



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών

Τομέας Τοπογραφίας

Εργαστήριο Γενικής Γεωδαισίας

«ΜΕΛΕΤΗ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΚΑΛΩΔΙΩΝ ΠΕΖΟΓΕΦΥΡΑΣ "CALATRAVA" ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΜΙΚΡΟΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑΣ»

Νικόλαος Γ. Καλαμπόγιας

Υπεύθυνος

Βασίλειος Γκίκας

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα 2012





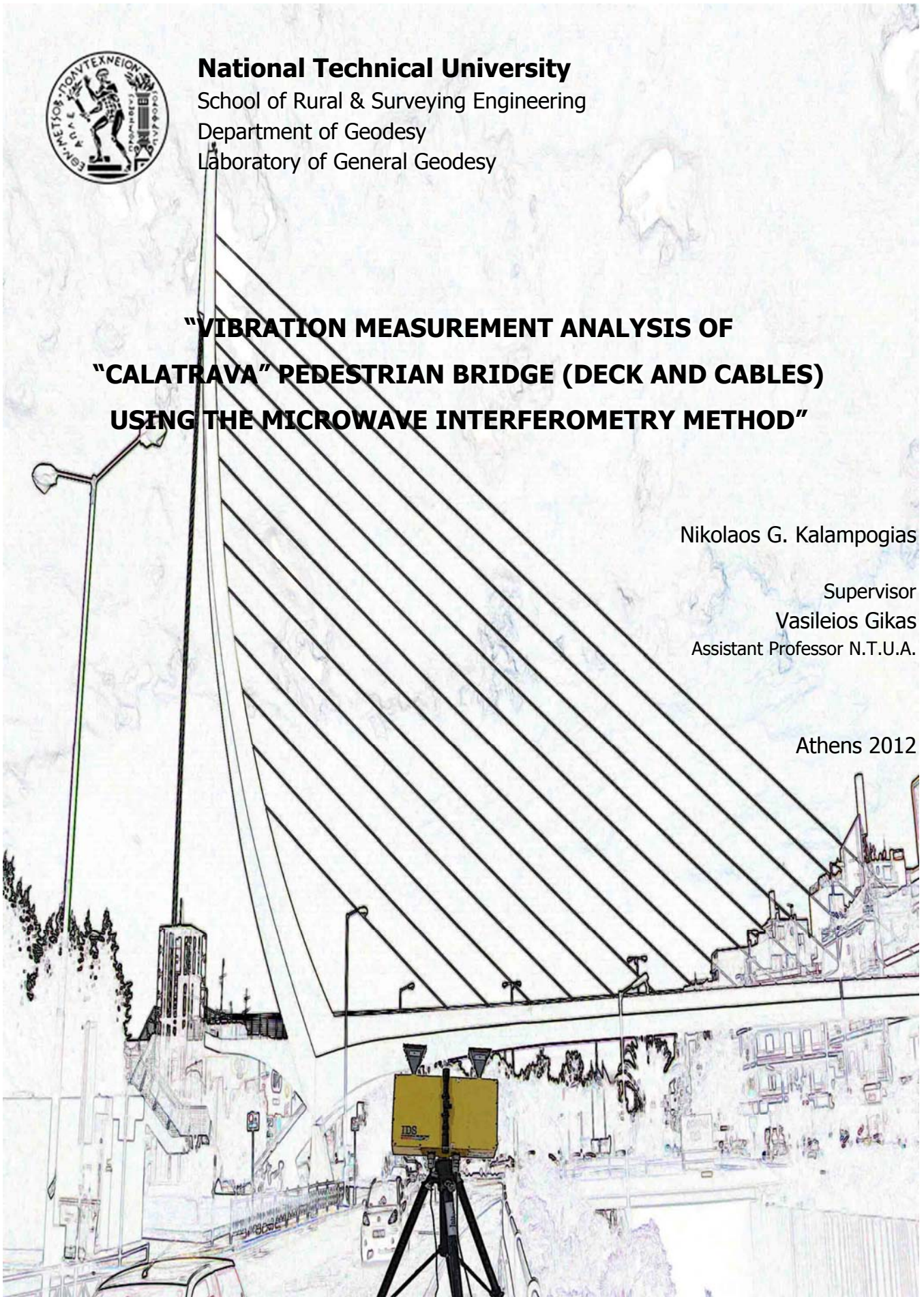
National Technical University
School of Rural & Surveying Engineering
Department of Geodesy
Laboratory of General Geodesy

**"VIBRATION MEASUREMENT ANALYSIS OF
"CALATRAVA" PEDESTRIAN BRIDGE (DECK AND CABLES)
USING THE MICROWAVE INTERFEROMETRY METHOD"**

Nikolaos G. Kalampogias

Supervisor
Vasileios Gikas
Assistant Professor N.T.U.A.

Athens 2012



Ευχαριστίες

Το τελευταίο στάδιο της προσπάθειας μου για την απόκτηση του Διπλωματός μου από την Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου σηματοδοτήθηκε από την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Στο σημείο αυτό, επιθυμώ να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε κάθε έναν από τους ανθρώπους που στήριξαν την προσπάθεια μου όλο αυτό το διάστημα.

Καταρχήν θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Γκίκα Βασίλειο που μου εμπιστεύθηκε το θέμα αυτής της μελέτης. Τον ευχαριστώ για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση καθ' όλη την διάρκεια υλοποίησης της διπλωματικής εργασίας καθώς, και για την πολυτιμή υποστήριξη του και το ενδιαφέρον για την ορθή εκπόνηση και παρουσίασή της. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Μπίμη Αθανάσιο, Υποψήφιο Διδάκτορα, για την σημαντική βοήθεια που προσέφερε προκειμένου να γίνει εφικτή η ολοκληρωσή της. Τέλος ευχαριστώ όλους τους φίλους οι οποίοι πολύ πρόθυμα εξέφρασαν την επιθυμία να με βοηθήσουν.

Κλείνοντας ένα μεγάλο ΕΥΧΑΡΙΣΤΩ, την αμέριστη ευγνωμοσύνη και αγάπη μου για τους δικούς μου ανθρώπους που με στηρίζουν σε όλες μου τις προσπάθειες, χωρίς ποτέ να μου ζητούν ανταλλάγματα.

Νικόλαος Γ. Καλαμπόγιας

Περίληψη

Η συστηματική παρακολούθηση και ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς των κατασκευών έναντι σεισμικής δράσης, των εναλλασσόμενων φορτίσεων του ανέμου και άλλων φαινομένων αποτελεί βασική προϋπόθεση για την ασφαλή λειτουργία τους. Παραδοσιακά, ο προσδιορισμός των κινηματικών χαρακτηριστικών μιας κατασκευής επιτυγχάνεται με μεθόδους πειραματικής μηχανικής χρησιμοποιώντας αισθητήρες, όπως επιταχυνσιόμετρα, κλισίμετρα και πιο πρόσφατα αισθητήρες οπτικών ινών. Τα τελευταία χρόνια οι εφαρμογές του συστήματος GPS (**G**lobal **P**ositioning **S**ystem) και των γεωδαιτικών σταθμών αυτόματης αναγνώρισης και παρακολούθησης στόχου (Tracking Total Stations) καθιστούν τις συμβατικές γεωδαιτικές μεθόδους μια αξιόπιστη εναλλακτική μέθοδο για την καταγραφή των κινηματικών χαρακτηριστικών κατασκευών όπως υψηλές κατασκευές και γέφυρες. Επειδή όμως οι παραπάνω μέθοδοι για να εφαρμοστούν απαιτούν την εγκατάσταση εξοπλισμού πάνω στην υπό μελέτη κατασκευή (γενικώς δύσκολο, χρονοβόρο, επικίνδυνες συνθήκες), οι μελετητές έχουν στρέψει την προσοχή τους στα non-contact συστήματα που έχουν αναπτυχθεί τον τελευταίο καιρό όπως τα οπτικά συστήματα που χρησιμοποιούν τεχνικές ψηφιακών εικόνων.

Επιπρόσθετα, η μικροκυμματική συμβολομετρία χαρακτηρίζεται ως η καταλληλότερη μέθοδος για την από απόσταση παρακολούθηση φαινομένων επί κατασκευών και πρόσφατα αναπτύχθηκε από Ιταλούς ερευνητές το σύστημα IBIS-S το οποίο βασίζεται στην μέθοδο της μικροκυμματικής συμβολομετρίας (τεχνική επίγειου radar). Η καινοτόμος αυτή τεχνολογία προσφέρει ακρίβειες οι οποίες δεν έχουν επιτευχθεί στο παρελθόν με κανένα από τα παραπάνω συστήματα.

Αντικείμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας αποτελεί η μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς (μετατοπίσεις και συχνότητες ταλάντωσης) της πεζογέφυρας που βρίσκεται στην συμβολή των Λ. Μεσογείων και Λ. Κανελλοπούλου (Κατεχάκη) χρησιμοποιώντας το σύστημα IBIS-S. Εξετάζει

την επίδραση τυχαίων φορτίσεων (λόγω της κυκλοφορίας των πεζών, του ανέμου και του ιδίου βάρους της κατασκευής) τόσο στο κυρίως σώμα της πεζογέφυρας (κατάστρωμα) όσο και στα καλώδια ανάρτησής της.

Η ανάλυση των μετρήσεων έγινε στα πεδία του Χώρου/Χρόνου και των Συχνοτήτων. Απο την ανάλυση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι το καταστρώμα της κατασκευής εμφανίζει βασική συχνότητα ταλάντωσης 2.00 Hz και το εύρος ταλάντωσης του είναι 2.21 mm. Ενώ τα καλώδια ανάρτησης βρίσκονται μέσα στο ενεργό φάσμα απόκρισης [0,17] Hz με μέγιστο εύρος ταλάντωσης κοντά στα 13 mm και ελάχιστο περίπου 1 mm.

Abstract

The systematic monitoring of the dynamic behavior of structures under several loading conditions (e.g. due to earthquakes, wind etc.) is indispensable to ensure their structural integrity, durability and reliability. Traditionally, the dynamic behavior of a structure has been relied on experimental mechanic methods with instruments such as accelerometers, inclinometers and more recently fiber optical sensors. In recent years, GPS (Global Positioning System) and Tracking Total Stations applications have also been applied successful as alternative methods of monitoring slender structures such as high rise structures and bridges. However, the implementation of deformational methods on the investigated structure prerequisite equipment installation (in generally difficult, time-consuming and hazardous conditions), that leads researchers to reflect on recently developed non-contact sensors such as vision-based systems using digital image processing techniques.

Additionally, very recently microwave interferometry has been investigated in structural deformation monitoring its ability to operate from distance and high accuracy potential. Latterly, Italian researchers designed and developed a new radar system which is based on microwave interferometry (IBIS-S System). Despite the fact that with microwave interferometry measure only 1-D displacements, can be attributed this innovative technology provides accuracy never seen before with none of the methods above.

This diploma thesis, study the dynamic behavior (displacements and dominant frequencies), measured using system IBIS-S, of the pedestrian bridge which is located at the intersection of Avenues Mesogeion and Kanellopoulou (Katechaki), Athens (Greece). In particular investigates the effects of random loads (because of pedestrian's movement, weight of structure and wind) at the deck and the suspension cables.

The analysis of data realized in two fields. First field focuses in Time domain and second in Frequencies domain. The results of data produce a constant value of dominant frequency for the deck of bridge of 2.00 Hz and width of oscillation 2.21 mm. Values of dominant frequencies for the cables are in space [0,17] Hz, max width of oscillation is 13 mm and min about 1 mm.

Πίνακας Περιεχομένων

Ευχαριστίες	3
Περίληψη	5
Abstract	7
Πίνακας Περιεχομένων	9
Ευρετήριο Σχημάτων	12
1. Εισαγωγή	17
1.1 Γενικά	17
1.2 Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας	17
1.3 Δομή της Εργασίας.....	17
2. Η Δυναμική Συμπεριφορά των Κατασκευών	19
2.1 Γενικά για την «Υγεία των Κατασκευών»	19
2.2 Φορτίσεις και Μετακινήσεις	21
2.2.1 Είδη Φορτίσεων	21
2.2.2 Είδη Μετατοπίσεων	22
3. Μέθοδοι Ελέγχου της Δυναμικής Συμπεριφοράς των Κατασκευών.....	25
3.1 Μη Τοπογραφικές Μέθοδοι Παρακολούθησης	25
3.1.1 Επιταχυνσιόμετρα	25
3.1.2 Οπτικές Ίνες.....	26
3.1.3 Ψηφιακά Κλισίμετρα.....	28
3.2 Τοπογραφικές Μέθοδοι.....	28
3.2.1 Γεωδαιτικοί Σταθμοί Αυτόματης Αναγνώρισης Στόχου.....	28
3.2.2 Συστήματα Παγκόσμιου Δορυφορικού Εντοπισμού (GNSS), GPS ...	30
3.2.3 Συστήματα Βιντεομετρίας	33
4. Το Σύστημα Μικροκυμματικής Συμβολομετρίας IBIS-S.....	34

4.1 Γενική Περιγραφή του Αισθητήρα	34
4.3 Αρχές Λειτουργίας	37
4.3.1 Η Τεχνική της Συμβολομετρίας.....	37
4.3.2 Η Τεχνική SF - CW	40
4.4 Κεραίες Αισθητήρα	43
4.5 Ακρίβεια των Μετρήσεων.....	45
4.6 Μέγιστη Απόσταση Παρατήρησης.....	46
4.7 Ατμοσφαιρική Επίδραση	46
5. Η Πεζογέφυρα "Calatrava"	48
5.1 Γενικά	48
5.2 Κατασκευαστικά Στοιχεία	49
6. Συλλογή Δεδομένων.....	56
6.1 Προπαρασκευή Συλλογής Δεδομένων Πεδίου.....	56
6.2 Συλλογή Δεδομένων Πεδίου	56
6.3 Διαδικασία Συλλογής Δεδομένων	59
6.4 Ιδιαιτερότητες	60
6.5 Προβλήματα στο Πεδίο.....	61
7. Λογισμικό / Μεθοδολογία Επεξεργασίας Μετρήσεων	62
7.1 Λογισμικό Προ-Επεξεργασίας των Μετρήσεων.....	62
7.1.1 Ενεργοποιώντας το Λογισμικό	62
7.1.2 Εισαγωγή Παραμέτρων Πειράματος	63
7.1.3 Καταγραφή Δεδομένων	64
7.2 Λογισμικό Επεξεργασίας των Μετρήσεων.....	65
7.2.1 Δημιουργία Φακέλου Μελέτης / Έργου.....	66
7.2.2 Παράμετροι Επεξεργασίας.....	67
7.2.3 Επεξεργασία Δεδομένων	68

7.2.4 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων	71
8. Επεξεργασία Μετρήσεων και Ανάλυση Αποτελεσμάτων	73
8.1 Εισαγωγή	73
8.2 Κατάστρωμα Πεζογέφυρας.....	73
8.2.1 Διαγράμματα Μετατόπισης.....	75
8.2.2 Διαγράμματα Ταχύτητας - Επιτάχυνσης.....	78
8.2.3 Φασματική Ανάλυση.....	79
8.2.4 Συμπεράσματα.....	80
8.3 Καλώδια Ανάρτησης Καταστρώματος.....	81
8.3.1 Διαγράμματα Μετατόπισης.....	82
8.3.2 Διαγράμματα Ταχύτητας - Επιτάχυνσης.....	86
8.3.3 Φασματική Ανάλυση.....	88
8.3.4 Σύνοψη.....	91
9. Συμπεράσματα - Προτάσεις.....	93
9.1 Γενικά	93
9.2 Στοιχεία Σχετικά με την Δυναμική Συμπεριφορά της Κατασκευής.....	93
9.3 Επισημάνσεις για τον Αισθητήρα IBIS-S	95
9.4 Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα	95
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	96
A 1. Παράδειγμα Στατικής Ανάλυσης Γέφυρας.....	96
B. IBIS-S	106
B 1. Τα Μέρη του Συστήματος.....	106
B 2. Κεραίες του Συστήματος	108
Γ. Μετασχηματισμοί Fourier.....	110
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	114

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχ. 2.1: Η.Π.Α.-Κάθε 2 χρόνια ελέγχεται η «υγεία» των κρατικών γεφυρών ..	20
Σχ. 2.2: Κατάρρευση Γέφυρας 35W στην Μινεάπολη, Αμερική	22
Σχ. 2.3: Παράδειγμα μετατόπισης γέφυρας λόγω στατικού φορτίου.....	23
Σχ. 2.4: Παράδειγμα δυναμικής απόκρισης κεραίας.....	24
Σχ. 3.1: Τυπική Διάταξη Οπτικής Ίνας επί του Β. Τείχους της Ακροπόλεως	27
Σχ. 3.2: Ψηφιακό Κλισίμετρο Leica Nivel 220.....	28
Σχ. 3.3: Ο ρομποτικός γεωδαιτικός σταθμός TPS 1200+	29
Σχ. 3.4: Ο δορυφορικός σχηματισμός του συστήματος GPS	31
Σχ. 3.5: Δέκτης GPS τοποθετημένος στην Γέφυρα του Μανχάταν.....	32
Σχ. 3.6: Κρεμαστή γέφυρα με τα καθορισμένα σημεία - στόχους.....	33
Σχ. 4.1: Ο αισθητήρας IBIS-S.....	34
Σχ. 4.2: Σκαρίφημα του Εσωτερικού Τμήματος του Αισθητήρα	35
Σχ. 4.3: Αρχές της συμβολομετρίας	38
Σχ. 4.4: Radar Συνθετικού Ανοίγματος πάνω σε αεροπλάνο	39
Σχ. 4.5: Εικόνα SAR του Λευκού Οίκου, Ουάσιγκτον D.C, Η.Π.Α.....	39
Σχ. 4.6: Ακτινική και προβολική μετατόπιση	39
Σχ. 4.7: Διάγραμμα του μεταδιδόμενου σήματος στο χρόνο.....	40
Σχ. 4.8: Ακρίβεια της απόστασης vs ανάλυση στο έδαφος	41
Σχ. 4.9: Η μονοδιάστατη εικόνα στο εύρος λήψης.....	42
Σχ. 4.10: Πρότυπο κατά τον Κατακόρυφο και Οριζόντιο Άξονα.....	44
Σχ. 4.11: Κεραία Η 20	44
Σχ. 4.12: Διάγραμμα της ακρίβειας των μετρήσεων συναρτήσει του SNR	45
Σχ. 5.1: Νοτιο – Δυτική άποψη της γέφυρας	48
Σχ. 5.2: Βόρειο – Δυτική άποψη της γέφυρας.....	49

Σχ. 5.3: Οριζοντιογραφία της γέφυρας (Χωρίς Κλίμακα).....	50
Σχ. 5.4: Βόρειο – Ανατολική όψη της γέφυρας (Χωρίς Κλίμακα)	51
Σχ. 5.5: Διατομή γέφυρας (Χωρίς Κλίμακα).....	52
Σχ. 5.6: Τομή καλωδίου ανάρτησης	53
Σχ. 5.7: Πυλώνας γέφυρας	54
Σχ. 5.8: Αγκύρωση καλωδίου σε κατάστρωμα και πυλώνα	55
Σχ. 6.1: Θέσεις παρατηρήσεων.....	57
Σχ. 6.2: Φωτογραφίες από τις θέσεις παρατήρησης.....	58
Σχ. 6.3: Λογισμικό λήψης δεδομένων.....	60
Σχ. 7.1: Παραμέτροι Γεωμετρίας.....	64
Σχ. 7.2: Παράθυρο Διαχείρισης Μετρήσεων	65
Σχ. 7.3: Αρχική σελίδα λογισμικού IBISDV.....	66
Σχ. 7.4: Παράθυρο επιλογής rangebin.....	69
Σχ. 7.5: Παράθυρο Rangebin Dynamic Analysis	70
Σχ. 7.6: Παράθυρο Modal Analysis.....	72
Σχ. 8.1: Διάγραμμα SNR / Range του καταστρώματος.....	74
Σχ. 8.2: Εγκάρσιοι δοκοί καταστρώματος	74
Σχ. 8.3: Διάγραμμα μετατοπίσεων του καταστρώματος, στις θέσεις 17 και 18 αντίστοιχά.....	75
Σχ. 8.4: Διάγραμμα μετατόπισης του καταστρώματος στις θέσεις 17 (Π) και 18 (Μ)	76
Σχ. 8.5: Τυπική απόκριση γέφυρας σε διέλευση πεζών	76
Σχ. 8.6: Κατάστρωμα, θέση 18 (1251 – 1259 s)	77
Σχ. 8.7: Διάγραμμα ταχύτητας του καταστρώματος στις θέσεις 17 (Π) και 18 (Μ)	78
Σχ. 8.8: Διάγραμμα επιτάχυνσης του καταστρώματος στις θέσεις 17 (Π) και 18 (Μ)	79
Σχ. 8.9: Περιοδόγραμμα του καταστρώματος στις θέσεις 17 και 18	80

Σχ. 8.10: Διάγραμμα SNR / Range των καλωδίων ανάρτησης.....	81
Σχ. 8.11: Μετατοπίσεις των καλωδίων 1 (Κ), 2 (Π), 3 (Μ).....	82
Σχ. 8.12: Μετατοπίσεις των καλωδίων 4 (Μ), 5 (Π), 6 (Κ).....	83
Σχ. 8.13: Μετατοπίσεις των καλωδίων 7 (Π), 8 (Μ), 9 (Κ).....	83
Σχ. 8.14: Μετατοπίσεις των καλωδίων 10 (Μ), 11 (Κ), 12 (Π)	84
Σχ. 8.15: Μετατοπίσεις των καλωδίων 13 (Π), 14 (Μ)	84
Σχ. 8.16: Καλώδιο 7 (902 – 910 s)	86
Σχ. 8.17: Διάγραμμα Ταχύτητας – Μήκους Καλωδίων	86
Σχ. 8.18: Διάγραμμα Επιτάχυνσης – Μήκους Καλωδίων	87
Σχ. 8.19: Διάγραμμα επιτάχυνσης καλωδίου 1	87
Σχ. 8.20: Διάγραμμα ταχύτητας καλωδίου 12	88
Σχ. 8.21: Περιοδογράμματα των καλωδίων 1 και 7.....	89
Σχ. 8.22: Διάγραμμα Τάσεων / Καλωδίων.....	91
Σχ. Α.1: Οι νέοι κλάδοι πάνω από την Λ. Forlanini (Μιλάνο, Ιταλία)	96
Σχ. Α.2: Όψη και οριζοντιογραφία της υπό μελέτης γέφυρας (m)	97
Σχ. Α.3: Τυπική διατομή της υπό μελέτης γέφυρας (m)	97
Σχ. Α.4: Σχηματικά οι αναλυόμενες συνθήκες φόρτισης (m).....	98
Σχ. Α.5: Τυπική διάταξη των οχημάτων κατά την διάρκεια των μετρήσεων ...	99
Σχ. Α.6: Το κατάστωμα της γέφυρας από κάτω.....	99
Σχ. Α.7: Θέσεις του radar και των LVDT κατά τις μετρήσεις LC1 και LC2	100
Σχ. Α.8: Διάγραμμα σήματος radar κατά τις μετρήσεις LC1 και LC2.....	101
Σχ. Α.9: Κατακόρυφες μετατοπίσεις απ’ το radar στο χρόνο (LC1).....	101
Σχ. Α.10: Σύγκριση μεταξύ radar και επιταχυνσιόμετρου (LC1)	102
Σχ. Α.11: Παραμορφωμένη ελαστική γραμμή απ’ το radar (LC1)	102
Σχ. Α.12: Σύγκριση μεταξύ radar και επιταχυνσιόμετρου (LC2)	102
Σχ. Α.13: Θέσεις του radar και των LVDT κατά την φόρτιση LC3.....	103

Σχ. Α.14: Διάγραμμα σήματος radar κατά τις μετρήσεις LC3	104
Σχ. Α.15: Σύγκριση μεταξύ radar και επιταχυνσιόμετρου (LC3)	104
Σχ. Α.16: Παραμορφωμένη ελαστική γραμμή απ' το radar (LC3)	104
Σχ. Β.1: Πρότυπο κατά τον Κατακόρυφο και Οριζόντιο Άξονα, Η23	108
Σχ. Β.2: Πρότυπο κατά τον Κατακόρυφο και Οριζόντιο Άξονα, Η15	109
Σχ. Β.3: Πρότυπο κατά τον Κατακόρυφο και Οριζόντιο Άξονα, Η13	109
Σχ. Γ.1: Σχηματική Αναπαράσταση του Κανόνα του Τραπεζίου	110

1. Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Η παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς των κατασκευών αποτελεί πεδίο δραστηριοτήτων του σύγχρονου μηχανικού, το οποίο χρόνο με τον χρόνο διευρύνεται και για μεγάλα τεχνικά έργα πλέον αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι κατά την διάρκεια του σχεδιασμού της κατασκευής και της συντήρησης / λειτουργίας. Σκοπός της παρακολούθησης των κατασκευών είναι ο έλεγχος και η συλλογή πληροφοριών για την “κατάσταση” τους έπειτα από τυχαία γεγονότα (π.χ. σεισμός), κατά την διάρκεια της λειτουργίας (π.χ. γέφυρα), κατά την εξέλιξη ενός φαινομένου (π.χ. δυνατός άνεμος) και άλλων παρόμοιων γεγονότων και φαινομένων.

1.2 Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας

Αφορά στην μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς των κατασκευών με την μέθοδο της μικροκυμματικής συμβολομετρίας. Ειδικότερα, εξετάζεται το σύστημα επίγειου radar IBIS-S και η εφαρμογή του στην παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς της πεζογέφυρας “Calatrava” που βρίσκεται στην συμβολή των Λ. Μεσογείων και Λ. Κανελλοπούλου.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν αφορούν την δυναμική συμπεριφορά της κατασκευής τόσο στο πεδίο του χώρου / χρόνου όσο και στο πεδίο των συχνοτήτων.

1.3 Δομή της Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από 9 Κεφάλαια και ένα Παράρτημα για τα οποία παρουσιάζεται μία πολύ σύντομη περίληψη στην συνέχεια.

Το 1^ο Κεφάλαιο παρέχει εισαγωγική παρουσίαση του αντικειμένου της εργασίας.

Το 2^ο Κεφάλαιο παρέχει μια εισαγωγική παρουσίαση για την δυναμική συμπεριφορά των κατασκευών και των φορτίων που τις καταπονούν.

Το 3^ο Κεφάλαιο περιλαμβάνει μια σύντομη ανασκόπηση των γεωδαιτικών και μη-γεωδαιτικών μεθόδων ελέγχου των κατασκευών και των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται.

Το 4^ο Κεφάλαιο ασχολείται αποκλειστικά με το σύστημα IBIS-S, τις αρχές λειτουργίας του, τα μέρη που το αποτελούν καθώς και το θεωρητικό υποβαθρό του.

Στο 5^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται οι προπαρασκευαστικές εργασίες που πραγματοποιήθηκαν και τα απαιτούμενα στοιχεία που συλλέχθηκαν.

Στο 6^ο Κεφάλαιο δίνονται βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά της κατασκευής (πεζογέφυρα, καλώδια ανάρτησης, κτλ) αναλύεται η διαδικασία συλλογής των δεδομένων πεδίου και αναφέρονται προβλήματα που προέκυψαν κατά την διάρκεια των εργασιών πεδίου.

Στο 7^ο Κεφάλαιο διατυπώνεται η μεθοδολογία ανάλυσης των αποτελεσμάτων και το θεωρητικό υπόβαθρο που βασίζεται.

Στο 8^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα της εργασίας.

Στο 9^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την μελέτη των συλλεχθέντων στοιχείων και γίνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Στο Παράρτημα της εργασίας δίδεται ένα παράδειγμα χρήσης του συστήματος IBIS-S, που αφορά την παρουσίαση των δυνατοτήτων του αισθητήρα στην στατική παρακολούθηση μίας γέφυρας.

2. Η Δυναμική Συμπεριφορά των Κατασκευών

2.1 Γενικά για την «Υγεία των Κατασκευών»

Κατά την διάρκεια του σχεδιασμού ενός τεχνικού έργου ο μηχανικός καλείται να δημιουργήσει μια κατασκευή η οποία να είναι λειτουργική, ανθεκτική, οικονομική, αισθητικά αποδεκτή, κυρίως όμως, να είναι ασφαλής για τις χρήσεις που πρόκειται να εξυπηρετήσει. Ο σχεδιασμός ενός έργου ακολουθείται από το στάδιο της κατασκευής και στην συνέχεια από τα τελευταία στάδια που το χαρακτηρίζουν τα οποία είναι η λειτουργία και η συντηρησή του. Στη φάση της λειτουργίας είναι αναγκαίο ιδιαίτερα στη περίπτωση μεγάλων (και κρίσιμων για την Εθνική Οικονομία μίας χώρας) τεχνικών έργων να διαπιστώνεται σε τακτά χρονικά διαστήματα εάν η ασφάλεια του έργου διατηρείται στα προκαθορισμένα επίπεδα. Για τον λόγο αυτό θα πρέπει να διενεργείται είτε περιοδικά (π.χ. στα πλαίσια ενός προγράμματος συντήρησης), είτε έκτακτα (π.χ. μετά από ένα σεισμό) ένα πρόγραμμα μετρήσεων - παρακολούθησης του έργου και σύμφωνα με τα αποτελέσματα, εφόσον κρίνεται απαραίτητο, να προγραμματίζονται οι απαιτούμενες επεμβάσεις.

Η διαδικασία ελέγχου (μέσω μετρήσεων και υπολογισμών) και εκτίμησης της συμπεριφοράς των κατασκευών λόγω της επιβολής φορτίων σε αυτές είναι γνωστή ως «Έλεγχος της Υγείας των Κατασκευών» (**Structural Health Monitoring – SHM**).

Ο σκοπός της μεθόδου αυτής είναι να αποκτήσουμε στοιχεία για την στατική κατάσταση των κατασκευών σε συνεχή βάση και σε συνδυασμό με την προγραμματισμένη συντήρηση. Η προγραμματισμένη συντήρηση και επιθεώρηση των κατασκευών προσφέρουν περιορισμένη χρονικά γνώση για την κατάσταση της κατασκευής, απαιτούν εκτεταμένη εργασία και είναι χρονοβόρες. Ακόμη, τα ομοιώματα που κατασκευάζονται υπό κλίμακα για τις κατασκευές και δοκιμάζονται μέσω προσομοιωτών (π.χ. σεισμική τράπεζα, ανεμοσήραγγα) δεν μας δίνουν πάντα την πλήρη εικόνα της συμπεριφοράς

των κατασκευών υπό την επίδραση των δυνάμεων που τις καταπονούν λόγω της πολυπλοκότητας των μεγεθών. Συνεπώς είναι επιβεβλημένη η παρακολούθηση του συνόλου των παραμορφώσεων των κατασκευών στη φάση λειτουργίας τους (ενδεχομένως σε πραγματικό χρόνο), στις οποίες δεν υπεισέρχονται απλοποιητικές παραδοχές όπως στις παραπάνω μεθόδους. Έτσι, για την συλλογή της πρωτογενούς πληροφορίας χρησιμοποιούνται ειδικοί αισθητήρες που τοποθετούνται σε χαρακτηριστικά σημεία της κατασκευής, που καταγράφουν στοιχεία για την μεταβολή της γεωμετρίας της κατασκευής συναρτήσει του χρόνου ή χρησιμοποιούνται όργανα για την συλλογή της πληροφορίας από απόσταση συναρτήσει του χρόνου και πάλι. Η συγκριτική ανάλυση των υπολογισμένων (μέσω αριθμητικών μοντέλων) και των μετρημένων μετατοπίσεων μας δίνουν τη δυνατότητα πρόληψης αστοχιών και καταστροφών όπως επίσης βελτίωσης των κατασκευών και ενδεχομένως την κατανόηση του μηχανισμού παραμόρφωσης τους.



Σχ. 2.1: Η.Π.Α.-Κάθε 2 χρόνια ελέγχεται η «υγεία» των κρατικών γεφυρών
Fig. 2.1: U.S.A.-Every 2 years check the «health» of government-owned bridges

2.2 Φορτίσεις και Μετακινήσεις

Κάθε κατασκευή, ανάλογα με το είδος της, τις συνθήκες λειτουργίας και την σκοπιμότητα που εξυπηρετεί, εκτός από τα στατικά φορτία είναι δυνατόν να καταπονηθεί και από δυναμικά φορτία (γρήγορα μεταβαλλόμενα). Η φόρτιση ενός τεχνικού έργου έχει ως αποτέλεσμα την γένεση μετατοπίσεων που μπορεί να έχουν μόνιμα, ημι-μόνιμα ή δυναμικά χαρακτηριστικά. Οι παραμορφώσεις εξαρτώνται ακόμη από τον τρόπο και τον τόπο έδρασης, την γεωμετρία του τεχνικού έργου όσο και από τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή. Στην ακραία περίπτωση που οι μετακινήσεις αυτές ξεπεράσουν τις τιμές των ορίων για τις οποίες έχει μελετηθεί το έργο, τότε έχουμε αστοχία ολόκληρης της κατασκευής ή προηγουμένως μέρους αυτής. Παρακάτω ακολουθεί επεξήγηση των παραπάνω όρων:

2.2.1 Είδη Φορτίσεων

- **Στατικές Φορτίσεις:** Ως τέτοια φορτία νοούνται το ίδιο βάρος της κατασκευής, το φορτίο κάθε πρόσθετης μόνιμης κατασκευής, οι δράσεις λόγω της παρουσίας υγρών με πρακτικά σταθερή στάθμη και τα φορτία που αναμένεται να παραλάβει το έργο στο μέλλον σύμφωνα με τον σχεδιασμό του.

Αν εξετάσουμε πιο διεξοδικά τη στατική φόρτιση θα δούμε ότι τα φορτία που ονομάζουμε στατικά είναι στην πραγματικότητα δυναμικά. Η εντασή τους αρχίζει από μηδενική τιμή και φθάνει στην τελική τιμή μετά από παρέλευση κάποιου χρόνου. Ο τρόπος επιβολής των στατικών φορτίων είναι τέτοιος ώστε οι αναπτυσσόμενες επιταχύνσεις να είναι αμελητέες. Θα μπορούσε συνεπώς η συμπεριφορά ενός φορέα που υποβάλλεται σε στατική φόρτιση, να θεωρηθεί ως μερική περίπτωση της δυναμικής με αμελητέες επιταχύνσεις.

- **Δυναμικές Φορτίσεις:** Τα φορτία αυτά δεν είναι σταθερά καθώς διαφοροποιείται το μέγεθος και πιθανώς και η διεύθυνση τους συναρτήσει του χρόνου. Συνεπώς, οι προκαλούμενες μετακινήσεις περιγράφονται από μαθηματικές συναρτήσεις του χρόνου, δηλαδή σε κάθε χρονική στιγμή αναπτύσσεται στον φορέα διαφορετική δυναμική κατάσταση. Επιπρόσθετα, τα σημεία του φορέα αλλάζουν θέση συναρτήσει του χρόνου κατά την εξέλιξη του φαινομένου, δηλαδή έχουν ταχύτητα και επιτάχυνση. Επειδή ο φορέας έχει μάζα αναπτύσσονται αδρανειακές δυνάμεις, συνέπεια της επιταχύνσεως των υλικών σημείων της κατασκευής. Οι αδρανειακές δυνάμεις που δημιουργούνται αποτελούν πρόσθετες δυνάμεις καταπόνησης της κατασκευής.

