



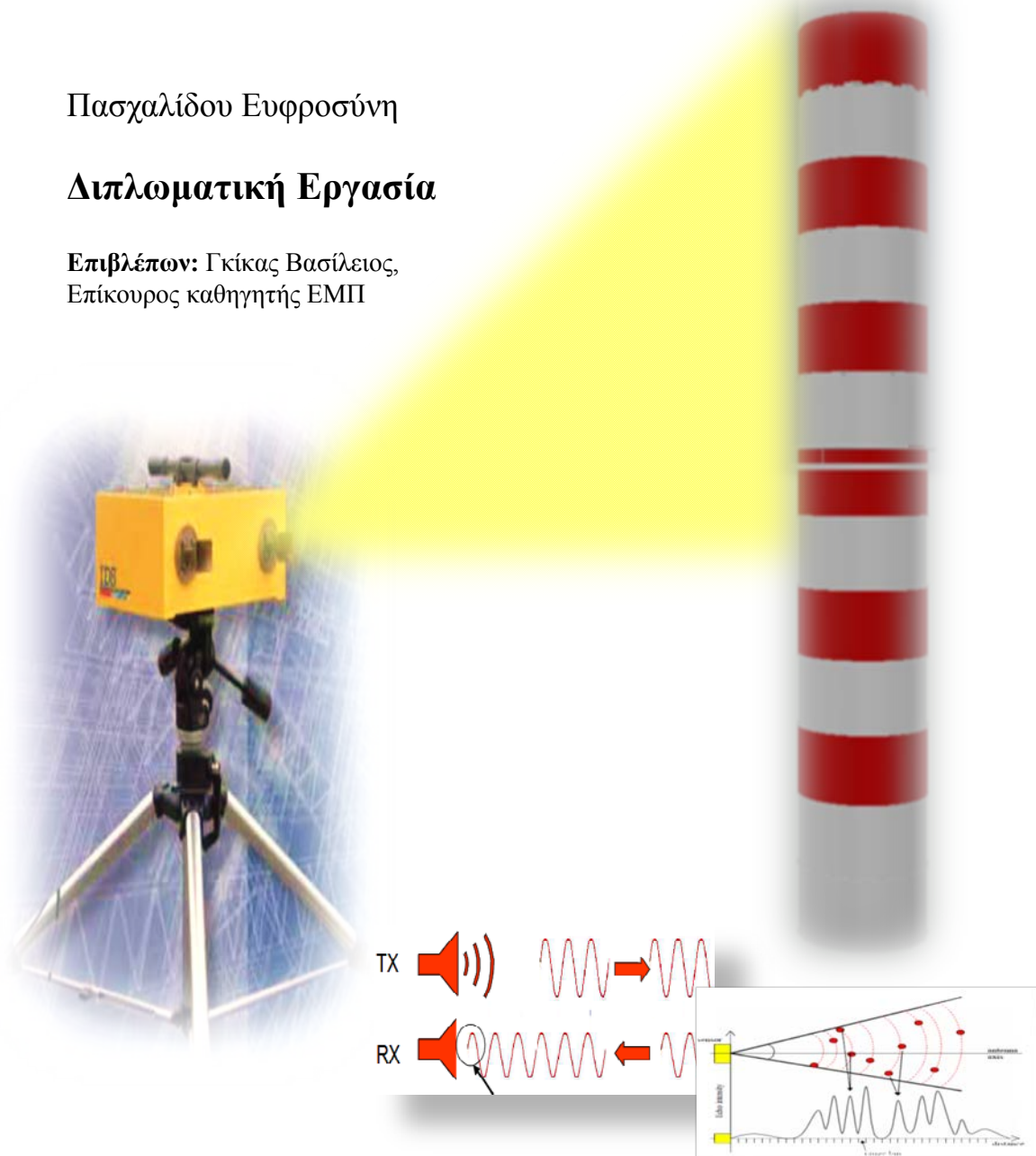
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών
Τομέας Τοπογραφίας
Εργαστήριο Γενικής Γεωδαισίας

**ΜΕΛΕΤΗ ΚΡΑΔΑΣΜΩΝ ΠΑΡΑΚΑΜΠΗΤΗΡΙΟΥ ΚΑΠΝΟΔΟΧΟΥ ΣΕ ΟΡΙΑΚΕΣ
ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΟΥ ΑΕΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ
ΜΙΚΡΟΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑΣ**

Πασχαλίδου Ευφροσύνη

Διπλωματική Εργασία

Επιβλέπων: Γκίκας Βασίλειος,
Επίκουρος καθηγητής ΕΜΠ



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στο τέλος εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θεωρώ υποχρέωσή μου να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που ήταν δίπλα μου και με βοήθησαν, ο καθένας με το δικό του τρόπο, σε όλες τις φάσεις των προσπαθειών μου για την ολοκλήρωσή της.

Αρχικά, ευχαριστώ θερμά τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Βασίλειο Γκίκα για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου τη συγκεκριμένη εργασία, για τις γνώσεις που μου προσέφερε, την υπομονή που επέδειξε στο να λύσει τις απορίες μου και τις πολύτιμες συμβουλές στη συγγραφή της εργασίας ώστε να βελτιωθεί σημαντικά η τελική της μορφή.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους υποψήφιους διδάκτορες της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου Γεώργιο Πηγιώτη και Αθανάσιο Μπίμη αλλά και τη συνάδελφο Αγγελική Ανδρουλάκη για την καθοριστική βοήθειά τους στις μετρήσεις πεδίου, στο χειρισμό του οργάνου που χρησιμοποιήθηκε, την καθοδήγησή τους και τις ουσιαστικές συμβουλές τους κατά το στάδιο της επεξεργασίας των μετρήσεων.

Ιδιαίτερη αναφορά οφείλω στους μηχανικούς του Ατμοηλεκτρικού Σταθμού του Λαυρίου της Δ.Ε.Η. Α.Ε και συγκεκριμένα στον Διευθυντή του κλάδου κ. Βακρινό Γ., τον Τομεάρχη Συντήρησης κ. Οικονομίδα Α., τον Τομεάρχη Λειτουργίας κ. Μαλκάζα Α. και τον κ. Καραγιάννη Ε., για την παροχή της άδειας εκτέλεσης του πειράματος, τη συμβολή τους στις εργασίες πεδίου αλλά και για τις πληροφορίες που παρείχαν για την παρακαμπτήριο καπνοδόχο που ήταν το αντικείμενο μελέτης.

Ευχαριστώ από καρδιάς τους γονείς μου Ειρήνη και Πασχάλη Πασχαλίδη, την αδερφή μου Κατερίνα και τη γιαγιά μου Ευφροσύνη Πυλαρινού για την αμέριστη βοήθεια τους, τη συμπαράστασή τους, την ηθική και ψυχολογική υποστήριξη σε κάθε δύσκολο ή εύκολο στάδιο της ζωής μου. Εύχομαι κάποια μέρα να τους κάνω περήφανους. Τέλος, ευχαριστώ τους φίλους και συγγενείς μου Διονύση, Χρυσούλα, Ευαγγελία, Χρύσα που με ενθάρρυναν στην προσπάθειά μου και ιδιαίτερα σε κάθε μου δυσκολία.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς της παρακαμπτήριου καπνοδόχου της μονάδας IV του Ατμοηλεκτρικού Σταθμού του Λαυρίου της ΔΕΗ ΑΕ σε οριακές συνθήκες φόρτισης με τη χρήση επιγείου συστήματος radar μικροκυματικής συμβολομετρίας (IBIS-S). Ειδικότερα, μελετάται η κινηματική συμπεριφορά της κατασκευής σε λειτουργία ανοικτού κύκλου πλήρους φόρτισης του αεροστροβίλου και απώτερο στόχο τη μελέτη της δομοστατικής συμπεριφοράς της κατασκευής και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν με παλαιότερες μετρήσεις.

Για τη μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς της καπνοδόχου προσδιορίζονται τα χαρακτηριστικά της ταλάντωσης (μετατόπιση, φάσμα συχνοτήτων ταλάντωσης, επιτάχυνση) της κατασκευής στις προκαθορισμένες συνθήκες. Στα πλαίσια των εργασιών πεδίου πραγματοποιήθηκαν πέντε ομάδες μετρήσεων κυμαινόμενης διάρκειας καθώς το φορτίο της μηχανής λαμβάνει συγκεκριμένες τιμές.

Η επεξεργασία των δεδομένων που συλλέχθηκαν γίνεται εκ των υστέρων με τη βοήθεια του προγράμματος IBIS Data Viewer. Επιλέγονται για ανάλυση έξι περίπου ισαπέχοντα σημεία με μεγάλη ανακλαστικότητα καθ' ύψος της καπνοδόχου. Πραγματοποιείται ανάλυση στα πεδία του χρόνου και των συχνοτήτων και προκύπτει ότι η κύρια συχνότητα ταλάντωσης της κατασκευής είναι 19.85 Hz, το εύρος μετακίνησης του χαμηλότερου παρατηρούμενου σημείου (H=25.3 m) είναι 0.8 mm ενώ του υψηλότερου σημείου (H=78.4 m) είναι 2.0 mm. Τέλος, η μέγιστη τιμή μετατόπισης φτάνει περίπου τα 6.0 mm στο υψηλότερο παρατηρούμενο σημείο. Σημειώνεται πως τα συγκεκριμένα αποτελέσματα προκύπτουν όταν το φορτίο της μηχανής λαμβάνει τη μέγιστη τιμή (110 MW).

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη συγκεκριμένη μελέτη, συγκρίνονται με αυτά που διεξήχθησαν από τις μετρήσεις της εταιρίας ATEA Environment κατά την περίοδο 2000. Οι συχνότητες επιτάχυνσης που αντιστοιχούν στα 11.4 Hz, 19.8 Hz, 50.0 Hz εμφανίζονται ταυτόχρονα και στις δύο σειρές μετρήσεων. Επιπλέον, οι διαφορές των μέσων τιμών επιταχύνσεων μεταξύ των δύο σειρών μετρήσεων στα τρία ύψη που συγκρίνονται είναι 0.3 m/s^2 , -0.7 m/s^2 , -0.4 m/s^2 , αντίστοιχα.

ABSTRACT

The aim of this diploma thesis is to study the dynamic behavior of the bypass stack, Unit IV of the Lavrion Thermal Power Plant operated by the Public Power Corporation of Greece with the use of ground-based microwave radar interferometry technique (IBIS-S system). Particularly, experimental work was undertaken with the air turbine operating at open cycle mode and maximum machine power with the ultimate aim to study the structural behavior of the construction and evaluation of the results obtained with previous measurements.

In order to study the dynamic behavior of the stack and to draw conclusions about the vibration problems that occur under marginal operating condition it is necessary to identify the characteristics of the oscillation (displacement, oscillation frequency spectra, acceleration) of construction to the prescribed conditions. In the fieldwork were recorded five groups of measurements of variable duration as the machine load has specific values.

The processing of the data which collected is undertaken retrospectively using the IBIS Data Viewer compute software. Six approximately equidistant points with high reflectivity are selected for analysis from the bottom to the top of the stack. Subsequently, analysis performs in the time and frequency domain and reveal that the dominant oscillation frequency of the structure is 19.85 Hz, the movement range of the lowest observed point (H=25.3 m) is 0.8 mm while the highest point (H=78.4 m) is 2.0 mm. Finally, the maximum displacement reaches approximately 6.0 mm at the highest observed point. It is noted that these results indicate when the machine load takes the maximum value (110 MW).

Results generated from this study are compared with those carried out by measurements of the ATEA Environment Company during the period 2000. The acceleration frequencies corresponding to 11.4 Hz, 19.8 Hz, 50.0 Hz are displayed simultaneously on both series of measurements. In addition, the differences in acceleration mean values between two series of measurements at three comparable heights are 0.3 m/s^2 , -0.7 m/s^2 , -0.4 m/s^2 respectively.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	i
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	ii
ABSTRACT	iii
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	iv
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	viii
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ	x
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΜΕΛΕΤΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ	4
1.1 Εισαγωγή	4
1.2 Αναγκαιότητα της Διαδικασίας Παρακολούθησης της Δομικής Ακεραιότητας Τεχνικών Έργων	4
1.3 Εξωγενείς Παράγοντες Δυναμικής Συμπεριφοράς Τεχνικών Έργων	7
1.3.1 Σεισμική δράση	8
1.3.2 Άνεμος	8
1.3.3 Μεταβολές της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος	9
1.4 Μέθοδοι και Όργανα Παρακολούθησης Δυναμικής Συμπεριφοράς Τεχνικών Έργων	10
1.4.1 Μέθοδοι πειραματικής μηχανικής	12
1.4.1 α Επιταχυνσιόμετρα (accelerometers)	12
1.4.1 β Οπτικές ίνες (Fiber-optics)	14
1.4.1 γ Επιμηκυνσιόμετρα (strain gauges)	16
1.4.1 δ Κλισίμετρα (inclinometers)	16
1.4.2 Τοπογραφικές μέθοδοι	17
1.4.2 α Συστήματα δορυφορικού εντοπισμού (Global Navigation Satellite Systems- GNSS)	18
1.4.2 β Γεωδαιτικοί σταθμοί αυτόματης αναγνώρισης και παρακολούθησης στόχου (Robotic Total Station)	22

1.4.2 γ Επίγειο σύστημα radar μικροκυματικής συμβολομετρίας (Ground-based microwave radar interferometry system)	24
1.4.2 δ Επίγειοι σαρωτές laser (Terrestrial Laser Scanner)	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΟ ΕΠΙΓΕΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑ RADAR ΜΙΚΡΟΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑΣ IBIS-S	29
2.1 Εισαγωγή.....	29
2.2 Επίγειο Σύστημα Μικροκυματικής Συμβολομετρίας IBIS-S	29
2.2.1 Γενική περιγραφή	29
2.2.2 Το πεδίο εφαρμογών του IBIS-S	30
2.2.3 Όργανο και παρελκόμενα	31
2.2.4 Τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά	34
2.2.5 Αρχές λειτουργίας του IBIS-S.....	35
2.2.5 α Η τεχνική της συμβολομετρίας	35
2.2.5 β Η τεχνική της βαθμωτής συχνότητας- συνεχούς κύματος (SF-CW)	37
2.2.6 Ακρίβεια μετρήσεων.....	40
2.2.7 Ατμοσφαιρικές επιδράσεις	41
2.3 Λογισμικό Καταγραφής « IBIS-S controller »	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΑΡΑΚΑΜΠΤΗΡΙΟΣ ΚΑΠΝΟΔΟΧΟΣ, ΜΟΝΑΔΑΣ IV, ΑΗΣ ΛΑΥΡΙΟΥ.....	43
3.1 Εισαγωγή.....	43
3.2 Ιστορικά Στοιχεία του ΑΗΣ Λαυρίου	43
3.3 Μονάδες Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας	44
3.4 Παρακαμπτήριος Καπνοδόχος Μονάδας IV	45
3.4.1 Δομή	45
3.4.2 Ο ρόλος της καπνοδόχου	46
3.4.3 Τρόπος λειτουργίας Μονάδας IV και καπνοδόχου	46
3.4.4 Προβλήματα δονήσεων κατά τη διάρκεια λειτουργίας της καπνοδόχου και ιστορικό	50

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ ΤΗΣ ΠΑΡΑΚΑΜΠΗΡΙΟΥ ΚΑΠΝΟΔΟΧΟΥ, ΜΟΝΑΔΑΣ IV, ΑΗΣ ΛΑΥΡΙΟΥ.....	53
4.1 Εισαγωγή.....	53
4.2 Εξοπλισμός παρατήρησης και Επιλογή Σημείου Τοποθέτησής του.....	53
4.3 Συνθήκες Φόρτισης και Διεξαγωγή Μετρήσεων.....	56
4.4 Μετεωρολογικά Δεδομένα.....	60
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	62
5.1 Εισαγωγή.....	62
5.2 Ορισμός, Τύποι Σημάτων και Επεξεργασία τους.....	62
5.3 Μέθοδοι Φασματικής Ανάλυσης	63
5.3.1 Σειρές Fourier	64
5.3.2 Διακριτός μετασχηματισμός Fourier (Discrete Fourier Transform- DFT) και αντίστροφος διακριτός μετασχηματισμός Fourier (Inverse Discrete Fourier Transform- IDFT).....	65
5.3.3 Ταχύς μετασχηματισμός Fourier (Fast Fourier Transform- FFT)	68
5.4 Το Θεώρημα Δειγματοληψίας.....	69
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ...	71
6.1 Εισαγωγή.....	71
6.2 Προεπεξεργασία Μετρήσεων και Επιλογή Σημείων για Ανάλυση	71
6.3 Ανάλυση στο Πεδίο του Χρόνου	73
6.4 Ανάλυση στο Πεδίο των Συχνοτήτων.....	77
6.5 Σύγκριση των Αποτελεσμάτων της ΑΤΕΑ Environment και του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου	82
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	88
7.1 Εισαγωγή.....	88
7.2 Συμπεράσματα Σχετικά με τη Δυναμική Συμπεριφορά της Κατασκευής	88
7.3 Συμπεράσματα Σχετικά με τη Μέθοδο Παρακολούθησης της Καπνοδόχου.....	89
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	92

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....98

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1: Είδη παραμορφώσεων	5
Σχήμα 1.2: Παραδείγματα παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας τεχνικών έργων	6
Σχήμα 1.3: Απεικόνιση ενός επιταχυνσιόμετρου.....	14
Σχήμα 1.4: Παρακολούθηση της δομικής κατάστασης τεχνικού έργου με τη χρήση αισθητήρων οπτικών ινών	15
Σχήμα 1.5: Διάφοροι τύποι επιμηκυνσιόμετρων	16
Σχήμα 1.6: Το Nivel 210, της Leica-Geosystems.....	17
Σχήμα 1.7: Οι τροχιές των δορυφόρων του συστήματος GPS	19
Σχήμα 1.8: Σχηματική αρχή λειτουργίας του συστήματος GPS στην παρακολούθηση κατασκευών.....	22
Σχήμα 1.9: Επίγειο σύστημα radar μικροκυματικής συμβολομετρίας	26
Σχήμα 1.10: Επίγειος σαρωτής laser.....	27
Σχήμα 2.1: Απεικόνιση του IBIS-S μικροκυματικής συμβολομετρίας.....	30
Σχήμα 2.2: Απεικόνιση IBIS-S και η χρήση του στην παρακολούθηση κατασκευών.....	31
Σχήμα 2.3: Ο εξοπλισμός του radar	32
Σχήμα 2.4: Ο αισθητήρας του IBIS-S.....	32
Σχήμα 2.5: Κεραία IBIS-H20	33
Σχήμα 2.6: IBIS-H20 Διάγραμμα κατακόρυφου επιπέδου.....	
Σχήμα 2.7: IBIS-H20 Διάγραμμα οριζόντιου επιπέδου.....	33
Σχήμα 2.8: Διάγραμμα του λοβού της κεραίας.....	34
Σχήμα 2.9: Η τεχνική της συμβολομετρίας	36
Σχήμα 2.10: Ακτινική μετατόπιση και προβαλλόμενη μετατόπιση.....	37
Σχήμα 2.11: Διάγραμμα εκπεμπόμενου σήματος με την πάροδο του χρόνου.....	38
Σχήμα 2.12: Ανάλυση απόστασης και προβαλλόμενη ανάλυση απόστασης	39
Σχήμα 2.13: Προφίλ του φάσματος (μονοδιάστατη εικόνα)	39
Σχήμα 2.14: Γράφημα ακρίβειας της μετατόπισης συναρτήσει του θορύβου του σήματος (SNR) εκφρασμένος σε dB	40
Σχήμα 3.1: Γενική άποψη των εγκαταστάσεων του ΑΗΣ Λαυρίου	44
Σχήμα 3.2: Διάταξη των μονάδων του ΑΗΣ Λαυρίου.....	45
Σχήμα 3.3: Λέβητας ανάκτησης θερμότητας κατακόρυφου τύπου	47
Σχήμα 3.4: Ατμοστροβίλος της μονάδας IV, τεχνολογίας Alstom.....	48
Σχήμα 3.5: Άποψη της μονάδας IV και η καπνοδόχος που μελετάται (κόκκινο βέλος).....	49

