



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ
ΚΑΙ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Διπλωματική Εργασία

**Αξιοποίηση παρατηρήσεων ρομποτικού γεωδαιτικού σταθμού και δεδομένων
σαρωτή Laser για την γεωμετρική παρακολούθηση γέφυρας.**

Συγγραφέας

Καρανδρέας Δημήτριος

ΑΜ: 509150200227

Επιβλέπων:

Αναστασίου Δημήτριος

Αθήνα, Ιούλιος 2022



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF SURVEYING AND
GEOINFORMATICS ENGINEERING**

Diploma Thesis

**Robotic geodetic station observations analysis and Laser scanner data utilization
for bridge geometric monitoring**

Student name and surname: Dimitrios Karandreas

Registration Number: 509150200227

Supervisor name and surname: Dimitrios Anastasiou

Athens, July 2022



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ
ΚΑΙ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Τίτλος εργασίας:

Αξιοποίηση παρατηρήσεων ρομποτικού γεωδαιτικού σταθμού και δεδομένων σαρωτή Laser για την γεωμετρική παρακολούθηση γέφυρας.

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

α/α	ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ	ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
1	ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ	ΔΙΔΑΣΚΩΝ ΕΣΠΑ	
2	ΠΑΓΟΥΝΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ	ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ	
3	ΓΙΑΝΝΙΟΥ ΜΙΧΑΗΛ	ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Καρανδρέας Δημήτριος του Κωνσταντίνου, με αριθμό μητρώου 509150200227 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανικών Τοπογραφίας και Γεωπληροφορικής, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών



Ευχαριστίες

Η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής μου εργασίας πραγματοποιήθηκε υπό την επίβλεψη και καθοδήγηση του διδάσκοντος Αναστασίου Δημήτριου και τον οποίον θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά για την εμπιστοσύνη που επέδειξε στο πρόσωπο μου στην ανάθεση του θέματος, καθώς και για την συνεχή του βοήθεια και συνεισφορά στην περάτωση της εργασίας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την υποστήριξη και κατανόηση που έδειξαν σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Οι γέφυρες ως κατασκευές αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της ανθρώπινης κοινότητας καθώς εξυπηρετούν καθημερινά τις ανάγκες για μετακίνηση. Ανεξάρτητα από το είδος, το σχήμα και το μέγεθος, υφίστανται καθημερινά καταπονήσεις και φθορές, συνεπώς είναι σκόπιμη η παρακολούθηση τους με μεθόδους ακριβείας. Τέτοιες τεχνικές αναλύονται σε πληθώρα εργασιών συμπεριλαμβανομένου και της παρούσας.

Η εν λόγω διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια ολοκλήρωσης του προγράμματος σπουδών προπτυχιακού επιπέδου, του τμήματος «Μηχανικών Τοπογραφίας και Γεωπληροφορικής» της ροής «Τοπογραφίας» με εμβάθυνση την «Γεωδαισία», της σχολής «Μηχανικών» του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Στόχος της είναι η παρουσίαση σύγχρονων γεωδαιτικών τεχνικών για την γεωμετρική παρακολούθηση γεφυρών.

Συγκεκριμένα, εστιάζει στην χρήση τρισδιάστατου σαρωτή laser για την γεωμετρική τεκμηρίωση δύο ολόσωμων κιβωτοειδούς διατομής γεφυρών κατασκευασμένες από οπλισμένο σκυρόδεμα στην Πέτρου Ράλλη και αξιοποίηση των παρατηρήσεων ρομποτικού γεωδαιτικού σταθμού για την παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς τους. Για τον σκοπό αυτό προκειμένου να δημιουργηθεί το τρισδιάστατο μοντέλο της εκάστοτε γέφυρας και στην συνέχεια να δημιουργηθούν μετρητικά προϊόντα για αυτές, με χρήση σαρωτή laser πραγματοποιήθηκαν με γνώμονα η αλληλοεπικάλυψη να είναι της τάξης του 60%, 26 σαρώσεις οι οποίες ενώθηκαν με ακρίβεια RMS 9-13 mm. Στην συνέχεια, δημιουργήθηκαν οι κατόψεις και 35 διατομές για την νότια και 7 για την βόρεια γέφυρα. Έπειτα, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις πεδίου με χρήση ρομποτικού γεωδαιτικού σταθμού. Όσον αφορά την βόρεια γέφυρα, χρησιμοποιήθηκαν δύο αυτοκόλλητοι στόχοι για τις παρατηρήσεις με την τεχνική «Sets of Angles» και δύο πρίσματα για την τεχνική του «Tracking» χωρίς να προσφέρουν κάποιο αξιόλογο αποτέλεσμα. Συγκεκριμένα για την πρώτη τεχνική πραγματοποιήθηκαν δύο σειρές μετρήσεων 10 και 6 περιόδων, ενώ για την δεύτερη, έγιναν μετρήσεις για 1 λεπτό με περίοδο μέτρησης ανά 2 sec, 1 sec, 0.5 sec, 0.2 sec και 0.1 sec. Αντίθετα για την νότια γέφυρα πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με την τεχνική του «Tracking» με χρήση τεσσάρων πρισμάτων τοποθετημένα σε 8 σημεία. Το ένα από τα 4 πρίσματα τοποθετήθηκε αριστερά από τον αρμό συστολής – διαστολής πάνω από το ακρόβαθρο, ενώ ένα δεύτερο μπήκε σε κοντινή του απόσταση δεξιά από τον αρμό. Πιο αναλυτικά, το κάθε σημείο μετρήθηκε με διάρκεια 15 λεπτών και συχνότητα μέτρησης τα 2Hz. Οι μετρήσεις έλαβαν χώρα χωρίς την διακοπή της κυκλοφορίας των οχημάτων. Η διαδικασία της ανάλυσης των χρονοσειρών που προέκυψαν έγινε με χρήση του «γρήγορου μετασχηματισμού Fourier» (FFT), του οποίου τα αποτελέσματα έδειξαν για το τμήμα μεταξύ των δύο αρμών, τρεις επικρατέστερες φυσικές συχνότητες στην κατά X μετακίνηση (0.001106 Hz, 0.001654 Hz και 0.003053 Hz) δύο στον Y άξονα (0.001109 Hz και 0.002219 Hz) και τρεις στην κατακόρυφη (0.001106 Hz, 0.001663 Hz και 0.002205 Hz). Τέλος, όσον αφορά το τμήμα στο ακρόβαθρο, προέκυψαν δύο επικρατέστερες ιδιοσυχνότητες για τις μετακινήσεις και στους τρεις άξονες. Για τον X η πρώτη έχει τιμή 0.002611 Hz και η δεύτερη 0.001958 Hz, για τον Y 0.010444 Hz και 0.001305 Hz και τέλος για τον Z 0.001305 Hz και 0.002611 Hz.

Abstract

Bridges as structures are an integral part of the human community as they serve daily needs for transportation. Regardless of the type, shape, and size, there are daily stresses and wear, so it is advisable to monitor them with precise methods. Such techniques are analyzed in numerous papers including the present one. This diploma thesis was prepared as part of the undergraduate level study program, on the Department of "Topography and Geoinformatics" of the "Topography" stream with an in-depth study of "Geodesy", of the "Engineering" faculty of the University of West Attica. It aims to present modern geodetic techniques for the geometric monitoring of bridges. Specifically, it focuses on the use of a 3D laser scanner for the geometric documentation of two full-body box-section bridges made of reinforced concrete in Petrou Ralli street and the utilization of robotic geodetic station observations to monitor their dynamic behavior. For this purpose, to create the three-dimensional model of each bridge and then to create measurement products for them, using a laser scanner, 26 scans were performed with an overlap of 60%, which were joined with an RMS accuracy of 9- 13 mm. Subsequently, floor plans and 35 cross-sections for the southern and 7 for the northern bridge were created. Field measurements were then carried out using a robotic geodetic station. Regarding the north bridge, two adhesive targets were used for observations with the "Sets of Angles" technique and two prisms for the "Tracking" technique without offering any appreciable result. Specifically, for the first technique, two series of measurements of 10 and 6 periods were carried out, while for the second, measurements were made for 1 minute with a measurement period of 2 sec, 1 sec, 0.5 sec, 0.2 sec, and 0.1 sec. On the contrary, for the southern bridge, measurements were made with the "Tracking" technique using four prisms placed at 8 points. One of the 4 prisms was placed to the left of the contraction-expansion joint above the abutment, while a second one was placed close to it to the right of the joint. In more detail, each point was measured with a duration of 15 minutes and a measurement frequency of 2Hz. The measurements took place without stopping the traffic of vehicles. The process of analyzing the resulting time series was done using the "fast Fourier transform" (FFT), whose results showed for the section between the two joints, three dominant natural frequencies for X-axis movement (0.001106 Hz, 0.001654 Hz, and 0.003053 Hz) two Y-axis (0.001109 Hz, and 0.002219 Hz) and three in vertical (0.001106 Hz, 0.001663 Hz, and 0.002205 Hz). Finally, regarding the section at the abutment, two dominant eigenfrequencies emerged for the movements in all three axes. For X the first has a value of 0.002611 Hz and the second 0.001958 Hz, for Y 0.010444 Hz and 0.001305 Hz, and finally for Z 0.001305 Hz and 0.002611 Hz.la

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	6
Abstract	7
1. Εισαγωγή	15
2. Κατηγοριοποίηση γεφυρών	17
2.1 Γενικός ορισμός της γέφυρας.....	17
2.2 Βασικά κατασκευαστικά μέρη γεφυρών	17
2.3 Είδη φορέων.....	18
2.4 Κατηγορίες γεφυρών	20
3. Συναφείς επιστημονικές εργασίες.....	23
4. Αποτύπωση γέφυρας με Laser Scanner	26
4.1 Εργασίες πεδίου	27
4.2 Επεξεργασία δεδομένων.....	28
4.3 Προβλήματα.....	29
4.4 Δημιουργία μετρητικών προϊόντων	31
5. Γεωδαιτικές μετρήσεις για την εκτίμηση της δυναμικής συμπεριφοράς των γεφυρών	36
5.1 Μετρήσεις πεδίου.....	36
5.1.1 Βόρεια γέφυρα	37
5.1.2 Νότια γέφυρα	39
5.2 Επεξεργασία δεδομένων.....	42
5.2.1 Βόρεια γέφυρα	44
5.2.2 Νότια γέφυρα	47
6. Ανάλυση χρονοσειρών.....	57
6.1 Κατακόρυφη μετακίνηση της γέφυρας	57
6.1.1 Τμήμα T1-T4	57
6.1.2 Τμήμα T5-T8	61
6.1.3 Φυσικές συχνότητες κατακόρυφης μετακίνησης νότιας γέφυρας.....	65
6.2 Κατά τον X άξονα μετακίνηση της γέφυρας.....	66
6.2.1 Τμήμα T1-T4	66
1.1.1 Τμήμα T5-T8	71
6.2.2 Φυσικές συχνότητες μετακίνησης κατά τον X άξονα νότιας γέφυρας..	74
6.3 Κατά τον Y άξονα μετακίνηση της γέφυρας.....	76
1.1.2 Τμήμα T1-T4	76

1.1.3	Τμήμα T5-T8	80
6.3.1	Φυσικές συχνότητες μετακίνησης κατά τον Υ άξονα νότιας γέφυρας..	84
7.	Συμπεράσματα	85
	Βιβλιογραφία	88
	Παραρτήματα.....	90
	Παράρτημα 1	90
	Παράρτημα 2.....	91
	Παράρτημα 3.....	92
	Διαγράμματα βόρειας γέφυρας με συχνότητα μέτρησης ανά 2 sec.....	92
	Διαγράμματα βόρειας γέφυρας με συχνότητα μέτρησης ανά 1 sec.....	95
	Διαγράμματα βόρειας γέφυρας με συχνότητα μέτρησης ανά 0.5 sec.....	98
	Διαγράμματα βόρειας γέφυρας με συχνότητα μέτρησης ανά 0.2 sec.....	101
	Διαγράμματα βόρειας γέφυρας με συχνότητα μέτρησης ανά 0.1 sec.....	104

Πίνακας εικόνων

Εικόνα 1	Τμηματικά μέρη από τα οποία συντίθεται η γέφυρα. (Μπισκίνης, 2016)...	17
Εικόνα 2	Είδη φορέων. (Βουθούνης, 2019).....	19
Εικόνα 3	Παράδειγμα γέφυρας με ολόσωμους συνεχείς φορείς. (Σαπουντζάκης, 2022)	20
Εικόνα 4	Παράδειγμα τοξωτής γέφυρας (γέφυρα Τσακώνας) (Σαπουντζάκης, 2022)	20
Εικόνα 5	Παράδειγμα καλωδιωτής γέφυρας (Νέα γέφυρα του Ευρίπου, Χαλκίδα). (Σαπουντζάκης, 2022).....	21
Εικόνα 6	Παράδειγμα κρεμαστής γέφυρας (γέφυρα Tsing Ma, Hong Kong). (Σαπουντζάκης, 2022).....	21
Εικόνα 7	Παράδειγμα γέφυρας με δοκούς (γέφυρα Lake Pontchartrain Causeway, Νότια Λουϊζιάνα). (Παναγιωτοπούλου, 2019)	22
Εικόνα 8	Παραδείγματα κινητών γεφυρών (Α) γέφυρα Shatt – Al – Arab, Iraq, Β) γέφυρα Haarlem Ολλανδία, Γ) γέφυρα καναλιού Cape Cod, Μασαχουσέτη. (Σαπουντζάκης, 2022).....	22
Εικόνα 9	Παράδειγμα πλωτής γέφυρας (γέφυρα Evergreen, Σιάτλ ΗΠΑ) (fortunegreece.com, 2015).....	22
Εικόνα 10	Θέση γεφυρών μελέτης.....	26
Εικόνα 11	Laser Scanner Leica BLK360. (leica-geosystems.com).....	26
Εικόνα 12	Διάταξη laser scanner για μετρήσεις πεδίου.....	27
Εικόνα 13	Dense Cloud γεφυρών σε θερμική (αριστερά) κα RGB (δεξιά) απεικόνιση.	29
Εικόνα 14	Θερμική απεικόνιση βόρειας γέφυρας έπειτα της αφαίρεσης τμήματος του περιβάλλοντα χώρου. Κάτοψη (αριστερά), άποψη (δεξιά).	29
Εικόνα 15	Ύπαρξη θορύβου λόγω νερού αυτόματου ποτισμού και παρουσίας ανθρώπων κατά την σάρωση.	30

Εικόνα 16 Αδυναμία αποτύπωσης τμήματος γέφυρας.....	30
Εικόνα 17 Μετακίνηση τμήματος σάρωσης σε σχέση με το υπόλοιπο μοντέλο.....	31
Εικόνα 18 Νέφη σημείων γεφυρών στο περιβάλλον του AutoCAD. A) Νότια γέφυρα, B) Βόρεια γέφυρα.	31
Εικόνα 19 Προοπτική απεικόνιση διατομών γεφυρών (αριστερά νότιας γέφυρας, δεξιά βόρειας γέφυρας).	33
Εικόνα 20 Leica Ts30. (leica-geosystems.com).....	36
Εικόνα 21 Θέση ανακλαστικού στόχου πάνω στην κολώνα της γέφυρας.....	37
Εικόνα 22 Θέση πρισμάτων στα δύο σημεία μέτρησης στον πρόβολο της γέφυρας.	39
Εικόνα 23 Θέσεις τοποθέτησης πρισμάτων στο μεγάλο τμήμα της γέφυρας.	41
Εικόνα 24 Θέσεις τοποθέτησης πρισμάτων στο τμήμα της γέφυρας με αρμό.	42
Εικόνα 25 Format πρωτογενών δεδομένων.	43
Εικόνα 26 Μορφή πρωτογενών δεδομένων στο περιβάλλον του Excel.....	43
Εικόνα 27 Αποτελέσματα της τεχνικής Sets of angles 10 περιόδων.	44
Εικόνα 28 Παράδειγμα μορφής αρχείου CSV (αφορά το σημείο αριστερά από τον αρμό στο μικρό τμήμα της γέφυρας).	48

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1 Κάτοψη και αριθμημένες γραμμές διατομών νότιας γέφυρας.	32
Σχήμα 2 Κάτοψη και αριθμημένες γραμμές διατομών βόρειας γέφυρας.	32
Σχήμα 3 Παράδειγμα κατόψεως κολώνας στήριξης της νότιας γέφυρας.	33
Σχήμα 4 Παράδειγμα τυπικών διατομών γέφυρας. Επάνω εμφανίζεται η διατομή D8, κάτω αριστερά η D18A και δεξιά η D18B.	34
Σχήμα 5 Τυπική διατομή D2 βόρειας γέφυρας.	35
Σχήμα 6 Θέση τοποθέτησης πρισμάτων στην γέφυρα.....	40
Σχήμα 7 Διαγράμματα διασποράς της τεχνικής Sets of angles 10 περιόδων.	45
Σχήμα 8 Διαγράμματα διασποράς της τεχνικής Sets of angles 6 περιόδων.	45
Σχήμα 9 Χρονοσειρές σημείου 1 βόρειας γέφυρας με συχνότητα μέτρησης 0.5 sec.	46
Σχήμα 10 Χρονοσειρές σημείου 2 βόρειας γέφυρας με συχνότητα μέτρησης 0.5 sec.	47
Σχήμα 11 Χρονοσειρές σημείου T1.....	49
Σχήμα 12 Χρονοσειρές σημείου T2.....	50
Σχήμα 13 Χρονοσειρές σημείου T3.....	51
Σχήμα 14 Χρονοσειρές σημείου T4.....	52
Σχήμα 15 Χρονοσειρές σημείου T5.....	53
Σχήμα 16 Χρονοσειρές σημείου T6.....	54
Σχήμα 17 Χρονοσειρές σημείου T7.....	55
Σχήμα 18 Χρονοσειρές σημείου T8.....	56
Σχήμα 19 Περιοδογράμματα κατά τον άξονα Z για το τμήμα T1-T4 (Πάνω αριστερά αφορά το T1, πάνω δεξιά το T2, κάτω αριστερά το T3 και κάτω δεξιά το T4).	57
Σχήμα 20 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα Z πάνω για το σημείο T1 όσον αφορά την 1 ^η επικρατέστερη περίοδο (T=1532), στην μέση για το T2 όσον αφορά την 1 ^η	

επικρατέστερη περίοδο ($T=1835$) και κάτω για το T3 όσον αφορά την 2 ^η επικρατέστερη περίοδο ($T=1802$).	59
Σχήμα 21 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα Z πάνω για το σημείο T2 όσον αφορά την 2 ^η επικρατέστερη περίοδο ($T=917.50$), στην μέση για το T3 όσον αφορά την 1 ^η επικρατέστερη περίοδο ($T=901$) και κάτω για το T4 όσον αφορά την 2 ^η επικρατέστερη περίοδο ($T=903$).	59
Σχήμα 22 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα Z για το σημείο T4 όσον αφορά την 1 ^η επικρατέστερη περίοδο ($T=602$).	60
Σχήμα 23 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα Z πάνω για το σημείο T2 όσον αφορά την 3 ^η επικρατέστερη περίοδο ($T=458.75$), κάτω για το T4 όσον αφορά την 3 ^η επικρατέστερη περίοδο ($T=451.50$).	60
Σχήμα 24 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα Z για το σημείο T1 όσον αφορά την 2 ^η επικρατέστερη περίοδο ($T=766$).	60
Σχήμα 25 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα Z για το σημείο T1 όσον αφορά την 3 ^η επικρατέστερη περίοδο ($T=383$).	61
Σχήμα 26 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα Z για το σημείο T3 όσον αφορά την 3 ^η επικρατέστερη περίοδο ($T=11.26$).	61
Σχήμα 27 Περιοδογράμματα κατά τον άξονα Z για το τμήμα T5-T8 (Πάνω αριστερά αφορά το T5, πάνω δεξιά το T6, κάτω αριστερά το T7 και κάτω δεξιά το T8).	61
Σχήμα 28 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα Z πάνω για το σημείο T5 όσον αφορά την 1 ^η επικρατέστερη περίοδο ($T=1802$), κάτω για το T6 όσον αφορά την 2 ^η επικρατέστερη περίοδο ($T=1802$).	63
Σχήμα 29 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα Z πάνω για το σημείο T5 όσον αφορά την 2 ^η επικρατέστερη περίοδο ($T=901$), στην μέση για το T6 όσον αφορά την 1 ^η επικρατέστερη περίοδο ($T=901$) και κάτω για το T7 όσον αφορά την 1 ^η επικρατέστερη περίοδο ($T=900.50$).	63
Σχήμα 30 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα Z πάνω για το σημείο T5 όσον αφορά την 3 ^η επικρατέστερη περίοδο ($T=600.67$), στην μέση για το T8 όσον αφορά την 3 ^η επικρατέστερη περίοδο ($T=601.33$) και κάτω για το T6 όσον αφορά την 3 ^η επικρατέστερη περίοδο ($T=450.50$).	64
Σχήμα 31 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα Z πάνω για το σημείο T7 όσον αφορά την 2 ^η επικρατέστερη περίοδο ($T=225.12$), κάτω για το T8 όσον αφορά την 1 ^η επικρατέστερη περίοδο ($T=257.71$).	64
Σχήμα 32 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα Z πάνω για το σημείο T7 όσον αφορά την 3 ^η επικρατέστερη περίοδο ($T=163.73$), κάτω για το T8 όσον αφορά την 2 ^η επικρατέστερη περίοδο ($T=106.12$).	65
Σχήμα 33 Περιοδογράμματα κατά τον άξονα X για το τμήμα T1-T4 (Πάνω αριστερά αφορά το T1, πάνω δεξιά το T2, κάτω αριστερά το T3 και κάτω δεξιά το T4).	67
Σχήμα 34 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα X το 1 ^ο για το σημείο T1 όσον αφορά την 1 ^η επικρατέστερη περίοδο ($T=1532$), στην συνέχεια για το T2 όσον αφορά την 1 ^η επικρατέστερη περίοδο ($T=1835$), έπειτα για το T3 όσον αφορά την 2 ^η επικρατέστερη περίοδο ($T=1802$) και τέλος, για το T4 όσον αφορά την 1 ^η επικρατέστερη περίοδο ($T=1806$).	68
Σχήμα 35 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα X πάνω για το σημείο T2 όσον αφορά την 2 ^η επικρατέστερη περίοδο ($T=917.50$), κάτω για το T4 όσον αφορά την 2 ^η επικρατέστερη περίοδο ($T=903$).	69

Σχήμα 36 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα X για το σημείο T1 όσον αφορά την 2 ^η επικρατέστερη περίοδο (T=383).....	69
Σχήμα 37 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα X για το σημείο T2 όσον αφορά την 3 ^η επικρατέστερη περίοδο (T=611.67).....	69
Σχήμα 38 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα X για το σημείο T1 όσον αφορά την 3 ^η επικρατέστερη περίοδο (T=510.67).....	70
Σχήμα 39 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα X για το σημείο T4 όσον αφορά την 3 ^η επικρατέστερη περίοδο (T=129).....	70
Σχήμα 40 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα X πάνω για το σημείο T3 όσον αφορά την 1 ^η επικρατέστερη περίοδο (T=10.54), κάτω για το T3 όσον αφορά την 3 ^η επικρατέστερη περίοδο (T=20.95).....	70
Σχήμα 41 Περιοδογράμματα κατά τον άξονα X για το τμήμα T5-T8 (Πάνω αριστερά αφορά το T5, πάνω δεξιά το T6, κάτω αριστερά το T7 και κάτω δεξιά το T8).	71
Σχήμα 42 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα X το 1 ^ο για το σημείο T5 όσον αφορά την 1 ^η επικρατέστερη περίοδο (T=1802), στην συνέχεια για το T6 όσον αφορά την 1 ^η επικρατέστερη περίοδο (T=1802), έπειτα για το T7 όσον αφορά την 1 ^η επικρατέστερη περίοδο (T=1801) και τέλος, για το T8 όσον αφορά την 1 ^η επικρατέστερη περίοδο (T=1804).	73
Σχήμα 43 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα X το 1 ^ο για το σημείο T5 όσον αφορά την 3 ^η επικρατέστερη περίοδο (T=901), στην συνέχεια για το T6 όσον αφορά την 2 ^η επικρατέστερη περίοδο (T=901), έπειτα για το T7 όσον αφορά την 2 ^η επικρατέστερη περίοδο (T=900.50) και τέλος, για το T8 όσον αφορά την 3 ^η επικρατέστερη περίοδο (T=902).	73
Σχήμα 44 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα X πάνω για το σημείο T5 όσον αφορά την 2 ^η επικρατέστερη περίοδο (T=600.67), κάτω για το T8 όσον αφορά την 2 ^η επικρατέστερη περίοδο (T=601.33).....	74
Σχήμα 45 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα X πάνω για το σημείο T6 όσον αφορά την 3 ^η επικρατέστερη περίοδο (T=300.33), κάτω για το T7 όσον αφορά την 3 ^η επικρατέστερη περίοδο (T=360.20).....	74
Σχήμα 46 Περιοδογράμματα κατά τον άξονα Y για το τμήμα T1-T4 (Πάνω αριστερά αφορά το T1, πάνω δεξιά το T2, κάτω αριστερά το T3 και κάτω δεξιά το T4).	76
Σχήμα 47 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα Y πάνω για το σημείο T1 όσον αφορά την 1 ^η επικρατέστερη περίοδο (T=1532), στην μέση για το T3 όσον αφορά την 1 ^η επικρατέστερη περίοδο (T=1802) και κάτω για το T4 όσον αφορά την 2 ^η επικρατέστερη περίοδο (T=1806).	77
Σχήμα 48 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα Y για το σημείο T4 όσον αφορά την 1 ^η επικρατέστερη περίοδο (T=903).....	78
Σχήμα 49 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα Y για το σημείο T3 όσον αφορά την 2 ^η επικρατέστερη περίοδο (T=450.50).....	78
Σχήμα 50 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα Y πάνω για το σημείο T3 όσον αφορά την 3 ^η επικρατέστερη περίοδο (T=300.33), κάτω για το T4 όσον αφορά την 3 ^η επικρατέστερη περίοδο (T=361.20).....	78
Σχήμα 51 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα Y για το σημείο T1 όσον αφορά την 3 ^η επικρατέστερη περίοδο (T=766).....	79
Σχήμα 52 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα Y για το σημείο T2 όσον αφορά την 1 ^η επικρατέστερη περίοδο (T=131.07).....	79

Σχήμα 53 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα Y για το σημείο T2 όσον αφορά την 3 ^η επικρατέστερη περίοδο (T=166.85).....	79
Σχήμα 54 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα Y για το σημείο T2 όσον αφορά την 2 ^η επικρατέστερη περίοδο (T=63.28).....	79
Σχήμα 55 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα Y για το σημείο T1 όσον αφορά την 2 ^η επικρατέστερη περίοδο (T=95.75).....	80
Σχήμα 56 Περιοδογράμματα κατά τον άξονα Y για το τμήμα T5-T8 (Πάνω αριστερά αφορά το T5, πάνω δεξιά το T6, κάτω αριστερά το T7 και κάτω δεξιά το T8).	80
Σχήμα 57 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα Y το 1 ^ο για το σημείο T5 όσον αφορά την 3 ^η επικρατέστερη περίοδο (T=1802), στην συνέχεια για το T6 όσον αφορά την 1 ^η επικρατέστερη περίοδο (T=1802), έπειτα για το T7 όσον αφορά την 1 ^η επικρατέστερη περίοδο (T=1801) και τέλος, για το T8 όσον αφορά την 1 ^η επικρατέστερη περίοδο (T=1804).	82
Σχήμα 58 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα Y το 1 ^ο για το σημείο T5 όσον αφορά την 1 ^η επικρατέστερη περίοδο (T=901), στην συνέχεια για το T6 όσον αφορά την 2 ^η επικρατέστερη περίοδο (T=901), έπειτα για το T7 όσον αφορά την 2 ^η επικρατέστερη περίοδο (T=900.50) και τέλος, για το T8 όσον αφορά την 2 ^η επικρατέστερη περίοδο (T=902).	83
Σχήμα 59 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα Y πάνω για το σημείο T6 όσον αφορά την 3 ^η επικρατέστερη περίοδο (T=450.50), στην μέση για το T7 όσον αφορά την 3 ^η επικρατέστερη περίοδο (T=450.25) και κάτω για το T8 όσον αφορά την 3 ^η επικρατέστερη περίοδο (T=451).....	83
Σχήμα 60 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα Y για το σημείο T5 όσον αφορά την 2 ^η επικρατέστερη περίοδο (T=46.21).....	83

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1 Τιμές σταθεράς πρισμάτων.	39
Πίνακας 2 Παράδειγμα πίνακα στατιστικών στοιχείων.....	44
Πίνακας 3 Στατιστικά στοιχεία μετρήσεων Tracking βόρειας γέφυρας για το σημείο 1.	46
Πίνακας 4 Στατιστικά στοιχεία μετρήσεων Tracking βόρειας γέφυρας για το σημείο 2.	47
Πίνακας 5 Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης σημείου T1.....	49
Πίνακας 6 Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης σημείου T2.....	50
Πίνακας 7 Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης σημείου T3.....	51
Πίνακας 8 Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης σημείου T4.....	52
Πίνακας 9 Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης σημείου T5.....	52
Πίνακας 10 Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης σημείου T6.....	53
Πίνακας 11 Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης σημείου T7.....	54
Πίνακας 12 Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης σημείου T8.....	55
Πίνακας 13 Αποτελέσματα ανάλυσης κατά τον Z άξονα για τα σημεία T1-T4.....	57
Πίνακας 14 Ομαδοποίηση αποτελεσμάτων κατά τον Z άξονα του τμήματος T1-T4.....	58
Πίνακας 15 Αποτελέσματα ανάλυσης κατά τον Z άξονα για τα σημεία T5-T8.....	62

Πίνακας 16	Ομαδοποίηση αποτελεσμάτων κατά τον Z άξονα τμήματος T5-T8.	62
Πίνακας 17	Ομαδοποίηση αποτελεσμάτων κατά τον Z άξονα συνολικού τμήματος γέφυρας.	65
Πίνακας 18	Φυσικές συχνότητες κατακόρυφης μετακίνησης νότιας γέφυρας.....	66
Πίνακας 19	Ιδιοσυχνότητες κατακόρυφης μετακίνησης νότιας γέφυρας στο τμήμα του ακρόβαθρου.	66
Πίνακας 20	Αποτελέσματα ανάλυσης κατά τον X άξονα για τα σημεία T1-T4.	67
Πίνακας 21	Ομαδοποίηση αποτελεσμάτων κατά τον X άξονα του τμήματος T1-T4.	67
Πίνακας 22	Αποτελέσματα ανάλυσης κατά τον X άξονα για τα σημεία T5-T8.	71
Πίνακας 23	Ομαδοποίηση αποτελεσμάτων κατά τον X άξονα του τμήματος T5-T8.	72
Πίνακας 24	Ομαδοποίηση αποτελεσμάτων κατά τον X άξονα συνολικού τμήματος γέφυρας.	75
Πίνακας 25	Φυσικές συχνότητες μετακίνησης κατά τον X άξονα νότιας γέφυρας. ..	75
Πίνακας 26	Φυσικές συχνότητες μετακίνησης κατά τον X άξονα νότιας γέφυρας στο τμήμα του ακρόβαθρου.....	76
Πίνακας 27	Αποτελέσματα ανάλυσης κατά τον Y άξονα για τα σημεία T1-T4.	76
Πίνακας 28	Ομαδοποίηση αποτελεσμάτων κατά τον Y άξονα του τμήματος T1-T4.	77
Πίνακας 29	Αποτελέσματα ανάλυσης κατά τον Y άξονα για τα σημεία T5-T8.	80
Πίνακας 30	Ομαδοποίηση αποτελεσμάτων κατά τον Y άξονα του τμήματος T5-T8.	81
Πίνακας 31	Ομαδοποίηση αποτελεσμάτων κατά τον Y άξονα συνολικού τμήματος γέφυρας.	84
Πίνακας 32	Φυσικές συχνότητες μετακίνησης κατά τον Y άξονα νότιας γέφυρας. ..	84
Πίνακας 33	Φυσικές συχνότητες μετακίνησης κατά τον Y άξονα νότιας γέφυρας στο τμήμα του ακρόβαθρου.....	84
Πίνακας 34	Τελικές φυσικές συχνότητες νότιας γέφυρας όσον αφορά και τις τρεις κατευθύνσεις.	86

1. Εισαγωγή

Η τεχνολογική πρόοδος στο πεδίο δραστηριοποίησης του τοπογράφου μηχανικού, έχει αποτελέσει κινητήριο μοχλό για την εφαρμογή των νέων δυνατοτήτων του εξοπλισμού για έρευνα ή μελέτη αντικειμένων, όπου παλαιότερα το μέγεθος του κόστους και του χρόνου που απαιτούνταν, εμπόδιζε την πλειοψηφία του κλάδου από την ενασχόληση με τέτοιου είδους εφαρμογές. Παράδειγμα τέτοιων αντικειμένων μελέτης αποτελεί η παρακολούθηση κατασκευών για τον προσδιορισμό των φυσικών συχνοτήτων τους. Πιο συγκεκριμένα, σε ότι αφορά τις γέφυρες, ήταν απαραίτητη η χρήση σειсмоγράφου ακριβείας έτσι ώστε να γίνουν αντιληπτές οι ταλαντώσεις μικρής χρονικής διάρκειας στην περίπτωση των μεταλλικών γεφυρών, ή ακόμα και οι ταλαντώσεις με μεγαλύτερη περίοδο όπου υφίστανται στις σκυροδετημένες. Τέτοια μηχανήματα όπου αξιοποιούνται από αυτού του είδους εφαρμογές είναι οι ρομποτικοί γεωδαιτικοί σταθμοί ή και ακόμα και οι σύγχρονοι δορυφορικοί δέκτες GNSS υπό την προϋπόθεση να εξασφαλιστούν με κάποιον τρόπο από τα φαινόμενα της πολυανακλαστικότητας κυρίως αλλά και των παρεμβολών στην περίπτωση όπου υπάρχουν.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται η χρήση του RTS της «Leica» «TS30», στην παρατήρηση δύο ολόσωμων κιβωτοειδούς διατομής γεφυρών κατασκευασμένες από οπλισμένο σκυρόδεμα, με σκοπό τον προσδιορισμό των φυσικών συχνοτήτων τους. Επιπλέον, έλαβε χώρα με χρήση του σαρωτή λέιζερ «BLK 360» της «Leica» η τρισδιάστατη αποτύπωση τους, έτσι ώστε να προσδιοριστούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους, προσφέροντας κατά αυτόν τον τρόπο την καλύτερη δυνατή γνώση του αντικειμένου μελέτης. Παρακάτω, περιγράφονται συνοπτικά τα επτά κεφάλαια από τα οποία αποτελείται η παρούσα εργασία.

Στο [Κεφάλαιο 2](#) παρουσιάζονται γενικά οι κατηγορίες των γεφυρών, τα επιμέρους κατασκευαστικά τμήματα από τα οποία αποτελούνται, καθώς και τα συνηθέστερα είδη φορέων όπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κατασκευές, έτσι ώστε να μπορέσει να γίνει αντιληπτό το είδος κατασκευής των γεφυρών μελέτης.

Στο [Κεφάλαιο 3](#) παρουσιάζονται έξι επιλεγμένες εργασίες που έχουν ασχοληθεί με την παρακολούθηση γεφυρών χρησιμοποιώντας γεωδαιτικά δεδομένα. Ο λόγος ύπαρξης του εν λόγω κεφαλαίου στην παρούσα διπλωματική είναι η ευρύτερη γνώση όπου προσφέρει για τον τρόπο χειρισμού της εκάστοτε περίπτωσης σε παρόμοια θέμα.

Στο [Κεφάλαιο 4](#) παρουσιάζονται οι εργασίες αποτύπωσης των δύο γεφυρών με Laser Scanner και οι επεξεργασίες των δεδομένων του, με στόχο την γεωμετρική τους τεκμηρίωση. Το κεφάλαιο αυτό διακρίνεται στα εξής υποκεφάλαια:

- Εργασίες πεδίου,
- Επεξεργασία δεδομένων,
- Προβλήματα,
- Δημιουργία μετρητικών προϊόντων.

Στο [Κεφάλαιο 5](#) παρουσιάζονται οι εργασίες για την παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς των δύο γεφυρών με χρήση ρομποτικού γεωδαιτικού σταθμού. Για τον σκοπό αυτό, όσον αφορά την μία γέφυρα χρησιμοποιήθηκαν δύο αυτοκόλλητοι ανακλαστικοί στόχοι όπου αξιοποιήθηκαν κατά την εφαρμογή της τεχνικής Sets of

Angles της «Leica» και ένα πρίσμα της «Leica» τοποθετημένο σε δύο θέσεις για την τεχνική του Tracking, ενώ στην περίπτωση της δεύτερης γέφυρας, πραγματοποιήθηκε μόνο η τεχνική του Tracking σε 8 διαφορετικά σημεία της. Το κεφάλαιο αυτό διακρίνεται λοιπόν στα εξής υποκεφάλαια:

- Μετρήσεις πεδίου,
- Επεξεργασία δεδομένων.

Στο [Κεφάλαιο 6](#) παρουσιάζονται η διαδικασία και τα αποτελέσματα της ανάλυσης των χρονοσειρών. Πιο συγκεκριμένα, απεικονίζονται μεταξύ άλλων τα διαγράμματα του FFT και αναφέρονται οι φυσικές συχνότητες της γέφυρας. Το κεφάλαιο αυτό διακρίνεται λοιπόν στα εξής υποκεφάλαια:

- Κατακόρυφη μετακίνηση της γέφυρας,
- Κατά τον Χ άξονα μετακίνηση της γέφυρας,
- Κατά τον Υ άξονα μετακίνηση της γέφυρας.

Στο [Κεφάλαιο 7](#) συνοψίζονται τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αναφέροντας παράλληλα το πλήθος των παρατηρήσεων και συμπερασμάτων που προέκυψαν από το σύνολο των εργασιών και παραθέτονται τυχόν ιδέες για την βελτίωση παρόμοιων μελετών ή για την αξιοποίηση τους από το ευρύτερο επιστημονικό κλάδο.

2. Κατηγοριοποίηση γεφυρών

Σε αυτό το κεφάλαιο αναφέρονται περιληπτικά τα βασικά χαρακτηριστικά των γεφυρών και η ταξινόμηση τους σε ομάδες βάσει ορισμένων κοινών στοιχείων.

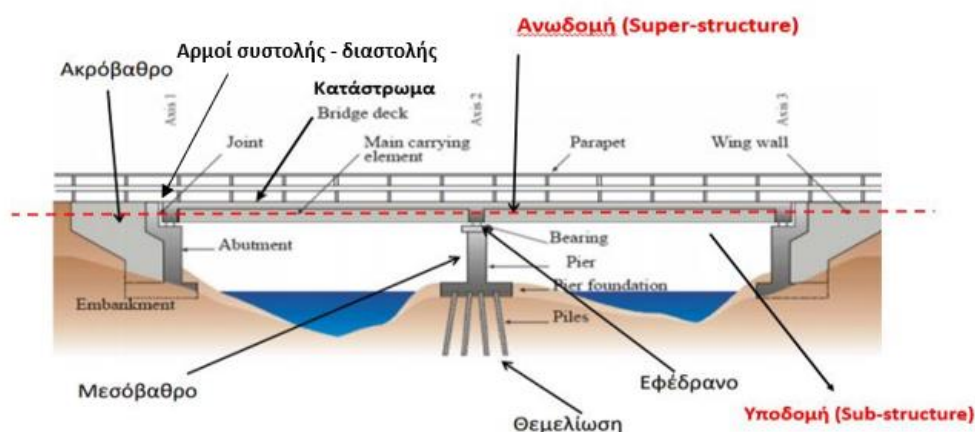
2.1 Γενικός ορισμός της γέφυρας

Γέφυρα είναι το δόμημα με το οποίο γίνεται η μετάβαση από μία θέση Α σε μία άλλη Β, η οποία χωρίς τη γέφυρα θα ήταν αδύνατη ή πάντως δυσχερέστερη. (Σαουντζάκης, 2022). Τέτοιες περιπτώσεις είναι για παράδειγμα η μετάβαση από την μία πλευρά ενός ποταμού ή μιας χαράδρας στην άλλη.

Οι υπό μελέτη γέφυρες σε αυτήν την εργασία είναι ολόσωμες, δηλαδή συνεχής, κιβωτοειδούς διατομής, κατασκευασμένες από οπλισμένο σκυρόδεμα.

2.2 Βασικά κατασκευαστικά μέρη γεφυρών

Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται τα τμήματα μίας γέφυρας. Συγκεκριμένα, με κόκκινο χρώμα αναγράφονται οι δύο ενότητες όπου κατατάσσονται τα δομικά μέλη μιας γέφυρας (Ανωδομή, υποδομή), ενώ με μαύρο τα στοιχεία που ανήκουν στην κάθε μία από αυτές τις δύο κατηγορίες.



Εικόνα 1 Τμηματικά μέρη από τα οποία συντίθεται η γέφυρα. (Μπισκίνης, 2016)

Πιο αναλυτικά στην **ανωδομή** πέρα των ακόλουθων στοιχείων που αναλύονται περιλαμβάνονται τα πεζοδρόμια, το δίκτυο απορροής υδάτων, τα στηθαία ασφαλείας, τα μέσα φωτισμού και ειδοποίησης των οδηγών και τυχόν δίκτυα καλωδίων.

➤ **Κατάστρωμα (bridge deck)**

Η κατασκευή του γίνεται συνήθως από οπλισμένο ή σύμμικτο σκυρόδεμα, σε ποικίλες σχεδιαστικές μορφές. Αποτελείται από δύο μέρη, από την πλάκα όπου ανάλογα με το είδος χρήσης της γέφυρας τοποθετείται το αντίστοιχο υλικό επίστρωσης και τους δοκούς οι οποίοι στηρίζουν την πλάκα πάνω στα βάθρα. (Παναγιωτοπούλου, 2019)

➤ **Αρμοί συστολής – διαστολής (expansion joints)**

Οι αρμοί είναι μηχανισμοί που μπορεί να είναι έγχυτης μορφής προκατασκευασμένοι από χάλυβα και ελαστικό υλικό, οι οποίοι βρίσκονται στα σημεία ασυνέχειας του καταστρώματος. (Παναγιωτοπούλου, 2019)

Όσον αφορά την **υποδομή**, πέρα των παρακάτω στοιχείων, ανήκει η θεμελίωση της γέφυρας όπου εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες όπως για παράδειγμα το είδος του εδάφους και το μέγεθος της γέφυρας.

➤ **Ακρόβαθρα (abutments)**

Συνήθως είναι κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα ποικίλους μεγέθους και σχήματος που εξαρτάται από την χρήση και τις διαστάσεις του φορέα της γέφυρας, ενώ παράλληλα συνηθίζεται να διαθέτουν περυγότοιχους οι οποίοι έχουν ως ρόλο την συγκράτηση του επιχώματος δεξιά και αριστερά του ακροβάθρου. Είναι το μέσο στήριξης της αρχής και του τέλους της ανωδομής. (Παναγιωτοπούλου, 2019)

➤ **Μεσόβαθρα (column, piers, bent)**

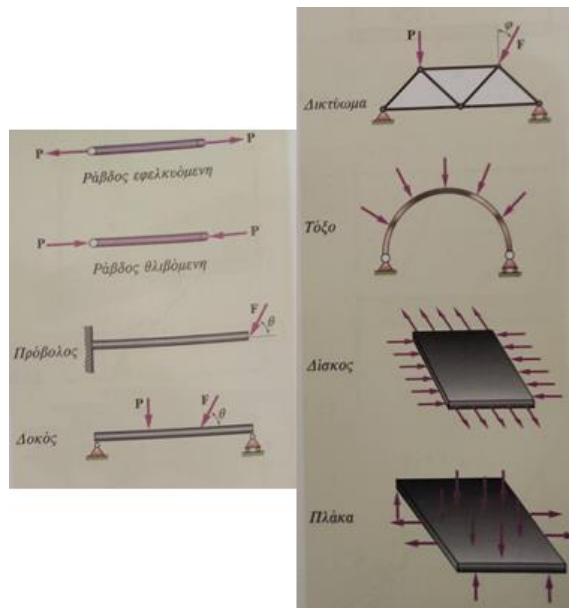
Αποτελούν το μέσο στήριξης της ανωδομής ανάμεσα στα ακρόβαθρα. Είναι κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα και η ύπαρξη τους εξαρτάται από τις ανάγκες στήριξης της γέφυρας (σε μικρές γέφυρες είναι πιθανό να μην κρίνεται αναγκαία η ύπαρξη τους). (Παναγιωτοπούλου, 2019)

➤ **Εφέδρανα (bearings)**

Αποτελούν τον μηχανισμό μεταφοράς των δυνάμεων και μετατοπίσεων όπου ασκούνται στην ανωδομή στην υποδομή. Είναι είτε μεταλλικές κατασκευές, είτε συνδυασμός χάλυβα – ελαστικού υλικού. (Παναγιωτοπούλου, 2019) Τα εφέδρανα καθώς αποτελούν τον συνδετικό κρίκο της υποδομής με την ανωδομή θα μπορούσε να θεωρηθούν ότι ανήκουν και στις δύο ενότητες.