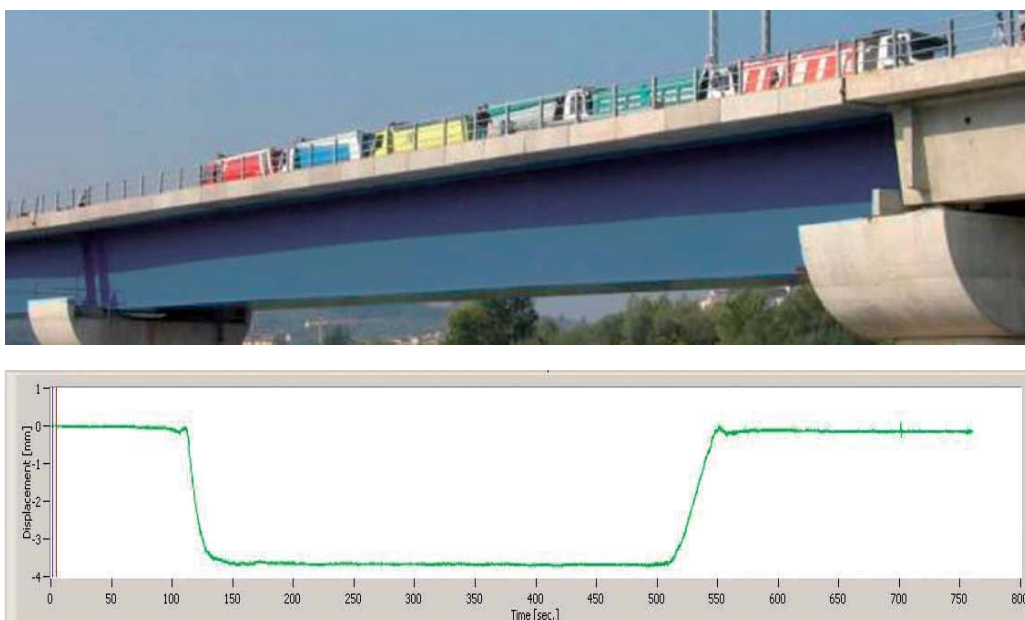
2.2.2 Είδη Μετατοπίσεων

- **Μόνιμες Μετατοπίσεις:** Μπορούν να προκληθούν σε μια κατασκευή είτε απότομα (π.χ. λόγω σεισμικής δράσης) είτε προοδευτικά (π.χ. λόγω συνεχών φορτίσεων του ανέμου) και ενδέχεται να έχουν ουσιαστική επίδραση στην στατική της επάρκεια.



Σχ. 2.2: Κατάρρευση Γέφυρας 35W στην Μινεάπολη, Αμερική
Fig. 2.2: Collapse of the 35W Bridge to Minneapolis, U.S.A.

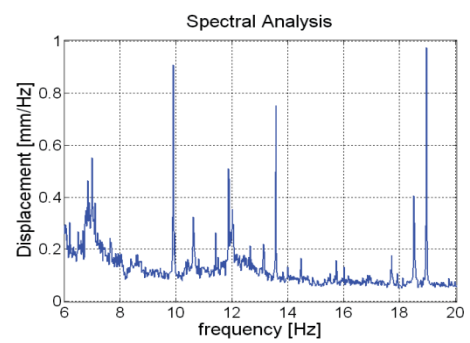
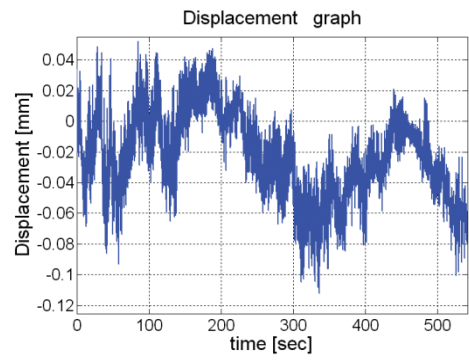
- **Ημι-Μόνιμες Μετατοπίσεις:** Συνίστανται σε “μικρο-μεταβολές” της γεωμετρίας της κατασκευής, δηλαδή μια παροδική μετατόπιση ενός τμήματος της κατασκευής ως προς ένα νέο κέντρο ισορροπίας και στην συνέχεια ταλάντωσης του ως προς αυτό. Οι μετατοπίσεις αυτές, εφόσον δεν υπερβαίνουν κάποια όρια, είναι αναμενόμενες και επιθυμητές για την ασφάλεια των κατασκευών καθώς απορροφούν την ενέργεια των δυνάμεων που τις φορτίζουν (π.χ. φορτίσεις ανέμου). Έτσι η συγκεκριμένη κατηγορία μετατοπίσεων αναφέρονται στην μέση εκτροπή της θέσης ηρεμίας της κατασκευής για ένα χρονικό διάστημα.



Σχ. 2.3: Παράδειγμα μετατόπισης γέφυρας λόγω στατικού φορτίου

Fig. 2.3: Example of bridge displacement under static load

- **Δυναμικές Μετατοπίσεις:** Αναφέρονται στην απόκριση της κατασκευής συνήθως με τη μορφή ταλαντώσεων. Το φάσμα συχνοτήτων ταλάντωσης καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά της κατασκευής (γεωμετρία, υλικά, ηλικία, κ.α.). Το εύρος της μετακίνησης μπορεί να μεταβάλεται ανάλογα με τα επιβαλλόμενα φορτία.



Σχ. 2.4: Παράδειγμα δυναμικής απόκρισης κεραίας
Fig. 2.4: Example of antenna's dynamic response

3. Μέθοδοι Ελέγχου της Δυναμικής Συμπεριφοράς των Κατασκευών

3.1 Μη Τοπογραφικές Μέθοδοι Παρακολούθησης

Ως μέθοδοι πειραματικής μηχανικής αναφέρονται μεθοδολογίες μετρήσεων οι οποίες χρησιμοποιούν όργανα όπως επιταχυνσιόμετρα, οπτικές ίνες, κλισίμετρα, επιμηκυνσιόμετρα κ.α.

3.1.1 Επιταχυνσιόμετρα

Τα επιταχυνσιόμετρα αποτελούν τα πλέον διαδεδομένα όργανα παρακολούθησης της δυναμικής συμπεριφοράς των κατασκευών. Είναι διατάξεις οι οποίες στηρίζονται σε ηλεκτρομηχανικές ιδιότητες για την μέτρηση της επιτάχυνσης σε ένα, δύο ή τρεις άξονες. Βασίζουν την λειτουργία τους στην αρχή της αδράνειας και πιο συγκεκριμένα σε μία δόκιμη μάζα (proof mass) που μετατοπίζεται κατά την εμφάνιση επιτάχυνσης. Η μετατόπιση της μάζας υπολογίζεται από βαθμονομημένους ηλεκτρονικούς αισθητήρες, οι οποίοι την μετατρέπουν σε ψηφιακό σήμα και την παρουσιάζουν σε μονάδες μέτρησης της επιτάχυνσης.

Μία μεγάλη κατηγοριοποίηση των επιταχυνσιόμετρων μπορεί να γίνει βάση του κύκλου λειτουργίας τους, δηλαδή ανοικτού (open loop) ή κλειστού (closed loop) κύκλου λειτουργίας. Στη πρώτη περίπτωση η επιτάχυνση υπολογίζεται μετρώντας την δύναμη που μετατοπίζει την μάζα από την θέση ισορροπίας, ενώ στην δεύτερη, υπολογίζεται η δύναμη που απαιτείται για την διατήρηση της μάζας στην θέση ισορροπίας. Ακόμη κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής τους σε οπτικά, laser, πιεζοηλεκτρικά, μαγνητικά, θερμικά, σερβομηχανικά κ.α.

Τα επιταχυνσιόμετρα χρησιμοποιούνται για μεγάλο χρονικό διάστημα στην παρακολούθηση των κατασκευών παραμένοντας στην κατασκευή για μακρά ή βραχεία περίοδο, ανάλογως την φύση του προβλήματος. Ανάλογα με την περίπτωση προκειμένου να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση τεχνικών έργων, ενδέχεται να χρειάζεται ένας ικανοποιητικός αριθμός, ικανός να μπορεί να συσταθεί δίκτυο στην κατασκευή για την πληρέστερη καταγραφή των επιταχύνσεων. Τα επιταχυνσιόμετρα συνδέονται σε ένα κεντρικό σύστημα για την καταγραφή των δεδομένων.

3.1.2 Οπτικές Ίνες

Οπτική ίνα είναι μια γυάλινη ή πλαστική ίνα που “μεταφέρει το φως” κατά μήκος της. Πρόσφατα γίνεται όλο και πιο διαδεδομένη η χρήση αισθητήρων οπτικών ινών στις κατασκευές για τον έλεγχο διαφόρων παραμέτρων (θερμοκρασία, μηχανική καταπόνηση, δονήσεις, επιταχύνσεις κ.α.). Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στην εκπομπή μιας ακτίνας laser η οποία διατρέχει την οπτική ίνα που είναι τοποθετημένη πάνω στην κατασκευή και καταλήγει σε μία ειδική συσκευή αποκωδικοποίησης του οπτικού σήματος (interrogator). Σε περίπτωση που παρατηρηθεί από τον αισθητήρα της ακτίνας μεταβολή των χαρακτηριστικών της, τότε συνεπάγεται πως υπήρξε κάποιο φαινόμενο επί της κατασκευής. Μετά από τους κατάλληλους υπολογισμούς και μετατροπές προσδιορίζονται τα μεγέθη που δημιούργησαν την μεταβολή.

Τα κυριότερα πλεονέκτηματα των αισθητήρων οπτικών ινών είναι τα εξής:

- Μικρό μέγεθος και αμελητέο βάρος, συνεπώς προσφέρουν την δυνατότητα τοποθέτησης σε δύσκολα σημεία και σε πολύπλοκες διατάξεις
- Η ευελιξία και προσαρμοστικότητα των αισθητήρων επιτρέπει την κάλυψη και των πιο ιδιαίτερων κατασκευών
- Μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας (>50 °C)

- Φιλικοί προς το περιβάλλον καθώς δεν εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, ούτε περιέχουν τοξικά κατάλοιπα
- Μεγάλη ταχύτητα μετρήσεων και επαναληψιμότητα. Δυνατότητα επανάληψης μέτρησης κατά την διάρκεια ενός φαινομένου (σεισμός, ισχυρός άνεμος κλπ). Δεν επηρεάζονται από διαδοχικές μετρήσεις
- Δεν επηρεάζονται από ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες
- Προσφέρουν δυνατότητα πολυπλεξίας. Δηλαδή μέσα από μία οπτική ίνα μπορεί να περάσει πλήθος σημάτων.

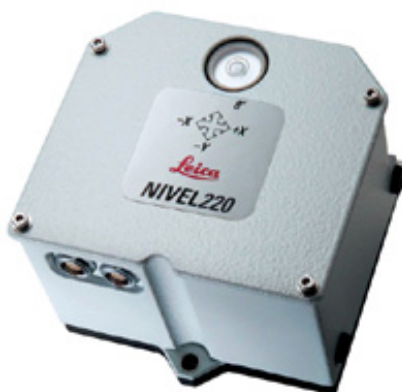


Σχ. 3.1: Τυπική Διάταξη Οπτικής Ίνας επί του Β. Τείχους της Ακροπόλεως

Fig. 3.1: Typical Deployment of Fiber-Optic Sensor attached on North Wall of Acropolis

3.1.3 Ψηφιακά Κλισίμετρα

Τα κλισίμετρα είναι απλές μετρητικές διατάξεις οι οποίες μετρούν με μεγάλη ακρίβεια γωνίες κλίσης. Μπορούν να μετρήσουν τόσο θετικές κλίσεις όσο και αρνητικές. Είναι εφοδιασμένα με πολύ ευαίσθητους αισθητήρες και η ανάλυσή τους προσεγγίζει την τάξη των 0.0001° . Η τελική ακρίβεια που μπορεί να επιτευχθεί είναι της τάξης του 0.01° υπόκειται όμως σε περιορισμούς όπως το εύρος της μετρούμενης γωνίας, το όργανο που χρησιμοποιείται κ.α.



Σχ. 3.2: Ψηφιακό Κλισίμετρο Leica Nivel 220
Fig. 3.2: Digital Inclination Sensor Leica Nivel 220

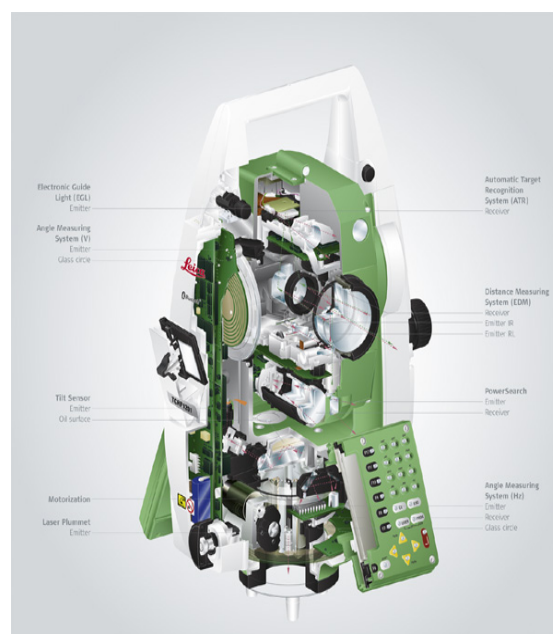
3.2 Τοπογραφικές Μέθοδοι

Ως τοπογραφικές μέθοδοι αναφέρονται οι μεθοδολογίες οι οποίες χρησιμοποιούν αισθητήρες που βασίζονται σε οπτικές μεθόδους ή άλλες.

3.2.1 Γεωδαιτικοί Σταθμοί Αυτόματης Αναγνώρισης Στόχου (Robotic Total Station)

Οι γεωδαιτικοί σταθμοί αυτόματης αναγνώρισης στόχου είναι ολοκληρωμένοι γεωδαιτικοί σταθμοί που έχουν προσαρμοσμένο ένα σύνολο

σερβομηχανισμών και αισθητήρων κάμερας CCD για την παρακολούθηση στόχων. Η χρήση τους στη δυναμική παρακολούθηση των κατασκευών βασίζεται στην δυνατότητα αυτόματης αναγνώρισης, παρακολούθησης και εκτέλεσης μετρήσεων προς κινούμενο στόχο, λειτουργίες που τους επιτρέπουν οι παραπάνω μηχανισμοί. Η αρχή εντοπισμού σημείων στο χώρο με πολικές συντεταγμένες επιτυγχάνεται μέσω μετρήσεων αποστάσεων και γωνιών και τη βοήθεια της ειδικής διάταξης κάμερας CCD. Η διαδικασία εκτελείται επαναλαμβανόμενα με αυτοματοποιημένο τρόπο και μεγάλη συχνότητα καταγραφής (έως 4-7 Hz), χωρίς να δημιουργείται ανάγκη χειροκίνητης σκόπευσης – μέτρησης ή άλλης παρέμβασης του παρατηρητή. Ως στόχος χρησιμοποιείται ένα τοπογραφικό κυκλικό πρίσμα, το οποίο τοποθετείται σε επιλεγμένα σημεία της κατασκευής.



Σχ. 3.3: Ο ρομποτικός γεωδαιτικός σταθμός TPS 1200+

Fig. 3.3: Robotic total station TPS 1200+

Το μετρητικό σύστημα λειτουργεί παθητικά, είναι απλό και εύχρηστο, δεν επιβαρύνει την κατασκευή και δεν απαιτεί ειδική εγκατάσταση πολύπλοκου μόνιμου εξοπλισμού δεδομένου ότι δεν περιλαμβάνει

ηλεκτρομηχανικά μέρη. Βασικός περιορισμός της μεθόδου είναι η απαίτηση ανεμπόδιστης οπτικής επαφής μεταξύ οργάνου και στόχου και μεταξύ τους απόσταση να μην υπερβαίνει τα 500 m. Σημαντικοί παράγοντες υποβάθμισης της ακρίβειας της μεθόδου αποτελούν το μέγεθος της απόστασης οργάνου – στόχου, οι συνθήκες στο μέσο διάδοσης (ατμοσφαιρική διάθλαση), καθώς και τα χαρακτηριστικά του διανύσματος κίνησης του στόχου (διεύθυνση, ταχύτητα) σε σχέση με τη θέση του οργάνου. Εν γένει, το σφάλμα στον προσδιορισμό της θέσης κυμαίνεται από 0.005 m έως 0.01 m.

3.2.2 Συστήματα Παγκόσμιου Δορυφορικού Εντοπισμού (GNSS), GPS

Το σύστημα **NAVSTAR GPS** (NAVigation Satellite Timing And Ranging, **Global Positioning System**) ή όπως είναι ευρέως γνωστό ως **GPS** άρχισε να σχεδιάζεται και να υλοποιείται σταδιακά στη δεκαετία του 1970, με ευθύνη του Υπουργείου Άμυνας των Η.Π.Α. Πρόκειται για ένα, κυρίως στρατιωτικό και έπειτα πολιτικό, παγκόσμιο δορυφορικό σύστημα προσδιορισμού θέσης (συντεταγμένες), χρόνου και ταχύτητας, που καλύπτει όλη την επιφάνεια της γής συμπεριλαμβανομένης της ατμόσφαιράς της, το οποίο είναι διαθέσιμο 24 ώρες το 24ωρο και δεν επηρεάζεται από τις καιρικές συνθήκες. Τον έλεγχο της λειτουργίας του τον έχει το Υπουργείο Άμυνας των Η.Π.Α, το οποίο επιτρέπει την πολιτική χρήση του.

Το όλο σύστημα αποτελείται από τρία βασικά τμήματα:

- **Το δορυφορικό τμήμα:** Αποτελείται σήμερα από 29 δορυφόρους των σειρών BLOCK II, IIA IIR, IIR-M. Κάθε δορυφόρος εκπέμπει ένα εξαιρετικά πολύπλοκο σήμα, δύο υψηλές συχνότητες της τάξης του 1.5 GHz διαμορφωμένες από κώδικες ψευδοτυχαίου θορύβου και ένα μήνυμα δεδομένων. Η περίοδος κάθε δορυφόρου είναι μισή ημέρα, δηλαδή δώδεκα ώρες. Οι δορυφόροι του συστήματος βρίσκονται σε μέσο ύψος περίπου 20000 Km από την επιφάνεια της γής και η διάρκεια ζωής τους είναι περίπου 10 έτη.

- **Το τμήμα ελέγχου:** Αποτελείται από πέντε μόνιμους επίγειους σταθμούς παρακολούθησης (monitor stations) οι οποίοι είναι κατανομημένοι σε όλη την γή, από τρεις σταθμούς τηλεπικοινωνιών (upload stations, Ground Antennas) οι οποίοι στέλνουν τα δεδομένα πλοήγησης στους δορυφόρους και από κεντρικό σταθμό ελέγχου που βρίσκεται στην βάση Falcon στο Colorado Springs και είναι υπεύθυνος για την λειτουργία του συνόλου του συστήματος.
- **Το τμήμα χρηστών:** Αποτελείται από όσους με ειδικά εξοπλισμένους δέκτες λαμβάνουν το σήμα του GPS.



Σχ. 3.4: Ο δορυφορικός σχηματισμός του συστήματος GPS

Fig. 3.4: Schema of GPS satellites

Σε αντιδιαστολή με τις μεθόδους πειραματικής μηχανικής, σύμφωνα με τις οποίες τα χαρακτηριστικά της κίνησης προσδιορίζονται από μετρήσεις μονοδιάστατων (μη χωρικών) μεγεθών, οι γεωδαιτικές μέθοδοι παρέχουν πρωτογενώς τη θέση του αισθητήρα μέτρησης ως προς κάποιο γνωστό σύστημα αναφοράς. Το δορυφορικό σύστημα εντοπισμού GPS βασίζεται σε μετρήσεις της φάσης του φέροντος σήματος, το οποίο λαμβάνουν δύο επίγειοι δέκτες από τους δορυφόρους του συστήματος. Ο ένας δέκτης (σταθμός αναφοράς) τοποθετείται σε σταθερό σημείο εκτός της κατασκευής και ο δεύτερος (κινούμενος) σε σημείο ελέγχου της κατασκευής, χωρίς ωστόσο να απαιτείται οπτική επαφή μεταξύ τους. Με την τεχνική του σχετικού

κινηματικού εντοπισμού, τόσο με εκ των υστέρων ανάλυση των παρατηρήσεων (PPK-GPS), όσο και με τη δυνατότητα επεξεργασίας τους σε πραγματικό χρόνο (RTK-GPS), προσδιορίζεται η θέση του κινούμενου δέκτη ως προς το σταθερό με ακρίβεια της τάξης των μερικών χιλιοστών, ανεξάρτητα από τις συνθήκες του περιβάλλοντος. Βασικοί εγγενείς περιορισμοί του συστήματος που υποβαθμίζουν την ακρίβεια της μεθόδου είτε την καθιστούν ολοκληρωτικά ανεφάρμοστη αποτελεί η απαίτηση «ανοικτού ορίζοντα» (ώστε να εξασφαλίζεται η αδιάλειπτη λήψη του δορυφορικού σήματος από τουλάχιστον τέσσερις κοινούς δορυφόρους), η απουσία ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών, καθώς και συνθήκες που προκαλούν πολλαπλές διαδρομές στο σήμα GPS (multipath). Επίσης, σε εφαρμογές παρακολούθησης μεταλλικών κατασκευών πρέπει να λαμβάνονται υπόψη πρακτικοί περιορισμοί εγκατάστασης των δεκτών/κεραιών και των παρελκόμενων τους, καθώς και ο περιορισμένος αριθμός των υποψήφιων σημείων ελέγχου. Επισημαίνεται ότι, για τις ανάγκες παρακολούθησης των κατασκευών, ορισμένα συστήματα σύγχρονων δεκτών GPS παρέχουν τη δυνατότητα μέτρησης με υψηλή συχνότητα δειγματοληψίας (έως 20 Hz), χαρακτηριστικό που καλύπτει τις συχνότητες απόκρισης των περισσότερων μεταλλικών κατασκευών.

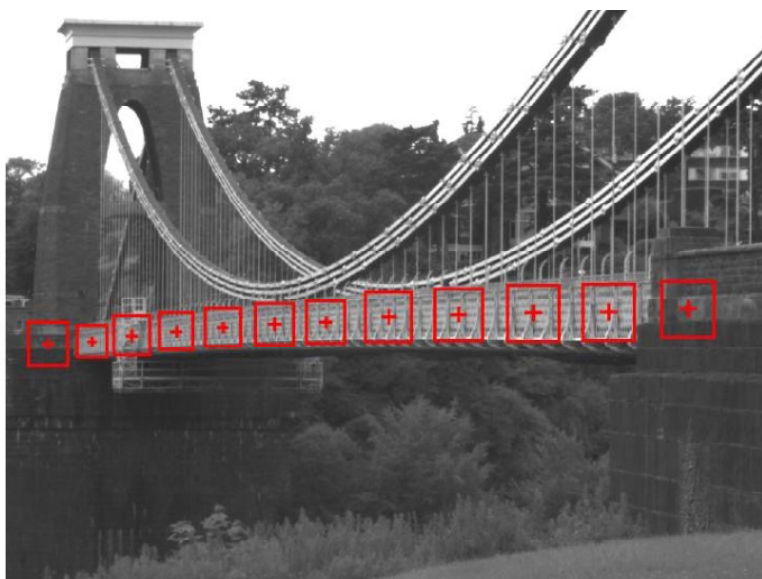


Σχ. 3.5: Δέκτης GPS τοποθετημένος στην Γέφυρα του Μανχάταν

Fig. 3.5: GPS Receiver mounted on Manhattan Bridge

3.2.3 Συστήματα Βιντεομετρίας

Τα συστήματα βιντεομετρίας που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση των κατασκευών, βασίζουν την λειτουργία τους στις αρχές της φωτογραμμετρίας και ανάλυσης εικόνας που αφορά σε μετρήσεις από κοντινές αποστάσεις (close – range photogrammetry). Πρόκειται για μετρικές κάμερες κατάλληλα σχεδιασμένες για τέτοιους σκοπούς οι οποίες κατά την διάρκεια ενός πειράματος παρακολουθούν ένα σύνολο σημείων (συνήθως κοντά στα 100) σε πραγματικό χρόνο και με συχνότητα δειγματοληψίας συνήθως μέχρι 15 Hz. Ακόμη χρησιμοποιούνται ειδικά κατασκευασμένοι στόχοι, για την αποκατάσταση της κλίμακας. Συστήματα αυτής της κατηγορίας παρέχουν ακριβεία μέσω υπολογισμού της θέσης (μετατόπιση που ισοδυναμεί με 1/10 - 1/100 pixel). Ωστόσο, εισάγονται περιορισμοί που αφορούν σε περιβαλλοντικούς παράγοντες.



Σχ. 3.6: Κρεμαστή γέφυρα με τα καθορισμένα σημεία - στόχους

Fig. 3.6: Suspension bridge showing user – targeted points

4. Το Σύστημα Μικροκυμματικής Συμβολομετρίας IBIS-S

4.1 Γενική Περιγραφή του Αισθητήρα

Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις της παρούσας διπλωματικής είναι ο αισθητήρας IBIS-S (Image By Interferometric Survey-S), ο οποίος σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε από Ιταλούς ερευνητές της εταιρείας IDS (Ingegneria Dei Sistemi) σε συνεργασία με το Πολυτεχνείο του Μιλάνου. Η λειτουργία του βασίζεται στην αρχή της μικροκυμματικής συμβολομετρίας, μέθοδος που τα τελευταία χρόνια χαρακτηρίζεται ως καινοτόμος, κατάλληλη για την από απόσταση παρακολούθηση μεγάλων κατασκευών, τόσο στατικά όσο και δυναμικά.

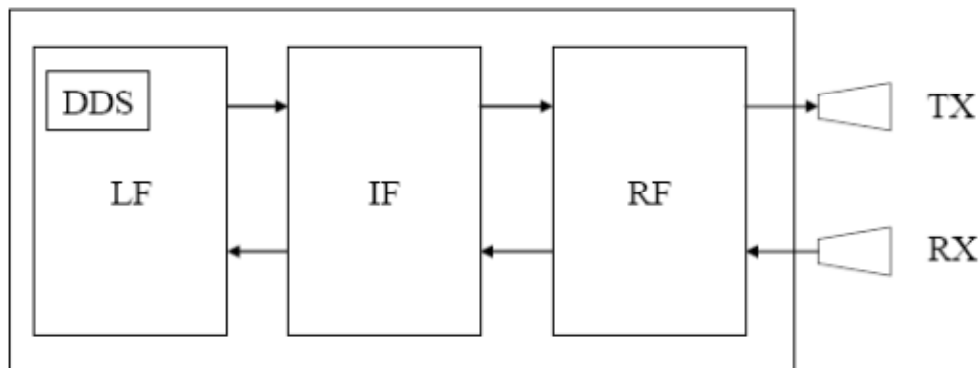


Σχ. 4.1: Ο αισθητήρας IBIS-S

Fig. 4.1: The IBIS-S sensor

Το σύστημα IBIS-S είναι ένα εργοστασιακά κατασκευασμένο μικροκυμματικό ιντερφερόμετρο που αποτελείται από τον αισθητήρα, ένα laptop λειτουργίας του συστήματος και ένα σετ 12 V μπαταρίες. Ο αισθητήρας περιλαμβάνει ακόμη δύο κεραίες, έχει βάρος 12 kg και εγκαθίσταται πάνω σε ένα τρίποδα με περιστρεφόμενη κεφαλή με την δυνατότητα να ευθυγραμμιστεί σε οποιαδήποτε κατεύθυνση.

Ο αισθητήρας είναι ένα συνεκτικό radar (δηλαδή διατηρεί την πληροφορία φάσης του λαμβανόμενου σήματος) το οποίο παράγει, μεταδίδει και λαμβάνει τα ηλεκτρομαγνητικά κύμματα ώστε να προκύψουν οι μετρήσεις των μετατοπίσεων και αποτελείται από τα μέρη χαμηλής συχνότητας (LF), μέσης συχνότητας (IF) και ραδιοσυχνότητας (RF). Η βασική συχνότητα λειτουργίας δημιουργείται μέσα στο τμήμα LF και βασίζεται στην συσκευή Άμεσης Ψηφιακής Σύνθεσης (Direct Digital Synthesis – DDS). Αυτή παράγει ένα γρήγορο σήμα χαμηλής αναπηδούσης συχνότητας που μετατρέπεται σε ημιτονοειδές σήμα με την βοήθεια ενός υψηλής ταχύτητας μετατροπέα χρησιμοποιώντας έναν πίνακα ημιτόνων και ένα ρολόι ακριβείας. Ακόμη στο συγκεκριμένο τμήμα γίνεται η μετατροπή του σήματος βασικής συχνότητας από αναλογική σε ψηφιακή. Στην συνέχεια τα μέρη IF και RF εκτελούν λειτουργίες ενίσχυσης και αλλαγής συχνότητας. Η εκπομπή του σήματος γίνεται από το τμήμα RF με κεντρική συχνότητα τα 16.75 GHz με εύρος ± 300 MHz ώστε να διατηρηθεί η πληροφορία φάσης στο σήμα.



Σχ. 4.2: Σκαρίφημα του Εσωτερικού Τμήματος του Αισθητήρα

Fig. 4.2: Sensor Head Sketch

Σχεδιάστηκε για την μέτρηση από απόσταση μικρομετακινήσεων σε κατασκευές με μέγιστη συχνότητα δειγματοληψίας 200 Hz και με μέγιστη ονομαστική ακρίβεια 1/100 του χιλιοστού (σε εργαστηριακές συνθήκες). Η απόδοση του συστήματος εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του πειράματος και τις συνθήκες περιβάλλοντος. Έτσι για την καλύτερη απόδοση του οργάνου τα χαρακτηριστικά λειτουργίας μπορούν να συνοψισθούν στα κάτωθι:

- Μέγιστη λειτουργική απόσταση: 1000 m
- Μέγιστη ανάλυση πεδίου: 0.75 m
- Ακρίβεια στις μετρημένες μετατοπίσεις στην διεύθυνση παρατήρησης τουλάχιστον 0.1 mm

Ο εξοπλισμός έχει σχεδιαστεί και για υπαίθρια χρήση, (επίπεδο προστασίας IP65), όπως επίσης και ο φορητός υπολογιστής του εξοπλισμού που είναι κατασκευασμένος για λειτουργία σε ακραίες συνθήκες.

Τα πλεονεκτήματα που παρέχει ο αισθητήρας IBIS-S σε σχέση με τα διαθέσιμα συστήματα παρακολούθησης κατασκευών (GPS, επιταχυνσιόμετρα κλπ) είναι:

1. Λήψη μετρήσεων από απόσταση, χωρίς να είναι αναγκαία η μετάβαση στην κατασκευή ή η απαίτηση τοποθέτησης εξοπλισμού επί αυτής.
2. Η ανάλυση των 0.75 m η οποία επιτρέπει στον αισθητήρα να αναγνωρίσει πλήθος «πραγματικά μετακινούμενων αισθητήρων» στην υπό μελέτη περιοχή, απλά με την στόχευση στην περιοχή.
3. Συχνότητα λήψης δεδομένων για το σύνολο της υπό μελέτη περιοχής μέχρι 200Hz.
4. Άμεση μέτρηση των μικρομετακινήσεων σε πραγματικό χρόνο. Το σύστημα IBIS-S έχει την δυνατότητα να επεξεργαστεί τα συλλεγμένα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και να παρουσιάσει τις μετακινήσεις οποιουδήποτε σημείου επιλεγθεί από το πείραμα σε πραγματικό χρόνο και πάλι. Τα χαρακτηριστικά του IBIS-S του επιτρέπουν να χρησιμοποιηθεί σε κατεστραμένες κατασκευές ή κατασκευές με προβλήματα, όπου σε περίπτωση κινδύνου κατάρρευσης, σε πραγματικό χρόνο, να παράγονται σήματα συναγερμού.
5. Ακρίβεια στις μετρημένες μετατοπίσεις τουλάχιστον 0.01 mm. Η συμβολομετρία επιτρέπει στο σύστημα IBIS-S να μετράει μετακινήσεις με μεγάλη ορθότητα και ακρίβεια, η οποία δεν έχει επαναληφθεί στο παρελθόν σε άλλα συστήματα.
6. Γρήγορη εγκατάσταση / απεγκατάσταση του εξοπλισμού.

7. Ο τρόπος λειτουργίας είναι κατάλληλος για μεγάλες περιόδους παρατήρησης:

- Μετράει και ημέρα και νύχτα.
- Μπορεί να λειτουργήσει σε οποιοδήποτε καιρικές συνθήκες.

Ο αισθητήρας IBIS-S είναι κατάλληλος για τις εφαρμογές στις οποίες χρειάζεται να μετρηθούν μικρομετακινήσεις επί μίας κατασκευής χωρίς να υπάρξει μετάβαση επ' αυτής ή όταν πρόκειται να γίνει πολύ γρήγορα μία σύντομη παρατήρηση. Επίσης είναι κατάλληλος όταν η κατασκευή είναι πολύ υψηλή, όπως κεραιές ή πύργοι ή όταν πρόκειται για κατασκευές στις οποίες δεν επιτρέπεται η τοποθέτηση εξοπλισμού, π.χ. μνημεία.

4.3 Αρχές Λειτουργίας

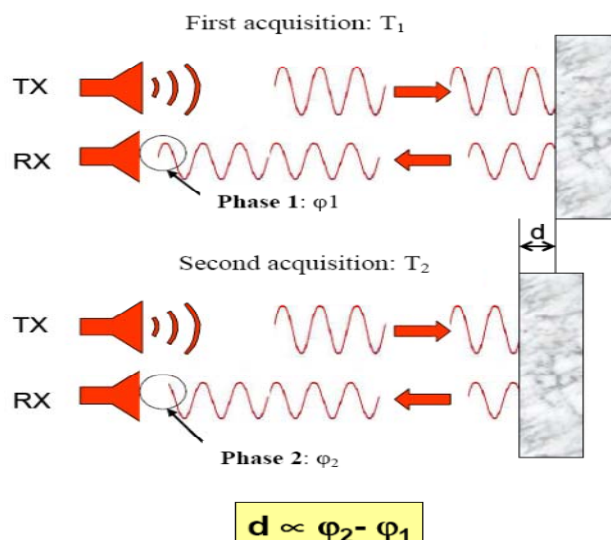
Η λειτουργία του αισθητήρα βασίζεται σε δύο αρκετά διαδεδομένες τεχνικές Radar, που είναι οι εξής:

- Συμβολομετρία
- SF – CW (**S**tepped **F**requency – **C**ontinuous **W**ave)

4.3.1 Η Τεχνική της Συμβολομετρίας

Η συμβολομετρία είναι μια τεχνική radar η οποία μετράει μετατοπίσεις σημείων συγκρίνοντας τις φάσεις των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων τα οποία ανακλώνται από το αντικείμενο σε διαφορετικές χρονικές στιγμές.

Σε γενικές γραμμές, τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που ανακλώνται από ένα αντικείμενο διαφέρουν ως προς την μεταξύ τους φάση όταν υπάρχουν αποκλίσεις στην θέση του αντικειμένου. Η μέτρηση της φάσης γίνεται στην πηγή εκπομπής των κυμάτων. Η σχηματική αναπαράσταση που ακολουθεί (Σχήμα 4.3) διευκρινίζει τις αρχές της συμβολομετρίας.