Σχήμα 3.6: Τοποθέτηση και αριθμός αισθητήρων στα σημεία μέτρησης	52
Σχήμα 4.1: Σκάλα για την πρόσβαση στη στέγη	54
Σχήμα 4.2: Θέση τοποθέτησης του οργάνου (κίτρινος κύκλος) και περιοχή παρατήρησης της καπνοδόχου (κίτρινο τρίγωνο)	55
Σχήμα 4.3: Σχηματική αναπαράσταση γεωμετρίας του πειράματος	56
Σχήμα 4.4: Παρατήρηση της καπνοδόχου από το σύστημα IBIS-S	58
Σχήμα 4.5: Διάγραμμα φορτίου της μηχανής και χρονική αλληλουχία μετρήσεων	59
Σχήμα 4.6: Διάγραμμα της θερμοκρασίας της καπνοδόχου σε συνάρτηση με το χρόνο	60
Σχήμα 4.7: Μετεωρολογικός σταθμός	60
Σχήμα 4.8: Διάγραμμα της ταχύτητας του ανέμου σε συνάρτηση με το χρόνο κατά τη διάρκεια του πειράματος στις 24-03-2012	61
Σχήμα 4.9: Διάγραμμα της διεύθυνσης του ανέμου σε συνάρτηση με το χρόνο κατά τη διάρκεια του πειράματος στις 24-03-2012	61
Σχήμα 5.1: Διαχωρισμός του σήματος σε αναλογικό (αριστερά), διακριτού χρόνου (κέντρο) και ψηφιακό (δεξιά)	62
Σχήμα 5.2: Σχηματική αναπαράσταση του κανόνα του τραπεζίου	66
Σχήμα 6.1: Παρουσίαση σημείων με μεγάλη ανακλαστικότητα και τα ύψη στα οποία αντιστοιχούν πάνω στην καπνοδόχο	72
Σχήμα 6.2: Μέτρηση της μετατόπισης σημείου στο ύψος των 25.3 m (α), 34.8 m (β), 44.4 m (γ), 54.5 m (δ), 64.7 m (ε), 78.4 m (στ) για το χρονικό διάστημα 15 min	75
Σχήμα 6.3: Διάγραμμα μετατόπισης-χρόνου για 6 σημεία καθ' ύψος της καπνοδόχου (Range Bins 32, 38, 47, 58, 70, 87) για χρονικό διάστημα 10 sec	76
Σχήμα 6.4: Μέγιστες μετακινήσεις που μετρήθηκαν για ένα τμήμα της καπνοδόχου που αντιστοιχεί σε εύρος διαστήματος 25.3 m-78.4 m για χρονική διάρκεια 15 min	77
Σχήμα 6.5: Απόκριση συχνοτήτων μετατόπισης της καπνοδόχου στο ύψος των 25.3 m (α), 34.8 m (β), 44.4 m (γ), 54.5 m (δ), 64.7 m (ε), 78.4 m (στ) για το χρονικό διάστημα 15 min	80
Σχήμα 6.6: Κατάσταση λειτουργίας στη συχνότητα των 19.86 Hz	82
Σχήμα 6.7: Τα ύψη των σημείων που μετρήθηκαν από ATEA-EMΠ. Τα ίδια χρώματα (ροζ, πράσινο, πορτοκαλί) αντιπροσωπεύουν τα ύψη των συγκρίσιμων σημείων	83
Σχήμα 6.8: Διάγραμμα μέσων τιμών επιτάχυνσης σε συνάρτηση με το ύψος της καπνοδόχου- μετρήσεις ATEA (9-03-2000, 10-03-2000) και EMΠ (σειρές #1, #2, #3)	87

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1: Πλάτος των κύριων λοβών των κεραιών IBIS-H20 στα -3dB και στα -10 dB.....	33
Πίνακας 4.1: Ωρα έναρξης, λήξης και διάρκεια κάθε μέτρησης	59
Πίνακας 6.1: Τα 6 σημεία που επιλέχθηκαν για περεταίρω ανάλυση, η κεκλιμένη απόστασή τους από το όργανο και το ύψος στο οποίο αντιστοιχούν πάνω στην καπνοδόχο	73
Πίνακας 6.2: Αντιπαραβολή κύριων συχνοτήτων επιτάχυνσης από τις μετρήσεις ΑΤΕΑ-ΕΜΠ για τα ύψη $H_{ΑΤΕΑ}= 22.0 \text{ m}$ - $H_{ΕΜΠ}=25.3 \text{ m}$ (α), $H_{ΑΤΕΑ}= 63.0 \text{ m}$ - $H_{ΕΜΠ}=64.7 \text{ m}$ (β), $H_{ΑΤΕΑ}= 63.0 \text{ m}$ - $H_{ΕΜΠ}=64.7 \text{ m}$, (γ) αντίστοιχα.....	84
Πίνακας 6.3: Οι μέσες επιταχύνσεις των σημείων που μετρήθηκαν από ΑΤΕΑ-ΕΜΠ και οι διαφορές τους	86

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα μεγάλα έργα υποδομής όπως αυτοκινητόδρομοι, γέφυρες, φράγματα, σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κ.ά, υφίστανται μετακινήσεις που μπορεί να οδηγήσουν σε αστοχία λόγω των δράσεων που ασκούνται σε αυτά και μπορεί να είναι το ίδιο βάρος, η σεισμική δράση, οι μεταβολές της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, οι ισχυροί άνεμοι, πλημμύρες ή καταιγίδες. Προκειμένου να αποφευχθούν οι καταστροφές που μπορεί να προκληθούν από την αστοχία μιας τέτοιας κατασκευής αλλά και οι επιπτώσεις στην κοινωνία και την οικονομία της περιοχής ή της χώρας που ανήκει, έχει αναπτυχθεί ιδιαίτερα η διαδικασία ενόργανης παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας των τεχνικών έργων (Structural Health Monitoring). Η διαδικασία αυτή έχει καθιερωθεί ως μέσο παρατήρησης και ελέγχου της εξέλιξης στο χρόνο των χαρακτηριστικών ενός τεχνικού έργου και μπορεί να παρέχει έγκαιρα πληροφορίες για τυχόν επικίνδυνες καταστάσεις στις οποίες βρίσκεται αυτό.

Οι μέθοδοι παρακολούθησης των μετακινήσεων των έργων υποδομής έχουν εξελιχθεί ιδιαίτερα τις δύο τελευταίες δεκαετίες. Παραδοσιακά, η μελέτη της δυναμικής απόκρισης των κατασκευών γινόταν κυρίως με μεθόδους πειραματικής μηχανικής, όπως επιταχυνσιόμετρα, αισθητήρες οπτικών ινών, κλισίμετρα κ.ά. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια έχουν εξελιχθεί ιδιαίτερα και οι τοπογραφικές μέθοδοι (δορυφορικές-GPS ή συμβατικές-RTS) οι οποίες συμβάλουν ενεργά στο χώρο της ενόργανης παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας των διάφορων τεχνικών έργων. Τέτοια συστήματα παρακολούθησης, παρόλο που είναι ακριβή και αξιόπιστα απαιτούν την τοποθέτηση πρίσματος ή κεραίας σε στενή επαφή με την κατασκευή. Επιπλέον, μετρούν τη δυναμική απόκριση της κατασκευής σε συγκεκριμένα σημεία.

Πρόσφατες εξελίξεις έχουν ευνοήσει την ανάπτυξη επίγειων συστημάτων radar μικροκυματικής συμβολομετρίας για την παρακολούθηση των στατικών και δυναμικών μετατοπίσεων μεγάλων τεχνικών έργων. Η συγκεκριμένη μέθοδος μελετά την απόκριση μιας κατασκευής σε πολλά σημεία ταυτόχρονα, από μεγάλη απόσταση παρατήρησης, υψηλή συχνότητα δειγματοληψίας και με μεγάλη ακρίβεια.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς της παρακαμπτήριου καπνοδόχου του Ατμοηλεκτρικού Σταθμού Λαυρίου σε συνθήκες οριακής φόρτισης με τη μέθοδο της μικροκυματικής συμβολομετρίας. Χρησιμοποιείται το επίγειο σύστημα radar μικροκυματικής συμβολομετρίας και συγκεκριμένα η τεχνική IBIS-S. Η μέθοδος εφαρμόζεται για την παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς της καπνοδόχου κατά τη διάρκεια του κύκλου φόρτισης της μηχανής. Η έρευνα τονίζει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων, την απλότητα χρήσης της τεχνικής του radar και την αποτελεσματικότητά της στη μέτρηση πολλών σημείων ταυτόχρονα. Η διπλωματική εργασία αποτελείται από επτά κεφάλαια των οποίων το περιεχόμενο παρουσιάζεται συνοπτικά στη συνέχεια.

Το κεφάλαιο 1 αναφέρεται στη μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς των τεχνικών έργων. Αναλύεται η αναγκαιότητα της διαδικασίας παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας των κατασκευών καθώς και οι παράγοντες που προκαλούν τη δυναμική τους μετακίνηση. Τέλος, περιγράφονται οι μέθοδοι και τα όργανα παρακολούθησης των δυναμικών μετατοπίσεων.

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στο επίγειο σύστημα radar μικροκυματικής συμβολομετρίας και το λογισμικό καταγραφής του.

Το κεφάλαιο 3 παρέχει βασικές πληροφορίες για τον ΑΗΣ Λαυρίου, τις μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και για την παρακαμπτήριου καπνοδόχο της μονάδας IV που αποτελεί αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας. Επιπλέον, γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στα προβλήματα δονήσεων που εμφανίζει η καπνοδόχος κατά τη διάρκεια λειτουργίας της και τις μετρήσεις που έχουν γίνει στο παρελθόν προκειμένου να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα.

Στο κεφάλαιο 4 περιγράφονται οι εργασίες πεδίου που έγιναν για τη συλλογή των μετρήσεων ταλαντώσεων της καπνοδόχου με το επίγειο σύστημα radar μικροκυματικής συμβολομετρίας. Επίσης, παρουσιάζονται τα μετεωρολογικά δεδομένα που επικρατούσαν στην περιοχή κατά την ημέρα και ώρα διεξαγωγής του πειράματος.

Στο κεφάλαιο 5 δίνεται η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για την επεξεργασία των δεδομένων που συλλέχτηκαν. Συγκεκριμένα, περιγράφονται οι μέθοδοι φασματικής ανάλυσης.

Στο κεφάλαιο 6 γίνεται η παρουσίαση και ανάλυση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων. Επιπλέον, συγκρίνονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις της εταιρίας ATEA Environment το 2000 με αυτά του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Στο κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται συνοπτικά τα συμπεράσματα που προκύπτουν από το σύνολο της εργασίας και διαχωρίζονται σε αυτά που αφορούν τη δυναμική συμπεριφορά της καπνοδόχου και σε αυτά που σχετίζονται με τη μέθοδο παρακολούθησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΜΕΛΕΤΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

1.1 Εισαγωγή

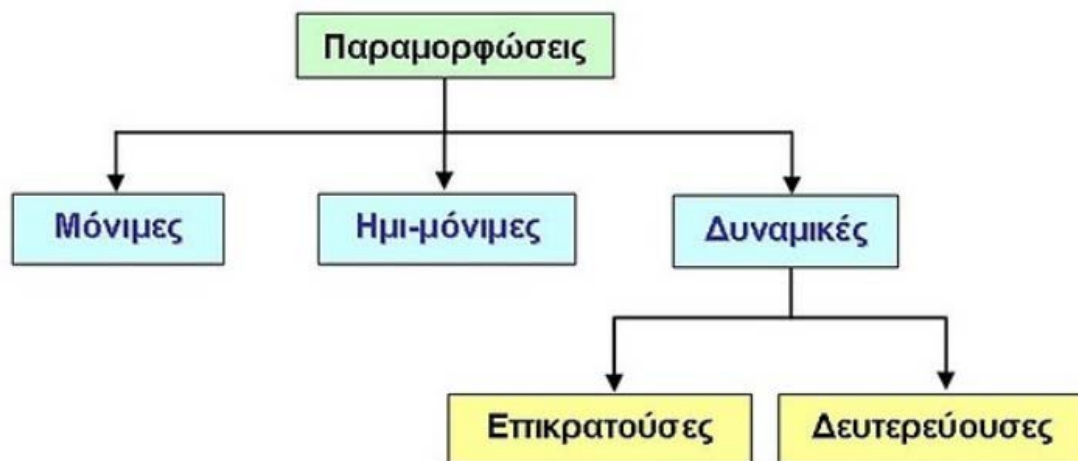
Στο κεφάλαιο 1 γίνεται αναφορά στην αναγκαιότητα της διαδικασίας παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας των τεχνικών έργων. Εξετάζονται οι κύριοι παράγοντες που προκαλούν τη δυναμική τους μετατόπιση και οι επιδράσεις τους στην εκάστοτε κατασκευή. Περιγράφονται οι μέθοδοι και τα όργανα παρακολούθησης των τεχνικών έργων και μάλιστα γίνεται διαχωρισμός τους σε μεθόδους πειραματικής μηχανικής (επιταχυνσιόμετρα, οπτικές ίνες, κλισίμετρα, μηκυνσιόμετρα) και τοπογραφικές μεθόδους (συστήματα δορυφορικού εντοπισμού, γεωδαιτικοί σταθμοί αυτόματης αναγνώρισης και παρακολούθησης στόχου, επίγειο σύστημα radar μικροκυματικής συμβολομετρίας, επίγειοι σαρωτές laser). Αναλύονται οι αρχές λειτουργίας των οργάνων, τα σφάλματα που εισάγουν στις μετρήσεις, οι ακρίβειες, η ανάλυση που προσφέρουν, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τους κατά τη διαδικασία παρακολούθησης των κατασκευών.

1.2 Αναγκαιότητα της Διαδικασίας Παρακολούθησης της Δομικής Ακεραιότητας Τεχνικών Έργων

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας σε όλους τους τομείς. Αποτέλεσμα αυτής της προόδου είναι η κατασκευή μεγάλων τεχνικών έργων με υψηλές απαιτήσεις σε ακρίβεια σχεδιασμού και εκτέλεσης. Μεγάλα σε μέγεθος και έκταση τεχνικά έργα υπόκεινται σε στατικές ή δυναμικές φορτίσεις. Συγκεκριμένα, το ίδιο βάρος του έργου αποτελεί στατικό φορτίο ενώ η σεισμική δράση, ο άνεμος και οι μεταβολές της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος αποτελούν δυναμικά φορτία. Αποτέλεσμα της φόρτισης μιας κατασκευής είναι η γένεση μετακινήσεων οι οποίες είναι συνδυασμός μόνιμων, ημι-μόνιμων και δυναμικών συνιστωσών.

Μόνιμες ονομάζονται οι μετακινήσεις που μπορούν να επηρεάσουν τη στατική επάρκεια μιας κατασκευής. Αυτές μπορεί να συμβούν είτε απότομα (π.χ. σεισμική δράση) είτε προοδευτικά. Οι ημι-μόνιμες και οι δυναμικές μετακινήσεις προκαλούνται από κάποια μεταβολή της γεωμετρίας της κατασκευής. Θεωρούνται

αναμενόμενες και εάν δεν ξεπερνούν τα όρια αντοχής της κατασκευής είναι επιθυμητές και είναι το αποτέλεσμα της απορρόφησης της ενέργειας των μεταβαλλόμενων εξωτερικών φορτίσεων (π.χ. της δράσης του ανέμου). Συγκεκριμένα, η ημι-μόνιμη μετακίνηση εκφράζει τη μέση εκτροπή από τη θέση ισορροπίας της κατασκευής για ένα χρονικό διάστημα και σχετίζεται με μια σταθερή συνιστώσα φόρτισης μεγάλης περιόδου. Αντίθετα, η δυναμική μετατόπιση αναφέρεται στις αποκρίσεις της κατασκευής με τη μορφή ταλαντώσεων και συχνότητες κοντά στην ιδιοσυχνότητα της κατασκευής και μπορεί να διακριθεί περαιτέρω σε επικρατούσες και δευτερεύουσες συνιστώσες. Οι επικρατούσες συνιστώσες σχετίζονται με την απόκριση της κατασκευής κοντά στην ιδιοσυχνότητα ταλάντωσης, ενώ οι δευτερεύουσες εκφράζουν ένα πλήθος συχνοτήτων απορρόφησης και λαμβάνουν εν γένει μικρότερες τιμές από την τιμή της ιδιοσυχνότητας (Σχήμα 1.1).



Σχήμα 1.1: Είδη παραμορφώσεων
Figure 1.1: Kinds of deformations
(Πηγή: Β. Γκίκας, 2011)

Με την κατασκευή μεγάλων τεχνικών έργων έχει αυξηθεί και η απαίτηση για την παρακολούθηση των μετατοπίσεων τους. Τα τεχνικά έργα που αποτελούν αντικείμενο παρακολούθησης για μετακινήσεις μπορεί να είναι (Σχήμα 1.2):

- Αυτά τα οποία μια ενδεχόμενη καταστροφή τους θα έχει αρνητικές συνέπειες για το φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον (π.χ. φράγματα, γέφυρες, σήραγγες, κτίρια, επικλινείς εδαφικές επιφάνειες κ.ά.)
- Τα τεχνικά έργα που κατασκευάζονται σε σεισμογενείς περιοχές ή σε κακή ποιότητα εδάφους.

- Τεχνικά έργα στα οποία μια ενδεχόμενη μετατόπιση μπορεί να προκαλέσει πρόβλημα στην ομαλή λειτουργία τους (π.χ. σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, πύργοι τηλεόρασης, κεραιές ραδιοφώνου, πυρηνικά εργοστάσια κ.ά.)