2.3 Είδη φορέων

Φορέας ονομάζεται γενικά κάθε σώμα ή κατασκευή που μπορεί με ασφάλεια να φέρει εξωτερικά φορτία, τα οποία και μεταφέρει στις στηρίξεις του. Διαμέσου των στηρίξεων τα φορτία καταλήγουν τελικά στο έδαφος, ή σε κάποια άλλη μεγαλύτερη κατασκευή. (Βουθούνης, 2019)



Εικόνα 2 Είδη φορέων. (Βουθούνης, 2019)

Οι βασικοί φορείς που χρησιμοποιούνται στο σύνολο των κατασκευών και επομένως και στις γέφυρες διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

- **Ράβδος**
Σώμα του οποίου το μήκος είναι πολύ μεγαλύτερο των άλλων του διαστάσεων και διαθέτει έναν ευθύγραμμο άξονα συμμετρίας. Μπορεί να δεχτεί μόνον εφελκυσμό ή θλίψη σε κάθε περίπτωση. (Βουθούνης, 2019)
- **Δοκός**
Σώμα που το μήκος του είναι μεγαλύτερο των άλλων διαστάσεων και έχει έναν ευθύγραμμο άξονα συμμετρίας. Καταπονείται από αξονικά και εγκάρσια φορτία, καθώς και από συγκεντρωμένες ροπές. Διακρίνεται σε αμφιέρειστες, πρόβλους κ.λπ. (Βουθούνης, 2019)
- **Πλαίσιο**
Αποτελείται από άθροισμα δοκών όπου η μία είναι πακτωμένη στην άλλη. Το σημείο της ένωσης ως εσωτερική πάκτωση. (Βουθούνης, 2019)
- **Τόξο**
Δοκός με καμπύλο άξονα (τόξο κύκλου, τετραγωνική παραβολή, κυβική παραβολή κ.λπ.). (Βουθούνης, 2019)
- **Δικτύωμα**
Φορέας ο οποίος αποτελείται από ράβδους ενωμένες μέσω αρθρώσεων. Φορτίζεται με δυνάμεις που εφαρμόζονται στους κόμβους. (Βουθούνης, 2019)
- **Δίσκος**
Επίπεδο σώμα με πάχος μικρότερο των άλλων του διαστάσεων. Καταπονείται από εφελκυστικές ή θλιπτικές δυνάμεις οι οποίες δρουν στο επίπεδο του. (Βουθούνης, 2019)
- **Πλάκα**
Επίπεδο σώμα με πάχος μικρότερο των άλλων του διαστάσεων. Επιπλέον των δυνάμεων που δρουν στον δίσκο δέχεται και εγκάρσια φορτία. (Βουθούνης, 2019)

- **Κέλυφος**
Σώμα με πάχος μικρότερο των άλλων του διαστάσεων του οποίου η μέση του επιφάνεια δεν είναι επίπεδη αλλά καμπύλη. (Βουθούνης, 2019)
- **Σύνθετος**
Ονομάζεται ο φορέας που αποτελείται από τον συνδυασμό δύο τουλάχιστον ειδών από τις παραπάνω περιπτώσεις. (Βουθούνης, 2019)

2.4 Κατηγορίες γεφυρών

- **Γέφυρα με ολόσωμους/συνεχείς φορείς**



Εικόνα 3 Παράδειγμα γέφυρας με ολόσωμους συνεχείς φορείς. (Σαουντζάκης, 2022)

Αποτελείται από παράλληλες δοκούς οι οποίες υποστηρίζουν εγκάρσια το κατάστρωμα. Η χρήση των μεσόβαθρων παρουσιάζεται στις περιπτώσεις που κρίνεται αναγκαία. Τέλος, τα ανοίγματα είναι σχετικά μικρά. (Σαουντζάκης, 2022)

- **Τοξωτή γέφυρα**
Έχουν ως κύριο χαρακτηριστικό τον τοξωτό φορέα στον οποίο στηρίζεται ή αναρτάται ο φορέας του καταστρώματος. (Σαουντζάκης, 2022)



Εικόνα 4 Παράδειγμα τοξωτής γέφυρας (γέφυρα Τσακόνας) (Σαουντζάκης, 2022)

➤ **Καλωδιωτή γέφυρα**

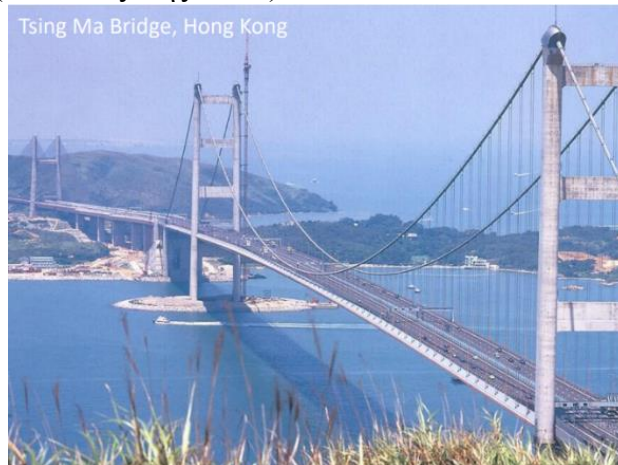


Εικόνα 5 Παράδειγμα καλωδιωτής γέφυρας (Νέα γέφυρα του Ευρίπου, Χαλκίδα). (Σαπουντζάκης, 2022)

Καλύπτουν την περιοχή εφαρμογής από 60 μέτρα έως και τα 900 μέτρα. Τα καλώδια στα οποία είναι αναρτώμενο το κατάστρωμα στηρίζονται στους κεντρικούς πυλώνες και μπορούν να είναι είτε λοξά είτε κατακόρυφα στο κατάστρωμα. Η κατασκευή τους είναι ταχύτερη και οικονομικότερη των κρεμαστών, παρόλα αυτά υπάρχει περιορισμός στο μήκος των ανοιγμάτων. (Σαπουντζάκης, 2022)

➤ **Κρεμαστή γέφυρα**

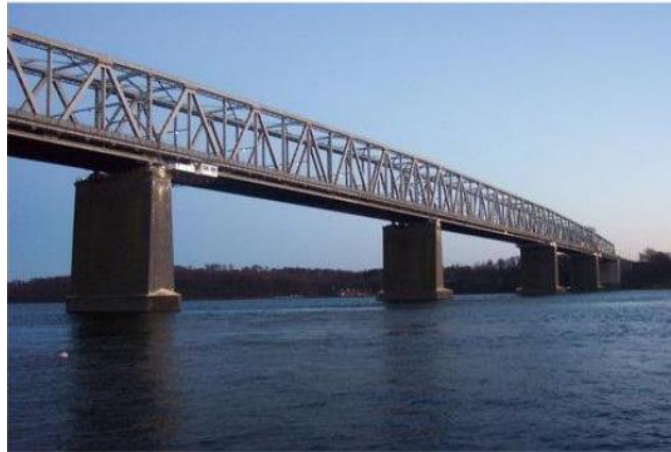
Τα κατακόρυφα καλώδια υποστηρίζουν το βάρος του καταστρώματος, τα οποία με την σειρά τους κρέμονται από δύο ή περισσότερους πυλώνες. Κατασκευάζονται για ένωση δυο σημείων σε μεγάλη απόσταση (>900 μέτρων), καθώς έχουν ως πλεονέκτημα τα μεγάλα ανοίγματα που υποστηρίζουν, παρόλα αυτά επηρεάζονται από τον άνεμο και είναι επιρρεπείς σε εγκάρσιες ταλαντώσεις. (Σαπουντζάκης, 2022)



Εικόνα 6 Παράδειγμα κρεμαστής γέφυρας (γέφυρα Tsing Ma, Hong Kong). (Σαπουντζάκης, 2022)

➤ **Γέφυρα με δοκούς**

Αποτελείται από οριζόντιες αμφιαρθωτές δοκούς που υποστηρίζονται στα άκρα τους με στηρίξεις. Στην περίπτωση ύπαρξης περισσότερων του ενός ανοίγματος η υποστήριξη των ενδιάμεσων γίνεται με πυλώνες. Το βάρος του καταστρώματος ασκείται στην χαλύβδινη δοκό και ωθεί τα βάθρα της γέφυρας προς τα κάτω.



Εικόνα 7 Παράδειγμα γέφυρας με δοκούς (γέφυρα Lake Pontchartrain Causeway, Νότια Λοιζιάνα). (Παναγιωτοπούλου, 2019)

➤ Κινητή γέφυρα



Εικόνα 8 Παραδείγματα κινητών γεφυρών (Α) γέφυρα Shatt – Al – Arab, Iraq, (Β) γέφυρα Haarlem Ολλανδία, (Γ) γέφυρα καναλιού Cape Cod, Μασαχουσέτη. (Σαπουντζάκης, 2022)

Είναι η γέφυρα η οποία έχει κάποιο κινητό τμήμα της. Μπορεί να είναι περιστρεφόμενες, ανοιγόμενες ή γέφυρες που ανασηκώνεται το κατάστρωμα. Σκοπός τους είναι διευκόλυνση του περάσματος των πλωτών μέσων σε περιπτώσεις όπου διαφορετικά ήταν αδύνατον να διασχίσουν την γέφυρα από κάτω. (Σαπουντζάκης, 2022)

➤ Πλωτή γέφυρα



Εικόνα 9 Παράδειγμα πλωτής γέφυρας (γέφυρα Evergreen, Σιάτλ ΗΠΑ) (fortunegreece.com, 2015)

Βασικό χαρακτηριστικό τους είναι ότι με την υποστήριξη πλωτών μέσων, επιπλέον και μπορούν να αποσυναρμολογηθούν και να μεταφερθούν σε νέα θέση. (Σαπουντζάκης, 2022)

3. Συναφείς επιστημονικές εργασίες

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναφερθούν επιγραμματικά οι εργασίες που χρησιμοποιήθηκαν και ως πηγές για την ορθότερη διεκπεραίωση του θέματος της παρούσας διπλωματικής.

- ❖ Στην πτυχιακή εργασία με τίτλο «*Evaluation of Laser Scanning Technology for Bridge Inspection*» του Cihan Meral από το Πανεπιστήμιο Drexel που έλαβε χώρα τον Μάρτιο του 2011, αξιολογείται η χρήση του laser scanner στην επιθεώρηση μιας γέφυρας με μεταλλικές δοκούς, έχοντας γνωστά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της. Το όργανο που χρησιμοποιείται είναι ένα laser scanner υψηλής ακρίβειας της Leica, καθώς και το λογισμικό επεξεργασίας των δεδομένων (Cyclone). Πιο αναλυτικά το αντικείμενο μελέτης σαρώνεται από τέσσερα διαφορετικά σημεία ρυθμίζοντας το όργανο σε μέτρια ακρίβεια. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται έντεκα αυτοκόλλητοι στόχοι σωστά καταναμημένοι (μη συνευθειακά) σε ορατές θέσεις από διαφορετικές στάσεις. Συνδυαστικά με το laser scanner χρησιμοποιείται ένας γεωδαιτικός σταθμός για τον εντοπισμό των στόχων που δεν είναι ευδιάκριτοι από την συγκεκριμένη στάση. Το registration γίνεται με μη αυτόματο τρόπο για αποτελέσματα μεγαλύτερης ακρίβειας. Στην συνέχεια, δημιουργείται ένα 3D μοντέλο. Τέλος, χρησιμοποιείται το λογισμικό AutoCAD για να μετρηθούν οι διαστάσεις του κάθε τμήματος της γέφυρας. Συνοψίζοντας, τα αποτελέσματα της εργασίας δείχνουν ότι το laser scanner μπορεί να δώσει αποτελέσματα υψηλής ακρίβειας με μεγαλύτερη πυκνότητα σημείων σε λιγότερο χρόνο από άλλες τεχνικές.
- ❖ Στο άρθρο των B. Riveiro, H. González-Jorge, M. Varela, D.V. Jauregui, με τίτλο «*Validation of terrestrial laser scanning and photogrammetry techniques for the measurement of vertical underclearance and beam geometry in structural inspection of bridges*», αξιολογούνται οι τεχνικές της επίγειας φωτογραμμετρίας και της αποτύπωσης με laser scanner πάνω στις μετρήσεις των γεωμετρικών χαρακτηριστικών κατά την διάρκεια επιθεωρήσεις γεφυρών. Πιο αναλυτικά, χρησιμοποιήθηκε ο γεωδαιτικός σταθμός της Leica TCR1102 ως όργανο αναφοράς, το οποίο έχει ακρίβεια μέτρησης γωνιών τα 2" και απόσταση 2 mm + 2 ppm. Το laser scanner ήταν το Riegl LMS Z390i, το οποίο έχει εύρος μέτρησης από 1.5 m έως τα 400m με ακρίβεια τα 6 mm στα 50 m σε συνθήκες κανονικού φωτισμού και ανακλαστικότητας. Τέλος, χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις κάμερες με διαφορετικά χαρακτηριστικά για την ορθότερη σύγκριση των αποτελεσμάτων: Canon 5D Mark II, Canon 10D, Canon 450D, Canon 1000D. Συγκεκριμένα, τοποθετήθηκε το laser scanner σε απόσταση περίπου 25 μέτρων από την γέφυρα και σε σημείο ώστε να μην διαταράσσεται η συλλογή των δεδομένων από την κυκλοφορία. Το λογισμικό για την επεξεργασία της σάρωσης ήταν το «Riscan Pro». Αρχικά, έγινε μία πρώτη σάρωση με γωνιακή ακρίβεια 0.2° και με το που εντοπίστηκαν τα σημεία ενδιαφέροντος πραγματοποιήθηκε μία νέα πιο αναλυτική σάρωση. Στην συνέχεια, πάρθηκαν με την μέγιστη δυνατή ανάλυση τρεις φωτογραφίες σε διαφορετική θέση από κάθε κάμερα. Οι εικόνες επεξεργάστηκαν με το λογισμικό «Photomodeler». Όσον αφορά το Total station, τοποθετήθηκε σε

κοντινή απόσταση από το laser scanner και μετρήθηκαν ορισμένα σημεία ενδιαφέροντος των οποίων οι τιμές οι οποίες θα τους αποδίδονταν από τον γεωδαιτικό σταθμό, θα ήταν οι «πραγματικές τιμές». Έπειτα στις εργασίες γραφείου κατά την επεξεργασία ακολουθήθηκε μία σειρά ελέγχων και αξιολόγησης των αποτελεσμάτων, των οποίων τα ευρήματα έδειξαν ότι η επιλογή να χρησιμοποιηθεί το total station ως όργανο αναφοράς ήταν σωστή. Το πρόγραμμα που βοήθησε στον έλεγχο αυτό ήταν το Matlab. Τέλος, έγινε χρήση μίας πολυωνυμικής εξίσωσης δεύτερης τάξης όπου έδειξε βαθμό συσχέτισης για τον γεωδαιτικό σταθμό 0.9999, για το laser scanner 0,999 και για τις κάμερες 0,998. Συννοίζοντας, τα αποτελέσματα έδειξαν μέγιστη διαφορά 2 cm μεταξύ των διαφορετικών τεχνικών, κάτι που σημαίνει ότι και οι τρεις μέθοδοι δίνουν αξιόλογα αποτελέσματα.

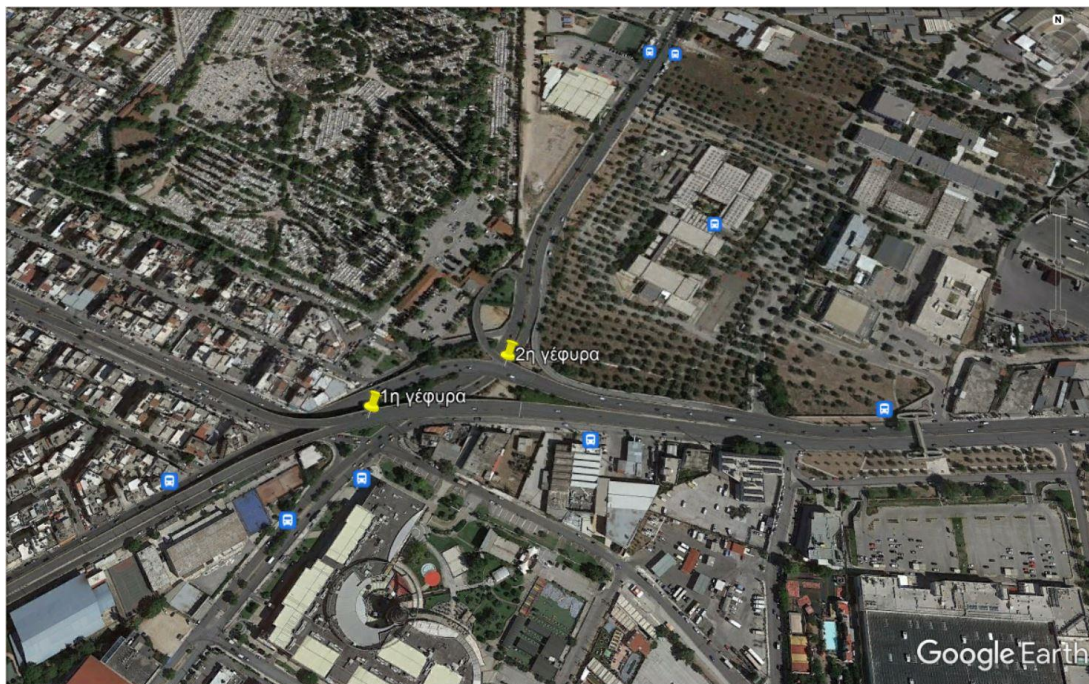
- ❖ Στο άρθρο του Παναγιώτη Ψιμούλη και του Στάθη Στείρου με τίτλο «*Measuring Deflections of a Short-Span Railway Bridge Using a Robotic Total Station*» μελετιούνται οι παραμορφώσεις που υφίστανται στην σιδηροδρομική γέφυρα του Γοργοποτάμου. Συγκεκριμένα, τοποθετήθηκε σε τμήμα ανάμεσα των κολώνων πρίσμα υψηλής ακριβείας και στην κορυφή του ένας δορυφορικός δέκτης ο οποίος χρησιμοποιήθηκε ως χρονογράφος. Παρόλα αυτά όπως αναφέρεται, δεν έδωσε αξιόλογα αποτελέσματα λόγω των πολλαπλών αντανάκλασεων (multipath) από τα διερχόμενα τρένα. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε το RTS της «Leica» 1201 το οποίο μετρούσε με συχνότητα 5-7 Hz. Οι μετρήσεις έλαβαν χώρα στις πρωινές καλοκαιρινές ώρες για να αποφευχθεί η έντονη ατμοσφαιρική διάθλαση. Τα αποτελέσματα έδωσαν μετατοπίσεις εύρους ± 1.6 mm για την περίπτωση όπου δεν υπήρχε διέλευση κάποιου τρένου και 2.5 - 6 mm όταν περνάγανε.
- ❖ Στο άρθρο με τίτλο «*High frequent total station measurements for the monitoring of bridge vibrations*», των Werner Lienhart, Matthias Ehrhart και Magdalena Grick, αξιολογείται το παραπάνω άρθρο του Ψιμούλη και Στείρου σε εργαστηριακό επίπεδο και διαπιστώνεται ότι με την συχνότητα μέτρησης που πραγματοποιήθηκε μπορούν να ανιχνευτούν μόνο φυσικές συχνότητες μικρότερες των 4.5 Hz. Επιπλέον, σκοπός του άρθρου είναι η αύξηση της συχνότητας μέτρησης στα 20 Hz. Με την τεχνική του ATR (Automatic Target Recognition) και μέτρησης μόνο γωνιών με ρομποτικά όργανα RTS (Robotic Total Station), με την χρήση οργάνων με υψηλότερο ρυθμό μέτρησης απόστασης με αισθητήρες EDM (Electronic Distance Measuring Device) και τέλος, με χρήση οργάνων IATS (Image Assisted Total Stations). Οι συχνότητες που επιτεύχθηκαν ήταν: με IATS 10 Hz, με RTS 20 Hz, ενώ με επιταχυνσιόμετρο 200 Hz.
- ❖ Στο άρθρο με τίτλο «*Monitoring of oscillations and frequency analysis of the railway bridge "Sava" using robotic total station*», των A. Marendić, R. Paar, I. Grgac και D. Damjanović, μελετάται η μεταλλική σιδηροδρομική γέφυρα «Sava» που βρίσκεται στην περιοχή Ζάγκρεμπ, ως προς τις ταλαντώσεις που υφίσταται και έπειτα για την εύρεση της ιδιοσυχνότητας της με χρήση δύο

μοντέλων RTS (το ένα με συχνότητα μέτρησης 10 Hz και το άλλο με 20 Hz). Όσον αφορά και τα δύο όργανα έγινε χρήση ειδικού λογισμικού μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή έτσι ώστε να επιτευχθεί η μεγαλύτερη δυνατή συχνότητα μέτρησης. Και τα δύο RTS μετρούσαν το ίδιο πρίσμα ταυτόχρονα. Οι μετρήσεις αφορούν δύο περιπτώσεις. Κατά την πρώτη διασχίζουν την γέφυρα δύο τρένα με μικρή ταχύτητα ταυτόχρονα και στην δεύτερη περίπτωση περνούν με μεγαλύτερη ταχύτητα και με μία μικρή χρονική διαφορά. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για το πρώτο γεγονός, δείχνουν μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση της τάξεως των 6.8 εκατοστών, ενώ στην δεύτερη περίπτωση οι τιμές ήταν σαφώς μικρότερες (3.8 cm από το ένα όργανο και 3.9 cm από το δεύτερο). Τα δύο όργανα έδωσαν μέγιστη απόκλιση των μεταξύ τους μετρήσεων ± 2.2 mm. Τέλος, για την εύρεση της φυσικής συχνότητας της γέφυρας χρησιμοποιήθηκε ο γρήγορος μετασχηματισμός Fourier FFT (**F**ast **F**ourier **T**ransform). Οι πρώτες πέντε φυσικές συχνότητες που υπολογίστηκαν ήταν 1.56 Hz, 2.97 Hz για τις κατακόρυφες μετατοπίσεις και 1.02 Hz, 1.95 Hz και 2.73 Hz για τις πλάγιες.

- ❖ Στο άρθρο με τίτλο «*A Comparative Study of Signal Processing Methods for Contactless Geodetic Monitoring*», των Samo Lubej και Boštjan Kovačić, συγκρίνονται οι μετρήσεις από δύο RTS και ενός δέκτη GNSS και ενός σειсмоγράφου για την παρακολούθηση της μεταλλικής πεζογέφυρας στον ποταμό Drava στην Σλοβενία. Το RTS TS30 είχε συχνότητα μέτρησης 6-10 Hz, το TS50 με χρήση GeoCOM/ZG 26-30 Hz, ο δέκτης GNSS Topcon Hiper Pro 10 Hz, ενώ σειсмоγράφος Instantel Minimate Plus 250 Hz. Τέλος, τα δεδομένα που πάρθηκαν επεξεργάστηκαν χρησιμοποιώντας τον FFT και τον τύπο του περιοδογράμματος LS (**L**omb – **S**cargle periodogram). Τα ευρήματα έδειξαν ότι η χρήση του δέκτη GNSS είναι σκόπιμη για περιπτώσεις όπου υφίστανται μεγάλες μετακινήσεις και αρκεί μικρή συχνότητα μέτρησης, ενώ τα RTS με συχνότητες 6-26 Hz μπορούν να προσφέρουν αξιόλογα αποτελέσματα ανάλογα κάθε φορά με τις φυσικές συχνότητες που έχει η κάθε γέφυρα.

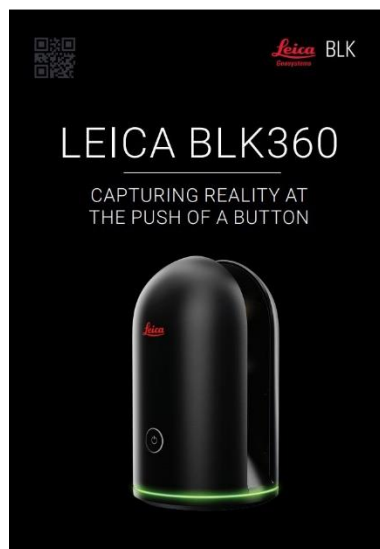
4. Αποτύπωση γέφυρας με Laser Scanner

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτυπώνονται με την τεχνική του Laser Scanner δύο γέφυρες με εφάδρανα, οι οποίες βρίσκονται στην περιοχή των συνόρων Νίκαιας, Αγ. Ιωάννη Ρέντη και Αιγάλεω, στην συμβολή των οδών Πέτρου Ράλλη, Γρηγορίου Λαμπράκη και Θηβών. Η διαδικασία αυτή, κρίθηκε απαραίτητη καθώς δεν υπήρχε κάποια γεωμετρική πληροφορία για τις συγκεκριμένες κατασκευές.



Εικόνα 10 Θέση γεφυρών μελέτης.

Για τον σκοπό της εργασίας και της απαιτούμενης ακρίβειας κρίθηκε ικανοποιητικό να χρησιμοποιηθεί το όργανο BLK 360 της Leica Geosystems όπου παρέχει ακρίβεια περίπου του 1 cm και γρήγορο χρόνο σάρωσης των μερικών λεπτών (3-5 λεπτά). Περισσότερες πληροφορίες για το όργανο αναφέρονται στο [παράρτημα 1](#). Στα πλαίσια των αναγκών της διπλωματικής, το όργανο έχει ρυθμιστεί στο medium και όχι στο μέγιστο, έτσι ώστε το αρχείο της κάθε σάρωσης να είναι μικρότερο σε μέγεθος και παράλληλα μειώνεται και ο χρόνος της κάθε σάρωσης. Παρακάτω θα αναλυθούν τα στάδια των εργασιών από το πεδίο έως και την επεξεργασία των δεδομένων και την δημιουργία του τελικού αποτελέσματος.



Εικόνα 11 Laser Scanner Leica BLK360. (leica-geosystems.com)

4.1 Εργασίες πεδίου

Αρχικά, στην περιοχή μελέτης γίνεται μία γρήγορη αξιολόγηση της μορφολογίας του τόπου και των δυνητικών στάσεων, βασιζόμενοι ότι η επιθυμητή αλληλοεπικάλυψη των σαρώσεων είναι της τάξεως του 60%. Όπως είναι λογικό σε πραγματικές επίγειες συνθήκες δεν είναι δυνατή η ακριβής επίτευξη του συγκεκριμένου ποσοστού, πόσο μάλλον σε ένα πολυσύχναστο οδικό δίκτυο με συνεχόμενη διέλευση οχημάτων όπως το παρόν. Συνεπώς, έχοντας ως κανόνα την συγκεκριμένη επικάλυψη, επιτυγχάνεται η ύπαρξη ικανοποιητικού αριθμού ομόλογων σημείων ακόμα και σε πιο μακρινές σαρώσεις όπου είτε εκτιμήθηκε λανθασμένα η μεταξύ τους απόσταση, είτε δεν είναι δυνατή μία πιο κοντινή σάρωση. Μία άλλη σημαντική λεπτομέρεια όπου διευκολύνει την επεξεργασία των δεδομένων είναι το γεγονός ότι δεν χρησιμοποιήθηκε ο τρίποδας του οργάνου αλλά ένας μεταλλικός τρίποδας γεωδαιτικού σταθμού σε συνδυασμό με ένα τριχογλίο δέκτη GNSS, έτσι ώστε να μπορέσει να γίνει οριζοντίωση (ο τρίποδας του laser scanner δεν διαθέτει δυνατότητα εφαρμογής τριχογλίου με αεροστάθμη) του οργάνου και κατά συνέπεια γεωαναφορά. Αφού λοιπόν,



Εικόνα 12 Διάταξη laser scanner για μετρήσεις πεδίου.

γίνει αναγνώριση του περιβάλλοντος χώρου ξεκινάει η διαδικασία των μετρήσεων. Το ζητούμενο του κάθε στησίματος είναι η αποτύπωση της γέφυρας όσο το δυνατόν καλύτερα σε κάθε της επιφάνεια, έχοντας παράλληλα την επικάλυψη που είχε προαναφερθεί. Σε περίπτωση όπου, από κάποια στάση δεν φαίνεται κάποιο τμήμα της γέφυρας, γίνεται μία νέα όπου θα αποτυπώνεται το εν λόγω κομμάτι χωρίς όμως να στερείται ομόλογα σημεία με τις υπόλοιπες σαρώσεις. Στην παρούσα εργασία, πραγματοποιήθηκαν συνολικά 26 σαρώσεις για τις δύο γέφυρες, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου, ενώ δύο επιπλέον σαρώσεις ήταν μη ολοκληρωμένες καθώς τελείωσε η μπαταρία του οργάνου και δεν έχουν χρησιμοποιηθεί. Κάθε στήσιμο του οργάνου γίνεται σε κοντινή σχετικά απόσταση με την γέφυρα και σε σημεία τέτοια ώστε να αποτυπώνεται με τον καλύτερο δυνατό τρόπο το κάτω τμήμα της και το πλάγιο. Πιο αναλυτικά, σε κάθε στάση αφού οριζοντιωνόταν το BLK έκανε μία πλήρη περιστροφή έτσι ώστε να δημιουργήσει ένα αυθαίρετο σύστημα στο οριζόντιο επίπεδο όπου έχει τοποθετηθεί. Έπειτα από αυτό, κάνει μία περιστροφή 360° για να τραβήξει φωτογραφίες με την θερμική και RGB κάμερα όπου διαθέτει, έτσι ώστε να δώσει τιμές χρώματος σε κάθε σημείο των σαρώσεων. Τέλος, αφού ξανά γυρίσει στην αρχή του συστήματος αναφοράς που είχε υλοποιήσει, κάνει μία περιστροφή 180° σαρώνοντας και τις δύο πλευρές χάριν του περιστρεφόμενου φακού όπου διαθέτει. Όπως είναι κατανοητό, δεν χρειάζεται να ορισθεί το εύρος της σάρωσης καθώς, σαρώνει ότι υπάρχει σε απόσταση 60 μέτρων και ακτίνα 360°.

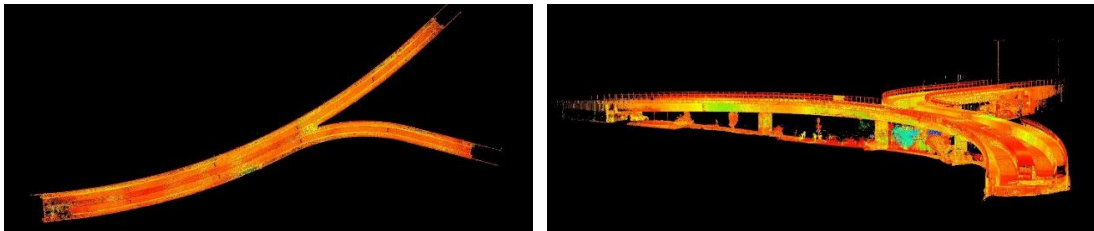
4.2 Επεξεργασία δεδομένων

Ολοκληρώνοντας τις μετρήσεις πεδίου, το επόμενο στάδιο είναι η επεξεργασία τους. Έτσι, με την χρήση του λογισμικού «BLK Data Manager» κατεβαίνουν οι σαρώσεις που έχουν πραγματοποιηθεί, 26 στην προκειμένη περίπτωση, συνολικού μεγέθους 6.97 GB σε μορφότυπο αρχείου «.blk». Στην συνέχεια, στο πρόγραμμα «Cyclone», δημιουργείται μία βάση δεδομένων όπου εισάγονται οι σαρώσεις. Έπειτα, ξεκινάει η διαδικασία του Registration. Η διαδικασία αυτή ουσιαστικά συνενώνει τις σαρώσεις μεταξύ τους βρίσκοντας ομόλογα σημεία. Συγκεκριμένα, το πρόγραμμα απαιτεί επικάλυψη τουλάχιστον 30% μεταξύ των νεφών και να του δοθούν τουλάχιστον 3 ομόλογα σημεία τα οποία όμως για την επίτευξη της καλύτερης δυνατής ακρίβειας θα πρέπει να είναι σωστά κατανοημένα σε όλη την κοινή επιφάνεια των σαρώσεων. Η τεχνική αυτή ονομάζεται «Cloud Based Registration» και ουσιαστικά χρησιμοποιεί προσεγγιστικά τα σημεία που του δίνονται και ελέγχει επαναληπτικά την απόσταση μεταξύ των ομόλογων σημείων των νεφών στις δύο εικόνες έτσι ώστε να υπολογίσει τις παραμέτρους του μετασχηματισμού της συνένωσης των δύο σαρώσεων. Στην περίπτωση όπου κάποιο από τα ομόλογα αυτά σημεία έχει μεγάλη απόσταση με το αντίστοιχο του, τότε το πρόγραμμα εμφανίζει μήνυμα λάθους και ζητάει να του ξανά προσδιοριστούν τα tie points. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται 4-8 σημεία σε κάθε ζεύγος νεφών και ορίζεται να χρησιμοποιηθεί το 60% των κοινών σημείων για την συνένωση των σαρώσεων με μέγιστο αριθμό επαναλήψεων τις 150. Τα ομόλογα σημεία, επιλέγονται κυρίως σε καθαρές ακμές όπου διακρίνονται καλά μέσω της θερμικής απεικόνισης με αλλαγή της απόχρωσης, ενώ στην περίπτωση όπου δεν υπάρχουν επαρκή σημεία γίνεται χρήση και των γκράφιτι τα οποία εμφανίζονται πάνω στα τοιχεία της γέφυρας.

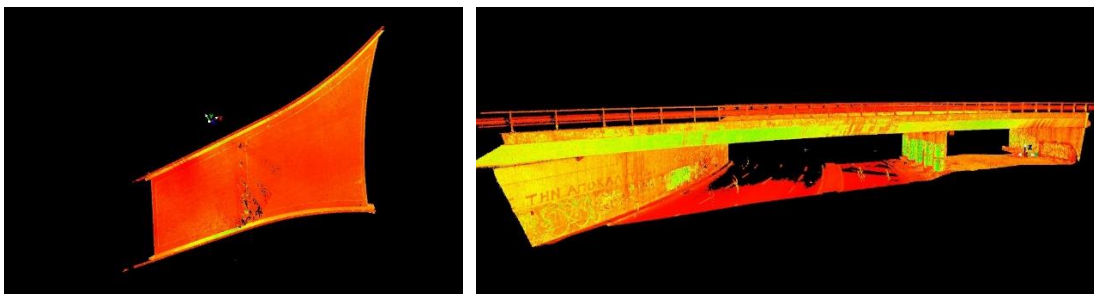


Εικόνα 13 Dense Cloud γεφυρών σε θερμική (αριστερά) και RGB (δεξιά) απεικόνιση.

Η διαδικασία του alignment δίνοντας ακρίβεια (RMS) 9 - 13 mm, επιβεβαιώνει την ορθότητα των κριτηρίων που αποφασίστηκαν τόσο στην διαδικασία της αποτύπωσης όσο και κατά την επιλογή των ομόλογων σημείων στα νέφη και των παραμέτρων που ορίστηκαν κατά την συνένωση, τα οποία οδηγούν στο τελικό αποτέλεσμα. Την διαπίστωση αυτή συμπληρώνει το γεγονός ότι με επιλογή διαφορετικών σημείων ή μικρότερου ποσοστού κοινών σημείων, η συνένωση δύο νεφών δίνει RMS κατά 4 mm μεγαλύτερο. Τέλος, αφού ολοκληρώνεται η συνένωση των σαρώσεων, το τελικό αποτέλεσμα είναι ένα ενιαίο μοντέλο σε ένα τυχαίο σύστημα αναφοράς όπου περιέχει τις δύο γέφυρες, τον περιβάλλοντα χώρο και θόρυβο. Έτσι, για την καλύτερη και σαφέστερη απεικόνιση του αντικειμένου αποφασίζεται να απαλειφθεί ένα τμήμα του περιβάλλοντα χώρου και να δημιουργηθούν δύο ξεχωριστά μοντέλα όπου η κάθε γέφυρα θα είναι ξεχωριστά.



Εικόνα 5 Θερμική απεικόνιση κάτοψης νότιας γέφυρας έπειτα της αφαίρεσης τμήματος του περιβάλλοντα χώρου (αριστερά) και άποψη της νότιας γέφυρας (δεξιά).

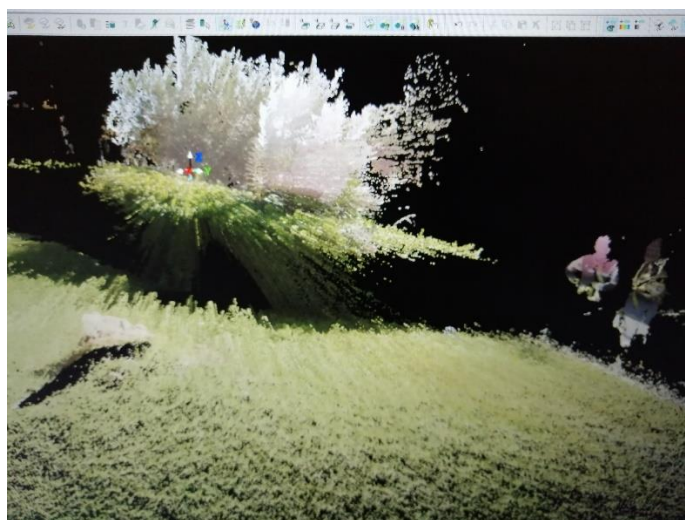


Εικόνα 14 Θερμική απεικόνιση βόρειας γέφυρας έπειτα της αφαίρεσης τμήματος του περιβάλλοντα χώρου. Κάτοψη (αριστερά), άποψη (δεξιά).

4.3 Προβλήματα

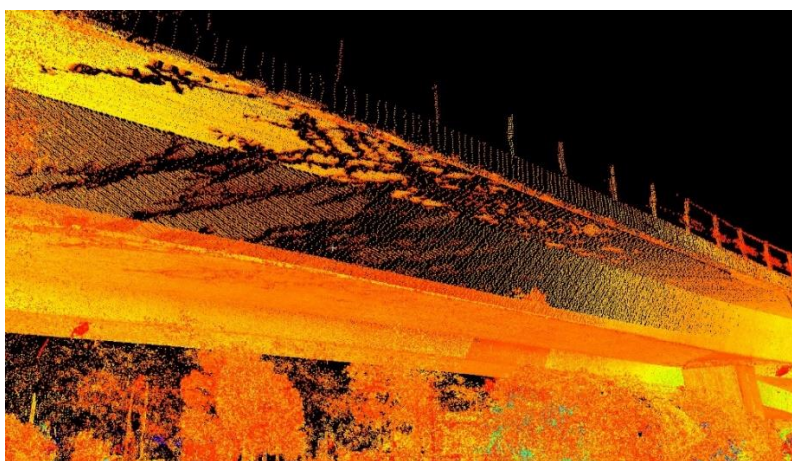
Όπως, είναι λογικό σε μία εργασία όπου δεν πραγματοποιείται υπό ιδανικές συνθήκες προκύπτουν και ορισμένα προβλήματα. Αρχικά, έγινε μία ανεπιτυχής προσπάθεια αποτύπωσης του οδοστρώματος των γεφυρών, καθώς η διέλευση των οχημάτων ήταν

υπερβολικά πυκνή χρονικά και υπό μεγάλες ταχύτητες, ενώ παράλληλα δεν υπήρχε κάποια νησίδα όπου θα μπορούσε να τοποθετηθεί με ασφάλεια το laser scanner. Παρ' όλα αυτά, για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής δεν απαιτείται η πλήρης αποτύπωση όλων των στοιχείων της γέφυρας καθώς στην συνέχεια εστιάζεται κατά βάση στην μελέτη της δυναμική της συμπεριφοράς. Ένα άλλο μεγάλο πρόβλημα που οφείλεται στην πυκνή κυκλοφορία των πεζών και των οχημάτων, ήταν η δημιουργία θορύβου σε όλον σχεδόν τον περιβάλλοντα χώρο των γεφυρών. Οι θόρυβοι αυτοί αποτυπώνονται σε μορφή σκιάς, θολούρας ή λανθασμένης απόχρωσης του μοντέλου.



Εικόνα 15 Έπαρξη θορύβου λόγω νερού αυτόματου ποτισμού και παρουσίας ανθρώπων κατά την σάρωση.

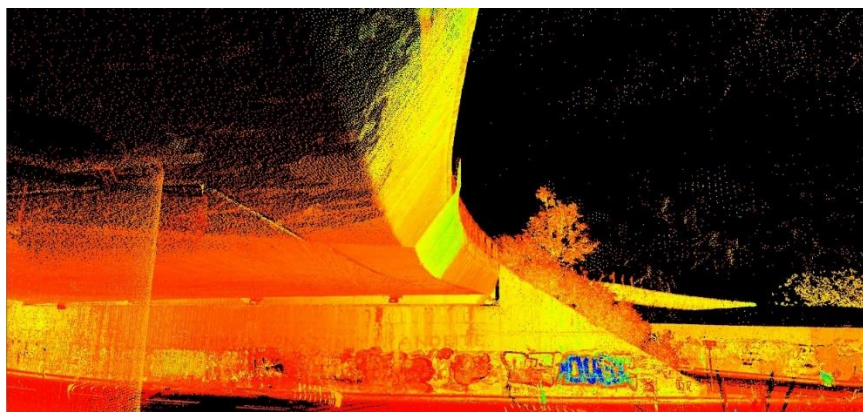
Τέλος, τα δύο σημαντικότερα προβλήματα που προέκυψαν ήταν ότι λόγω της έντονης κυκλοφορίας και της πυκνής βλάστησης, ένα τμήμα της μίας γέφυρας δεν ήταν δυνατόν να αποτυπωθεί.



Εικόνα 16 Αδυναμία αποτύπωσης τμήματος γέφυρας.

Το τελευταίο σημαντικό πρόβλημα, το οποίο θα μπορούσε να είχε αποφευχθεί με την έγκαιρη αναγνώριση του στο πεδίο, έχει σαν αποτέλεσμα την μετακίνηση τμήματος ενός νέφους σημείων της γέφυρας σε σχέση με όλο το μοντέλο, κάτι το οποίο οφείλεται σε κάποια μετακίνηση του οργάνου κατά την διαδικασία της σάρωσης. Όπως είναι λογικό η εν λόγω σάρωση δεν χρησιμοποιήθηκε στην δημιουργία του μοντέλου, ενώ παράλληλα δεν κρίθηκε αναγκαία η επανάληψη της, καθώς λόγω της καλής

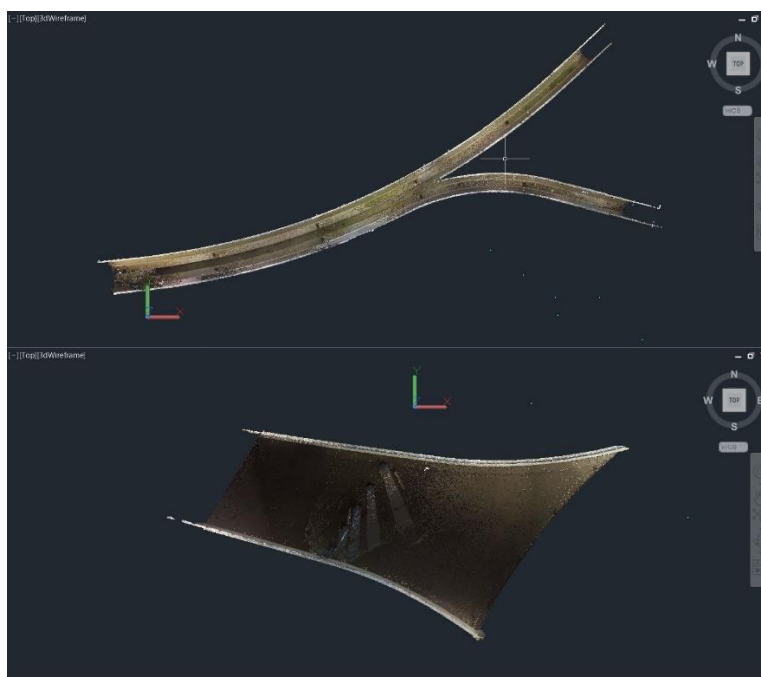
αλληλοεπικάλυψης των υπολοίπων σαρώσεων είχε αποτυπωθεί ολόκληρο το τμήμα της γέφυρας. Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται η προαναφερθείσα μετατόπιση του νέφους.



Εικόνα 17 Μετακίνηση τμήματος σάρωσης σε σχέση με το υπόλοιπο μοντέλο.

4.4 Δημιουργία μετρητικών προϊόντων

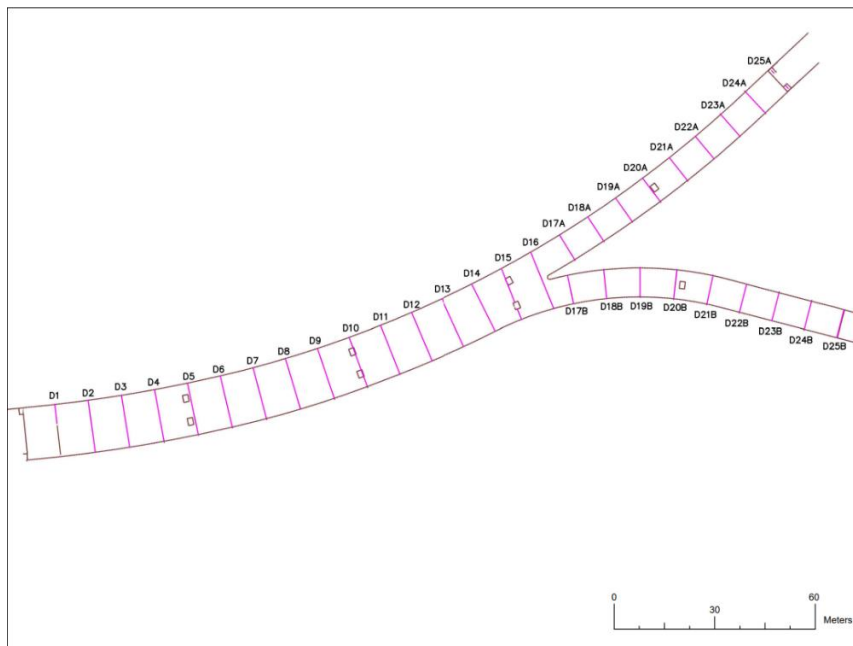
Έχοντας ολοκληρώσει την επεξεργασία των δύο dense cloud, έχει σειρά η εξαγωγή τους σε μορφή «.rcp» έτσι ώστε να δημιουργηθούν οι κατόψεις και οι τομές τους. Η επεξεργασία αυτών των αρχείων γίνεται στο περιβάλλον του AutoCAD. Αφού γίνει η επισύναψη του νέφους σημείων σε ένα νέο σχέδιο, είναι δυνατή η τρισδιάστατη απεικόνιση του με την βοήθεια των εργαλείων που προσφέρει το λογισμικό.



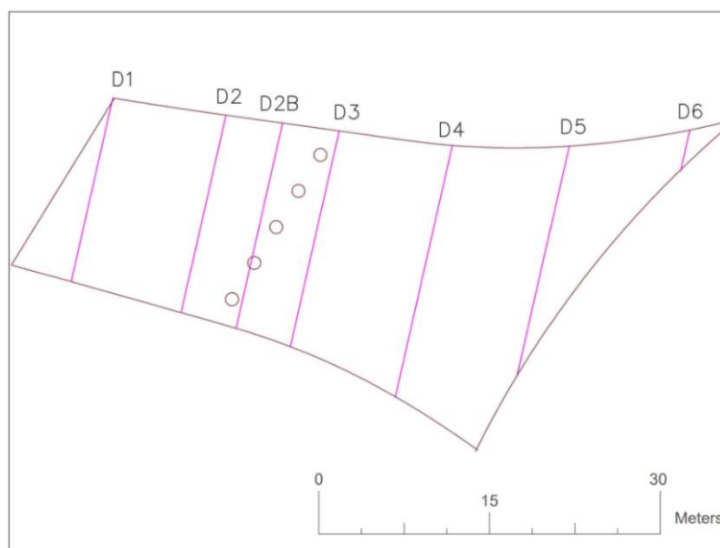
Εικόνα 18 Νέφη σημείων γεφυρών στο περιβάλλον του AutoCAD. A) Νότια γέφυρα, B) Βόρεια γέφυρα.