Σχ. 4.3: Αρχές της συμβολομετρίας
 Fig. 4.3: The interferometric principles

Η μέτρηση των μετατοπίσεων (d) του υπό μελέτη αντικειμένου απορρέει από την μέτρηση της διαφοράς φάσης ($\Delta\varphi$) των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, η οποία μετριέται από τον αισθητήρα σε διαφορετικές χρονικές στιγμές κατά τις οποίες γίνεται η λήψη τους. Η σχέση παρακάτω συνδέει την μετατόπιση ενός αντικειμένου με την διαφορά φάσης ($\Delta\varphi$) και το μήκος κύματος (λ) του σήματος.

$$d = \frac{\lambda}{4 \cdot \pi} \cdot \Delta\varphi \quad (4.1)$$

Οι πρώτες εφαρμογές της συμβολομετρίας έγιναν με την βοήθεια δορυφόρων, προκειμένου να διαπιστωθεί αν υπήρξαν μετακινήσεις μεγάλων περιοχών του πλανήτη μας. Η χωρική ανάλυση τότε ήταν μερικές δεκάδες μέτρα. Η ίδια τεχνική σήμερα χρησιμοποιείται για την παραγωγή ψηφιακών μοντέλων εδάφους (**D**igital **T**errain **M**odel) και για ανίχνευση / χαρτογράφηση τεκτονικών παραμορφώσεων αξιοποιώντας δύο τουλάχιστον εικόνες SAR (**S**ynthetic **A**perture **R**adar Images) οι οποίες περιέχουν σε κάθε pixel εκτός από την ανακλαστικότητα και την φάση. Το σύστημα IBIS-S χρησιμοποιεί την συμβολομετρία για να μετρήσει μετακινήσεις στα στοιχεία των κατασκευών τα

οποία περικλείονται στην ηλεκτρομαγνητική δέσμη που εκπέμπει η κεραία του συστήματος.



Σχ. 4.4: Radar Συνθετικού Ανοίγματος πάνω σε αεροπλάνο

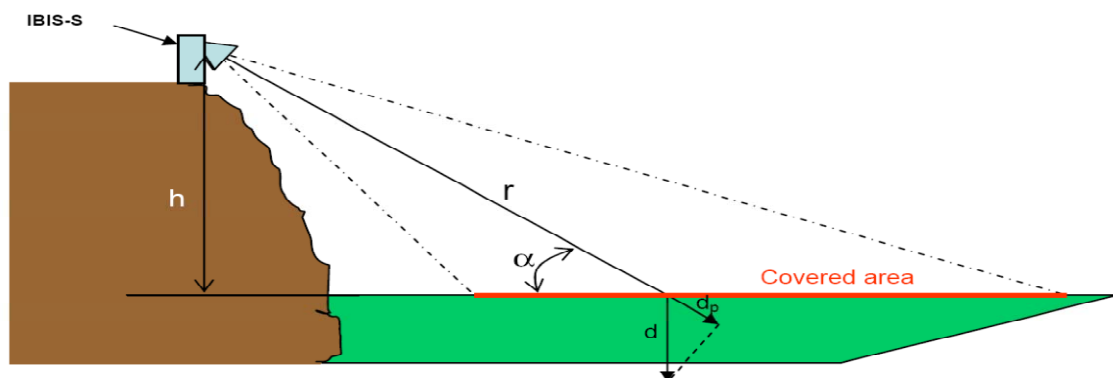
Fig. 4.4: Synthetic Aperture Radar on airplane



Σχ. 4.5: Εικόνα SAR του Λευκού Οίκου, Ουάσιγκτον D.C, Η.Π.Α.

Fig. 4.5: White House SAR Image, Ουάσιγκτον D.C, U.S.A.

Ο αισθητήρας παράγει μία σειρά από ηλεκτρομαγνητικά κύμματα καθ' όλη την διάρκεια των μετρήσεων και σε γενικές γραμμές υπολογίζει την φάση μεταξύ της μίας μετάδοσης και της επόμενης. Είναι σημαντικό να υπογραμμιστεί ότι ο αισθητήρας μπορεί να μετρήσει μετατοπίσεις στην διεύθυνση παρατήρησης (radial direction, d_r), ενώνοντας την ευθεία που ενώνει τον αισθητήρα και το σημείο παρατήρησης, το οποίο κάνει σε όλη την διάρκεια των μετρήσεων, δηλαδή μετράει μόνο την ακτινική μετατόπιση.



Σχ. 4.6: Ακτινική και προβολική μετατόπιση

Fig. 4.6: Radial and projected displacement

Έτσι η πραγματική μετατόπιση (d) που χρειάζεται τις περισσότερες φορές υπολογίζεται αφού γίνουν κάποιες παραδοχές:

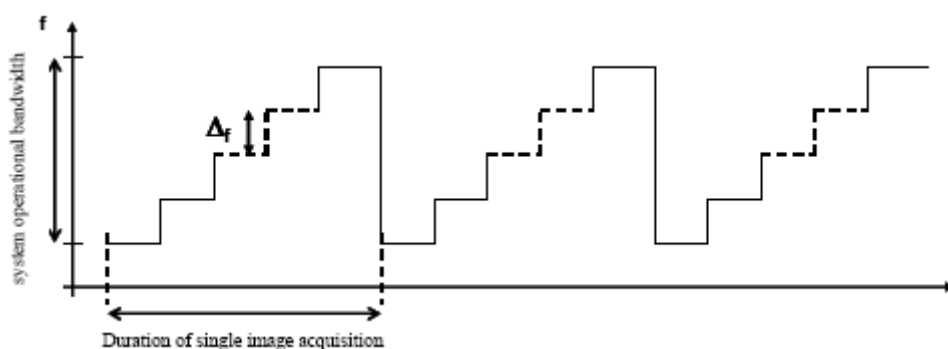
$$dp = d \cdot \sin(\alpha) \quad (4.2)$$

Αν $h = r \cdot \sin(\alpha)$, τότε προκύπτει:

$$d = \frac{r}{h} \cdot dp \quad (4.3)$$

4.3.2 Η Τεχνική SF - CW

Η καρδιά του συστήματος IBIS-S βασίζεται σε έναν ηλεκτρομαγνητικό αισθητήρα ο οποίος λειτουργεί με την τεχνική SF – CW (**S**tepped **F**requency – **C**ontinuous **W**ave). Η μέθοδος αυτή επιτρέπει στο σύστημα να αποκτήσει μία μονοδιάστατη εικόνα του πεδίου στο οποίο είναι προσανατολισμένο με υψηλή ανάλυση της απόστασης (range resolution). Η εικόνα λαμβάνεται από την εκπομπή μέσω των κεραιών του συστήματος μίας σειράς ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μακράς διάρκειας (Continuous Wave) σε διαφορετικές συχνότητες (Stepped Frequency).

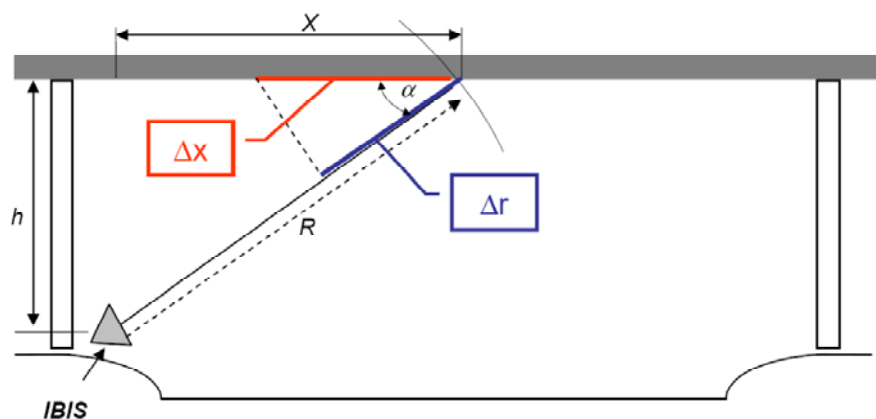


Σχ. 4.7: Διάγραμμα του μεταδιδόμενου σήματος στο χρόνο

Fig. 4.7: Diagram of the signal transmitted over time

Χρησιμοποιώντας αυτή την τεχνική, το σύστημα IBIS-S μπορεί να προσεγγίσει ακρίβεια στην απόσταση έως 0.75 m, ανεξάρτητα από την

μέγιστη απόσταση που μπορεί να μετρήσει. Έτσι ακόμη και αν η απόσταση μεταξύ του αισθητήρα και της κατασκευής αυξάνει, η ακρίβεια λόγω της συγκεκριμένης τεχνικής θα διατηρηθεί στο ίδιο επίπεδο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η ακρίβεια που επιτυγχάνεται στις μετρημένες μετακινήσεις να είναι ανεξάρτητη της αποστασης παρατήρησης στα όρια εμβέλειας του αισθητήρα. Η ανάλυση στην εικόνα του πεδίου (ground range resolution) που λαμβάνει όμως διαφέρει και υπολογίζεται από την Σχέση (4.4) διότι παίζει ρόλο η γωνία παρατήρησης του οργάνου με το σημείο στην κατασκευή το οποίο φαίνεται από το Σχήμα (4.8).



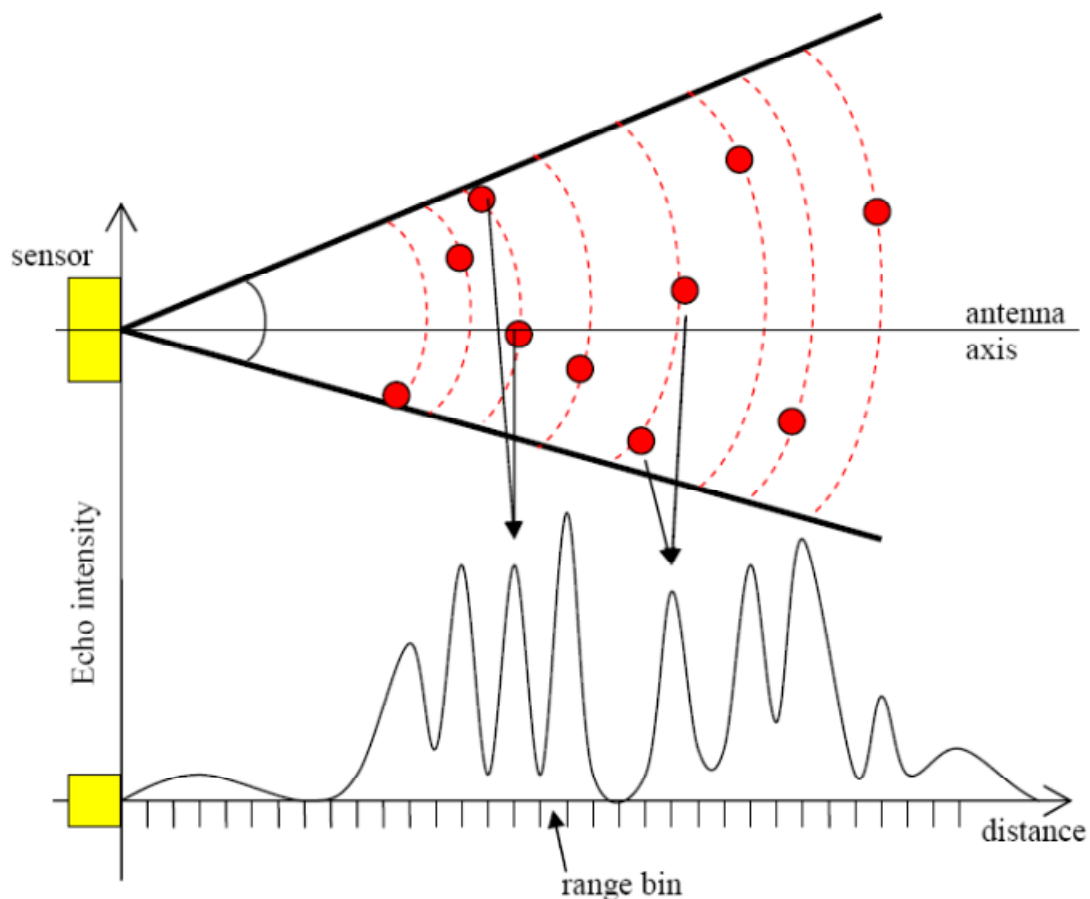
Σχ. 4.8: Ακρίβεια της απόστασης vs ανάλυση στο έδαφος
 Fig. 4.8: Range resolution vs ground range resolution

$$\Delta x = \frac{\Delta r}{\cos(\alpha)} = \frac{\Delta r}{X} \quad (4.4)$$

Όπως παρατηρείται στο Σχήμα (4.9), το μέγεθος ανταπόκρισης του νιοστού (n^{th}) range bin - φατνίου (που παρουσιάζεται στο δεύτερο διάγραμμα), όπως θα ονομάζονται από εδώ και πέρα τα «εικονοστοιχεία» στην μονοδιάστατη εικόνα μεταξύ της απόστασης $n \cdot \Delta r$ και της $(n+1) \cdot \Delta r$, περιλαμβάνει ολόκληρο το τμήμα της σφαίρας της δέσμης που παράγεται από τις κεραιές μεταξύ των παραπάνω αποστάσεων. Έτσι τα αποτελέσματα κάθε φατνίου σχετίζονται με την αντίστοιχη περιοχή. Η πληροφορία που λαμβάνει το σύστημα για κάθε φατνίο περιέχει δύο είδη πληροφορίας:

- Το πλάτος του σήματος που επιστρέφει στον αισθητήρα, το οποίο δείχνει την ανακλαστικότητα του πεδίου για το συγκεκριμένο φατνίο
- Και την φάση του σήματος που επιστρέφει στον αισθητήρα, η οποία αναφέρεται στην απόσταση μεταξύ του αισθητήρα και του συγκεκριμένου φατνίου.

Συνεπώς εάν ένας στόχος με πολύ μεγαλύτερη ανακλαστικότητα από του υπόλοιπους ενός πειράματος απεικονισθεί σε ένα φατνίο, η πληροφορία του φατνίου (πλάτος και φάση) θα αντιστοιχεί σε στόχο με μεγάλη ανακλαστικότητα.



Σχ. 4.9: Η μονοδιάστατη εικόνα στο εύρος λήψης
Fig. 4.9: An in-range profile (one dimensional image)

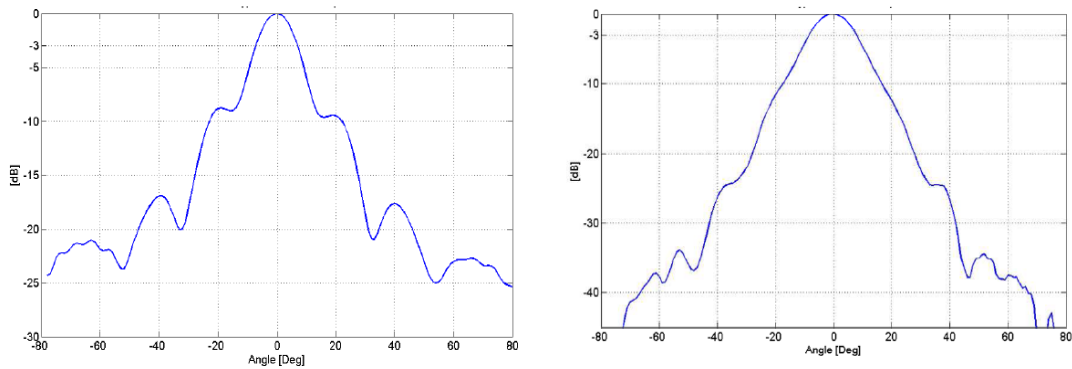
4.4 Κεραίες Αισθητήρα

Για την μετάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ο αισθητήρας χρησιμοποιεί κατευθυντικές κεραίες οι οποίες εκπέμπουν στις ζώνες Ku (12 – 18 GHz) και X (8 – 12 GHz). Το σύστημα συνοδεύεται με ένα ζεύγος κεραιών, τις H 20, ενώ υπάρχουν διαθέσιμα ακόμη τρία ζεύγη τα H 13, H 15 και H 23 τα οποία έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά με το ζεύγος που δίνεται. Χρησιμεύουν σε διατάξεις που η λήψη του σήματος επηρεάζεται από τα τεχνικά χαρακτηριστικά της κατασκευής, από την παρουσία ισχυρού θορύβου ή από οποιοδήποτε άλλη αιτία μπορεί να δημιουργήσει πρόβλημα.

Οι Ku και X bands ανήκουν στο μικροκυμματικό μέρος (microwave range) του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Ο συμβολισμός που χρησιμοποιεί η Ku προέρχεται από τον «K-under», με άλλα λόγια ανήκει στην K band και χρησιμοποιείται κυρίως για δορυφορικές εφαρμογές, σπανιότερα για υπηρεσίες αναμετάδοσης και για ειδικές εφαρμογές μετάδοσης δεδομένων της NASA. Ο συμβολισμός της X band ανεπίσημα υποδηλώνει την Extended AM Broadcast band, όπου το X αναφέρεται στο Extended. Χρησιμοποιείται κυρίως για τηλεπικοινωνιακούς και δορυφορικούς σκοπούς.

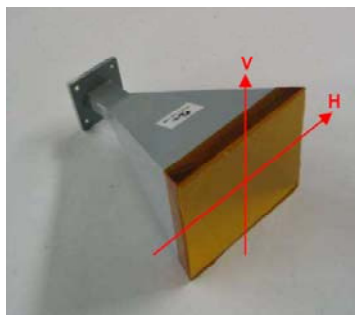
Όσον αφορά το ζεύγος των κεραιών, όπως προείπαμε πρόκειται για κατευθυντικού τύπου κεραίες, δηλαδή διαδίδουν το σήμα προς μία συγκεκριμένη γωνιακή ζώνη και η μία χρησιμοποιείται για την μετάδοση ενώ η άλλη για την λήψη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Οι συγκεκριμένες κεραίες εκπέμπουν σε κάθετη πόλωση (vertical polarization), δηλαδή η διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων γίνεται στο κατακόρυφο επίπεδο και έχουν μέγιστο κέρδος 20dBi (η ισχύς που εκπέμπει είναι 20db = 100mV). Η κάθετη πόλωση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων για την διαδοσή τους από τις κεραίες έπειτα είναι προτιμότερη έναντι της οριζόντιας και της κυκλικής για τις εφαρμογές που θα χρησιμοποιηθεί ο αισθητήρας, διότι με τον τρόπο αυτό αυξάνονται οι ανακλάσεις από τις κάθετες επιφάνειες που υπάρχουν στο πεδίο των μετρήσεων, συνεπώς έτσι βελτιώνεται η ποιότητα των μετρήσεων και μειώνεται ο θόρυβος. Στην συνέχεια δίνονται δύο

διαγράμματα, στα οποία εμφανίζονται τα χαρακτηριστικά του κύριου λοβού των κεραιών για διάφορες γωνίες (Σχήμα 4.10) και έπειτα μία εικόνα όπου φαίνεται πως ορίζονται οι άξονες επί της κεραίας.



Σχ. 4.10: Πρότυπο κατά τον Κατακόρυφο και Οριζόντιο Άξονα

Fig. 4.10: Vertical and Horizontal plane pattern



Σχ. 4.11: Κεραία H 20

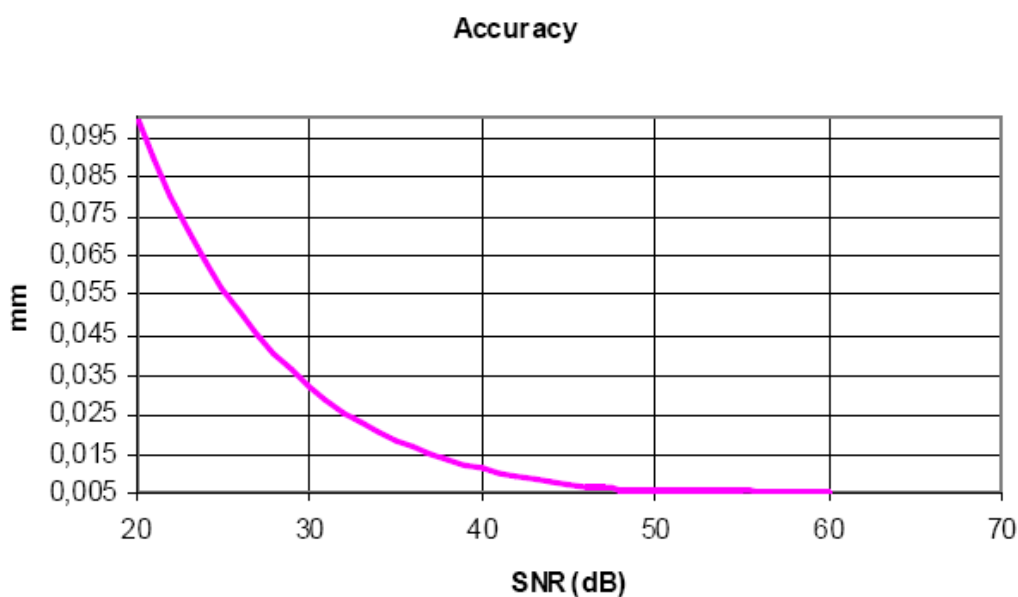
Fig. 4.11: H 20 antenna

Οι κύριες τιμές που προκύπτουν από τα παραπάνω διαγράμματα είναι στην στάθμη των -3dB και στην στάθμη των -10dB . Οι τιμές αυτές είναι χαρακτηριστικές διότι στην στάθμη των -3dB η εντασή του σήματος έχει μειωθεί στο μισό ενώ στην στάθμη των -10dB το σήμα έχει εξασθενήσει σε σημαντικό βαθμό και ο λόγος αυτής της ραγδαίας πτώσης είναι η λογαριθμική κλίμακα (κατακόρυφος άξονας διαγραμμάτων). Έτσι στα -3dB για το μεν πρώτο διάγραμμα η γωνία ισούται με 15° ενώ για το δεύτερο 17° και στα -10dB για το μεν πρώτο διάγραμμα η γωνία ισούται με 34° ενώ για το δεύτερο 45° . Οι γωνίες αυτές δείχνουν ότι κατά την διάρκεια των μετρήσεων ενός

φαινομένου πρέπει, για να ληφθούν αξιόλογες και ακριβείς μετρήσεις, το φαινόμενο να εξελίσσεται μέσα στον κεντρικό λοβό που εκπέμπεται από την κεραία και σε γωνίες στην καλύτερη περίπτωση αυτές που ορίζονται από την στάθμη των -3dB και στην χειρότερη αυτή των -10dB .

4.5 Ακρίβεια των Μετρήσεων

Η τιμή των μετατοπίσεων που μετρώνται με την τεχνική της συμβολομετρίας έχουν ακρίβεια η οποία εξαρτάται από την ένταση των επιστροφών του σήματος radar για το συγκεκριμένο φατνίο. Αλλιώς η ακρίβεια είναι δυνατόν να εκφραστεί ως το λαμβανόμενο σήμα προς τον λαμβανόμενο θόρυβο για το συγκεκριμένο σημείο (SNR). Η θεωρητική ακρίβεια του οργάνου προσεγγίζει $1/100$ του χιλιοστού. Για προφανείς πρακτικούς λόγους, η ακρίβεια αυτή δεν μπορεί να επιτευχθεί κατά την διάρκεια μετρήσεων σε κατασκευές, αλλά σε κάθε περίπτωση, ακρίβεια της τάξης του 0.1 mm μπορεί με ευκολία να επιτευχθεί. Στο Σχήμα 4.12 βλέπουμε την συνάρτηση που δείχνει την ακρίβεια που μπορεί να επιτευχθεί βάσει του SNR που αναλύθηκε παραπάνω.



Σχ. 4.12: Διάγραμμα της ακρίβειας των μετρήσεων συναρτήσει του SNR

Fig. 4.12: Measurement accuracy as a function of SNR

4.6 Μέγιστη Απόσταση Παρατήρησης

Η μέγιστη απόσταση παρατήρησης του αισθητήρα ισούται με 1 Km για την στατική λειτουργία του και 500 m για την δυναμική λειτουργία του.

Θεωρητικά δεν υπάρχουν περιορισμοί στην μέγιστη απόσταση παρατήρησης. Οι περιορισμοί όμως εισέρχονται με την μετάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που είναι ανάλογη με το τετράγωνο της απόστασης που διανύεται. Αυτό συνεπάγεται ότι όσο μεγαλώνει η απόσταση που διανύεται, μειώνεται η ένταση του σήματος που λαμβάνεται. Έτσι από ένα σημείο που μετρούνται μεγέθη με τον αισθητήρα, η μέγιστη απόσταση παρατήρησης εξαρτάται από την ανακλαστικότητα της κατασκευής και από την ακρίβεια που απαιτείται.

Σε περιπτώσεις που η ανακλαστικότητα μίας κατασκευής είναι πολύ μικρή, υπάρχει δυνατότητα να τοποθετηθούν ειδικοί ανακλαστήρες σε σημεία που ενδιαφέρουν, προκειμένου να ενισχύθει η ένταση της επιστροφής του σήματος.

4.7 Ατμοσφαιρική Επίδραση

Δεδομένου ότι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία διαδίδεται στην ατμόσφαιρα, οι μετρήσεις που λαμβάνονται επηρεάζονται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, κυρίως από την θερμοκρασία και την ατμοσφαιρική υγρασία. Οι επιδράσεις αυτές δεν γίνονται αισθητές κατά την διάρκεια δυναμικών παρατηρήσεων διότι:

- Η συχνότητα μεταβολής του ατμοσφαιρικού αέρα είναι κανονικά πολύ μικρότερη από τις συχνότητες ταλάντωσης που απασχολούν
- Οι μέγιστες αποστάσεις παρατήρησης δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλες
- Οι χρόνοι καταγραφής των δεδομένων δεν είναι μεγάλοι.

Οι επιδράσεις της ατμόσφαιρας όμως δεν είναι αμελητέες όταν πρόκειται για στατικά πειράματα τα οποία έχουν μακρά περίοδο παρατήρησης και οι αποστάσεις είναι αρκετά μεγάλες μεταξύ του αισθητήρα και του στόχου (π.χ. σε παρακολούθηση φράγματος, κατολισθίσεων), διότι μπορούν να υπάρξουν ατμοσφαιρικές μεταβολές είτε στον ενδιάμεσο χρόνο είτε στην ενδιάμεση απόσταση. Το αποτέλεσμα της ατμοσφαιρικής επίδρασης είναι να παράγονται μετατοπίσεις σημείων κατά την φώραση του σήματος του radar οι οποίες προέρχονται από τις διαφορές μεταξύ της μίας εικόνας και της επόμενης. Είναι αναγκάιο να διορθώνεται αυτό με την σύγκριση των μετατοπίσεων των σημείων ολόκληρου του πειράματος με χρήση της πραγματικής μετατόπισης μερικών σταθερών σημείων. Μία καλά εφαρμοσμένη τεχνική μπορεί να επιτρέψει ακρίβεια στην διόρθωση των πραγματικών μετατοπίσεων της τάξης των μερικών δεκάτων του χιλιοστού.

5. Η Πεζογέφυρα “Calatrava”

5.1 Γενικά

Η κατασκευή στην οποία πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις για την Διπλωματική Εργασία είναι η Πεζογέφυρα που σχεδιάστηκε από τον Ισπανό αρχιτέκτονα Santiago Calatrava και βρίσκεται στον κόμβο των Λ.Μεσογείων και Λ. Κανελλοπούλου (Κατεχάκη) στην Αθήνα. Έχει κατασκευάσει πάνω από τον σταθμό Κατεχάκη του Αττικού Μετρό με σκοπό την εξυπηρέτηση της διέλευσης των επιβατών και των πεζών μεταξύ των δύο πλευρών του κόμβου. Η κατασκευή της ολοκληρώθηκε το 2004, λίγο πριν την έναρξη των Ολυμπιακών Αγώνων και έχει σχήμα άρπας. Την εποπτεία της κατασκευής την έχει η Αττικό Μετρό Α.Ε. από την οποία χορηγήθηκαν στοιχεία σχετικά με την κατασκευή. Αν και έγινε μεγάλη προσπάθεια να βρεθούν στοιχεία σχετικά με τις τιμές τάνυσης των καλωδίων, θεωρητικές τιμές ταλάντωσης της κατασκευής μελέτες και οτιδήποτε άλλο σχετικό, αυτό δεν κατέστη δυνατόν.



Σχ. 5.1: Νοτιο – Δυτική άποψη της γέφυρας

Fig. 5.1: Bridge view from South – West

5.2 Κατασκευαστικά Στοιχεία

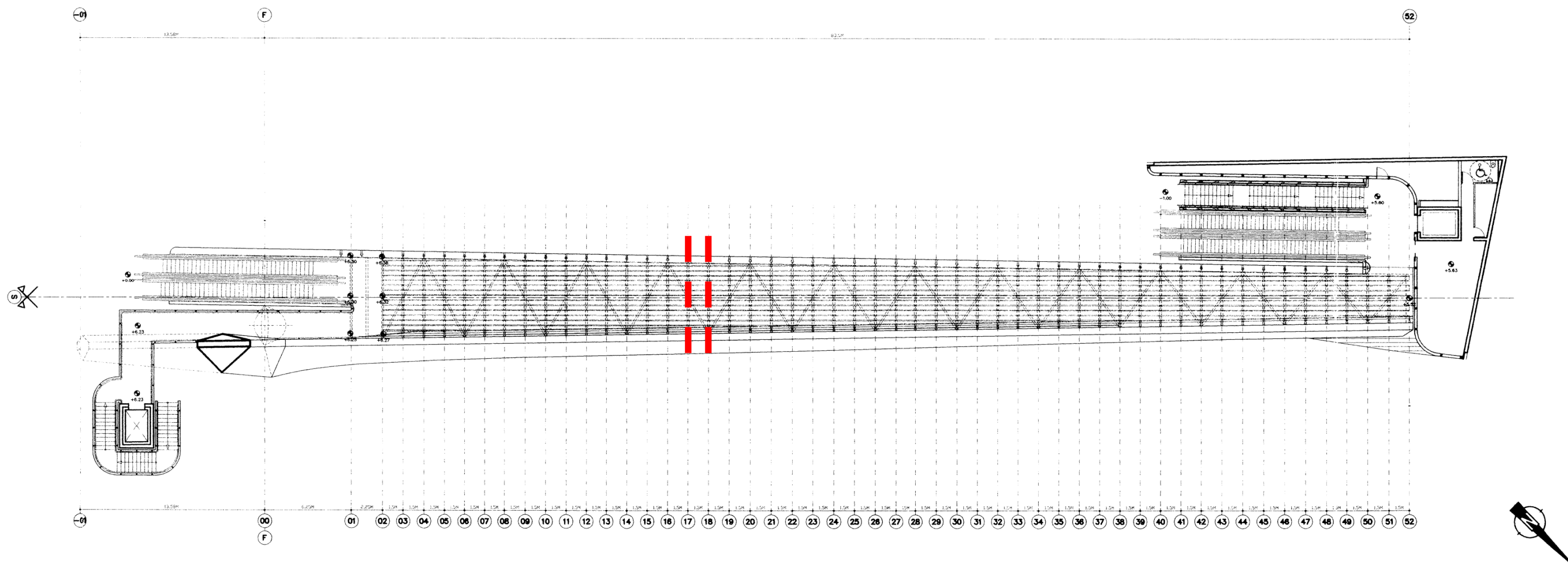
Πρόκειται για καλωδιωτή γέφυρα (Σχήματα 5.3 – 5.4) κατασκευασμένη με μορφή άρπας, δηλαδή τα καλώδια ανάρτησης του καταστρώματος είναι τοποθετημένα σε ίσες αποστάσεις πάνω στον ένα και μοναδικό πυλώνα της κατασκευής και παράλληλα μεταξύ τους. Η γέφυρα στηρίζεται κυρίως σε τρία σημεία τα οποία είναι, ένα βάθρο που βρίσκεται κάτω από τον πυλώνα και σε δύο στηρίξεις στο τέλος της βορειοδυτικής πλευράς της. Η κατασκευή είναι σύμμικτη και έχουν χρησιμοποιηθεί υλικά όπως ο χάλυβας, το σκυρόδεμα, το ξύλο και το αλουμίνιο. Το συνολικό μήκος της γέφυρας είναι 97.08 m, το ύψος 50.70 m, το πλάτος του καταστρώματος κυμαίνεται μεταξύ 4.0 και 6.5 m και το άνοιγμα της είναι 72.25 m.

Το καταστρώμα της αποτελείται από δύο διαμήκεις κιβωτοειδείς δοκούς από φύλλα χάλυβα (συγκολλημένα μεταξύ τους), οι οποίοι συνδέονται εγκάρσια μεταξύ τους ανά 1.5 m με δοκούς διατομής διπλού ταυ μαζί με κάποιες διαγώνιες συνδέσεις. Πάνω σε αυτόν τον μεταλλικό σκελετό έχει κατασκευαστεί το κατάστρωμα της γέφυρας που είναι από ξύλο. Στα σχέδια που παρατίθενται στην συνέχεια (οριζοντιογραφία, όψη και διατομή) φαίνονται επακριβώς τα στοιχεία της κατασκευής.