Σχήμα 1.2: Παραδείγματα παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας τεχνικών έργων
Figure 1.2: Examples of structural health monitoring
(Πηγή: www.kinemetrics.com)

Η ανάγκη μέτρησης των μετακινήσεων και άλλων στατικών και δυναμικών χαρακτηριστικών των κατασκευών οφείλεται σε διάφορους λόγους. Πολλές φορές, τα πραγματικά (δυναμικά κυρίως) χαρακτηριστικά μιας κατασκευής (π.χ. ιδιοσυχνότητα, εύρος ταλάντωσης κ.ά) διαφέρουν από αυτά της μελέτης λόγω τροποποιήσεων της, ή πιθανών ατελειών κατά τη διαδικασία κατασκευής. Ωστόσο, είναι αναγκαίο να γνωρίζει κανείς τα στοιχεία σχεδιασμού και να μπορεί επίσης να μετρήσει τα πραγματικά χαρακτηριστικά του έργου μετά την κατασκευή του. Επιπλέον, ορισμένα τεχνικά έργα εμφανίζουν ασυνήθιστη συμπεριφορά η οποία δεν προβλέπεται από τη μελέτη σχεδιασμού.

Γενικά, κανένα τεχνικό έργο δεν είναι σταθερό και αμετακίνητο. Αντίθετα, οι δυνάμεις που επιδρούν σε αυτό μπορούν να προκαλέσουν μετακινήσεις που σε ακραίες περιπτώσεις μπορούν να οδηγήσουν σε ολική ή μερική κατάρρευση του έργου αν δεν εντοπιστούν έγκαιρα ή δεν παρθούν άμεσα μέτρα προστασίας. Ωστόσο, η καταστροφή ενός τεχνικού έργου μπορεί να έχει τεράστιο κοινωνικό και οικονομικό κόστος. Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να υπάρξουν θύματα, διατάραξη του

περιβάλλοντος και τεράστιες οικονομικές επιπτώσεις που μπορούν να επηρεάσουν την οικονομία ενός κράτους για πολλά χρόνια.

Λαμβάνοντας υπόψη τις καταστροφικές συνέπειες μιας τέτοιας αστοχίας, γίνεται κατανοητή η ανάγκη πραγματοποίησης μετρήσεων μετακινήσεων. Σε αυτήν την κατεύθυνση έχει στραφεί ένα επιστημονικό πεδίο γνωστό ως παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας των τεχνικών έργων (Structural Health Monitoring-SHM). Η παρακολούθηση της δομικής κατάστασης έχει σκοπό να παράσχει αξιόπιστα στοιχεία αναφορικά με την κατάσταση στην οποία βρίσκεται μια κατασκευή (π.χ. ύπαρξη ατελειών, αστοχιών κ.ά), προκειμένου να αποφασιστεί η συνέχιση της χρήσης της, η επισκευή της ή η απόσυρσή της. Γι αυτό το σκοπό χρησιμοποιούνται διάφορων τύπων αισθητήρες που παρέχουν στοιχεία σχετικά με τη συμπεριφορά της κατά την άσκηση φορτίων. Συγκρίνοντας τα στοιχεία αυτά με την πρότυπη συμπεριφορά της κατασκευής δίνεται η δυνατότητα «συνεχούς διάγνωσης» της δομικής ακεραιότητας της κατασκευής και της αποκάλυψης τυχόν δομικών αστοχιών ή δυσλειτουργιών. Ωστόσο, η ευαισθησία της μεθόδου πρέπει να είναι τέτοια ώστε να επιτρέπει την έγκαιρη ανίχνευση προβλημάτων, την αποφυγή καταστρεπτικών αστοχιών, την κατά το δυνατόν μικρότερη διακοπή λειτουργίας της κατασκευής και το μειωμένο κόστος συντήρησης. Συμπερασματικά, η παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας των κατασκευών αποβλέπει στην εγγύηση της δημόσιας ασφάλειας.

1.3 Εξωγενείς Παράγοντες Δυναμικής Συμπεριφοράς Τεχνικών Έργων

Κάθε φυσικό ή τεχνικό σώμα ή έργο που βρίσκεται πάνω στο έδαφος υφίσταται αλλαγές στο χώρο και στο χρόνο. Ως εκ τούτου, τα τεχνικά έργα υφίστανται στατικές και δυναμικές μετακινήσεις που οφείλονται σε διάφορους παράγοντες. Προκειμένου να εξασφαλιστεί η ασφαλής λειτουργία τους στο πέρας των χρόνων απαραίτητη προϋπόθεση είναι η μελέτη των παραγόντων που προκαλούν τις εν λόγω μετακινήσεις πριν την κατασκευή του έργου έτσι ώστε να είναι δυνατή η πρόβλεψη των επιπτώσεων που θα έχουν στο έργο. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω (βλ. § 1.2), το ίδιο βάρος του έργου αποτελεί στατικό φορτίο ενώ η σεισμική δράση, ο άνεμος και οι μεταβολές της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος αποτελούν δυναμικά φορτία. Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία το αντικείμενο μελέτης αναφέρεται σε δυναμικές

μετακινήσεις. Επομένως, εξετάζονται μόνο τα δυναμικά φορτία, τα σημαντικότερα από τα οποία αναλύονται στη συνέχεια.

1.3.1 Σεισμική δράση

Ο σχεδιασμός μιας κατασκευής είναι μια διαδικασία κατά την οποία ο μελετητής μηχανικός προσπαθεί να λάβει υπ όψιν του, εκτός των δομικών χαρακτηριστικών, και όλα τα πιθανά φορτία που θα επιβληθούν στο φορέα στη διάρκεια της ζωής του. Ένα από αυτά είναι η σεισμική δράση. Είναι αναγκαίο να πραγματοποιηθεί εκ των προτέρων μελέτη για την όσο το δυνατόν καλύτερη αντίδραση του φορέα σε περίπτωση εκδήλωσης σεισμού. Κάποιες κατασκευές πιθανόν να κληθούν να ανταποκριθούν σε σεισμικές καταπονήσεις μεγαλύτερες από αυτές για τις οποίες σχεδιάστηκαν. Αυτό μπορεί να προκαλέσει υλικές ζημιές, κατάρρευση κτιρίων, τραυματισμούς, ιδιαίτερα μεγάλο οικονομικό κόστος, μόλυνση του περιβάλλοντος, κίνδυνος απώλειας ανθρώπινων ζωών κ.ά. Απαιτείται, λοιπόν, ο σωστός σχεδιασμός, και η συντήρηση των δομών ώστε να δέχονται με ασφάλεια τις ισχυρές καταπονήσεις που προκαλεί ο σεισμός.

1.3.2 Άνεμος

Άνεμος είναι η οριζόντια, κυρίως, κίνηση μεγάλων μαζών του ατμοσφαιρικού αέρα. Πρωταρχική γενεσιουργός αιτία του ανέμου είναι η διαφορά της θερμοκρασίας του αέρα που με τη σειρά της δημιουργεί υπό ορισμένες προϋποθέσεις, διαφορές βαρομετρικής πίεσης μεταξύ παρακείμενων τόπων. Ο άνεμος δημιουργείται ως εξής: όταν μία μάζα αέρα θερμαίνεται γίνεται πιο αραιή και πιο ελαφριά από τις άλλες μάζες που βρίσκονται γύρω της και τείνει να ανέβει ψηλότερα από εκείνες (ανοδική κίνηση). Επομένως, άλλες, πιο ψυχρές και βαριές αέριες μάζες θα κινηθούν και θα πάρουν τη θέση της. Αντίθετα, όταν μια μάζα αέρα ψύχεται γίνεται πιο πυκνή και πιο βαριά και τείνει να κατέβει (καθοδική κίνηση). Προκειμένου να γίνει αυτό «σπρώχνει» τις άλλες τις πιο θερμές και πιο αραιές μάζες του αέρα και παίρνει τη θέση τους.

Ο άνεμος επιδρά στις ψηλές, κυρίως, κατασκευές και πολλές φορές προκαλεί τη δυναμική τους μετατόπιση καθώς ασκεί πίεση στο φορέα τους. Οι εύκαμπτες κατασκευές πρέπει να σχεδιαστούν έτσι ώστε να είναι ικανές να αντέξουν τη

δυναμική επιρροή της τυρβώδους ροής του ανέμου, που μεταβάλλεται συναρτήσει του χρόνου.

1.3.3 Μεταβολές της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος

Σχεδόν όλα τα κατασκευαστικά υλικά υπόκεινται σε διαστολή ή συστολή με αύξηση ή μείωση αντίστοιχα της θερμοκρασίας τους. Τα προβλήματα που ανακύπτουν όταν οι μεταβολές θερμοκρασίας είναι μεγάλες και απότομες είναι αρκετά περίπλοκα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι ιδιότητες των υλικών επηρεάζονται από τη θερμοκρασία.

Στις κατασκευές που συνίστανται στο σύνολό τους από ένα υλικό, θερμικές τάσεις εκδηλώνονται για ομοιόμορφη μεταβολή της θερμοκρασίας, μόνο όταν υπάρχουν εξωτερικοί περιορισμοί που παρεμποδίζουν την ελεύθερη διαστολή ή συστολή του σώματος.

Θερμικές τάσεις εκδηλώνονται επίσης σε ομοιογενή σώματα που είναι ακόμα και ελεύθερα εξωτερικά να παραμορφωθούν, όταν η θερμοκρασιακή μεταβολή παρουσιάζεται ανομοιόμορφα κατανεμημένη μέσα στο σώμα. Αν η κατανομή αυτή είναι γνωστή και το σώμα έχει απλή μορφή, τότε εύκολα υπολογίζονται οι θερμικές τάσεις.

Στα σώματα που συνίστανται από περισσότερα υλικά, θερμικές τάσεις εκδηλώνονται επίσης για ομοιόμορφη μεταβολή της θερμοκρασίας (και προφανώς για ανομοιόμορφη). Η εσωτερική ένταση οφείλεται σε αυτή την περίπτωση στους διαφορετικούς συντελεστές θερμικής διαστολής των υλικών που συνθέτουν το σώμα, που οδηγούν σε ανομοιόμορφη παραμόρφωση των επί μέρους υλικών όπου υπάρχει σχετική ελευθερία.

Είναι γνωστό ότι η ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών στα υλικά δόμησης επηρεάζει δυσμενώς τόσο τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους (όπως την θλιπτική και εφελκυστική αντοχή, όρια διαρροής και θραύσεως, μέτρο ελαστικότητας κ.λ.π.) όσο και τις φυσικοχημικές ιδιότητές τους (αλλαγή κρυσταλλικής δομής, πορώδες κ.λ.π.). Συνέπεια αυτών των μεταβολών είναι αντίστοιχες μειώσεις στην φέρουσα ικανότητα

των δομικών μελών, αύξηση των παραμορφώσεών τους υπό σταθερό φορτίο, ανακατανομές εντάσεως κ.λ.π.

Το φαινόμενο αυτό έχει άμεση επίδραση στη δυναμική συμπεριφορά των κτηρίων και γενικότερα των τεχνικών έργων δεδομένου ότι ο συνδυασμός διαφορετικών τύπων υλικών στην εκάστοτε κατασκευή, επιβάλλει εκ των προτέρων την προσεκτική μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς της κατασκευής στις θερμοκρασιακές μεταβολές, για την αντιμετώπιση εμφάνισης φαινομένων ασυνέχειας (ρωγμές) σε κρίσιμα για την λειτουργική ικανότητα σημεία του φορέα της κατασκευής, ενώ για ιδιόρρυθμες κατασκευές κρίνεται απαραίτητη και η εκ των υστέρων παρακολούθηση του κτηρίου (ή τεχνικού έργου) για την έγκαιρη αντιμετώπιση φαινομένων αστοχίας του φορέα.

1.4 Μέθοδοι και Όργανα Παρακολούθησης Δυναμικής Συμπεριφοράς Τεχνικών Έργων

Για την λήψη μετρήσεων ταλαντώσεων σε διάφορα τεχνικά έργα, χρησιμοποιούνται είτε μέθοδοι πειραματικής μηχανικής είτε τοπογραφικές μέθοδοι. Οι μέθοδοι πειραματικής μηχανικής ή αλλιώς γεωτεχνικές μέθοδοι στηρίζονται στη λήψη μετρήσεων από γεωτεχνικά όργανα όπως επιταχυνσιόμετρα, οπτικές ίνες, επιμηκυνσιόμετρα, κλισιόμετρα κ.ά. Οι τοπογραφικές ή γεωδαιτικές μέθοδοι περιλαμβάνουν επίγειες, φωτογραμμετρικές και δορυφορικές μεθόδους. Μερικά από τα όργανα που χρησιμοποιούνται είναι τα συστήματα δορυφορικού εντοπισμού GNSS, οι γεωδαιτικοί σταθμοί αυτόματης αναγνώρισης και παρακολούθησης στόχου, το επίγειο σύστημα radar μικροκυματικής συμβολομετρίας, οι επίγειοι σαρωτές laser και τα συστήματα βιντεομετρίας.

Πρέπει να αναφερθεί, ότι στις μεθόδους πειραματικής μηχανικής τα όργανα που χρησιμοποιούνται εγκαθίστανται μόνιμα μια φορά επάνω στην κατασκευή και δίνουν συνεχώς μετρήσεις. Επιπλέον, μπορούν να προσδιορίσουν ικανοποιητικά τις συνιστώσες της δυναμικής συμπεριφοράς (συχνότητες ταλάντωσης) της κίνησης που παρουσιάζει μια κατασκευή, αλλά μειονεκτούν στον προσδιορισμό του εύρους της ταλάντωσης και της μετατόπισης που προκύπτει από τη συνεχή φόρτιση της

κατασκευής από διάφορους παράγοντες (π.χ. επίδραση του ανέμου, μεταβολές της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος).

Επιπλέον, με τις γεωδαιτικές μεθόδους και τα όργανα μέτρησης είναι δυνατόν να ελεγχθεί ένα τεχνικό έργο σχεδόν σε όλο το σύνολό του. Ως εκ τούτου, δίνουν μια σφαιρική εικόνα της υπό παρακολούθηση κατασκευής. Αντίθετα, οι γεωτεχνικές μέθοδοι δίνουν συνεχόμενη πληροφορία (μετρήσεις) αλλά για συγκεκριμένη μικρή περιοχή παρακολούθησης.

Συμπερασματικά, στις μετρήσεις που πραγματοποιούνται για την παρακολούθηση των μετακινήσεων και των παραμορφώσεων των τεχνικών έργων, πολλές φορές γίνεται προσπάθεια συνδυασμού και των δύο μεθόδων μέτρησης, ώστε να επωφελείται κανείς των πλεονεκτημάτων και των δυνατοτήτων που προσφέρει η καθεμία.

Γενικά, η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση της εκάστοτε κατασκευής καθορίζεται λαμβάνοντας υπ' όψιν το σύνολο των ακόλουθων παραγόντων:

- Η ταχύτητα συλλογής και επεξεργασίας των δεδομένων δεδομένου ότι όσο πιο γρήγορα πραγματοποιηθεί αυτή τόσο νωρίτερα θα διεξαχθούν τα αποτελέσματα της έρευνας και θα ληφθεί η απόφαση.
- Η πληρότητα των δεδομένων. Για το σχεδιασμό πολύπλοκων κατασκευών, η λήψη μη επαρκών μετρήσεων δημιουργεί κίνδυνο για εσφαλμένα συμπεράσματα.
- Η ακρίβεια των δεδομένων. Ανάλογα, το αντικείμενο παρακολούθησης ορίζεται και το επίπεδο ακρίβειας.
- Η δυνατότητα παρακολούθησης μη προσβάσιμων περιοχών.
- Η ασφάλεια της μεθόδου. Κάθε μέθοδος πρέπει να είναι ασφαλής για τα συνεργεία που εκτελούν τις μετρήσεις, για τα συνεργεία συντήρησης και λειτουργίας της κατασκευής αλλά και για το κοινό το οποίο αυτή εξυπηρετεί.
- Δυνατότητα εκτέλεσης μετρήσεων οποιαδήποτε στιγμή και σε όλες τις επιθυμητές καιρικές συνθήκες.

- Το κόστος της μεθόδου καθώς λαμβάνονται υπόψη τα έξοδα που απαιτεί κάθε μέθοδος σε συνδυασμό με το πόσο αξιόλογα αποτελέσματα δίνει.

1.4.1 Μέθοδοι πειραματικής μηχανικής

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται επιγραμματικά οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι πειραματικής μηχανικής που στηρίζονται σε μετρήσεις από επιταχυνσιόμετρα, οπτικές ίνες, επιμηκυνσιόμετρα και κλισίμετρα. Αυτές μπορούν να εφαρμοστούν είτε αυτόνομα είτε σε συνδυασμό μεταξύ τους.

1.4.1 α Επιταχυνσιόμετρα (accelerometers)

Τα επιταχυνσιόμετρα (accelerometers) αποτελούν την πιο καθιερωμένη μέθοδο για την καταγραφή των δυναμικών κινήσεων (Σχήμα 1.3). Είναι αισθητήρες και όργανα για τη μέτρηση, την απεικόνιση και την ανάλυση της επιτάχυνσης. Οι επιταχυνσιογράφοι διαχωρίζονται ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής τους αλλά η αρχή λειτουργίας τους είναι κοινή: μια μάζα διεγείρεται από μια δύναμη και καταγράφεται η επιτάχυνσή της. Διαφέρουν, όμως, ως προς τον τρόπο με τον οποίο γίνεται η καταγραφή των επιταχύνσεων. Το στοιχείο αυτό επηρεάζει τα όρια λειτουργίας και το πεδίο εφαρμογής τους. Μερικά από τα είδη των επιταχυνσιογράφων είναι τα εξής:

- ο πιεζοηλεκτρικός επιταχυνσιογράφος (piezoelectric accelerometer), ο οποίος λειτουργεί με βάση ένα κρύσταλλο ο οποίος όταν διεγείρεται από την ταλαντούμενη μάζα, πιέζεται και παράγει ηλεκτρικό ρεύμα τάσης ανάλογο της επιτάχυνσης διέγερσης.
- ο πιεζοωμικός επιταχυνσιογράφος (piezoresistive accelerometer), ο οποίος αποτελείται από ένα ηλεκτρικό κύκλωμα στο οποίο η ταλαντούμενη μάζα παίζει το ρόλο διακόπτη. Με την διέγερση της μάζας ανοιγοκλείνει το κύκλωμα και η τάση που παράγεται είναι ανάλογη της επιτάχυνσης.
- Ο επιμηκυνσιομετρικός επιταχυνσιογράφος (strain gauge accelerometer), ο οποίος αποτελείται από ένα μονοβάθμιο ταλαντωτή (μάζας-ελατηρίου-αποσβεστήρα).