Το πρώτο βήμα είναι η δημιουργία της κάτοψης της εκάστοτε γέφυρας. Πιο αναλυτικά, αρχικά, ορίζεται ένα οριζόντιο παράλληλο επίπεδο με την βοήθεια της επέκτασης «CloudWorx» από πάνω ή από κάτω από το μοντέλο και το τέμνει στο ύψος και στο πάχος που είναι επιθυμητό κάθε φορά. Στην προκειμένη περίπτωση, για τον λόγο ότι είναι γνωστό προσεγγιστικά το ύψος μίας γέφυρας, ορίστηκε ένα παράλληλο επίπεδο

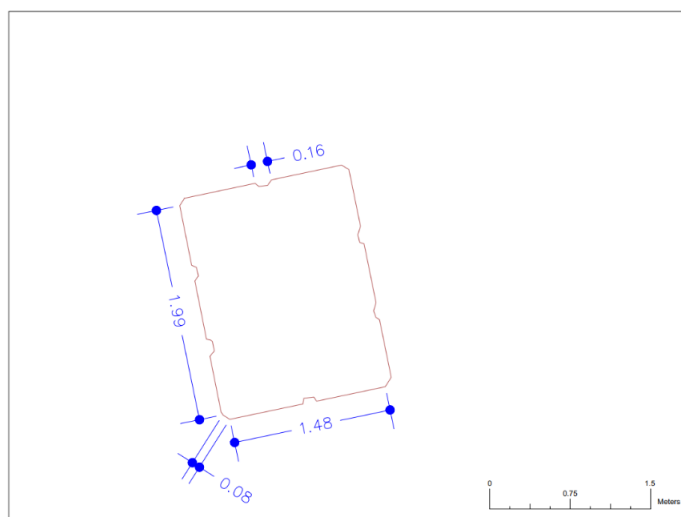
τομής κάτω από το νέφος και ανέβηκε προς τα επάνω με πάχος περίπου 20 εκατοστά σε διάφορες βαθμίδες της γέφυρας, ανάλογα με την εκάστοτε επιφάνεια που επρόκειτο να αποδοθεί. Όπως είναι λογικό το ύψος και το πάχος της τομής μεταβάλλεται κατά μήκος της γέφυρας καθώς δεν διατηρεί σταθερή υψομετρική διαφορά σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο. Η κάτοψη γίνεται γραφικά σχεδιάζοντας σε σταθερό zoom είτε με τόξα και ευθείες, είτε με πολύ πυκνά ευθύγραμμα τμήματα ή με την μαθηματική συνάρτηση «SPLINE». Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται και οι τρεις τρόποι, διαπιστώνοντας ότι όλοι τους προσεγγίζουν ικανοποιητικά το μοντέλο με τον τελευταίο να είναι ελάχιστα προτιμότερος κατά την προσαρμογή των τόξων. Στις κατόψεις που ακολουθούν, εκτός του περιγράμματος του προβόλου των γεφυρών, φαίνονται οι κολόνες και τα τοιχία τους.



Σχήμα 1 Κάτοψη και αριθμημένες γραμμές διατομών νότιας γέφυρας.



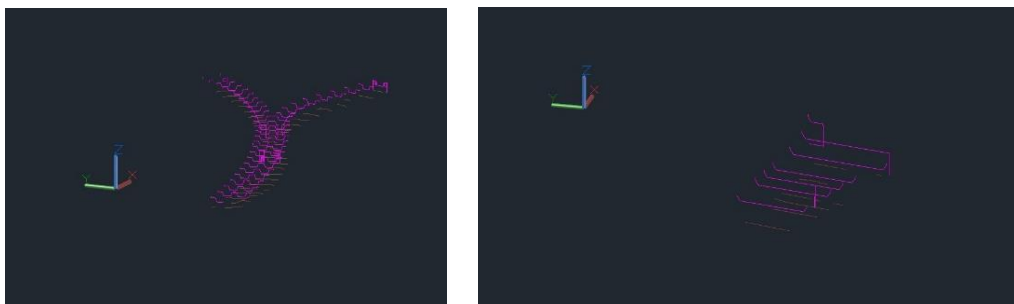
Σχήμα 2 Κάτοψη και αριθμημένες γραμμές διατομών βόρειας γέφυρας.



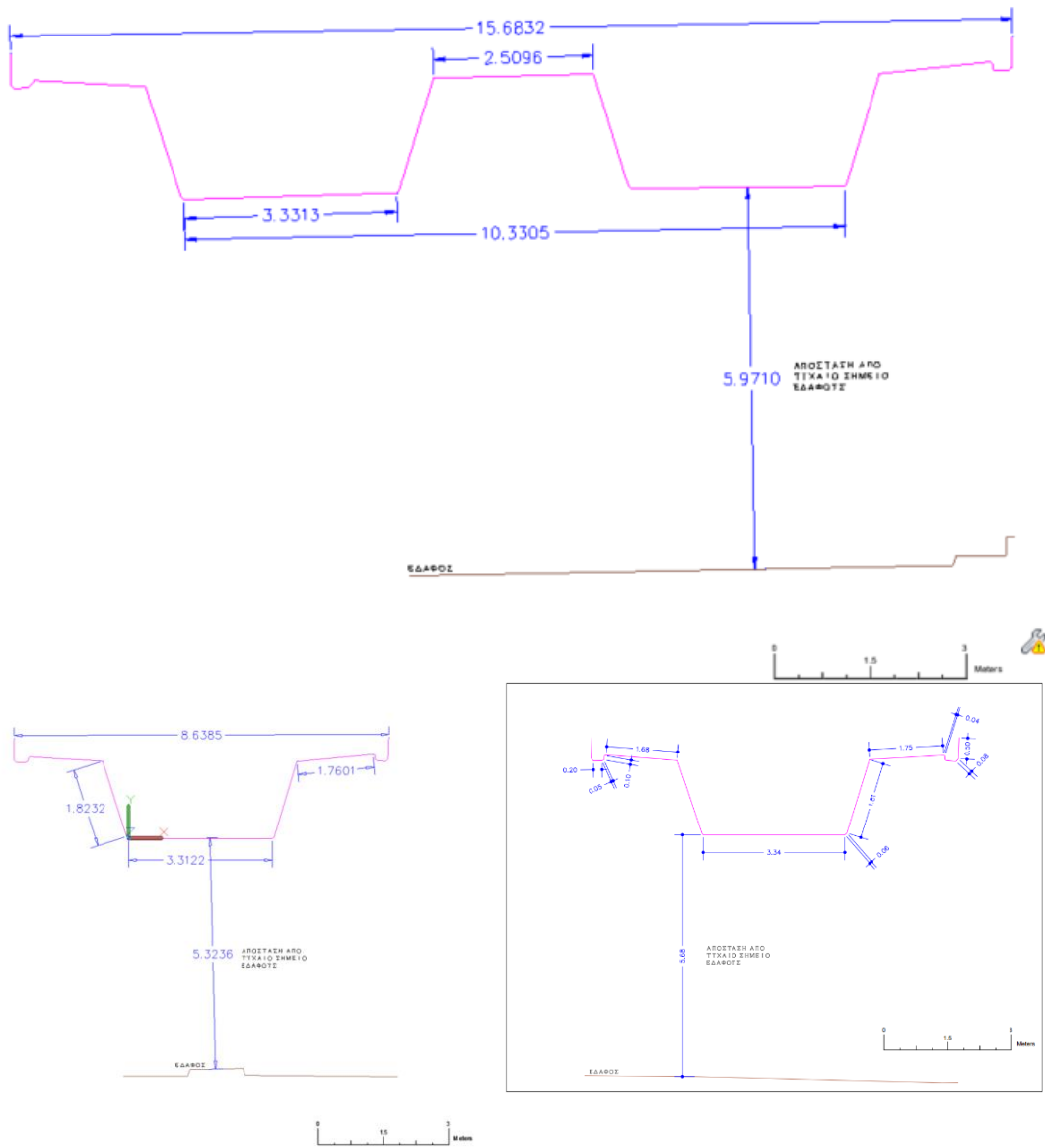
Σχήμα 3 Παράδειγμα κατόψεως κολώνας στήριξης της νότιας γέφυρας.

Έχοντας δημιουργήσει τις κατόψεις, έπεται στην συνέχεια ο σχεδιασμός των διατομών. Αρχικά, σχεδιάζονται οι γραμμές όπου στην θέση τους θα γίνουν οι τομές της γέφυρας. Όσον αφορά την βόρεια γέφυρα, επειδή το σχήμα της είναι απλό, χρησιμοποιείται ένα ευθύγραμμο τμήμα όπου περνάει από το κέντρο της. στην συνέχεια, υλοποιούνται κάθετες ευθείες ως προς την γραμμή αυτή με ισοδιάσταση 10 μέτρα. Στην περίπτωση της νότιας γέφυρας, επειδή το σχήμα της είναι περίπλοκο ακολουθείται η διαδικασία της προσαρμογής τόξων και έπειτα δημιουργούνται οι γραμμές των τομών. Με την ίδια λογική όπως και στην περίπτωση των κατόψεων, ορίζεται ένα επίπεδο τομής κάθετο αυτήν την φορά προς την επιφάνεια του μοντέλου. Η δημιουργία των διατομών, γίνεται σχεδόν αυτόματα από το πρόγραμμα με χειροκίνητες έπειτα διορθώσεις (προσθήκη ακμών, διαγραφή περιττών ευθύγραμμων τμημάτων, αναπροσαρμογή ευθειών, κ.α.). οι παράμετροι που ορίζονται για τον σχεδιασμό των τομών, αφορούν το πλήθος των σημείων που θα χρησιμοποιήσει, το ελάχιστο μήκος γραμμής που θα δημιουργήσει (δεν φτιάχνει τόξα παρά μόνο ευθείες), η ανοχή μεταξύ των γραμμών και της γωνίας ανάμεσα στα σημεία και την γραμμή που θα υλοποιηθεί. Συνολικά, πραγματοποιούνται 35 διατομές για την νότια γέφυρα και 7 για την βόρεια.

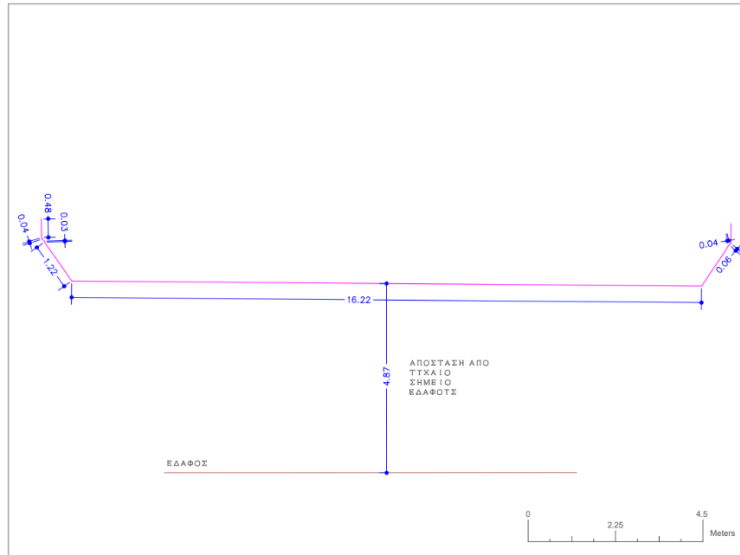
Όπως είναι λογικό, και όσον αφορά τις κατόψεις και τις τομές, η ύπαρξη θορύβου μπορεί να δώσει λανθασμένα αποτελέσματα, για τον λόγο αυτό, οι εργασίες αυτές απαιτούν μεγάλη προσοχή και σωστή κρίση ως προς την επιλογή των σημείων όπου θα ληφθούν υπόψιν για την δημιουργία είτε της κάτοψης είτε των τομών.



Εικόνα 19 Προοπτική απεικόνιση διατομών γεφυρών (αριστερά νότιας γέφυρας, δεξιά βόρειας γέφυρας).



Σχήμα 4 Παράδειγμα τυπικών διατομών γέφυρας. Επάνω εμφανίζεται η διατομή D8, κάτω αριστερά η D18A και δεξιά η D18B.



Σχήμα 5 Τυπική διατομή D2 βόρειας γέφυρας.

5. Γεωδαιτικές μετρήσεις για την εκτίμηση της δυναμικής συμπεριφοράς των γεφυρών

Η μάζα μιας οποιασδήποτε κατασκευής, λόγω της αδράνειας της, δεν ακολουθεί την κίνηση της βάσης (π.χ. έδαφος κατά τη διάρκεια σεισμού) ή οποιαδήποτε ταλαντωτική κίνηση της επιβάλλεται από εξωτερικές φορτίσεις, αλλά κινείται με διαφορετικό τρόπο κάνοντας μια δική της ταλάντωση. Η συχνότητα αυτής της ταλάντωσης ονομάζεται ιδιοσυχνότητα ή φυσική συχνότητα και εξαρτάται μόνο από τη μάζα και την δυσκαμψία της κατασκευής και όχι από τη διέγερση.

Δίνεται από τον τύπο:

$$f = 2\pi \sqrt{\frac{K}{m}}$$

Όπου, K δυσκαμψία και m μάζα της κατασκευής (Ψυχάρης, 2016)

Στην παρούσα εργασία, οι μετρήσεις πραγματοποιούνται χρησιμοποιώντας τον ρομποτικό γεωδαιτικό σταθμό της Leica «TS30», ο οποίος έχει ονομαστική ακρίβεια γωνιακής μέτρησης 0.5" και απόστασης 0.6mm + 1 ppm για μετρήσεις σε πρίσμα και 2mm + 2 ppm για μετρήσεις σε οποιαδήποτε επιφάνεια. Για τέτοιου είδους εργασίες το όργανο πρέπει να είναι σωστά βαθμονομημένο και να έχει ελεγχθεί ως προς την ορθή λειτουργία του.

Leica TS30
Champion's League.



- when it has to be right **Leica**
Geosystems

Εικόνα 20 Leica Ts30. (leica-geosystems.com)

5.1 Μετρήσεις πεδίου

Για την σωστότερη περάτωση της εργασίας, στην βόρεια γέφυρα αποφασίζεται να πραγματοποιηθούν αρχικά μερικές μετρήσεις μικρής διάρκειας με διαφορετικές

παραμέτρους, έτσι ώστε να αναλυθούν και να προσδιοριστεί η βέλτιστη τακτική για την επίτευξη του ζητούμενου στόχου.

5.1.1 Βόρεια γέφυρα

❖ Τεχνική Sets of Angles

Μέσω της τεχνικής αυτής προσδιορίζεται η απόσταση και η γωνία των στόχων που έχουν προσδιοριστεί από τον χειριστή του οργάνου. Η διαδικασία που ακολουθείται περιγράφεται στα παρακάτω στάδια:

- Σκόπευση σημείων σε πρώτη και δεύτερη θέση τηλεσκοπίου με μη αυτόματο τρόπο,
- Καθορισμός αριθμού περιόδων μέτρησης των σημείων που προσδιορίζονται στο προηγούμενο βήμα,
- Επιλογή αυτόματης αναγνώρισης στόχου «ATR»
- Ορισμός ημερομηνίας και ώρας έναρξης και λήξης των μετρήσεων καθώς και του χρόνου μεταξύ των διαδοχικών περιόδων.

Για τις ανάγκες της συγκεκριμένης τεχνικής έχουν τοποθετηθεί δύο αυτοκόλλητοι ανακλαστικοί στόχοι (Tape), ο ένας πάνω στο βάθρο της γέφυρας σε απόσταση περίπου 1 μέτρου από το έδαφος και ο δεύτερος στην πλαϊνή όψη του προβόλου της, περίπου στο κέντρο της απόστασης του κρεμαστού της μέρους. Το όργανο έχει τοποθετηθεί σε απόσταση περίπου 16.5 μέτρων από τον πρώτο και σε 16 κατά προσέγγιση μέτρα από τον δεύτερο. Οι μετρήσεις ξεκίνησαν στις 14:19 και διήρκεσαν έως 14:32, δηλαδή για 13 λεπτά και πραγματοποιήθηκαν συνολικά 10 περίοδοι μετρήσεων των δύο σημείων. Στην συνέχεια, ξανά μετρήθηκαν τα ίδια σημεία από τις 15:16 έως τις 15:19, έχοντας ολοκληρώσει 6 περιόδους.

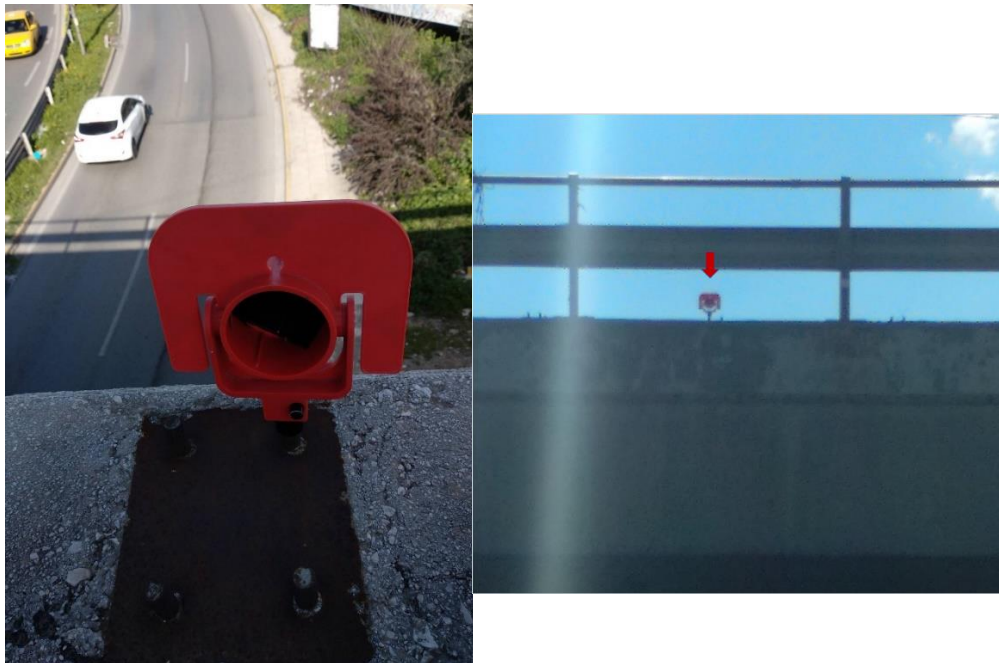


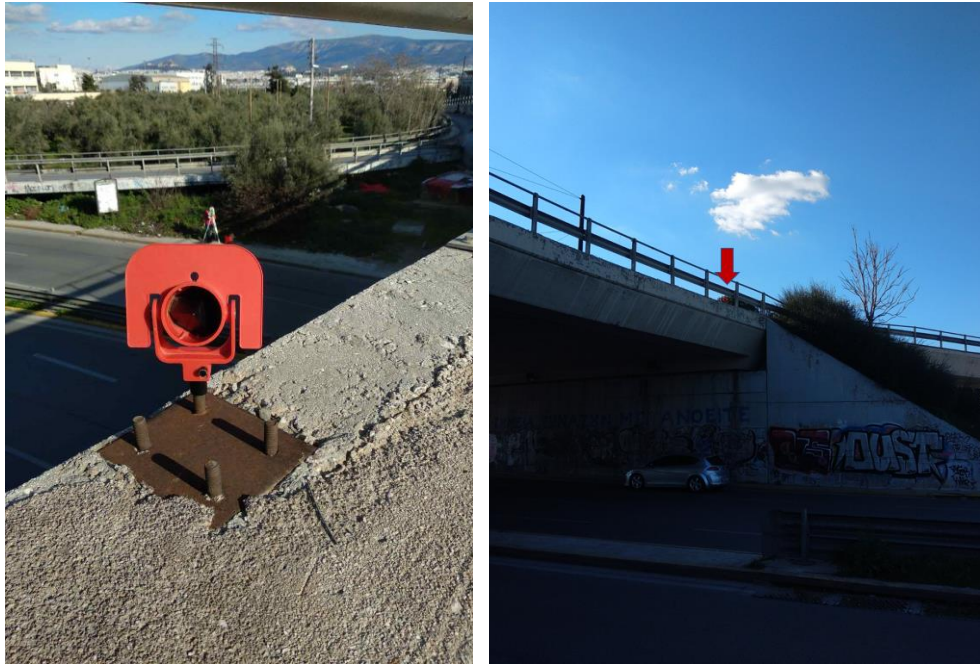
Εικόνα 21 Θέση ανακλαστικού στόχου πάνω στην κολώνα της γέφυρας.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν φανερώνουν μία περιοδικότητα παρ' όλα αυτά το μικρό δείγμα των μετρήσεων δεν οδηγεί σε σαφή αποτελέσματα. Περισσότερα θα αναφερθούν στην υποενότητα του κεφαλαίου αυτού «[Επεξεργασία δεδομένων](#)»

❖ Τεχνική Tracking

Κατά την τεχνική αυτή, το όργανο κλειδώνει σε έναν συγκεκριμένο στόχο και μετράει επανειλημμένα σύμφωνα με την συχνότητα που του έχει καθοριστεί. Έτσι λοιπόν, έχοντας ενεργοποιημένο το ATR (Automatic Target Recognition) και επιλεγμένη την λειτουργία Lock, η οποία κλειδώνει σε μία συγκεκριμένη σκόπευση, ξεκινάει η διαδικασία των μετρήσεων σε διάφορες συχνότητες (2 sec, 1 sec, 0.5 sec, 0.2 sec, 0.1 sec). Η διάρκεια των μετρήσεων επιλέχθηκε να είναι ενός λεπτού για κάθε συχνότητα. Συνολικά, έχουν μετρηθεί δύο σημεία της γέφυρας, το ένα κοντά στο τοιχίο της και το άλλο κοντά στην στρογγυλή της κολώνα. Τα πρίσματα έχουν τοποθετηθεί με χρήση ειδικού αντάπτορα στα αγκύρια των λαπατσών παλαιών μεταλλικών στηθαίων ασφαλείας (ΜΣΑ) που έχουν απομείνει πάνω στην γέφυρα. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η βέλτιστη συχνότητα είναι αυτή των 0.5 δευτερολέπτων για τον λόγο ότι μεγαλύτερες συχνότητες αφορούν περιπτώσεις ελέγχου της δυναμικής συμπεριφοράς γεφυρών με ελεγχόμενη φόρτιση. Περισσότερα θα αναφερθούν στην υποενότητα του κεφαλαίου αυτού «[Επεξεργασία δεδομένων](#)» Η παραπάνω διαδικασία γίνεται για δύο σημεία της γέφυρας. Το όργανο έχει τοποθετηθεί σε απόσταση περίπου 16 μέτρων από το πρώτο και σε 25 κατά προσέγγιση μέτρα από το δεύτερο.





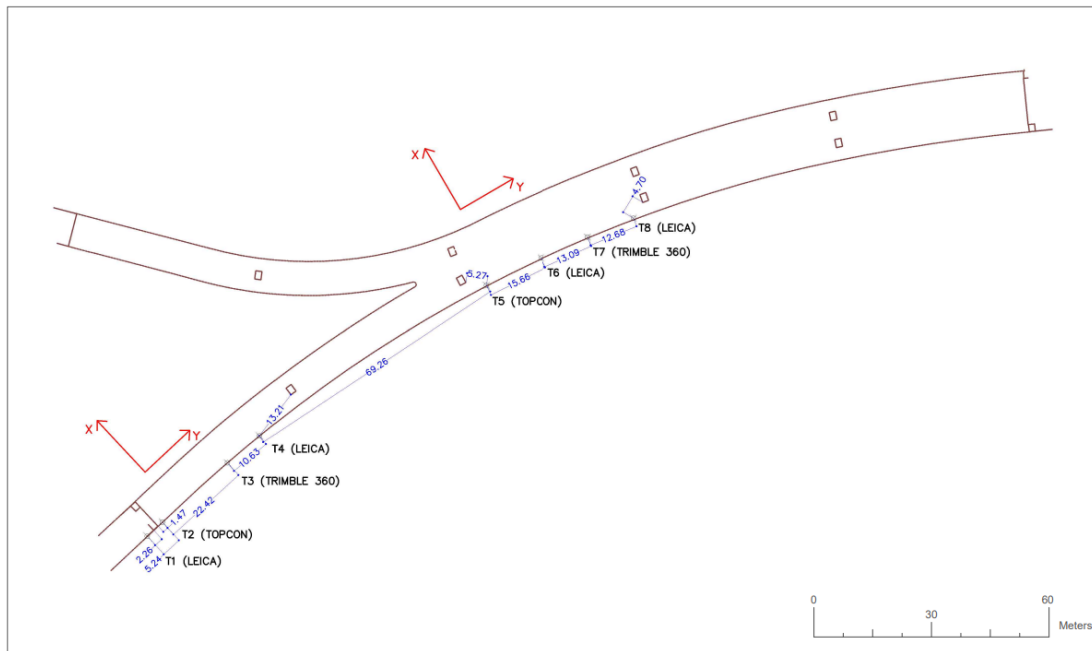
Εικόνα 22 Θέση πρισμάτων στα δύο σημεία μέτρησης στον πρόβολο της γέφυρας.

5.1.2 Νότια γέφυρα

Αξιοποιώντας τις γνώσεις που προσφέρουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων της βόρειας γέφυρας, όσον αφορά την νότια γέφυρα οι μετρήσεις περιορίζονται στην τεχνική του «Tracking» με περίοδο μέτρησης τα 0.5 δευτερόλεπτα δηλαδή με συχνότητα 2 Hz. Συγκεκριμένα, μελετάται ο κλάδος της γέφυρας που έχει ανοδική πορεία στην Πέτρου Ράλλη από Πειραιά προς Αθήνα. Στον δεύτερο κλάδο της (προς Γρηγορίου Λαμπράκη) δεν πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις καθώς, θεωρείται ότι παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά με τον πρώτο. Οι μετρήσεις έλαβαν χώρα στις 3-04-2022 υπό συνθήκες υψηλής ηλιοφάνειας και μέτριου ανέμου. Για τον σκοπό της εργασίας χρησιμοποιούνται τέσσερα πρίσματα (δύο της «Leica», ένα της «Topcon» και ένα 360 της «Trimble»), τα οποία τοποθετούνται κατανεμημένα στο κρεμαστό μέρος της γέφυρας, με τα δύο ακριανά να προσεγγίζουν την θέση των βάθρων. Η εγκατάστασή τους γίνεται και αυτήν την φορά, βιδώνοντας τα στα αγκύρια των ΜΣΑ. Λόγω του μεγέθους της γέφυρας, για την καλύτερη δυνατή μελέτη της πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε 2 αιωρούμενα τμήματα (ανάμεσα σε δύο κολώνες), το ένα εκ των δύο να αποτελεί το μεγαλύτερο κρεμαστό τοξωτό μέρος της, ενώ το δεύτερο να εμπεριέχει και αρμό κοντά στο τοίχιο της. Στον παρακάτω πίνακας φαίνονται τα χαρακτηριστικά των πρισμάτων, ενώ στο σχήμα που ακολουθεί η ακριβή τους θέση πάνω στην γέφυρα.

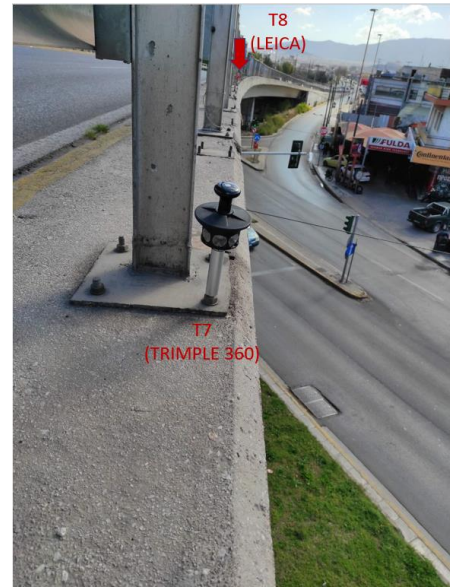
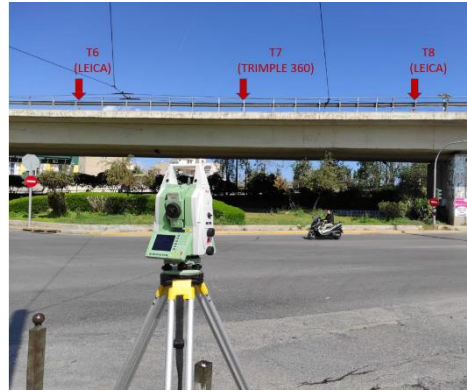
Πίνακας 1 Τιμές σταθεράς πρισμάτων.

Όνομα	Σταθερά (mm)
Leica Circ Prism	0.0
Leica Circ Prism	0.0
Topcon	0.0
Trimble 360	2.0



Σχήμα 6 Θέση τοποθέτησης πρισμάτων στην γέφυρα.

Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται τα σημεία τοποθέτησης των πρισμάτων και για τις δύο σειρές μετρήσεων. Πιο αναλυτικά, στο τμήμα με τον αρμό τοποθετήθηκε ένα πρίσμα αριστερά του και ένα άλλο δεξιά του, ενώ τα υπόλοιπα δύο κατανεμήθηκαν στο αιωρούμενο μέρος της. Οι μετρήσεις ξεκίνησαν στις 11:14 και διήρκεσαν έως 12:41 για το μεγάλο τμήμα και 13:30 – 14:49 για το δεύτερο τμήμα. Συνολικά πραγματοποιούνται 1800 μετρήσεις με συχνότητα 2 Hz για το κάθε σημείο, δηλαδή για χρονικό διάστημα 15 λεπτών. Όπως παρατηρείται η διαφορά του χρόνου έναρξης και λήξης των μετρήσεων και στις δύο περιπτώσεις είναι μεγαλύτερη από την αναμενόμενη μία ώρα ($15 \text{ min} \times 4 \text{ σημεία} = 60 \text{ min}$). Αυτό συνέβη στην πρώτη περίπτωση, λόγω της παρεμπόδισης των μετρήσεων ενός σημείου από ένα καλώδιο της ΔΕΗ όπου εξαιτίας τους αέρα ταλαντωνόταν διαταράσσοντας την συνέχεια των μετρήσεων. Η λύση σε αυτό το πρόβλημα ήταν το στήσιμο του οργάνου σε διαφορετική θέση και επανάληψη των μετρήσεων για το εν λόγω σημείο. Στην δεύτερη περίπτωση, λόγω της μικρής υψομετρικής διαφοράς του σκοπευτικού άξονα του οργάνου με την θέση ενός πρίσματος και ταυτόχρονα και της μικρής μεταξύ τους απόσταση, διακόπηκε η διαδικασία της μέτρησης λόγω της στάσης ενός μέσου μαζικής μεταφοράς. Συνεπώς, οι μετρήσεις στο συγκεκριμένο σημείο επαναλήφθηκαν. Το όργανο έχει απόσταση από τους στόχους T5 – T8 από περίπου 29 μέτρα έως 42 μέτρα και από 10 έως 25.5 μέτρα για τα T1 – T4. Τέλος, για την περίπτωση της ανάγκης μελλοντικών μετρήσεων και λόγω της δυσμενής προσέγγισης των σημείων όπου πρέπει να τοποθετηθούν τα πρίσματα, εγκαταστάθηκαν στον πρόβολο της γέφυρας, τρεις αυτοκόλλητοι αντανακλαστικοί στόχοι (Tape) κατανεμημένοι στο τμήμα των στόχων T5 – T8.



Εικόνα 23 Θέσεις τοποθέτησης πρισμάτων στο μεγάλο τμήμα της γέφυρας.



Εικόνα 24 Θέσεις τοποθέτησης πρισμάτων στο τμήμα της γέφυρας με αρμό.

5.2 Επεξεργασία δεδομένων

Έπειτα της συλλογής των δεδομένων ακολουθεί η επεξεργασία τους. Αυτό επιτυγχάνεται είτε με χρήση του λογισμικού «Excel» είτε αξιοποιώντας κάποια γλώσσα προγραμματισμού όπως πχ. «Python» ή «MATLAB». Στην παρούσα εργασία γίνεται χρήση και των δύο επιλογών.

Αεδομένα

Τα δεδομένα που δίνει το όργανο έχουν την μορφή που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

6483040310,	126.2504,	110.7518,	18.8394,	75.2519,	84.1729,	29.2668,	1.6380,	0.0000,	3/ 4/2022,	10:14:36.250000
6483040310,	126.2504,	110.7518,	18.8394,	75.2518,	84.1730,	29.2668,	1.6380,	0.0000,	3/ 4/2022,	10:14:36.840000
6483040310,	126.2494,	110.7515,	18.8391,	75.2516,	84.1731,	29.2658,	1.6380,	0.0000,	3/ 4/2022,	10:14:37.350000
6483040310,	126.2495,	110.7514,	18.8389,	75.2520,	84.1734,	29.2658,	1.6380,	0.0000,	3/ 4/2022,	10:14:38.520000
6483040310,	126.2504,	110.7517,	18.8394,	75.2520,	84.1729,	29.2668,	1.6380,	0.0000,	3/ 4/2022,	10:14:39.080000
6483040310,	126.2495,	110.7514,	18.8391,	75.2519,	84.1731,	29.2658,	1.6380,	0.0000,	3/ 4/2022,	10:14:39.670000
6483040310,	126.2495,	110.7513,	18.8391,	75.2521,	84.1731,	29.2658,	1.6380,	0.0000,	3/ 4/2022,	10:14:40.220000
6483040310,	126.2505,	110.7515,	18.8394,	75.2525,	84.1728,	29.2668,	1.6380,	0.0000,	3/ 4/2022,	10:14:40.790000
6483040310,	126.2504,	110.7517,	18.8393,	75.2522,	84.1730,	29.2668,	1.6380,	0.0000,	3/ 4/2022,	10:14:41.880000
6483040310,	126.2504,	110.7517,	18.8394,	75.2521,	84.1729,	29.2668,	1.6380,	0.0000,	3/ 4/2022,	10:14:42.440000
6483040310,	126.2504,	110.7518,	18.8391,	75.2519,	84.1736,	29.2668,	1.6380,	0.0000,	3/ 4/2022,	10:14:43.020000
6483040310,	126.2504,	110.7517,	18.8395,	75.2521,	84.1727,	29.2668,	1.6380,	0.0000,	3/ 4/2022,	10:14:43.640000
6483040310,	126.2504,	110.7516,	18.8395,	75.2522,	84.1726,	29.2668,	1.6380,	0.0000,	3/ 4/2022,	10:14:44.170000
6483040310,	126.2522,	110.7524,	18.8400,	75.2521,	84.1725,	29.2688,	1.6380,	0.0000,	3/ 4/2022,	10:14:44.730000
6483040310,	126.2512,	110.7521,	18.8398,	75.2519,	84.1726,	29.2678,	1.6380,	0.0000,	3/ 4/2022,	10:14:45.320000
6483040310,	126.2503,	110.7517,	18.8395,	75.2519,	84.1726,	29.2668,	1.6380,	0.0000,	3/ 4/2022,	10:14:45.880000
6483040310,	126.2504,	110.7517,	18.8396,	75.2521,	84.1725,	29.2668,	1.6380,	0.0000,	3/ 4/2022,	10:14:46.440000
6483040310,	126.2504,	110.7516,	18.8396,	75.2522,	84.1725,	29.2668,	1.6380,	0.0000,	3/ 4/2022,	10:14:47.200000
6483040310,	126.2504,	110.7517,	18.8395,	75.2521,	84.1726,	29.2668,	1.6380,	0.0000,	3/ 4/2022,	10:14:47.710000
6483040310,	126.2504,	110.7517,	18.8394,	75.2521,	84.1728,	29.2668,	1.6380,	0.0000,	3/ 4/2022,	10:14:48.260000
6483040310,	126.2504,	110.7517,	18.8393,	75.2521,	84.1731,	29.2668,	1.6380,	0.0000,	3/ 4/2022,	10:14:48.790000
6483040310,	126.2503,	110.7519,	18.8393,	75.2515,	84.1732,	29.2668,	1.6380,	0.0000,	3/ 4/2022,	10:14:49.370000
6483040310,	126.2503,	110.7519,	18.8393,	75.2516,	84.1731,	29.2668,	1.6380,	0.0000,	3/ 4/2022,	10:14:49.940000
6483040310,	126.2495,	110.7514,	18.8391,	75.2520,	84.1730,	29.2658,	1.6380,	0.0000,	3/ 4/2022,	10:14:50.440000
6483040310,	126.2513,	110.7520,	18.8396,	75.2522,	84.1731,	29.2678,	1.6380,	0.0000,	3/ 4/2022,	10:14:50.970000
6483040310,	126.2512,	110.7523,	18.8398,	75.2515,	84.1726,	29.2678,	1.6380,	0.0000,	3/ 4/2022,	10:14:51.540000
6483040310,	126.2495,	110.7514,	18.8391,	75.2518,	84.1729,	29.2658,	1.6380,	0.0000,	3/ 4/2022,	10:14:52.120000
6483040310,	126.2504,	110.7517,	18.8395,	75.2520,	84.1726,	29.2668,	1.6380,	0.0000,	3/ 4/2022,	10:14:52.690000
6483040310,	126.2521,	110.7525,	18.8399,	75.2519,	84.1728,	29.2688,	1.6380,	0.0000,	3/ 4/2022,	10:14:53.270000
6483040310,	126.2484,	110.7512,	18.8391,	75.2514,	84.1724,	29.2648,	1.6380,	0.0000,	3/ 4/2022,	10:14:53.840000
6483040310,	126.2494,	110.7515,	18.8391,	75.2516,	84.1730,	29.2658,	1.6380,	0.0000,	3/ 4/2022,	10:14:54.420000
6483040310,	126.2504,	110.7517,	18.8394,	75.2519,	84.1729,	29.2668,	1.6380,	0.0000,	3/ 4/2022,	10:14:55.480000
6483040310,	126.2522,	110.7525,	18.8396,	75.2520,	84.1736,	29.2688,	1.6380,	0.0000,	3/ 4/2022,	10:14:56.070000
6483040310,	126.2504,	110.7517,	18.8394,	75.2521,	84.1729,	29.2668,	1.6380,	0.0000,	3/ 4/2022,	10:14:56.630000

Εικόνα 25 Format πρωτογενών δεδομένων.

Για την επεξεργασία τους, εισάγονται στο λογισμικό «Excel» και μετατρέπεται η ώρα σε δεκαδικά δευτερόλεπτα έτσι ώστε να δημιουργηθούν έπειτα διαγράμματα χρονοσειρών θέσης. Ο χρόνος σε δευτερόλεπτα όπου εμφανίζεται παρακάτω καθώς και στις χρονοσειρές, έχει ως χρονική αφετηρία την αρχή της ημέρας.

A/A	X (m)	Y (m)	Z (m)	H (grad)	V (grad)	S (m)	Y.O. (m)	Y.S. (m)	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	h	min	sec	ΧΡΟΝΟΣ (sec)
6483040310	126.2513	110.7523	18.8394	75.2515	84.1735	29.2678	1.638	0	3/4/2022	10	14	35.87	36875.870
6483040310	126.2504	110.7518	18.8394	75.2519	84.1729	29.2668	1.638	0	3/4/2022	10	14	36.25	36876.250
6483040310	126.2504	110.7518	18.8394	75.2518	84.173	29.2668	1.638	0	3/4/2022	10	14	36.84	36876.840
6483040310	126.2494	110.7515	18.8391	75.2516	84.1731	29.2658	1.638	0	3/4/2022	10	14	37.35	36877.350
6483040310	126.2495	110.7514	18.8389	75.252	84.1734	29.2658	1.638	0	3/4/2022	10	14	38.52	36878.520
6483040310	126.2504	110.7517	18.8394	75.252	84.1729	29.2668	1.638	0	3/4/2022	10	14	39.08	36879.080
6483040310	126.2495	110.7514	18.8391	75.2519	84.1731	29.2658	1.638	0	3/4/2022	10	14	39.67	36879.670
6483040310	126.2495	110.7513	18.8391	75.2521	84.1731	29.2658	1.638	0	3/4/2022	10	14	40.22	36880.220
6483040310	126.2505	110.7515	18.8394	75.2525	84.1728	29.2668	1.638	0	3/4/2022	10	14	40.79	36880.790
6483040310	126.2504	110.7517	18.8393	75.2522	84.173	29.2668	1.638	0	3/4/2022	10	14	41.88	36881.880
6483040310	126.2504	110.7517	18.8394	75.2521	84.1729	29.2668	1.638	0	3/4/2022	10	14	42.44	36882.440
6483040310	126.2504	110.7518	18.8391	75.2519	84.1736	29.2668	1.638	0	3/4/2022	10	14	43.02	36883.020
6483040310	126.2504	110.7517	18.8395	75.2521	84.1727	29.2668	1.638	0	3/4/2022	10	14	43.64	36883.640
6483040310	126.2504	110.7516	18.8395	75.2522	84.1726	29.2668	1.638	0	3/4/2022	10	14	44.17	36884.170
6483040310	126.2522	110.7524	18.84	75.2521	84.1725	29.2688	1.638	0	3/4/2022	10	14	44.73	36884.730
6483040310	126.2512	110.7521	18.8398	75.2519	84.1726	29.2678	1.638	0	3/4/2022	10	14	45.32	36885.320
6483040310	126.2503	110.7517	18.8395	75.2519	84.1726	29.2668	1.638	0	3/4/2022	10	14	45.88	36885.880
6483040310	126.2504	110.7517	18.8396	75.2521	84.1725	29.2668	1.638	0	3/4/2022	10	14	46.44	36886.440
6483040310	126.2504	110.7516	18.8396	75.2522	84.1725	29.2668	1.638	0	3/4/2022	10	14	47.2	36887.200
6483040310	126.2504	110.7517	18.8395	75.2521	84.1726	29.2668	1.638	0	3/4/2022	10	14	47.71	36887.710
6483040310	126.2504	110.7517	18.8394	75.2521	84.1728	29.2668	1.638	0	3/4/2022	10	14	48.26	36888.260
6483040310	126.2504	110.7517	18.8393	75.2521	84.1731	29.2668	1.638	0	3/4/2022	10	14	48.79	36888.790
6483040310	126.2503	110.7519	18.8393	75.2515	84.1732	29.2668	1.638	0	3/4/2022	10	14	49.37	36889.370
6483040310	126.2503	110.7519	18.8393	75.2516	84.1731	29.2668	1.638	0	3/4/2022	10	14	49.94	36889.940
6483040310	126.2495	110.7514	18.8391	75.252	84.173	29.2658	1.638	0	3/4/2022	10	14	50.44	36890.440
6483040310	126.2513	110.752	18.8396	75.2522	84.1731	29.2678	1.638	0	3/4/2022	10	14	50.97	36890.970
6483040310	126.2512	110.7523	18.8398	75.2515	84.1726	29.2678	1.638	0	3/4/2022	10	14	51.54	36891.540
6483040310	126.2495	110.7514	18.8391	75.2518	84.1729	29.2658	1.638	0	3/4/2022	10	14	52.12	36892.120

Εικόνα 26 Μορφή πρωτογενών δεδομένων στο περιβάλλον του Excel.

Αρχικά, από το δείγμα των 1800 μετρήσεων όπως έχει προαναφερθεί που έχουν παρθεί για το κάθε σημείο, υπολογίζεται η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή των αυθαίρετων συντεταγμένων του, έτσι ώστε να οριοθετηθούν οι τιμές του κατακόρυφου άξονα των διαγραμμάτων τους. Στην συνέχεια, υπολογίζονται η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση της κάθε θέσης. Τα στατιστικά στοιχεία που εμφανίζονται παρακάτω, αφορούν τις μετρήσεις στο μεγάλο τοξωτό τμήμα της νότιας γέφυρας. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε αυθαίρετο τοποκεντρικό σύστημα με αρχή το σημείο εγκατάστασης του οργάνου.

Πίνακας 2 Παράδειγμα πίνακα στατιστικών στοιχείων.

ΔΕΙΓΜΑ 1800 ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ									
Σημείο	min(x)	min(y)	min(z)	max(x)	max(y)	max(z)	std(x)	std(y)	std(z)
T8	126.248	110.749	18.838	126.253	110.754	18.840	0.00074	0.00064	0.00028
T7	118.712	120.941	18.970	118.715	120.944	18.972	0.00065	0.00059	0.00029
T6	110.621	131.231	18.954	110.626	131.237	18.956	0.00079	0.00063	0.00031
T5	100.418	141.563	18.829	100.421	141.567	18.831	0.00046	0.00056	0.00034

5.2.1 Βόρεια γέφυρα

❖ Τεχνική Sets of Angles

Η επεξεργασία των δεδομένων γίνεται από τα παρακάτω βήματα:

- Υπολογισμός μέσης τιμής 1^{ης} και 2^{ης} θέσης τηλεσκοπίου,
- Υπολογισμός γενικού μέσου όρου κάθε περιόδου,
- Υπολογισμός μέγιστης και ελάχιστης τιμής των συντεταγμένων κάθε σημείου για κάθε σειρά μετρήσεων,
- Υπολογισμός του μέσου όρου των συντεταγμένων για κάθε σημείο των δύο σειρών μετρήσεων
- Δημιουργία διαγραμμάτων διασποράς

Παρακάτω εμφανίζονται οι τιμές των αποτελεσμάτων καθώς και τα διαγράμματα της πρώτης σειράς μετρήσεων.