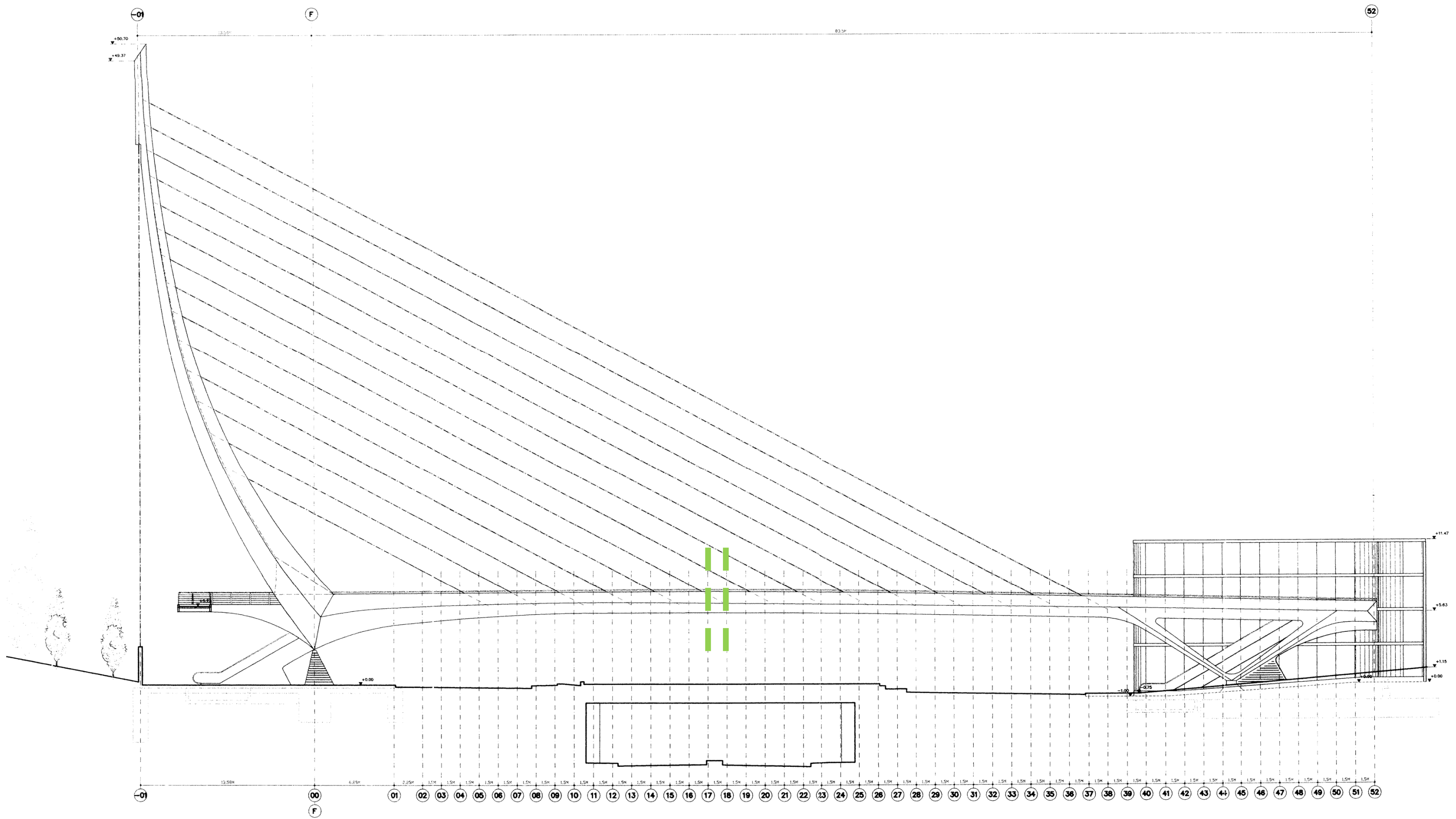


Σχ. 5.2: Βόρειο – Δυτική άποψη της γέφυρας

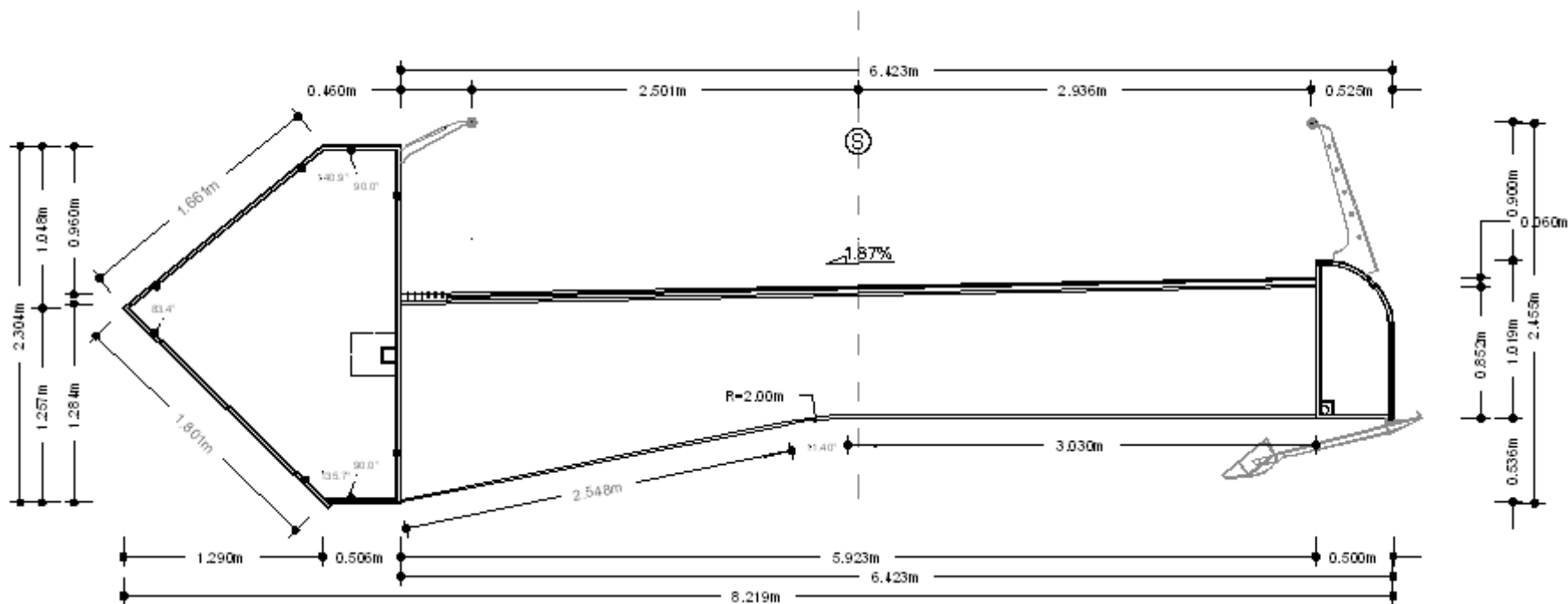
Fig. 5.2: Bridge view from North - West



Σχ. 5.3: Οριζοντιογραφία της γέφυρας (Χωρίς Κλίμακα)
Fig. 5.3: Bridge plan view (No Scale)



Σχ. 5.4: Βόρειο – Ανατολική όψη της γέφυρας (Χωρίς Κλίμακα)
Fig. 5.4: Bridge plan elevation from South – East (No Scale)

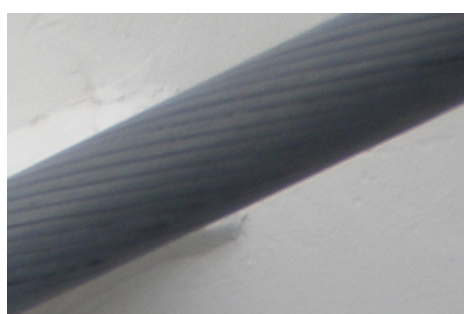
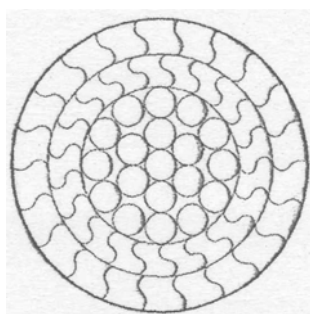


Σχ. 5.5: Διατομή γέφυρας (Χωρίς Κλίμακα)

Fig. 5.5: Bridge cross – section (No Scale)

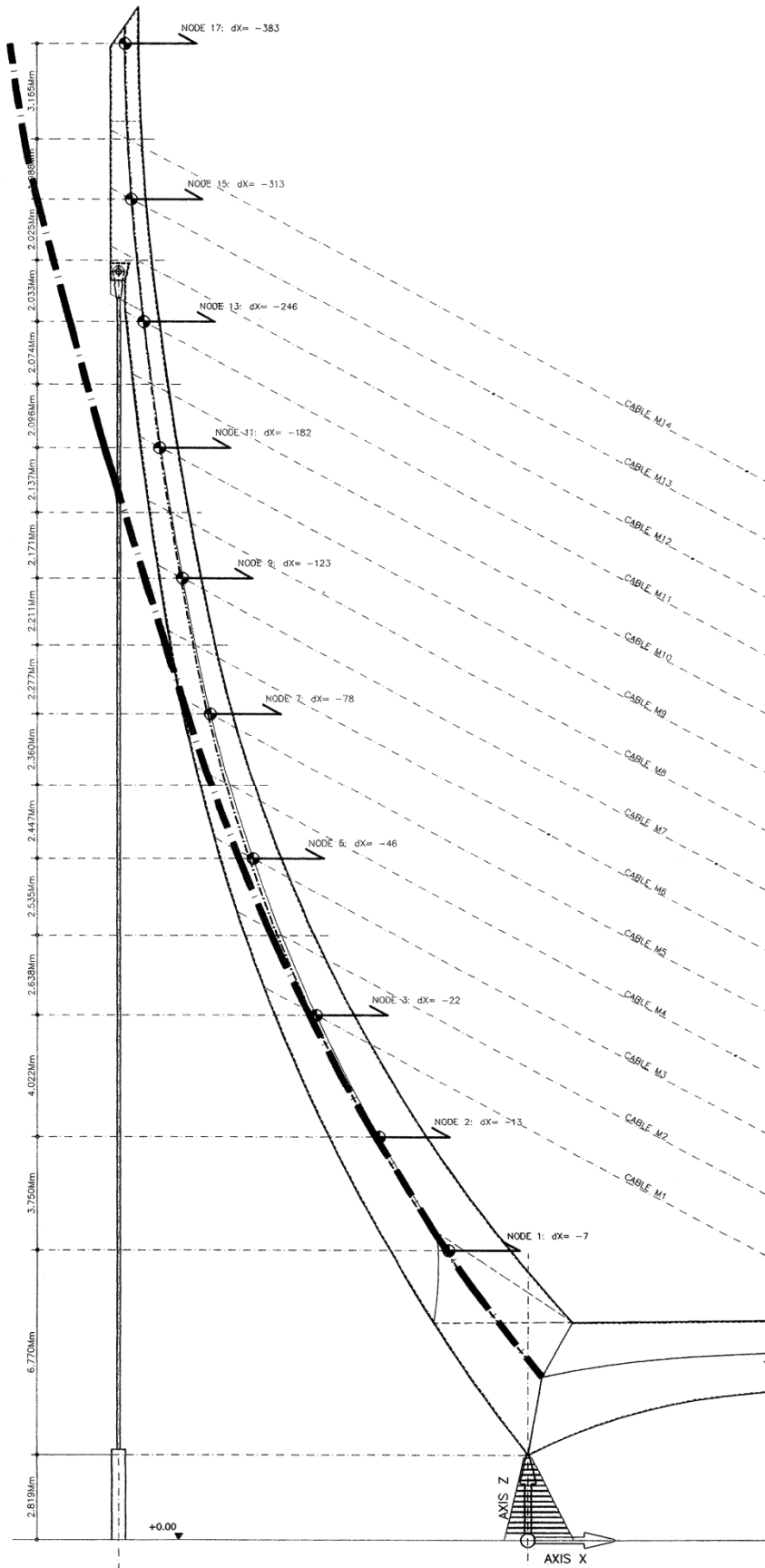
Ο πυλώνας της κατασκευής παρουσιάζει σημαντική καμπυλότητα στο μεγαλύτερο μέρος του προκειμένου να δώσει στην κατασκευή, σε συνδυασμό με το κατάστρωμα, την αισθηση της άρπας όπως αναφέρθηκε στην αρχή του κεφαλαίου. Η κατασκευή του δεν διαφέρει από τις δοκούς του καταστρώματος, δηλαδή πρόκειται για φύλλα χάλυβα συγκολλημένα μεταξύ τους. Από αυτόν ξεκινούν 14 καλώδια από τα οποία αναρτάται το κατάστρωμα της κατασκευής συν δύο ακόμη που ξεκινούν λίγο χαμηλότερα (49.37 m) από την κορυφή του και χρησιμεύουν ως αντίβαρο. Την τελική του μορφή την έλαβε σταδιακά κατά την τάνυση των καλωδίων ανάρτησης όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.7, όπου παρουσιάζεται ο πυλώνας στην αρχική του μορφή με έντονη γραμμή και ο πυλώνας στο τελικό στάδιο μαζί με τις μετατοπίσεις (σε mm) επιλεγμένων σημείων από την πρώτη στην δεύτερη κατάσταση.

Για την πεζογέφυρα χρησιμοποιούνται, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, 14 καλώδια διαμέτρου 41 mm για την ανάρτηση του καταστρώματος και 2 καλώδια διαμέτρου 90 mm ως αντίβαρα τα οποία καταλήγουν με ένα βάρος στην άκρη τους που αιωρείται ελάχιστα πάνω από το έδαφος. Τα καλώδια είναι συρματόσχοινα τύπου "locked coil" (τυλιγμένα με μορφή έλικας) ιδιαίτερα γαλβανιζμένα με θεωρητική τιμή θραύσης $F_{tk} = 1490$ MPa. Τα συρματόσχοινα τύπου locked coil, είναι προκατασκευασμένα και αποτελούνται από έναν πυρήνα χαλύβδινων συρματοσχοιμάτων τοποθετημένων σε ίσια διάταξη ο οποίος προστατεύεται από πολλαπλές στρώσεις χαλύβδινων καλωδίων τοποθετημένων σε ελικοειδή μορφή.



Σχ. 5.6: Τομή καλωδίου ανάρτησης

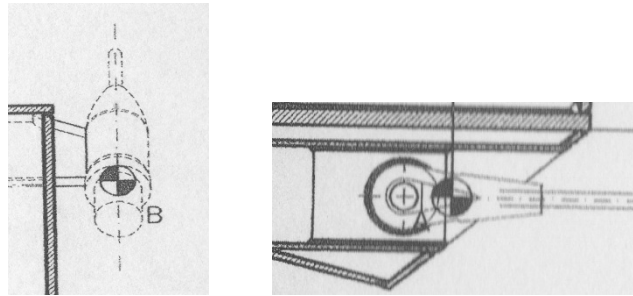
Fig. 5.6: Suspension cable section



Σχ. 5.7: Πυλώνας γέφυρας
Fig. 5.7: Bridge tower

Τα καλώδια έχουν προσαρμοστεί πάνω στην κατασκευή με την μορφή αγκυρώσεων οι οποίες βρίσκονται πάνω στον μεταλλικό σκελετό της.

Το κατάστρωμα της πεζογέφυρας υψώνεται περίπου 6.5 m πάνω από τον δρόμο και έχει μία πολύ ήπια ανωφερική κλίση προς το μέσον του, ξεκινώντας από τα δύο άκρα του. Επίσης σε όλο το μήκος της κατασκευής διατηρείται εγκάρσια κλίση προς την αντίθετη πλευρά του πυλώνα.



Σχ. 5.8: Αγκύρωση καλωδίου σε κατάστρωμα και πυλώνα

Fig. 5.8: Cable's anchorage on deck and pylon

6. Συλλογή Δεδομένων

6.1 Προπαρασκευή Συλλογής Δεδομένων Πεδίου

Για τις μετρήσεις που έγιναν στην κατασκευή χρησιμοποιήθηκε ο αισθητήρας IBIS-S με σκοπό να προσδιοριστούν οι μετατοπίσεις και οι συχνότητες ταλάντωσης στα φέροντα στοιχεία της που καταπονούνται δυναμικά, όπως είναι τα καλώδια ανάρτησης και το κατάστρωμα.

Προκειμένου να προγραμματιστούν οι μετρήσεις στο πεδίο αλλά και για να είναι γενικότερα γνωστή η γεωμετρία της κατασκευής κρίθηκε αναγκαία η εύρεση στοιχείων, μελετών και οτιδήποτε άλλο σχετικό με την κατασκευή. Αυτά ζητήθηκαν από την Αττικό Μετρό Α.Ε όπου ανήκει η πεζογέφυρα και την ΜΕΤΚΑ Α.Ε. η οποία υλοποίησε την κατασκευή. Τα μόνα στοιχεία που βρέθηκαν ήταν τα σχέδια που παρατίθενται στην παρούσα διπλωματική και κάποια ακόμη από τα οποία έχουν εξαχθεί χρήσιμα συμπεράσματα. Δεν κατέστη δυνατό να βρεθούν στοιχεία σχετικά με το ειδικό βάρος των καλωδίων ανάρτησης (αυτό που χρησιμοποιείται στη συνέχεια είναι από παρόμοια καλώδια της ίδιας εταιρείας, που είναι η Bridon, παλαιότερης κατασκευής όμως) και τις θεωρητικές τιμές τάνυσης τους. Ακόμη δεν βρέθηκε κάποια μελέτη που να περιέχει τις θεωρητικές τιμές των κύριων συχνοτήτων ταλάντωσης των φέροντων στοιχείων.

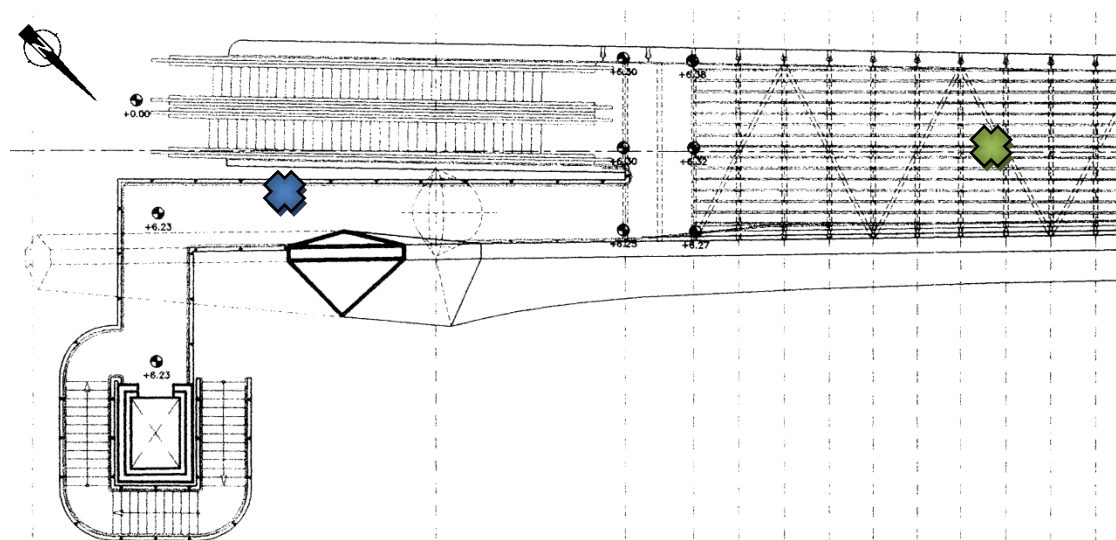
Αυτά τα στοιχεία θα ήταν χρήσιμα προκειμένου να γίνουν συγκρίσεις μεταξύ των θεωρητικών τιμών και των αποτελεσμάτων ώστε να αξιολογηθούν οι μετρήσεις και η κατάσταση της κατασκευής.

6.2 Συλλογή Δεδομένων Πεδίου

Οι μετρήσεις έγιναν το μεσημέρι της 3^{ης} Ιουνίου του 2011. Τα στοιχεία για τις καιρικές συνθήκες που επικρατούσαν στην περιοχή ελήφθησαν από την ιστοσελίδα www.meteo.gr και πιο συγκεκριμένα από τις μετρήσεις του

μετεωρολογικού σταθμού των Αμπελοκήπων του Εθνικού Αστεροσκοπίου Αθηνών ο οποίος βρίσκεται σε απόσταση 2.0 Km από την πεζογέφυρα και σε υψόμετρο 136 m. Οι καιρικές συνθήκες την συγκεκριμένη μέρα είχαν ως εξής:

- Μέγιστη θερμοκρασία: 29.2 °C
- Μικρότερη θερμοκρασία: 20.8 °C
- Μέση θερμοκρασία: 24.6 °C
- Επικρατούσα διεύθυνση ανέμου: Νότια
- Μέση τιμή ταχύτητας ανέμου: 2.4 Km/hr
- Μέγιστη τιμή ταχύτητας ανέμου: 20.9 Km/hr



Σχ. 6.1: Θέσεις παρατηρήσεων

Fig. 6.1: Observation positions

Για την συλλογή των δεδομένων πραγματοποιήθηκαν δύο πειράματα. Στο πρώτο πείραμα ο αισθητήρας τοποθετήθηκε πάνω στο κατάστρωμα της γέφυρας, στο κομμάτι που βρίσκεται προς την πλευρά του σταθμού του Μετρό, το οποίο είναι σταθερό διότι βρίσκεται πάνω από την έδραση του πυλώνα με στόχο να ληφθούν δεδομένα για την συμπεριφορά των καλωδίων ανάρτησης.

Στό δεύτερο πείραμα ο αισθητήρας τοποθετήθηκε κάτω από την πεζογέφυρα προκειμένου να έχει ορατότητα προς το μέσον του «ανοίγματος»

της πεζογέφυρας ώστε οι μετρήσεις μας να αναφέρονται στο σημείο αυτό. Και οι δύο θέσεις φαίνονται στο Σχέδιο 6.1 το οποίο συνοδεύεται από τις παρακάτω φωτογραφίες προκειμένου να γίνει κατανοητός ο τρόπος συλλογής των δεδομένων.



Σχ. 6.2: Φωτογραφίες από τις θέσεις παρατήρησης
Fig. 6.2: Images of observation positions

Η θέση που παρουσιάζεται με το μπλέ σύμβολο στο Σχήμα 6.1, αποτελεί την θέση απ' όπου ελήφθησαν οι μετρήσεις για την ανάλυση των καλωδίων και σ' αυτήν αντιστοιχεί η αριστερή από τις παραπάνω φωτογραφίες. Επιλέχθηκε αυτή η θέση επειδή από εκεί ο αισθητήρας έχει καλύτερη ορατότητα προς τα καλώδια χωρίς να υπάρχει κάποιο εμπόδιο στο οπτικό του πεδίο. Για παράδειγμα εάν ο αισθητήρας τοποθετούταν δίπλα στον πυλώνα, στην βόρεια πλευρά της κατασκευής, τότε στο οπτικό πεδίο θα υπήρχε και το κατάστρωμα γεγονός που σε ένα βαθμό θα επηρέαζε τις μετρήσεις. Ακόμη λόγω του ότι η θέση που επιλέχθηκε βρίσκεται πάνω από την θεμελίωση του πυλώνα, της προσφέρει σταθερότητα χωρίς τυχόν μικρομετακινήσεις της κατασκευής να επηρεάσουν τις μετρήσεις.

Η θέση που φαίνεται στο ίδιο σχέδιο με το πράσινο σύμβολο, αντιστοιχεί στην θέση όπου έγιναν οι παρατηρήσεις κυρίως για την συμπεριφορά στο μέσο του καταστρώματος. Ο αισθητήρας τοποθετήθηκε εκεί προκειμένου να αποφευχθεί ο θόρυβος που θα υπεισερχόνταν στις μετρήσεις λόγω της κυκλοφορίας των οχημάτων εάν βρισκόταν στην άλλη πλευρά του πεζοδρομίου. Επιπροσθέτως, επειδή η κατασκευή βρίσκεται σε μικρό ύψος πάνω από τον δρόμο (περίπου 6 m), εάν ο αισθητήρας απομακρυνόταν πολύ από το υπό μελέτη σημείο, η ακρίβεια των μετρήσεων θα μειωνόταν. Αυτό διότι ένα απομακρυσμένο σημείο παρατήρησης θα χειροτέρευε τη γεωμετρία παρατήρησης σε συνδυασμό με το χαμηλό ύψος της κατασκευής, με αποτέλεσμα ο αισθητήρας να «παρατηρεί» το ζητούμενο σημείο με μεγάλη κλίση. Έτσι καθώς το ζητούμενο μέγεθος είναι κατακόρυφη κίνηση του καταστρώματος, η μεγάλη κλίση παρατήρησης δεν ήταν σκόπιμη.

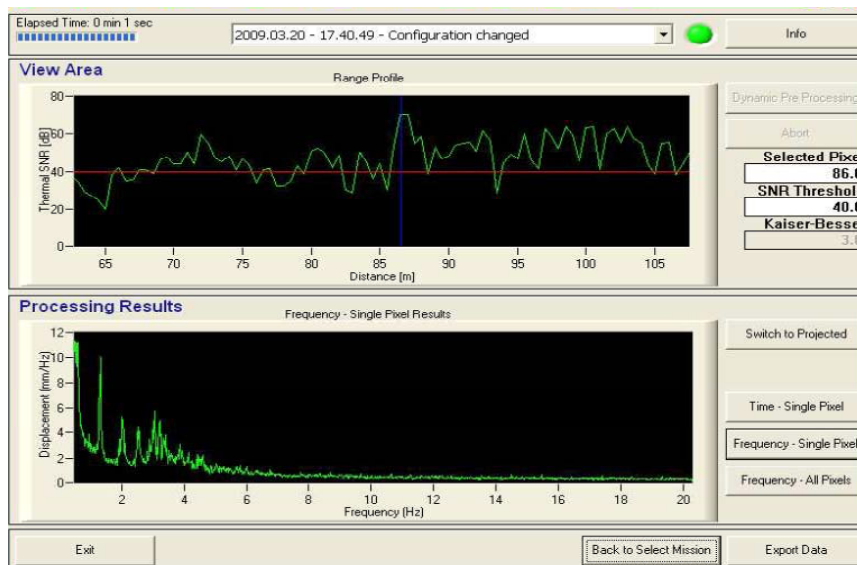
6.3 Διαδικασία Συλλογής Δεδομένων

Προκειμένου να καταστεί δυνατή η λήψη μετρήσεων με το συγκεκριμένο όργανο έγιναν οι εξής ενέργειες:

- Τοποθέτηση του αισθητήρα πάνω στον τρίποδα
- Εγκατάσταση των κεραιών του συστήματος και καλωδίωση της τροφοδοσίας (από δύο 12V μπαταρίες) μαζί με το καλώδιο επικοινωνίας με τον φορητό υπολογιστή
- Έλεγχος λειτουργίας του αισθητήρα από τον φορητό υπολογιστή μέσω του λογισμικού που τον συνοδεύει
- Προετοιμασία λογισμικού, αρχείων και παραμέτρων που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά της κατασκευής προκειμένου να ξεκινήσει η καταγραφή δεδομένων
- Δοκιμές της θέσης παρατήρησης του αισθητήρα σε σχέση με την κατασκευή ώστε οι αιχμές που παρουσιάζονται στο πάνω μέρος της Εικόνας 6.3 να είναι σταθερές και να μην μετατοπίζονται. Τότε ο

αισθητήρας έχει καλές «επιστροφές» σήματος και οι μετρήσεις μας θα είναι αξιόπιστες

- Τέλος χωρίς να μετακινηθεί ο αισθητήρας, καταγραφή των μετρήσεων για εύλογο χρονικό διάστημα.



Σχ. 6.3: Λογισμικό λήψης δεδομένων

Fig. 6.3: Data acquisition software

6.4 Ιδιαιτερότητες

Οι ιδιαιτερότητες των μετρήσεων που παρουσιάστηκαν περιορίστηκαν μόνο στην σειρά των μετρήσεων που αφορούσαν το κατάστρωμα. Στις μετρήσεις αυτές όταν τοποθετήθηκε ο αισθητήρας κανονικά, δηλαδή οι δύο κεραίες να βρίσκονται οριζόντια (όπως φαίνεται στην αριστερή εικόνα στο Σχήμα 6.2), οι «επιστροφές» που αναφέρθηκαν στο λογισμικό δεν ήταν καλές. Για να επιλυθεί το πρόβλημα αυτό έγιναν δοκιμές από άλλες θέσεις παρατήρησης χωρίς αποτέλεσμα όμως και αυτό διότι το πρόβλημα δεν ήταν οι θέσεις παρατήρησης αλλά ο τρόπος λειτουργίας του συστήματος.

Ο αισθητήρας είναι ρυθμισμένος, όταν είναι στην «κανονική» θέση, να πολώνει το σήμα (τα ηλεκτρομαγνητικά κύμματα) μέσω των κεραιών του

κάθετα. Η κάθετη πόλωση σε σχέση με την οριζόντια και την κυκλική έχει το πλεονέκτημα να είναι πιο αποτελεσματική, όσον αφορά τις ανακλάσεις του σήματος, σε κάθετες επιφάνειες (π.χ. κτήρια). Στο συγκεκριμένο πείραμα όμως η οριζόντια πόλωση είναι καταλληλότερη, διότι σε αντίθεση με την κάθετη έχει το πλεονέκτημα, όσον αφορά τις ανακλάσεις και πάλι, να είναι πιο αποτελεσματική στις οριζόντιες επιφάνειες.

Έτσι στρέφοντας τον αισθητήρα κάθετα (όπως παρουσιάζεται στην δεξιά εικόνα στο Σχήμα 6.2), αυτός πλέον λειτουργούσε σε συνθήκες οριζόντιας πόλωσης και με τις εγκάρσιες δοκούς του καταστρώματος να βρίσκονται οριζόντια ως προς το έδαφος, οι «επιστροφές» βελτιώθηκαν. Το πρόβλημα συνεπώς λύθηκε δημιουργώντας με έμμεσο τρόπο συνθήκες οριζόντιας πόλωσης.

6.5 Προβλήματα στο Πεδίο

Τα προβλήματα που προέκυψαν στο πεδίο μπορούν να συνοψισθούν ως εξής:

- Στην δεύτερη θέση παρατήρησης (μέσον καταστρώματος) υπάρχει ιδιαίτερα αυξημένος θόρυβος στις μετρήσεις που βρίσκονται στις ακραίες θέσεις των διαγραμμάτων SNR, λόγω παρεμβολών που δημιουργούσαν τα οχήματα, τα δέντρα και οι ιστοί φωτισμού που υπήρχαν στο πεδίο παρατήρησης
- Αδυναμία υλοποίησης δύο επιπλέον πειραμάτων, ένα για τα καλώδια ανάρτησης ως προς την εγκάρσια μετατόπιση τους και ένα για τον πυλώνα λόγω των παραπάνω προβλημάτων. Οι μετρήσεις δεν ήταν αξιόπιστες λόγω του υπεισερχόμενου θορύβου.
- Δοκιμές αρκετών θέσεων για την τοποθέτηση του αισθητήρα προκειμένου να ξεπεραστούν τα παραπάνω.

7. Λογισμικό / Μεθοδολογία Επεξεργασίας Μετρήσεων

Σε αυτό το κεφάλαιο δίδεται μία συνοπτική περιγραφή της μεθοδολογίας και του λογισμικού επεξεργασίας των δεδομένων πεδίου. Η ανάλυση των μετρήσεων γίνεται σε δυο στάδια:

- Κατα τη διάρκεια συλλογής των μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο
- Την εκ των υστέρων επεξεργασία στο γραφείο.

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται δυο πακέτα λογισμικού τα βασικά χαρακτηριστικά των οποίων έχουν ως εξής.

7.1 Λογισμικό Προ-Επεξεργασίας των Μετρήσεων (IDS – S Controller Software)

Το υπόψη λογισμικό χρησιμοποιείται κατα τη διάρκεια συλλογής των μετρήσεων προκειμένου να εξασφαλιστεί η διαχείριση και η συλλογή των δεδομένων πεδίου με επάρκεια και ποιότητα. Το λογισμικό, είναι συνταγμένο στη γλώσσα προγραμματισμού MATLAB και ενεργοποιείται παράλληλα με την εγκατάσταση του συστήματος παρατήρησης. Τα βασικά βήματα υλοποίησης της διαδικασίας έχουν ως εξής:

7.1.1 Ενεργοποιώντας το Λογισμικό

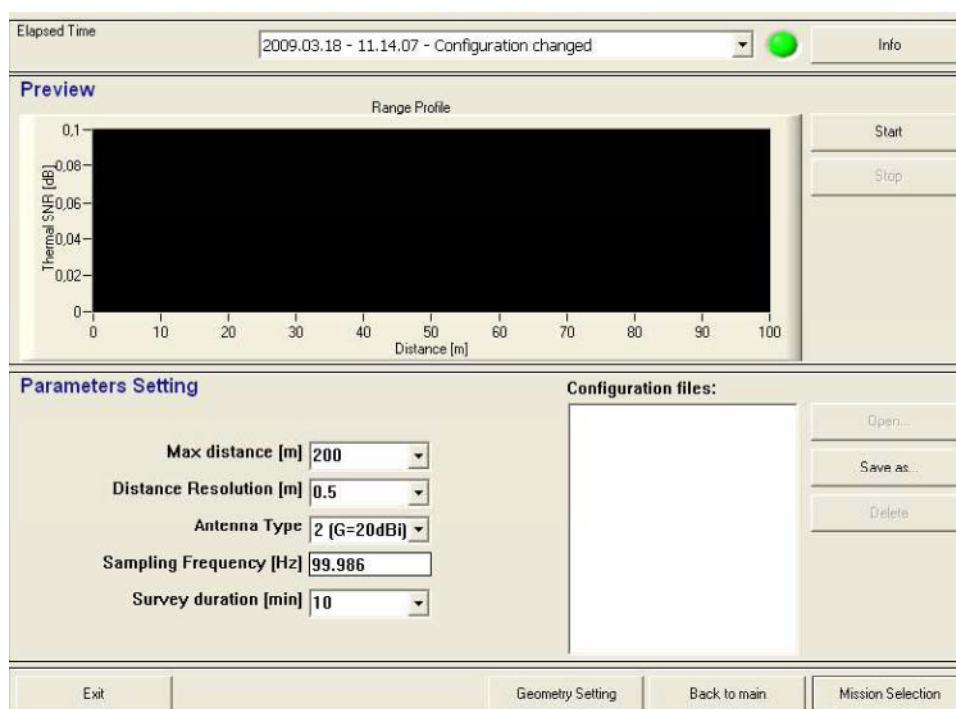
Με την ενεργοποίηση του λογισμικού γίνεται ο έλεγχος λειτουργίας του συστήματος σε πρώτη φάση. Έπειτα γίνεται επιλογή της μεθόδου λήψης των δεδομένων όπως επίσης και ο τρόπος λειτουργίας του συστήματος. Το αρχικό παράθυρο που εμφανίζεται με την ενεργοποίηση του λογισμικού είναι χωρισμένο σε διάφορα κομμάτια τα οποία περιλαμβάνουν:

- Μπάρα Κατάστασης (Status Bar): Στο επάνω μέρος του παραθύρου υπάρχουν στοιχεία σχετικά με το σύστημα και τα δεδομένα των μετρήσεων
- Παράθυρο Ελέγχων: Στο μεσαίο τμήμα του παραθύρου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα κάποιων ελέγχων που γίνονται στο σύστημα με την ενεργοποίησή του προκειμένου να εξασφαλιστεί η ορθή λειτουργία του συστήματος κατά την διάρκεια των μετρήσεων
- Κουμπιά Εντολών: Βρίσκονται στο κάτω μέρος του παραθύρου και δίνουν τη δυνατότητα στον χρήστη να αλλάξει τις παραμέτρους του πειράματος (δυναμική – στατική λειτουργία), της λειτουργίας του συστήματος και να κλείσει το λογισμικό.
 - i. Στατική Λειτουργία (Static Survey): Για εκτέλεση μετρήσεων οι οποίες εντάσσονται στο διάστημα [2, 1800] s με βήμα 1 s.
 - ii. Δυναμική Λειτουργία (Dynamic Survey): Για εκτέλεση μετρήσεων των οποίων η συχνότητα λήψης να βρίσκεται στο διάστημα 1 Hz – 200 Hz με μέγιστη απόσταση παρατήρησης τα 150 m και 1 Hz – 24 Hz με μέγιστη απόσταση παρατήρησης τα 1000 m.
 - iii. Πλαίσιο Λειτουργίας (Working Modality): Σχετίζεται με τον αριθμό των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται σε ένα πείραμα και τον τρόπο αποθήκευσης των δεδομένων προκειμένου να συσχετιστούν σε ένα οι μετρήσεις από διαφορετικούς αισθητήρες σε ένα ενιαίο αρχείο. Το λογισμικό δίνει τρεις δυνατότητες λειτουργίας Stand-Alone, Slave και Master. Στο πείραμα ο αισθητήρας λειτούργησε στην Stand-Alone.

7.1.2 Εισαγωγή Παραμέτρων Πειράματος

Μετά την επιλογή της μεθόδου λήψης δεδομένων πρέπει να εισαχθούν οι τιμές των παραμέτρων του πειράματος που σχετίζονται σε πρώτη φάση με την μέγιστη απόσταση παρατήρησης, την ανάλυση της «εικόνας» του πεδίου (Distance Resolution), τον τύπο των κεραιών που χρησιμοποιούνται, την

συχνότητα δειγματοληψίας και τον χρόνο παρατήρησης. Έπειτα περαιτέρω στοιχεία χρειάζονται για την γεωμετρία του πειράματος που αναφέρονται στο μήκος και την γωνία κλίσης με το έδαφος της κατασκευής, την θέση του αισθητήρα στο τοπικό σύστημα αναφοράς (μπορούν να εισαχθούν και τιμές από GPS βασιζόμενες στο WGS84) και την κατακόρυφη γωνία παρατήρησης. Τέλος ορίζεται η διαδρομή, ο φάκελος και το όνομα που θα αποθηκευτούν οι μετρήσεις.