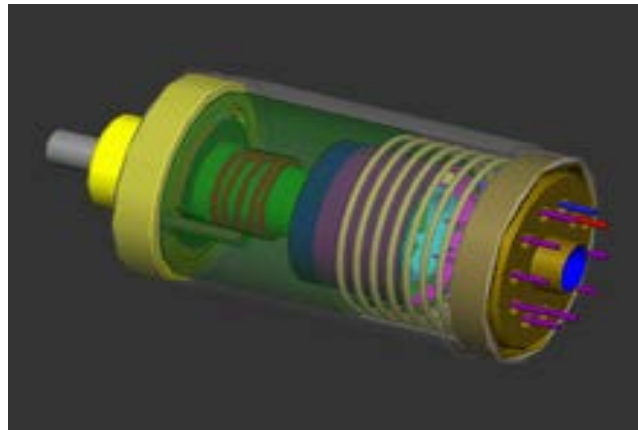
Λόγω της λειτουργίας του ο πιεζοηλεκτρικός επιταχυνσιογράφος μπορεί να καταγράψει επιταχύνσεις σχετικά υψηλών συχνοτήτων (έως 5000 Hz) και για το λόγο

αυτό χρησιμοποιείται για την μέτρηση των κυμάτων της διάδοσης του ήχου, στην αεροναυπηγική, στις δοκιμές μηχανών αλλά και ως σύστημα ελέγχου των κατασκευών. Αντίθετα, ο πιεζοωμικός μπορεί να καταγράφει και μικρότερες συχνότητες (της τάξης του 0.5 Hz) και γι αυτό χρησιμοποιείται και σε κρουστικές δοκιμές (π.χ. crash test αυτοκινήτων).

Για την παρακολούθηση των επιταχύνσεων των εύκαμπτων κατασκευών του πολιτικού μηχανικού χρησιμοποιούνται επιταχυνσιόμετρα που αποτελούνται από μάζα που εκτελεί ταλάντωση ενώ συνδέεται με ελατήριο και αποσβεστήρα. Προκειμένου να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση τεχνικών έργων, απαιτείται η τοποθέτηση των επιταχυνσιόμετρων σταθερά πάνω στην κατασκευή που μελετάται, έτσι ώστε να σχηματίζουν πρακτικά ένα δίκτυο. Με τον τρόπο αυτό, παράγονται αποτελέσματα για μικροδονήσεις και επιταχύνσεις της κατασκευής.

Η χρήση του επιταχυνσιόμετρου στην παρακολούθηση ταλαντώσεων και μετακινήσεων κατασκευών παρουσιάζει τα εξής μειονεκτήματα:

- εξαιτίας της δυσκαμψίας του ελατηρίου και της απόσβεσης του ταλαντωτή, ο επιταχυνσιογράφος μπορεί να καταγράψει κυρίως υψίσυχνες κινήσεις (συνήθως $>0.5-1\text{Hz}$) και όχι τις χαμηλόσυχνες ($<0.1-0.2\text{Hz}$) που οφείλονται σε ανεμοπιέσεις, θερμοκρασιακές μεταβολές κ.ά.
- Οι εκτιμήσεις ταχυτήτων και μετακινήσεων επηρεάζονται από σφάλματα των καταγραφών της επιτάχυνσης και της αστάθειας δειγματοληψίας η συσσώρευση των οποίων (λόγω του Νόμου Μετάδοσης των Σφαλμάτων) καταλήγει η τελική εκτίμηση της μετατόπισης να είναι ανάλογη του τετραγώνου του χρόνου της καταγραφής και πολλές φορές στατιστικά μη σημαντική.
- Με την πάροδο του χρόνου τα ρολόγια των οργάνων παρουσιάζουν σφάλματα. Δηλαδή υπολείπονται κάποιων δευτερολέπτων.
- Είναι αναγκαία η τοποθέτηση των επιταχυνσιόμετρων σε στενή επαφή με την κατασκευή παρακολούθησης. Ωστόσο, η εγκατάστασή τους απαιτεί τη διατήρηση της κατασκευής εκτός λειτουργίας για αρκετή ώρα. Επιπλέον, αν το σημείο τοποθέτησης δεν είναι προσβάσιμο είναι απαραίτητη η εγκατάσταση και χρήση δαπανηρών σκαλωσιών.



Σχήμα 1.3: Απεικόνιση ενός επιταχυνσιόμετρου
Figure 1.3: A depiction of an accelerometer
(Πηγή: www.wikipedia.org)

1.4.1 β Οπτικές ίνες (Fiber-optics)

Οι οπτικές ίνες (Fiber-optics) είναι όργανα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό διάφορων μεγεθών (π.χ. μετακινήσεις, ταχύτητες). Ανάλογα με το προς μέτρηση μέγεθος μεταβάλλονται και οι λειτουργίες του οργάνου.

Αποτελούνται από ένα ζευγάρι καλωδίων οπτικής ίνας τα οποία συνδέονται με έναν αισθητήρα (sensor) ή ενισχυτή. Τα καλώδια οπτικής ίνας τοποθετούνται το ένα δίπλα στο άλλο. Το ένα εκ των δύο καλωδίων εκπέμπει ακτίνα ενέργειας η οποία ανακλάται πάνω στο σώμα του οποίου μετράται η μετακίνηση. Το άλλο καλώδιο της οπτικής ίνας λαμβάνει την ανακλώμενη ακτίνα και μεταφέρει το σήμα της πίσω στον αισθητήρα. Η ενέργεια της ανακλώμενης ακτίνας μεταβάλλεται σύμφωνα με τη μετακίνηση του σώματος και συνεπώς προκύπτουν συμπεράσματα για τη μετακίνηση του σώματος.

Οι αισθητήρες οπτικών ινών χρησιμοποιούνται ευρέως στην παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας των τεχνικών έργων αλλά και σε μνημεία ιστορικής και πολιτιστικής κληρονομιάς γιατί μπορούν να τοποθετηθούν σε σημεία δύσκολης πρόσβασης, οποιουδήποτε δομήματος και σε οποιαδήποτε μετρητική διάταξη (Σχήμα 1.4). Βασικό χαρακτηριστικό είναι η αντοχή της οπτικής ίνας σε μηχανικές καταπονήσεις, καθώς και ότι είναι αδρανής σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία και στο νερό. Αυτό είναι το κύριο στοιχείο διαφοροποίησής της από τα συμβατικά όργανα δομικής παρακολούθησης.



Σχήμα 1.4: Παρακολούθηση της δομικής κατάστασης τεχνικού έργου με τη χρήση αισθητήρων οπτικών ινών

Figure 1.4: Structural health monitoring of engineering work with the use of fiber-optics sensors
(Πηγή: Εισαγωγή στην οπτοηλεκτρονική-αισθητήρες οπτικών ινών, Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Κρήτης)

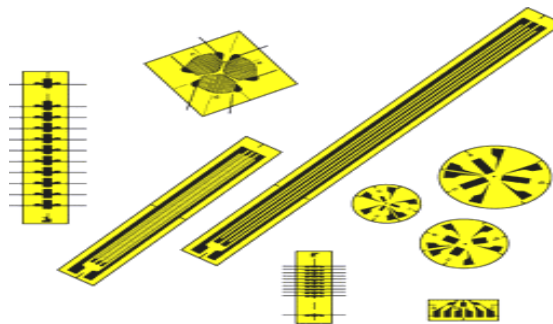
Τα βασικά πλεονεκτήματα που προκύπτουν από τη χρήση αισθητήρων οπτικών ινών στην παρακολούθηση της δομικής κατάστασης των τεχνικών έργων είναι τα εξής:

- Μεγάλη ακρίβεια προσδιορισμού της μετακίνησης ενός αντικειμένου της τάξης των μερικών χιλιοστών.
- Έχουν μικρό μέγεθος και αμελητέο βάρος, άρα και δυνατότητα τοποθέτησης σε δύσκολα σημεία και πολύπλοκες διατάξεις.
- Μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας $>50^{\circ}\text{C}$ με αποτέλεσμα τη δυνατότητα εφαρμογής υπό όλες τις καιρικές συνθήκες.
- Υψηλή αντοχή σε σημαντικές καταπονήσεις.
- Φιλικό προς το περιβάλλον γιατί δεν εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και ούτε περιέχουν τοξικά κατάλοιπα.
- Μεγάλη ταχύτητα μετρήσεων και δυνατότητα επανάληψης μέτρησης κατά τη διάρκεια ενός φαινομένου (σεισμός, διέλευση μεγάλου οχήματος, ισχυροί άνεμοι, κ.ά).
- Σημαντική συμβολή στη μείωση του κόστους συντήρησης των τεχνικών έργων/μνημείων.
- Δυνατότητα απομακρυσμένης επιτήρησης και μετάδοσης, χιλιόμετρα μακριά μέσω συμβατικών τηλεπικοινωνιακών μέσων.

Ωστόσο, πρέπει να αναφερθεί ότι τα όργανα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν υπό συνθήκες στην παρακολούθηση μιας εύκαμπτης κατασκευής καθώς οι μετακινήσεις της είναι πολύ μεγάλες (και πιθανότητα εκτός των ορίων εφαρμογής του οργάνου) αλλά δεν είναι εφικτή η κατασκευή διάταξης παρακολούθησης μιας μεγάλης κατασκευής. τέλος, προσδιορίζουν σχετικές μετακινήσεις τμημάτων μιας κατασκευής και όχι μετακινήσεις ως προς κάποιο ανεξάρτητο σύστημα αναφοράς.

1.4.1 γ Επιμηκυνσιόμετρα (strain gauges)

Τα επιμηκυνσιόμετρα (Σχήμα 1.5) χρησιμοποιούνται για την μέτρηση των μετατοπίσεων σε συγκεκριμένα σημεία εύκαμπτων κατασκευών και γεφυρών, υπό την επίδραση διαφόρων φορτίσεων. Τα πιο γνωστά είναι εκείνα που είναι κατασκευασμένα από φύλλα αλουμινίου (etched foil gauges). Τα επιμηκυνσιόμετρα έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να τοποθετούνται «κολλημένα» πάνω στο σημείο ελέγχου της κατασκευής και όταν αυτό παραμορφώνεται-επιμηκύνεται, προκαλείται παραμόρφωση και του οργάνου, με αποτέλεσμα αυτό να μακραίνει και να λεπταίνει και έτσι να αυξάνεται και η ηλεκτρική του αντίσταση. Σε αντίθετη περίπτωση (συμπίεσης) η αντίστασή του μικραίνει. Αυτή η αλλαγή στην αντίσταση του οργάνου είναι ανάλογη με την παραμόρφωση στην επιφάνεια του σημείου ενδιαφέροντος στην κατασκευή, με αναλογία συνήθως 2:1.



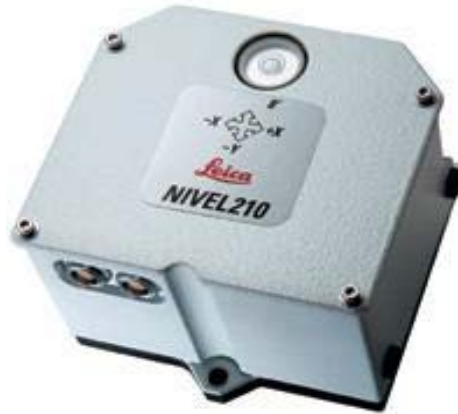
Σχήμα 1.5: Διάφοροι τύποι επιμηκυνσιόμετρων
Figure 1.5: Several types of strain-gauges
(Πηγή: <http://www.personal.dundee.ac.uk>)

1.4.1 δ Κλισίμετρα (inclinometers)

Τα κλισίμετρα (Σχήμα 1.6) είναι απλές διατάξεις ή όργανα που μετρούν γωνίες κλίσης. Μετρούν θετικές και αρνητικές κλίσεις. Κλισίμετρα που διαθέτουν εξαιρετικά ευαίσθητους αισθητήρες, έχουν ανάλυση της τάξης των 0.0001 deg. Η

τελική ακρίβεια βέβαια που επιτυγχάνεται, εξαρτάται τόσο από το είδος του οργάνου όσο και από το εύρος της μετρούμενης γωνίας και ανάλογα με την περίπτωση μπορεί να περιοριστεί στις 0.01 deg.

Τα σύγχρονα κλισίμετρα υψηλής ακριβείας χρησιμοποιούνται για ταυτόχρονες μετρήσεις κλίσης, διεύθυνσης μετακίνησης και θερμοκρασίας βασιζόμενης σε οπτοηλεκτρονική μέθοδο. Χρησιμοποιούνται για μεγάλες κατασκευές και εφαρμογές παρακολούθησης κατασκευών όπως φράγματα, γέφυρες και ψηλά κτίρια και όπου απαιτούνται υψηλής ακριβείας πληροφορίες για την κλίση και την διεύθυνση των μετατοπίσεων.



Σχήμα 1.6: Το Nivel 210, της Leica-Geosystems
Figure 1.6: The Nivel 210, from Leica-Geosystems
(Πηγή: www.leica-geosystems.com)

1.4.2 Τοπογραφικές μέθοδοι

Στην προηγούμενη ενότητα (βλ. § 1.4.1) αναφέρονται μέθοδοι πειραματικής μηχανικής που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της συμπεριφοράς των κατασκευών. Ωστόσο, έχουν αναπτυχθεί νέες συμπληρωματικές μέθοδοι παρακολούθησης που βασίζονται στη χρήση γεωδαιτικών οργάνων. Τα πιο διαδεδομένα είναι τα συστήματα δορυφορικού εντοπισμού GNSS, οι γεωδαιτικοί σταθμοί αυτόματης αναγνώρισης και παρακολούθησης στόχου, το επίγειο σύστημα radar μικροκυματικής συμβολομετρίας και οι επίγειοι σαρωτές laser. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται επιγραμματικά οι αρχές λειτουργίας τους, οι ακρίβειες με τις οποίες λαμβάνουν μετρήσεις, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους όσον αφορά την παρακολούθηση δομικών κατασκευών.

1.4.2 α Συστήματα δορυφορικού εντοπισμού (Global Navigation Satellite Systems-GNSS)

Τα συστήματα δορυφορικού εντοπισμού (GNSS) εμφανίστηκαν το 1960 και από τότε έως σήμερα εξελίσσονται συνεχώς. Κύριος στόχος τους είναι ο προσδιορισμός τρισδιάστατων συντεταγμένων σημείων πάνω στην επιφάνεια της γης, με τη λήψη και επεξεργασία μετρήσεων από τεχνητούς δορυφόρους που βρίσκονται σε καθορισμένες τροχιές γύρω από τη Γη. Το πρώτο σύστημα που αναπτύχθηκε ήταν το DOPPLER (ή TRANSIT) και χρησιμοποιήθηκε τόσο στη ναυσιπλοΐα, όσο και για γεωδαιτικούς σκοπούς.

Το δορυφορικό σύστημα που χρησιμοποιείται κυρίως σήμερα είναι το αμερικάνικο NAVSTAR GPS (NAVigation Satellite Timing And Ranging, Global Positioning System) ή απλά το GPS. Το σύστημα αναπτύχθηκε στη δεκαετία του 1980 και βρίσκεται υπό τον έλεγχο του Υπουργείου Άμυνας των ΗΠΑ. Πρόκειται για ένα στρατιωτικό και πολιτικό σύστημα με κύριο στόχο την κάλυψη των στρατιωτικών και στη συνέχεια και πολιτικών αναγκών πλοήγησης. Επιπλέον, υπάρχει σε χρήση το ρώσικο σύστημα GLONASS που είναι στο στάδιο της αποκατάστασης του, σε μια εντατική προσπάθεια να γίνει πλήρως επιχειρησιακό και για το λόγο αυτό δεν έχει τύχει ακόμα της ίδιας ευρείας αποδοχής και χρήσης όπως το GPS.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση αναπτύσσει το πρώτο δορυφορικό σύστημα εντοπισμού θέσης και πλοήγησης που σχεδιάστηκε για πολιτική χρήση, το οποίο εμπεριέχει το ήδη σε λειτουργία σύστημα EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) και το σύστημα GALILEO που στα επόμενα λίγα χρόνια με την πλήρη λειτουργία του θα παρέχει ποικίλες νέες υπηρεσίες εντοπισμού θέσης, πλοήγησης και χρονισμού ακριβείας. Παράλληλα, η Λαϊκή Δημοκρατία της Κίνας προχωράει από το 2010 στην επέκταση του τοπικού συστήματος BEIDOU, με την προοπτική να εξελιχθεί στο παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού COMPASS.

Στη συνέχεια, αναλύεται η δομή και η λειτουργία του δορυφορικού συστήματος GPS. Το σύστημα αυτό οδήγησε την πορεία των GNSS και μετέβαλε ένα δορυφορικό στρατιωτικό σύστημα σε χρήσιμο, οικείο και χρηστικό εργαλείο καθημερινής χρήσης καθώς δεν απευθύνεται μόνο σε ομάδες επαγγελματιών αλλά και στο ευρύ κοινό.

➤ Το Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσης (Global Positioning System-GPS)

Το Παγκόσμιο Σύστημα Προσδιορισμού θέσης ευρύτερα γνωστό με τα αρχικά GPS (Global Positioning System) είναι ένα σύστημα πλοήγησης που στηρίζεται στη μετάδοση πληροφοριών από το δορυφόρο προς του επίγειους δέκτες. Υπάρχουν τεχνητοί δορυφόροι που τροφοδοτούνται με ηλιακή ενέργεια και κινούνται γύρω από τη γη σε σχεδόν κυκλική τροχιά σε ύψος περίπου 20000 km (Σχήμα 1.7). Οι πληροφορίες που μεταδίδονται περιλαμβάνουν και τη χρονική στιγμή μετάδοσης του σήματος που φτάνει στο δέκτη από τη θέση του δορυφόρου κάθε στιγμή. Το ρολόι του δέκτη συγχρονισμένο με το χρονόμετρο του δορυφόρου, προσδιορίζει την απόσταση (ψευδο-απόσταση) δέκτη-δορυφόρου. Εξαιτίας της αδυναμίας συγχρονισμού του χρονομέτρου του δέκτη με αυτά των δορυφόρων, η απόσταση που προσδιορίζεται δεν φέρει την απαιτούμενη ακρίβεια. Για την αντιμετώπιση αυτής της αδυναμίας απαιτούνται τουλάχιστον 4 δορυφόροι και ταυτόχρονη μέτρησή τους από το δέκτη προκειμένου να υπολογιστεί η θέση X, Y, Z ή φ, λ, h του δέκτη με ακρίβεια ως η τομή 4 σφαιρών, υπολογίζοντας και το εκάστοτε σφάλμα στο χρονόμετρο του δέκτη.



Σχήμα 1.7: Οι τροχιές των δορυφόρων του συστήματος GPS
Figure 1.7: GPS satellites constellation
(Πηγή: www.space.com/images)

Το σύστημα GPS αποτελείται από την κεραία, το δέκτη και έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή χειρός στον οποίο εισάγονται οι ρυθμίσεις για τη διεξαγωγή των μετρήσεων.

Ο προσδιορισμός θέσης με τη βοήθεια του GPS γίνεται είτε με τον απόλυτο είτε με το σχετικό εντοπισμό. Στον απόλυτο εντοπισμό η θέση του δέκτη (X,Y,Z) υπολογίζεται ως προς το γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς (WGS84). Ο δέκτης επεξεργάζεται τα δεδομένα που λαμβάνει και στη συνέχεια προσδιορίζει τις συντεταγμένες του. Στο σχετικό προσδιορισμό θέσης καθορίζονται οι συντεταγμένες ενός δέκτη (σημείου) σε σχέση με κάποιο άλλο, που βρίσκεται συνήθως σε μια γνωστή και σταθερή θέση. Στην περίπτωση αυτή είναι απαραίτητη η ταυτόχρονη παρατήρηση των ίδιων δορυφόρων από δύο ή περισσότερους δέκτες. Με αυτόν τον τρόπο απαλείφονται τα διάφορα κοινά σφάλματα με αποτέλεσμα τη βελτίωση της ακρίβειας εντοπισμού θέσης.