M.O. I II [X]		M.O. I II [Y]		M.O. I II [Z]		M.O. I II [DPA]		Γ.Μ.Ο. [X]		Γ.Μ.Ο. [Y]		Γ.Μ.Ο. [Z]		Γ.Μ.Ο. [ΧΡΟΝΟΣ]	
A2	A1	A2	A1	A2	A1	A2	A1	A1	A2	A1	A2	A1	A2	A1	A2
	100.0001		116.4535		11.1095			100.0001	103.0768	116.4533	114.6536	11.1095	17.0715	52187.348	52187.514
103.0769		114.6537		17.0714		52036.880									
	100.0001		116.4533		11.1096										
103.0768		114.6537		17.0716		52068.780									
	100.0001		116.4532		11.1095										
103.0768		114.6536		17.0715		52101.905									
	100.0001		116.4532		11.1096										
103.0768		114.6539		17.0716		52135.430									
	100.0002		116.4534		11.1097										
103.0769		114.6537		17.0713		52170.755									
	100.0002		116.4532		11.1096										
103.0768		114.6535		17.0714		52203.980									
	100.0001		116.4534		11.1098										
103.0768		114.6535		17.0716		52238.830									
	100.0001		116.4533		11.1095										
103.0768		114.6537		17.0714		52273.475									
	100.0001		116.4534		11.1095										
103.0769		114.6537		17.0716		52306.040									
	100.0003		116.4534		11.1094										
103.0769		114.6535		17.0714		52338.745									

Εικόνα 27 Αποτελέσματα της τεχνικής Sets of angles 10 περιόδων.



Σχήμα 7 Διαγράμματα διασποράς της τεχνικής Sets of angles 10 περιόδων.

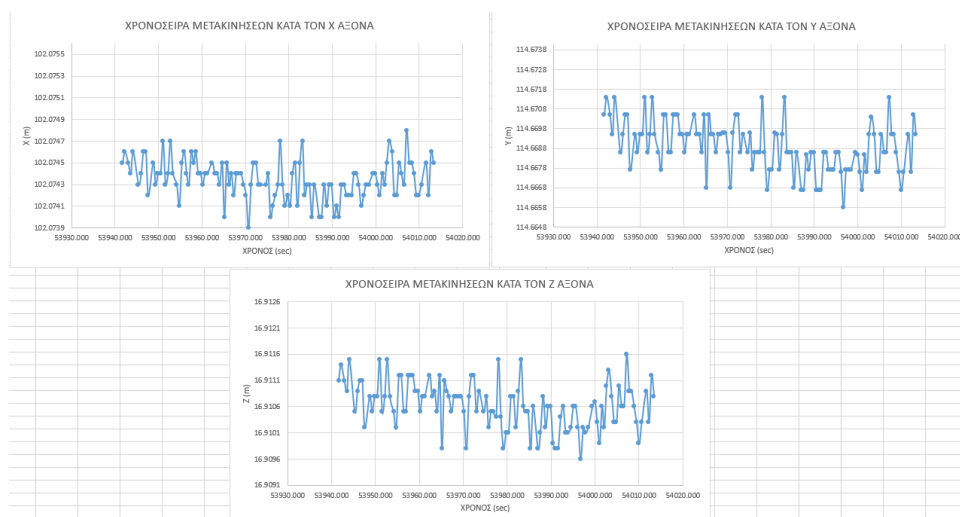


Σχήμα 8 Διαγράμματα διασποράς της τεχνικής Sets of angles 6 περιόδων.

Με την τεχνική Sets of Angles παρατηρούνται πολύ μικρές διαφορές στα διαγράμματα που παρουσιάζονται. Η ανάλυση έγινε ξεχωριστά για κάθε ολοκληρωμένη μέτρηση (I και II θέση τηλεσκοπίου) ωστόσο δεν μπορούν να εξαχθούν κάποια ασφαλή συμπεράσματα. Τα αποτελέσματα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν εφόσον γίνει επαναμέτρηση των ίδιων σημείων σε μεταγενέστερο χρόνο για την ανίχνευση μόνιμων μετακινήσεων της γέφυρας και όχι της δυναμικής συμπεριφοράς.

❖ Τεχνική Tracking

Όπως έχει αναφερθεί και στο κεφάλαιο «[Μετρήσεις πεδίου](#)» πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για ένα λεπτό με συχνότητα ανά 2, 1, 0.5, 0.2, 0.1 δευτερολέπτων. Η επεξεργασία τους είναι η ίδια που αναφέρθηκε και στην τεχνική του «Sets of Angles» με την διαφορά ότι αυτήν την φορά δεν χρειάζεται να υπολογιστούν οι μέσοι όροι της 1^{ης} και 2^{ης} θέσης τηλεσκοπίου και ο Γ.Μ.Ο. των περιόδων, καθώς το όργανο μετράει συνεχόμενα σε 1^η θέση τηλεσκοπίου. Παρακάτω εμφανίζονται τα διαγράμματα χρονοσειρών που αφορούν τις μετρήσεις με συχνότητα 0.5 sec και 1 sec για τα δύο σημεία, ενώ στο [παράρτημα 3](#) φαίνονται και των υπόλοιπων συχνοτήτων. Όπως είναι λογικό ο χρόνος 1 λεπτού με συχνότητα 0.5 sec αναλογεί σε δείγμα 120 μετρήσεων. Χρονοσειρά ονομάζεται, μία ιεραρχημένη ως προς τον χρόνο ακολουθία παρατηρήσεων. Μια χρονοσειρά μπορεί να προέρχεται από συνεχή καταγραφή δεδομένων (συνεχής χρονοσειρά) ή από διακριτή (διακριτή χρονοσειρά). (Δεμερτζής, 2013)

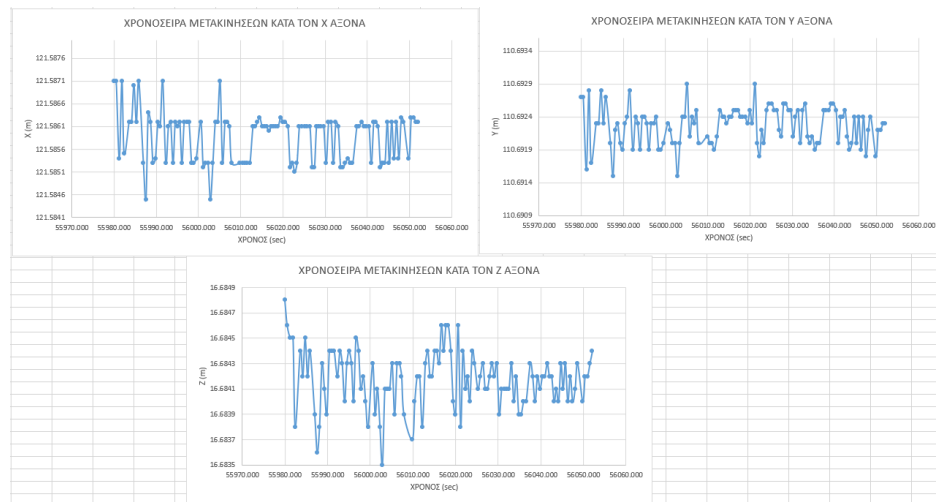


Σχήμα 9 Χρονοσειρές σημείου 1 βόρειας γέφυρας με συχνότητα μέτρησης 0.5 sec.

Τα αποτελέσματα που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα δείχνουν ότι οι παρατηρήσεις είναι αρκετά συσχετισμένες. Όσον αφορά τον X άξονα, η τιμή του μέσου όρου απέχει από την μέγιστη τιμή 0.6 mm και 0.5 mm από την ελάχιστη, στον Y άξονα απέχει 3.2 mm από την μέγιστη και 3.3 mm από την ελάχιστη και τέλος, σχετικά με τον άξονα Z η μέση τιμή απέχει 1.2 mm από την μέγιστη και 1.1 mm από την ελάχιστη.

Πίνακας 3 Στατιστικά στοιχεία μετρήσεων Tracking βόρειας γέφυρας για το σημείο 1.

1 ^ο Σημείο			
	X	Y	Z
Μέγιστη τιμή	102.0750	114.6723	16.9119
Ελάχιστη τιμή	102.0739	114.6658	16.9096
Μέση τιμή	102.0744	114.6691	16.9107
Τυπική απόκλιση	0.000204	0.001298	0.000467



Σχήμα 10 Χρονοσειρές σημείου 2 βόρειας γέφυρας με συχνότητα μέτρησης 0.5 sec.

Τα αποτελέσματα που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα δείχνουν ότι οι παρατηρήσεις είναι αρκετά συσχετισμένες. Όσον αφορά τον X άξονα, η τιμή του μέσου όρου απέχει 1.2 mm από την μέγιστη και από την ελάχιστη τιμή, στον Y άξονα απέχει 0.6 mm από την μέγιστη και από την ελάχιστη και τέλος, σχετικά με τον άξονα Z η μέση τιμή απέχει 0.6 mm από την μέγιστη και από την ελάχιστη τιμή.

Πίνακας 4 Στατιστικά στοιχεία μετρήσεων Tracking βόρειας γέφυρας για το σημείο 2.

2 ^ο Σημείο			
	X	Y	Z
Μέγιστη τιμή	121.5871	110.6929	16.6848
Ελάχιστη τιμή	121.5845	110.6915	16.6835
Μέση τιμή	121.5859	110.6923	16.6842
Τυπική απόκλιση	0.000536	0.000285	0.000222

Με την τεχνική tracking φαίνονται καλύτερα οι δυναμικές κινήσεις της γέφυρας στους τρεις άξονες. Οι μετρήσεις αυτές χρησιμοποιήθηκαν σαν αρχικό πείραμα ελέγχου λειτουργίας του οργάνου και καταγραφής των παρατηρήσεων. Επιλέχθηκε η συνέχεια της επεξεργασίας και ανάλυσης να αφορά μόνο την νότια γέφυρα όπου υπάρχει δυνατότητα επιλογής περισσότερων σημείων μετρήσεων και είναι γέφυρα με μεγαλύτερα ανοίγματα μεταξύ των βάθρων.

5.2.2 Νότια γέφυρα

Όπως έχει αναφερθεί και στο κεφάλαιο «[Μετρήσεις πεδίου](#)» πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για δεκαπέντε λεπτά με συχνότητα ανά μισό δευτερόλεπτο. Για την επεξεργασία τους, εκτός από το «Excel» αξιοποιήθηκε το διαδικτυακό περιβάλλον «Jupyter», όπου παρέχει την δυνατότητα δημιουργίας μεταξύ άλλων κώδικα σε «python» όπου και χρησιμοποιήθηκε. Πιο αναλυτικά, αναπτύχθηκε κώδικας ο οποίος δίνει ως αποτελέσματα τα διαγράμματα των χρονοσειρών, του γρήγορου μετασχηματισμού Φουριέ (FFT- **F**ast **F**ourier **T**ransform), τα περιοδογράμματα και τέλος, τις τρεις επικρατέστερες τιμές των συχνοτήτων όπου παρουσιάζονται μαζί με τις περιόδους τους και της ισχύς. Οι ρουτίνες επεξεργασίας έχουν αναπτυχθεί σε

περιβάλλον python και είναι ελεύθερα διαθέσιμες από το αποθετήριο της Ερευνητικής Μονάδας Γεωδαισίας Τοπογραφίας και GNSS στον σύνδεσμο που ακολουθεί:

(https://github.com/LabGeoTopo/fftpy_analysis).

Κάθε πρόγραμμα χρειάζεται αρχικά να του εισαχθούν τα δεδομένα τα οποία θα επεξεργαστεί και θα δώσει τα αποτελέσματα. Έτσι, μέσω του λογισμικού «Excel» δημιουργήθηκαν αρχεία τύπου «.csv» (συνολικά 8, ένα για κάθε σημείο) τα οποία περιέχουν τα πρωτογενή δεδομένα που δίνει το όργανο μαζί με μία σειρά όπου αναγράφεται το τι αποτελεί η κάθε στήλη. Συγκεκριμένα περιέχει τον κωδικό του σημείου, τις συντεταγμένες του, την οριζόντια και κατακόρυφη γωνία, την οριζόντια απόσταση μεταξύ του οργάνου και του στόχου, το ύψος οργάνου και στόχου, την ημερομηνία και την χρονική στιγμή που πραγματοποιήθηκε η κάθε μέτρηση (για ευκολία στην επεξεργασία διακρίθηκε σε ώρες, λεπτά, δευτερόλεπτα).

code	X	Y	Z	Hz	V	S	hsta	htarg	dates	h	min	sec
A1	98.5612	125.3028	14.5425	396.3839	92.7757	25.5078	1.654	0	3/4/2022	12	30	27.58
A2	98.5609	125.3038	14.5430	396.3833	92.7746	25.5088	1.654	0	3/4/2022	12	30	28.17
A3	98.5608	125.3048	14.5430	396.3832	92.7748	25.5098	1.654	0	3/4/2022	12	30	28.73
A4	98.5609	125.3028	14.5426	396.3831	92.7752	25.5078	1.654	0	3/4/2022	12	30	29.32
A5	98.5612	125.3018	14.5426	396.3838	92.7751	25.5068	1.654	0	3/4/2022	12	30	30.15
A6	98.5609	125.3038	14.5429	396.3832	92.7748	25.5088	1.654	0	3/4/2022	12	30	30.73
A7	98.5608	125.3028	14.5426	396.3829	92.7753	25.5078	1.654	0	3/4/2022	12	30	31.29
A8	98.5610	125.3028	14.5425	396.3834	92.7755	25.5078	1.654	0	3/4/2022	12	30	31.88
A9	98.5609	125.3028	14.5425	396.3831	92.7756	25.5078	1.654	0	3/4/2022	12	30	32.44
A10	98.5610	125.3028	14.5427	396.3833	92.7751	25.5078	1.654	0	3/4/2022	12	30	33.53
A11	98.5609	125.3028	14.5424	396.3830	92.7758	25.5078	1.654	0	3/4/2022	12	30	34.1
A12	98.5608	125.3028	14.5424	396.3829	92.7757	25.5078	1.654	0	3/4/2022	12	30	34.68
A13	98.5610	125.3029	14.5421	396.3834	92.7765	25.5078	1.654	0	3/4/2022	12	30	35.25
A14	98.5608	125.3028	14.5426	396.3828	92.7753	25.5078	1.654	0	3/4/2022	12	30	35.83
A15	98.5610	125.3028	14.5423	396.3835	92.7759	25.5078	1.654	0	3/4/2022	12	30	36.39
A16	98.5611	125.3028	14.5424	396.3835	92.7759	25.5078	1.654	0	3/4/2022	12	30	36.97
A17	98.5609	125.3028	14.5426	396.3832	92.7752	25.5078	1.654	0	3/4/2022	12	30	37.5
A18	98.5609	125.3028	14.5427	396.3830	92.7750	25.5078	1.654	0	3/4/2022	12	30	38
A19	98.5608	125.3018	14.5424	396.3828	92.7754	25.5068	1.654	0	3/4/2022	12	30	38.86
A20	98.5608	125.3028	14.5424	396.3828	92.7759	25.5078	1.654	0	3/4/2022	12	30	39.43
A21	98.5607	125.3028	14.5427	396.3827	92.7751	25.5078	1.654	0	3/4/2022	12	30	40
A22	98.5607	125.3028	14.5427	396.3826	92.7751	25.5078	1.654	0	3/4/2022	12	30	40.58
A23	98.5606	125.3028	14.5425	396.3823	92.7756	25.5078	1.654	0	3/4/2022	12	30	41.14
A24	98.5606	125.3028	14.5426	396.3824	92.7754	25.5078	1.654	0	3/4/2022	12	30	41.71
A25	98.5607	125.3018	14.5426	396.3824	92.7750	25.5068	1.654	0	3/4/2022	12	30	42.28
A26	98.5606	125.3028	14.5425	396.3824	92.7755	25.5078	1.654	0	3/4/2022	12	30	42.86
A27	98.5606	125.3028	14.5426	396.3824	92.7754	25.5078	1.654	0	3/4/2022	12	30	43.43
A28	98.5607	125.3028	14.5426	396.3826	92.7754	25.5078	1.654	0	3/4/2022	12	30	44.05

Εικόνα 28 Παράδειγμα μορφής αρχείου CSV (αφορά το σημείο αριστερά από τον αρμό στο μικρό τμήμα της γέφυρας).

Παρακάτω, αναφέρονται τα βήματα λειτουργίας του προγράμματος που δημιουργήθηκε.

- Εγκατάσταση βιβλιοθηκών,
- εισαγωγή δεδομένων,
- δημιουργία γραφημάτων χρονοσειρών,
- δημιουργία περιοδογράμματος,
- δημιουργία διαγραμμάτων FFT,
- υπολογισμός στατιστικών στοιχείων.

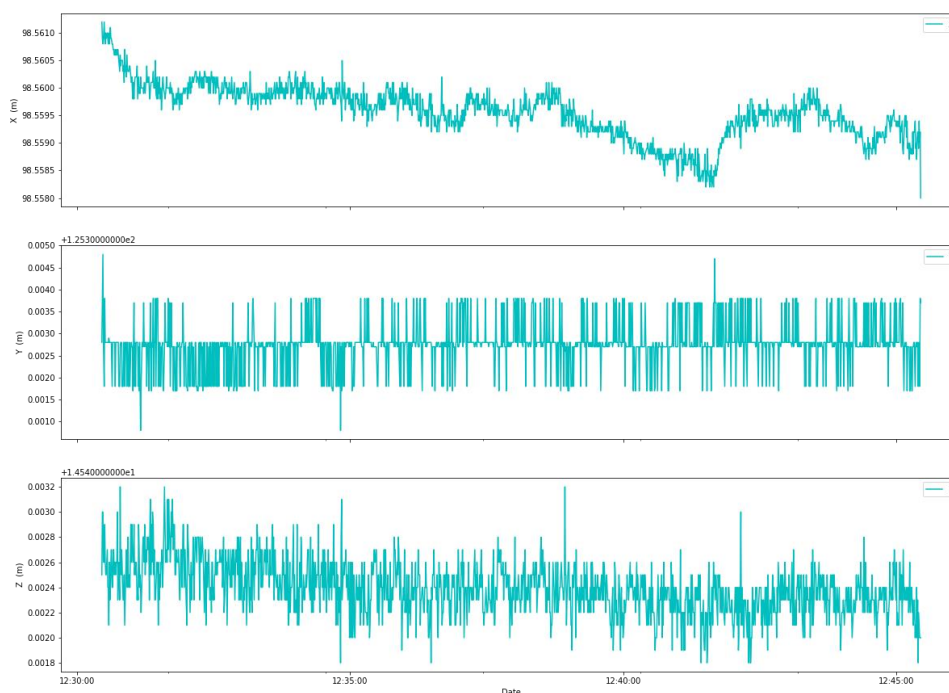
Στην συνέχεια ακολουθούν τα διαγράμματα χρονοσειρών των σημείων της γέφυρας καθώς και τα στατιστικά τους στοιχεία.

Σημείο T1

Όπως παρατηρείται στον παρακάτω πίνακα και διάγραμμα παρουσιάζονται τιμές με απόκλιση 0.480 mm για την μετατόπιση κατά τον X άξονα, 0.552 mm για τον Y και 0.213 mm για την κατακόρυφη. Επίσης γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι για τους άξονες X και Y, η μέση τιμή απέχει το ίδιο από την ελάχιστη και μέγιστη τιμή (1.6 mm), ενώ όσον αφορά τον Z υπάρχει μετατόπιση του μέσου όρου από την μικρότερη μέτρηση της τάξεως των 0.6 mm, ενώ από την μεγαλύτερη 0.8 mm. Ξανά αναφέρεται ότι οι τιμές των αποτελεσμάτων είναι σχετικές και δεν αναφέρονται σε κάποιο κρατικό σύστημα συντεταγμένων.

Πίνακας 5 Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης σημείου T1.

Σημείο T1			
	X (m)	Y (m)	Z (m)
Ελάχιστη τιμή	98.5580	125.3008	14.5418
Μέγιστη τιμή	98.5612	125.3048	14.5432
Μέση τιμή	98.5596	125.3028	14.5424
Τυπική απόκλιση	0.000480	0.000552	0.000213



Σχήμα 11 Χρονοσειρές σημείου T1.

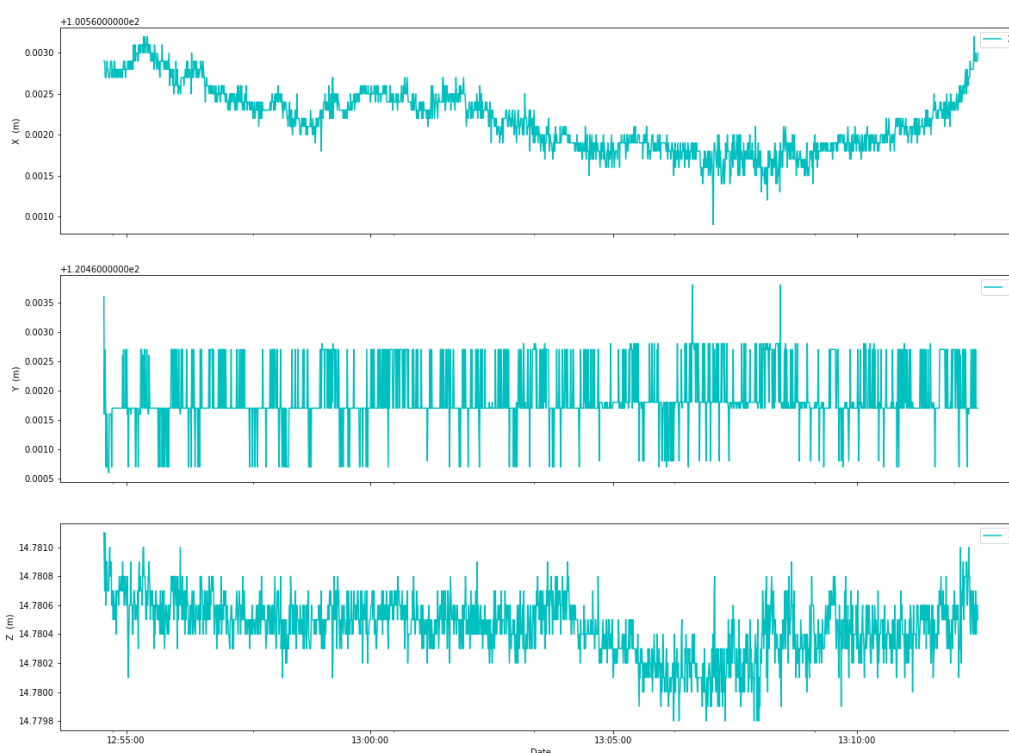
Σημείο T2

Όπως παρατηρείται στον παρακάτω πίνακα και διάγραμμα παρουσιάζονται τιμές με απόκλιση 0.382 mm για την μετατόπιση κατά τον X άξονα, 0.522 mm για τον Y και 0.202 mm για την κατακόρυφη. Επίσης, ο μέσος όρος για τον X άξονα

παρουσιάζει μετατόπιση από την ελάχιστη τιμή 1.3 mm και από την μέγιστη 1 mm, για τον άξονα Y, 1.3 mm από την ελάχιστη και 1.9 mm από την μέγιστη και για τον άξονα Z 0.6 mm από την ελάχιστη και 0.7 mm από την μέγιστη.

Πίνακας 6 Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης σημείου T2.

Σημείο T2			
	X (m)	Y (m)	Z (m)
Ελάχιστη τιμή	100.5609	120.4606	14.7798
Μέγιστη τιμή	100.5632	120.4638	14.7811
Μέση τιμή	100.5622	120.4619	14.7804
Τυπική απόκλιση	0.000382	0.000522	0.000202



Σχήμα 12 Χρονοσειρές σημείου T2.

Σημείο T3

Όπως παρατηρείται στον παρακάτω πίνακα και διάγραμμα παρουσιάζονται τιμές με απόκλιση 0.313 mm για την μετατόπιση κατά τον X άξονα, 0.128 mm για τον Y και 0.208 mm για την κατακόρυφη. Επίσης, ο μέσος όρος για τον X άξονα παρουσιάζει ίση μετατόπιση 1 mm από την ελάχιστη και μέγιστη τιμή, για τον άξονα Y 0.6mm από την ελάχιστη και 0.4mm από την μέγιστη και για τον άξονα Z 2 mm από την ελάχιστη και 0.9 mm από την μέγιστη.

Πίνακας 7 Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης σημείου T3.

Σημείο T3			
	X (m)	Y (m)	Z (m)
Ελάχιστη τιμή	108.9674	99.6984	15.9898
Μέγιστη τιμή	108.9694	99.6994	15.9927
Μέση τιμή	108.9684	99.6990	15.9918
Τυπική απόκλιση	0.000313	0.000128	0.000208



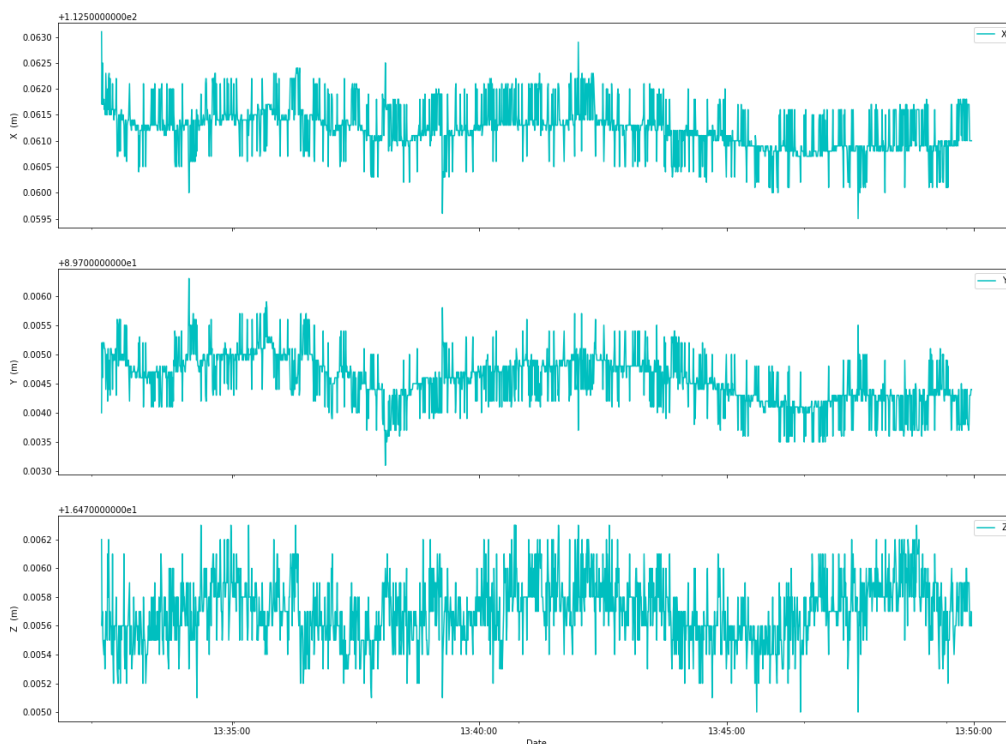
Σχήμα 13 Χρονοσειρές σημείου T3.

Σημείο T4

Όπως παρατηρείται στον παρακάτω πίνακα και διάγραμμα παρουσιάζονται τιμές με απόκλιση 0.464 mm για την μετατόπιση κατά τον X άξονα, 0.448 mm για Y και 0.223 mm για την κατακόρυφη. Επίσης, ο μέσος όρος για τον X άξονα παρουσιάζει μετατόπιση 1.7 mm από την ελάχιστη και 1.9 mm από την μέγιστη τιμή, για τον άξονα Y 1.5 mm από την ελάχιστη και 1.7 mm από την μέγιστη και για τον άξονα Z 0.7 mm από την ελάχιστη και 0.6 mm από την μέγιστη.

Πίνακας 8 Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης σημείου T4.

Σημείο T4			
	X (m)	Y (m)	Z (m)
Ελάχιστη τιμή	112.5595	89.7031	16.4750
Μέγιστη τιμή	112.5631	89.7063	16.4763
Μέση τιμή	112.5612	89.7046	16.4757
Τυπική απόκλιση	0.000464	0.000448	0.000223



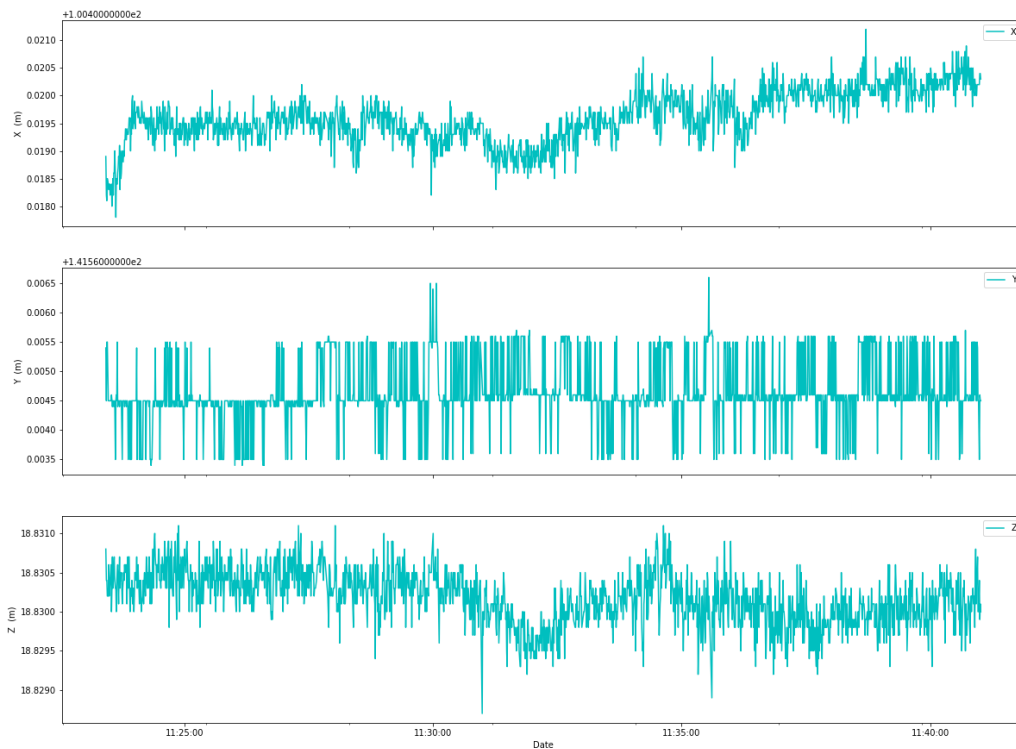
Σχήμα 14 Χρονοσειρές σημείου T4.

Σημείο T5

Όπως παρατηρείται στον παρακάτω πίνακα και διάγραμμα παρουσιάζονται τιμές με απόκλιση 0.464 mm για την μετατόπιση κατά τον X άξονα, 0.561 mm για τον Y και 0.341 mm για την κατακόρυφη. Επίσης, ο μέσος όρος για τον X άξονα παρουσιάζει μετατόπιση 1.8 mm από την ελάχιστη και 1.6 mm από την μέγιστη τιμή, για τον άξονα Y 1.3 mm από την ελάχιστη και 1.9 mm από την μέγιστη και για τον άξονα Z 1.5 mm από την ελάχιστη και 0.9 mm από την μέγιστη.

Πίνακας 9 Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης σημείου T5.

Σημείο T5			
	X (m)	Y (m)	Z (m)
Ελάχιστη τιμή	100.4178	141.5634	18.8287
Μέγιστη τιμή	100.4212	141.5666	18.8311
Μέση τιμή	100.4196	141.5647	18.8302
Τυπική απόκλιση	0.000464	0.000561	0.000341



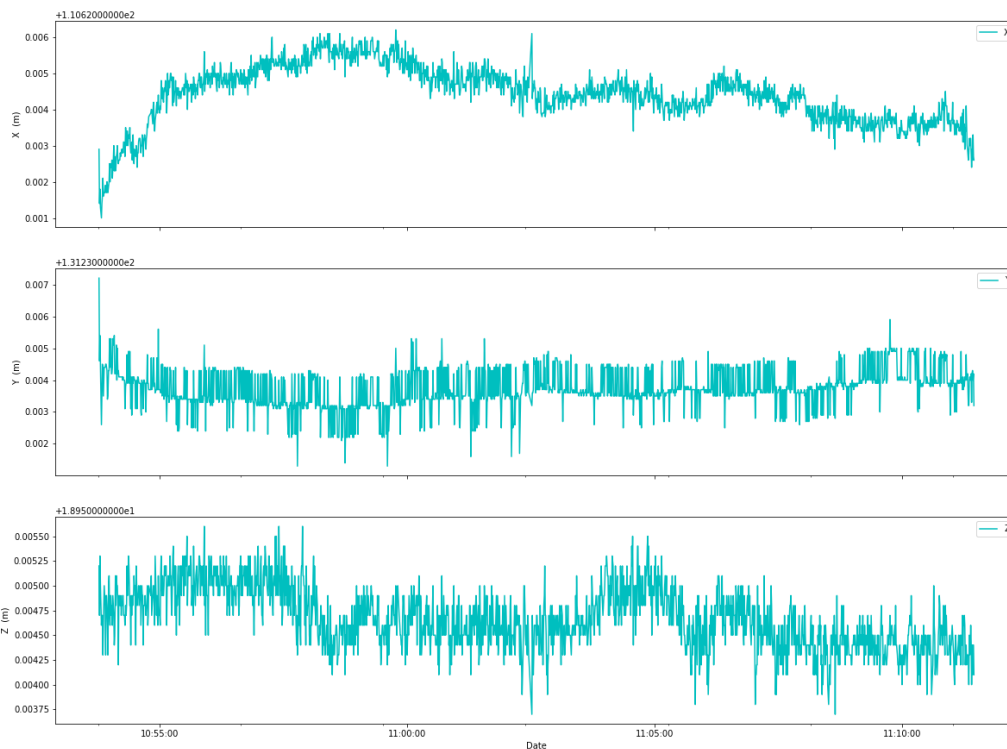
Σχήμα 15 Χρονοσειρές σημείου T5.

Σημείο T6

Όπως παρατηρείται στον παρακάτω πίνακα και διάγραμμα παρουσιάζονται τιμές με απόκλιση 0.791 mm για την μετατόπιση κατά τον X άξονα, 0.628 mm για τον Y και 0.308 mm για την κατακόρυφη. Επίσης, ο μέσος όρος για τον X άξονα παρουσιάζει μετατόπιση 3.4 mm από την ελάχιστη και 1.8 mm από την μέγιστη τιμή, για τον άξονα Y 2.4 mm από την ελάχιστη και 3.5 mm από την μέγιστη και για τον άξονα Z 1 mm από την ελάχιστη και 0.9 mm από την μέγιστη.

Πίνακας 10 Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης σημείου T6.

Σημείο T6			
	X (m)	Y (m)	Z (m)
Ελάχιστη τιμή	110.6210	131.2313	18.9537
Μέγιστη τιμή	110.6262	131.2372	18.9556
Μέση τιμή	110.6244	131.2337	18.9547
Τυπική απόκλιση	0.000791	0.000628	0.000308



Σχήμα 16 Χρονοσειρές σημείου T6.

Σημείο T7

Όπως παρατηρείται στον παρακάτω πίνακα και διάγραμμα παρουσιάζονται τιμές με απόκλιση 0.651 mm για την μετατόπιση κατά τον X άξονα, 0.590 mm για τον Y και 0.286 mm για την κατακόρυφη. Επίσης, ο μέσος όρος για τον X άξονα παρουσιάζει μετατόπιση 1.6 mm από την ελάχιστη και μέγιστη τιμή, για τον άξονα Y 1.8 mm από την ελάχιστη και 1.6 mm από την μέγιστη και για τον άξονα Z 1 mm από την ελάχιστη και 0.8 mm από την μέγιστη.

Πίνακας 11 Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης σημείου T7.

Σημείο T7			
	X (m)	Y (m)	Z (m)
Ελάχιστη τιμή	118.7120	120.9408	18.9703
Μέγιστη τιμή	118.7152	120.9442	18.9721
Μέση τιμή	118.7136	120.9426	18.9713
Τυπική απόκλιση	0.000651	0.000590	0.000286



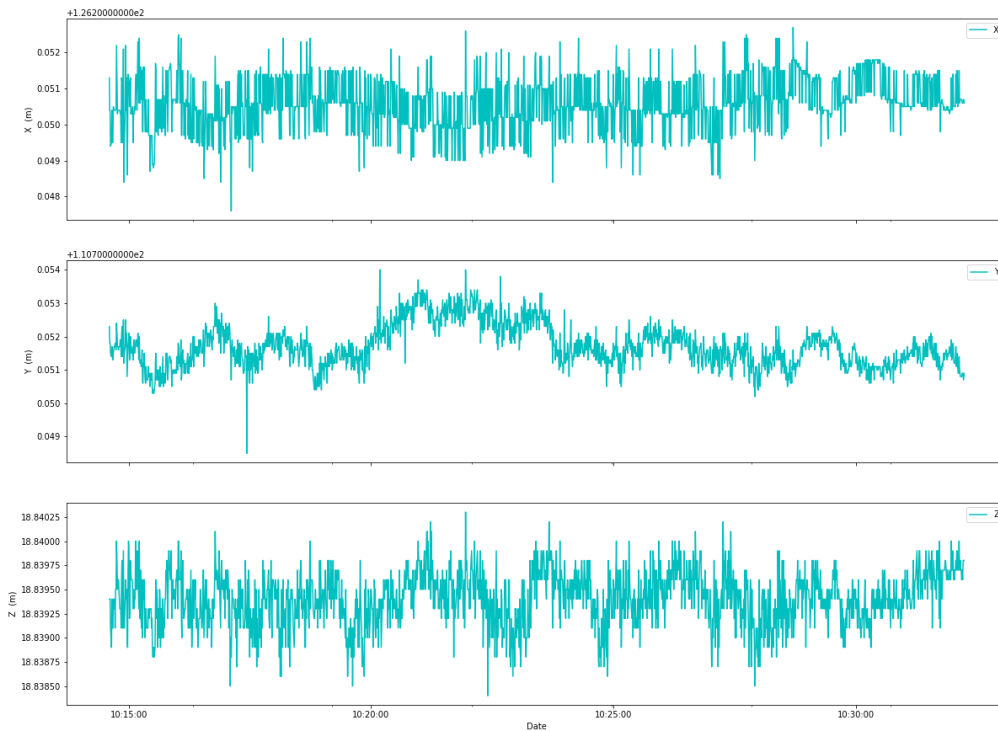
Σχήμα 17 Χρονοσειρές σημείου T7.

Σημείο T8

Όπως παρατηρείται στον παρακάτω πίνακα και διάγραμμα παρουσιάζονται τιμές με απόκλιση 0.737 mm για την μετατόπιση κατά τον X άξονα, 0.640 mm για τον Y και 0.282 mm για την κατακόρυφη. Επίσης, ο μέσος όρος για τον X άξονα παρουσιάζει μετατόπιση 3 mm από την ελάχιστη και 2.1 mm από την μέγιστη τιμή, για τον άξονα Y 3.2 mm από την ελάχιστη και 2.3 mm από την μέγιστη και για τον άξονα Z 1 mm από την ελάχιστη και 0.9 mm από την μέγιστη.

Πίνακας 12 Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης σημείου T8.

Σημείο T8			
	X (m)	Y (m)	Z (m)
Ελάχιστη τιμή	126.2476	110.7485	18.8384
Μέγιστη τιμή	126.2527	110.7540	18.8403
Μέση τιμή	126.2506	110.7517	18.8394
Τυπική απόκλιση	0.000737	0.000640	0.000282



Σχήμα 18 Χρονοσειρές σημείου T8.

Από τα παραπάνω παρατηρείται ότι, στο τμήμα T1-T4 όπου το υψόμετρο της γέφυρας είναι μικρότερο και με μεγαλύτερη κλίση συγκριτικά με το T5-T8 και βρίσκεται σε κοντινότερη απόσταση στο ακρόβαθρο και τον αρμό συστολής – διαστολής, οι αποκλίσεις των τιμών είναι μικρότερες. Αυτό ίσως, συμβαίνει και για τον λόγο ότι η απόσταση μεταξύ οργάνου - στόχων ήταν σαφώς μεγαλύτερη στο τμήμα T5-T8. Η μεγαλύτερη τιμή όσον αφορά την τυπική απόκλιση για τον άξονα X εμφανίζεται στο σημείο T6 (0.791 mm), για τον άξονα Y στο σημείο T8 (0.640 mm) και για τον άξονα Z στο σημείο T5 (0.341 mm). Αντίστοιχα η ελάχιστη απόκλιση για τον άξονα X εμφανίζεται στο σημείο T3 (0.313 mm), για τον άξονα Y στο σημείο T3 (0.128 mm) και για τον άξονα Z στο σημείο T2 (0.202 mm). Επιπλέον, την παρατήρηση αυτή συμπληρώνει το γεγονός ότι κατά κύριο λόγο, οι μεγαλύτερες διαφορές μεταξύ της μέγιστης και ελάχιστης τιμής εμφανίζονται στο τμήμα T5-T8, ενώ οι μικρότερες στο T1-T4. Πιο αναλυτικά, για τον άξονα X εμφανίζεται μέγιστη διαφορά στο σημείο T6 (5.2 mm) και στο σημείο T8 (5.1 mm), ενώ η ελάχιστη στο σημείο T3 (2 mm) και στο σημείο T2 (2.3 mm). Για τον άξονα Y, μέγιστη διαφορά παρουσιάζεται στο T6 (5.9 mm) και στο T8 (5.5 mm), ενώ η ελάχιστη στο σημείο T3 (1 mm). Τέλος, για τον άξονα Z η μεγαλύτερη διαφορά εμφανίζεται στο σημείο T3 (2.9 mm) και στο T5 (2.4 mm), ενώ η ελάχιστη στα σημεία T2 και T4 (1.3 mm) και στο T1 (1.4 mm).

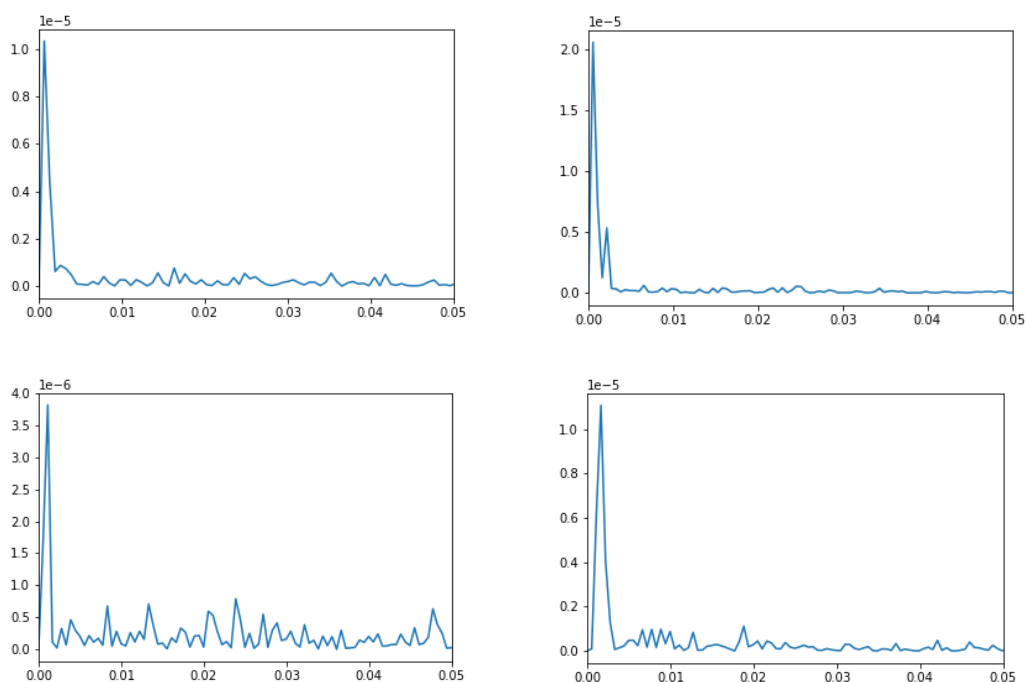
Συνοψίζοντας, η εμφάνιση μεγάλων διαφορών μεταξύ της μέγιστης και ελάχιστης τιμής, καθώς και οι υψηλές αποκλίσεις, δηλώνουν την ύπαρξη ακραίων τιμών οι οποίες οφείλονται σε τυχαίους κραδασμούς από τα διερχόμενα οχήματα.

6. Ανάλυση χρονοσειρών

Παρακάτω αναλύονται τα διαγράμματα του FFT για τα δύο τμήματα της γέφυρας (T1-T4 και T5-T8). Επίσης, παρουσιάζονται τα περιοδογράμματα τους. Τα διαγράμματα αυτά είναι χρήσιμα καθώς δείχνουν την ενέργεια που προσδίδει η εκάστοτε συχνότητα στο σύστημα. Με άλλα λόγια αποτελούν την συνάρτηση της ισχύος με την συχνότητα (στον κατακόρυφο άξονα έχουμε την ισχύ και στον οριζόντιο την συχνότητα).

6.1 Κατακόρυφη μετακίνηση της γέφυρας

6.1.1 Τμήμα T1-T4



Σχήμα 19 Περιοδογράμματα κατά τον άξονα Z για το τμήμα T1-T4 (Πάνω αριστερά αφορά το T1, πάνω δεξιά το T2, κάτω αριστερά το T3 και κάτω δεξιά το T4).

Πίνακας 13 Αποτελέσματα ανάλυσης κατά τον Z άξονα για τα σημεία T1-T4.