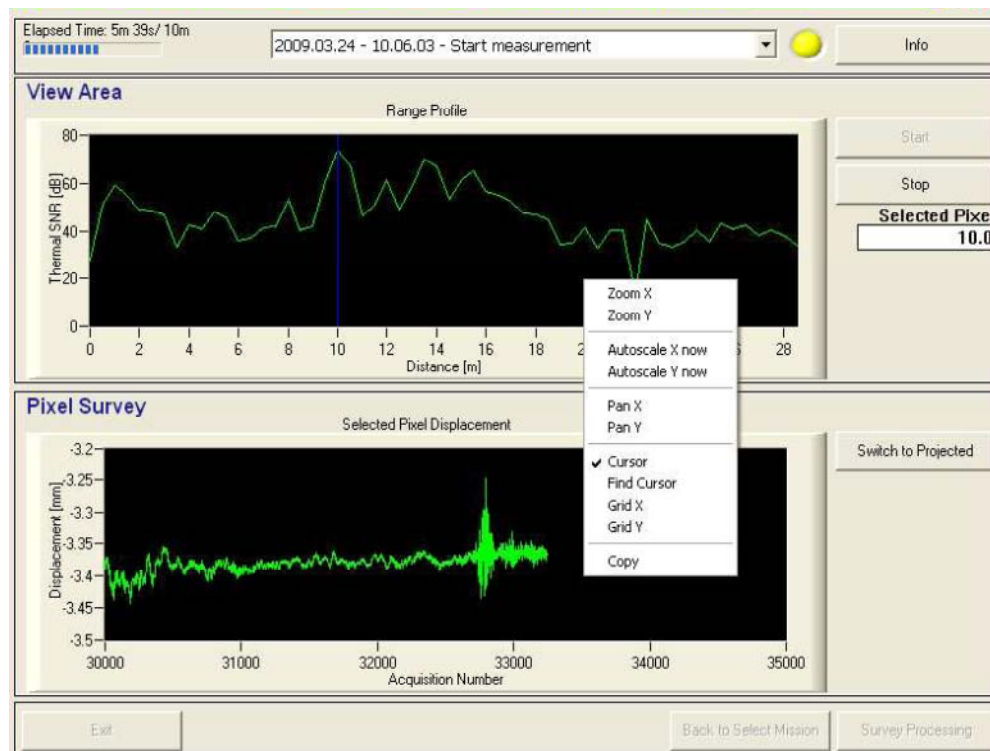
Σχ. 7.1: Παραμέτροι Γεωμετρίας

Fig. 7.1: Geometry Settings

7.1.3 Καταγραφή Δεδομένων

Στην συνέχεια ξεκινά η διαδικασία των μετρήσεων κατά την οποία για το χρονικό διάστημα που έχει οριστεί, το σύστημα πραγματοποιεί συνεχώς μετρήσεις οι οποίες υπάρχει δυνατότητα να διαχειριστούν ταυτόχρονα με την πραγματοποιησή τους, μέσω του λογισμικού. Στην Εικόνα 7.2 παρουσιάζεται το γραφικό περιβάλλον του λογισμικού όπου στο επάνω μισό κομμάτι του παραθύρου παρουσιάζεται το διάγραμμα SNR μέσω του οποίου μπορεί να γίνει

επιλογή μεμονομένης θέσης της κατασκευής για απ' ευθείας παρατήρηση των μετρήσεων που παρουσιάζεται στο κάτω μισό του παραθύρου χρησιμοποιώντας ένα διάγραμμα μετατόπισης συναρτήσει του χρόνου.



Σχ. 7.2: Παράθυρο Διαχείρισης Μετρήσεων
 Fig. 7.2: Measurement's Manage Window

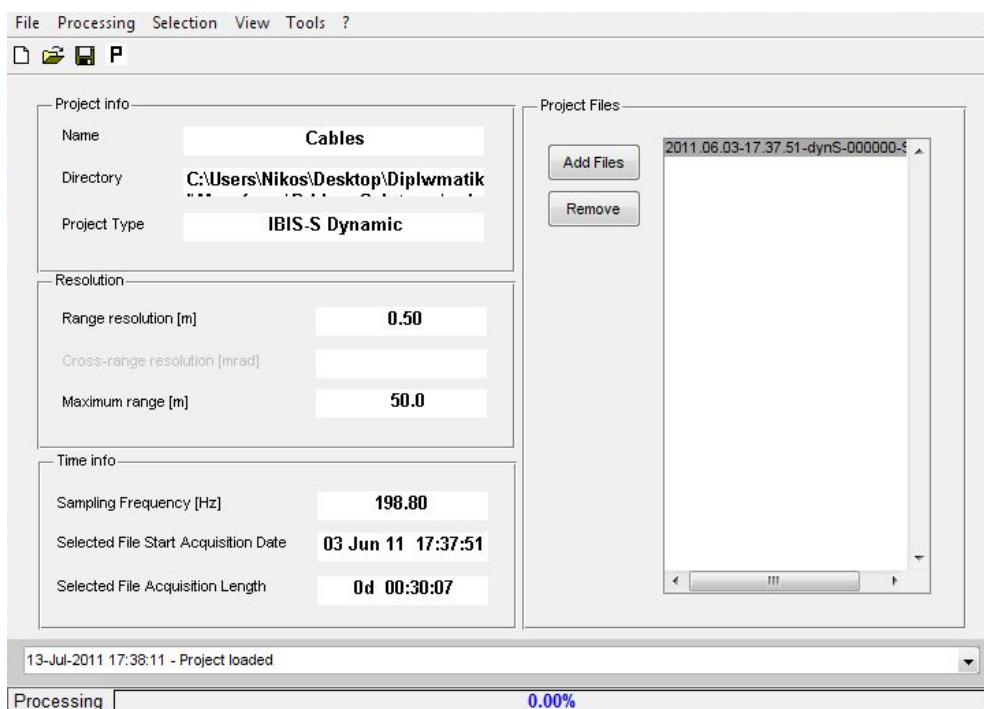
Αφού ολοκληρωθούν οι μετρήσεις, μέσω του λογισμικού μπορεί να γίνει μία προεπεξεργασία των μετρήσεων εφαρμόζοντας κάποια φίλτρα πάνω τους ώστε να υπάρξει μία αδρομερή εικόνα των αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα μπορούν να εξαχθούν συγκεντρωτικά σε ένα αρχείο.

7.2 Λογισμικό Επεξεργασίας των Μετρήσεων

Το υπόψη λογισμικό χρησιμοποιείται για την εκ των υστέρων επεξεργασία των μετρήσεων και αποσκοπεί στον υπολογισμό τελικών αποτελεσμάτων της επεξεργασίας. Το λογισμικό είναι δομημένο στη γλώσσα προγραμματισμού MATLAB . Τα βασικά μέρη του λογισμικού έχουν ως εξής:

7.2.1 Δημιουργία Φακέλου Μελέτης / Έργου

Με το πέρας των μετρήσεων, στην θέση που είχε οριστεί να γίνει η αποθήκευση των στοιχείων, έχει δημιουργηθεί ένα αρχείο με κατάληξη *.gbd το οποίο περιέχει όλη την πληροφορία που συλλέχθηκε στο πεδίο. Το συγκεκριμένο αρχείο αποτελεί την μόνη είσοδο δεδομένων στο λογισμικό επεξεργασίας των μετρήσεων του οποίου το αρχικό παράθυρο διαλόγου παρουσιάζεται στην Εικόνα 7.3 και περιλαμβάνει κάποια συγκεντρωτικά στοιχεία σχετικά με τις μετρήσεις.



Σχ. 7.3: Αρχική σελίδα λογισμικού IBISDV

Fig. 7.3: Software IBISDV first page

Στο σημείο αυτό καθορίζεται τον φάκελο που θα αποθηκευθούν τα στοιχεία ανάλυσης των μετρήσεων, δημιουργείται το έργο στο λογισμικό και ορίζεται η ονοματολογία του αρχείου. Επίσης επιλέγουμε τον τύπο ανάλυσης που θα χρησιμοποιηθεί μεταξύ της δυναμικής και της στατικής ανάλυσης.

7.2.2 Παράμετροι Επεξεργασίας

Στην συνέχεια, πριν το λογισμικό να προχωρήσει στην επεξεργασία των μετρήσεων μπορούμε να αλλάξουμε κάποιες παραμέτρους οι οποίες έχουν κάποια αρχική τιμή ή καθορίζονται μέσω του αρχείου *.gbd (π.χ. γεωμετρία της κατασκευής και θέση του αισθητήρα ως προς αυτή). Οι εν λόγω παράμετροι που καθορίζουν και μπορούν να επηρεάσουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων είναι:

- Ανάλυση Δεδομένων: Με έναν συντελεστή ο οποίος λαμβάνει τιμές από μια κλίμακα μεταξύ του 1 και του 8, μας επιπέται να καθορίσουμε την παρεμβολή μεταξύ των δεδομένων που ελήφθησαν προκειμένου να πυκνώσει τα δεδομένα που αποθηκεύονται στην εικόνα από 0.50 m εως 0.06 m.
- Φίλτρο Επεξεργασίας Μετρήσεων: Μπορούμε να επιλέξουμε μεταξύ τριών επιλογών συναρτήσεων παραθύρου (Ορθογωνικό, Hanning και Kaiser) προκειμένου να υπάρξει «παραθύρωση» των δεδομένων, διαδικασία που θα επεξηγηθεί στην συνέχεια.
- Γεωμετρία Παρατήρησης: Αν και η γεωμετρία του πειράματος καθορίζεται πριν ξεκινήσει η διαδικασία των μετρήσεων στο πεδίο και εισάγεται μαζί με τις μετρήσεις στο λογισμικό, υπάρχει η δυνατότητα να τροποποιηθεί για οποιοδήποτε λόγο μπορεί αυτό να απαιτηθεί.
- «Παράθυρο» Κινούμενου Μέσου Όρου: Στις ρυθμίσεις αυτές περιλαμβάνονται, ρύθμιση της ανάλυσης και της επικάλυψης (overlapping) των παραθύρων όπου παρουσιάζονται τα δεδομένα και καθορισμός της συχνότητας δειγματοληψίας αυτών.
- Τύπος Κεραίας: Η τελευταία επιλογή σχετίζεται με τον τύπο της κεραίας που χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να καθοριστεί το πρότυπο σχήμα του κύριου λοβού της και τον καθορισμό της γωνίας του radar ως προς το οριζόντιο επίπεδο που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις (radar tilt).

Τα φίλτρα επεξεργασίας των μετρήσεων που αναφέρθηκαν παραπάνω είναι μαθηματικές συναρτήσεις που ομαλοποιούν το φάσμα των συχνοτήτων.

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

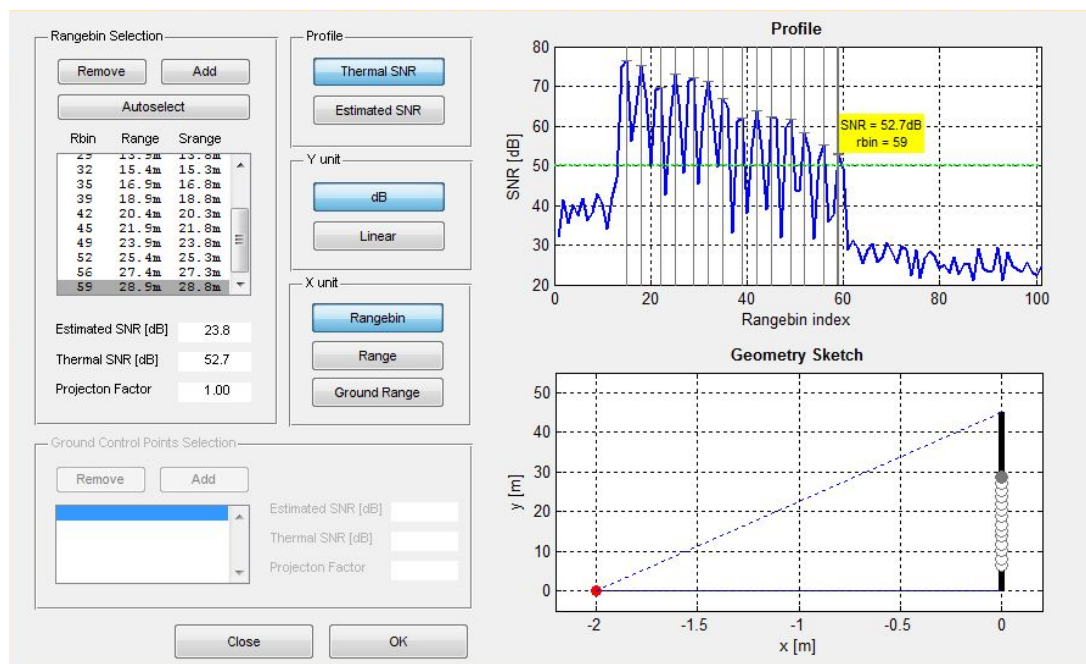
Ένας τρόπος για τη μειωθεί ο θορυβος το σήμα πολλαπλασιάζεται με κάποια συνάρτηση γνωστή ως window. Πρόκειται για μια συνάρτηση χρόνου που τείνει στο μηδέν στα άκρα του διαστήματος που ορίζουν τα δεδομένα αλλά είναι ίση με τη μονάδα στο κέντρο του. Υπάρχουν διάφορα παράθυρα (windows): ορθογωνικό παράθυρο (rectangular window), Hanning window, Blackman window κτλ. με τα οποία επιτυγχάνεται η «ομαλοποίηση» του σήματος. Για σήματα που παρουσιάζουν σχεδόν ημιτονική μεταβολή καταλληλότερο θεωρείται το παράθυρο Hanning.

Σε διάφορες άλλες εφαρμογές π.χ. στη συμβολομετρία (interferometry) έχουν προταθεί εναλλακτικές τεχνικές για την αντιμετώπιση του θορύβου του φάσματος. Γενικότερα για την επεξεργασία σημάτων, η μείωση του θορύβου επιτυγχάνεται με τη χρήση φίλτρων που αφαιρούν από το σήμα τις πολύ χαμηλές ή τις πολύ υψηλές συχνότητες ή ακόμη και συχνότητες εντός συγκεκριμένου εύρους τιμών.

7.2.3 Επεξεργασία Δεδομένων

Εφ' όσον γίνει ο μετασχηματισμός των δεδομένων σύμφωνα με τα παραπάνω στοιχεία τότε μπορεί να γίνει η επιλογή των rangebin, δηλαδή να επιλέχθούν από ένα διάγραμμα εύρους παρατήρησης συναρτήσει του SNR τα

στοιχεία εκείνα που ενδιαφέρουν, κυρίως λόγω της θέσης τους στην κατασκευή. Τα range bin περιέχουν την πληροφορία για την κίνηση του στοιχείου στον χρόνο και από αυτή την πληροφορία γίνεται η μετάβαση στην φασματική ανάλυση.



Σχ. 7.4: Παράθυρο επιλογής rangebin

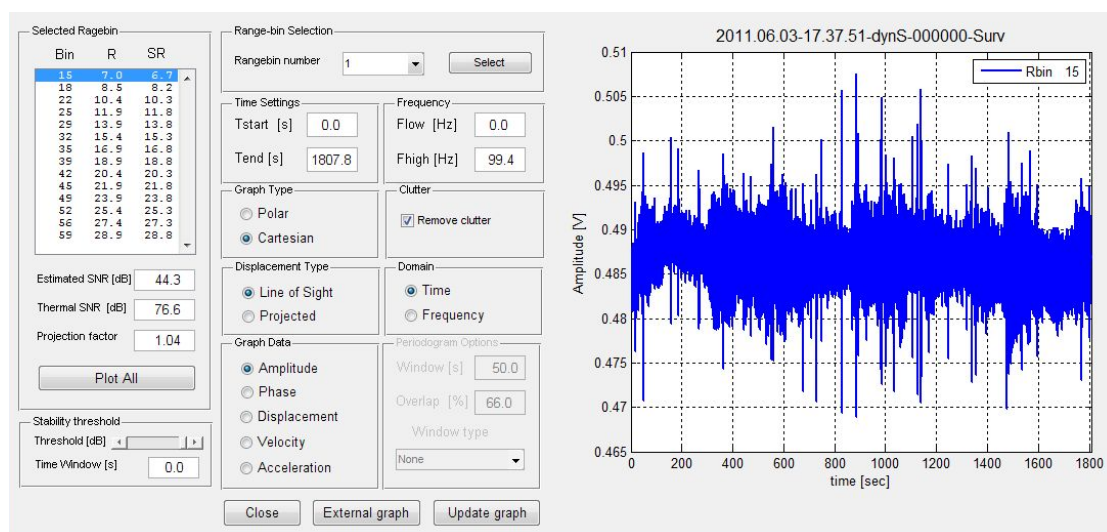
Fig. 7.4: Rangebin selection window

Οι επιτρεπόμενες επιλογές που έχουμε σε αυτό το σημείο από το λογισμικό συνοψίζονται στις εξής:

- **Range bin:** Αφορά την διαχείριση των range bin η οποία σχετίζεται με την χειροκίνητη επιλογή, την αυτόματη επιλογή πάνω από ένα προκαθορισμένο επίπεδο SNR, την διαγραφή τους και τέλος την παρουσίασή τους (αύξων αριθμός range bin, απόσταση από τον αισθητήρα, θέση επί της κατασκευής).
- **Διάγραμμα:** Για την παρουσίαση του SNR παρέχονται δύο τύποι SNR, το Thermal SNR και το Estimated SNR. Το μεν πρώτο υπολογίζεται ως ο λόγος της ισχύος του σήματος προς την διασπορά του θορύβου ενώ το δε δεύτερο υπολογίζεται από την εκτίμηση του λόγου της ισχύος του σήματος και της διασποράς του θορύβου.

- Κλίμακα γ: Οι τιμές του SNR μπορούν να απεικονισθούν είτε σε γραμμική είτε σε λογαριθμική κλίμακα.
- Κλίμακα x: Στην συγκεκριμένη κλίμακα απεικονίζεται το εύρος παρατήρησης με το '0' του διαγράμματος να ταυτίζεται είτε με την θέση του αισθητήρα είτε με την αρχή της κατασκευής. Η μονάδα μέτρησης μπορεί να είναι σε μέτρα ή ο αριθμός των range bin.
- Σκαρίφημα Γεωμετρίας: Παρουσιάζει την βασική γεωμετρία του πειράματος σύμφωνα με τα στοιχεία που έχουν εισαχθεί στο σύστημα. Σε αυτό απεικονίζονται οι θέσεις των επιλεγμένων range bin.

Το επόμενο βήμα μετά την επιλογή των φατνίων είναι η επεξεργασία των δεδομένων για καθένα από αυτά και η εξαγωγή και παρουσίαση αποτελεσμάτων. Τα παραπάνω υλοποιούνται μέσω του γραφικού περιβάλλοντος που παρουσιάζεται στην Εικόνα 7.5.



Σχ. 7.5: Παράθυρο Rangebin Dynamic Analysis

Fig. 7.5: Rangebin Dynamic Analysis window

Πριν γίνει η παρουσίαση των αποτελεσμάτων, οι μετρήσεις ίσως χρειάζονται κάποιες διορθώσεις - μετατροπές. Οι διορθώσεις – μετατροπές των μετρήσεων αναφέρονται σε αφαίρεση του clutter, στην επιλογή του «είδους» των μετατοπίσεων (αναφέρονται στην διεύθυνση παρατήρησης ή

στην προβολή) και τέλος στην ανάλυση στο πεδίο του χρόνου ή των συχνοτήτων.

Ο παράγοντας clutter αναφέρεται σε σήματα παρεμβολών που προέρχονται από διάφορα αντικείμενα στο περιβάλλον που βρίσκεται το radar και επηρεάζουν τις μετρούμενες φάσεις των σημάτων. Με την αφαίρεση του αποκαθίσταται η πληροφορία των φάσεων των μετρημένων στοιχείων.

Η ανάλυση στο πεδίο του χρόνου έχει ως αποτέλεσμα διαγράμματα μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης κ.α. συναρτήσεως του χρόνου τα οποία είναι πολύ χρήσιμα για την περιγραφή ενός φαινομένου όμως η ανάλυση στο πεδίο των συχνοτήτων αποτελεί ένα μέσο για την άντληση πληροφοριών από δεδομένα που χαρακτηρίζουν ένα φαινόμενο, για το οποίο η ανάλυση στο πεδίο του χρόνου δεν επαρκεί για να το περιγράψει πλήρως. Κάθε σήμα μπορεί να διασπαστεί σε συνιστώσες κάθε μία από τις οποίες χαρακτηρίζεται από κάποια συχνότητα. Η ανάλυση που πραγματοποιείται για το σκοπό αυτό λέγεται φασματική. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν μια σειρά από μεθόδους φασματικής ανάλυσης οι κυριότερες από τις οποίες είναι οι μετασχηματισμοί Fourier και το Κανονικοποιημένο Περιοδόγραμμα Lomb, για την περίπτωση που τα δεδομένα είναι μη ισαπέχοντα.

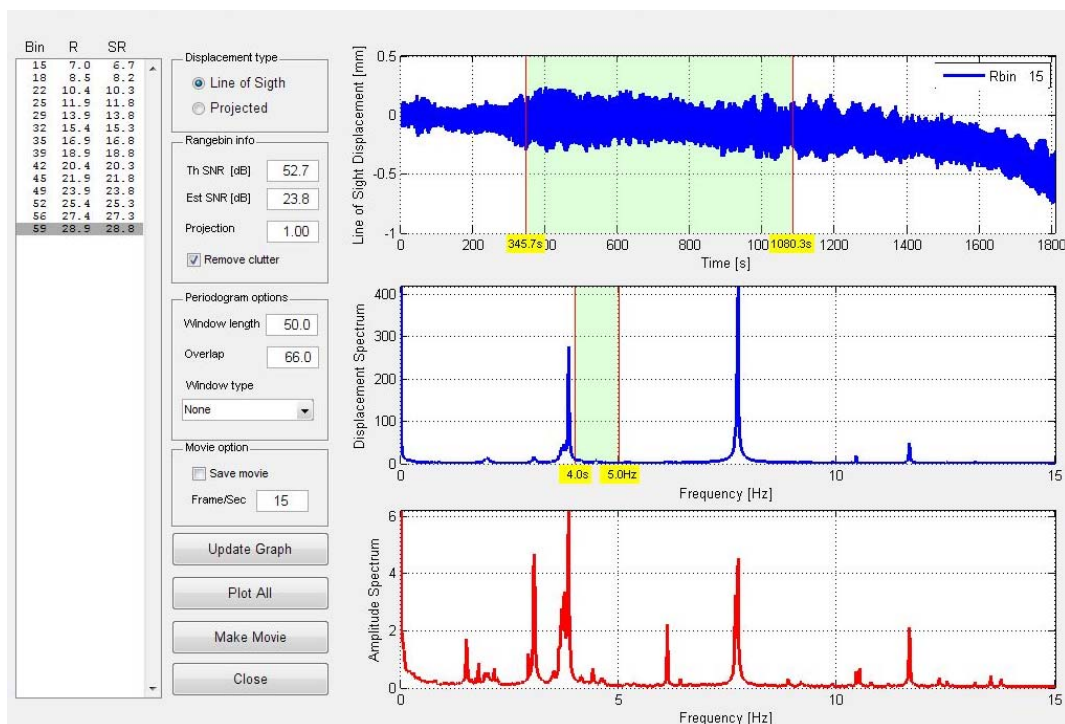
7.2.4 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

Το γραφικό περιβάλλον το οποίο παρουσιάζεται στη Εικόνα 7.5, δίνει τις εξής δυνατότητες παρουσίασης των αποτελεσμάτων:

- Επιλογή Range bin: Στον πίνακα αυτό παρουσιάζονται τα range bin που επιλέχθηκαν προηγουμένως, με τα ίδια στοιχεία για αυτά (αύξων αριθμός range bin, απόσταση από τον αισθητήρα, απόσταση επί της κατασκευής). Από τον πίνακα αυτό επιλέγονται ένα ή περισσότερα rangebin των οποίων τα στοιχεία εμφανίζονται στο διάγραμμα στο δεξί μέρος της εικόνας.

- Ρύθμιση Χρόνου: Εδώ προσαρμόζεται η αρχή και τέλος της χρονοσειράς στις χρονικές στιγμές που απαιτείται.
- Συχνότητα: Εδώ δίνονται οι τιμές της μέγιστης και της ελάχιστης συχνότητας που συνθέτουν το σήμα. Οι τιμές αυτές μπορούν να μεταβληθούν ώστε να προσδιοριστεί ένα απλοποιημένο διάγραμμα και όχι ένα διάγραμμα για όλο το φάσμα των συχνοτήτων αλλά για ένα υποσύνολο αυτού.
- Τύπος Διαγράμματος: Επιλογή μεταξύ καρτεσιανού και πολικού διαγράμματος.
- Υπόλοιπες Λειτουργίες: Οι υπόλοιπες λειτουργίες περιλαμβάνουν τον καθορισμό των μεταβλητών (χρόνος, συχνότητα, ταχύτητα, μετατόπιση κ.α.) για την κατασκευή των διαγραμμάτων, την αφαίρεση του θορύβου.

Κλείνοντας, το λογισμικό δίνει την δυνατότητα να δημιουργηθεί βίντεο των μετατοπίσεων ενός rangebin. Οι βασικές λειτουργίες του συγκεκριμένου παραθύρου (Εικόνα 7.6) είναι ίδιες με πριν.



Σχ. 7.6: Παράθυρο Modal Analysis

Fig. 7.6: Modal Analysis window

8. Επεξεργασία Μετρήσεων και Ανάλυση Αποτελεσμάτων

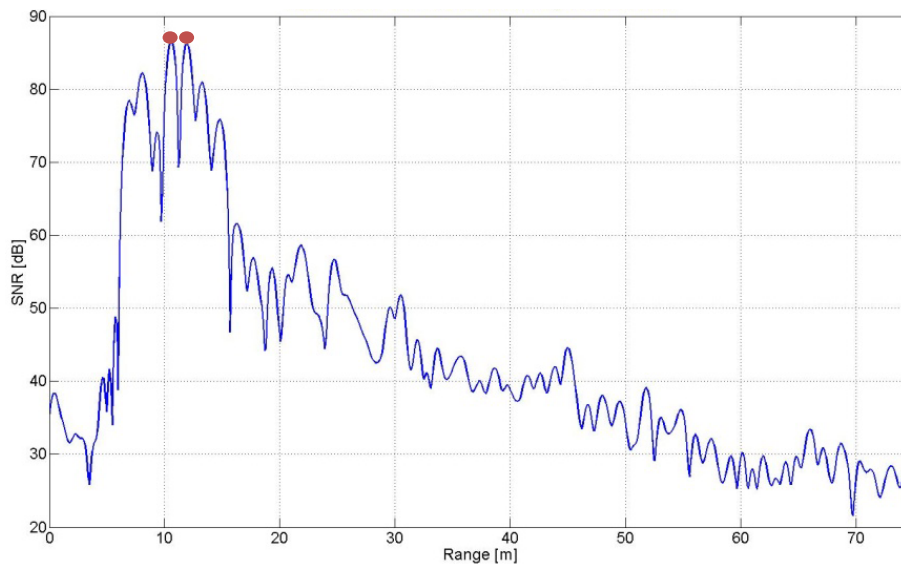
8.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο συνοψίζεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων που αφορούν τα πειράματα που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 6. Στην αρχή παρουσιάζονται και αναλύονται οι μετρήσεις για το κατάστρωμα της πεζογέφυρας και στη συνέχεια οι μετρήσεις για τα καλώδια ανάρτησης του καταστρώματος. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με διαγράμματα μετατόπισης, ταχύτητας και επιτάχυνσης όσον αφορά το πεδίο του χρόνου και με περιοδογράμματα για το πεδίο των συχνοτήτων. Επιπροσθέτα, για τα καλώδια ανάρτησης μόνο, έχουν υπολογιστεί οι τιμές των δυνάμεων τάσης βάση των τιμών των συχνοτήτων που προέκυψαν από τα περιοδογράμματα.

8.2 Κατάστρωμα Πεζογέφυρας

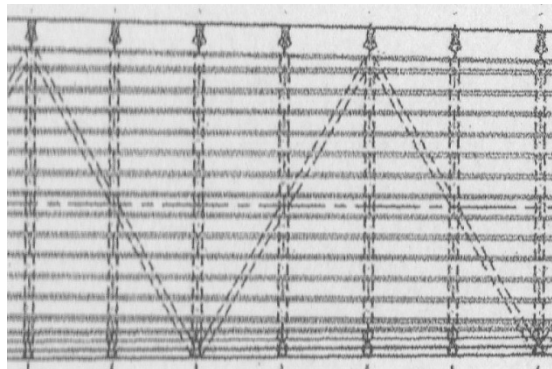
Κατά την αρχική επεξεργασία των μετρήσεων, προκειμένου να προκύψει καλύτερη διακριτική ικανότητα στο διάγραμμα που παρουσιάζει το SNR συναρτήσει του εύρους παρατήρησης (range – με το “0” του διαγράμματος να τοποθετείται στην θέση του αισθητήρα) διαφοροποιήθηκαν οι αρχικές παράμετροι ανάλυσης. Δεδομένου ότι η εφαρμογή της μεθόδου έγινε για πρώτη φορά στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας διερευνήθηκαν εναλλακτικές τιμές (Trial and Error) ώστε να προκύψει το καλύτερο αποδεκτό αποτέλεσμα. Οι αλλαγές περιελάμβαναν την αύξηση του συντελεστή της παρεμβολής (από 1 σε 4) και την χρήση του παραθύρου Hanning. Έτσι με τις αλλαγές αυτές προέκυψε πύκνωση των δεδομένων, σε απόσταση 0.12 m πλέον και υπήρξε μία ομαλοποίηση του διαγράμματος αφαιρώντας ταυτόχρονα μερικές ακραίες συχνότητες.

Έτσι προκύπτει το διάγραμμα που παρουσιάζει το SNR συναρτήσει του εύρους παρατήρησης (range).



Σχ. 8.1: Διάγραμμα SNR / Range του καταστρώματος

Fig. 8.1: SNR / Range profile of deck



Σχ. 8.2: Εγκάρσιοι δοκοί καταστρώματος

Fig. 8.2: Cross beams of deck

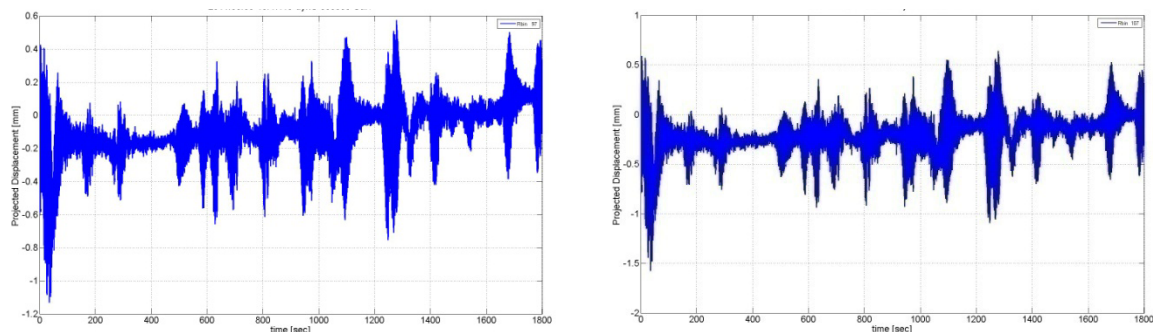
Το "0" του Διαγράμματος 8.1 τοποθετείται στην θέση του αισθητήρα (που αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο) και όπως βλέπουμε στο διάγραμμα του SNR φαίνονται διάφορες ισοκατανεμημένες αιχμές που ουσιαστικά αποτελούν τις εγκάρσιες δοκούς της υπόβασης καταστρώματος, των οποίων η διάταξη φαίνεται καθαρά στην πιο πάνω εικόνα με διακεκομμένη γραμμή. Οι διαγώνιες στηρίξεις δεν εμφανίζονται στο διάγραμμα και δεν επηρεάζουν την διαδικασία των μετρήσεων διότι διέρχονται από το εσωτερικό των εγκάρσιων δοκών. Ακόμη παρατηρείται ότι η ποιότητα του επιστρεφόμενου σήματος χειροτερεύει αισθητά έξω από το διάστημα [6,17] m, το οποίο οφείλεται στο αυξημένο θόρυβο που υπεισέρχεται στο σήμα λόγω

της κυκλοφορίας οχημάτων και των διάφορων εμποδίων που υπάρχουν στο πεδίο (βλέπε Κεφάλαιο 6).

Στο παραπάνω διάγραμμα από την ένταση του σήματος φαίνεται πως οι μετρήσεις είναι αξιόπιστες και ακριβείς για την περιοχή που ενδιέφερε εξαρχής, δηλαδή το μέσον του καταστρώματος της κατασκευής.

8.2.1 Διαγράμματα Μετατόπισης

Από τα διαγράμματα μετατόπισης θα προκύψει πληροφορία σχετικά με την κατακόρυφη κίνηση του καταστρώματος της κατασκευής. Στην συνέχεια θα αναλυθούν δύο εγκάρσιοι δοκοί, οι πιο σημαντικοί από πλευράς θέσης στην κατασκευή (μέσο του «ανοίγματος» της γέφυρας), οι δοκοί 17 και 18. Στα Σχήδια 5.2 και 5.3. οι θέσεις των δοκών 17 και 18 εμφανίζονται με έντονη διακεκομμένη διαγράμμιση ενώ στο Σχήμα 8.1 οι θέσεις τους συμβολίζονται με κόκκινη τελεία.