Όσον αφορά τις πηγές σφαλμάτων του συστήματος GPS, μπορούν να διακριθούν σε 3 βασικές κατηγορίες:

- Τα σφάλματα που σχετίζονται με τους δορυφόρους: σφάλματα εφημερίδων, σφάλματα χρονομέτρων των δορυφόρων.
- Τα σφάλματα που σχετίζονται με τον δέκτη: σφάλματα χρονομέτρου του δέκτη, σφάλματα λόγω σταθερότητας του ηλεκτρονικού κέντρου της κεραίας του δέκτη.
- Τα σφάλματα που σχετίζονται με τη διάδοση του σήματος: ατμοσφαιρικά σφάλματα (τροπόσφαιρα, ιονόσφαιρα), σφάλματα πολλαπλών ηλεκτρονικών διαδρομών.
- **Μέθοδοι μετρήσεων GPS για την παρακολούθηση κατασκευών, ακρίβειες εντοπισμού και αξιολόγηση**

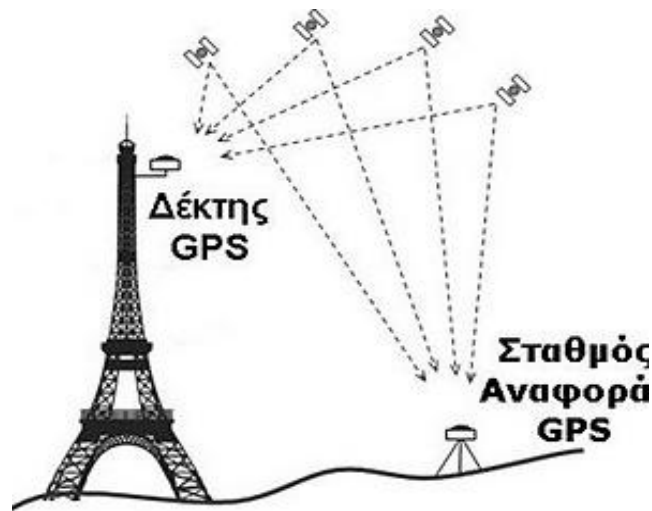
Τα τελευταία χρόνια έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές μελέτες με χρήση του GPS στην παρακολούθηση ταλαντώσεων κατασκευών που προκαλούνται από δυναμικά φορτία (π.χ. σεισμός, άνεμος κ.ά.) αλλά και ημιστατικά φαινόμενα (π.χ. θερμοκρασιακές μεταβολές). Η λειτουργία του GPS στηρίζεται σε μετρήσεις της φάσης του φέροντος σήματος, το οποίο λαμβάνουν δυο επίγειοι δέκτες από τους ίδιους 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 (Σχήμα 1.8).

Τα βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι τα εξής:

- Υψηλή συχνότητα καταγραφής που αγγίζει τα 100 Hz έτσι ώστε να μπορεί να καλύψει τις ιδιοσυχνότητες των κατασκευών.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάτω από οποιεσδήποτε καιρικές συνθήκες.
- Η διαδικασία των μετρήσεων είναι αρκετά απλή και δεν απαιτείται πολύς χρόνος προετοιμασίας.
- Μπορεί να συνεργαστεί με άλλα συστήματα προσδιορισμού θέσης (π.χ. αδρανειακά συστήματα) και με άλλες σύγχρονες εφαρμογές και συστήματα.
- Για τον προσδιορισμό θέσης δεν απαιτεί αμοιβαία ορατότητα μεταξύ του σταθερού σταθμού και του κινούμενου. Απαιτείται μόνο ορατότητα προς ικανοποιητικό αριθμό δορυφόρων (ανοικτός ορίζοντας).
- Παρέχει τη δυνατότητα καταγραφής δεδομένων καθ' όλη τη διάρκεια της μέρας και της νύχτας.
- Παρέχει καλή ακρίβεια εντοπισμού οριζοντιογραφικά.

Τα κυριότερα μειονεκτήματα της μεθόδου συνοψίζονται στα εξής:

- Απαιτεί ανοικτό ορίζοντα για να έχει οπτική επαφή με δορυφόρους, γεγονός που κάνει δύσκολη τη χρήση του μέσα σε πόλεις και κατοικημένες περιοχές.
- Το σήμα των δορυφόρων επηρεάζεται από την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που μπορεί να υπάρχει κοντά στην περιοχή που βρίσκεται ο δέκτης.
- Το σήμα των δορυφόρων παρουσιάζει το φαινόμενο των πολλαπλών διαδρομών όταν ανακλάται σε διάφορες επιφάνειες πριν φτάσει στο δέκτη.
- Παρέχει μειωμένη ακρίβεια προσδιορισμού υψομετρικά.
- Απαιτείται η δημιουργία μικρών βάσεων μεταξύ των δεκτών, που δεν είναι πάντα εφικτό.
- Οι μετρήσεις ενδέχεται να περιέχουν σφάλματα που οφείλονται σε κακή γεωμετρία των δορυφόρων και έτσι μπορεί να μην προκύψουν αξιόπιστα αποτελέσματα.



Σχήμα 1.8: Σχηματική αρχή λειτουργίας του συστήματος GPS στην παρακολούθηση κατασκευών
Figure 1.8: Schematic operating principle of the GPS system for structural monitoring
(Πηγή: Γκίκας-Δασκαλάκης, 2008)

1.4.2 β Γεωδαιτικοί σταθμοί αυτόματης αναγνώρισης και παρακολούθησης στόχου (Robotic Total Station)

➤ Αρχές λειτουργίας

Το RTS (Robotic Total Station) αποτελεί εξέλιξη του ηλεκτρονικού θεοδολίχου. Χρησιμοποιείται κυρίως στη χάραξη μεγάλων τεχνικών έργων και στην παρακολούθηση της συμπεριφοράς πολλών φυσικών φαινομένων (π.χ. κατολισθήσεις, κ.ά). Χρησιμοποιείται επίσης, στην παρακολούθηση των δομικών κατασκευών προκειμένου να μελετήσει τη δυναμική συμπεριφορά τους.

Τα εν λόγω όργανα προσφέρουν τη δυνατότητα αυτόματης αναγνώρισης, παρακολούθησης και εκτέλεσης μετρήσεων προς κινούμενο στόχο. Η αρχή εντοπισμού σημείων στο χώρο με πολικές συντεταγμένες επιτυγχάνεται μέσω μετρήσεων αποστάσεων και γωνιών και τη βοήθεια ειδικής διάταξης κάμερας CCD. Η διαδικασία εκτελείται επαναλαμβανόμενα με αυτοματοποιημένο τρόπο και μεγάλη συχνότητα καταγραφής (έως 10 Hz), χωρίς να δημιουργείται ανάγκη χειροκίνητης σκόπευσης-μέτρησης ή άλλης παρέμβασης του παρατηρητή.

Πιο συγκεκριμένα, η λειτουργία του RTS στηρίζεται στο σερβοκινητήρα και σε ένα μικρο-επεξεργαστή που διαθέτει και του επιτρέπουν να πραγματοποιεί είτε προγραμματισμένες σκοπεύσεις, είτε παρακολούθηση και μέτρηση των

συντεταγμένων του κινητού στόχου. Το όργανο εκπέμπει μια ακτίνα laser, αυτή ανακλάται σε έναν ανακλαστήρα και στη συνέχεια επιστρέφει στο όργανο και προσδιορίζεται η θέση του σταθερού ή κινούμενου στόχου και σε τοπικό σύστημα πολικών συντεταγμένων (απόσταση μεταξύ οργάνου και ανακλαστήρα και η γωνία της ακτίνας ως προς τον κατακόρυφο και κάποιον οριζόντιο άξονα αναφοράς). Ακολουθεί ο μετασχηματισμός των συντεταγμένων σε καρτεσιανό σύστημα αναφοράς.

➤ Πηγές σφαλμάτων

Όπως προαναφέρθηκε το RTS αποτελεί εξέλιξη των γεωδαιτικών σταθμών. Κατά συνέπεια, τα περισσότερα από τα σφάλματά του είναι κοινά με αυτά των κλασικών γεωδαιτικών σταθμών όπως για παράδειγμα σφάλματα κέντρωσης, οριζοντίωσης, διάθλασης κ.ά. Η εξέλιξη που έχει επέλθει στα συγκεκριμένα όργανα και οι διάφορες τεχνικές μέτρησης έχουν περιορίσει σε ικανοποιητικό βαθμό τα παραπάνω σφάλματα.

Επιπρόσθετα, υπάρχουν σφάλματα που οφείλονται σε εξωτερικούς παράγοντες όπως είναι οι περιβαλλοντικές συνθήκες (αυξημένα επίπεδα υγρασίας, θερμοκρασίας κλπ), πηγές εξωτερικής ακτινοβολίας και αντανάκλασεις, σφάλματα κατά σκόπευση, ποιότητα στόχου, σφάλματα κέντρωσης, σφάλματα πιθανής απόκλισης στην παραλληλία των σκοπευτικών αξόνων οργάνου-στόχου, εξασθένηση λόγω απόστασης του σήματος παρακολούθησης, παρεμβολή εμποδίων ανάμεσα στο στόχο και το όργανο κ.α.

➤ Αξιολόγηση της μεθόδου μέτρησης με ρομποτικούς γεωδαιτικούς σταθμούς

Οι ρομποτικοί γεωδαιτικοί σταθμοί παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα και ως εκ τούτου προτιμούνται ιδιαίτερα σε εφαρμογές παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας των κατασκευών. Μερικά από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματά του συνοψίζονται στη συνέχεια:

- Το RTS είναι κατάλληλο για την ακριβή παρακολούθηση ταλαντώσεων και δυναμικών κινήσεων, δεδομένου ότι μπορεί να καταγράψει με ακρίβεια το εύρος ταλάντωσης ακόμα και για μικρές ταλαντώσεις.

- Μπορεί να προσδιορίσει με ακρίβεια την συχνότητα διέγερσης για χαμηλόσυχνες ταλαντώσεις. Για πιο υψίσυχνες κινήσεις το RTS απαιτεί κατάλληλο λογισμικό και άλλη διάταξη.
- Υπάρχει δυνατότητα βελτίωσης των καταγραφών με την τοποθέτηση του RTS σε κατάλληλη απόσταση έτσι ώστε η κίνηση του σημείου παρακολούθησης να είναι ακριβής ακόμα και όταν η ταχύτητα και το εύρος της ταλάντωσης είναι μεγάλα.

Τα βασικά μειονεκτήματα που παρουσιάζουν οι ρομποτικοί γεωδαιτικοί σταθμοί είναι τα εξής:

- Η ποιότητα των μετρήσεων επηρεάζεται σημαντικά από τις καιρικές συνθήκες όπως για παράδειγμα τον ήλιο, τη βροχή κ.ά.
- Είναι απαραίτητη η τοποθέτηση πρίσματος στο σημείο ελέγχου και πολλές φορές η διαδικασία αυτή δεν είναι εύκολα εφικτή από όλες τις κατασκευές.
- Μελετά τη δυναμική συμπεριφορά μιας κατασκευής λαμβάνοντας μετρήσεις μόνο από ένα σημείο.

1.4.2 γ Επίγειο σύστημα radar μικροκυματικής συμβολομετρίας (Ground-based microwave radar interferometry system)

Με το επίγειο σύστημα radar μικροκυματικής συμβολομετρίας και συγκεκριμένα με τη λειτουργία IBIS-S διεξήχθησαν οι μετρήσεις για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας (Σχήμα 1.9). Επομένως, γίνεται λεπτομερής περιγραφή των χαρακτηριστικών του στο κεφάλαιο 2. Εδώ θα αναφερθούν συνοπτικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της χρήσης του συγκεκριμένου οργάνου όσον αφορά στην παρακολούθηση κατασκευών.

Τα βασικά πλεονεκτήματα που προσφέρει σε σχέση με άλλες μεθόδους παρακολούθησης κατασκευών (GPS, επιταχυνσιόμετρα, μηκηνσιόμετρα, κλισίμετρα κ.ά) είναι:

- Παρακολουθεί την ταλάντωση μιας κατασκευής εξ' αποστάσεως χωρίς να απαιτείται πρόσβαση σε αυτή.

- Ανάλυση που αγγίζει τα 0.75 m και η οποία επιτρέπει στο IBIS-S να ανιχνεύσει τη μετατόπιση μεγάλου αριθμού σημείων μιας κατασκευής με μια απλή στόχευση.
- Συχνότητα δειγματοληψίας έως 200 Hz.
- Απ' ευθείας μέτρηση μετακινήσεων σε πραγματικό χρόνο. Το IBIS-S μπορεί να επεξεργαστεί δεδομένα και να εμφανίσει τη μετακίνηση ενός σημείου της κατασκευής που θα επιλεγεί σε πραγματικό χρόνο. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιείται και στην παρακολούθηση κατασκευών υπό κατάρρευση δεδομένου ότι παράγει σήματα κινδύνου σε περίπτωση κατάρρευσης.
- Παρουσιάζει ακρίβεια μετακινήσεων έως 1/10 mm. Η τεχνική της συμβολομετρίας επιτρέπει στο IBIS-S να μετρήσει μετατοπίσεις με υψηλό βαθμό ακρίβειας και ορθότητας.
- Η εγκατάσταση του απαιτεί λίγο χρόνο.
- Μπορεί να λάβει μετρήσεις όλη τη διάρκεια της μέρας και κάτω από οποιεσδήποτε καιρικές συνθήκες.
- Προσφέρει τη δυνατότητα μέτρησης σε μη προσβάσιμες ή ψηλές κατασκευές στις οποίες δεν είναι εφικτό να γίνουν μετρήσεις που απαιτούν επαφή.

Τα βασικά μειονεκτήματα του είναι:

- Το κόστος του είναι πολύ υψηλό.
- Πολλές φορές όταν η εφαρμογή απαιτεί πολύ υψηλή ακρίβεια μπορεί να χρειαστεί να εγκατασταθούν ανακλαστήρες σε συγκεκριμένα σημεία ελέγχου. Αυτή η τεχνική μειώνει το θόρυβο του σήματος λόγω της καλύτερης ανακλαστικότητας. Η συγκεκριμένη διαδικασία όμως αναιρεί τον πλεονέκτημα της μέτρησης χωρίς να χρειάζεται η εγκατάσταση στόχου στην κατασκευή.



Σχήμα 1.9: Επίγειο σύστημα radar μικροκυματικής συμβολομετρίας
Figure 1.9: Ground-based microwave interferometry system
(Πηγή: www.idscompany.it)

1.4.2 δ Επίγειοι σαρωτές laser (Terrestrial Laser Scanner)

➤ Αρχές λειτουργίας

Οι τρισδιάστατοι σαρωτές laser (Σχήμα 1.10) είναι ένα είδος οργάνων για την παρακολούθηση διάφορων τεχνικών έργων. Ουσιαστικά, προσδιορίζουν τις θέσεις σημείων σε τρεις διαστάσεις ως προς ένα τοπικό σύστημα αναφοράς, μετρώντας την απόσταση, την κατακόρυφη και την οριζόντια γωνία προς αυτά. Όλα τα όργανα αυτής της κατηγορίας, εκτός από τις πολικές συντεταγμένες, μετρούν και την ανακλαστικότητα του κάθε σημείου, ενώ έχουν τη δυνατότητα και της λήψης ψηφιακών φωτογραφιών της περιοχής ή του αντικειμένου που αποτυπώνεται. Τα δεδομένα συλλέγονται ως ομοιόμορφα κατανεμημένα 3D έγχρωμα (RGB) ή gray-scaled (ανάλογα με την ένταση του ανακλώμενου σήματος) σημεία με την επιθυμητή πυκνότητα (ανάλυση), το σύνολο των οποίων αποτελεί ένα νέφος σημείων (point cloud). Το πλήθος των σημείων που λαμβάνονται σε μία σάρωση εξαρτάται από τη γωνιακή ανάλυση του οργάνου, η οποία είναι συνάρτηση του γωνιακού βήματος των κινητήρων που περιστρέφουν τη μετρητική κεφαλή γύρω από τον οριζόντιο και τον κατακόρυφο άξονα, καθώς και από την ανάλυση του δίσκου κώδικα Gray που έχει τοποθετηθεί στον κάθε άξονα. Ο αριθμός των σημείων που μπορεί να μετρήσει ένας σύγχρονος σαρωτής ξεκινά από μερικές εκατοντάδες χιλιάδες και φτάνει έως μερικά εκατομμύρια σημεία ανά στάση σάρωσης. Στις περισσότερες περιπτώσεις μία και μοναδική σάρωση δεν είναι αρκετή για την παραγωγή ενός ολοκληρωμένου μοντέλου

του αντικειμένου. Πολλαπλές σαρώσεις από διάφορες διευθύνσεις είναι συνήθως απαραίτητες για τη λήψη πληροφοριών που αφορούν σε όλες τις πλευρές του αντικειμένου. Όλες οι σαρώσεις πρέπει να αναχθούν σε ένα κοινό σύστημα αναφοράς και στη συνέχεια συνθέτονται ώστε να δημιουργήσουν ένα ολοκληρωμένο μοντέλο. Με τη χρήση του κατάλληλου λογισμικού διαχείρισης είναι δυνατή η εξαγωγή άμεσων συμπερασμάτων και η παραγωγή προηγμένων αξιόπιστων προϊόντων.



Σχήμα 1.10: Επίγειος σαρωτής laser
Figure 1.10: Terrestrial laser scanner
(Πηγή: www.astrolabe.gr)

➤ Κατηγορίες επίγειων σαρωτών laser

Ανάλογα με τον τρόπο εκπομπής της δέσμης laser διακρίνονται δύο είδη σαρωτών:

1. *Phased-based laser scanner:*

Οι σαρωτές που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία, επιτυγχάνουν πολύ υψηλή ακρίβεια στα τελικά προϊόντα κάτι το οποίο τους καθιστά κατάλληλους για παρακολούθηση φαινομένων δυναμικής μετατόπισης.

2. *Time of flight laser scanner:*

Η βασική αρχή της μεθόδου είναι η μέτρηση της διαφοράς χρόνου μεταξύ του εκπεμπόμενου και του λαμβανόμενου σήματος και βάσει της ταχύτητας φωτός, ο υπολογισμός της απόστασης. Ο υπολογισμός της διαφοράς χρόνου μεταξύ του εκπεμπόμενου και λαμβανόμενου σήματος γίνεται με διάφορες τεχνικές, με τις σημαντικότερες να είναι η μετάδοση του παλμού και η διαμόρφωση του φέροντος κύματος. Οι σαρωτές που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία χρησιμοποιούνται συνήθως για τη γεωμετρική τεκμηρίωση των κατασκευών.