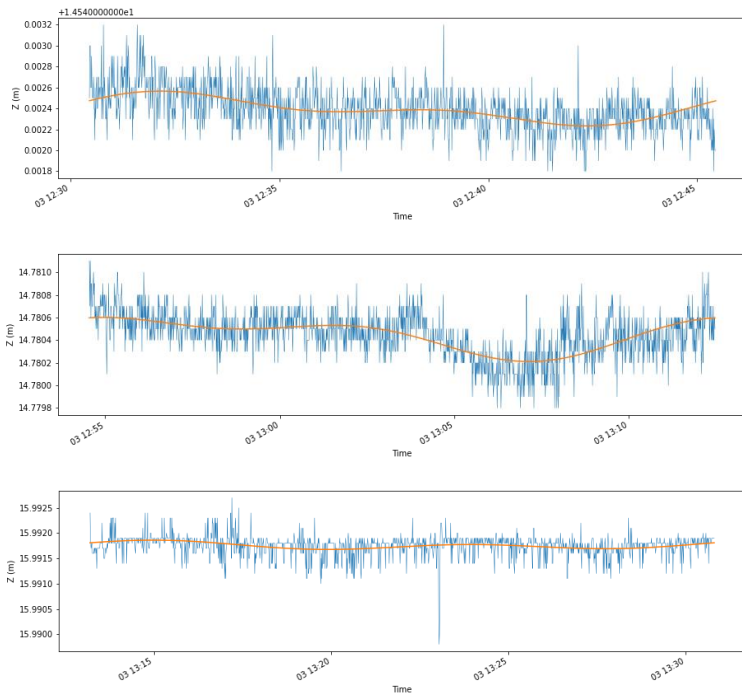
CODE	T1 (Z)	T2 (Z)	T3 (Z)	T4 (Z)
period1	1532.00	1835.00	901.00	602.00
freq1	0.000653	0.000545	0.001110	0.001661
power1	0.000010	0.000021	0.000004	0.000011
period2	766.00	917.50	1802.00	903.00
freq2	0.001305	0.001090	0.000555	0.001107
power2	0.000004	0.000007	0.000002	0.000006
period3	383.00	458.75	11.26	451.50
freq3	0.002611	0.002180	0.088790	0.002215
power3	0.000001	0.000005	0.000001	0.000004

Από τα αποτελέσματα, μπορούν να ομαδοποιηθούν οι συχνότητες σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα:

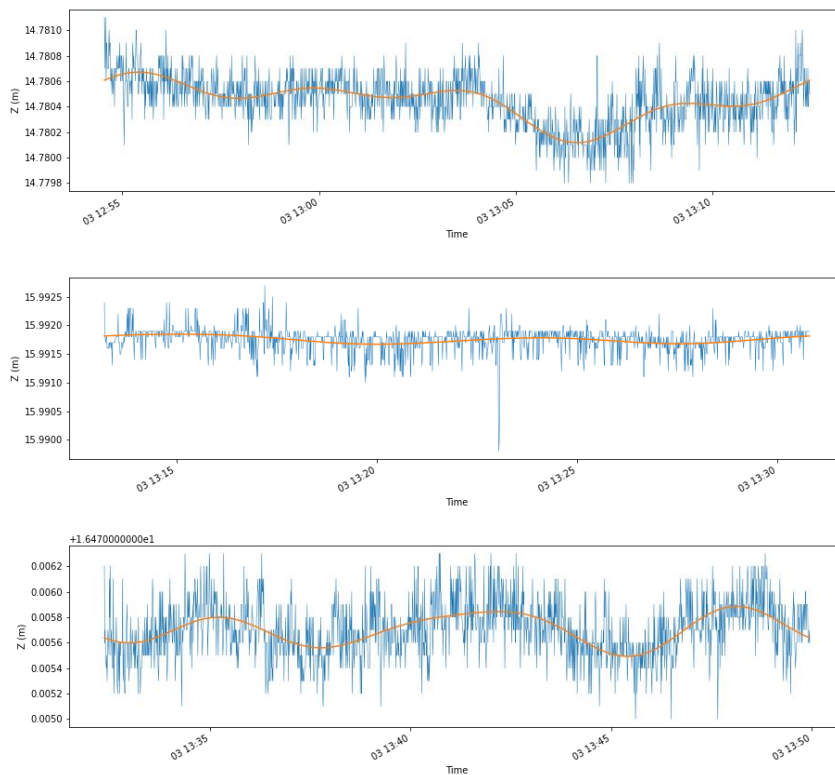
Πίνακας 14 Ομαδοποίηση αποτελεσμάτων κατά τον Z άξονα του τμήματος T1-T4.

Ομαδοποιημένες συχνότητες	Ομαδοποιημένες περίοδοι
T1 (freq1)	1532-1835
T2 (freq1)	
T3 (freq2)	
T2 (freq2)	901-917.50
T3 (freq1)	
T4 (freq2)	
T4 (freq1)	602
T2 (freq3)	451.50-458.75
T4 (freq3)	
T1 (freq2)	766
T1 (freq3)	383
T3 (freq3)	11.26

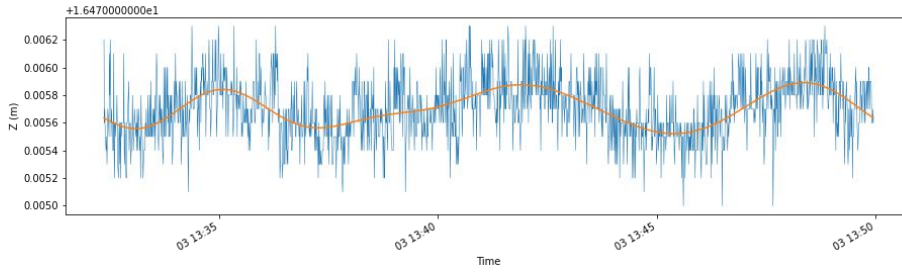
Οι συχνότητες με περίοδο το πλήθος των μετρήσεων (1802-1835) δεν μπορούν να θεωρηθούν πραγματικές καθώς για να επιβεβαιωθούν θα έπρεπε να υπήρχε μεγαλύτερο δείγμα. Επίσης, η συχνότητα με περίοδο 11.26 που παρουσιάζεται στο σημείο T3, αποτελεί παράδειγμα του φαινομένου της παραποίησης κατά το οποίο είναι αδύνατος ο διαχωρισμός των επιμέρους συχνοτήτων (για αυτό και ακολουθεί την πορεία του σήματος). Τέλος, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του T1 με το T2 αλλά και με το σύνολο των υπόλοιπων 7 σημείων της γέφυρας, παρατηρείται ότι παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά, πράγμα λογικό καθώς αποτελεί το μοναδικό σημείο αριστερά του αρμού της γέφυρας.



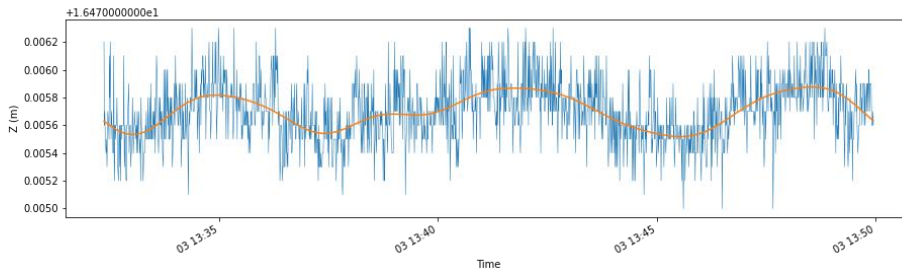
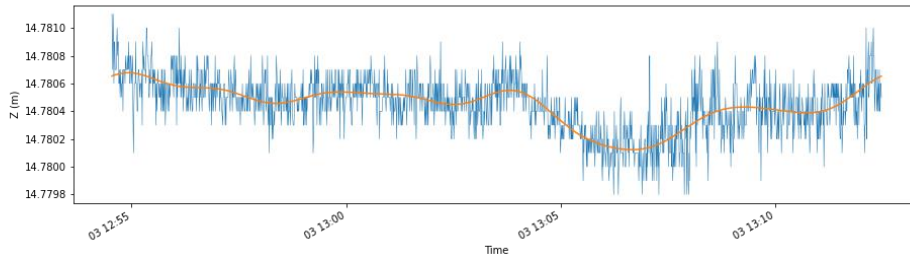
Σχήμα 20 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα Z πάνω για το σημείο T1 όσον αφορά την 1^η επικρατέστερη περίοδο ($T=1532$), στην μέση για το T2 όσον αφορά την 1^η επικρατέστερη περίοδο ($T=1835$) και κάτω για το T3 όσον αφορά την 2^η επικρατέστερη περίοδο ($T=1802$).



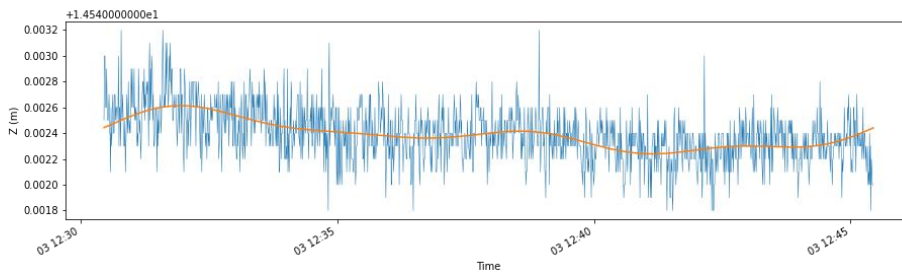
Σχήμα 21 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα Z πάνω για το σημείο T2 όσον αφορά την 2^η επικρατέστερη περίοδο ($T=917.50$), στην μέση για το T3 όσον αφορά την 1^η επικρατέστερη περίοδο ($T=901$) και κάτω για το T4 όσον αφορά την 2^η επικρατέστερη περίοδο ($T=903$).



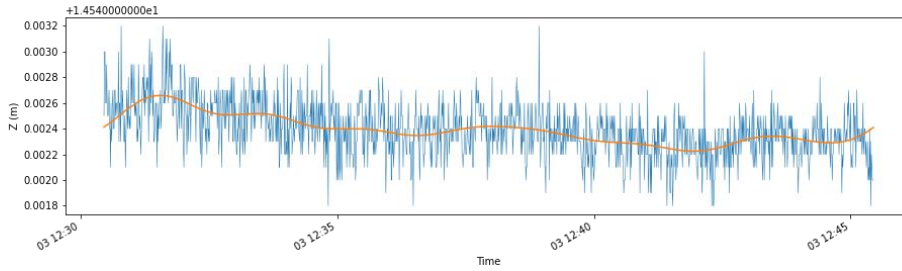
Σχήμα 22 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα Z για το σημείο T4 όσον αφορά την 1^η επικρατέστερη περίοδο ($T=602$).



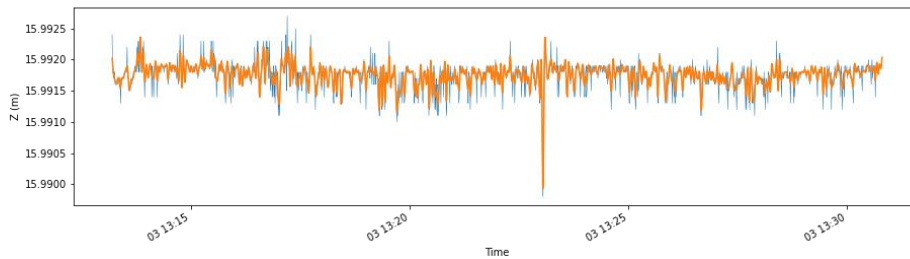
Σχήμα 23 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα Z πάνω για το σημείο T2 όσον αφορά την 3^η επικρατέστερη περίοδο ($T=458.75$), κάτω για το T4 όσον αφορά την 3^η επικρατέστερη περίοδο ($T=451.50$).



Σχήμα 24 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα Z για το σημείο T1 όσον αφορά την 2^η επικρατέστερη περίοδο ($T=766$).



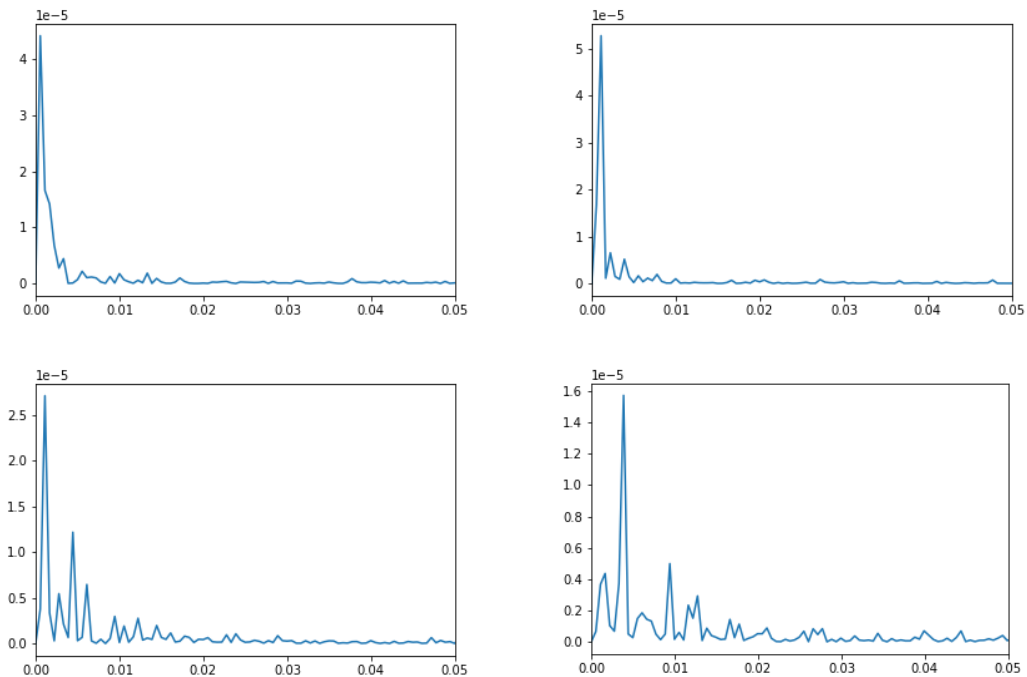
Σχήμα 25 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα Z για το σημείο T1 όσον αφορά την 3^η επικρατέστερη περίοδο ($T=383$).



Σχήμα 26 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα Z για το σημείο T3 όσον αφορά την 3^η επικρατέστερη περίοδο ($T=11.26$).

Στα παραπάνω γραφήματα που έχουν προκύψει από τον γρήγορο μετασχηματισμό Fourier (FFT), παρατηρείται η χρονοσειρά όπως ακριβώς φαίνεται στην παραπάνω ενότητα ως μπλε γραμμή και με πορτοκαλί ουσιαστικά ο μέσος όρος των πλήρη κύκλων που έχουν προκύψει βάση της εκάστοτε περιόδου T .

6.1.2 Τμήμα T5-T8



Σχήμα 27 Περιοδογράμματα κατά τον άξονα Z για το τμήμα T5-T8 (Πάνω αριστερά αφορά το T5, πάνω δεξιά το T6, κάτω αριστερά το T7 και κάτω δεξιά το T8).

Πίνακας 15 Αποτελέσματα ανάλυσης κατά τον Z άξονα για τα σημεία T5-T8.

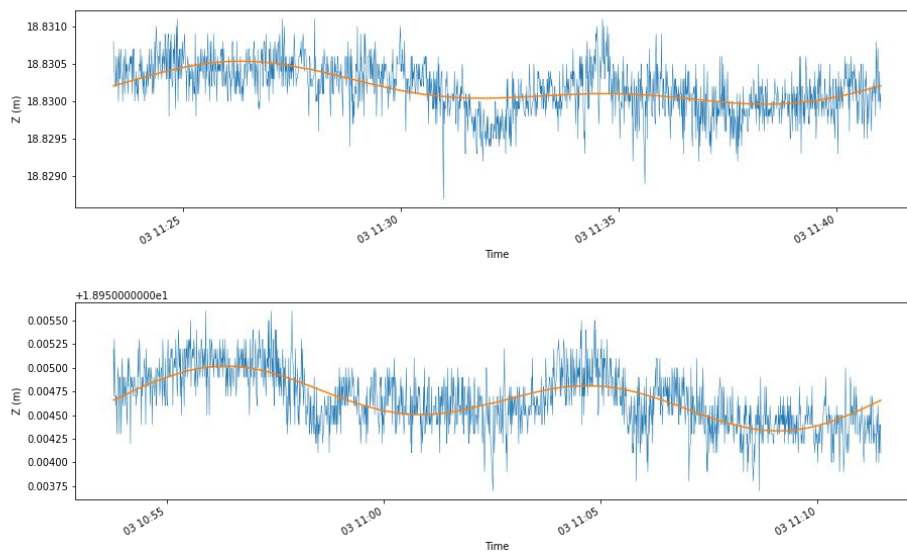
CODE	T5 (Z)	T6 (Z)	T7 (Z)	T8 (Z)
period1	1802.00	901.00	900.50	257.71
freq1	0.000555	0.001110	0.001110	0.003880
power1	0.000044	0.000053	0.000027	0.000016
period2	901.00	1802.00	225.12	106.12
freq2	0.001110	0.000555	0.004442	0.009424
power2	0.000017	0.000017	0.000012	0.000005
period3	600.67	450.50	163.73	601.33
freq3	0.001665	0.002220	0.006108	0.001663
power3	0.000014	0.000007	0.000006	0.000004

Και σε αυτό το τμήμα μπορούν να ομαδοποιηθούν οι συχνότητες σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα.

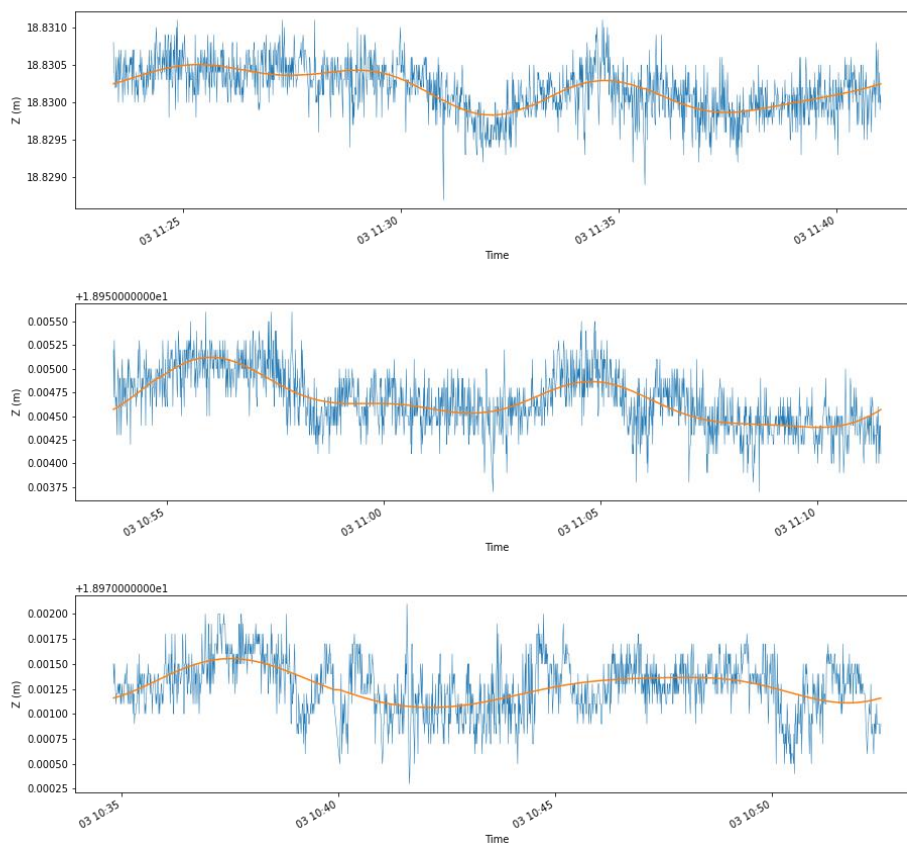
Πίνακας 16 Ομαδοποίηση αποτελεσμάτων κατά τον Z άξονα τμήματος T5-T8.

Ομαδοποιημένες συχνότητες	Ομαδοποιημένες περιόδους
T5 (freq1)	1802
T6 (freq2)	
T5 (freq2)	900.50-901
T6 (freq1)	
T7 (freq1)	
T5 (freq3)	600.67-601.33
T8 (freq3)	
T6 (freq3)	450.50
T7 (freq2)	225.12-257.71
T8 (freq1)	
T8 (freq2)	106.12
T7 (freq3)	163.73

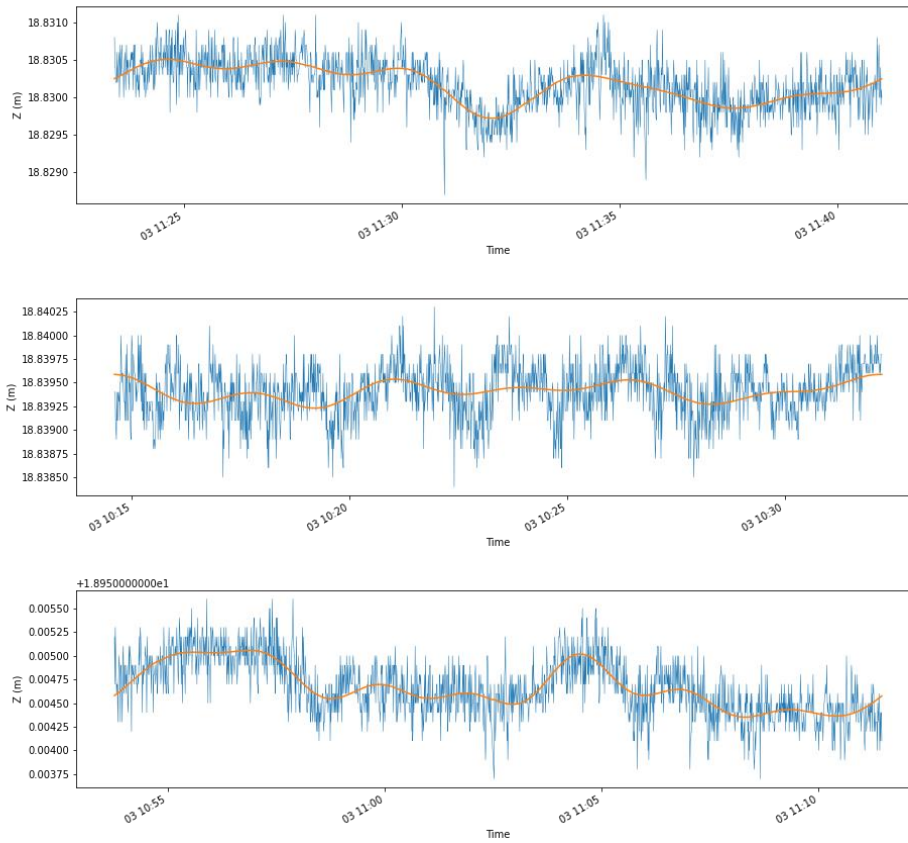
Οι συχνότητες με περίοδο 106.12 και 163.73 στα δύο τελευταία σημεία (T8 και T7 αντίστοιχα) θεωρούνται τυχαίες καθώς δεν εμφανίζονται σε κανένα άλλο από τα υπόλοιπα σημεία. Τέλος και σε αυτήν την περίπτωση οι συχνότητες με περίοδο το πλήθος των μετρήσεων προκαλούν ερώτημα σχετικά με την ορθότητα τους.



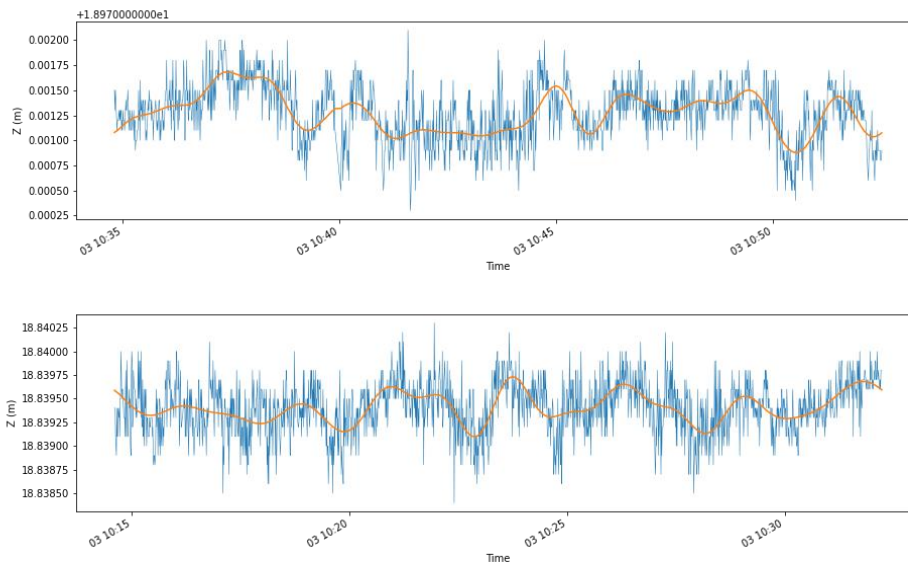
Σχήμα 28 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα Z πάνω για το σημείο T5 όσον αφορά την 1^η επικρατέστερη περίοδο ($T=1802$), κάτω για το T6 όσον αφορά την 2^η επικρατέστερη περίοδο ($T=1802$).



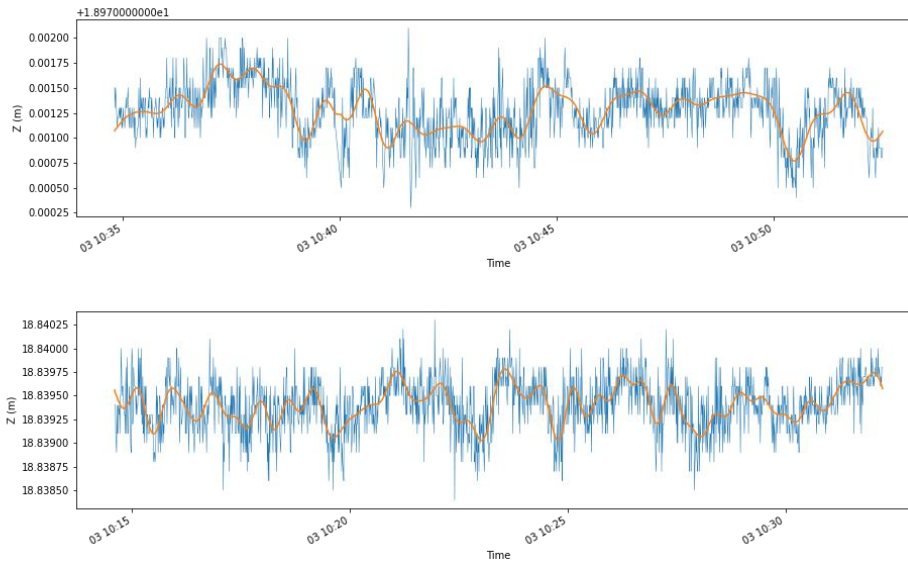
Σχήμα 29 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα Z πάνω για το σημείο T5 όσον αφορά την 2^η επικρατέστερη περίοδο ($T=901$), στην μέση για το T6 όσον αφορά την 1^η επικρατέστερη περίοδο ($T=901$) και κάτω για το T7 όσον αφορά την 1^η επικρατέστερη περίοδο ($T=900.50$).



Σχήμα 30 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα Z πάνω για το σημείο T5 όσον αφορά την 3^η επικρατέστερη περίοδο ($T=600.67$), στην μέση για το T8 όσον αφορά την 3^η επικρατέστερη περίοδο ($T=601.33$) και κάτω για το T6 όσον αφορά την 3^η επικρατέστερη περίοδο ($T=450.50$).



Σχήμα 31 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα Z πάνω για το σημείο T7 όσον αφορά την 2^η επικρατέστερη περίοδο ($T=225.12$), κάτω για το T8 όσον αφορά την 1^η επικρατέστερη περίοδο ($T=257.71$).



Σχήμα 32 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα Z πάνω για το σημείο T7 όσον αφορά την 3^η επικρατέστερη περίοδο ($T=163.73$), κάτω για το T8 όσον αφορά την 2^η επικρατέστερη περίοδο ($T=106.12$).

6.1.3 Φυσικές συχνότητες κατακόρυφης μετακίνησης νότιας γέφυρας

Συγκρίνοντας τα ομαδοποιημένα αποτελέσματα των δύο τμημάτων, διαπιστώνονται οι συχνότητες που μπορούν να θεωρηθούν πραγματικές και όχι τυχαίες να είναι οι ακόλουθες.

Πίνακας 17 Ομαδοποίηση αποτελεσμάτων κατά τον Z άξονα συνολικού τμήματος γέφυρας.

Σημείο	Περίοδος	Συχνότητα	Ισχύς
T2	917.50	0.001090	0.000007
T3	901.00	0.001110	0.000004
T4	903.00	0.001107	0.000006
T5	901.00	0.001110	0.000017
T6	901.00	0.001110	0.000053
T7	900.50	0.001110	0.000027
Σημείο	Περίοδος	Συχνότητα	Ισχύς
T4	602.00	0.001661	0.000011
T5	600.67	0.001665	0.000014
T8	601.33	0.001663	0.000004
Σημείο	Περίοδος	Συχνότητα	Ισχύς
T2	458.75	0.002180	0.000005
T4	451.50	0.002215	0.000004
T6	450.50	0.002220	0.000007

Για τον λόγο ότι το αντικείμενο μελέτης πρόκειται για μία συνεχής ολόσωμη γέφυρα, με τον μοναδικό αρμό να βρίσκεται μεταξύ του σημείου T1 και T2, παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά σε κάθε της κομμάτι. Συνεπώς, οι συχνότητες που μπορούν να θεωρηθούν ορθές είναι αυτές που εμφανίζονται στην πλειοψηφία των σημείων της.

Έτσι, από τα παραπάνω προκύπτει ότι σε ότι αφορά την κατακόρυφη μετακίνηση της γέφυρας στο τμήμα της μετά τον αρμό, οι φυσικές συχνότητες της είναι αυτές που φαίνονται στο παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 18 Φυσικές συχνότητες κατακόρυφης μετακίνησης νότιας γέφυρας.

Περίοδος (Μετρήσεις)	Περίοδος (sec)	Συχνότητα (Hz)	Ισχύς
904	452	0.001106	0.000019
601	301	0.001663	0.000010
454	227	0.002205	0.000005

Η περίοδος σε δευτερόλεπτα μετατρέπεται εύκολα αν πολλαπλασιαστεί ο ρυθμός μέτρησης των στόχων ($T=0.5 \text{ sec}$) με το πλήθος των μετρήσεων που χρειάζεται για να πραγματοποιηθεί ένας πλήρης κύκλος στο σήμα. Για παράδειγμα, $T = 904 \text{ (μετρήσεις)} \cdot 0.5 \text{ sec} \Rightarrow T = 452 \text{ sec}$. Τα παραπάνω, έχουν προκύψει από την μέση τιμή των ομαδοποιημένων αποτελεσμάτων.

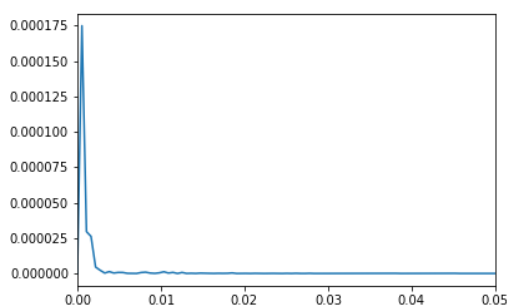
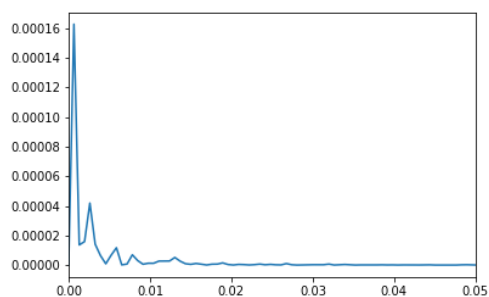
Για την περίπτωση του σημείου T1 (δηλαδή για το τμήμα αριστερά από τον αρμό), δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία καθώς ήταν το μοναδικό πρίσμα που τοποθετήθηκε πάνω από ακρόβαθρο. Καλύτερα αποτελέσματα θα υπήρχαν στην περίπτωση όπου είχε μελετηθεί το αντίστοιχο κομμάτι στην άλλη πλευρά την γέφυρας. Παρ' όλα αυτά με την όποια επιφύλαξη οι δύο επικρατέστερες ιδιοσυχνότητες που μπορεί να θεωρηθεί ότι κινείται η γέφυρα σε αυτό το τμήμα δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

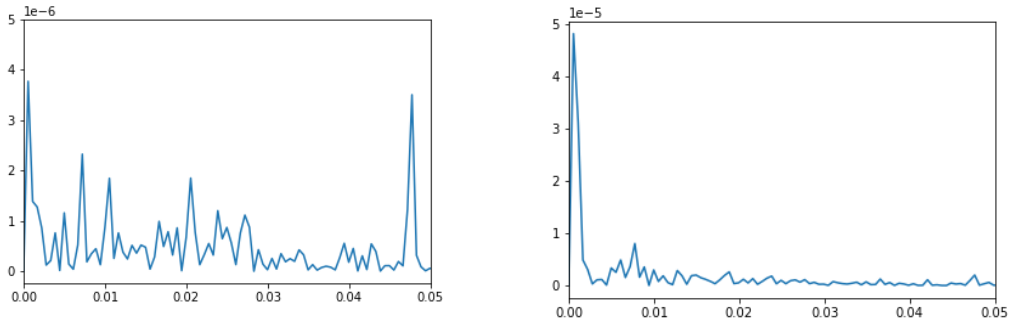
Πίνακας 19 Ιδιοσυχνότητες κατακόρυφης μετακίνησης νότιας γέφυρας στο τμήμα του ακρόβαθρου.

Περίοδος (Μετρήσεις)	Περίοδος (sec)	Συχνότητα	Ισχύς
766	383	0.001305	0.000004
383	192	0.002611	0.000001

6.2 Κατά τον X άξονα μετακίνηση της γέφυρας

6.2.1 Τμήμα T1-T4





Σχήμα 33 Περιοδογράμματα κατά τον άξονα X για το τμήμα T1-T4 (Πάνω αριστερά αφορά το T1, πάνω δεξιά το T2, κάτω αριστερά το T3 και κάτω δεξιά το T4).

Πίνακας 20 Αποτελέσματα ανάλυσης κατά τον X άξονα για τα σημεία T1-T4.

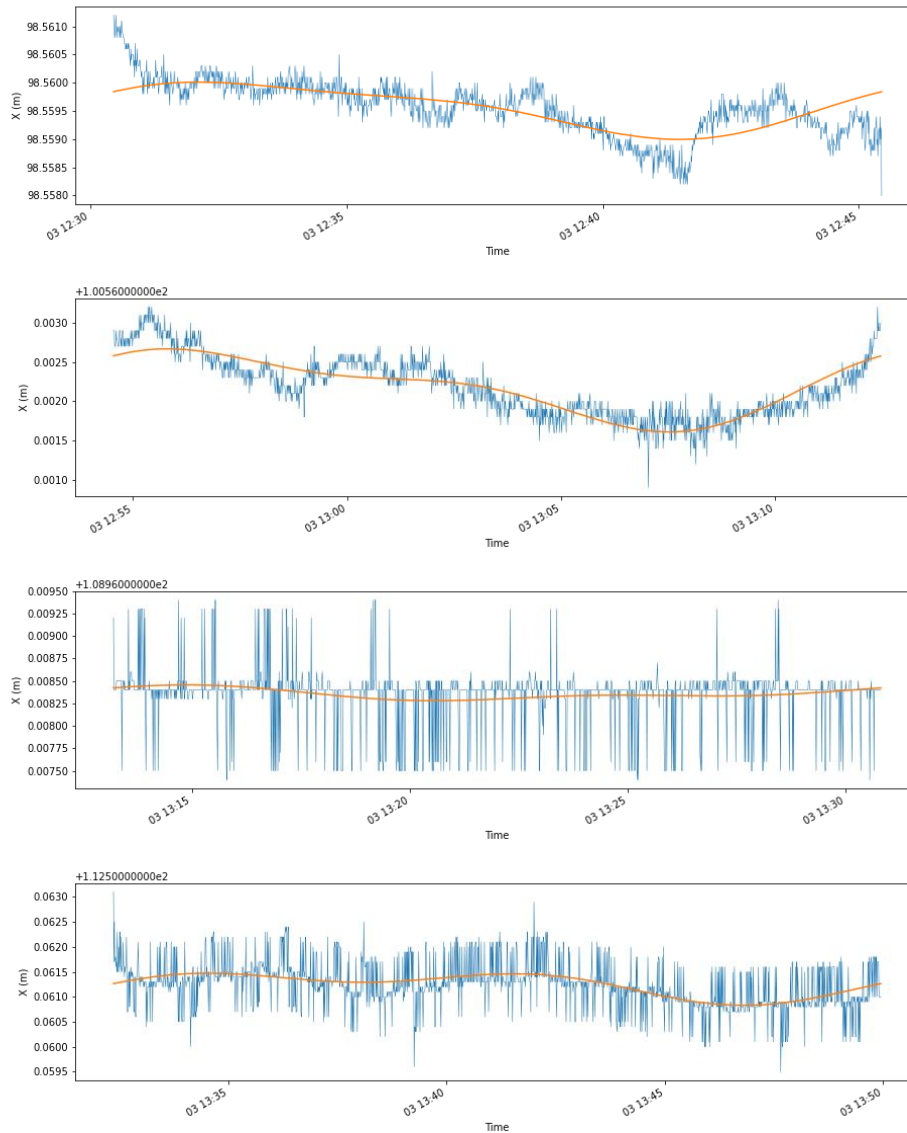
	T1 (X)	T2 (X)	T3 (X)	T4 (X)
period1	1532.00	1835.00	10.54	1806.00
freq1	0.000653	0.000545	0.094895	0.000554
power1	0.000163	0.000175	0.000005	0.000048
period2	383.00	917.50	1802.00	903.00
freq2	0.002611	0.001090	0.000555	0.001107
power2	0.000042	0.000030	0.000004	0.000031
period3	510.67	611.67	20.95	129.00
freq3	0.001958	0.001635	0.047725	0.007752
power3	0.000016	0.000026	0.000004	0.000008

Αντίστοιχα με την περίπτωση της κατακόρυφης μετακίνησης προκύπτουν οι παρακάτω ομαδοποιημένες συχνότητες.

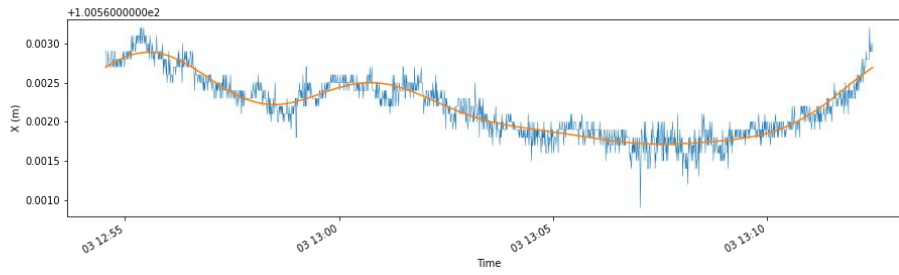
Πίνακας 21 Ομαδοποίηση αποτελεσμάτων κατά τον X άξονα του τμήματος T1-T4.

Ομαδοποιημένες συχνότητες	Ομαδοποιημένες περιόδους
T1 (freq1)	1532-1835
T2 (freq1)	
T3 (freq2)	
T4 (freq1)	
T2 (freq2)	903-917.50
T4 (freq2)	
T2 (freq3)	611.67
T1 (freq2)	383
T1 (freq3)	510.67
T4 (freq3)	129
T3 (freq1)	10.54
T3 (freq3)	20.95

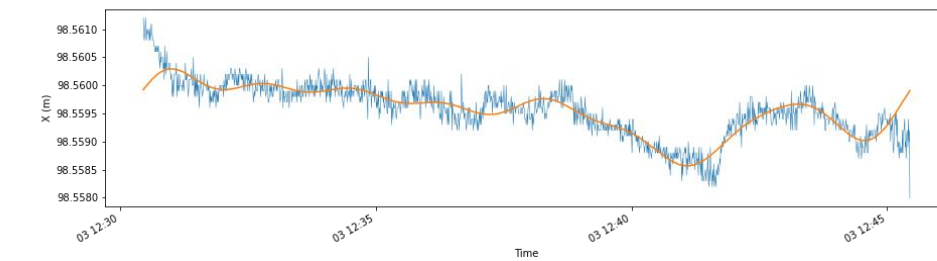
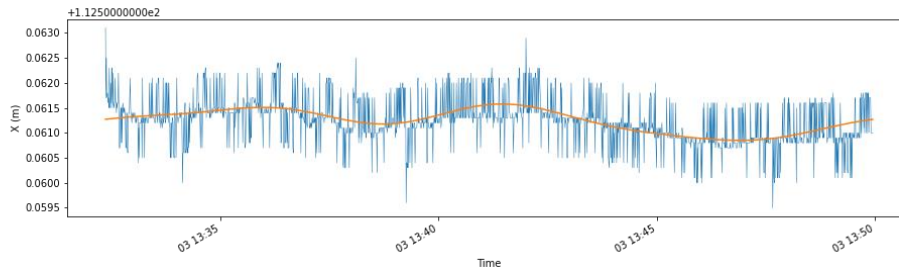
Όπως και στην περίπτωση της κατακόρυφης μετακίνησης, οι συχνότητες με περίοδο το σύνολο των παρατηρήσεων δεν μπορούν να θεωρηθούν αληθείς λόγω έλλειψης παραπανίσιων μετρήσεων. Επίσης, οι συχνότητες με περίοδο 10.54-20.95 αποτελούν όπως έχει αναφερθεί το φαινόμενο της παραποίησης. Μία άλλη πιθανή εξήγηση είναι ότι οφείλονται σε τυχόν κραδασμούς που προκαλούσαν τα διερχόμενα οχήματα στο σύστημα.



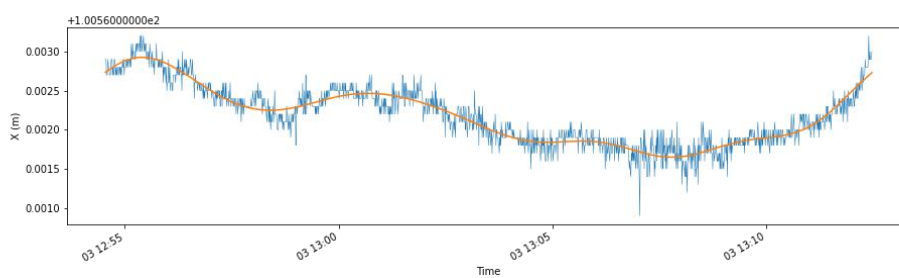
Σχήμα 34 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα X το 1° για το σημείο T1 όσον αφορά την 1^η επικρατέστερη περίοδο ($T=1532$), στην συνέχεια για το T2 όσον αφορά την 1^η επικρατέστερη περίοδο ($T=1835$), έπειτα για το T3 όσον αφορά την 2^η επικρατέστερη περίοδο ($T=1802$) και τέλος, για το T4 όσον αφορά την 1^η επικρατέστερη περίοδο ($T=1806$).



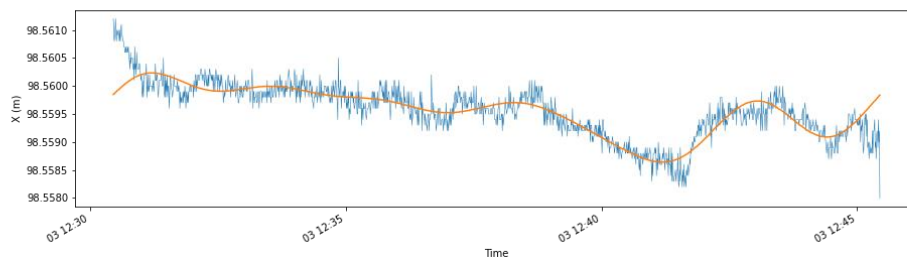
Σχήμα 35 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα X πάνω για το σημείο T2 όσον αφορά την 2^η επικρατέστερη περίοδο ($T=917.50$), κάτω για το T4 όσον αφορά την 2^η επικρατέστερη περίοδο ($T=903$).



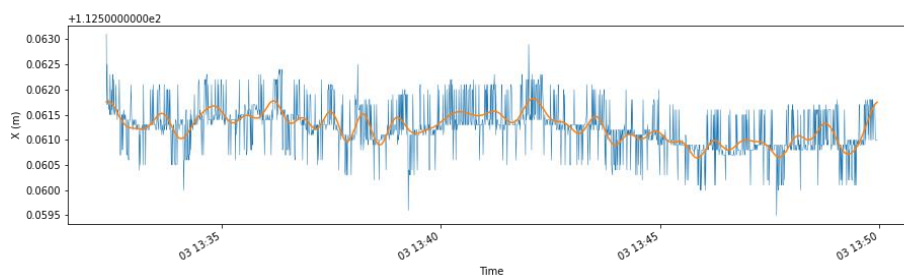
Σχήμα 36 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα X για το σημείο T1 όσον αφορά την 2^η επικρατέστερη περίοδο ($T=383$).



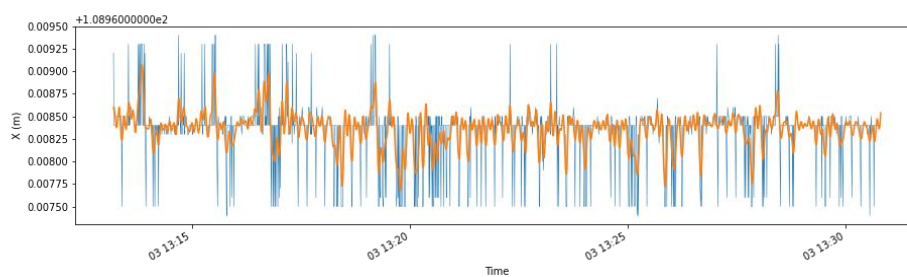
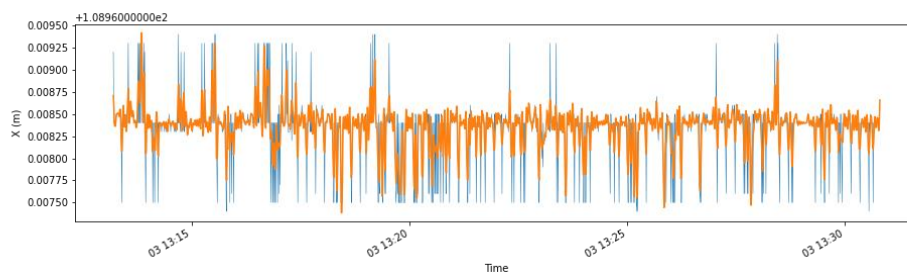
Σχήμα 37 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα X για το σημείο T2 όσον αφορά την 3^η επικρατέστερη περίοδο ($T=611.67$).



Σχήμα 38 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα X για το σημείο T1 όσον αφορά την 3^η επικρατέστερη περίοδο ($T=510.67$).