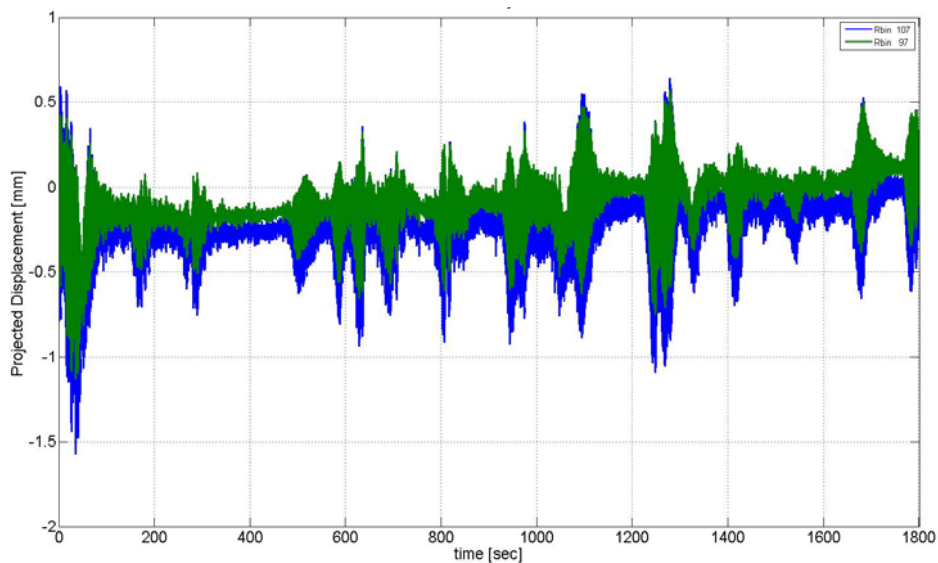


Σχ. 8.3: Διάγραμματα μετατοπίσεων του καταστρώματος, στις θέσεις 17 και 18 αντίστοιχά

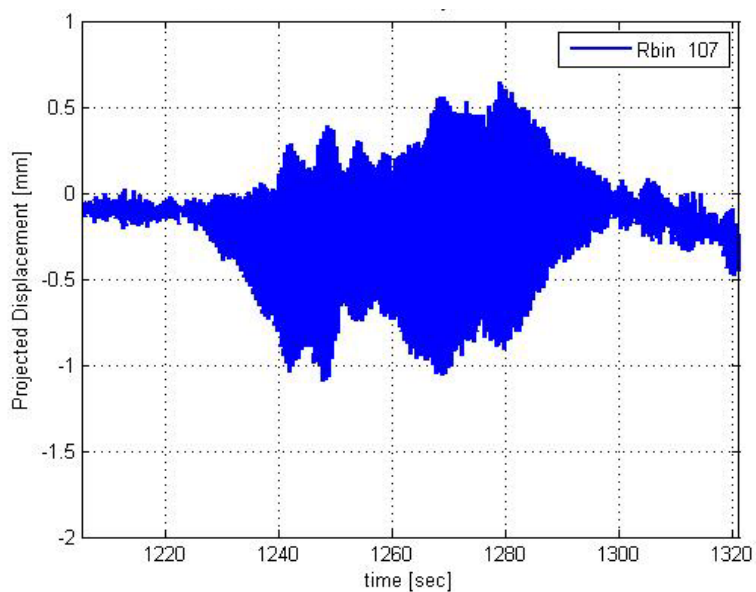
Fig. 8.3: Profiles of deck displacements at 17 and 18 positions

Παρατηρώντας τα διαγράμματα μετατόπισης που παρουσιάζονται στο Σχήμα 8.3, βλέπουμε αρχικά πως κατά τις φάσεις ηρεμίας της κατασκευής (π.χ. χρονικό διάστημα [300,480]) αυτή ταλαντώνεται σε ένα πολύ περιορισμένο εύρος ταλάντωσης περίπου 0.5 mm από το οποίο στην συνέχεια θα εξαχθεί η ιδιοπεριόδός της. Ακόμη παρατηρούμε πως κατά τα διαστήματα που εξελίσσεται κάποιο φαινόμενο είτε άνεμος, είτε διάβαση πεζών είτε

αυξημένη κυκλοφορία στον κόμβο κάτω από την κατασκευή, το πλάτος των μετατοπίσεων δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη αύξηση (μέγιστο εύρος μετατόπισης περίπου 2.5 mm). Η απόκριση όμως των δύο θέσεων (δοκών) παρατήρησης είναι άμεση σε όλες τις δυνάμεις είναι άμεση, πράγμα το οποίο γίνεται αντιληπτό από την συμφωνία στις μετατοπίσεις μεταξύ των διαγραμμάτων στο Σχήμα 8.4.

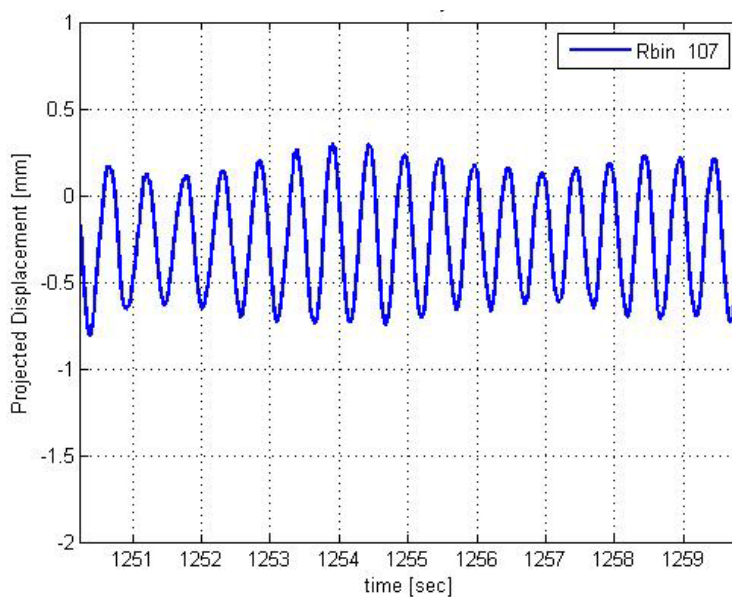


Σχ. 8.4: Διάγραμμα μετατόπισης του καταστρώματος στις θέσεις 17 (Γ) και 18 (Μ)
 Fig. 8.4: Profile of deck displacement at positions 17 (G) and 18 (B)



Σχ. 8.5: Τυπική απόκριση γέφυρας σε διέλευση πεζών
 Fig. 8.5: Typical response of the bridge at a pass of pedestrians

Κατα την διάρκεια των παρατηρήσεων ακόμη παρατηρήθηκε πως η απόκριση της κατασκευής ήταν άμεση όσον αφορά την παραλαβή των φορτίων που δημιουργούνται από την μετακίνηση πεζών. Περιπτώσεις πεζών που διασχίζουν την γέφυρα έχουμε τα χρονικά διαστήματα [150,200], [790,830], [930,990] και [1220-1300]. Παρατηρείται λοιπόν από το διάγραμμα στην συνέχεια την σταδιακή αύξηση και μείωση του πλάτους της ταλάντωσης κατα την διάρκεια που ο πεζός προσεγγίζει και απομακρίνεται από το σημείο παρατήρησης και ένα αυξημένο, κοντά στο μέγιστο πλάτος ταλάντωσης και σχετικά σταθερό σε πλάτος διάστημα κατά το οποίο ο πεζός βρίσκεται πολύ κοντά στο σημείο παρατήρησης. Επειτά φαίνεται καθαρά η επιστροφή της κατασκευής στην αρχική κατάσταση ηρεμίας.



Σχ. 8.6: Κατάστρωμα, θέση 18 (1251 – 1259 s)

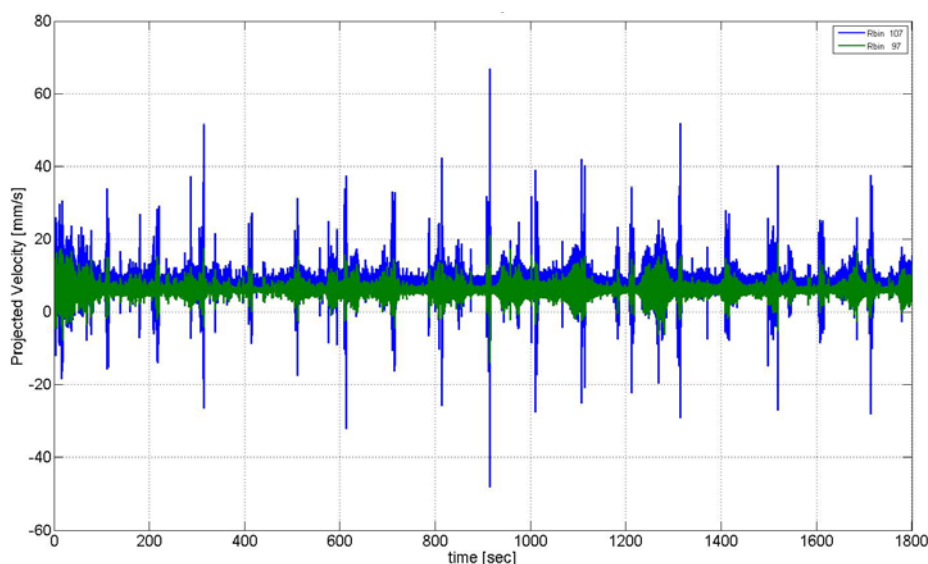
Fig. 8.6: Deck, position 18 (1251 – 1259 s)

Στο Σχήμα 8.6 παρουσιάζεται το πόσο σύντομη είναι η εναλλαγή των εκατέρωθεν θέσεων των μετατοπίσεων και κρίνοντας από την κλίση των πλευρών του διαγράμματος, αυτή γίνεται με μεγάλη επιτάχυνση. Επίσης από το πόσο κοντά είναι οι πλευρές βγαίνει το συμπέρασμα ότι το κατάστρωμα, όπως θα δούμε και στην συνέχεια, ταλαντώνεται με μικρή περίοδο ταλάντωσης. Ακόμη είναι εμφανής η περιοδικότητα της κινήσεως και η

μετατόπιση του κέντρου ισορροπίας στα -0.25 mm η οποία προήλθε λόγω του βάρους των πεζών που διέρχονταν από την πεζογέφυρα όπως αναφέραμε νωρίτερα.

8.2.2 Διαγράμματα Ταχύτητας - Επιτάχυνσης

Τα διαγράμματα ταχύτητας - επιτάχυνσης θα δείξουν την κατακόρυφη ταχύτητα και επιτάχυνση στα σημεία 17 – 18, των οποίων αναλύθηκαν προηγουμένως οι μετατοπίσεις. Τα αποτελέσματα των δύο θέσεων παρατήρησης έχουν παρουσιαστεί στο ίδιο διάγραμμα για κάθε περίπτωση προκειμένου να μπορεί να γίνει σύγκριση μεταξύ τους.

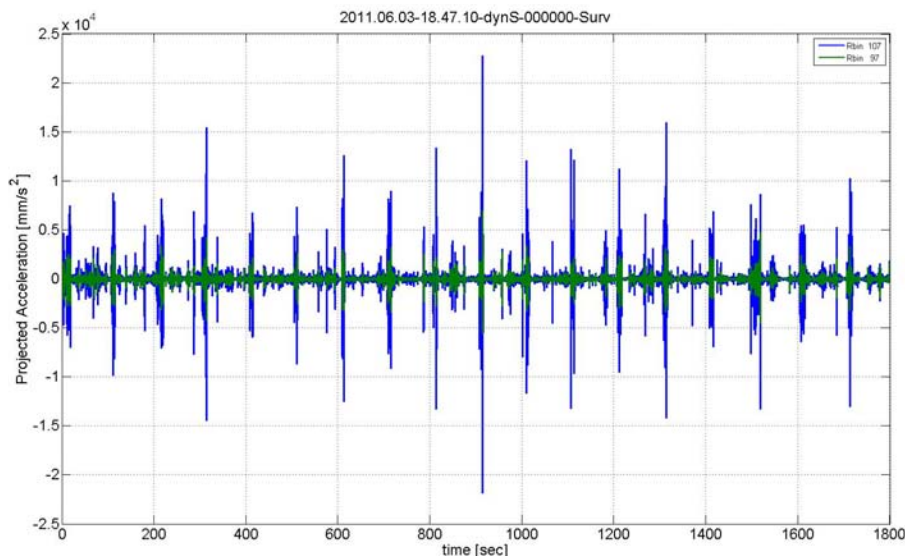


Σχ. 8.7: Διάγραμμα ταχύτητας του καταστρώματος στις θέσεις 17 (Π) και 18 (Μ)

Fig. 8.7: Profile of deck velocity at positions 17 (G) and 18 (B)

Παρατηρώντας τα συγκεκριμένα διαγράμματα (Σχήματα 8.7 – 8.8) είναι εμφανής η διαφορά τόσο στην ταχύτητα όσο και στην επιτάχυνση μεταξύ των δύο σημείων παρατήρησης. Ενώ οι τιμές και στα δύο διαγράμματα για την θέση 17 είναι συγκεντρωμένες γύρω από τιμή (10 mm/s και 0 mm/s² αντίστοιχα) και δεν παρουσιάζουν μεγάλη διασπορά, το αντίθετο συμβαίνει για την θέση 18. Δηλαδή ενώ για την θέση 18 οι τιμές είναι συσσωρευμένες στο ίδιο σημείο με της θέσης 17, παρουσιάζουν μεγάλη διασπορά και διακύμανση.

Αποτέλεσμα αυτού είναι κάποιες τιμές στην θέση 18 να παρουσιάζονται μεγαλύτερες κατά 6 φορές για την ταχύτητα και κατά 10 φορές για την επιτάχυνση, έναντι αυτών στην θέση 17.



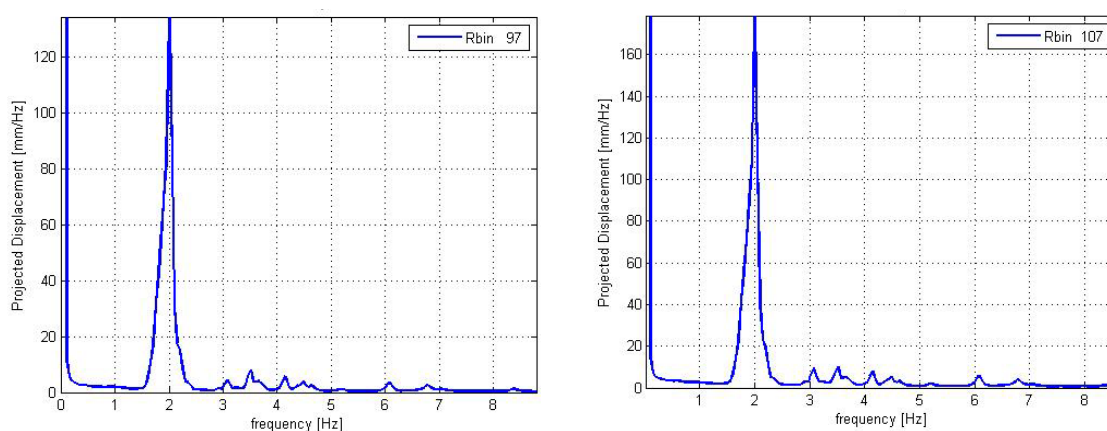
Σχ. 8.8: Διάγραμμα επιτάχυνσης του καταστώματος στις θέσεις 17 (Π) και 18 (Μ)

Fig. 8.8: Profile of deck acceleration at positions 17 (G) and 18 (B)

8.2.3 Φασματική Ανάλυση

Μέσω της φασματικής ανάλυσης γίνεται προσπάθεια να εξάχθει η κύρια συχνότητα ταλάντωσης που επηρεάζει την κατασκευή. Για τον υπολογισμό των περιοδογραμμάτων χρησιμοποιήθηκε το τροποποιημένο περιοδόγραμμα Welch σε συνδυασμό με το παράθυρο Hanning. Οι χρονοσειρές χωρίστηκαν σε παράθυρα των 4096 σημείων με επικάλυψη 66.7% και από το σύνολο των παραθύρων το περιοδόγραμμα προέκυψε ως ο μέσος όρος αυτών. Καθώς η δειγματοληψία των δεδομένων έγινε με συχνότητα 200Hz συνεπάγεται πως ο χρόνος μεταξύ κάθε χρονικής στιγμής συλλογής δεδομένων είναι 0.005 s το οποίο μας δίνει ανάλυση συχνότητας στο παράθυρο, $1 / (4096 \times 0.005) \approx 0.025$ Hz. Επιλέχτηκε η χρήση του τροποποιημένου περιοδογράμματος για να ομαλοποιηθεί το προκύπτον φασματικό περιεχόμενο.

Σύμφωνα με τα περιοδογράμματα στο Σχήμα 8.9 η τιμή της κύριας συχνότητας της κατασκευής είναι ίδια και για τα δύο. Κάτι τέτοιο είναι αναμενόμενο καθώς αν η κατασκευή εμφανίζε για διαφορετικές ομάδες δεδομένων, ταλαντώσεις σε διαφορετικές τιμές συχνοτήτων, τότε σε στιγμές εντόνων φαινομένων (π.χ. πολύ δυνατός άνεμος) θα δημιουργούνταν μεγάλες πιθανότητες αστοχίας της. Η τιμή της κύριας συχνότητας είναι $f = 2.00 \text{ Hz}$ και αντιστοιχεί σε περίοδο ταλάντωσης της ίση με: $T = \frac{1}{f} = \frac{1}{2} = 0.5 \text{ s}$.



Σχ. 8.9: Περιοδόγραμμα του καταστρώματος στις θέσεις 17 και 18

Fig. 8.9: Periodogram of deck at positions 17 and 18

8.2.4 Συμπεράσματα

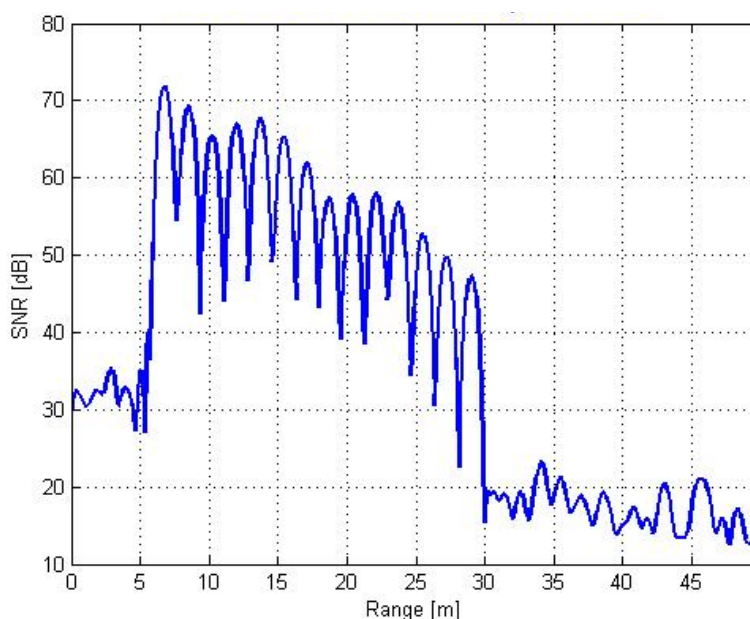
Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση του καταστρώματος της κατασκευής είναι πως αυτό δεν παρουσιάζει ιδιαίτερα μεγάλες μετατοπίσεις αλλά παρολαυτά δείχνει άμεση απόκριση. Το κατάστρωμα ακόμη δεν παρουσιάζει μεγάλες ταχύτητες κατά την ταλάντωση του, παρουσιάζει όμως αυξομειώσεις στις επιταχύνσεις.

Όσον αφορά την φασματική ανάλυση, μας έδειξε πως η κύρια συχνότητα ταλάντωσης του καταστρώματος της κατασκευής είναι μία και είναι 2.00 Hz. Αυτό σημαίνει πως δεν αποκρίνεται σε κάποια άλλη συχνότητα κατά την εξέλιξη φαινομένων (άνεμος, διέλευση πεζών κτλ) επί αυτής,

γεγονός το οποίο οδηγεί τον περιορισμό του κινδύνου αστοχίας λόγω τέτοιου είδους δυναμικού φαινομένου.

8.3 Καλώδια Ανάρτησης Καταστρώματος

Οι παράμετροι επεξεργασίας και ανάλυσης των μετρήσεων για τα καλώδια ανάρτησης του καταστρώματος είναι όμοιες με αυτές για το κατάστρωμα της κατασκευής. Το αποτέλεσμα λοιπόν είναι το παρακάτω διάγραμμα SNR / Range, στο οποίο διακρίνονται καθαρά, σε ίσες περίπου αποστάσεις, 14 κορυφές που αποτελούν τα καλώδια ανάρτησης της κατασκευής που θα αναλυθούν στην συνέχεια.



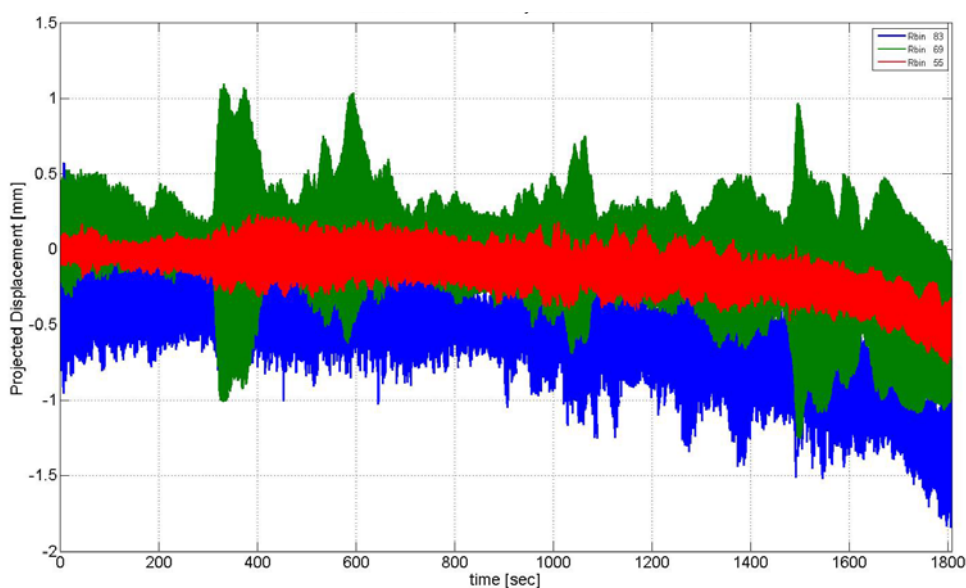
Σχ. 8.10: Διάγραμμα SNR / Range των καλωδίων ανάρτησης

Fig. 8.10: SNR / Range profile of suspension cables

Το παραπάνω διάγραμμα δείχνει πως οι μετρήσεις είναι αρκετά καλές και αξιόπιστες όσον αφορά την ακρίβεια τους. Αυτό διότι βλέπουμε πως οι θέσεις των καλωδίων διακρίνονται καθαρά, με κορυφές που ξεχωρίζουν από το υπόλοιπο διάγραμμα, γεγονός το οποίο συνεπάγεται ισχυρές επιστροφές και καλές ανακλάσεις του σήματος από την κατασκευή.

8.3.1 Διαγράμματα Μετατόπισης

Απο τα διαγράμματα μετατόπισης προκύπτει το μέγιστο εύρος μετατόπισης των καλωδίων ως προς την κάθετη στην διεύθυνσή τους μετακίνησης τους από την θέση ισορροπίας. Αυτό διότι ενώ ο αισθητήρας έχει μετρήσει τις μετατοπίσεις στην διεύθυνση παρατήρησης, με την βοήθεια του λογισμικού γίνεται η αναγωγή ως προς την κάθετο του καλωδίου.

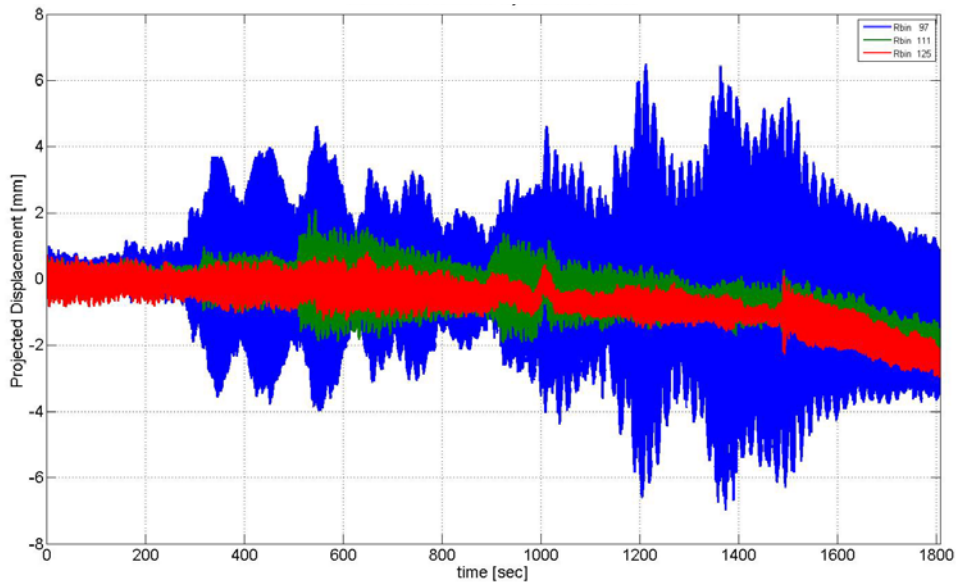


Σχ. 8.11: Μετατοπίσεις των καλωδίων 1 (Κ), 2 (Π), 3 (Μ)

Fig. 8.11: Cables deflection 1 (R), 2 (G), 3 (B)

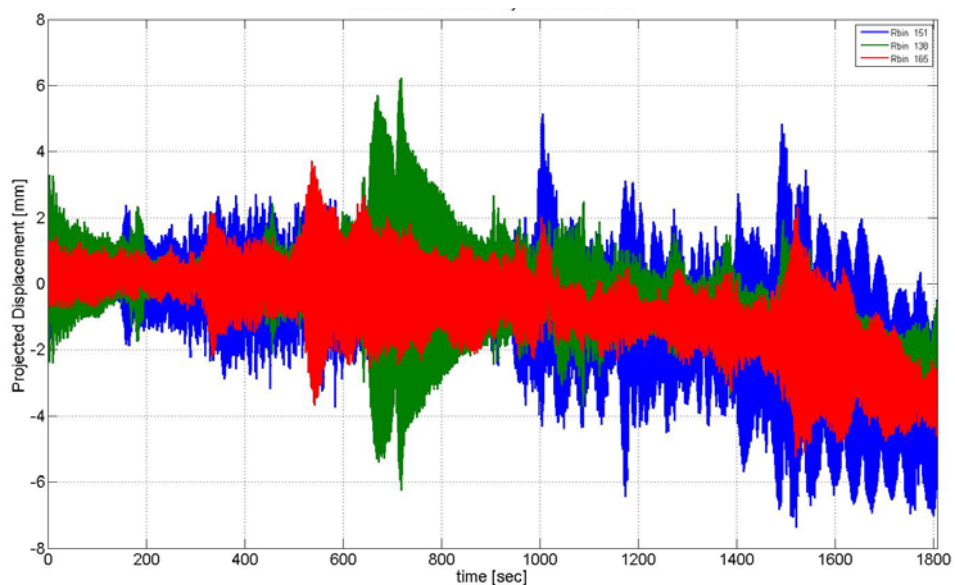
Παρατηρώντας λοιπόν τα διαγράμματα μετατόπισης των καλωδίων, τα οποία είναι ομαδοποιημένα ανά τρία και βρίσκονται στην ίδια κλίμακα αξόνων προκειμένου να γίνουν συγκρίσεις μεταξύ τους, βλέπουμε πως τα εύρη μετατόπισης τους διαφέρουν όπως ήταν αναμενόμενο φυσικά. Όμως αναμενόμενο ήταν οι μετατοπίσεις να αυξάνονται όσο μεγαλώνει το μήκος του καλωδίου, το οποίο εν γενει συμβαίνει, υπάρχουν όμως κάποιες εξαιρέσεις που ακυρώνουν τον κανόνα. Όπως βλέπουμε στον πίνακα (Πίνακας 8.1) τα καλώδια 4, 7 και 8 παρουσιάζουν ιδιαίτερα αυξημένη μετατόπιση σε σχέση με τα αντίστοιχα που βρίσκονται στις ενδιάμεσες θέσεις και μεγαλύτερη από τα μακρύτερα. Επίσης η μετατόπιση από το καλώδιο 5 στο 6 δεν αυξάνεται, αντίθετα μειώνεται και τα καλώδια 10 - 14 παρουσιάζουν στην αρχή μείωση

του πλάτους ταλάντωσης ενώ στην συνέχεια αύξηση. Συνεπώς όσον αφορά το πλάτος ταλάντωσης, τα καλώδια ανάρτησης της κατασκευής δεν παρουσιάζουν κάποιο αυστηρό κανόνα.



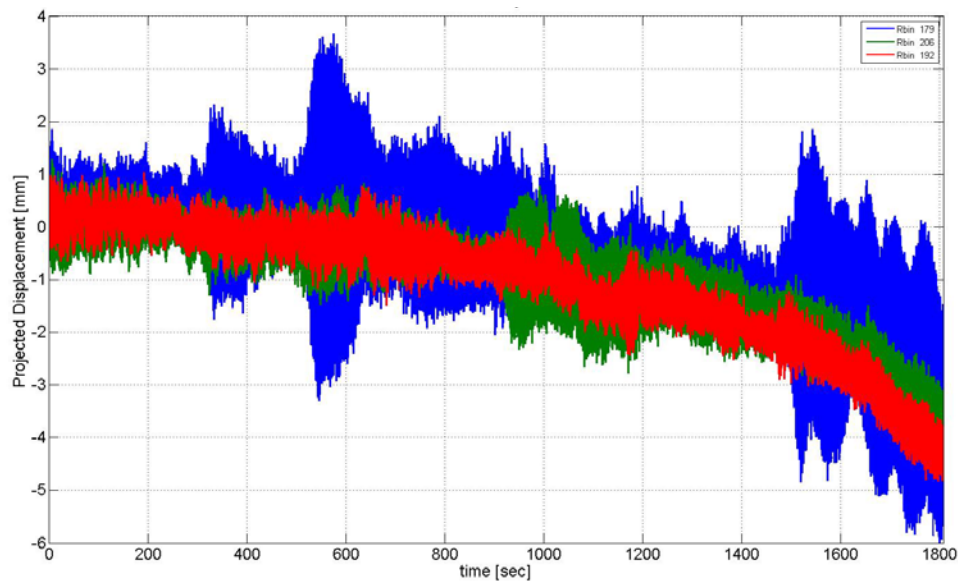
Σχ. 8.12: Μετατοπίσεις των καλωδίων 4 (M), 5 (Π), 6 (K)

Fig. 8.12: Cables deflection 4 (B), 5 (G), 6 (R)



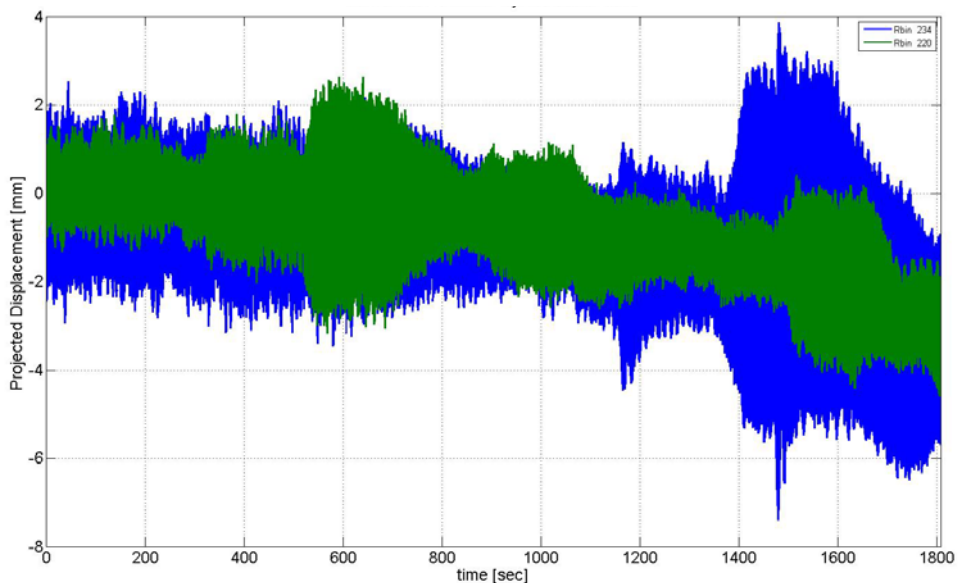
Σχ. 8.13: Μετατοπίσεις των καλωδίων 7 (Π), 8 (M), 9 (K)

Fig. 8.13: Cables deflection 7 (G), 8 (B), 9 (R)



Σχ. 8.14: Μετατοπίσεις των καλωδίων 10 (Μ), 11 (Κ), 12 (Π)

Fig. 8.14: Cables deflection 10 (B), 11 (R), 12 (G)



Σχ. 8.15: Μετατοπίσεις των καλωδίων 13 (Π), 14 (Μ)

Fig. 8.15: Cables deflection 13 (G), 14 (B)

Η γενική απόκριση των καλωδίων όμως δείχνει να συμφωνεί και να κατευθύνεται προς μία συγκεκριμένη κατεύθυνση. Αυτό το βλέπουμε βάσει των παραπάνω διαγραμμάτων όπου παρατηρούμε μία μετατόπιση της θέσης ισορροπίας των καλωδίων μετά το 1000 s (κυρίως όμως μετά το 1200 s) καθώς ξεκίνησε να επικρατεί ισχυρός άνεμος. Έτσι αντί να ταλαντώνονται

γύρω από την θέση "0", η θέση αυτή μετατοπίζεται κάποια χιλιοστά προς τα κάτω στην συγκεκριμένη περίπτωση, φαινόμενο το οποίο φαίνεται πολύ καθαρά και έντονα στις μετατοπίσεις των καλωδίων 11 και 12. Ακόμη στα διαγράμματα φαίνεται καθαρά πως τις χρονικές στιγμές κατά τις οποίες αυξάνεται στο πλάτος ταλάντωσης ενός καλωδίου, αυξάνεται και των υπολοίπων όπως για παράδειγμα τις χρονικές στιγμές 550 – 650 s και 1450 – 1580 s.

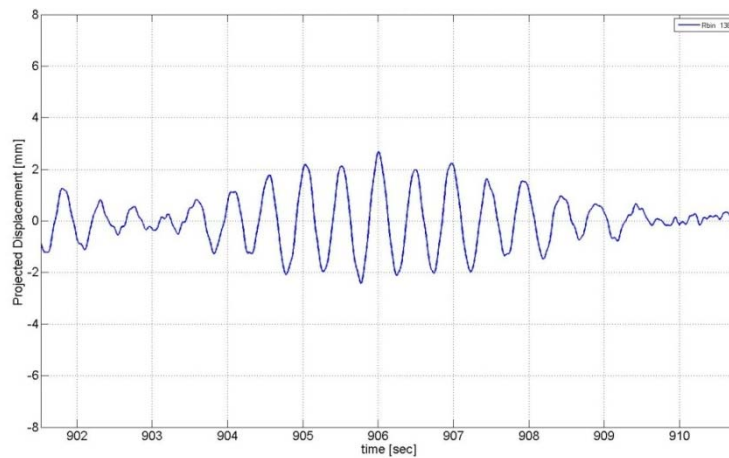
		Μήκος Καλωδίου	Ελάχιστη Μετατόπιση (-)	Μέγιστη Μετατόπιση (+)	Μέση Τιμή	σ
Καλώδιο	Range Bin	[m]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	55	22.03	-0.76	0.23	-0.13	0.15
2	69	27.63	-1.25	1.09	-0.03	0.34
3	83	32.98	-1.85	0.57	-0.56	0.32
4	97	38.13	-6.97	6.49	-0.12	2.04
5	111	43.11	-2.43	2.10	-0.46	0.62
6	125	47.94	-3.00	0.85	-0.67	0.65
7	138	52.66	-6.23	6.26	-0.35	1.25
8	151	57.31	-7.32	5.20	-0.81	1.67
9	165	61.92	-5.21	3.74	-0.74	1.26
10	179	66.49	-5.99	3.67	-0.47	1.31
11	192	71.01	-4.83	1.03	-1.07	1.16
12	206	75.51	-4.10	1.29	-0.98	1.01
13	220	79.95	-4.60	2.65	-0.80	1.14
14	234	84.33	-7.61	3.86	-1.07	1.33

Πιν. 8.1: Στοιχεία καλωδίων

Tab. 8.1: Cables data

Από το διάγραμμα μετατόπισης του καλωδίου 7 για ένα πολύ μικρό χρονικό διάστημα (902 – 910 s) μπορούμε να παρατηρήσουμε την περιοδικότητα των μετατοπίσεων που εκτελούν τα καλώδια, πριν γίνει η μετάβαση στην φασματική ανάλυση. Η επικρατούσα συχνότητα στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα είναι 2 Hz, δηλαδή το καλώδιο ταλαντώνεται με περίοδο 0.5 s το οποίο είναι ορατό στο διάγραμμα που παρατείνεται αν παρατηρήσουμε τις αιχμές του. Το καλώδιο μέσα σε μισό δευτερόλεπτο έχει

διαγράφει ένα πλήρη κύκλο και κατά το χρονικό διάστημα 904 – 907 s, διατηρεί σχεδόν το ίδιο πλάτος ταλάντωσης.