➤ **Ακρίβεια**

Η ακρίβεια προσδιορισμού συντεταγμένων με μεθόδους επίγειας σάρωσης με laser ποικίλει ανάλογα με το αντικείμενο παρακολούθησης, πάντως φτάνει σε επίπεδο μερικών mm. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια είναι οι εξής:

- Η μέθοδος σάρωσης που θα χρησιμοποιηθεί
- Η απόσταση από το αντικείμενο της σάρωσης
- Ο αριθμός των μετρήσεων
- Η ταχύτητα της σάρωσης
- Το υλικό της επιφάνειας που προσπίπτει η δέσμη

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΟ ΕΠΙΓΕΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑ RADAR ΜΙΚΡΟΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑΣ IBIS-S

2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά στο επίγειο σύστημα radar μικροκυματικής συμβολομετρίας, δίνεται γενική περιγραφή του συγκεκριμένου εξοπλισμού, αναλύονται τα παρελκόμενα που συνθέτουν όλο το σύστημα, τα τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του, η αρχή λειτουργίας του, η ακρίβεια των μετρήσεων και οι ατμοσφαιρικές επιδράσεις. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στο λογισμικό καταγραφής του συστήματος «IBIS-S controller» το οποίο χρησιμοποιείται τόσο για τη λήψη όσο και για την καταγραφή των μετρήσεων.

2.2 Επίγειο Σύστημα Μικροκυματικής Συμβολομετρίας IBIS-S

2.2.1 Γενική περιγραφή

Η εταιρία Ingegneria Dei Sistemi ή IDS δημιούργησε μια νέα τεχνολογία, που βασίζεται στο επίγειο radar συμβολομετρίας και επιτρέπει την εξ αποστάσεως παρακολούθηση των μετακινήσεων των τμημάτων του εδάφους (κατολισθήσεις, κλίσεις, τα ηφαιστεια, οι παγετώνες κλπ.) και των κατασκευών (φράγματα, γέφυρες, πύργοι, κτίρια κ.λπ.) με υψηλή ακρίβεια.

Η τεχνολογία Image By Interferometric Survey ή IBIS (Σχήμα 2.1) διαφοροποιείται σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους μέτρησης των μετακινήσεων των κατασκευών και των παραμορφώσεων του εδάφους, τόσο σε στατικές (αργές μετατοπίσεις) όσο και σε δυναμικές μετρήσεις μετατοπίσεων. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που το κάνουν να ξεχωρίζει είναι τα εξής:

- Παρακολούθηση εξ' αποστάσεως: επιτρέπει την παρακολούθηση των μετακινήσεων, χωρίς να απαιτείται η πρόσβαση στην περιοχή από απόσταση έως 500 m.
- Ευρεία περιοχή παρακολούθησης: αρκετά τετραγωνικά χιλιόμετρα μπορεί να παρακολουθούνται ταυτόχρονα. Ενώ άλλοι αισθητήρες μετρούν τη μετατόπιση ενός επιλεγμένου σημείου κάθε φορά, το IBIS-S μετρά τις μετατοπίσεις πολλών σημείων ταυτόχρονα σε πραγματικό χρόνο.

- Υψηλή ακρίβεια: ακρίβεια μέτρησης της τάξης του 1/10 mm σε κανονικές συνθήκες.
- Λειτουργία οποιαδήποτε στιγμή της μέρας και με οποιαδήποτε καιρικές συνθήκες: μπορεί να λειτουργήσει σε όλες τις συνθήκες όπως μέρα, νύχτα, ομίχλη και βροχή.
- Αυτόνομη λειτουργία: το σύστημα μπορεί να λειτουργήσει για μόνιμη ή μεγάλης διάρκειας παρακολούθηση χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση. Δεδομένου ότι μετράει σε πραγματικό χρόνο μετατοπίσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την έγκαιρη προειδοποίηση σε έκτακτες καταστάσεις (αστοχίες κ.τ.λ.)
- Δυναμική μέτρηση: το IBIS-S όχι μόνο επιτρέπει τη συνεχή παρακολούθηση των αργών μετακινήσεων και των παραμορφώσεων, αλλά μπορεί να μετρήσει επίσης δονήσεις σε κατασκευές (συχνότητες συντονισμού κ.ά.) έως 100 Hz.



Σχήμα 2.1: Απεικόνιση του IBIS-S μικροκυματικής συμβολομετρίας
Figure 2.1: View of the IBIS-S microwave interferometer
(Πηγή: IBIS-S user manual, IDS Company, 2008)

2.2.2 Το πεδίο εφαρμογών του IBIS-S

Το σύστημα IBIS-S χρησιμοποιείται για μονοδιάστατη στατική και δυναμική παρακολούθηση κατασκευών. Όσον αφορά τη στατική παρακολούθηση πραγματοποιεί ελέγχους των φορτίων στις κατασκευές και ελέγχει για τυχόν κίνδυνο αστοχίας. Κατά τη δυναμική παρακολούθηση προσδιορίζει τη συμπεριφορά των

κατασκευών σε πραγματικό χρόνο, μετράει το φάσμα συχνοτήτων ταλάντωσης, την επιτάχυνση και τη μετατόπιση σημείων της κατασκευής (Σχήμα 2.2).

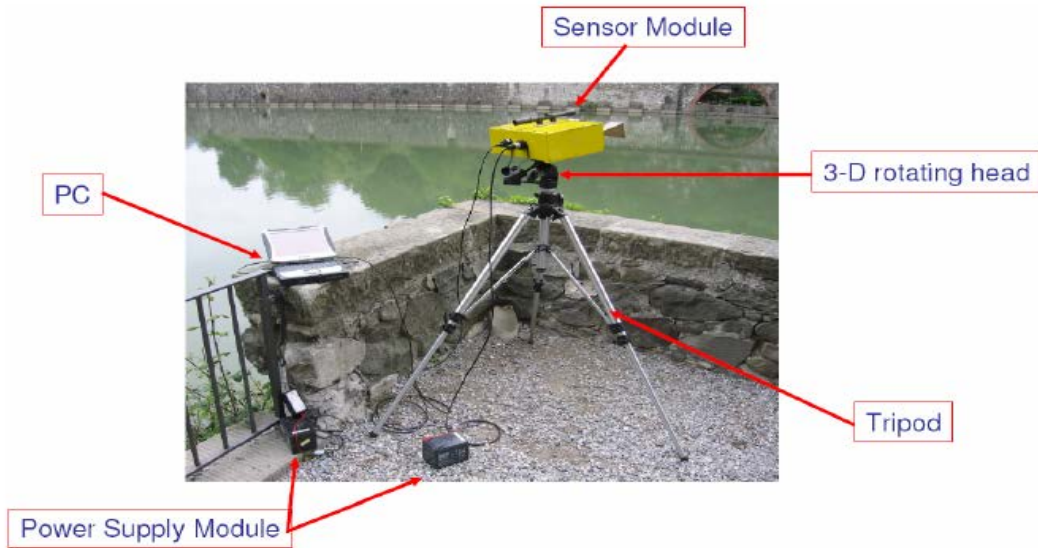


Σχήμα 2.2: Απεικόνιση IBIS-S και η χρήση του στην παρακολούθηση κατασκευών
Figure 2.2: View of IBIS-S and its use in structural monitoring
(Πηγή: www.idscopy.com)

Η παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς των κατασκευών (γέφυρες, κτίρια, πύργοι κλπ.) στις μέρες μας είναι ολοένα και πιο σημαντικό καθήκον για τους πολιτικούς μηχανικούς. Οι δοκιμές νέων κατασκευών, η συντήρηση και διατήρηση των υφιστάμενων και η παρακολούθηση των κατασκευών που έχουν υποβληθεί σε φυσικούς (π.χ. κατολισθήσεις, καθιζήσεις) ή τεχνητούς (π.χ. κατασκευή σηράγγων, τα μεγάλα έργα πολιτικού μηχανικού) κινδύνους επωφελούνται σε μεγάλο βαθμό από τη χρήση του IBIS-S. Να σημειωθεί πως μετράει από απόσταση έως 500 m, με συχνότητα δειγματοληψίας έως 200 Hz, ημέρα και νύχτα και σε οποιοδήποτε καιρικές συνθήκες.

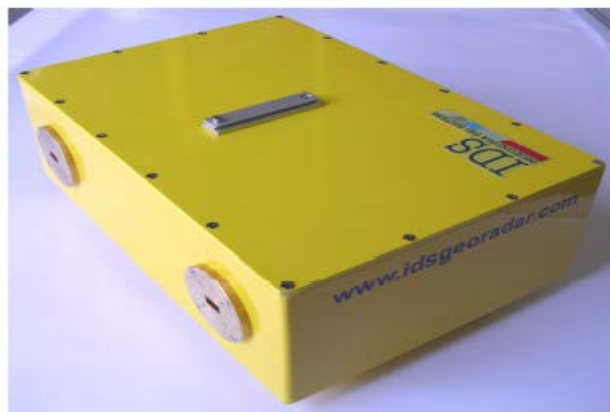
2.2.3 Όργανο και παρελκόμενα

Το σύστημα IBIS-S αποτελείται από τη μονάδα του αισθητήρα τοποθετημένη σε τρίποδα που διαθέτει περιστρεφόμενη κεφαλή, έναν υπολογιστή και τη μονάδα τροφοδοσίας ρεύματος (Σχήμα 2.3).



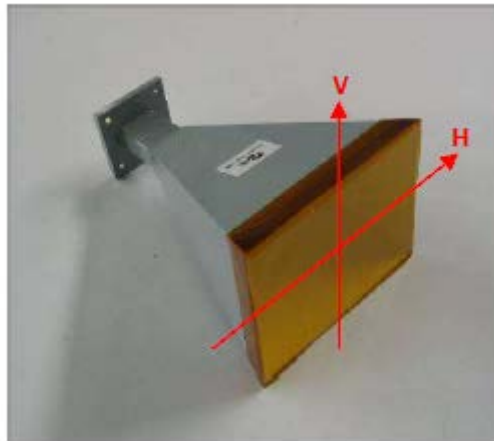
Σχήμα 2.3: Ο εξοπλισμός του radar
Figure 2.3: The radar equipment
(Πηγή: Gentile C., 2009)

Η μονάδα του αισθητήρα είναι ένα radar (το radar λαμβάνει την πληροφορία φάσης του λαμβανόμενου σήματος) που παράγει, μεταφέρει και λαμβάνει τα ηλεκτρομαγνητικά σήματα προκειμένου να υποστούν επεξεργασία για να υπολογιστούν οι μετακινήσεις της υπό έρευνα κατασκευής (Σχήμα 2.4). Η μονάδα του αισθητήρα ζυγίζει 12 kg, περιλαμβάνει δύο κεραίες για την εκπομπή και τη λήψη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και τοποθετείται στον τρίποδα που διαθέτει περιστρεφόμενη κεφαλή ώστε ο αισθητήρας να μπορεί να προσανατολίζεται σε οποιαδήποτε επιθυμητή διεύθυνση.



Σχήμα 2.4: Ο αισθητήρας του IBIS-S
Figure 2.4: The IBIS-S sensor
(Πηγή: IBIS-S user manual, IDS Company, 2008)

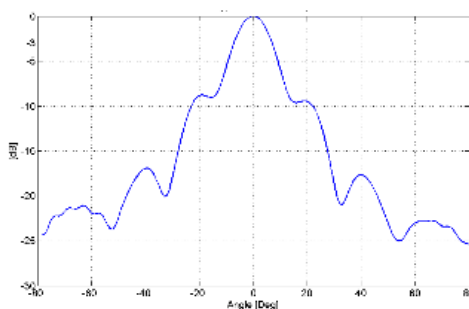
Το σύστημα του IBIS-S που ανήκει στη ζώνη κυμάτων Ku παρέχεται με δύο πανομοιότυπες κεραίες IBIS-H20 που λειτουργούν σε κάθετη πόλωση και χαρακτηρίζονται από το μέγιστο εύρος των 20 dBi (Σχήμα 2.5). Τα χαρακτηριστικά του πλάτους του κύριου λοβού της κεραίας στα -3 dB και -10 dB παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1 και το κάθετο και οριζόντιο επίπεδο φαίνονται στο Σχήμα 2.5.



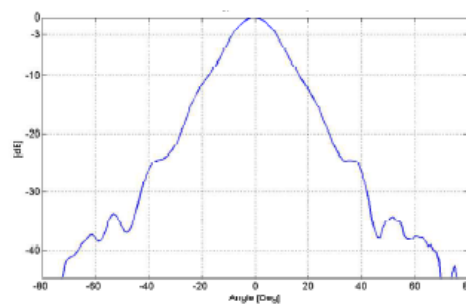
Σχήμα 2.5: Κεραία IBIS-H20
Figure 2.5: IBIS-H20 antenna
 (Πηγή: IBIS-S user manual, IDS Company, 2008)

IBIS-H20	Οριζόντιο επίπεδο	Κάθετο επίπεδο
-3 dB	17°	15°
-10 dB	34°	45°

Πίνακας 2.1: Πλάτος των κύριων λοβών των κεραίων IBIS-H20 στα -3dB και στα -10 dB
Table 2.1: Width of the main lobes of the IBIS-H20 antennas at -3 dB and -10 dB
 (Πηγή: IBIS-S user manual, IDS Company, 2008)



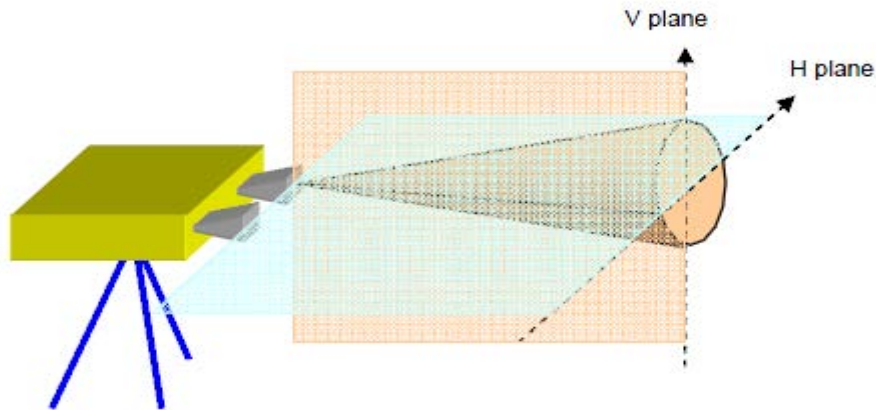
Σχήμα 2.6: IBIS-H20 Διάγραμμα κατακόρυφου επιπέδου
Figure 2.6: IBIS-H20 vertical plane pattern
 (Πηγή: IBIS-S user manual, IDS Company, 2008)



Σχήμα 2.7: IBIS-H20 Διάγραμμα οριζόντιου επιπέδου
Figure 2.7: IBIS-H20 horizontal plane pattern
 (Πηγή: IBIS-S user manual, IDS Company, 2008)

Ο κύριος λοβός της κεραίας (Σχήμα 2.8) είναι η γωνιακή περιοχή εντός της οποίας η κεραία συγκεντρώνει την περισσότερη ενέργεια. Ο κύριος λοβός μπορεί να

παρουσιαστεί σχηματικά σαν κώνος με ελλειπτική βάση, όπου η κορυφή του κώνου τοποθετείται σε αντιστοιχία με την κεραία. Η βάση του κώνου είναι ελλειπτική καθώς οι κεραίες έχουν λοβούς με διαφορετικά γωνιακά πλάτη σε οριζόντιο και κατακόρυφο επίπεδο.



Σχήμα 2.8: Διάγραμμα του λοβού της κεραίας
Figure 2.8: Schematic diagram of the antenna beam
(Πηγή: IBIS-S user manual, IDS Company, 2008)

Το τμήμα ραδιοσυχνότητας αφορά μια κύρια συχνότητα 16,75 GHz με μέγιστο εύρος ζώνης 300 MHz στη ζώνη κυμάτων Ku.

Ο αισθητήρας συνδέεται με τον υπολογιστή, PANASONIC CF-19, μέσω θύρας USB. Ο υπολογιστής διαθέτει ειδικό λογισμικό για τη διαχείριση του συστήματος και χρησιμοποιείται για να οριστούν οι παράμετροι λήψης, να αποθηκευτούν οι μετρήσεις και να παρουσιαστούν οι μετακινήσεις σε πραγματικό χρόνο.

2.2.4 Τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά

Τα κυριότερα τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του IBIS-S είναι:

- Μέγιστη ανάλυση απόστασης: 0.50 m
- Ελάχιστη ανάλυση απόστασης: 0.75 m
- Μέγιστη συχνότητα δειγματοληψίας: 200 Hz
- Μέγιστη απόσταση λειτουργίας: εξαρτάται από τη συχνότητα δειγματοληψίας και την ανάλυση απόστασης. Φτάνει έως 500 m για δυναμική κατάσταση λειτουργίας.

- Τυπική ακρίβεια μέτρησης μετατοπίσεων στην κατεύθυνση προβολής:
0.1 mm

2.2.5 Αρχές λειτουργίας του IBIS-S

Η λειτουργία του IBIS-S στηρίζεται στις ακόλουθες τεχνικές:

- Συμβολομετρία (interferometry)
- SF-CW (Stepped Frequency-Continuous Wave)- βαθμωτή συχνότητα-συνεχές κύμα

2.2.5 α Η τεχνική της συμβολομετρίας

Η μικροκυματική συμβολομετρία είναι μια νέα τεχνική που χρησιμοποιείται για την εξ' αποστάσεως στατική και δυναμική παρακολούθηση των κατασκευών ή και των μετατοπίσεων του εδάφους, και είναι ο καρπός ενός μεγάλης διάρκειας ερευνητικού έργου που ανέλαβε η εταιρία IDS σε συνεργασία με το Πολυτεχνείο του Μιλάνου. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό αυτής της νέας τεχνολογίας είναι ότι μπορεί να λειτουργήσει από απόσταση, χωρίς να απαιτείται καμία απολύτως επαφή με το στόχο που πρέπει να παρακολουθείται και ότι μπορεί να παρέχει χάρτες μετατοπίσεων, όλα με μεγάλη ταχύτητα και ακρίβεια μέτρησης σε σύγκριση με την τρέχουσα τεχνολογία.

Πιο συγκεκριμένα, η συμβολομετρία αποτελεί τεχνική του radar για τη μέτρηση μετακινήσεων διάφορων αντικειμένων, συγκρίνοντας πληροφορίες φάσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που ανακλώνται από το αντικείμενο σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Κάθε μετατόπιση μικρότερη του χιλιοστού δημιουργεί μια διαφορά φάσης του ανακλώμενου κύματος που είναι ανιχνεύσιμη από το radar.

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που ανακλώνται από ένα αντικείμενο διαφέρουν στην πληροφορία της φάσης, καθώς μεταβάλλεται η θέση του αντικειμένου εκτιμώντας την προέλευση της εκπομπής και της λήψης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος.