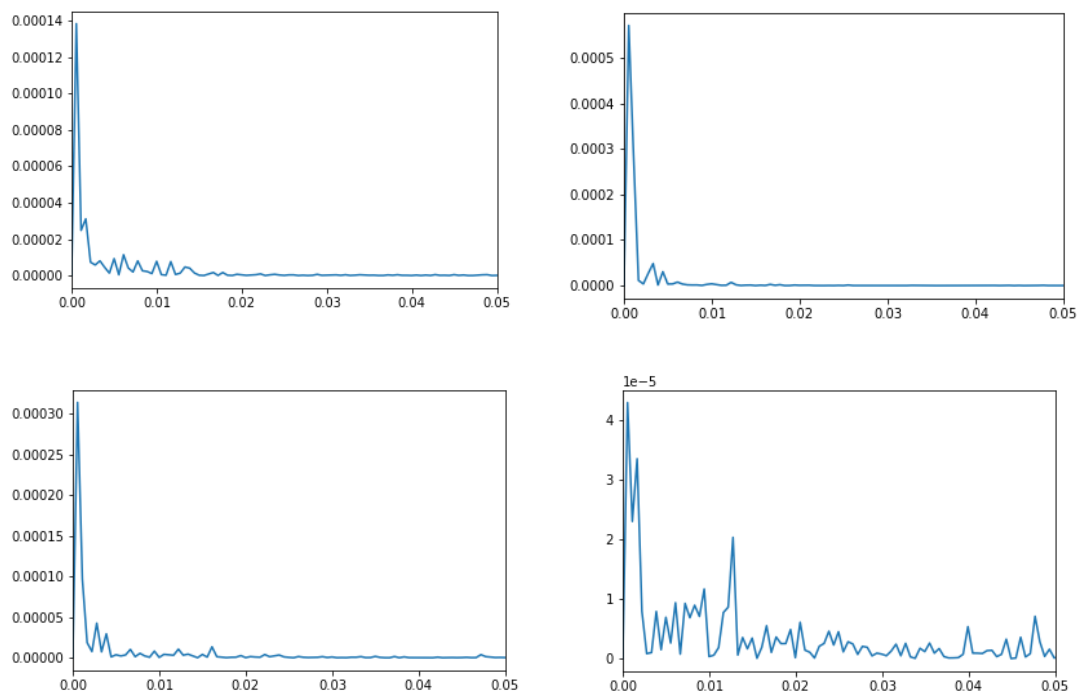


Σχήμα 39 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα X για το σημείο T4 όσον αφορά την 3^η επικρατέστερη περίοδο ($T=129$).



Σχήμα 40 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα X πάνω για το σημείο T3 όσον αφορά την 1^η επικρατέστερη περίοδο ($T=10.54$), κάτω για το T3 όσον αφορά την 3^η επικρατέστερη περίοδο ($T=20.95$).

1.1.1 Τμήμα T5-T8



Σχήμα 41 Περιοδογράμματα κατά τον άξονα X για το τμήμα T5-T8 (Πάνω αριστερά αφορά το T5, πάνω δεξιά το T6, κάτω αριστερά το T7 και κάτω δεξιά το T8).

Πίνακας 22 Αποτελέσματα ανάλυσης κατά τον X άξονα για τα σημεία T5-T8.

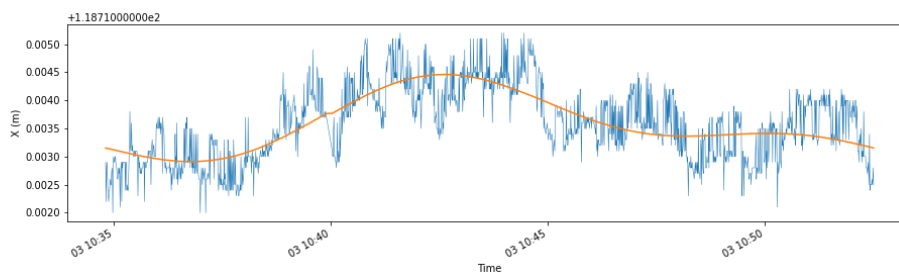
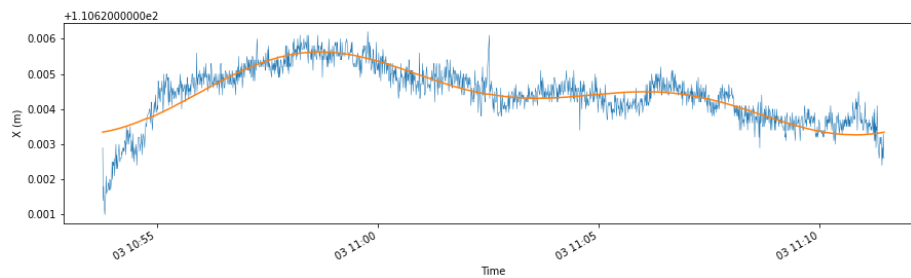
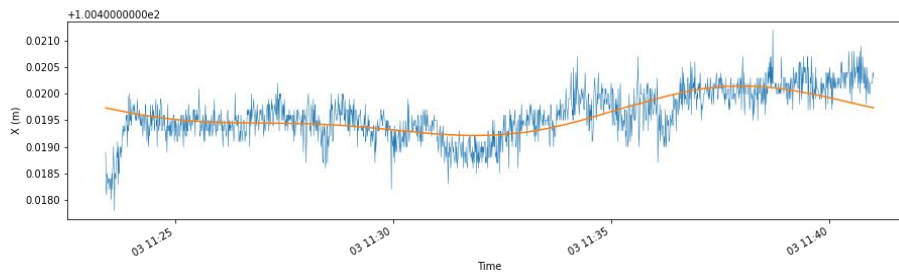
	T5 (X)	T6 (X)	T7 (X)	T8 (X)
period1	1802.00	1802.00	1801.00	1804.00
freq1	0.000555	0.000555	0.000555	0.000554
power1	0.000138	0.000571	0.000314	0.000043
period2	600.67	901.00	900.50	601.33
freq2	0.001665	0.001110	0.001110	0.001663
power2	0.000031	0.000282	0.000097	0.000034
period3	901.00	300.33	360.20	902.00
freq3	0.001110	0.003330	0.002776	0.001109
power3	0.000025	0.000048	0.000043	0.000023

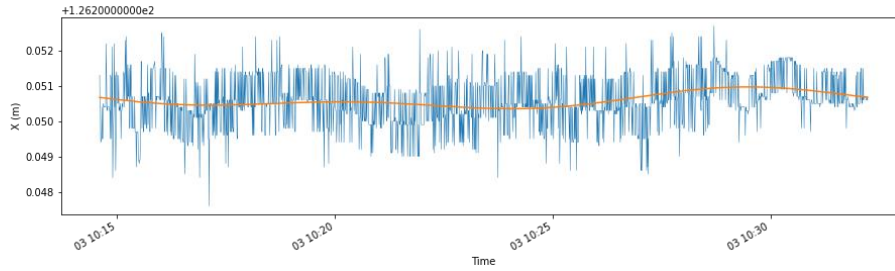
Αντίστοιχα γίνεται η παρακάτω ομαδοποίηση.

Πίνακας 23 Ομαδοποίηση αποτελεσμάτων κατά τον X άξονα του τμήματος T5-T8.

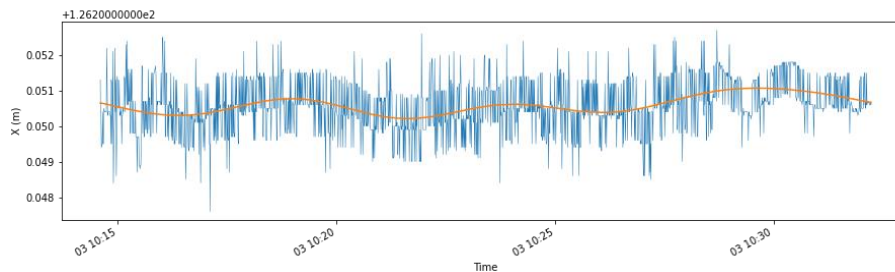
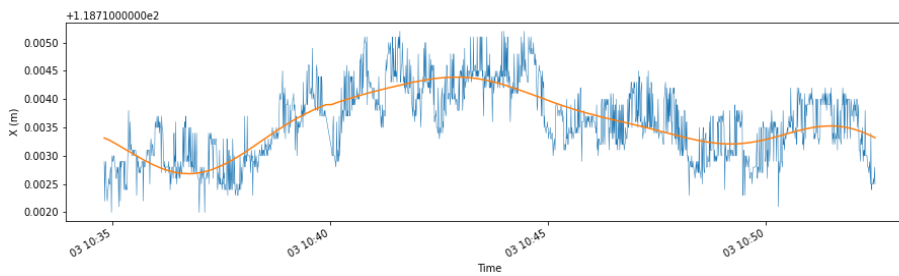
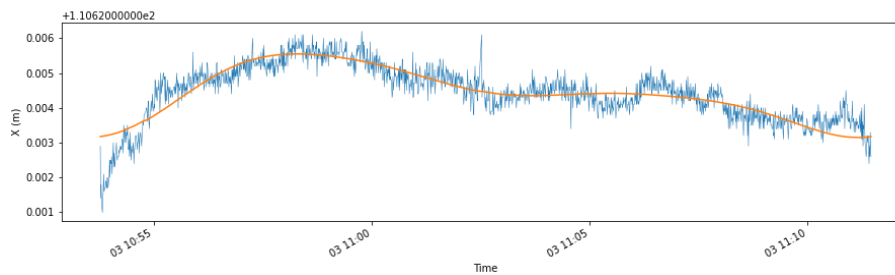
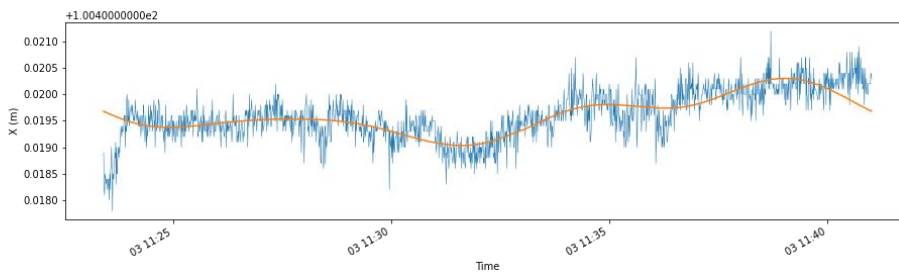
Ομαδοποιημένες συχνότητες	Ομαδοποιημένες περιόδους
T5 (freq1)	1801-1804
T6 (freq1)	
T7 (freq1)	
T8 (freq1)	
T5 (freq3)	900.50-902
T6 (freq2)	
T7 (freq2)	
T8 (freq3)	
T5 (freq2)	600.67-601.33
T8 (freq2)	
T6 (freq3)	300.33-360.20
T7 (freq3)	

Σε αυτό το τμήμα της γέφυρας παρατηρείται μία καλύτερη ομοιομορφία των αποτελεσμάτων, κάτι που προσδίδει ιδιαίτερη αξιοπιστία στις τιμές των συχνοτήτων. Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις έτσι και σε αυτήν, οι συχνότητες που έχουν προκύψει από την χρήση του συνόλου των παρατηρήσεων δεν θα ληφθούν υπόψιν.

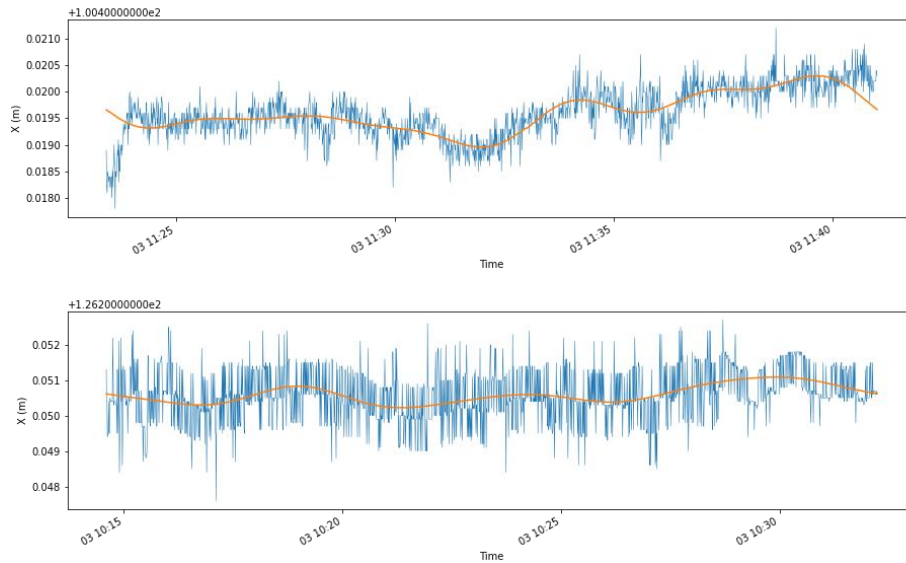




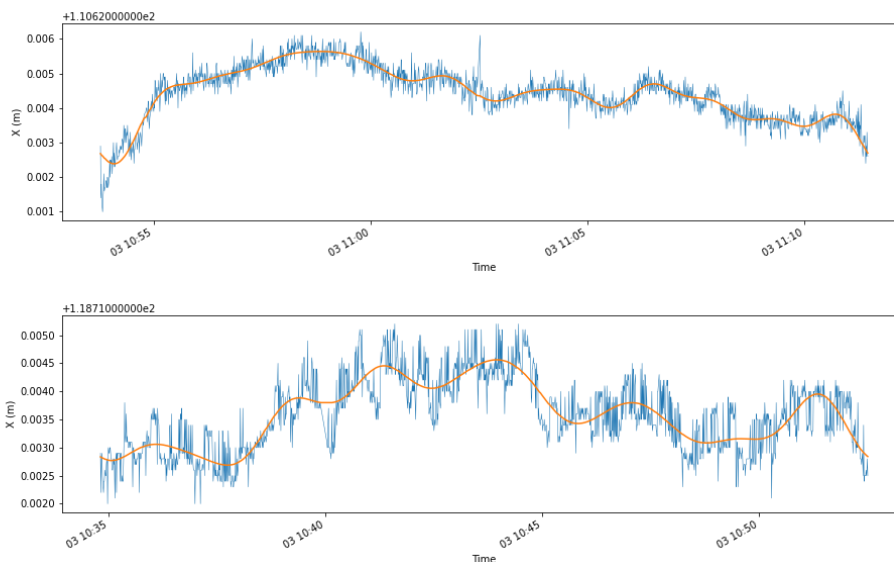
Σχήμα 42 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα X το 1^ο για το σημείο T5 όσον αφορά την 1^η επικρατέστερη περίοδο ($T=1802$), στην συνέχεια για το T6 όσον αφορά την 1^η επικρατέστερη περίοδο ($T=1802$), έπειτα για το T7 όσον αφορά την 1^η επικρατέστερη περίοδο ($T=1801$) και τέλος, για το T8 όσον αφορά την 1^η επικρατέστερη περίοδο ($T=1804$).



Σχήμα 43 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα X το 1^ο για το σημείο T5 όσον αφορά την 3^η επικρατέστερη περίοδο ($T=901$), στην συνέχεια για το T6 όσον αφορά την 2^η επικρατέστερη περίοδο ($T=901$), έπειτα για το T7 όσον αφορά την 2^η επικρατέστερη περίοδο ($T=900.50$) και τέλος, για το T8 όσον αφορά την 3^η επικρατέστερη περίοδο ($T=902$).



Σχήμα 44 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα X πάνω για το σημείο T5 όσον αφορά την 2^η επικρατέστερη περίοδο ($T=600.67$), κάτω για το T8 όσον αφορά την 2^η επικρατέστερη περίοδο ($T=601.33$).



Σχήμα 45 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα X πάνω για το σημείο T6 όσον αφορά την 3^η επικρατέστερη περίοδο ($T=300.33$), κάτω για το T7 όσον αφορά την 3^η επικρατέστερη περίοδο ($T=360.20$).

6.2.2 Φυσικές συχνότητες μετακίνησης κατά τον X άξονα νότιας γέφυρας

Συγκρίνοντας τα ομαδοποιημένα αποτελέσματα των δύο τμημάτων, διαπιστώνονται οι συχνότητες που μπορούν να θεωρηθούν πραγματικές και όχι τυχαίες να είναι οι ακόλουθες.

Πίνακας 24 Ομαδοποίηση αποτελεσμάτων κατά τον Χ άξονα συνολικού τμήματος γέφυρας.

Σημείο	Περίοδος	Συχνότητα	Ισχύς
T2	917.50	0.001090	0.000030
T4	903.00	0.001107	0.000031
T5	901.00	0.001110	0.000025
T6	901.00	0.001110	0.000282
T7	900.50	0.001110	0.000097
T8	902.00	0.001109	0.000023

Σημείο	Περίοδος	Συχνότητα	Ισχύς
T2	611.67	0.001635	0.000026
T5	600.67	0.001665	0.000031
T8	601.33	0.001663	0.000034

Σημείο	Περίοδος	Συχνότητα	Ισχύς
T1	383.00	0.002611	0.000042
T6	300.33	0.003330	0.000048
T7	360.20	0.002776	0.000043

Το παράδοξο στην μετακίνηση κατά τον Χ άξονα είναι το γεγονός ότι σε αντίθεση με την κατακόρυφη όπου το σημείο T1 παρουσιάζει ανεξάρτητη των υπολοίπων συμπεριφορά, φαίνεται να κινείται με την ίδια περίπου μεγαλύτερη συχνότητα (~0.0026) όπου κινείται και το υπόλοιπο τμήμα της γέφυρας. Για τον λόγο αυτό, συμπεριλήφθηκε στον υπολογισμό της μέσης τιμής των τελικών αποτελεσμάτων.

Πίνακας 25 Φυσικές συχνότητες μετακίνησης κατά τον Χ άξονα νότιας γέφυρας.

Περίοδος (Μετρήσεις)	Περίοδος (sec)	Συχνότητα	Ισχύς
904	452	0.001106	0.000081
605	302	0.001654	0.000030
348	174	0.002906	0.000044

Στην περίπτωση όπου θεωρήσουμε το T1 ως ανεξάρτητο των υπολοίπων η τελευταία σειρά του παραπάνω πίνακα διαμορφώνεται ως εξής:

330	165	0.003053	0.000046
-----	-----	----------	----------

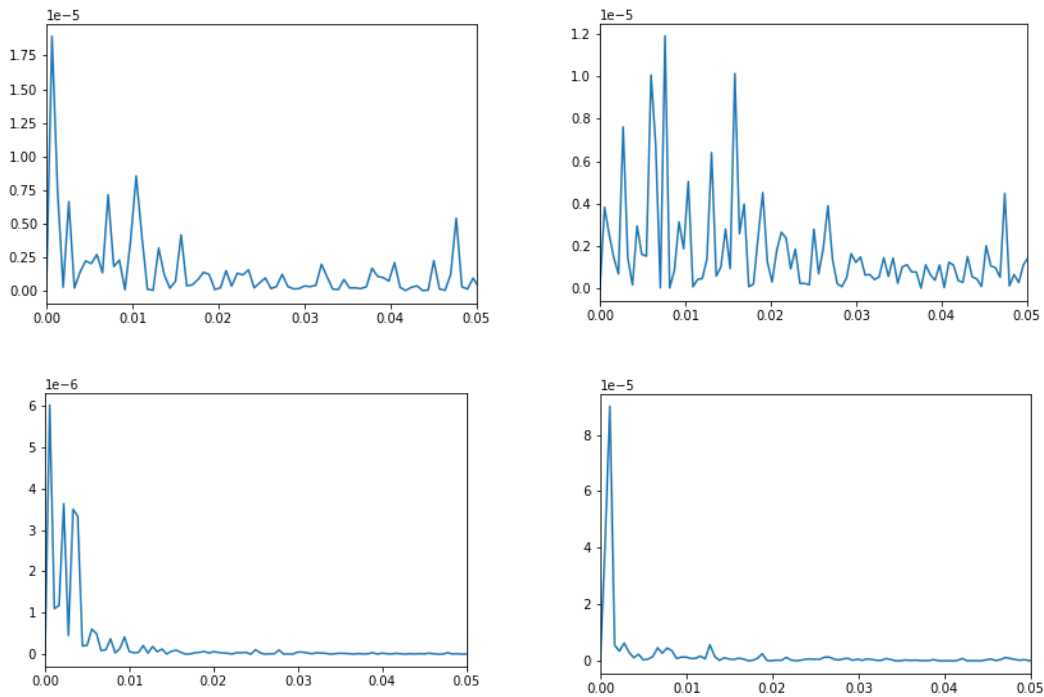
Ενώ, οι φυσικές συχνότητες της γέφυρας στο τμήμα του ακρόβαθρου είναι οι ακόλουθες.

Πίνακας 26 Φυσικές συχνότητες μετακίνησης κατά τον X άξονα νότιας γέφυρας στο τμήμα του ακρόβαθρου.

Περίοδος (Μετρήσεις)	Περίοδος (sec)	Συχνότητα	Ισχύς
383	192	0.002611	0.000042
511	255	0.001958	0.000016

6.3 Κατά τον Y άξονα μετακίνηση της γέφυρας

1.1.2 Τμήμα T1-T4



Σχήμα 46 Περιοδογράμματα κατά τον άξονα Y για το τμήμα T1-T4 (Πάνω αριστερά αφορά το T1, πάνω δεξιά το T2, κάτω αριστερά το T3 και κάτω δεξιά το T4).

Πίνακας 27 Αποτελέσματα ανάλυσης κατά τον Y άξονα για τα σημεία T1-T4.

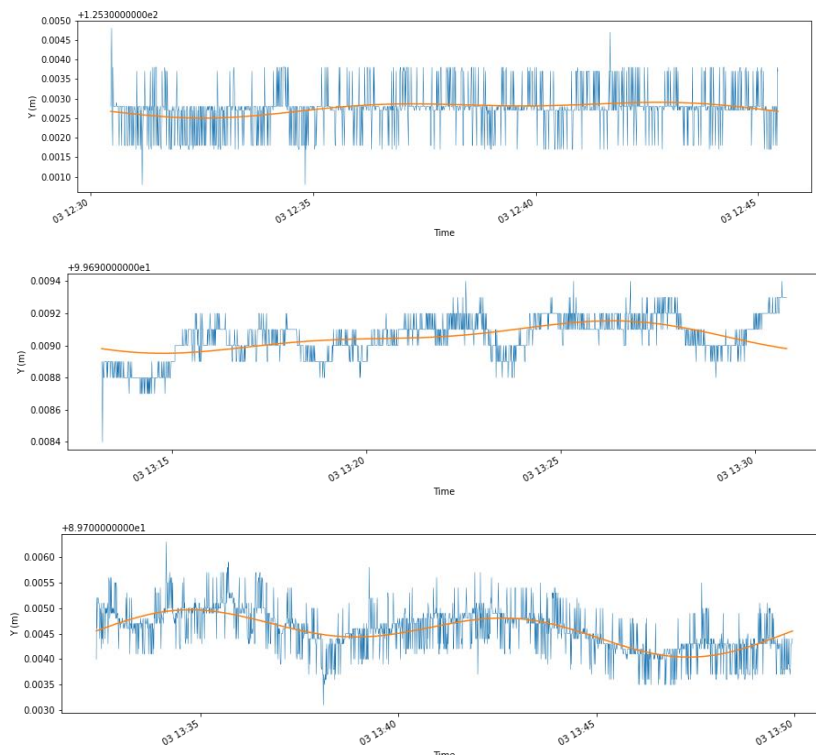
	T1 (Y)	T2 (Y)	T3 (Y)	T4 (Y)
period1	1532.00	131.07	1802.00	903.00
freq1	0.000653	0.007629	0.000555	0.001107
power1	0.000019	0.000012	0.000006	0.000090
period2	95.75	63.28	450.50	1806.00
freq2	0.010444	0.015804	0.002220	0.000554
power2	0.000009	0.000010	0.000004	0.000041
period3	766.00	166.82	300.33	361.20
freq3	0.001305	0.005995	0.003330	0.002769
power3	0.000007	0.000010	0.000004	0.000006

Αντίστοιχα γίνεται η παρακάτω ομαδοποίηση.

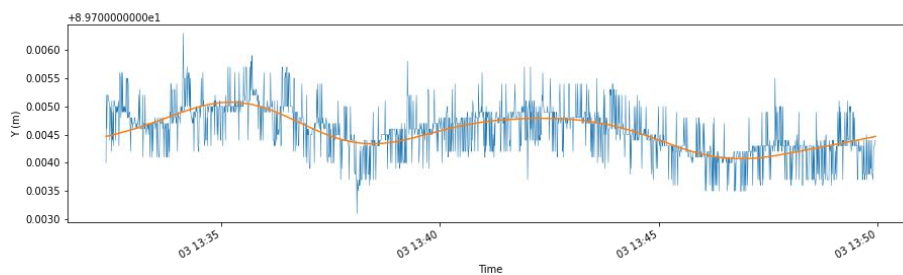
Πίνακας 28 Ομαδοποίηση αποτελεσμάτων κατά τον Y άξονα του τμήματος T1-T4.

Ομαδοποιημένες συχνότητες	Ομαδοποιημένες περιόδους
T1 (freq1)	1801-1804
T3 (freq1)	
T4 (freq2)	
T4 (freq1)	903
T3 (freq2)	450.50
T3 (freq3)	300.33-361.20
T4 (freq3)	
T1 (freq3)	766
T2 (freq1)	131.07
T2 (freq3)	166.85
T2 (freq2)	63.28
T1 (freq2)	95.75

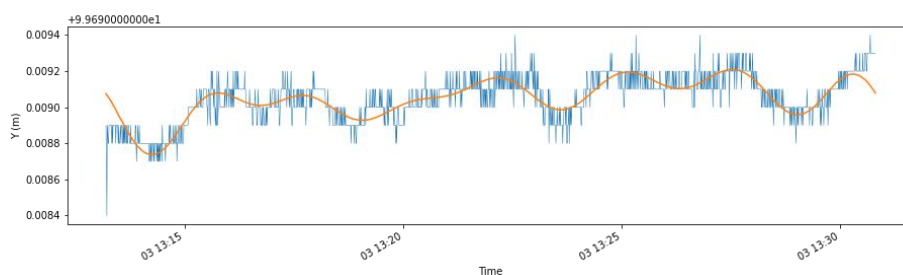
Τα αποτελέσματα όσον αφορά την μετακίνηση κατά τον Y άξονα της γέφυρας στο τμήμα T1-T4 δεν είναι τα καλύτερα δυνατά καθώς δεν δείχνουν με βεβαιότητα κάποια ορθολογικά καλή συχνότητα που επαναλαμβάνεται στην πλειοψηφία των σημείων. Επίσης παρατηρείται ότι υπάρχουν αρκετά υψηλότερες συχνότητες στα σημεία T1 (πάνω στο ακρόβαθρο) και στο σημείο T2 (το πρώτο σημείο μετά τον αρμό), σε σχέση με τα υπόλοιπα δύο, τα οποία και αυτά με την σειρά τους επαληθεύουν αυτήν την διαπίστωση. Ακόμη τα διαγράμματα FFT των σημείων T1 και T2 δεν δείχνουν κάποια κυματοειδής μορφή, παρά μόνο παρουσιάζουν ακραίες τιμές. Τέλος, για άλλη μία φορά, δεν λαμβάνονται υπόψιν οι συχνότητες που έχουν ως περίοδο το σύνολο των μετρήσεων.



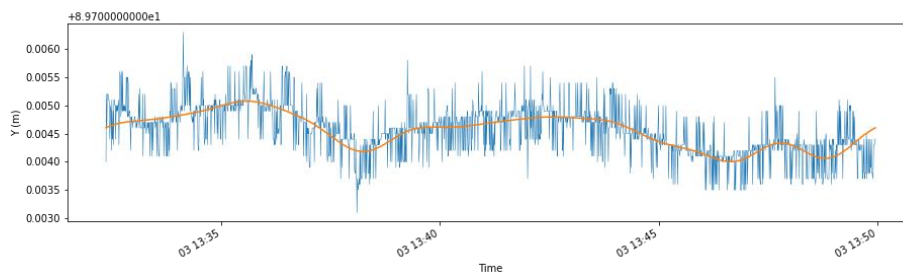
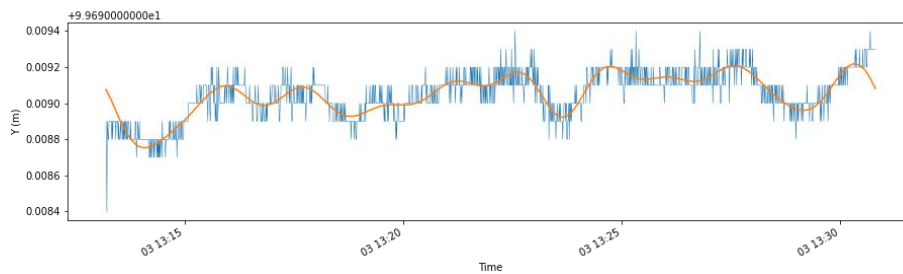
Σχήμα 47 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα Y πάνω για το σημείο T1 όσον αφορά την 1^η επικρατέστερη περίοδο ($T=1532$), στην μέση για το T3 όσον αφορά την 1^η επικρατέστερη περίοδο ($T=1802$) και κάτω για το T4 όσον αφορά την 2^η επικρατέστερη περίοδο ($T=1806$).



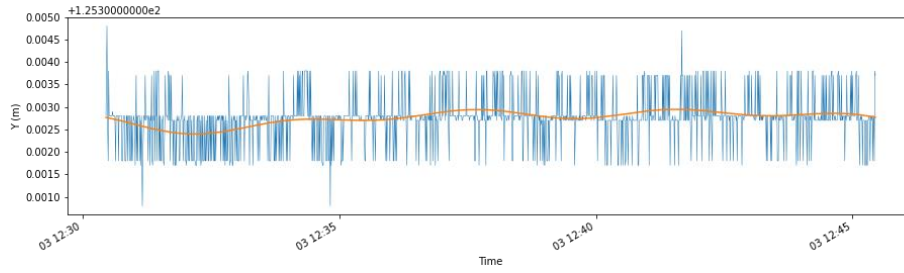
Σχήμα 48 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα Y για το σημείο T4 όσον αφορά την 1^η επικρατέστερη περίοδο ($T=903$).



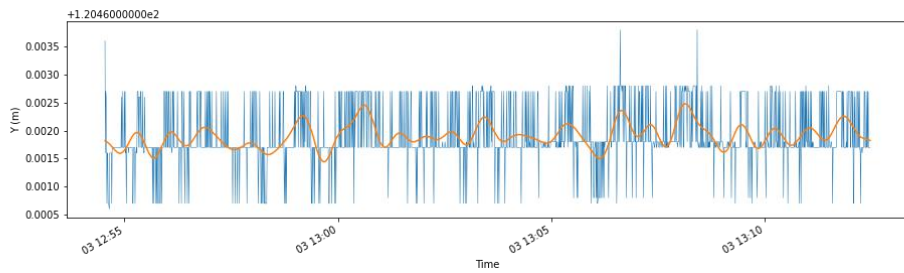
Σχήμα 49 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα Y για το σημείο T3 όσον αφορά την 2^η επικρατέστερη περίοδο ($T=450.50$).



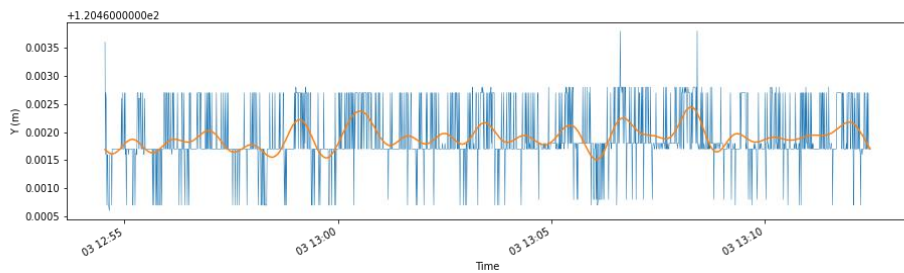
Σχήμα 50 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα Y πάνω για το σημείο T3 όσον αφορά την 3^η επικρατέστερη περίοδο ($T=300.33$), κάτω για το T4 όσον αφορά την 3^η επικρατέστερη περίοδο ($T=361.20$).



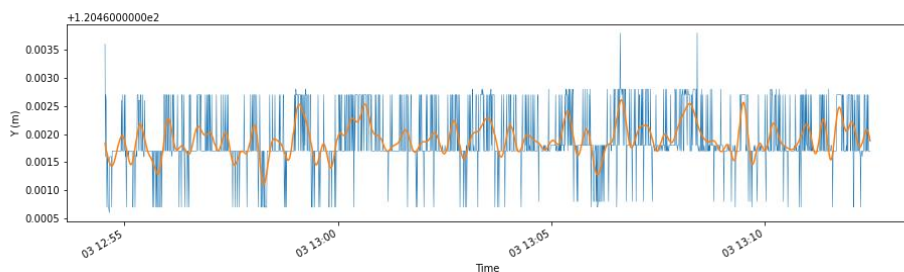
Σχήμα 51 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα Y για το σημείο T1 όσον αφορά την 3^η επικρατέστερη περίοδο ($T=766$).



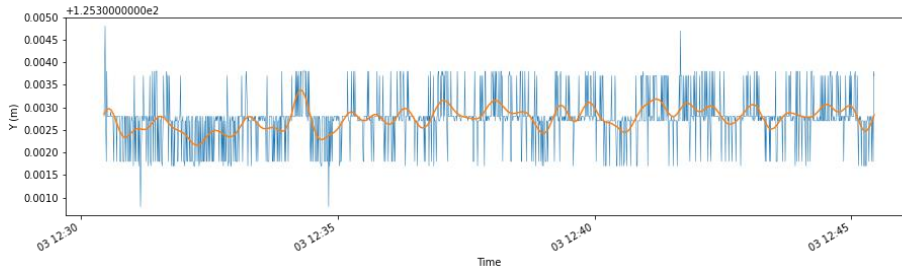
Σχήμα 52 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα Y για το σημείο T2 όσον αφορά την 1^η επικρατέστερη περίοδο ($T=131.07$).



Σχήμα 53 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα Y για το σημείο T2 όσον αφορά την 3^η επικρατέστερη περίοδο ($T=166.85$).

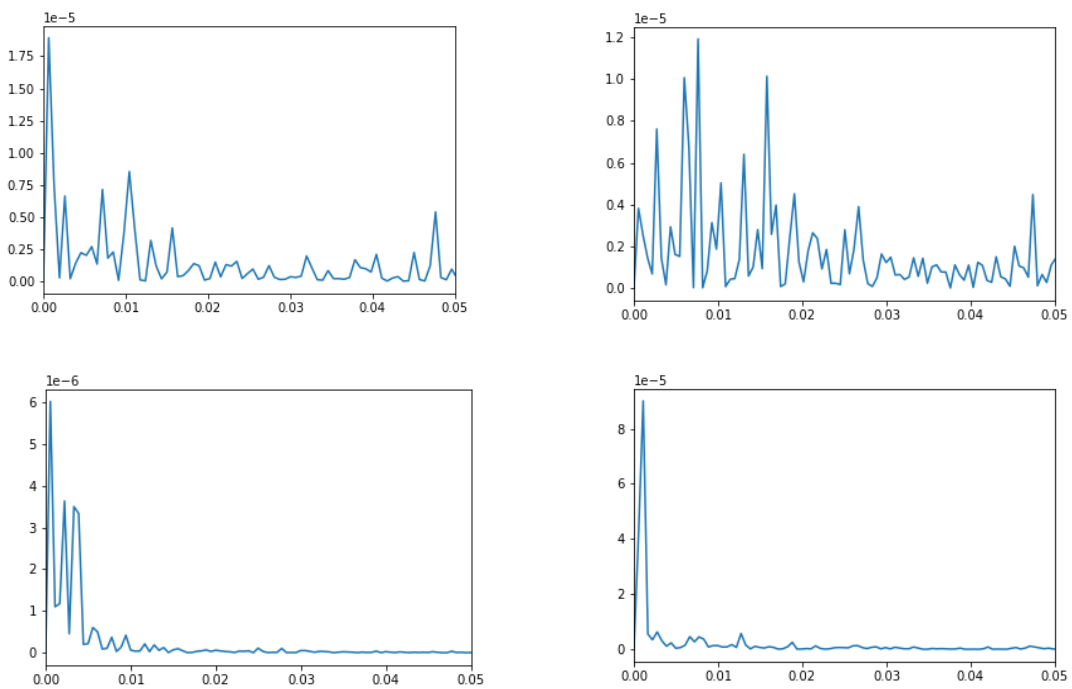


Σχήμα 54 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα Y για το σημείο T2 όσον αφορά την 2^η επικρατέστερη περίοδο ($T=63.28$).



Σχήμα 55 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα Y για το σημείο T1 όσον αφορά την 2^η επικρατέστερη περίοδο ($T=95.75$).

1.1.3 Τμήμα T5-T8



Σχήμα 56 Περιοδογράμματα κατά τον άξονα Y για το τμήμα T5-T8 (Πάνω αριστερά αφορά το T5, πάνω δεξιά το T6, κάτω αριστερά το T7 και κάτω δεξιά το T8).

Πίνακας 29 Αποτελέσματα ανάλυσης κατά τον Y άξονα για τα σημεία T5-T8.

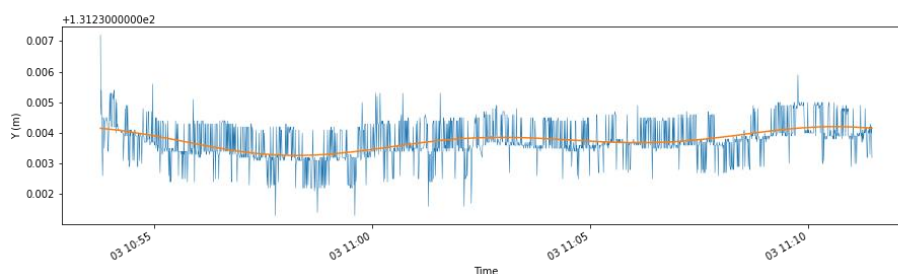
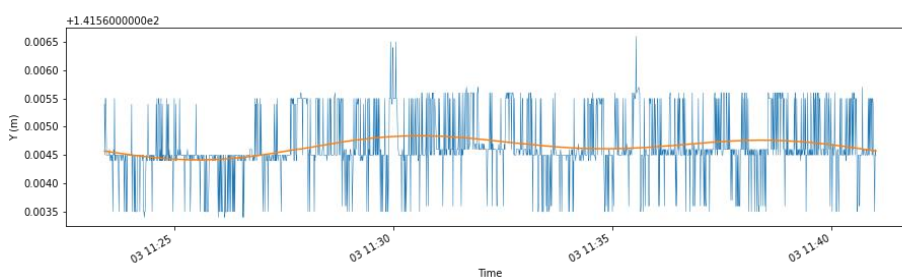
	T5 (Y)	T6 (Y)	T7 (Y)	T8 (Y)
period1	901.00	1802.00	1801.00	1804.00
freq1	0.001110	0.000555	0.000555	0.000554
power1	0.000017	0.000069	0.000278	0.000236
period2	46.21	901.00	900.50	902.00
freq2	0.021643	0.001110	0.001110	0.001109
power2	0.000012	0.000061	0.000024	0.000066
period3	1802.00	450.50	450.25	451.00
freq3	0.000555	0.002220	0.002221	0.002217
power3	0.000010	0.000012	0.000021	0.000049

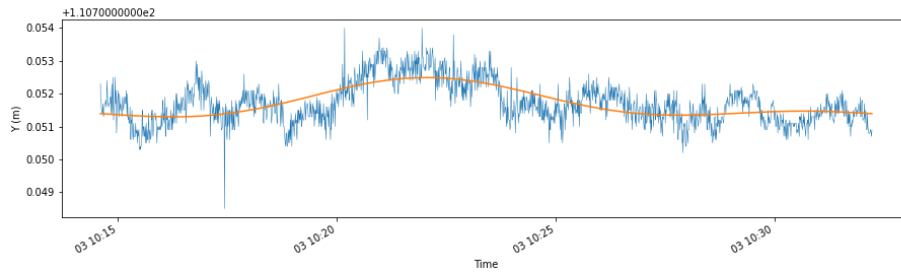
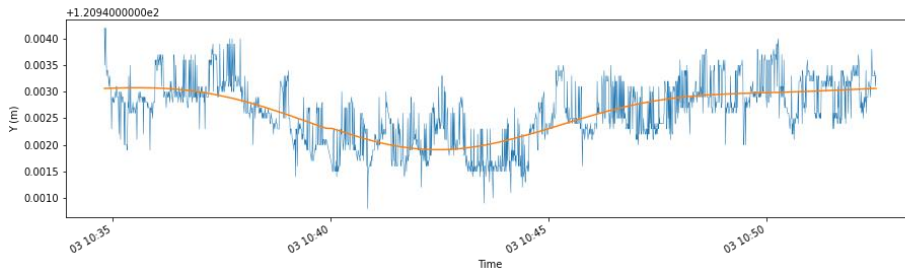
Αντίστοιχα γίνεται η παρακάτω ομαδοποίηση.

Πίνακας 30 Ομαδοποίηση αποτελεσμάτων κατά τον Y άξονα του τμήματος T5-T8.

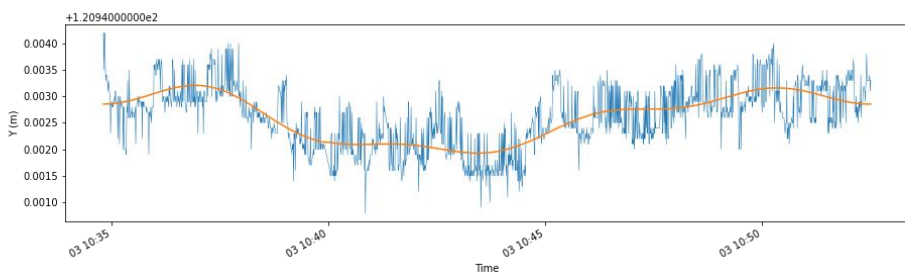
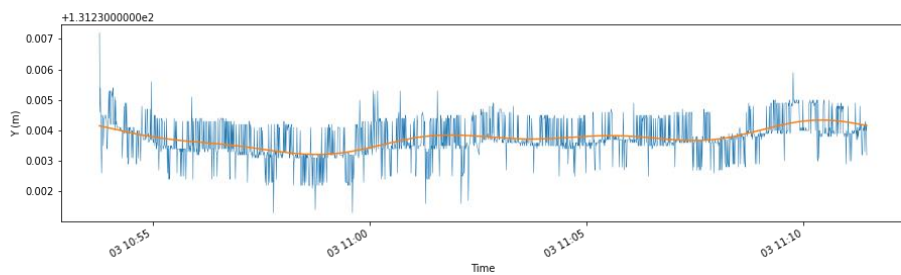
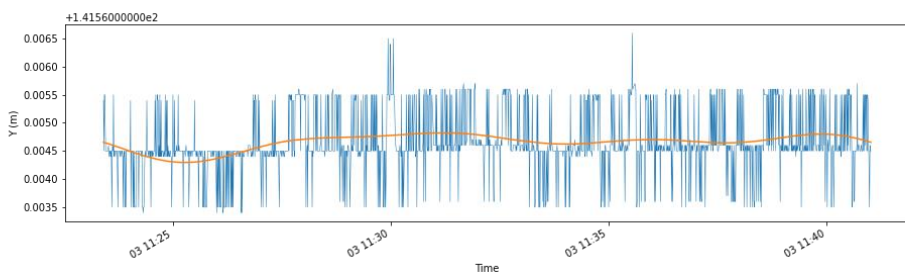
Ομαδοποιημένες συχνότητες	Ομαδοποιημένες περιόδους
T5 (freq3)	1801-1804
T6 (freq1)	
T7 (freq1)	
T8 (freq1)	
T5 (freq1)	900.50-902
T6 (freq2)	
T7 (freq2)	
T8 (freq2)	450.25-451
T6 (freq3)	
T7 (freq3)	
T8 (freq3)	46.21
T5 (freq2)	

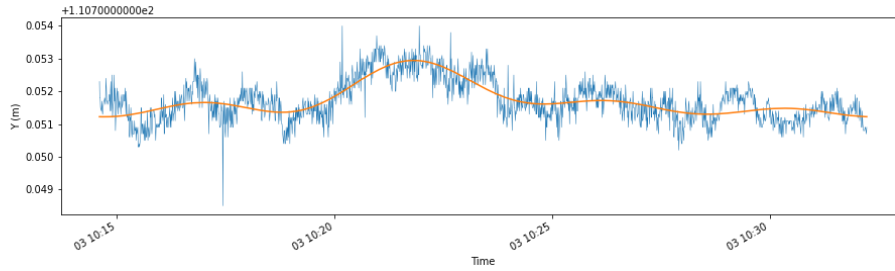
Τα αποτελέσματα σε αυτό το τμήμα παρουσιάζουν καλύτερο ομοιομορφία σε σχέση με το τμήμα T1-T4, με την μόνο ακραία τιμή να παρουσιάζεται στο T5, κάτι που πιθανόν να οφείλεται σε τυχαίο κραδασμό την χρονική στιγμή όπου μετρήθηκε είτε στην γέφυρα, είτε στο ίδιο το όργανο. Υπενθυμίζεται ότι όλα τα σημεία μετρήθηκαν την ίδια ημέρα αλλά σε διαφορετική χρονική στιγμή. Συνεπώς, τέτοια φαινόμενα όπως στο T5 μπορούν να δικαιολογηθούν μόνο με την προαναφερθείσα υπόθεση. Τέλος, και σε αυτήν την περίπτωση, δεν λαμβάνονται υπόψιν οι συχνότητες που έχουν ως περίοδο το σύνολο των μετρήσεων.



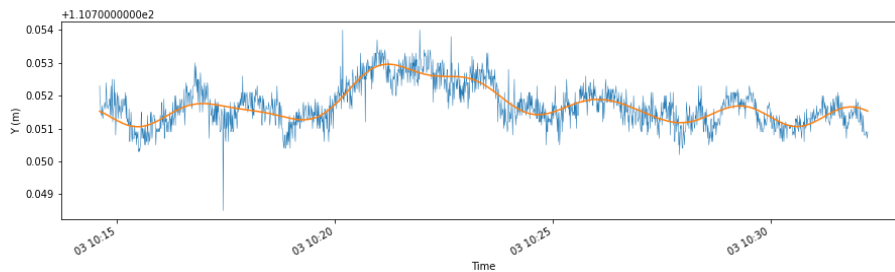
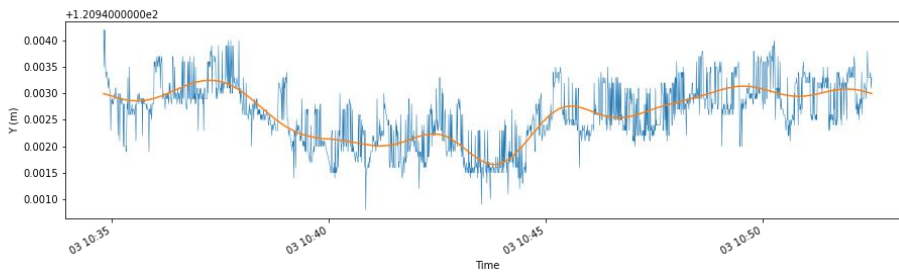
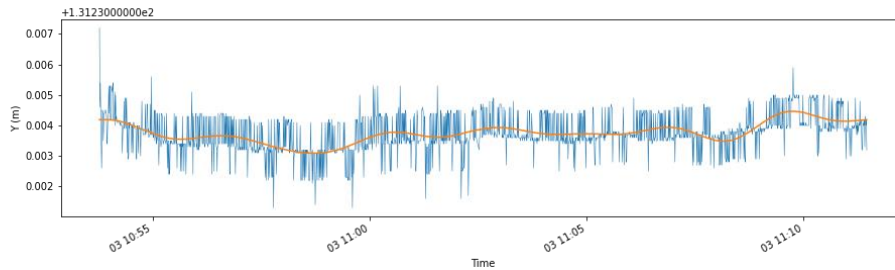


Σχήμα 57 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα Y το 1^ο για το σημείο T5 όσον αφορά την 3^η επικρατέστερη περίοδο (T=1802), στην συνέχεια για το T6 όσον αφορά την 1^η επικρατέστερη περίοδο (T=1802), έπειτα για το T7 όσον αφορά την 1^η επικρατέστερη περίοδο (T=1801) και τέλος, για το T8 όσον αφορά την 1^η επικρατέστερη περίοδο (T=1804).