Σχ. 8.16: Καλώδιο 7 (902 – 910 s)

Fig. 8.16: Cables 7 (902 – 910)

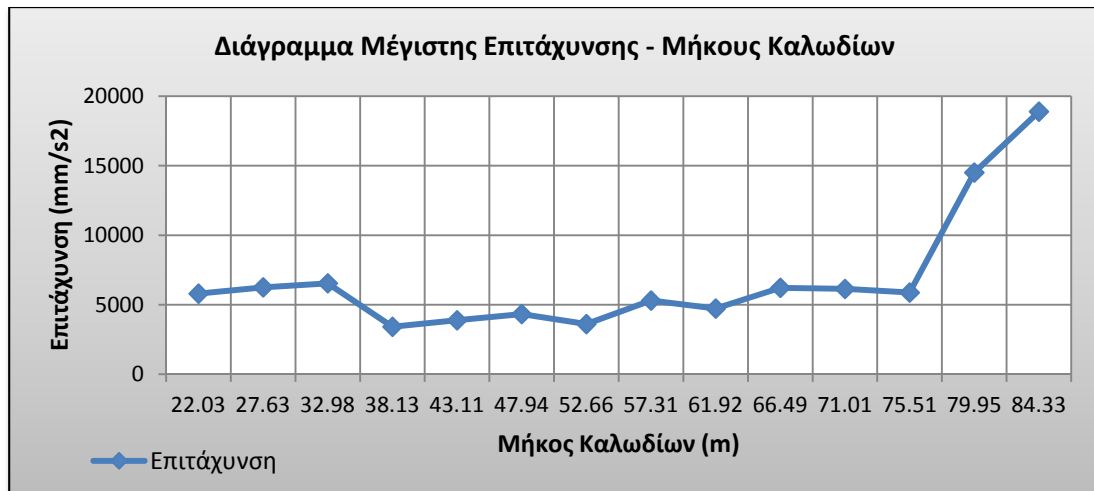
8.3.2 Διαγράμματα Ταχύτητας - Επιτάχυνσης

Τα διαγράμματα ταχύτητας και επιτάχυνσης παρουσιάζουν την ταχύτητα και την επιτάχυνση αντίστοιχα, των καλωδίων ανάρτησης του καταστρ στην ίδια διεύθυνση με την μετατόπιση που αναφέραμε παραπάνω.



Σχ. 8.17: Διάγραμμα Ταχύτητας – Μήκους Καλωδίων

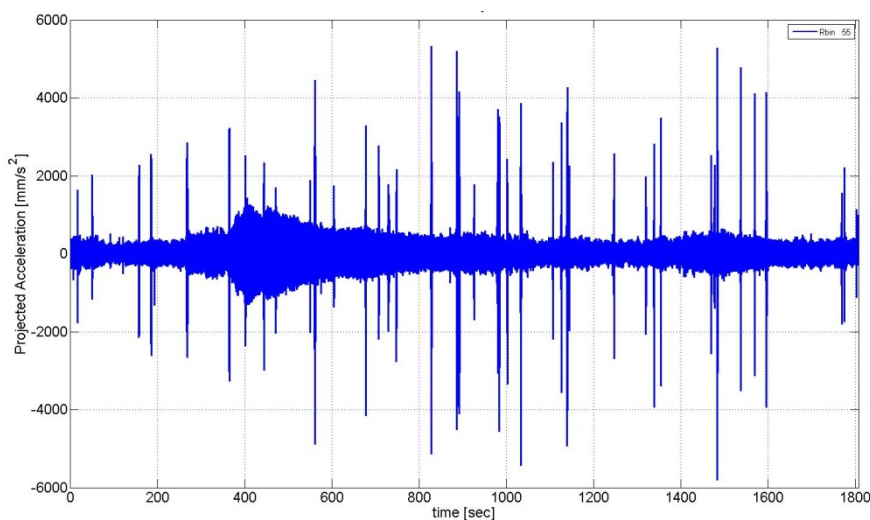
Fig. 8.17: Profile Velocity – Cable Length



Σχ. 8.18: Διάγραμμα Επιτάχυνσης – Μήκους Καλωδίων

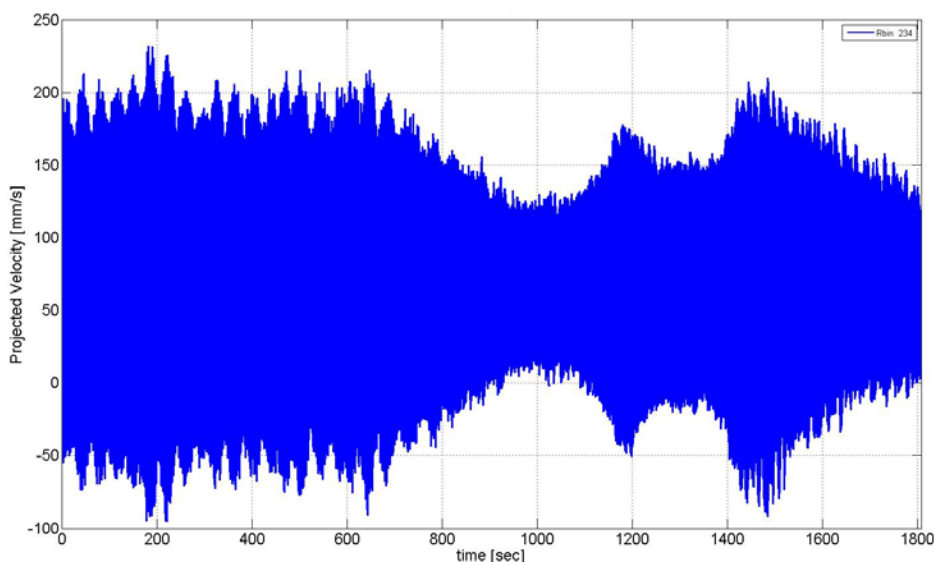
Fig. 8.18: Profile Acceleration – Cable Length

Τα διαγράμματα στα Σχήματα 8.17 – 8.18 αποτελούν τις μέγιστες ταχυτήτες και τις μέγιστες επιταχύνσεις που καταγράφηκαν σε κάθε καλώδιο. Έτσι παρατηρούμε από τα παρακάτω διαγράμματα πως ούτε η ταχύτητα ούτε και η επιτάχυνση συσχετίζονται σε μεγάλο βαθμό με το μήκος των καλωδίων καθώς γραφικά δεν αποτελούν μία ομαλή συνάρτηση που να αυξάνεται γραμμικά, εκθετικά, τετραγωνικά κτλ. Ενώ θα περίμενε κανείς να αυξάνονται οι τιμές όσο αυξάνεται το μήκος των καλωδίων με κάποια σταθερή σχέση, αυτό δεν συμβαίνει.



Σχ. 8.19: Διάγραμμα επιτάχυνσης καλωδίου 1

Fig. 8.19: Acceleration profile of cable 1



Σχ. 8.20: Διάγραμμα ταχύτητας καλωδίου 12

Fig. 8.20: Velocity profile of cable 12

Ακόμη μία σημαντική παρατήρηση που πρέπει να αναφερθεί είναι πως όταν οι μετατοπίσεις γειτονικών καλωδίων είναι σχεδόν ίδιες (π.χ. καλώδιο 1), τότε οι μέγιστες τιμές της ταχύτητας και της επιτάχυνσης είναι στιγμιαίες εξάρσεις οι οποίες ξεχωρίζουν μέσα από ένα πλήθος συγκεντρωμένων τιμών γύρω από την τιμή ισορροπίας (Σχήμα 8.19). Στην αντίθετη περίπτωση δεν υπάρχει μεγάλη συσσώρευση των τιμών γύρω από ένα σημείο, αλλά αυξάνεται η διασπορά και κατανέμονται μέχρι τις μέγιστες τιμές (Σχήμα 8.20).

8.3.3 Φασματική Ανάλυση

Μέσω της φασματικής ανάλυσης, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, θα καταφέρουμε να εξάγουμε πληροφορία σχετικά με τις φυσικές συχνότητες ταλάντωσης του κάθε καλωδίου και από αυτές θα υπολογίσουμε τις δυνάμεις των τάσεων που αναπτύσσονται σε κάθε καλώδιο με την βοήθεια του θεωρήματος χορδών και του τύπου:

$$T = 4 \cdot \rho \cdot L^2 \cdot \left(\frac{f_n}{n}\right)^2 \quad (8.1)$$

όπου

T είναι η υπολογιζόμενη τάση σε N

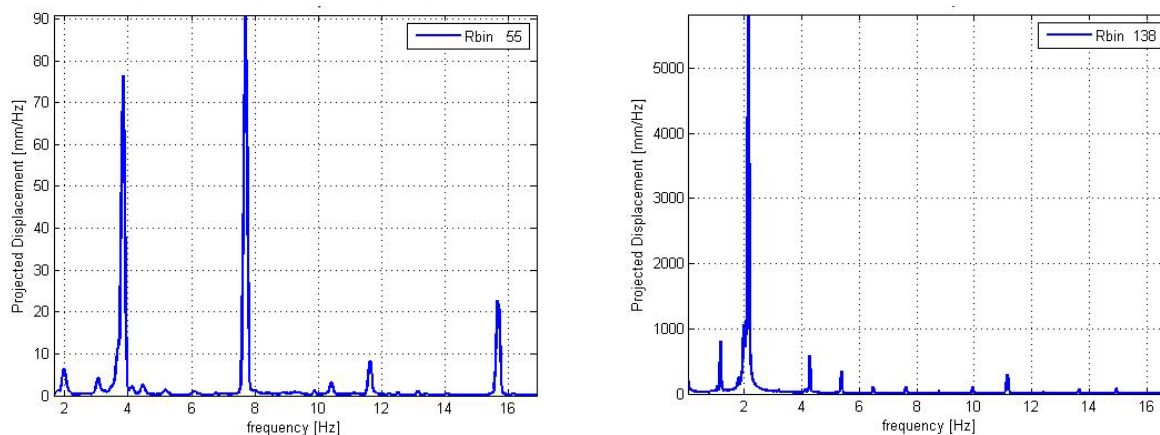
ρ είναι το ειδικό βάρος των καλωδίων ανάρτησης της κατασκευής

L το μήκος των καλωδίων ανάρτησης

f_n η νιοστή φυσική συχνότητα ταλάντωσης

n το σύνολο των φυσικών συχνοτήτων ταλάντωσης

Τα μήκη των καλωδίων έχουν υπολογιστεί στον Πίνακα 8.1, το ειδικό βάρος θα θεωρηθεί ίσο με 12.4 Kg/m και οι φυσικές συχνότητες θα προκύψουν από την ανάλυση στην συνέχεια. Για να ισχύει ο παραπάνω τύπος θα πρέπει οι κορυφές των περιοδογραμμάτων να ισαπέχουν.



Σχ. 8.21: Περιοδογράμματα των καλωδίων 1 και 7

Fig. 8.21: Periodograms of cables 1 and 7

Έτσι μετά την επεξεργασία των μετρήσεων και την μετάβαση από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο των συχνοτήτων προκύπτει ένα διάγραμμα σαν τα παραπάνω για κάθε ένα καλώδιο ανάρτησης. Από αυτά τα διαγράμματα εξαγάμουμε τις συχνότητες απόκρισης των καλωδίων οι οποίες όπως βλέπουμε παραπάνω βρίσκονται στις ίδιες περίπου θέσεις και στα δύο (αντίστοιχα και στα υπόλοιπα 12 διαγράμματα) έχοντας διαφορετικά πλάτη όμως. Προκύπτει

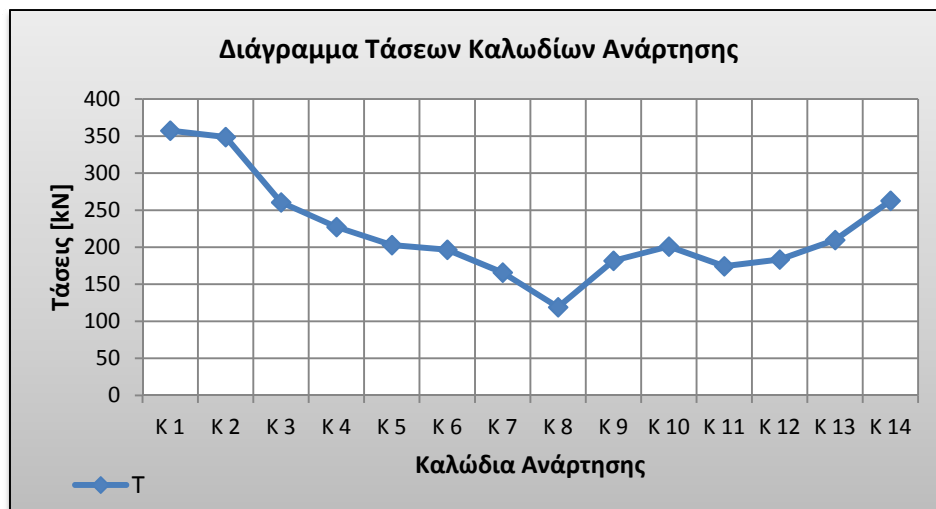
επίσης ότι τα καλώδια έχουν ένα ενεργό φάσμα απόκρισης από 0 – 17 Hz. Εξάγουμε λοιπόν τις φυσικές συχνότητες που είναι πιο έντονες, συνεπώς πιο σημαντικές, προκειμένου να υπολογίσουμε τις τάσεις που αναπτύσσονται σε κάθε καλώδιο χρησιμοποιώντας τον τύπο (8.1). Από τις τάσεις μπορούμε να καταλάβουμε την καταπόνηση που πιθανώς υφίσταται ένα καλώδιο σε σχέση με τα άλλα, εάν υπάρχει αστοχία στην εφαρμογή του κτλ. Οι φυσικές συχνότητες που χρησιμοποιήθηκαν και οι υπολογισμοί φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Καλώδιο	Μήκος [m]	f [Hz]				\bar{T} [kN]*
		T [kN]				
1	22.03	3.85	7.71			
		357	358			357
2	27.63	3.02	6.1			
		345	352			349
3	32.98	2.2	4.39			
		261	260			261
4	38.13	1.8	3.5			
		234	221			227
5	43.11	1.51	2.93	5.85	10.48	
		210	198	197	207	203
6	47.94	1.32	13.07			
		199	195			197
7	52.66	1.17	2.15	4.29	5.36	
		188	159	158	158	166
8	57.31	1.71	3.46			
		119	122			121
9	61.92	0.97	1.61	3.27	4.09	
		179	123	226	199	182
10	66.49	0.97	1.62	3.22		
		206	144	253		201
11	71.01	0.93	1.42	5.10		
		216	126	181		174
12	75.51	0.83	1.56			
		195	172			183
13	79.95	0.83	1.61	3.22		
		218	205	205		210
14	84.33	1.71	3.41	10.44	13.12	
		258	256	267	270	263

Πιν. 8.2: Τάσεις

Tab. 8.2: Tension

* Οι τάσεις που υπολογίστηκαν είναι προσεγγιστικές διότι δεν είχαμε τα ακριβή στοιχεία των καλωδίων και των υλικών τους.



Σχ. 8.22: Διάγραμμα Τάσεων / Καλωδίων

Fig. 8.22: Profile Tensions / Cables

8.3.4 Σύνοψη

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση των καλωδίων είναι πως το καθένα παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά από τα υπόλοιπα. Εξαιρεση αποτελεί όμως η μεταβολή της θέσης ισορροπίας των καλωδίων που αναφέρθηκε πιο πάνω λόγω ανέμου και η νέα ταλάντωση ως προς αυτήν. Έτσι λοιπόν η κατασκευή επηρεάζεται από τον άνεμο που της προκαλεί ημιμόνιμες παραμορφώσεις με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται η δυναμική συμπεριφορά της.

Τα καλώδια των οποίων παρατηρείται αυξημένη μετατόπιση σε σχέση με τα γειτονικά τους υπάρχουν δύο ενδεχόμενα, είτε να έχουν παραμορφωθεί είτε να είναι μέρος του σχεδιασμού της κατασκευής. Για τα καλώδια 7 και 8 τα οποία βρίσκονται στο μέσον περίπου του καταστρώματος της γέφυρας (συνεπώς μεγαλύτερη καταπόνηση λόγω αυξημένων φορτίων) έχουμε ως πρώτο ενδεχόμενο την πιθανή σημαντική επιβαρυνσή τους. Όμως οι τάσεις που υπολογίσαμε δεν μας δείχνουν κάτι τέτοιο διότι είναι μικρότερες σε σχέση

με τις γειτονικές τους. Συνεπώς ίσως αυτά τα δύο καλώδια να έχουν υποστεί κάποια σημαντική παραμόρφωση (για αστοχία το εύρος ταλάντωσης είναι σχετικά μικρό). Τα υπόλοιπα (καλώδια 4 και 14) δεν φαίνονται να αντιμετωπίζουν κάποιο πρόβλημα και οι αυξημένες μετατοπίσεις ίσως να οφείλονται στον σχεδιασμό της κατασκευής.

Όσον αφορά την φασματική ανάλυση των καλωδίων είδαμε πως αποκρίνονται σε ένα πεδίο τιμών του φάσματος μεταξύ $[0,17]$, τιμές οι οποίες ήταν αναμενόμενες για το είδος κατασκευής που μετρήθηκε. Ακόμη παρατηρήθηκε πως όσο αυξάνει το μήκος του καλωδίου, το φάσμα συχνοτήτων περιέχει περισσότερες τιμές συχνοτήτων που αυτό αντιδρά.

Τελειώνοντας, για τις τιμές των τάσεων και τις τιμές των συχνοτήτων δεν κατέσται δυνατόν να βρεθούν οι θεωρητικές τιμές των τάσεων των καλωδίων και οι τιμές τάνυσης τους κατά την κατασκευή όπως επίσης και το θεωρητικό δυναμικό μοντέλο της πεζογέφυρας. Γι' αυτό στην παρούσα φάση δεν υπάρχει η δυνατότητα να αξιοποιηθούν περαιτέρω.

9. Συμπεράσματα - Προτάσεις

9.1 Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη παρούσα εργασία. Περιλαμβάνονται συμπεράσματα που αφορούν τόσο τη δυναμική συμπεριφορά της ίδιας της κατασκευής, όσο και συμπεράσματα που αφορούν τον αισθητήρα που χρησιμοποιήθηκε για την λήψη των μετρήσεων. Τέλος αναφέρονται και κάποιες ενδεχόμενες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Επισημαίνεται ότι η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί ουσιαστικά πρώτη προσπάθεια διερεύνησης της λειτουργίας του συστήματος επίγειου RADAR μικροκυμματικής συμβολομετρίας (IBIS-S). Κατά συνέπεια, βασικός στόχος της εργασίας αποτελεί η θεωρητική προσέγγιση και κατανόηση της μεθόδου και εξοικείωση εφαρμογής της τεχνικής και του εξοπλισμού σε πειραματικό επίπεδο.

Ως εκ τούτου θεωρείται σκόπιμη περαιτέρω ανάλυση των μετρήσεων με αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

9.2 Στοιχεία Σχετικά με την Δυναμική Συμπεριφορά της Κατασκευής

Από την επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων που συλλέχθηκαν με τον αισθητήρα IBIS-S προκύπτει τα εξής συμπεράσματα:

- Τα κινηματικά χαρακτηριστικά της κατασκευής παρουσιάζουν έντονη περιοδικότητα
- Οι βασικές συχνότητες ταλάντωσης των καλωδίων ανάρτησης του καταστρώματος βρίσκονται μέσα σε ένα ενεργό φάσμα απόκρισης [0,17] Hz. Δεν παρουσιάζουν όλα την ίδια συμπεριφορά καθώς αυτή

επιηρεάζεται από το μήκος του καλωδίου, την θέση που βρίσκεται σε σχέση με τα υπόλοιπα, τον λοιπό σχεδιασμό της κατασκευής και την τάση που παραλαμβάνει. Παρουσιάζεται όμως μία «σύγκλιση» των αποτελεσμάτων για συγκεκριμένες ομάδες καλωδίων.

- Η βασική συχνότητα ταλάντωσης του καταστρώματος είναι 2.00 Hz, αποτέλεσμα το οποίο προκύπτει και από τις δύο θέσεις μετρήσεων (θέσεις δοκών 17 και 18). Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό διότι αν η κατασκευή εμφανίζε διαφορετικές τιμές συχνότητων, σε στιγμές εντόνων φαινομένων (π.χ. πολύ δυνατός άνεμος) θα δημιουργούνταν μεγάλες πιθανότητες αστοχίας της.
- Το μέγιστο εύρος ταλάντωσης καλωδίου (κίνηση από την θέση ισορροπίας αντίθετα προς την θέση παρατήρησης) που παρατηρήθηκε είναι 12.32 mm και το ελάχιστο 0.99 mm (κίνηση από την θέση ισορροπίας προς την θέση παρατήρησης). Η τιμή του εύρους ταλάντωσης στο μέσον του καταστρώματος της πεζογέφυρας είναι 2.21 mm.
- Η μέγιστη ταχύτητα ταλάντωσης καλωδίου (κίνηση από την θέση ισορροπίας αντίθετα προς την θέση παρατήρησης) που παρατηρήθηκε είναι 232.22 mm/s και η ελάχιστη 20.22 mm/s (κίνηση από την θέση ισορροπίας προς την θέση παρατήρησης). Η μέγιστη ταχύτητα ταλάντωσης στο μέσον του καταστρώματος της πεζογέφυρας είναι 66.85 mm/s.
- Η μέγιστη επιτάχυνση ταλάντωσης καλωδίου (κίνηση από την θέση ισορροπίας αντίθετα προς την θέση παρατήρησης) που παρατηρήθηκε είναι 18893.46 mm/s² και η ελάχιστη 2563.97 mm/s² (κίνηση από την θέση ισορροπίας προς την θέση παρατήρησης). Η μέγιστη επιτάχυνση ταλάντωσης στο μέσον του καταστρώματος της πεζογέφυρας είναι 22766.64 mm/s².

9.3 Επισημάνσεις για τον Αισθητήρα IBIS-S

- Με την τοποθέτησή του σε ένα σημείο παρατήρησης, ήταν δυνατόν να συλλεχθούν μετρήσεις για πολλά μέρη της κατασκευής.
- Μειονέκτημα του αισθητήρα ότι τα αποτελέσματα των μετρήσεων είναι σε μία διάσταση αντί τριών.
- Ο αισθητήρας προσέφερε μεγάλη δειγματοληψία των δεδομένων στο στάδιο των μετρήσεων (200 Hz) με αποτέλεσμα όλες οι συχνότητες που επιδρούν στην κατασκευή και βρίσκονται μέσα στο διάστημα [0,17] Hz, να μπορούν να εμφανιστούν σε αντίθεση π.χ. με έναν RTS που η μέγιστη δειγματοληψία που μπορεί να παρέχει είναι 5-6 Hz.

9.4 Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα

- Μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς της κατασκευής με συνδυασμό του αισθητήρα IBIS-S και ενός Total Station RTS προκειμένου να συγκριθούν τα αποτελέσματα μεταξύ τους.
- Εκπόνηση μελετών σχετικών με την συμπεριφορά της κατασκευής στη μεταβολή της θερμοκρασίας, σε σχέση με την πυκνότητα της κυκλοφορίας ή κατά πόσον επηρεάζεται από τους διερχόμενους συρμούς του μετρό στο υπέδαφος.
- Εκπόνηση μελέτης για την δυναμική συμπεριφορά της κατασκευής και σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις θεωρητικές τιμές της κατασκευής καθώς στην παρούσα διπλωματική δεν κατέσται εφικτό να ληφθούν τα συγκεκριμένα στοιχεία από τους αρμόδιους.
- Εκπόνηση μελέτης για την δυναμική συμπεριφορά της κατασκευής υλοποιώντας διάφορα σενάρια διάβασης πεζών.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

A 1. Παράδειγμα Στατικής Ανάλυσης Γέφυρας

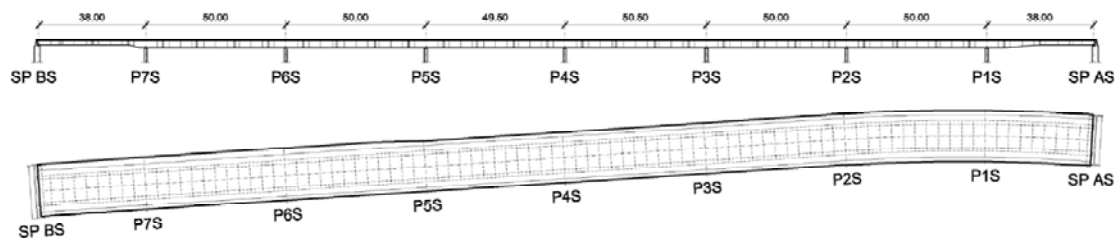
Σε πολλές χώρες, είναι υποχρεωτική η παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο καινούργιων γεφυρών ή υφιστάμενων στις οποίες γίνεται έλεγχος της αντοχής τους πριν τεθούν σε λειτουργία. Οι έλεγχοι αυτοί αποτελούν μια επίπονη διαδικασία ρουτίνας ελέγχοντας τις μετατοπίσεις συγκεκριμένων σημείων πάνω στην γέφυρα προκειμένου να αποτιμηθεί η κατάσταση της, ενώ απαιτείται διακοπή της κυκλοφορίας για μεγάλο χρονικό διάστημα μέχρι να ολοκληρωθούν οι εργασίες. Έτσι η τεχνολογία του αισθητήρα IBIS-S, δηλαδή της μέτρησης από απόσταση και της δυνατότητας να ελέγχει στατικά τις κατασκευές, προσφέρει μια ελκυστική εναλλακτική λύση στο πρόβλημα.



Σχ. A.1: Οι νέοι κλάδοι πάνω από την Λ. Forlanini (Μιλάνο, Ιταλία)

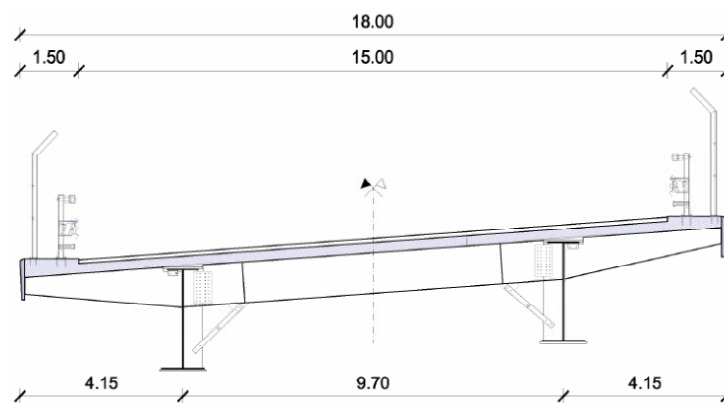
Fig. A.1: Aerial view of the new viaducts crossing Forlanini Avenue (Milan, Italy)

Η υπό μελέτη γεφυρά του πειράματος, η οποία θα ελεγχθεί στατικά για τα φορτία που παραλαμβάνει, ανήκει σε κόμβο αυτοκινητοδρόμου ο οποίος κατασκευάστηκε πρόσφατα όπου βρίσκεται κοντά με την Λεωφόρο Forlanini στο Μιλάνο και είναι ο κύριος οδικός άξονας που οδηγεί στο αεροδρόμιο Linate. Η νέα υποδομή παρουσιάζεται στην Σχήμα A.1 και αποτελείται από δύο γέφυρες οι οποίες διέρχονται πάνω από την Λεωφόρο Forlanini. Ειδικότερα οι μετρήσεις θα γίνουν στην νότια γέφυρα για την οποία παρατίθενται στην συνέχεια σχέδια οριζοντιογραφίας, όψης και μίας τυπικής διατομής.



Σχ. Α.2: Όψη και οριζοντιογραφία της υπό μελέτης γέφυρας (m)

Fig. A.2: Elevation and plan of the investigated viaduct (m)



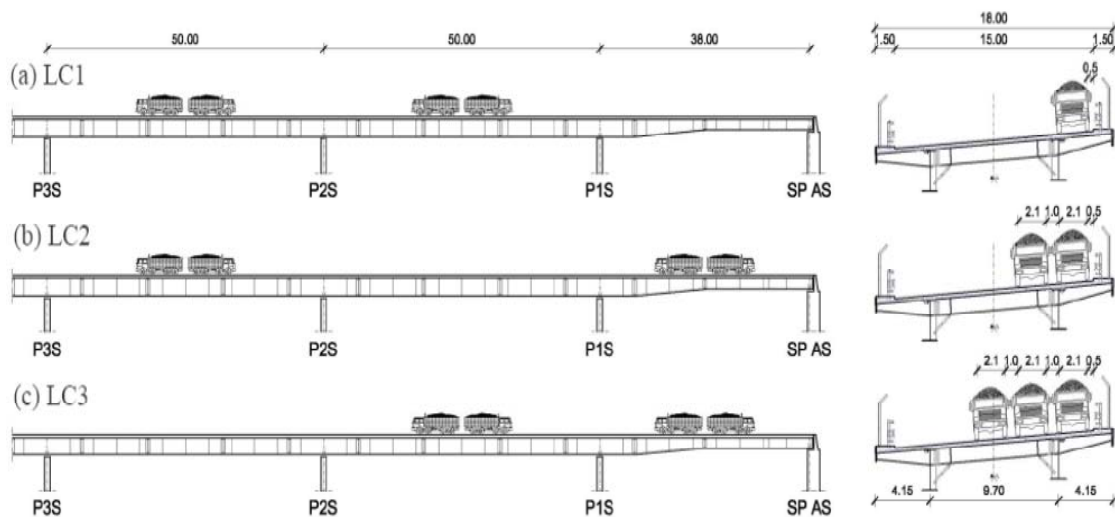
Σχ. Α.3: Τυπική διατομή της υπό μελέτης γέφυρας (m)

Fig. A.3: Typical cross-section of the investigated bridge (m)

Πρόκειται για μια σύμμικτη κατασκευή, η οποία αποτελείται από σκυρόδεμα και ατσάλι με συνολικό μήκος 376.0 m. Τα ενδιάμεσα ανοίγματα μεταξύ των πυλώνων είναι οκτώ, με μήκος περίπου 50.0 m το καθένα με εξαίρεση τα δύο τελευταία που το μήκος τους είναι 38.0 m. Είναι μία αρθρωτή γέφυρα κλιμακωτή με δοκούς, όσον αφορά τον τύπο της, ενώ εγκάρσια χαρακτηρίζεται από τις δύο διαμήκεις δοκούς πάνω στις οποίες είναι τοποθετημένες δοκοί σε απόσταση 4.167 m μεταξύ τους. Οι διαμήκεις δοκοί έχουν ύψος 2.55 m. Πάνω στον σκελετό αυτό είναι κατασκευασμένο το καταστρωμα της γέφυρας που αποτελείται από πλάκα σκυροδέματος πάχους 0.25 m. Το μέγιστο πλάτος της γέφυρας είναι 18.0 m με κυκλοφορούμενο κομμάτι 15.0 m.

Περνώντας στο μετρητικό κομμάτι της διαδικασίας για τον έλεγχο της γέφυρας, χρειαζόταν να μετρήσουμε όπως προείπαμε τις κατακόρυφες μετατοπίσεις της σε πραγματικό χρόνο αφού πρώτα με κάποιο μέσο υπάρξει φόρτιση των στοιχείων της. Για να επιτευχθεί αυτό χρησιμοποιήθηκαν οχήματα των οποίων ήταν γνωστό το βάρος και τοποθετήθηκαν σε προκαθορισμένα σημεία, όπου στην συνέχεια μετρήθηκαν οι κατακόρυφες μετατοπίσεις στο μέσον των ανοιγμάτων της γέφυρας παραδοσιακά με επιταχυνσιόμετρα τύπου LVDT Schaewitz (model E 200 HQ) και χρησιμοποιώντας τον αισθητήρα IBIB-S.

Για την φόρτιση της κατασκευής σε πραγματικό χρόνο χρησιμοποιήθηκαν 12 «διαξονικά» φορτηγά, των οποίων το βάρος κυμαινόταν μεταξύ 415 – 440 kN. Τα οχήματα τοποθετήθηκαν σε τρεις διαφορετικές διατάξεις οι οποίες αποσκοπούσαν να δημιουργηθούν τρία διαφορετικά σενάρια για το πείραμα. Τα τρία αυτά σενάρια παρουσιάζονται σχηματικά παρακάτω στο Σχήμα A.4 όπου φαίνονται καθαρά οι θέσεις των οχημάτων



Σχ. A.4: Σχηματικά οι αναλυόμενες συνθήκες φόρτισης (m)

Fig. A.4: Schematic of the investigated load conditions (m)



Σχ. A.5: Τυπική διάταξη των οχημάτων κατά την διάρκεια των μετρήσεων

Fig. A.5: Typical arrangement of the vehicles during live load tests

πάνω στην γέφυρα. Όπως παρατηρούμε στο παραπάνω σχήμα σε κάθε ένα από τα τρία σενάρια που πραγματοποιήθηκαν πάντα η φόρτιση γινόταν σε δύο «ανοίγματα» της γέφυρας, με τους πίσω άξονες των οχημάτων να βρίσκονται πάντα στο μέσον του «ανοίγματος». Αξίζει να αναφερθεί ακόμη ότι λόγω της αυξημένης εγκάρσιας κλίσης που παρουσιάζει η γέφυρα, προτιμήθηκε τα οχήματα να μὴν τοποθετηθούν στο κέντρο της, μεταξύ των δύο διαδοκίδων, αλλά να τοποθετηθούν στο άκρο της προκειμένου να ελεγχθεί η ροπή στρέψης.

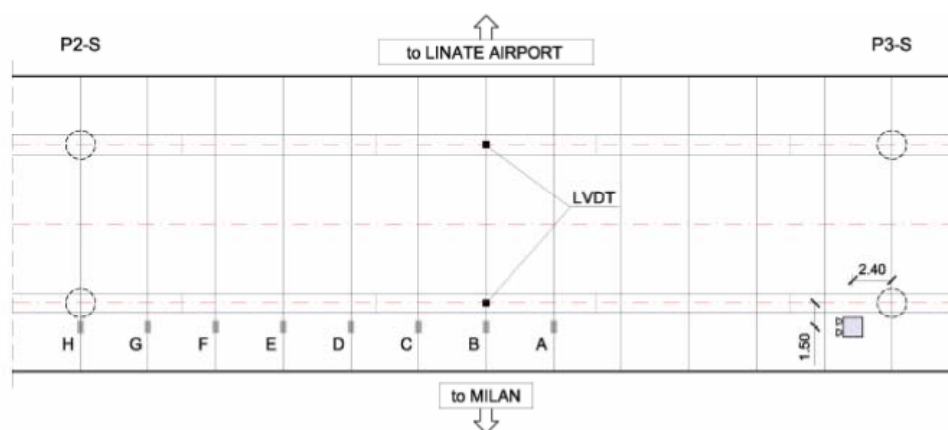


Σχ. A.6: Το κατάστρωμα της γέφυρας από κάτω

Fig. A.6: Bottom view of the bridge deck

Το κατάστρωμα της γέφυρας βλέποντας το από κάτω (Σχήμα A.6) είναι μια σύνθετη κατασκευή η οποία βοήθησε σε μεγάλο βαθμό στην λήψη των

μετρήσεων διότι είχε μεγάλη ανακλαστικότητα για τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα καθώς αποτελούταν από ένα μεγάλο σύνολο ακμών που σχημάτιζαν τα διαμήκη και τα εγκάρσια στοιχεία της. Για την αποφυγή επικάλυψης των μετρήσεων του αισθητήρα λόγω συμβολής πολλών σημείων τα οποία βρίσκονταν σε διαφορετικές ανακλαστικές ζώνες αλλά στην ίδια περίπου απόσταση προτιμήθηκε να τοποθετείται προς το εξωτερικό της κατασκευής. Σε όλες τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν τα υπο μελέτη σημεία βρίσκονταν σε απόσταση μέχρι των 150.0 m, και το όργανο λειτουργούσε με συχνότητα δειγματοληψίας 10 Hz.

