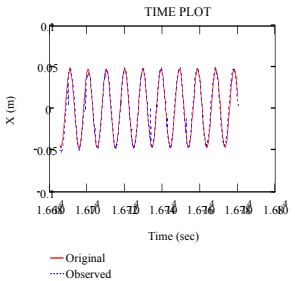
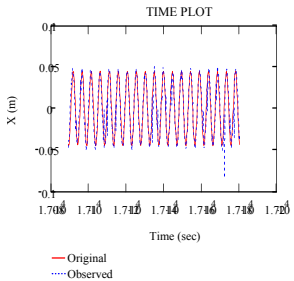
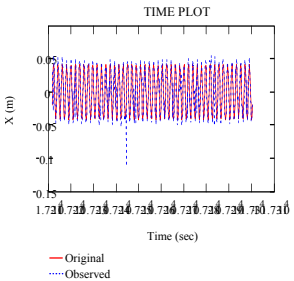
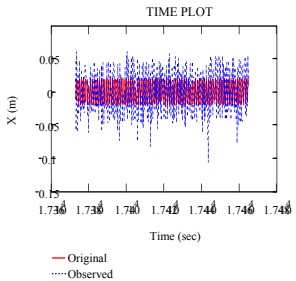
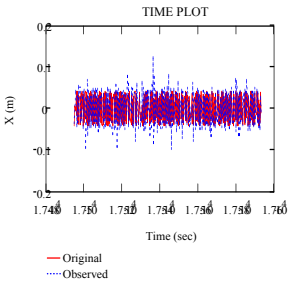
Πίνακας Π31 Διαγράμματα αναπαραγωγής κυρίου σήματος για την γωνία των 0°
Table Π31 Signal reproduction charts for 0° angle

30°	Nominal frequency F [Hz]				
Nominal amplitude α [cm]	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0
±1.0					
±2.0					
±3.0					
±5.0					

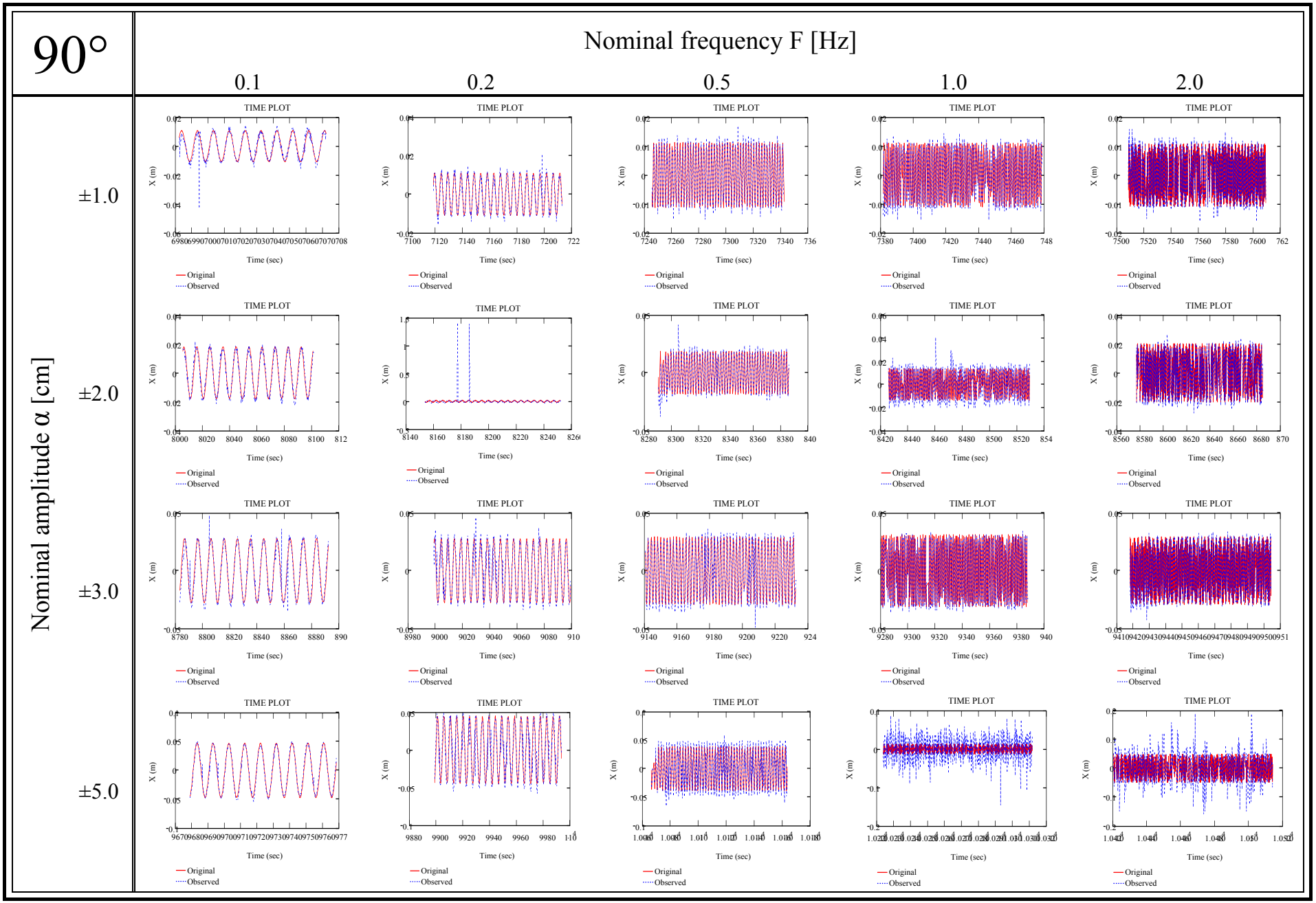
Πίνακας Π32 Διαγράμματα αναπαραγωγής κυρίου σήματος για την γωνία των 30°
Table Π32 Signal reproduction charts for 30° angle

45°	Nominal frequency F [Hz]				
Nominal amplitude α [cm]	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0
±1.0					
±2.0					
±3.0					
±5.0					

Πίνακας Π33 Διαγράμματα αναπαραγωγής κυρίου σήματος για την γωνία των 45°
Table Π33 Signal reproduction charts for 45° angle

60°	Nominal frequency F [Hz]				
Nominal amplitude α [cm]	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0
±1.0					
±2.0					
±3.0					
±5.0					

Πίνακας Π34 Διαγράμματα αναπαραγωγής κυρίου σήματος για την γωνία των 60°
Table Π34 Signal reproduction charts for 60° angle



Πίνακας Π35 Διαγράμματα αναπαραγωγής κυρίου σήματος για την γωνία των 90°
Table Π35 Signal reproduction charts for 90° angle