Η μέτρηση της μετατόπισης (d) ενός αντικειμένου προκύπτει από τη διαφορά φάσης ($\Delta\varphi$) που μετριέται από τον αισθητήρα του radar κατά τις διάφορες στιγμές της λήψης. Οι μετρήσεις μετατόπισης και διαφοράς φάσης συνδέονται με την σχέση:

$$d = \frac{\lambda}{4\pi} \Delta\varphi \quad (2.1)$$

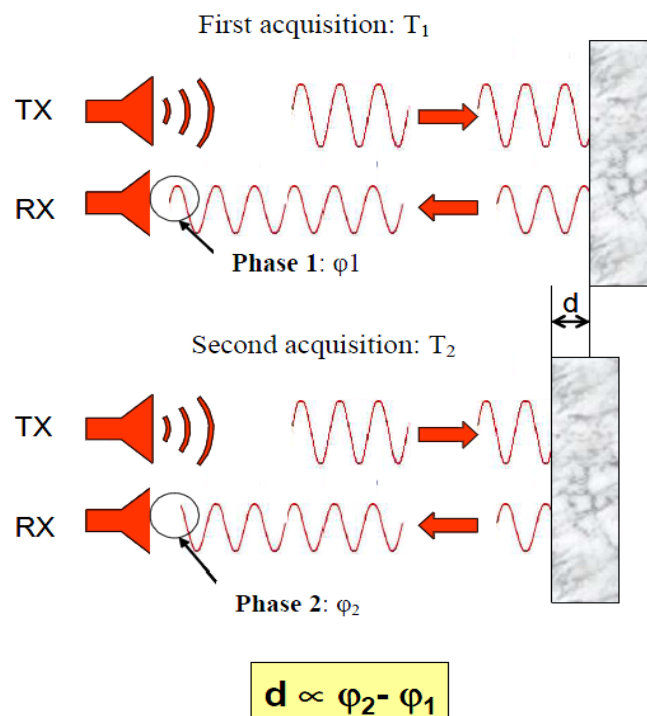
όπου:

d : ακτινική μετατόπιση

λ : μήκος κύματος

$\Delta\varphi$: διαφορά φάσης

Το Σχήμα 2.9 εξηγεί την αρχή λειτουργίας της τεχνικής της συμβολομετρίας.



Σχήμα 2.9: Η τεχνική της συμβολομετρίας
Figure 2.9: The interferometric technique
(Πηγή: IBIS-S controller user manual, IDS Company, 2009)

Οι πρώτες εφαρμογές της συγκεκριμένης τεχνικής έγιναν μέσω δορυφόρου για να ανιχνευτούν οι μετακινήσεις μεγάλων εκτάσεων του εδάφους. Η ίδια τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί με radar εγκατεστημένα στο έδαφος, τα οποία παρέχουν υψηλή ανάλυση και ακρίβεια.

Το IBIS-S χρησιμοποιεί τη συμβολομετρία για να μετρήσει μετακινήσεις κατασκευών στις οποίες προσπίπτει η ηλεκτρομαγνητική δέσμη που εκπέμπει η κεραία: το IBIS-S εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικά κύματα καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων ανά τακτά διαστήματα και επεξεργάζεται τις πληροφορίες φάσης για να

εντοπίζει τυχόν μετατοπίσεις που συμβαίνουν μεταξύ μιας εκπομπής και της επόμενης.

Πρέπει να σημειωθεί πως το IBIS-S μετράει μετακινήσεις στη διεύθυνση της σκόπευσης (ακτινική μετατόπιση) dp και το αποτέλεσμα της μετακίνησης του σημείου βρίσκεται με γεωμετρική επίλυση ως εξής:

$$dp = d \sin(\alpha) \quad (2.2)$$

Όμως, επειδή $h = r \sin(\alpha)$, προκύπτει:

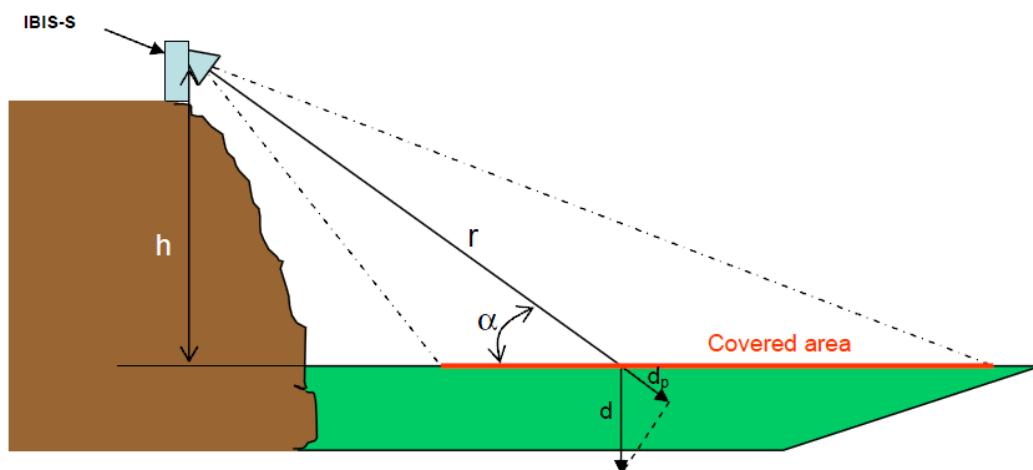
$$d = dp \frac{r}{h} \quad (2.3)$$

d : προβαλλόμενη μετατόπιση

dp : ακτινική μετατόπιση

r : ακτινική απόσταση από την κεραία του οργάνου έως το παρατηρούμενο σημείο

h : κάθετη απόσταση του οργάνου από το αντικείμενο μέτρησης

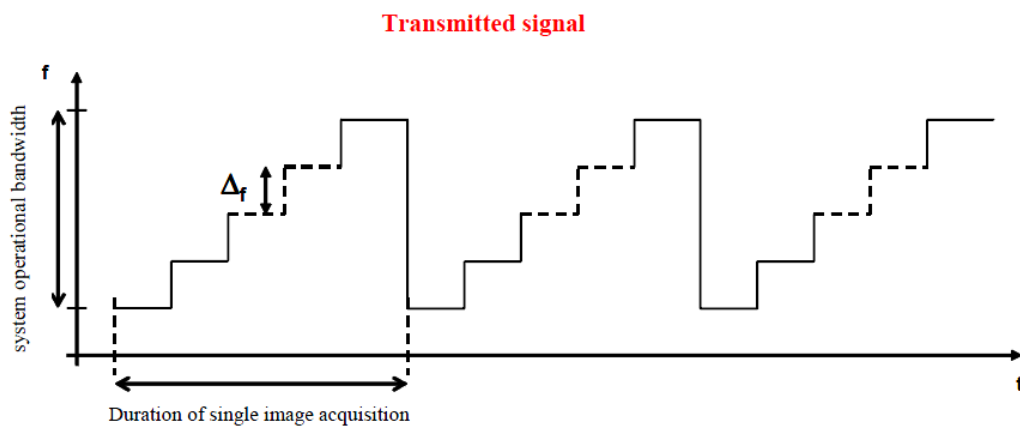


Σχήμα 2.10: Ακτινική μετατόπιση και προβαλλόμενη μετατόπιση
Figure 2.10: Radial displacement and projected displacement
(Πηγή: IBIS-S controller user manual, IDS Company, 2009)

2.2.5 β Η τεχνική της βαθμωτής συχνότητας- συνεχούς κύματος (SF-CW)

Το πιο σημαντικό εξάρτημα του IBIS-S είναι ο ηλεκτρομαγνητικός αισθητήρας που διαθέτει του οποίου η λειτουργία στηρίζεται στην τεχνική SF-CW. Με βάση την τεχνική αυτή εντοπίζεται η θέση διαφορετικών στόχων κατά μήκος της διεύθυνσης

σκόπευσης του radar. Η συγκεκριμένη τεχνική επιτρέπει στο IBIS-S να λάβει μονοδιάστατη εικόνα του αντικειμένου ενδιαφέροντος με μεγάλη ανάλυση απόστασης (δηλαδή, την ελάχιστη απόσταση που μπορεί να ανιχνευτεί κατά μήκος της γραμμής σκόπευσης του radar) χάρη στη μετάδοση μιας σειράς μεγάλης διάρκειας ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (Continuous Wave) σε διαφορετικές συχνότητες (Stepped Frequency). Συγκεκριμένα, το radar εκπέμπει μεγάλο αριθμό ηλεκτρομαγνητικών παλμών, των οποίων η συχνότητα αυξάνεται από παλμό σε παλμό με μια σταθερή αύξηση Δf (Σχήμα 2.11).



Σχήμα 2.11: Διάγραμμα εκπεμπόμενου σήματος με την πάροδο του χρόνου
Figure 2.11: Diagram of the signal transmitted over time
 (Πηγή: IBIS-S controller user manual, IDS Company, 2009)

Με τη συγκεκριμένη τεχνική το IBIS-S μπορεί να φτάσει την ανάλυση απόστασης των 0.75 m ανεξάρτητα από τη μέγιστη μετρήσιμη απόσταση. Η ανάλυση εικόνας στη διεύθυνση της υπό μελέτη κατασκευής εξαρτάται από την οπτική γωνία της κατασκευής και ακολουθεί την απλή γεωμετρική προβολή (Σχήμα 2.12):

$$\Delta x = \frac{\Delta r}{\cos(a)} = \frac{\Delta r R}{X} \quad (2.4)$$

όπου, $\Delta r = \frac{c}{2B}$ (2.5)

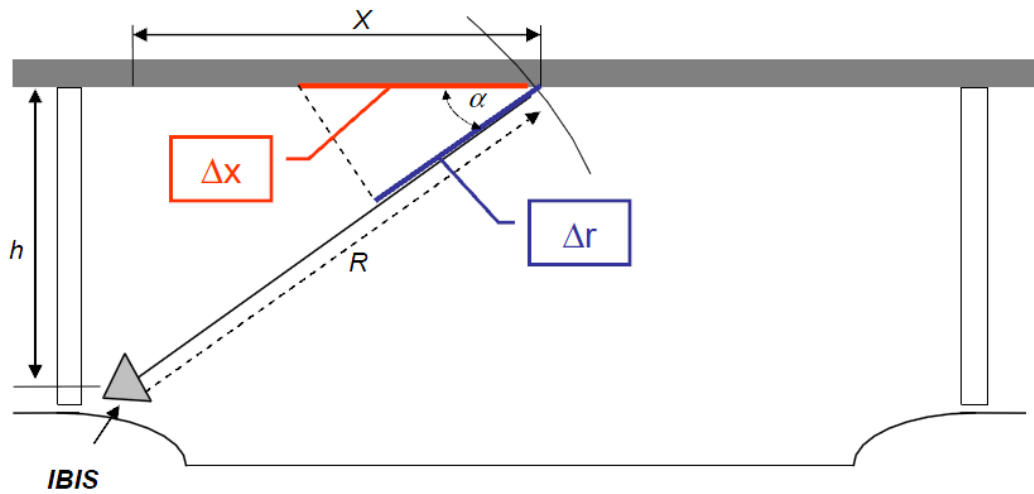
c : ταχύτητα του φωτός

B : εύρος ζώνης

Δr : ανάλυση απόστασης

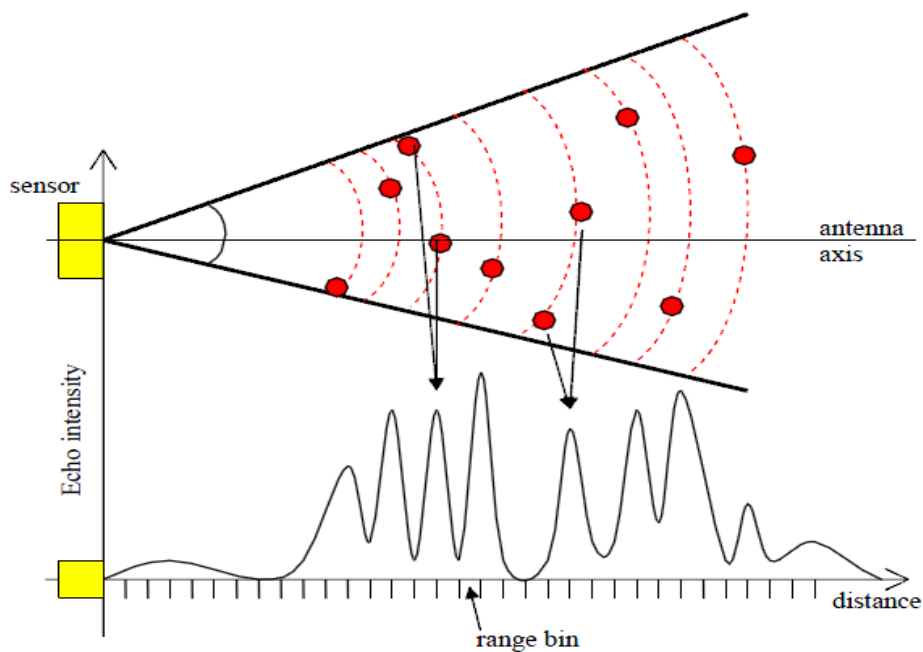
R : ακτινική απόσταση από την κεραία του οργάνου έως το παρατηρούμενο σημείο

Δx : προβαλλόμενη μετατόπιση



Σχήμα 2.12: Ανάλυση απόστασης και προβαλλόμενη ανάλυση απόστασης
Figure 2.12: Range resolution vs ground range resolution
(Πηγή: IBIS-S controller user manual, IDS Company, 2009)

Η τεχνική SF-CW επιτρέπει στο IBIS-S να διατηρήσει την ίδια ακρίβεια μέτρησης στα όρια λειτουργίας του.



Σχήμα 2.13: Προφίλ του φάσματος (μονοδιάστατη εικόνα)
Figure 2.13: An in-range profile (one dimensional image)
(Πηγή: IBIS-S controller user manual, IDS Company, 2009)

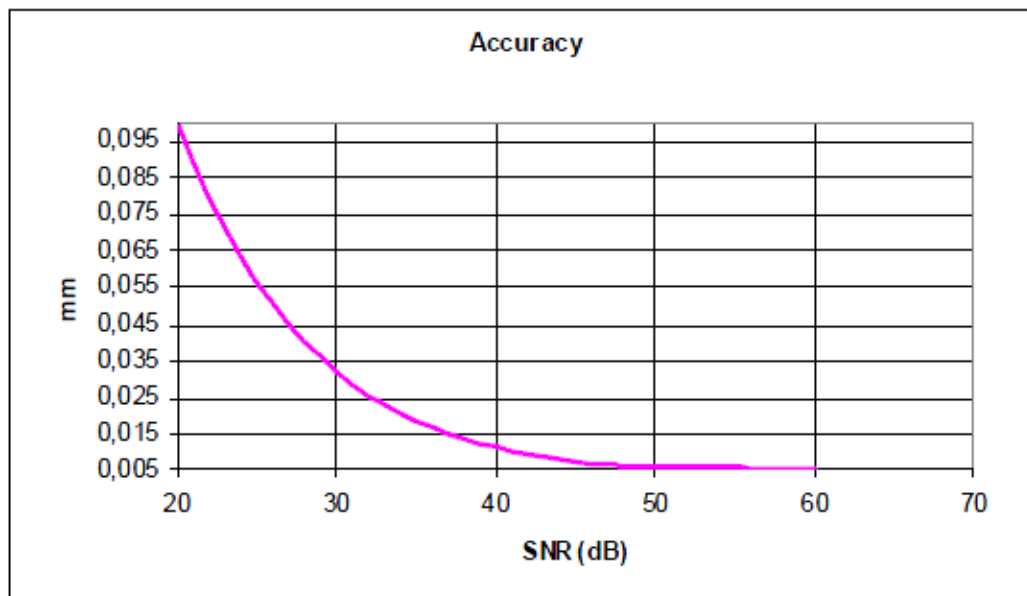
Στην λειτουργία S, η τεχνική SF-CW επιτρέπει στο σύστημα να λάβει μονοδιάστατη εικόνα των σημείων του αντικειμένου, όπως στο Σχήμα 2.13. Η απόκριση που προκύπτει από το IBIS-S για κάθε range bin περιέχει τις εξής πληροφορίες:

- Το πλάτος της έντασης του σήματος, που συνδέεται με την ανακλαστικότητα του αντικειμένου εντός του range bin.
- Τη φάση του σήματος που συνδέεται με την απόσταση μεταξύ του αισθητήρα και του range bin.

Αν ο στόχος με τη μεγαλύτερη ανακλαστικότητα βρίσκεται εντός ενός range bin, μπορεί να θεωρηθεί ότι οι πληροφορίες για το συγκεκριμένο range bin αναφέρονται στο στόχο με τη μεγαλύτερη ανακλαστικότητα.

2.2.6 Ακρίβεια μετρήσεων

Η μετακίνηση που μετριέται με τη μέθοδο της συμβολομετρίας (μέσω της σύγκρισης των φάσεων των διαφορετικών λήψεων), έχει ακρίβεια που εξαρτάται από την ένταση του σήματος του radar για το συγκεκριμένο range bin (στη μονοδιάστατη περίπτωση).



Σχήμα 2.14: Γράφημα ακρίβειας της μετατόπισης συναρτήσει του θορύβου του σήματος (SNR) εκφρασμένος σε dB

Figure 2.14: Graph of measurement accuracy as a function of the signal to noise ratio (SNR) expressed in dB

(Πηγή: IBIS-S controller user manual, IDS Company, 2009)

Η θεωρητική ακρίβεια του οργάνου εκτιμάται ότι είναι 0.001 mm. Ωστόσο, η συγκεκριμένη ακρίβεια είναι πρακτικά αδύνατο να επιτευχθεί (Σχήμα 2.14).

Πρέπει να σημειωθεί ότι η απόκριση του αντικειμένου που παρατηρείται μπορεί να βελτιωθεί με την εγκατάσταση τεχνητών ανακλαστών σε συγκεκριμένα σημεία ελέγχου. Έτσι, βελτιώνεται ο θόρυβος του σήματος εξαιτίας της βελτίωσης της ανακλαστικότητας του στόχου.

2.2.7 Ατμοσφαιρικές επιδράσεις

Δεδομένου ότι η λειτουργία του radar στηρίζεται στη διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων οι μετρήσεις που λαμβάνονται επηρεάζονται από τις συνθήκες του περιβάλλοντος, που είναι κυρίως οι μεταβολές στη θερμοκρασία και η υγρασία του περιβάλλοντος.

Η επίδραση των περιβαλλοντικών συνθηκών δεν είναι αισθητή κατά την εκτέλεση των δυναμικών μετρήσεων για τους εξής λόγους:

- Η συχνότητα των ατμοσφαιρικών μεταβολών είναι πολύ μικρότερη από τη συχνότητα των μετακινήσεων του αντικειμένου ενδιαφέροντος.
- Οι μέγιστες αποστάσεις δεν είναι πολύ μεγάλες.
- Το χρονικό διάστημα λήψης των μετρήσεων είναι μικρό.