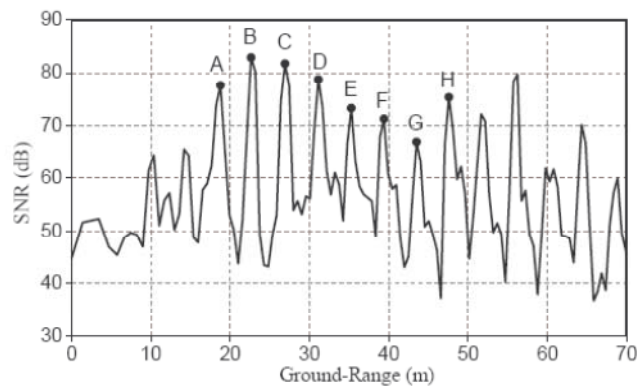


Σχ. A.7: Θέσεις του radar και των LVDT κατά τις μετρήσεις LC1 και LC2

Fig. A.7: Radar and LVDT position in load test LC1 and LC2

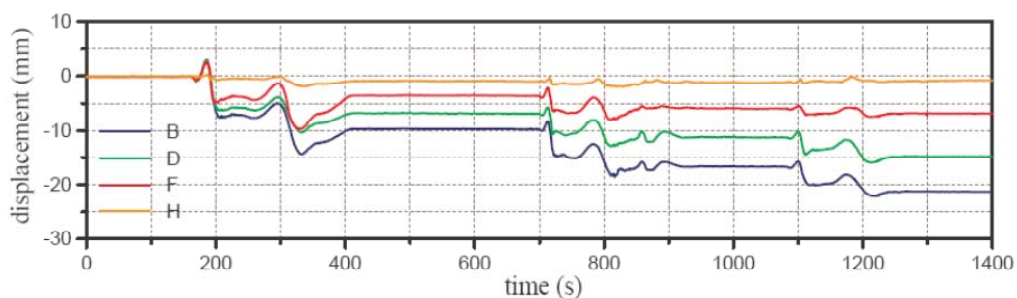
Κατά την διάρκεια των διατάξεων φόρτισης LC1 και LC2 (Σχήμα A.7), η θέση του αισθητήρα είχε προσαρμοστεί έτσι ώστε να λαμβάνει την μέγιστη ένταση από τις επιστροφές του radar που αντιστοιχούσαν στις θέσεις που ήταν τοποθετημένα τα επιταχυνσιόμετρα. Το Σχήμα A.8 παρουσιάζει τις επιστροφές του σήματος του radar σε σχέση με την οριζόντια απόσταση, στο οποίο διακρίνονται καθαρά κορυφές οι οποίες αποτελούν τις εγκάρσιες δοκούς της κατασκευής όπου έγινε η ανάκλαση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων χωρίς να υπάρχουν προβλήματα, πράγμα που φαίνεται από την ένταση των επιστροφών. Πρέπει να αναφερθεί πως οι μετατοπίσεις που προέκυψαν από την επεξεργασία των μετρήσεων του συστήματος IBIS-S αντιστοιχούν στη

ευθεία παρατήρησης του οργάνου όπως σημειώνονται τα σημεία στο Σχήμα A.4. Στο πρώτο διάγραμμα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετατοπίσεις κάποιων σημείων της κατασκευής συναρτήσει του χρόνου, όπου βλέπουμε την διαφορετική συμπεριφορά του κάθε σημείου ως προς το εύρος της, το οποίο επηρεάζεται από την θέση του, το οποίο ήταν αναμενόμενο. Ακόμη παρατηρούμε πως οι κινήσεις των σημείων κατά την διάρκεια του χρόνου είναι παρόμοιες και επηρεάζει το ένα το άλλο (Σχήμα A.9). Συγκρίνοντας μεταξύ του αποτελέσματος του radar και του LVDT για το μέσον του ανοίγματος παρατηρούμε πως υπάρχει μια υπέρβαση στα αποτελέσματα του radar ως αποτέλεσμα της ροπής στρέψης που δημιουργείται.



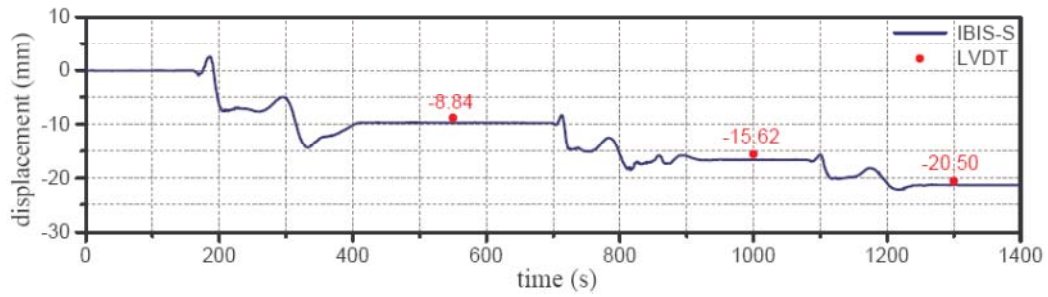
Σχ. A.8: Διάγραμμα σήματος radar κατά τις μετρήσεις LC1 και LC2

Fig. A.8: Ground range profile in load conditions LC1 and LC2



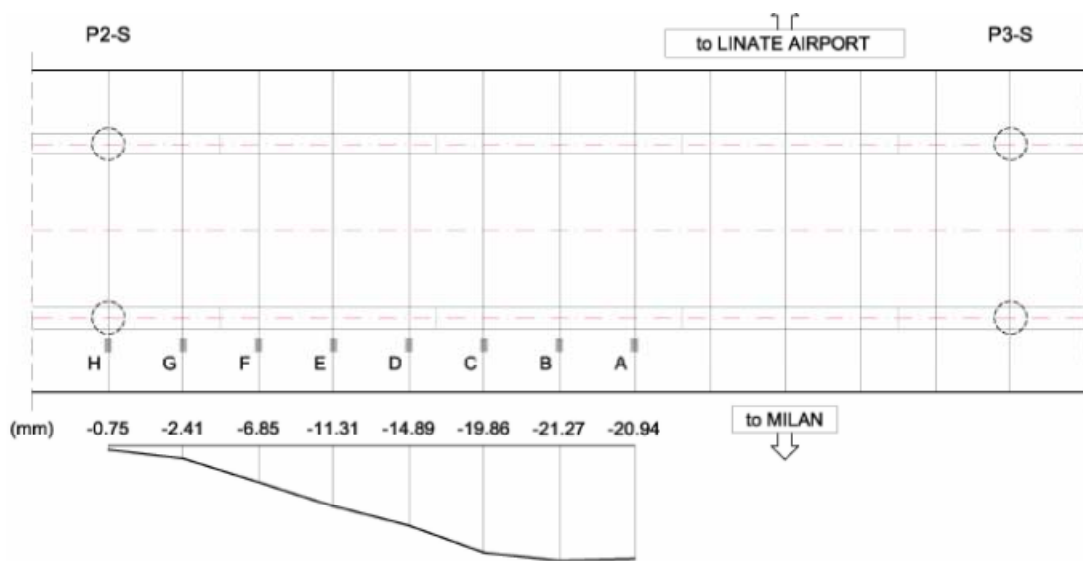
Σχ. A.9: Κατακόρυφες μετατοπίσεις απ' το radar στο χρόνο (LC1)

Fig. A.9: Progress in time of the vertical displacements measured by the radar (LC1)



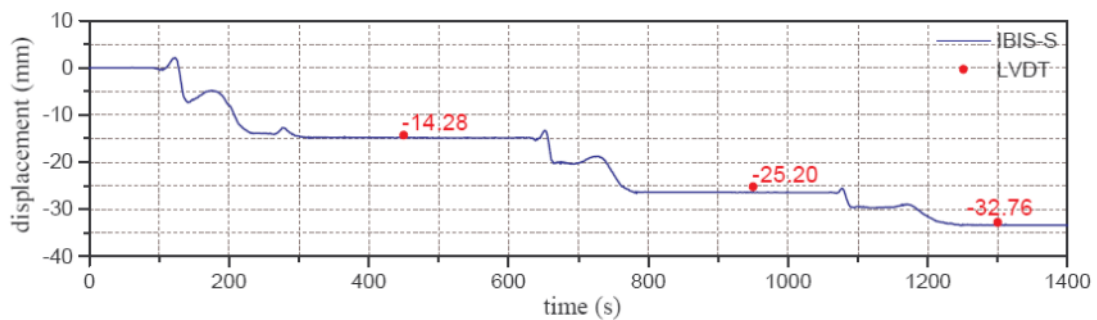
Σχ. A.10: Σύγκριση μεταξύ radar και επιταχυνσιόμετρου (LC1)

Fig. A.10: Comparison between radar and extensometer measurement (LC1)



Σχ. A.11: Παραμορφωμένη ελαστική γραμμή απ' το radar (LC1)

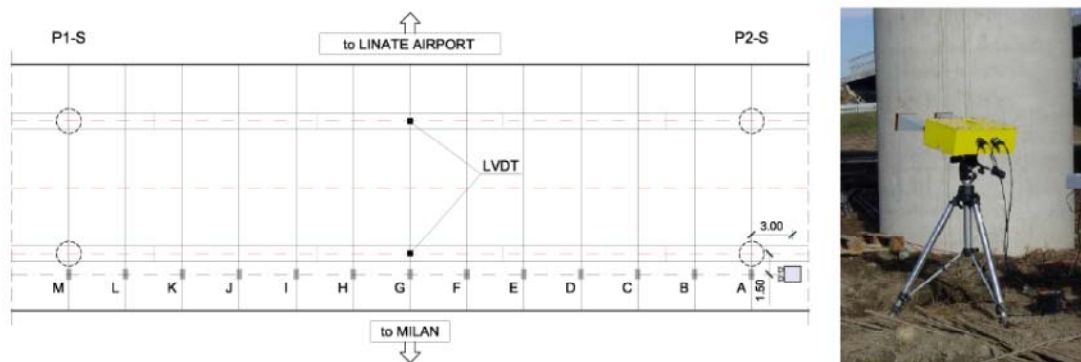
Fig. A.11: Deformed elastic curve provided by the radar (LC1)



Σχ. A.12: Σύγκριση μεταξύ radar και επιταχυνσιόμετρου (LC2)

Fig. A.12: Comparison between radar and extensometer measurement (LC2)

Η ελαστική γραμμή που παρουσιάζεται στο Σχήμα A.11 δεν έχει διαφορές από το σχήμα που αναμενόταν να έχει, όπως και τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις του δεύτερου σεναρίου (LC2) που τα βλέπουμε στο Σχήμα A.12.

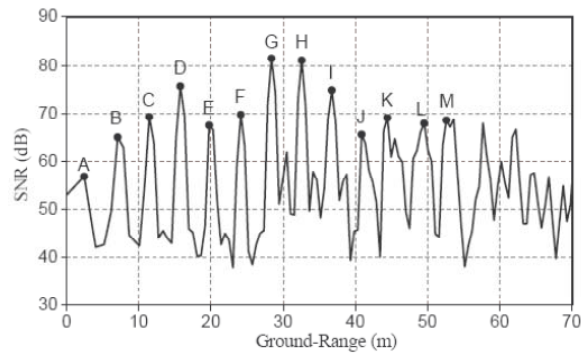


Σχ. A.13: Θέσεις του radar και των LVDT κατά την φόρτιση LC3

Fig. A.13: Radar and LVDT position in load condition LC3

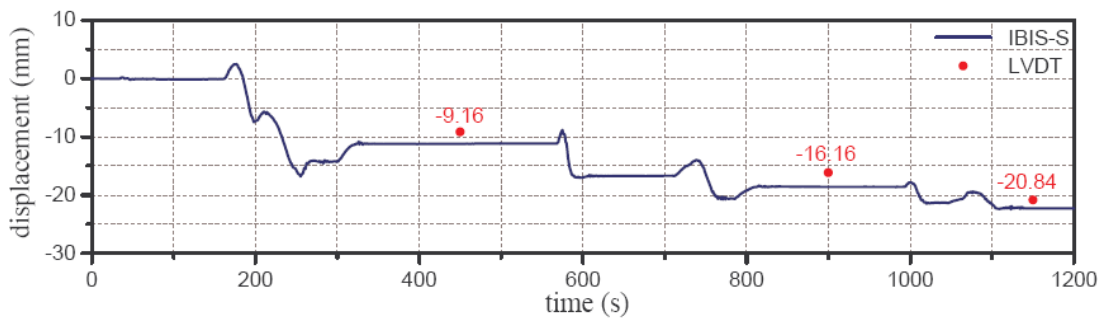
Στο τρίτο και τελευταίο σενάριο μετρήσεων ο δέκτης IBIS-S μετακινήθηκε δίπλα στον αριστερό πυλώνα P2-S όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα και βλέπουμε στην διπλανή εικόνα. Ο αισθητήρας μετακινήθηκε προκειμένου να υπάρξουν μετρήσεις για όλα τα στοιχεία της κατασκευής και να μπορέσει να κατασκευαστεί μία συνολική ελαστική γραμμή για το άνοιγμα μεταξύ των πυλώνων P1-S και P2-S.

Παρακάτω εμφανίζονται αντίστοιχα διαγράμματα με αυτά που αναλύσαμε πιο πάνω. Έτσι βλέπουμε στο Σχήμα A.14 πως οι επιστροφές του σήματος έχουν ικανοποιητική ένταση για όλα τα σημεία και μπορούμε με μεγάλη ευκολία να διακρίνουμε τα εγκάρσια τμήματα του καταστρώματος της γέφυρας. Ακόμη στο Σχήμα A.15 η σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων του radar σε σχέση με αυτά του επιταχυνσιόμετρου διαφέρει σε μεγαλύτερο βαθμό απ' ότι στο προηγούμενο διάγραμμα, το οποίο οφείλεται λόγω της ροπής στρέψης στην γέφυρα, όμως ενδέχεται να φταίει και η γεωμετρία λήψης των μετρήσεων. Στο τελευταίο σχήμα είναι σχεδιασμένη η ελαστική γραμμή η οποία παρουσιάζεται (μη συμμετρική) όπως αναμενόταν να είναι λόγω της κατασκευής (διαφορετικό μήκος ανοιγμάτων).



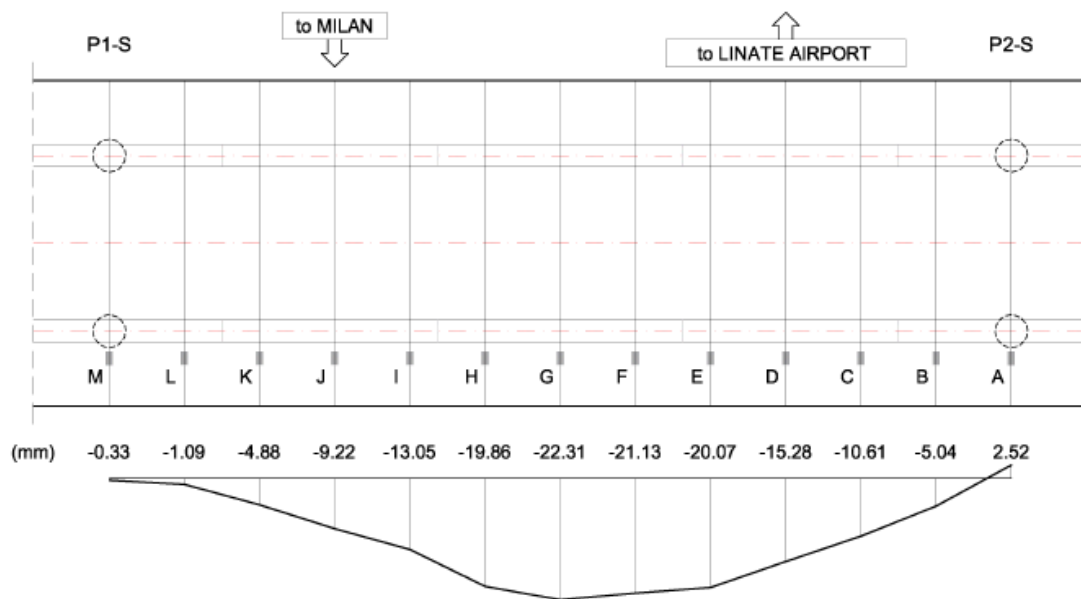
Σχ. A.14: Διάγραμμα σήματος radar κατά τις μετρήσεις LC3

Fig. A.14: Ground range profile in load conditions LC3



Σχ. A.15: Σύγκριση μεταξύ radar και επιταχυνσιόμετρου (LC3)

Fig. A.15: Comparison between radar and extensometer measurement (LC3)



Σχ. A.16: Παραμορφωμένη ελαστική γραμμή απ' το radar (LC3)

Fig. A.16: Deformed elastic curve provided by the radar (LC3)

Στο παράδειγμα αυτό παρουσιάστηκαν αποτελέσματα μετρήσεων του αισθητήρα IBIS-S από ένα πείραμα που έγινε σε έναν νέο κλάδο γέφυρας στην Ιταλία. Οι μετρήσεις βασίστηκαν στην παρατήρηση των κατακόρυφων μετατοπίσεων της κατασκευής σε συγκεκριμένα σημεία, όπως αυτές καταγράφηκαν από το παραπάνω σύστημα radar και από παραδοσιακά επιταχυνσιόμετρα. Τα συμπεράσματα από το παρόν πείραμα ήταν τα παρακάτω:

1. Ο αισθητήρας είχε εξαιρετική σταθερότητα στην λειτουργία του κατά την διάρκεια συνεχόμενων μετρήσεων.
2. Οι μετατοπίσεις που κατέγραψε το radar ήταν παρόμοιες με αυτές που αναμένονταν.
3. Οι μετατοπίσεις που καταγράφησαν ήταν τόσο ακριβείς όσο αυτές που καταγράφησαν από τα επιταχυνσιόμετρα.

B. IBIS-S

B 1. Τα Μέρη του Συστήματος

Το σύστημα αποτελείται από ένα σάκο, βάρους περίπου έξι κιλών και διαστάσεων 20 x 20 x 80 cm, μέσα στον οποίο βρίσκεται ο τρίποδας του αισθητήρα και μία μαύρη βαλίτσα, βάρους περίπου σαράντα κιλών και διαστάσεων 55 x 30 x 80 cm, μέσα στην οποία βρίσκονται τα υπόλοιπα μέρη του συστήματος που είναι:

- Θήκη φύλαξης του τρίποδα



- Ο τρίποδας



- Η βαλίτσα του συστήματος



- Ο αισθητήρας IBIS-S



- Το τηλεσκόπιο του αισθητήρα



- Οι κεραίες του αισθητήρα



- Καλώδιο USB για σύνδεση του αισθητήρα στον φορητό υπολογιστή



- Καλώδιο για σύνδεση του αισθητήρα με τις μπαταρίες



- Σύστημα περιστροφής του αισθητήρα σε τρεις άξονες



- Ο φορητός υπολογιστής (Panasonic CF 19)



- Δύο μπαταρίες των 12V

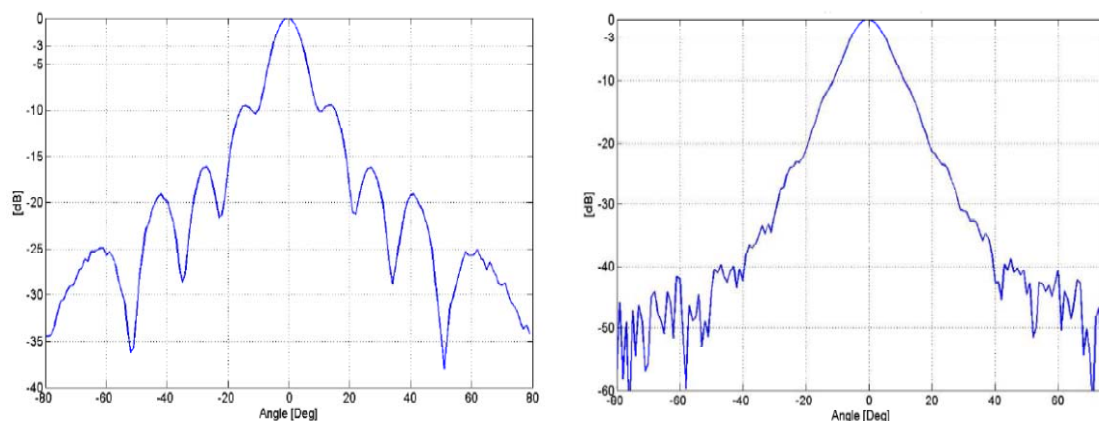


- Ο φορτιστής των μπαταριών
- Το καλώδιο παροχής ενέργειας στον φορητό υπολογιστή από το δίκτυο
- Το καλώδιο παροχής ενέργειας στον φορητό υπολογιστή από τις μπαταρίες



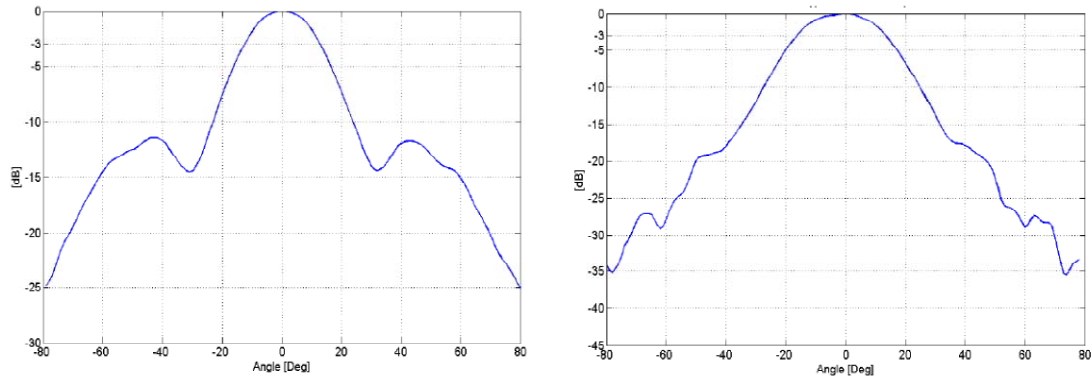
B 2. Κεραίες του Συστήματος

Τα διαγράμματα των υπόλοιπων διαθέσιμων κεραιών είναι τα κάτωθι και συνοδεύονται από έναν πίνακα, στον οποίο παρουσιάζονται οι γωνιακές ζώνες διάδοσης της ακτινοβολίας.



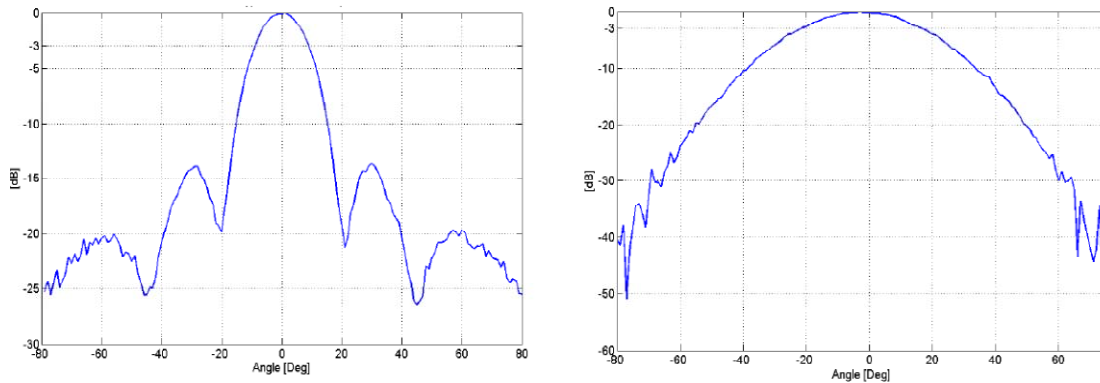
Σχ. B.1: Πρότυπο κατά τον Κατακόρυφο και Οριζόντιο Άξονα, H23

Fig. B.1: Vertical and Horizontal plane pattern, H 23



Σχ. Β.2: Πρότυπο κατά τον Κατακόρυφο και Οριζόντιο Άξονα, Η15

Fig. B.2: Vertical and Horizontal plane pattern, H 15



Σχ. Β.3: Πρότυπο κατά τον Κατακόρυφο και Οριζόντιο Άξονα, Η13

Fig. B.3: Vertical and Horizontal plane pattern, H 13

A/A	Τύπος Κεραίας	Κέρδος	Κατακόρυφος Άξονας	Οριζόντιος Άξονας
		[dBi]	[deg]	[deg]
1	IBIS - H 23	-3dB	10	11
		-10dB	23.5	23
2	IBIS - H 15	-3dB	25	29
		-10dB	15	49
3	IBIS - H 13	-3dB	18	38
		-10dB	13.5	30

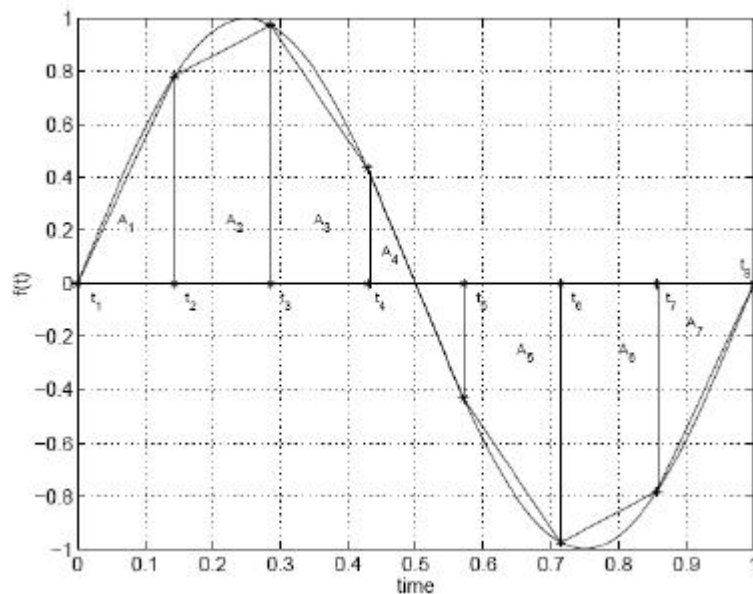
Πιν. Β.1: Πίνακας σύγκρισης προτύπων

Tab. B.1: Comparison Table of patterns

Γ. Μετασχηματισμοί Fourier

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

Ο Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier (DFT) είναι ο πρακτικός τρόπος υπολογισμού του συχνοτικού περιεχομένου μιας πεπερασμένης ακολουθίας. Συνήθως τα δεδομένα που λαμβάνουμε από μετρήσεις είναι διακριτά, σε μη σταθερό μεταξύ τους χρονικό διάστημα και όχι συνεχή. Βασίζεται στην μέθοδο του τραπεζίου, σύμφωνα με τον οποίο ανά δύο οι προβολές των διακριτών σημείων στον άξονα x σχηματίζουν ένα τραπέζιο.



Σχ. Γ.1: Σχηματική Αναπαράσταση του Κανόνα του Τραπεζίου

Fig. Γ.1: Schematic Representation of Trapezoidal Rule

Ο Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier (DFT) οδηγεί στον υπολογισμό του φάσματος συχνοτήτων με N τιμές και δίνεται από τη σχέση:

$$F_k = F \cdot \left(\frac{k}{N \cdot T_s} \right) = \sum_{n=0}^{N-1} f \cdot (n \cdot T_s) \cdot e^{-i2\pi nk/N} \quad (\Gamma.1)$$

όπου

- F_k σήμα με N διακριτές τιμές που αποτελεί το μετασχηματισμό DFT ενός άλλου σήματος N διακριτών τιμών, f_n , με $k = 0, \dots, N-1$
- N το πλήθος των διακριτών τιμών του σήματος που αναλύεται
- T_s το χρονικό διάστημα μεταξύ διαδοχικών τιμών.

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

$$f_s = \frac{1}{N \cdot T_s} \quad (\Gamma.2)$$

Η γενικότερη μορφή του DFT είναι:

$$F(f) = F_r(f) + iF_i(f) \quad (\Gamma.3)$$

όπου

$F_r(f)$ το πραγματικό μέρος του μετασχηματισμού και

$F_i(f)$ το φανταστικό μέρος

Η ακολουθία από όπου υπολογίζεται ο Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier (DFT) αποδεικνύεται ότι μπορεί να ανακατασκευαστεί από τα δείγματα στη συχνότητα χρησιμοποιώντας τον Αντίστροφο Διακριτό Μετασχηματισμό Fourier (iDFT) με βάση την σχέση:

$$f_k = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} f \cdot (n \cdot T_s) \cdot e^{i2\pi nk/N} \quad (\Gamma.4)$$

όπου

- f_k ακολουθία με N διακριτές τιμές που αποτελεί τον αντίστροφο μετασχηματισμό DFT του σήματος N διακριτών τιμών, F_n , με $k = 0, \dots, N-1$
- N το πλήθος των διακριτών τιμών του σήματος
- T_s το χρονικό διάστημα μεταξύ διαδοχικών τιμών.

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

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

$$\frac{1}{2 \cdot t_r} \leq f \leq \frac{N}{2 \cdot t_r} \quad (\Gamma.5)$$

όπου

- t_r είναι το συνολικό διάστημα που καλύπτουν οι παρατηρήσεις
- N το μήκος της χρονοσειράς.

Το ανώτατο όριο του εύρους του διαστήματος των συχνοτήτων $\frac{N}{2 \cdot t_r}$ εκφράζει τη συχνότητα Nyquist f_c , που αποτελεί τη μέγιστη συχνότητα του φάσματος. Ο υπολογισμός του φάσματος Fourier για συχνότητες μεγαλύτερες από $\frac{N}{2 \cdot t_r}$ μπορεί να προκαλέσει ψεύδιση (aliasing). Ο όρος χαρακτηρίζει το

φαινόμενο όπου κάθε συχνότητα εκτός του διαστήματος $(-f_c, f_c)$ μεταφέρεται εσφαλμένα εντός αυτού. Για ισαπέχοντα δεδομένα η συχνότητα Nyquist είναι ίση με $0.5 \cdot f_s$, όπου f_s είναι η συχνότητα δειγματοληψίας.

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

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

$$f(t) = \frac{\alpha_0}{2} + c_n \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t + \theta_n) \quad (Γ.6)$$

όπου

α_0 η τιμή του φάσματος συχνοτήτων που αντιστοιχεί σε μηδενική συχνότητα

c_n το μέγεθος του φάσματος συχνοτήτων και ισούται με:

$$c_n = \sqrt{F_r(f_n)^2 + F_i(f_n)^2} \quad (Γ.7)$$

θ_n η διαφορά φάσης και υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\theta_n = \tan^{-1} \left(-\frac{F_i(f_n)}{F_r(f_n)} \right) \quad (Γ.8)$$

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική

1. Adrian Biran και Moshe Breiner, Matlab για Μηχανικούς
2. Α. Φωτίου – Χ. Πικριδάς, Το Δορυφορικό Σύστημα GPS, Θεσσαλονίκη 2004
3. Βασιλίας Γκίκας και Σταμάτης Δασκαλάκης, Παρακολούθηση και Ανάλυση Δυναμικής Συμπεριφοράς Μεταλλικών Κατασκευών με Χρήση Γεωδαιτικής Μεθοδολογίας, 6^ο Εθνικό Συνέδριο Μεταλλικών Κατασκευών, 2008
4. Constantine A. Balanis, Κεραίες: Ανάλυση και Σχεδίαση, 2005
5. Γεωργίου Θ. Μιχάλτσου, Ελαφρές Μεταλλικές Κατασκευές, Αθήνα 2004
6. Γεώργιος Νησωτάκης, Διερεύνηση Λειτουργίας του Γεωδαιτικού Σταθμού Leica TCA-1800 για την Παρακολούθηση Κατασκευών σε Συνθήκες Ταλάντωσης με Χρήση Σεισμικής Τράπεζας Ακριβείας και Μεθόδων Φασματικής Ανάλυσης, Αθήνα 2008
7. Διονύσης Παραδείσης, Σημειώσεις Δορυφορικής Γεωδαισίας, Αθήνα 2000
8. Ευάγγελος Αστροειδής και Δημήτριος Εγγλέζος, Ενόργανη Παρακολούθηση Παραμορφώσεων του Τείχους της Ακρόπολης με Αισθητήρες Οπτικών Ινών – Σύγκριση Μετρήσεων και Αναλυτικών Προβλέψεων, 3ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας 5–7 Νοεμβρίου, 2008
9. Ιωάννης Ι. Κατσικαδέλης, Δυναμική των Κατασκευών (Τόμοι I & II), Αθήνα 2002
10. Μαλαχίας Γ. Νικόλαος Αρχές Ραντάρ & Ηλεκτρονικού Πολέμου στην Εποχή της Πληροφορικής, Αθήνα 2004
11. Μιχαήλ Γ. Σακελλαρίου, Γεωτεχνική Μηχανική, Αθήνα 2005
12. Μουστακίδης Γεώργιος, Βασικές Τεχνικές Ψηφιακής Επεξεργασίας Σημάτων, 2004

13. Πρόδρομος Δ. Ζάραρης, Μέθοδοι Υπολογισμού Σιδηροπαγούς Σκυροδέματος, 2004
14. Στυλιανή Ι. Πυθαρούλη, Μελέτη της Μακροχρόνιας Παράμόρφωσης του Φράγματος Κρεμαστών με Βάση Ανάλυση Γεωδαιτικών Δεδομένων και Μεταβολών Στάθμης Ταμιευτήρα, Πάτρα 2007
15. Χ. Σαουρίδης – Π. Καζατζής – Μ. Λεβέντης - B. Remy, Καλωδιωτές Γέφυρες της Airbus

Ξενόγλωσση

1. Adrian K. Fung, Microwave Scattering and Emission Models and their Applications, 1994
2. August W. Rihaczek and Stephen J. Hershkowitz, Theory and Practice of Radar Target Identification
3. Charles G. Salmon, Steel Structures: Design and Behavior: Emphasizing Load and Resistance Factor Design, 1996
4. Ramon Nitzberg, Radar Signal Processing and Adaptive Systems, 1999
5. Roger J. Sullivan, Microwave Radar: Imaging and Advanced Concepts, 2000
6. Ryall M. J. - Parke G.A.R – Harding J.E., The Manual of Bridge Engineering, 2000
7. Wai-Fah Chen and Lian Duan, Bridge Engineering Handbook
8. Βασίλης Γκίκας και Σταμάτης Δασκαλάκης, Radar-Based Measurements of the Oscillation Parameters of Large Civil Engineering Structures, Hong Kong 2011

Διαδίκτυο

1. <http://courses.cn.ntua.gr/course/view.php?id=27>
2. <http://el.wikipedia.org>

3. <http://www.garmin.com>
4. <http://www.geo.mtu.edu>
5. <http://www.idscompany.it>
6. <http://www.imetrum.com>
7. <http://www.jpl.nasa.gov>
8. <http://www.metrica.gr>
9. <http://www.sandia.gov>