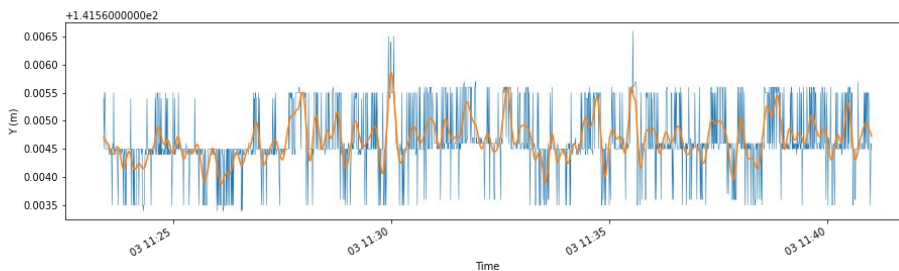




Σχήμα 58 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα Y το 1^ο για το σημείο T5 όσον αφορά την 1^η επικρατέστερη περίοδο ($T=901$), στην συνέχεια για το T6 όσον αφορά την 2^η επικρατέστερη περίοδο ($T=901$), έπειτα για το T7 όσον αφορά την 2^η επικρατέστερη περίοδο ($T=900.50$) και τέλος, για το T8 όσον αφορά την 2^η επικρατέστερη περίοδο ($T=902$).



Σχήμα 59 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα Y πάνω για το σημείο T6 όσον αφορά την 3^η επικρατέστερη περίοδο ($T=450.50$), στην μέση για το T7 όσον αφορά την 3^η επικρατέστερη περίοδο ($T=450.25$) και κάτω για το T8 όσον αφορά την 3^η επικρατέστερη περίοδο ($T=451$).



Σχήμα 60 Διάγραμμα FFT κατά τον άξονα Y για το σημείο T5 όσον αφορά την 2^η επικρατέστερη περίοδο ($T=46.21$).

6.3.1 Φυσικές συχνότητες μετακίνησης κατά τον Υ άξονα νότιας γέφυρας

Συγκρίνοντας τα ομαδοποιημένα αποτελέσματα των δύο τμημάτων, διαπιστώνονται οι συχνότητες που μπορούν να θεωρηθούν πραγματικές και όχι τυχαίες να είναι οι ακόλουθες.

Πίνακας 31 Ομαδοποίηση αποτελεσμάτων κατά τον Υ άξονα συνολικού τμήματος γέφυρας.

Σημείο	Περίοδος	Συχνότητα	Ισχύς
T4	903.00	0.001107	0.000090
T5	901.00	0.001110	0.000017
T6	901.00	0.001110	0.000061
T7	900.50	0.001110	0.000024
T8	902.00	0.001109	0.000066

Σημείο	Περίοδος	Συχνότητα	Ισχύς
T3	450.50	0.002220	0.000004
T6	450.50	0.002220	0.000012
T7	450.25	0.002221	0.000021
T8	451.00	0.002217	0.000049

Σε αυτήν την ομαδοποίηση πέρα από το αναμενόμενο να μην υπάρχουν κοινά μεταξύ του T1 και των υπολοίπων, δεν υπάρχουν και μεταξύ του T2, κάτι το οποίο συμβαίνει για τους λόγους που εξηγήθηκαν παραπάνω. Έτσι τα παρακάτω αποτελέσματα δεν συμπεριλαμβάνουν τις μετρήσεις του T2 καθώς χρίζουν περαιτέρω μετρήσεις για την επαλήθευση της ορθότητας τους.

Πίνακας 32 Φυσικές συχνότητες μετακίνησης κατά τον Υ άξονα νότιας γέφυρας.

Περίοδος (Μετρήσεις)	Περίοδος (sec)	Συχνότητα	Ισχύς
902	451	0.001109	0.000052
451	225	0.002219	0.000022

Τέλος, οι ιδιοσυχνότητες που παρουσιάζει η γέφυρα στο ακρόβαθρο (σημείο T1) δίνονται στον παρακάτω πίνακα. Η συχνότητα με περίοδο 96 είναι πολύ πιθανό να οφείλεται σε θόρυβο από τα διερχόμενα οχήματα παρόλα αυτά δεν υπάρχει δεύτερο σημείο για έλεγχο και για αυτόν τον λόγο συμπεριλαμβάνεται στον πίνακα των τελικών αποτελεσμάτων με κάθε επιφύλαξη.

Πίνακας 33 Φυσικές συχνότητες μετακίνησης κατά τον Υ άξονα νότιας γέφυρας στο τμήμα του ακρόβαθρου.

Περίοδος (Μετρήσεις)	Περίοδος (sec)	Συχνότητα	Ισχύς
96	48	0.010444	0.000009
766	383	0.001305	0.000007

7. Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας, η πρόοδος της τεχνολογίας στις μέρες μας, έχει δώσει την δυνατότητα εξέλιξης πολλών επιστημών. Συγκεκριμένα, όσον αφορά τον κλάδο της γεωδαισίας-τοπογραφίας, έχει καταστήσει ευκολότερη την συλλογή αλλά και την επεξεργασία των δεδομένων, γλυτώνοντας έτσι τον μηχανικό από χρόνο και υψηλά κόστη. Πιο αναλυτικά σε ότι αφορά την τεκμηρίωση και μελέτη γεφυρών, τα ευρήματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας έδειξαν ότι, ενώ παλιότερα ο προσδιορισμός των φυσικών συχνοτήτων γινόταν αποκλειστικά με χρήση σειсмоγράφων, στις μέρες μας, ο ερχομός των ρομποτικών γεωδαιτικών σταθμών υψηλής ακριβείας, έχει δώσει μια καλή εναλλακτική λύση, που απ' ότι δείχνει στο μέλλον θα γίνεται ολοένα και καλύτερη.

Η χρήση της ζητούμενης συχνότητας μέτρησης εξαρτάται κατά μεγάλο βαθμό από το είδος της γέφυρας αλλά και τις συνθήκες παρακολούθησης της. Για παράδειγμα, στο άρθρο που έχει περιγραφεί στην [ενότητα 2](#) με τίτλο «*Measuring Deflections of a Short-Span Railway Bridge Using a Robotic Total Station*», έχουν χρησιμοποιηθεί συχνότητες μέτρησης 5-7 Hz, ενώ μάλιστα σε άλλα άρθρα έχουν επιτευχθεί μέχρι και 20 Hz. Οι συχνότητες αυτές όμως είναι σκόπιμες για τις περιπτώσεις όπου ο χρόνος ταλάντωσης της γέφυρας είναι υπερβολικά σύντομος ανεξαρτήτως του πλάτους της. Τέτοιες γέφυρες, είναι οι μεταλλικές στις οποίες αναφέρονται και τα άρθρα, οι οποίες έχουν μεγάλο πλάτος ταλάντωσης αλλά υπερβολικά μικρή περίοδο. Η γέφυρα της Πέτρου Ράλλη, όπως έχει προαναφερθεί πρόκειται για μία ολόσωμη συνεχής κιβωτοειδούς διατομής γέφυρα κατασκευασμένη από σκυρόδεμα, συνεπώς, οι ταλαντώσεις της είναι μικρού πλάτους έχοντας μεγάλη περίοδο. Άρα, οι αναγκαίες συχνότητες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, είναι σαφώς μικρότερες των 5 Hz όπου ήταν η συχνότητα μέτρησης της ιστορικής μεταλλικής γέφυρας του Γοργοποτάμου. Επίσης, επειδή δεν ήταν δυνατή η διακοπή της έντονης κυκλοφορίας στην γέφυρα, έπρεπε να επιλεγεί μία συχνότητα η οποία να μην συμπεριελάμβανε τις ταλαντώσεις όπου οφείλονταν στα διερχόμενα οχήματα. Έτσι, έπειτα από ένα σύντομο πείραμα στην βόρεια γέφυρα όπου δεν προέκυψε κάποιο ουσιαστικό αποτέλεσμα, αποφασίστηκε να ρυθμιστεί το όργανο να λαμβάνει μέτρηση ανά μισό δευτερόλεπτο, δηλαδή με συχνότητα μέτρησης τα 2 Hz. Το όργανο είχε την δυνατότητα ακόμη, μέτρησης από 5 έως και 10 Hz, συχνότητες οι οποίες όμως κρίθηκαν μη ιδανικές για τους λόγους όπου προαναφέρθηκαν.

Φτάνοντας στο σημείο των μετρήσεων, το όργανο πρέπει να τοποθετηθεί στρατηγικά σε μία ασφαλή θέση κοντά σχετικά στην γέφυρα διατηρώντας παράλληλα σωστή γωνία μεταξύ των στόχων και του οργάνου, έτσι ώστε να είναι εξασφαλισμένες οι μετρήσεις από τυχόν ταλαντώσεις όπου θα υποστεί το ίδιο το όργανο. Στην προκειμένη περίπτωση λόγω εμποδίων το RTS αναγκάστηκε να μετακινηθεί για τις μετρήσεις του T5 κάτι το οποίο δημιουργεί ερώτημα αν η ακραία τιμή που παρουσιάζεται στην συχνότητα της μετακίνησης κατά τον Y άξονα οφείλεται στο γεγονός ότι τοποθετήθηκε κοντά στην ασφαλτο και επηρεάστηκε έτσι από τα διερχόμενα οχήματα. Ακραίες τιμές παρουσιάζονται και σε άλλα σημεία όπως στο T3 στην κατά τον X άξονα μετακίνηση αλλά και στην κατακόρυφη, κάτι το οποίο μπορεί να οφείλεται στο ίδιο το πρίσμα όπου χρησιμοποιήθηκε (Trimble 360), του οποίου η κατασκευή το τοποθετεί σε αρκετή

απόσταση από το επίπεδο της γέφυρας σε σχέση με τα υπόλοιπα, συναρτήσει του γεγονότος ότι η ντίζα στην λαπάτσα όπου βιδώθηκε το ανάγκασε σε μία θέση υπό μικρή κλίση. Όπως αναφέρεται στο άρθρο με τίτλο «*Monitoring of oscillations and frequency analysis of the railway bridge "Sava" using robotic total station*», η χρήση διαφορετικών πρισμάτων μπορεί να προκαλέσει διαφοροποίηση των τελικών αποτελεσμάτων, κάτι το οποίο επαληθεύτηκε και σε αυτήν την εργασία αν θεωρηθεί ότι η γέφυρα ταλαντώνεται με ακριβώς τον ίδιο ρυθμό σε κάθε μεμονωμένο σημείο της. Για τον λόγο αυτό τα τελικά αποτελέσματα προέκυψαν από την μέση τιμή των ομαδοποιημένων συχνοτήτων. Θα ήταν ίσως σημαντικό να γίνει έλεγχος και υπολογισμός της σταθεράς του κάθε πρίσματος πριν χρησιμοποιηθεί. Αναφορικά με τις περιπτώσεις των συχνοτήτων όπου χρησιμοποιήθηκε το πλήθος των μετρήσεων δείχνει ότι, ο χρόνος μέτρησης μίας τέτοιας γέφυρας θα πρέπει να είναι τουλάχιστον ο διπλάσιος και ίσως ακόμα μεγαλύτερος των 15 λεπτών όπου διήρκησαν οι παρατηρήσεις στην παρούσα εργασία, καθώς δείχνει ότι πιθανώς υπάρχουν συχνότητες με περίοδο ταλάντωσης μεγαλύτερη του ενός τετάρτου.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν με χρήση του μετασχηματισμού FFT, παρουσιάζουν τρεις συχνότητες στην κατακόρυφη και κατά Χ μετακίνηση και δύο συχνότητες για την μετακίνηση κατά τον Y άξονα αναφορικά με το τμήμα μεταξύ των αρμών και δύο συχνότητες για την μετακίνηση σε κάθε άξονα όσον αφορά το σημείο στο ακρόβαθρο.

Πίνακας 34 Τελικές φυσικές συχνότητες νότιας γέφυρας όσον αφορά και τις τρεις κατευθύνσεις.

Φυσικές Συχνότητες Γέφυρας στο τμήμα μεταξύ των αρμών			
Συχνότητα (Hz)			
A/A	X	Y	Z
1	0.001106	0.001109	0.001106
2	0.001654	0.002219	0.001663
3	0.003053		0.002205

Φυσικές Συχνότητες Γέφυρας στο ακρόβαθρο			
Συχνότητα (Hz)			
A/A	X	Y	Z
1	0.002611	0.010444	0.001305
2	0.001958	0.001305	0.002611

Τέλος, με σκοπό την μελλοντική συνέχιση της παρούσας διπλωματικής εργασίας δίνονται οι παρακάτω προτάσεις, οι οποίες εκτιμάται να προσφέρουν αθροιστικά καλύτερη εκτίμηση της συμπεριφοράς και της κατάστασης της γέφυρας.

- Αποτύπωση του οδοστρώματος της γέφυρας με χρήση UAV για την πλήρη δημιουργία του 3D μοντέλου της,
- Ταυτόχρονη χρήση δύο ή περισσότερων ρομποτικών γεωδαιτικών σταθμών για την παρακολούθηση της συμπεριφοράς της γέφυρας σε δύο ή περισσότερα σημεία την ίδια χρονική στιγμή,

- Ελεγχόμενη φόρτιση της γέφυρας, έτσι ώστε να παρατηρηθεί η συμπεριφορά της χωρίς διέλευση οχημάτων, αλλά και να μετρηθούν οι μετατοπίσεις οι οποίες υφίστανται κατά το πέρασμα οχημάτων ποικίλου βάρους και μεγέθους,
- Επαναμέτρηση των σημείων των δύο γεφυρών μετά το πέρας ενός εύλογου χρονικού διαστήματος για την παρατήρηση μόνιμων μετακινήσεων που ίσως έχουν υποστεί,
- Χρήση άλλων τεχνικών και μεθόδων μέτρησης, όπως για παράδειγμα αξιοποίηση δεκτών GNSS.

Βιβλιογραφία

- A. Marendić, R. P. (2016). "Monitoring of oscillations and frequency analysis of the railway bridge "Sava" using robotic total station". *researchgate.net*.
- B. Riveiro, H. G.-J. (2012). "Validation of terrestrial laser scanning and photogrammetry techniques for the measurement of vertical underclearance and beam geometry in structural inspection of bridges". *elsevier.com*.
- Hanly, S. (2016). *blog.endaq.com*. Ανάκτηση από Vibration Analysis: FFT, PSD, and Spectrogram Basics: <https://blog.endaq.com/vibration-analysis-fft-psd-and-spectrogram>
- Maria Rashidi, M. M.-H. (2020). "A Decade of Modern Bridge Monitoring Using Terrestrial Laser Scanning: Review and Future Directions". *mdpi.com*.
- Meral, C. (2011). "*Evaluation of Laser Scanning Technology for Bridge Inspection*". Philadelphia, USA: Drexel University.
- Panos A. Psimoulis, S. C. (2013). "Measuring Deflections of a Short-Span Railway Bridge Using a Robotic Total Station". *researchgate.net*.
- Samo Lubej, B. K. (2021). "A Comparative Study of Signal Processing Methods for Contactless Geodetic Monitoring". *mdpi.com*.
- Werner Lienhart, M. E. (2016). "High frequent total station measurements for the monitoring of bridge vibrations". *degruyter.com*.
- Young, H. D. (1994). "*Φυσική Μηχανική Θερμοδυναμική*". Παπαζήση.
- Ασημάκης, Ν., & Αδάμ, Μ. (2015). "*Διακριτός μετασχηματισμός Fourier και γρήγορος μετασχηματισμός Fourier*". Καλλιπος, Ανοικτες Ακαδημαϊκές Εκδόσεις.
- Βελώνη, Α. Ν., & Μυριδάκης, Ν. Ι. (2018). "*Ψηφιακή επεξεργασία σήματος*". Τζιόλα.
- Βουθούνης, Π. Α. (2019). "*Στατική και Αντοχή υλικών Τεχνική Μηχανική*". Αθήνα: Ανδρομάχη Βουθούνη.
- Βουρεξάκη, Χ.-Κ. (2021). "*Τρισδιάστατη αποτύπωση ιεράς μονής Υπεραγίας Θεοτόκου Άτρου, Κεφαλληνίας*". Αθήνα: Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής.
- Δεμερτζής, Κ. (2013). "*Έλεγχος, αξιολόγηση και ανάλυση χρονοσειρών ημερησίων δεδομένων από την ηλεκτρονική βάση του NCDC για τον προσδιορισμό αλλαγών σε κύριες κλιματικές παραμέτρους*". Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, τμήμα πολιτικών Μηχανικών.
- Μάργαρης, Α. (2014). "*Σήματα και Συστήματα*". Τζιόλα.
- Μινόπουλος, Δ. (2020). "*Σεισμική μόνωση γεφυρών οπλισμένου σκυροδέματος Μέθοδοι επισκευής και αποκατάστασης*". Αθήνα: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Σχολή θετικών σπουδών & τεχνολογίας, Μάθημα: Διαχείριση τεχνικών έργων.
- Μπέλλας, Δ. (2014). "*Ανιχνευση μικρομετακινήσεων με ρομποτικό γεωδαιτικό σταθμό*". Αθήνα: ΤΕΙ Αθήνας.

- Μπισκίνης, Δ. (2016). *Σημειώσεις "Γεφυροποιΐα είδη γεφυρών και κατασκευής"*
Μάθημα: Γεφυροποιΐας. Πατρα: ΑΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας.
- Παναγιωτοπούλου, Σ. (2019). *"Χρήση ψηφιακών κλισιμέτρων ακριβείας για την παρακολούθηση δομικής κατάστασης γέφυρας"*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών.
- Σαπουντζάκης, Ε. (2022). *Σημειώσεις "Εισαγωγή στην γεφυροποιΐα", Εργαστήριο Στατικής & αντισεισμικών ερευνών*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Σχολή Πολιτικών Μηχανικών.
- Χλούπης, Γ. (2020). *Σημειώσεις μαθήματος "Ανάλυση και επεξεργασία σήματος", τμήμα Μηχανικών τοπογραφίας & Γεωπληροφορικής*. Αθήνα: Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής.
- Ψυχάρης, Γ. Ν. (2016). *"Σημειώσεις αντισεισμικής τεχνολογίας", Τομέας Δομοστατικής*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών.

Παραρτήματα

Παράρτημα 1

Η ιστοσελίδα του οργάνου βρίσκεται στον [σύνδεσμο](#) όπου έχει επισυναφτεί.

LEICA BLK360

IMAGING LASER SCANNER



GENERAL

Imaging scanner 3D scanner with integrated spherical imaging system and thermography panorama sensor system

DESIGN & PHYSICAL

Housing Black anodized aluminium
Dimensions Height: 165 mm / Diameter: 100 mm
Weight 1 kg
Transport cover Hood with integrated floorstand
Mounting mechanism Button-press quick release

OPERATION

Stand-alone operation One-button operation
Remote operation iPad app, Apple iPad Pro® 12.9"/iOS 10 or later
Wireless communication Integrated wireless LAN (802.11 b/g/n)
Internal memory Storage for > 100 setups
Instrument orientation Upright and upside down

POWER

Battery type Internal, rechargeable Li-Ion battery (Leica GEB212)
Capacity Typically >40 setups

SCANNING

Distance measurement system High speed time of flight enhanced by Waveform Digitizing (WFD) technology
Laser class 1 (in accordance with IEC 60825-1:2014)
Wavelength 830 nm
Field of view 360° (horizontal) / 300° (vertical)
Range* min. 0.6 - up to 60 m
Point measurement rate up to 360'000 pts / sec
Ranging accuracy* 4mm @ 10m / 7mm @ 20m
Measurement modes 3 user selectable resolution settings

IMAGING

Camera System 15 Mpixel 3-camera system, 150Mpx full dome capture, HDR, LED flash Calibrated spherical image, 360° x 300°
Thermal Camera FLIR technology based longwave infrared camera
Thermal panoramic image, 360° x 70°

PERFORMANCE

Measurement speed < 3 min for complete full dome scan, spherical image & thermal image
3D point accuracy* 6mm @ 10m / 8mm @ 20m

ENVIRONMENTAL

Robustness Designed for indoor and outdoor use
Operating temperature +5 to +40° C
Dust/Humidity Solid particle/liquid ingress protection IP54 (IEC 60529)

DATA ACQUISITION

Live image and scanned data streaming
Live data viewing and editing
Automatic tilt measurements

All specifications are subject to change without notice.
All accuracy specifications are one sigma unless otherwise noted.
Copyright Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Switzerland 2020.

Leica BLK
Geosystems

Παράρτημα 2

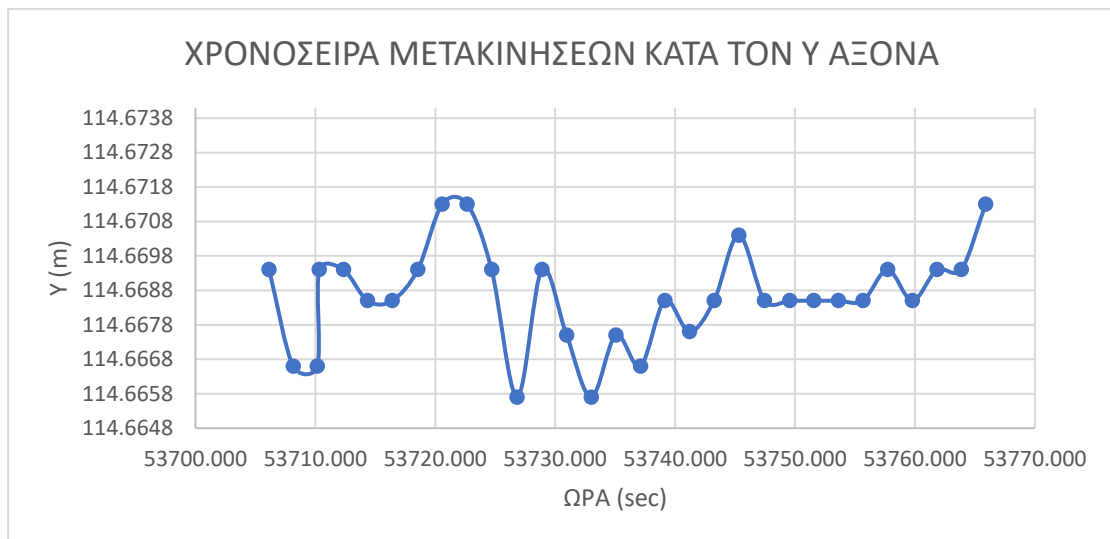
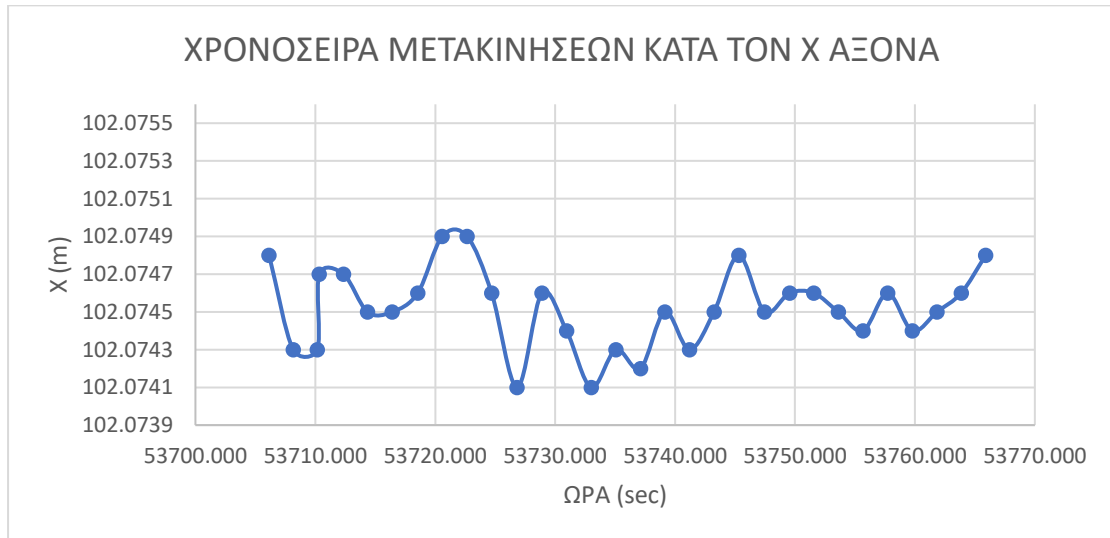
Leica TS30 Unmatched specifications

Angle Measurement		
Accuracy ¹	Hz, V	0.5" (0.15 mgon)
	Display resolution	0.01" (0.01 mgon)
	Method	Absolute, continuous, quadruple
Distance Measurement (Prism)		
Range	Round prism (GPR1)	3500 m
	360° prism (GR24)	1500 m
	Reflective tape (60 mm x 60 mm)	250 m
Accuracy ² /Measurement time to prism	Precise ³	0.6 mm + 1 ppm / typ. 7 s
	Standard	1 mm + 1 ppm / typ. 2.4 s
Accuracy ^{2-4,5} /		1 mm + 1 ppm / typ. 7 s
Measurement time to reflective tape		
Method	System analyzer based on phase shift measurement (coaxial, visible red laser)	
Distance Measurement (Non-Prism)		
Range ⁶		1000 m
Accuracy ⁷ /Measurement time		2 mm+2 ppm / typ. 3 s
Laser dot size	at 30 m / at 50 m	7 mm x 10 mm / 8 mm x 20 mm
Method	System analyzer based on phase shift measurement (coaxial, visible red laser)	
Motorisation		
Maximum acceleration and speed	Maximum acceleration	400 gon (360°) / s ²
	Rotation speed	200 gon (180°) / s
	Time for change face	2.9 s
	Positioning Time for 200 gon (180°)	2.3 s
Method	Direct drives based on Piezo technology	
Automatic Target Recognition (ATR)		
Range ATR mode / LOCK mode	Round prism (GPR1)	1000 m / 800 m
	360° prism (GR24, GRZ122)	800 m / 600 m
Accuracy ¹ /Measurement time	ATR angle accuracy Hz, V	1"
	Base positioning accuracy	±1 mm
	Pointing precision at 1000 m	±2 mm
	Measurement time (GPR1)	3 - 4 s
Method	Digital image processing	
Power Search (PS)		
Range ^{8,9}	360° prism (GR24, GRZ122)	300 m
Search time ⁹	Typical	5 s
Method	Digital signal processing (rotating laser fan)	
General		
Telescope	Magnification	30 x
	Focusing range	1.7 m to infinity
Keyboard and Display	Display	¼ VGA, colour, touch, both faces
	Keyboard	34 keys, illuminated
Data storage	Internal memory	256 MB
	Memory card	CompactFlash card 256 MB or 1 GB
	Interfaces	RS232, Bluetooth® Wireless
Operation	Three endless drives	For one or two hand manual operation
	Userdefinable Smart key	Fast precision trigger key for manual high precision measurements
	Electronic Guide Light	For guided stakeout
Power Management	Internal battery (GEB241)	Lithium-Ion
	Operating time	9 h
	Standby Power Consumption	typ. 5.9 W
Weight	Total Station incl. GEB241	7.6 kg
Environmental specifications	Operating temperature	-20° C to +50° C (-4° F to +122° F)
	Dust / water (IEC 60529)	IP54
	Humidity	95%, non-condensing

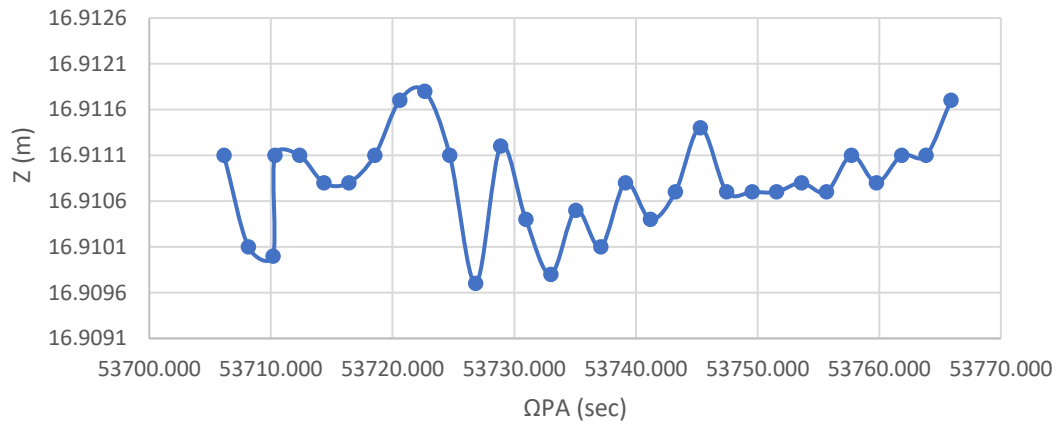
Παράρτημα 3

Διαγράμματα βόρειας γέφυρας με συχνότητα μέτρησης ανά 2 sec.

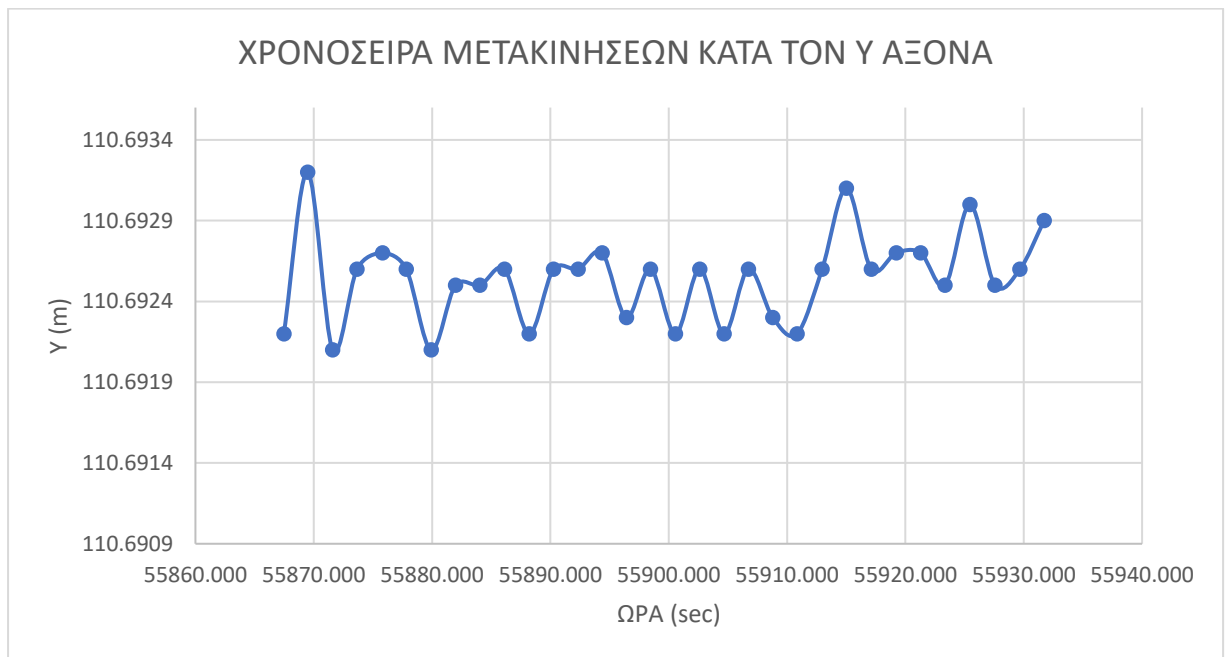
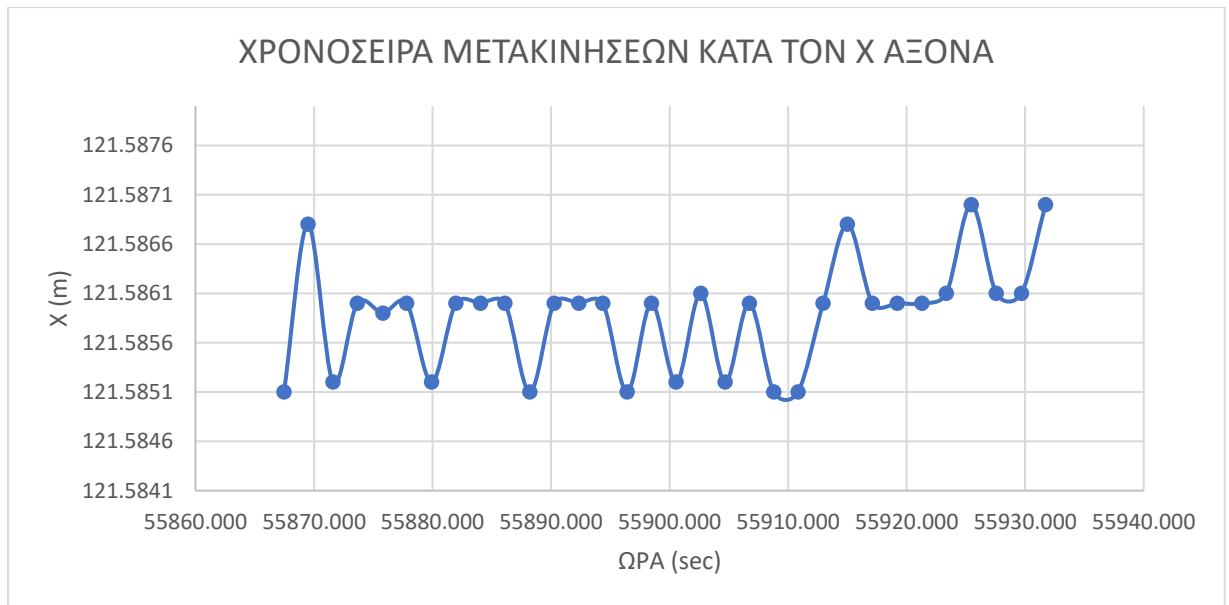
1^ο σημείο:

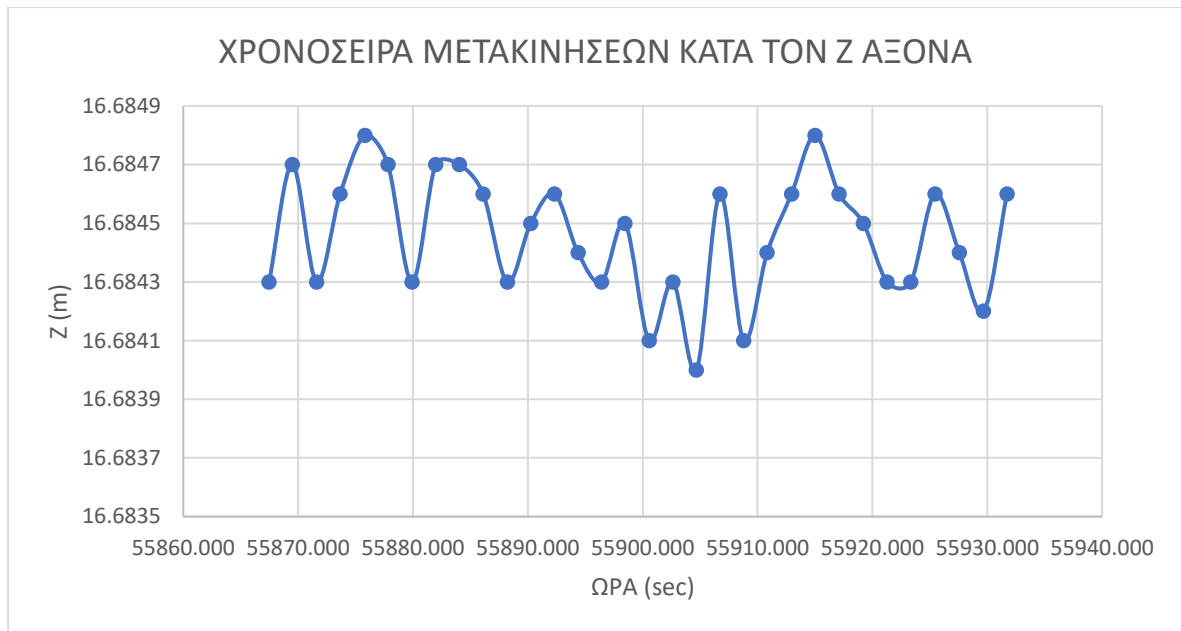


ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΤΟΝ Ζ ΑΞΟΝΑ

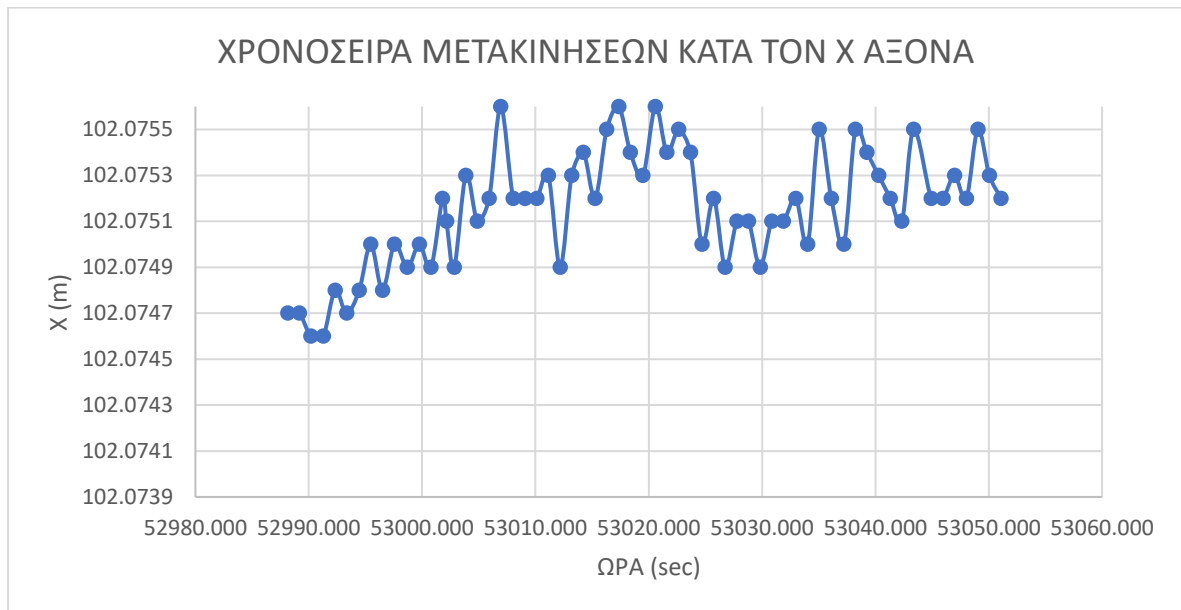


2^ο σημείο:

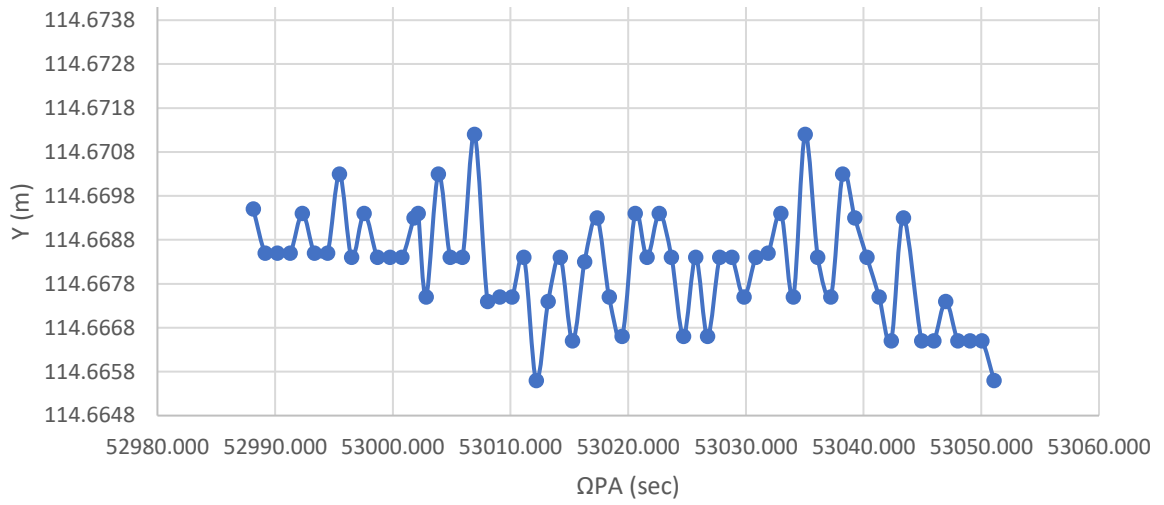




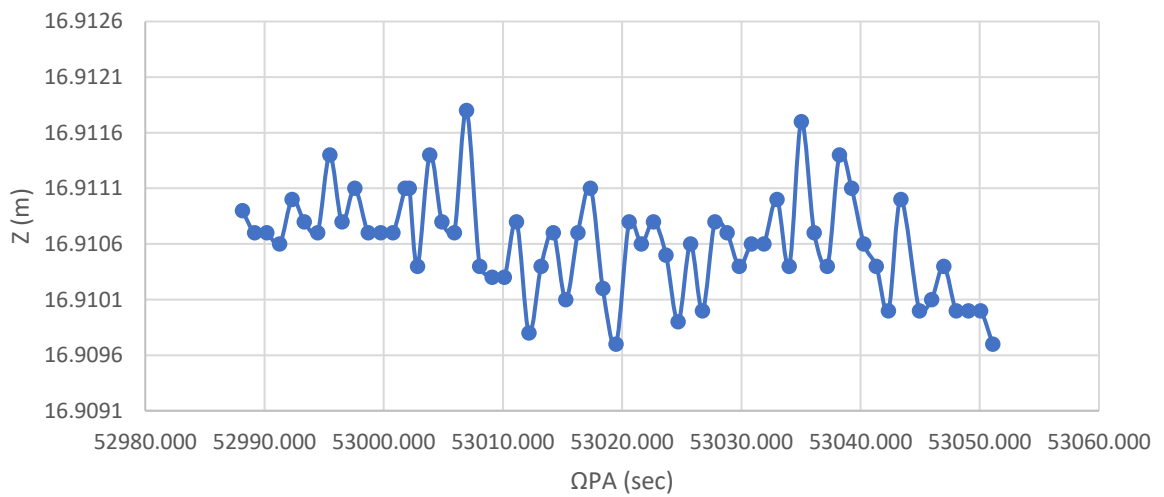
**Διαγράμματα βόρειας γέφυρας με συχνότητα μέτρησης ανά 1 sec.
1^ο σημείο:**



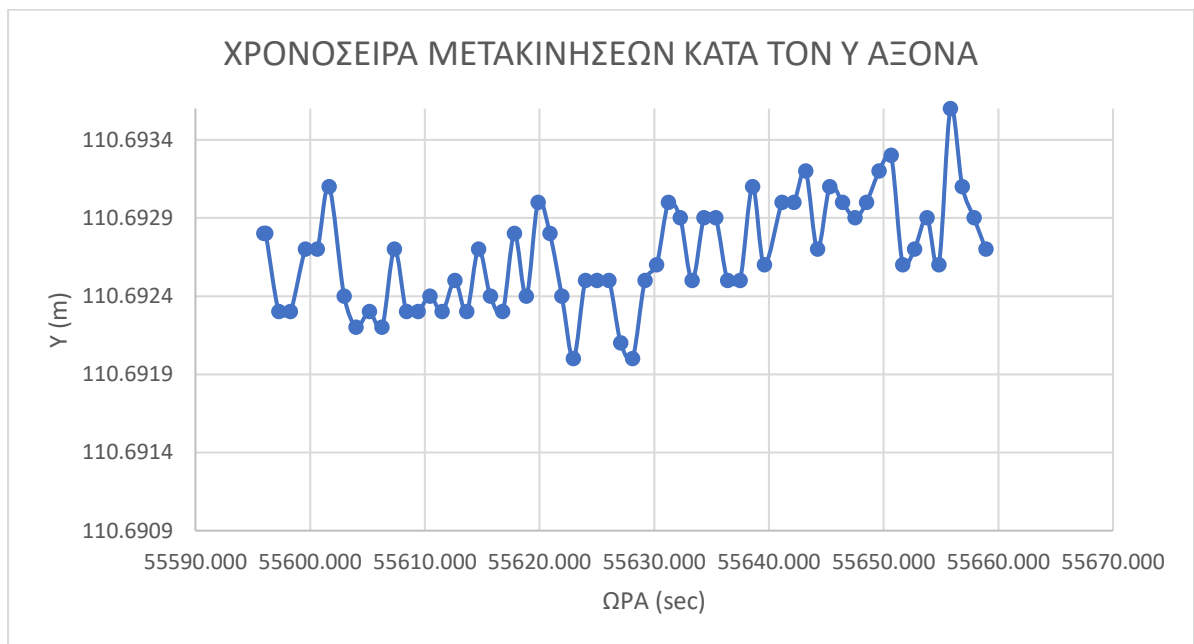
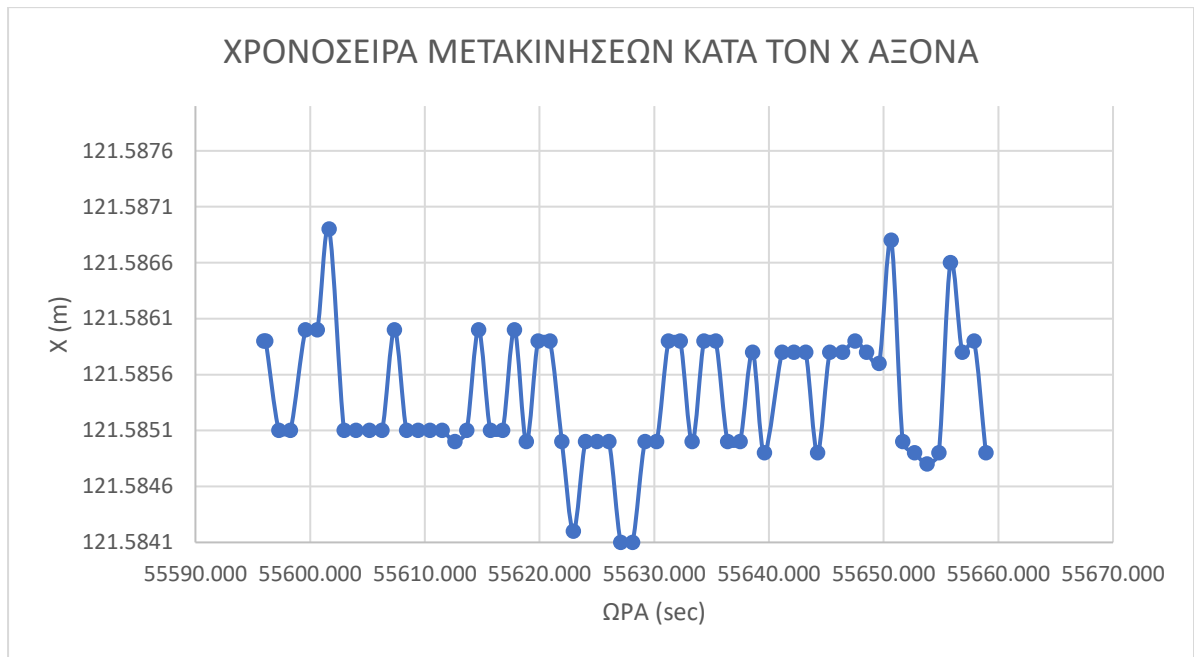
ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΤΟΝ Υ ΑΞΟΝΑ

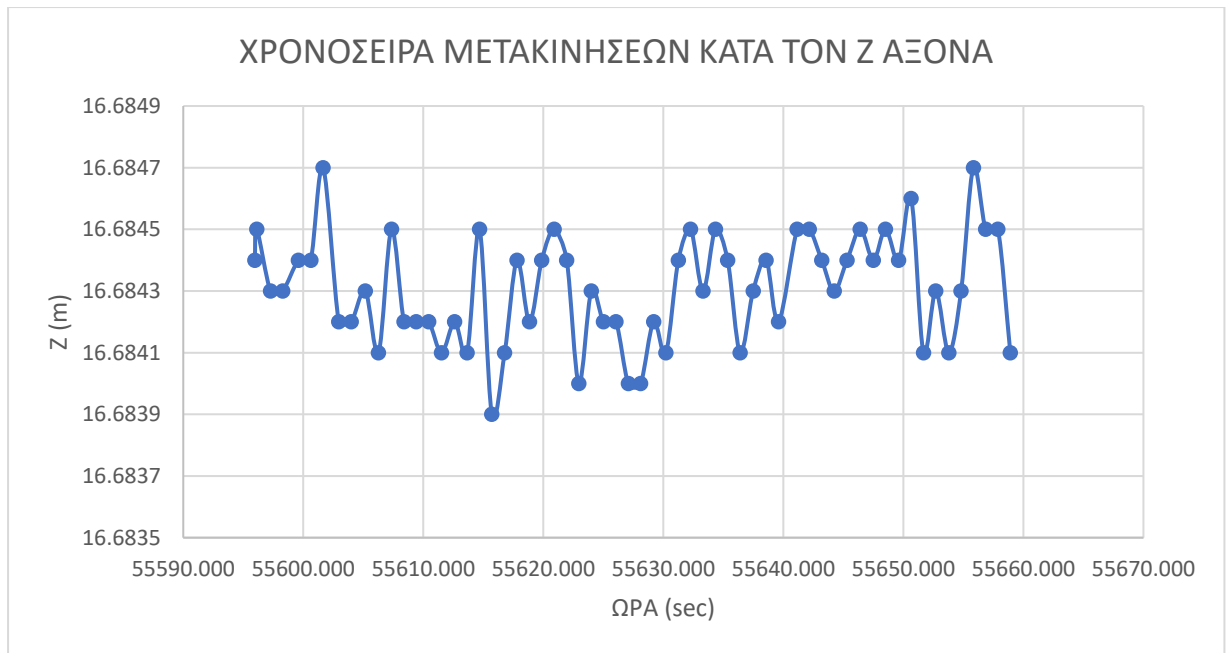


ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΤΟΝ Ζ ΑΞΟΝΑ

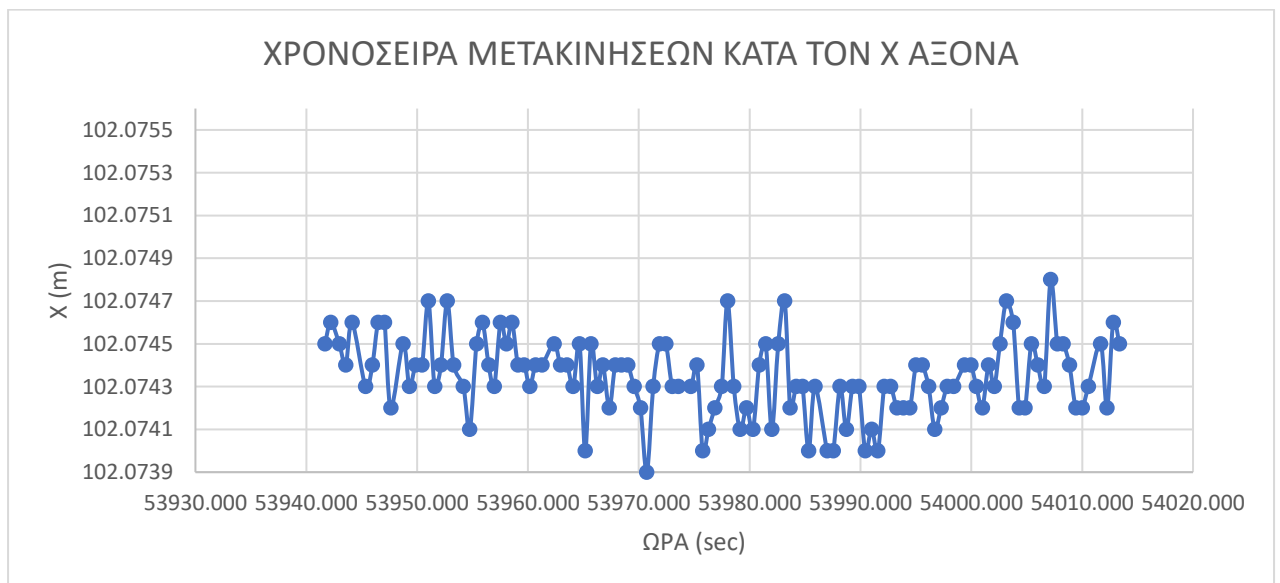


2^ο σημείο:

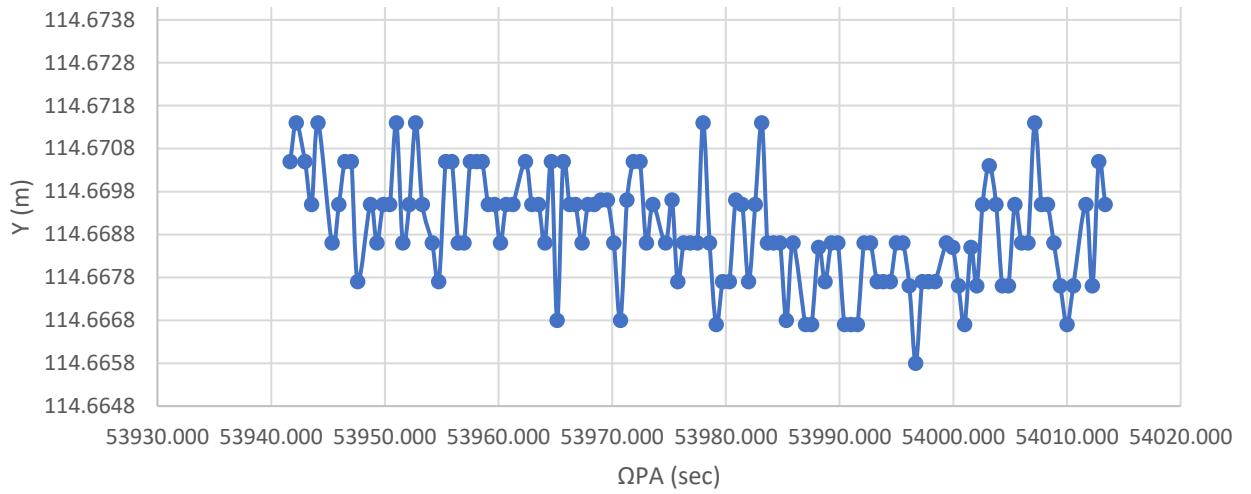




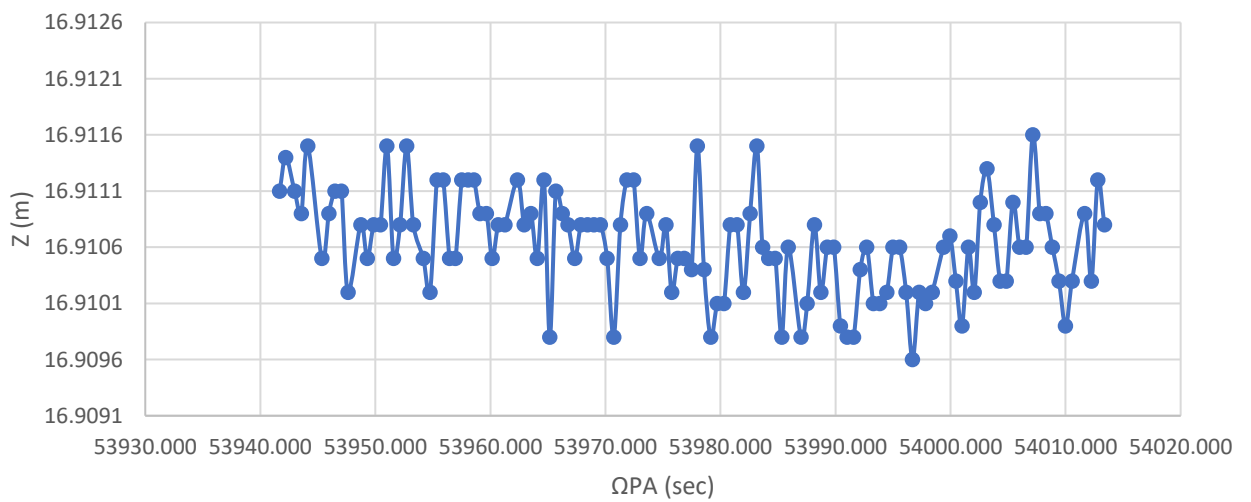
**Διαγράμματα βόρειας γέφυρας με συχνότητα μέτρησης ανά 0.5 sec.
1^ο σημείο:**



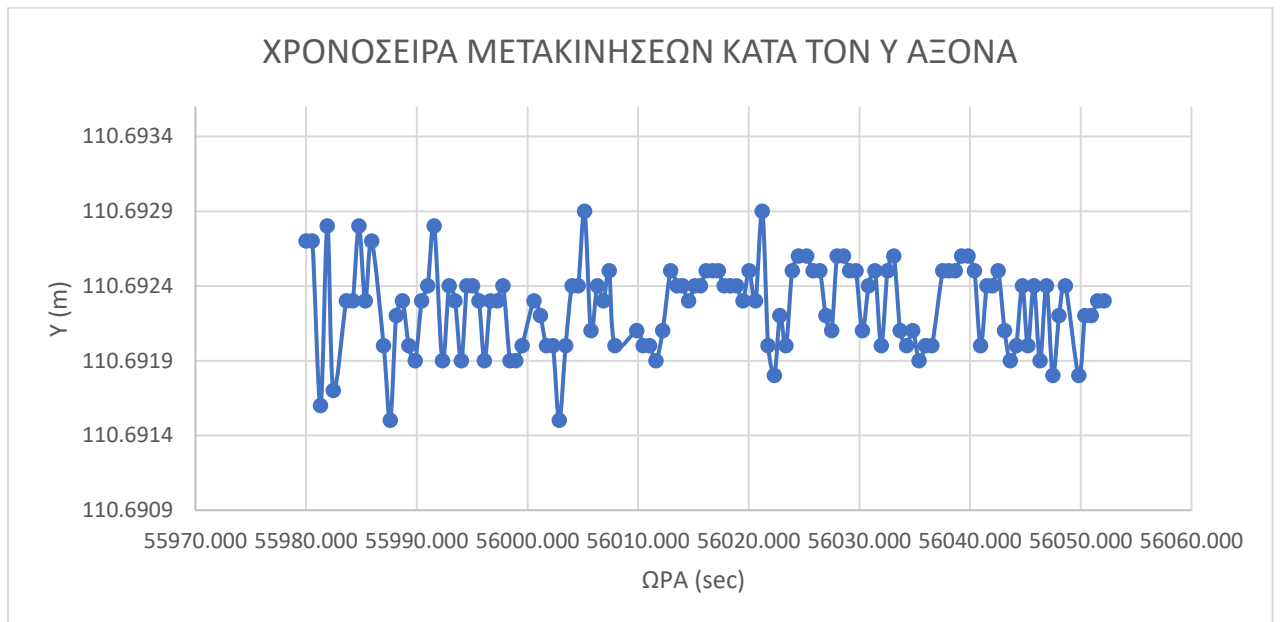
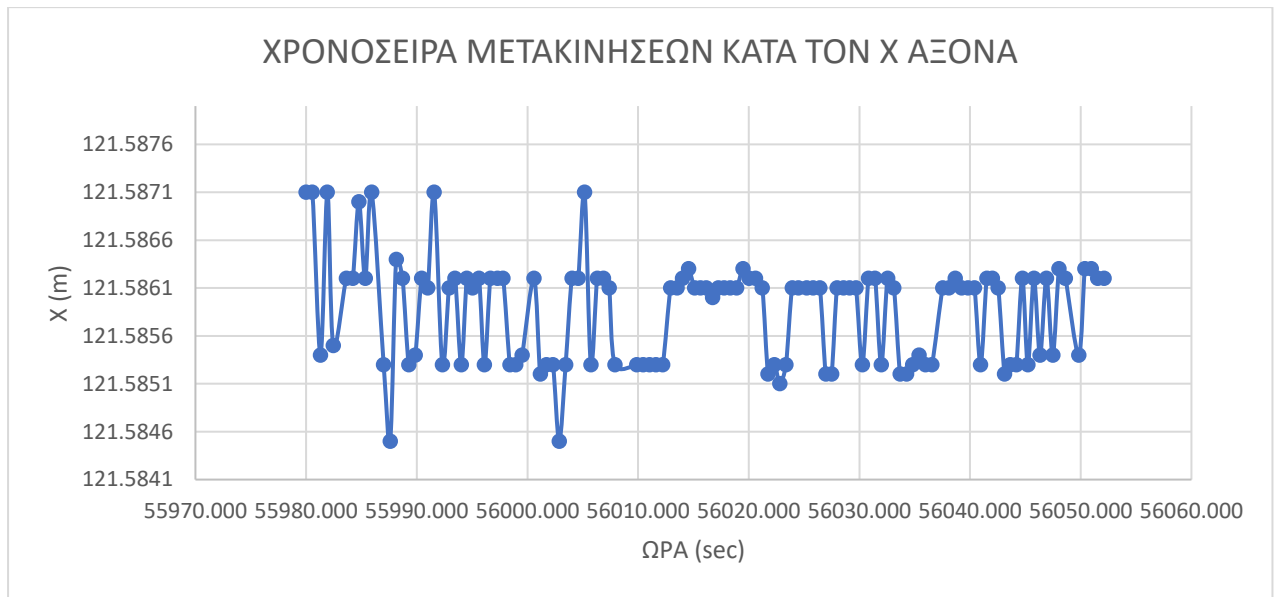
ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΤΟΝ Υ ΑΞΟΝΑ

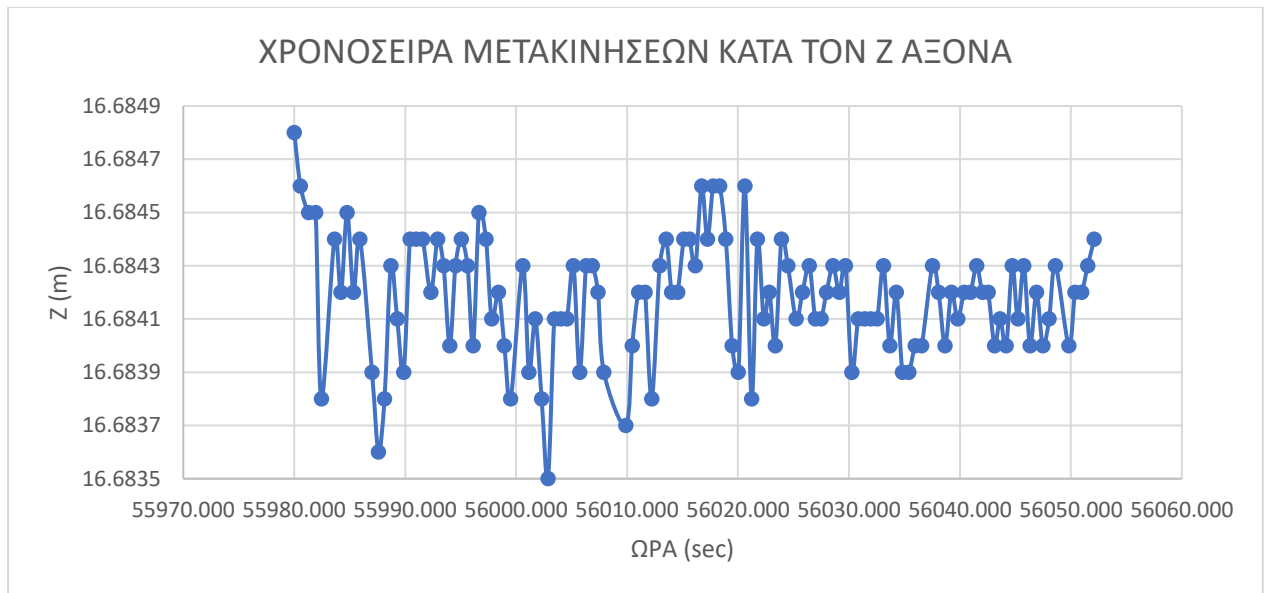


ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΤΟΝ Ζ ΑΞΟΝΑ

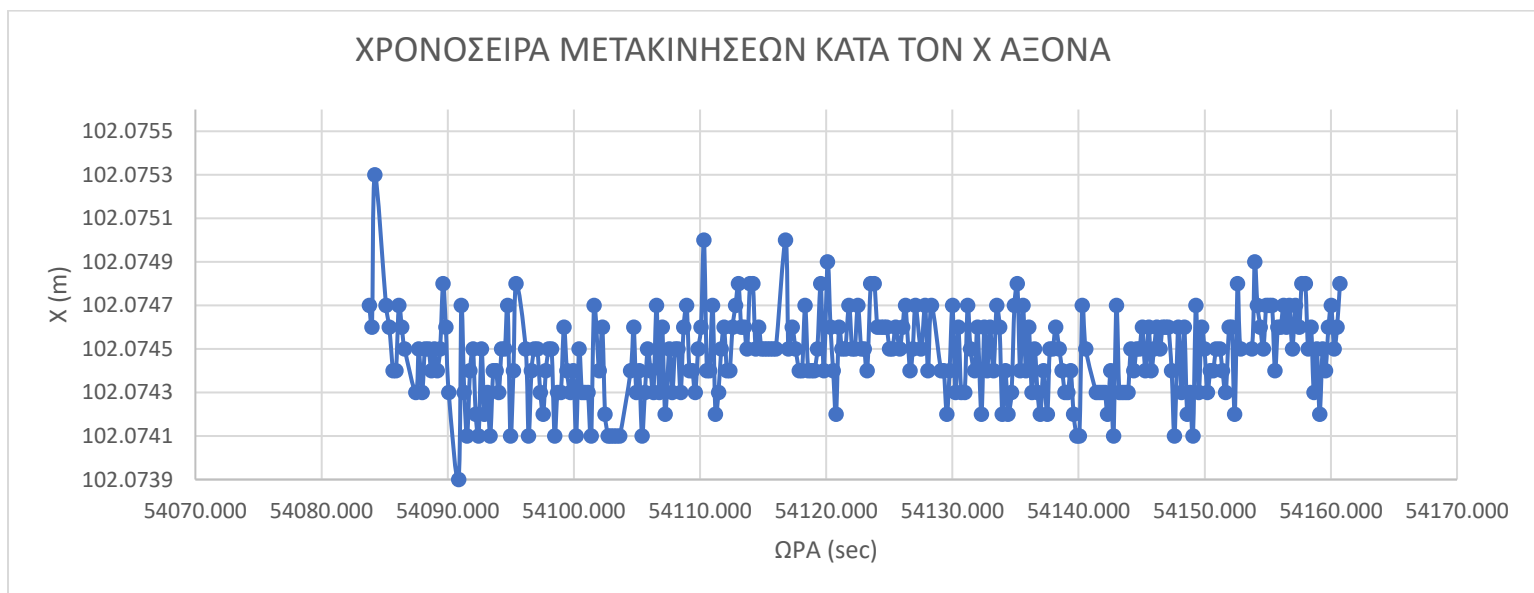


2^ο σημείο:

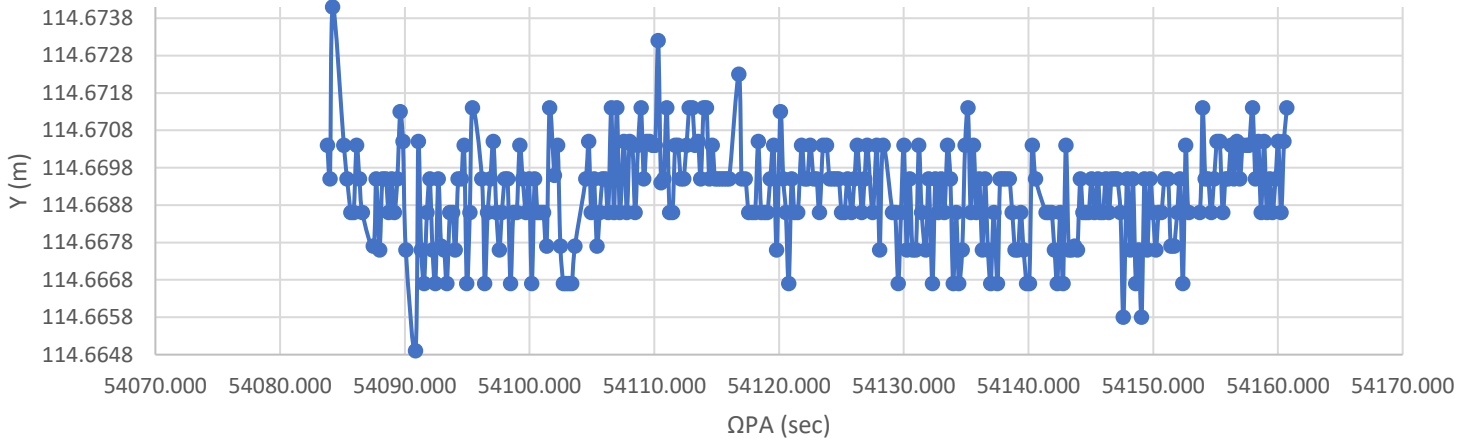




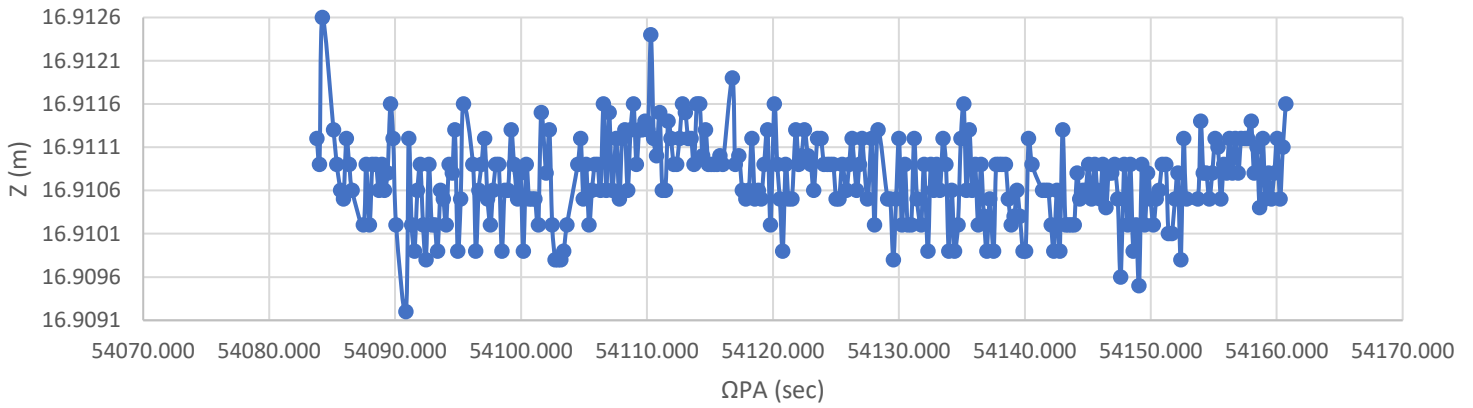
**Διαγράμματα βόρειας γέφυρας με συχνότητα μέτρησης ανά 0.2 sec.
1^ο σημείο:**



ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΤΟΝ Υ ΑΞΟΝΑ

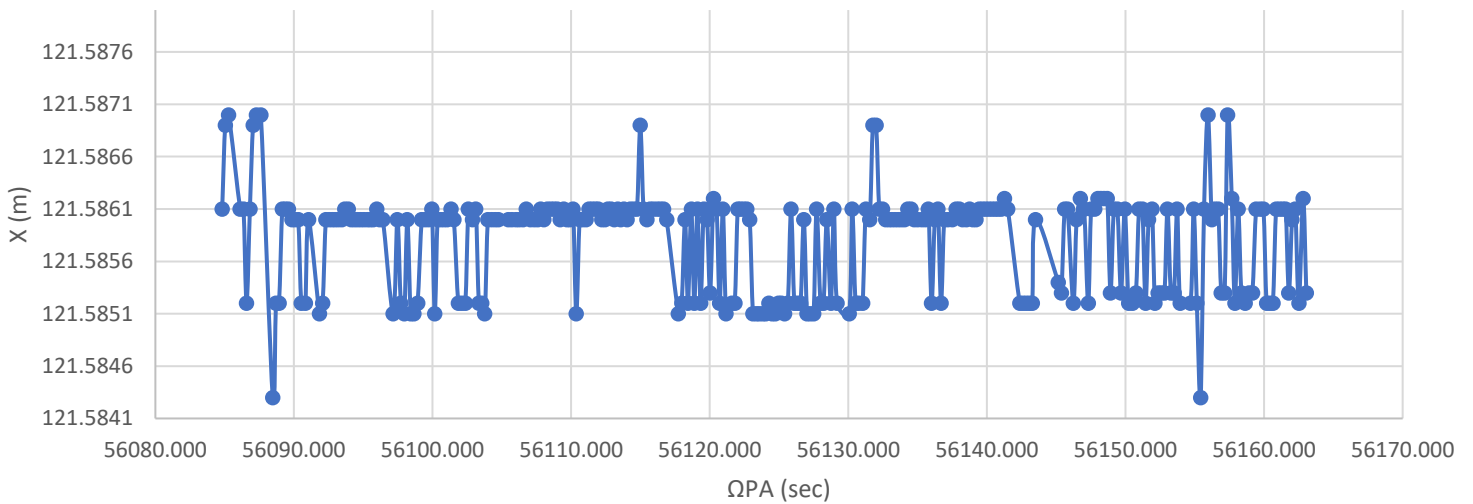


ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΤΟΝ Ζ ΑΞΟΝΑ

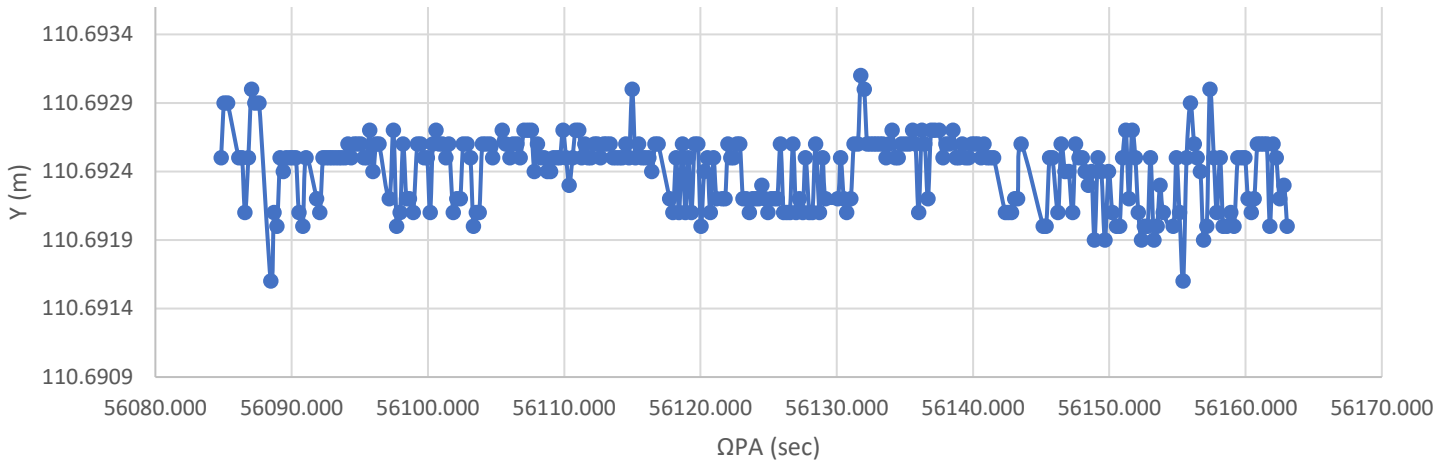


2^ο σημείο:

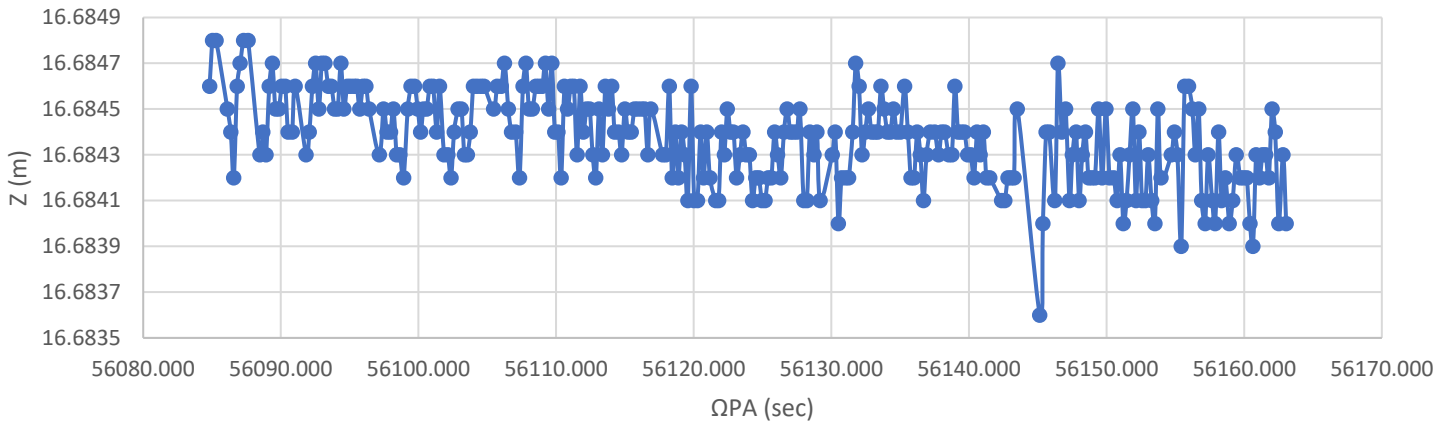
ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΤΟΝ Χ ΑΞΟΝΑ



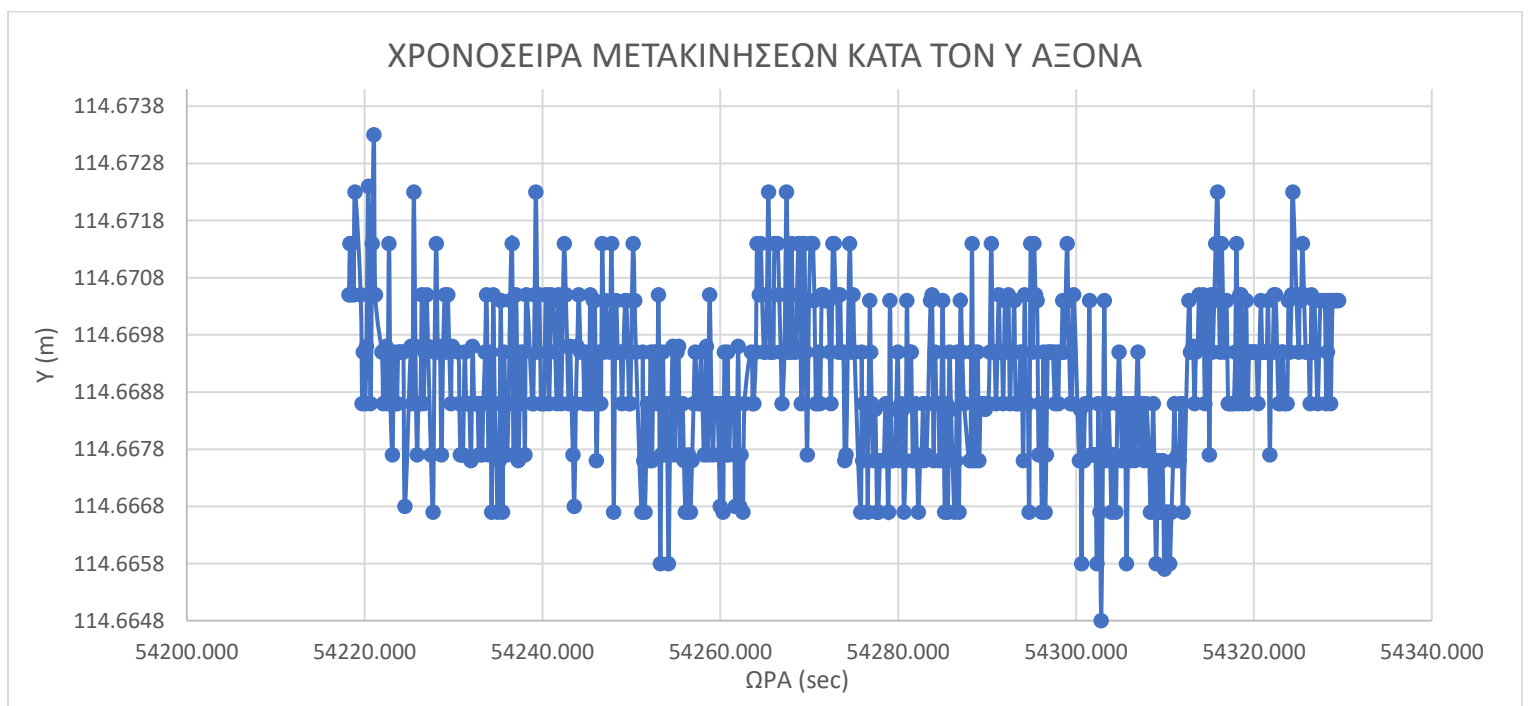
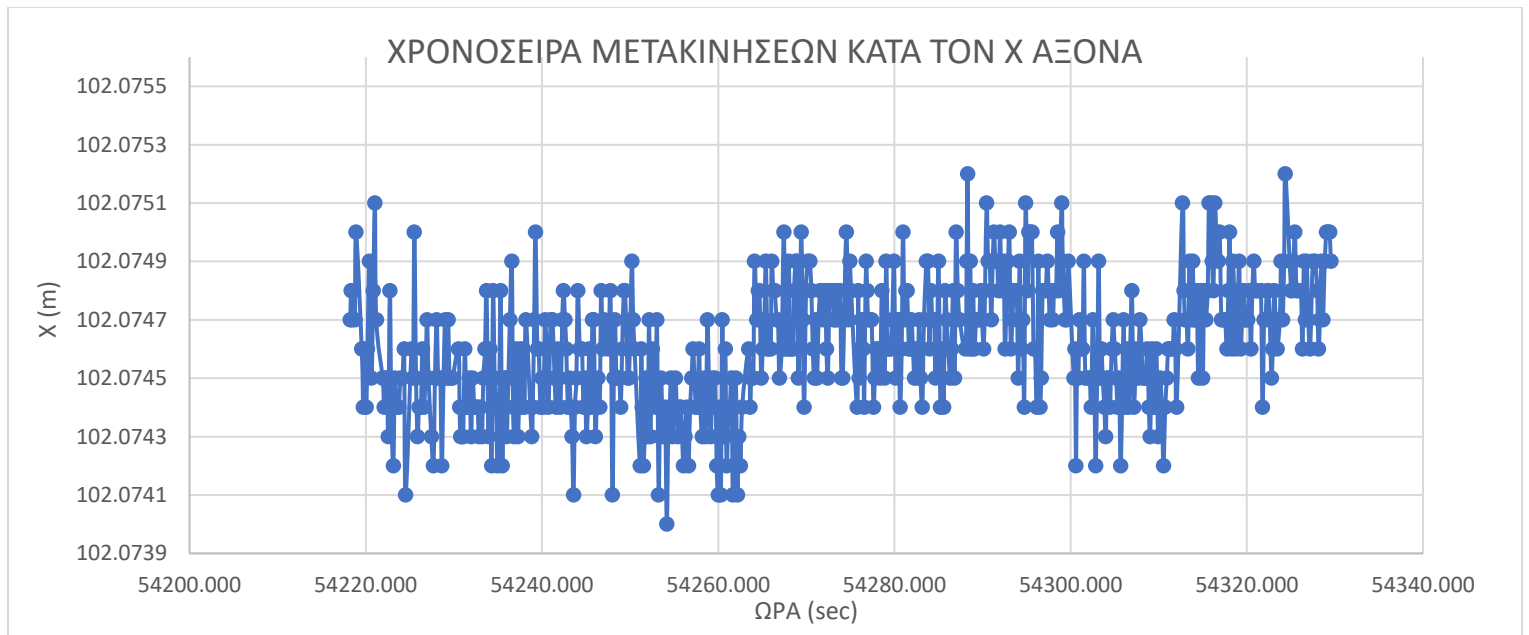
ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΤΟΝ Υ ΑΞΟΝΑ



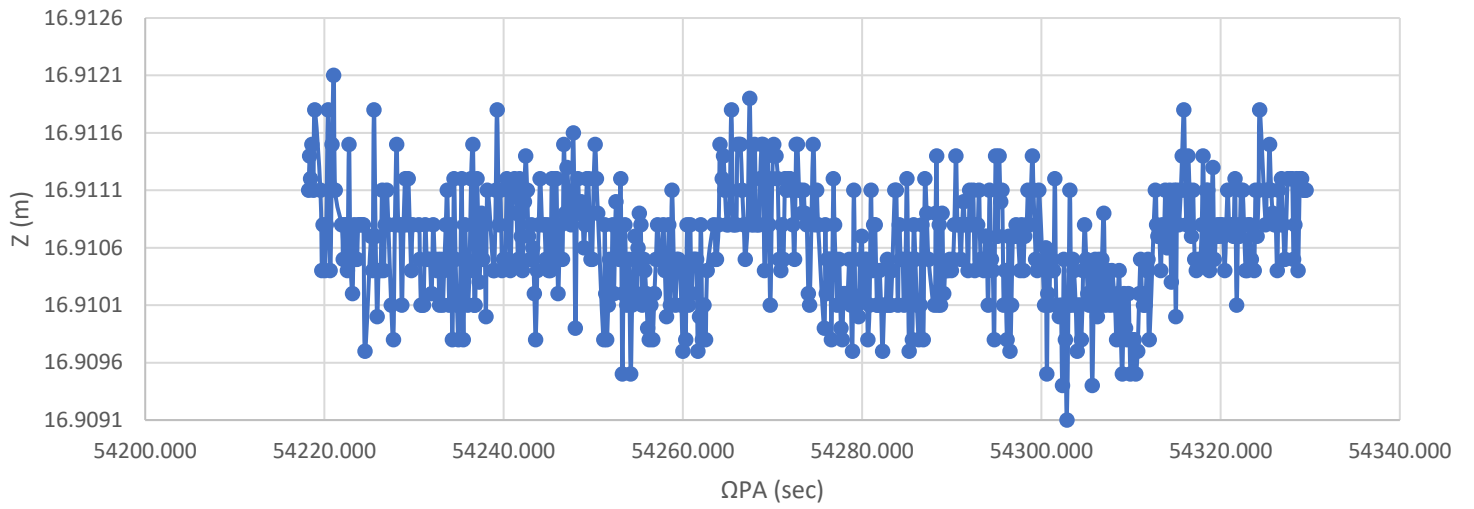
ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΤΟΝ Ζ ΑΞΟΝΑ



**Διαγράμματα βόρειας γέφυρας με συχνότητα μέτρησης ανά 0.1 sec.
1^ο σημείο:**

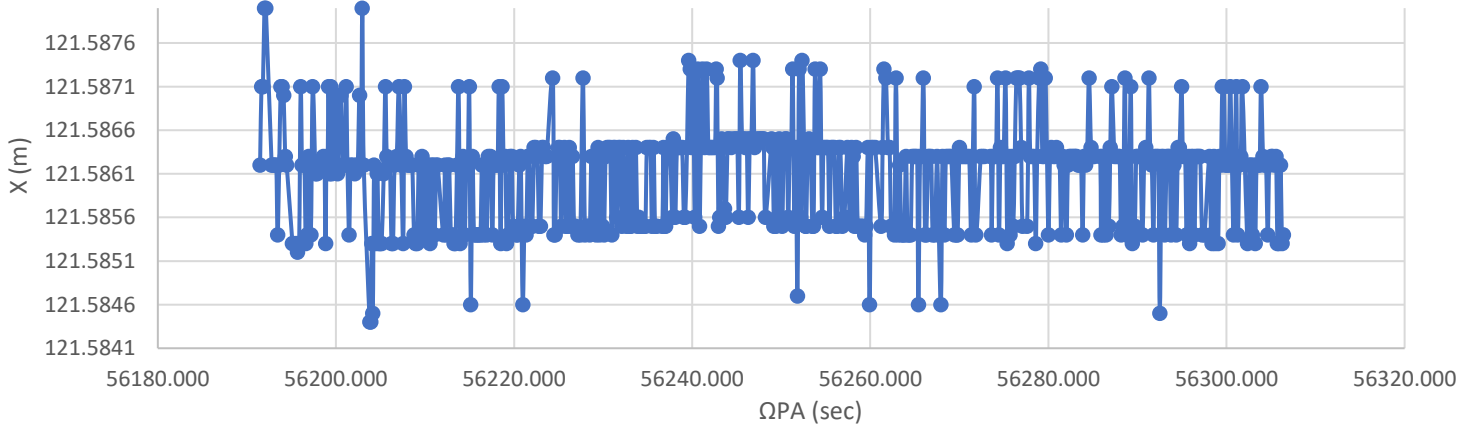


ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΤΟΝ Ζ ΑΞΟΝΑ

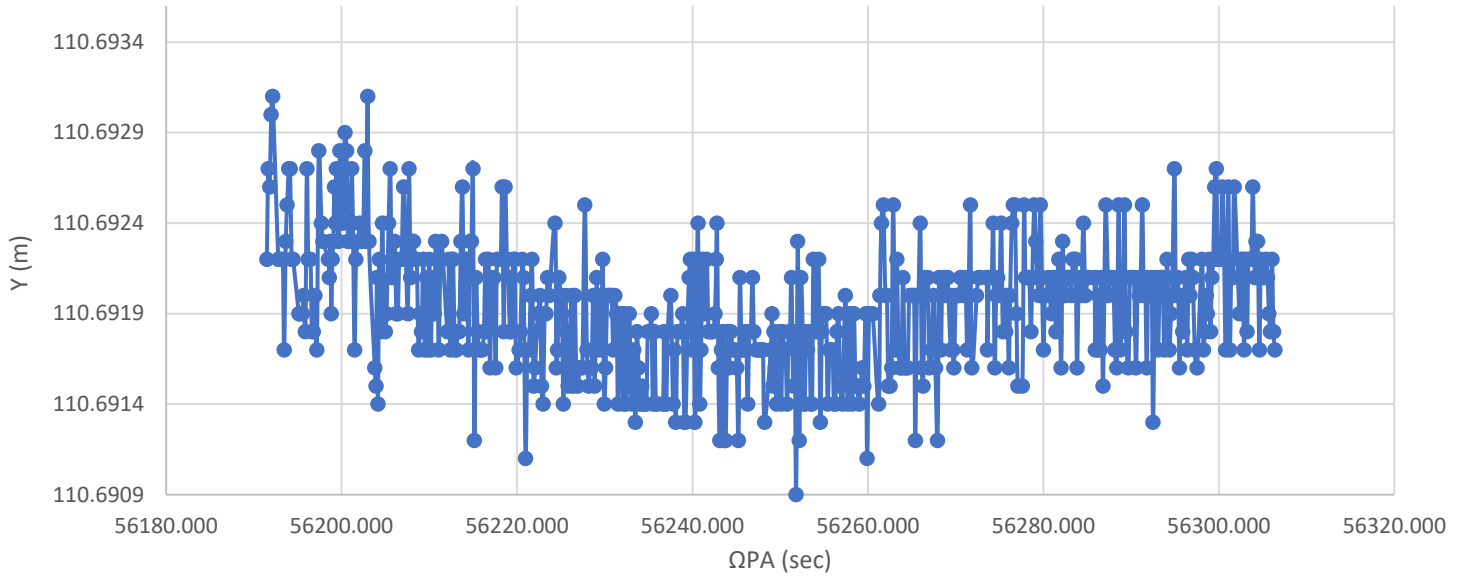


2^ο σημείο:

ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΤΟΝ Χ ΑΞΟΝΑ



ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΤΟΝ Υ ΑΞΟΝΑ



ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΤΟΝ Ζ ΑΞΟΝΑ