2.3 Λογισμικό Καταγραφής « IBIS-S controller »

Το λογισμικό καταγραφής, IBIS-S controller, σχεδιάστηκε προκειμένου να καθοδηγήσει το χρήστη ώστε να περατωθεί η λήψη των μετρήσεων. Το πρόγραμμα αποτελείται από έξι παράθυρα η λειτουργία των οποίων περιγράφεται στη συνέχεια:

- **Survey Type Selection window:** Το παράθυρο αυτό δίνει τη δυνατότητα επιλογής του είδους της λήψης μετρήσεων (στατική ή δυναμική). Επιπλέον, παρέχει πληροφορίες για την κατάσταση του συστήματος και των μετρήσεων. Συγκεκριμένα, φαίνεται ο χρόνος που έχει παρέλθει από την στιγμή που ξεκίνησε η λήψη ή η επεξεργασία και παρουσιάζονται τυχόν σφάλματα κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.
- **Parameters Setting and Pointing window:** γίνεται η ρύθμιση των παραμέτρων της λήψης και παρουσιάζεται το αντικείμενο παρατήρησης.

- **Data Capture Geometry:** καθορίζεται η γεωμετρία την λήψης μετρήσεων, δηλαδή εισάγονται σαν δεδομένα η γωνία της κατασκευής, το μήκος της, οι συντεταγμένες της θέσης του οργάνου σε σχέση με την κατασκευή και η κατακόρυφη κλίση του οργάνου σε σχέση με τον ορίζοντα.
- **Missions Selection window:** καθορίζεται το είδος της λήψης μετρήσεων (στατική ή δυναμική) και μπορεί να οριστεί το όνομα της εκάστοτε λήψης ή να μετονομαστεί κάποια ή ακόμα και να διαγραφεί.
- **Survey Management window:** χρησιμοποιείται για την εκκίνηση και τον τερματισμό της λήψης και επιτρέπει στο χρήστη να δει τα δεδομένα που λαμβάνονται σε πραγματικό χρόνο. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα προβολής της μετακίνησης ενός συγκεκριμένου σημείου που θα επιλεγεί.
- **Survey Processing window:** παρέχει τη δυνατότητα ανάλυσης των δεδομένων που έχουν ληφθεί με διαφορετικούς τρόπους επεξεργασίας ανάλογα με το είδος της μελέτης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΑΡΑΚΑΜΠΤΗΡΙΟΣ ΚΑΠΝΟΔΟΧΟΣ, ΜΟΝΑΔΑΣ IV, ΑΗΣ ΛΑΥΡΙΟΥ

3.1 Εισαγωγή

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο δίνονται ορισμένα στοιχεία για τον ατμοηλεκτρικό σταθμό του Λαυρίου, τις μονάδες παραγωγής που διαθέτει, τον τρόπο λειτουργίας τους και την ισχύ κάθε μονάδας. Επιπλέον, δίνεται έμφαση στην παρακαμπτήριο καπνοδόχο της μονάδας IV του ΑΗΣ Λαυρίου που είναι αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Περιγράφεται η δομή της, ο ρόλος της, η λειτουργία του συνδυασμένου κύκλου της μονάδας. Τέλος, αναφέρεται το πρόβλημα δόνησης που παρατηρείται στην καπνοδόχο κατά τη διάρκεια του κύκλου φόρτισης της μηχανής, οι μετρήσεις και τα μέτρα που έχουν ληφθεί στο παρελθόν για την αντιμετώπιση του συγκεκριμένου προβλήματος.

3.2 Ιστορικά Στοιχεία του ΑΗΣ Λαυρίου

Το Ενεργειακό Κέντρο Ηλεκτροπαραγωγής ή ο Ατμοηλεκτρικός Σταθμός Λαυρίου αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα κέντρα για την παραγωγή ηλεκτρισμού της ΔΕΗ. Ο σταθμός είναι εγκατεστημένος στον όρμο του Αγίου Νικολάου στο Λαύριο, 45 km ανατολικά της Αθήνας, σε οικόπεδο έκτασης 404,997 m². Απέχει περίπου 2 km μακριά από την πόλη του Λαυρίου.

Η κατασκευή του σταθμού άρχισε το 1969 ενώ τέθηκε σε λειτουργία το 1972 όταν ολοκληρώθηκε η μονάδα I. Η μονάδα II λειτούργησε το 1973 ενώ η III, IV (μικρό και μεγάλο Λαύριο) τέθηκαν σε λειτουργία το 1997. Τέλος, το 2006 λειτούργησε και η μονάδα V. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των πέντε μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι 1575 MW.

Μέσα στο σταθμό βρίσκονται διάφορες εγκαταστάσεις όπως το κέντρο διοίκησης, τα μηχανουργεία, ηλεκτρολογεία, ξυλουργεία κ.ά. Πρέπει να αναφερθεί πως υπάρχει μεγάλη προβλήτα παραλαβής πετρελαίου, διαστάσεων (200×48×15) m, στην περιοχή πλεύρισης των πλοίων. Στην προβλήτα μπορεί να προσέλθει δεξαμενόπλοιο μεγάλης

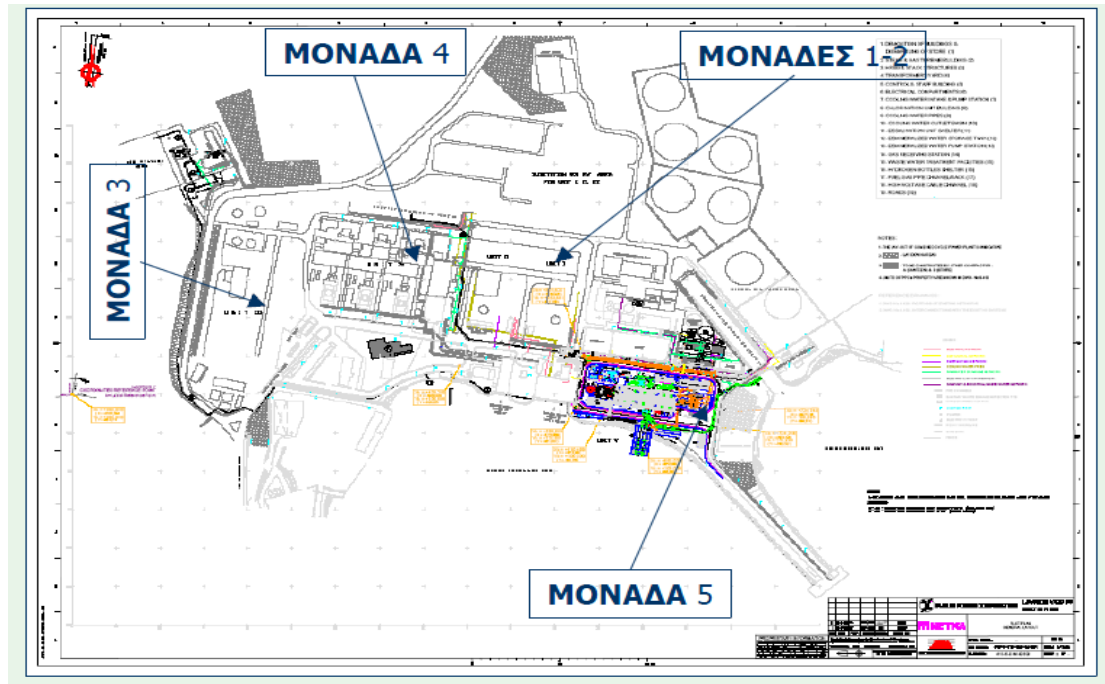
χωρητικότητας (60000 tn). Η γενική άποψη των εγκαταστάσεων του ΑΗΣ παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1: Γενική άποψη των εγκαταστάσεων του ΑΗΣ Λαυρίου
Figure 3.1: General view of the facilities of the power station at Lavrion
(Πηγή: www.metka.gr)

3.3 Μονάδες Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας

Στον ΑΗΣ Λαυρίου λειτουργούν πέντε μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Σχήμα 3.2). Οι μονάδες I και II είναι συμβατικές και ατμοηλεκτρικές, ισχύος 150 και 300 MW αντίστοιχα και έχουν σαν πρωτογενές καύσιμο το μαζούτ τύπου III. Οι μονάδες III, IV και V είναι συνδυασμένου κύκλου ισχύος 180, 560, 385 MW αντίστοιχα και έχουν σαν καύσιμο το φυσικό αέριο. Η γραμμή παραγωγής συνδέεται με το εθνικό δίκτυο μεταφοράς με γραμμές 400 kV και 150 kV. Ο ΑΗΣ Λαυρίου παρέχει ποσοστιαία το 8% της συνολικής ισχύος της ΔΕΗ που καλύπτει μέρος των αναγκών ηλεκτρισμού της Αττικής.



Σχήμα 3.2: Διάταξη των μονάδων του ΑΗΣ Λαυρίου
Figure 3.2: Provision of the plants at the power station of Lavrion
(Πηγή: ΔΕΗ Α.Ε, Αργυριάδης, Μπονατάκη, 2006)

3.4 Παρακαμπτήριος Καπνοδόχος Μονάδας IV

Δεδομένου ότι στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η δυναμική συμπεριφορά της παρακαμπτήριου καπνοδόχου της μονάδας IV θα πρέπει να αναφερθούν ορισμένα χαρακτηριστικά της.

3.4.1 Δομή

Η παρακαμπτήριος καπνοδόχος της μονάδας IV είναι μια εύκαμπτη κατασκευή κυλινδρικού σχήματος και έχει ύψος 80.0 m, εξωτερική διάμετρο 6.372 m και εσωτερική διάμετρο 6.216 m. Η διατομή της είναι αρκετά μεγάλη ώστε να μην δυσχεραίνεται η ροή των καυσαερίων. Η πορεία της είναι ευθύγραμμη και χωρίς αλλαγές στη διατομή διότι διαφορετικά θα αυξάνονταν οι αντιστάσεις ροής των καυσαερίων. Το θεμέλιο της κατασκευής είναι τετραγωνικής διατομής με μήκος πλευράς 5.600 m και ύψος 10.080 m. Η συγκεκριμένη καπνοδόχος είναι κατασκευασμένη από χάλυβα. Με τη χρήση του χάλυβα επιτυγχάνεται η μη διαπερατότητα των αερίων. Παράλληλα, οι μεταλλικές καπνοδόχοι μπορεί να επιτυγχάνουν μεγαλύτερη ταχύτητα διέλευσης των αερίων.

Το κυλινδρικό της σχήμα ελαχιστοποιεί την τριβή των καυσαερίων στα τοιχώματα της κατασκευής έτσι ώστε να επιτευχθεί η ομαλή μετάβασή τους στην ατμόσφαιρα. Επιπλέον, η καπνοδόχος διαθέτει θερμομόνωση, δηλαδή φέρει διπλό τοίχωμα. Πρέπει να αναφερθεί πως η μεγάλη διατομή σε συνδυασμό και με την έλλειψη θερμομόνωσης ή τις χαμηλές θερμοκρασίες θα προκαλούσε υγραποίηση των καυσαερίων σε θειικό οξύ, που διαβρώνει τον καπναγωγό και τους χαλύβδινους λέβητες. Γι αυτό επιλέγεται να είναι έχει θερμομόνωση, για να ελαττώνεται η θερμότητα των καυσαερίων προς το εγγύς περιβάλλον και αφετέρου να μην ελαττώνεται η ένταση του ελκυσμού λόγω ψύξης αυτών. Στο εσωτερικό της υπάρχει παρόμοια κατασκευή μικρότερης διαμέτρου που εξυπηρετεί τη διατήρηση της θερμοκρασίας σε όλο το ύψος της κατασκευής προκειμένου να μην ψύχεται το καυσαέριο και δυσκολεύεται η μετάβασή του στην ατμόσφαιρα. Αν το καυσαέριο ψυχθεί, αποτελεί σημαντική αιτία ταλάντωσης της κατασκευής (τιράγιο) και πρέπει να αποφεύγεται με κάθε τρόπο.

3.4.2 Ο ρόλος της καπνοδόχου

Οι καπνοδόχοι είναι το μέσο με το οποίο τα καυσαέρια διοχετεύονται με ικανοποιητικό τρόπο, ώστε αυτά να διαλυθούν από τους στροβιλισμούς της ατμόσφαιρας. Θα πρέπει όμως, το υψόμετρο διοχέτευσης των καυσαερίων να είναι τέτοιο, ώστε η συγκέντρωσή τους και πιθανά σωματίδια σκόνης που ενδέχεται να φέρουν να είναι σε ανεκτά επίπεδα, μετρούμενα σε συγκεντρώσεις στη στάθμη του εδάφους. Συνεπώς, μπορεί να θεωρηθεί πως οι καπνοδόχοι είναι το μέσο απομάκρυνσης και μείωσης της συγκέντρωσης των ρυπογόνων ουσιών (π.χ. SO₂, ιπτάμενη τέφρα κ.ά.) που προέρχονται από εργασίες καύσης.

3.4.3 Τρόπος λειτουργίας Μονάδας IV και καπνοδόχου

Η μονάδα IV του ΑΗΣ Λαυρίου είναι μια μονάδα συνδυασμένου κύκλου συνολικής ονομαστικής ισχύος περίπου 560.000 kW και αποτελείται από :

- τρεις αεριοστροβίλους τύπου EGT PG 9171 E με τις γεννήτριές τους
- τρεις λέβητες ανάκτησης θερμότητας, ένα για κάθε αεριοστρόβιλο
- έναν ατμοστρόβιλο ALSTOM με την γεννήτριά του
- έξι καπνοδόχους

Οι αεριοστροβίλοι λειτουργούν κανονικά με φυσικό αέριο, αλλά μπορούν να λειτουργήσουν και με ελαφρύ πετρέλαιο (το οποίο έχει υποστεί επεξεργασία για να απομακρυνθούν μέταλλα όπως το βανάδιο, το νάτριο, το κάλιο κλπ, που προκαλούν χημικές ενώσεις και διαβρώνουν τα μέταλλα του αεροστροβίλου) σε περίπτωση προβλήματος στο σύστημα τροφοδοσίας του φυσικού αερίου. Οι αεριοστροβίλοι διαθέτουν συστήματα ελέγχου της θερμοκρασίας για την καλή λειτουργία των στροβίλων και για την κατά το δυνατό μείωση των οξειδίων του αζώτου. Η έξοδος των καυσαερίων του κάθε αεροστροβίλου οδηγείται σε ένα λέβητα ανάκτησης θερμότητας, ενώ υπάρχει διάφραγμα (damper) με το οποίο μπορεί να γίνει η εκτροπή των καυσαερίων και το οποίο επιτρέπει στον κάθε αεριοστροβίλο να λειτουργεί σε ανοικτό κύκλο, δηλαδή να απορρίπτει τα καυσαέρια στην ατμόσφαιρα.

Στον λέβητα ανάκτησης (Σχήμα 3.3) υπάρχουν δυο κυκλώματα νερού/ατμού, ένα υψηλής και ένα χαμηλής πίεσης. Η ροή και η θερμοκρασία των καυσαερίων αλλά και η πίεση και η θερμοκρασία του κύριου ατμού αλλάζουν ανάλογα με το φορτίο της εγκατάστασης. Η τελική ρύθμιση της θερμοκρασίας του ατμού γίνεται με ψεκασμό. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα απόρριψης του ατμού στον συμπυκνωτή/ψυγείο της εγκατάστασης σε κάποια στάδια της λειτουργίας της εγκατάστασης (όπως π.χ. κατά την φάση εκκίνησης).



Σχήμα 3.3: Λέβητας ανάκτησης θερμότητας κατακόρυφου τύπου
Figure 3.3: The vertical type heat recovery boiler
(Πηγή: www.metka.gr)

Ο ατμοστρόβιλος (Σχήμα 3.4) αποτελείται από δυο τμήματα: ένα τμήμα υψηλής πίεσης ατμού και ένα χαμηλής πίεσης. Στο κάθε τμήμα συγκεντρώνεται η αντίστοιχη ατμοπαραγωγή κάθε λέβητα ανάκτησης θερμότητας. Ο υπέρθερμος ατμός υψηλής πίεσης αφού εκτονωθεί στις βαθμίδες υψηλής πίεσης αναμειγνύεται με τον ατμό χαμηλής πίεσης και εκτονώνεται τελικά στις βαθμίδες χαμηλής πίεσης μέχρι την πίεση του συμπυκνωτή. Οι βαθμίδες υψηλής πίεσης του ατμοστροβίλου λειτουργούν με την μέθοδο της ολισθαίνουσας πίεσης ατμού. Οι βαθμίδες χαμηλής πίεσης είναι συμμετρικής ροής και λειτουργούν με σταθερή πίεση. Ο συμπυκνωτής χρησιμοποιεί για τη συμπύκνωση του ατμού θαλασσινό νερό, ενώ υπάρχει και σύστημα καθαρισμού των επιφανειών με σφαιρίδια.



Σχήμα 3.4: Ατμοστρόβιλος της μονάδας IV, τεχνολογίας Alstom
Figure 3.4: Steam turbine of the plant IV, Alstom's technology
(Πηγή: www.metka.gr)

Ακόμα η γεννήτρια και η διεγέρτρια στρέφονται στις 3000 rpm, ενώ ψύχονται με αέρα, ο οποίος κυκλοφορεί σε κλειστό κύκλωμα, ο οποίος με τη σειρά του ψύχεται από δυο εναλλαχτείς θερμότητας νερού-αέρα.

Η αλλαγή του φορτίου γίνεται πρώτα στους αεριοστρόβιλους και μετά ακολουθεί ο ατμοστρόβιλος. Ο έλεγχος της μονάδας γίνεται μέσω του σύγχρονου καταναμημένου συστήματος (DCS) του οίκου CEGELEC, το οποίο εποπτεύει τα επιμέρους

συστήματα ελέγχου Speedtronic των τριών αεροστροβίλων και Microtec για τον έλεγχο του αμμοστροβίλου.

Η μία από τις έξι καπνοδόχους της μονάδας IV (Σχήμα 3.5), είναι μια παρακαμπτήριος καπνοδόχος. Η παρακαμπτήριος καπνοδόχος, χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση των καυσαερίων από τον αεροστροβίλο τουλάχιστον έως ότου τεθεί σε λειτουργία ο αμμοστροβίλος. Ως εκ τούτου, τα καυσαέρια από τον αεροστροβίλο μπορούν να εισαχθούν σε λέβητα ανάκτησης θερμότητας. Επιπλέον, η παρακαμπτήριος καπνοδόχος μπορεί να λειτουργήσει παράλληλα με μια κύρια καπνοδόχο. Για παράδειγμα, σε περίπτωση πυρκαγιάς της καπνοδόχου, ένας κινητός αποσβεστήρας κλείνει την κύρια καμινάδα, μειώνοντας ουσιαστικά τη σοβαρότητα πυρκαγιάς της καμινάδας. Ο κινητός αποσβεστήρας ανοίγει επίσης μια βοηθητική καμινάδα, επιτρέποντας στον καπνό να βγει, χωρίς διακοπή μέσω της βοηθητικής καμινάδας η οποία μπορεί να περιλαμβάνει έναν ανεμιστήρα για να βοηθήσει την έξοδο του καπνού στην ατμόσφαιρα. Ο κινητός αποσβεστήρας μπορεί να ενεργοποιηθεί χειροκίνητα ή αυτόματα σε περίπτωση πυρκαγιάς της καπνοδόχου.



Σχήμα 3.5: Άποψη της μονάδας IV και η καπνοδόχος που μελετάται (κόκκινο βέλος)

Figure 3.5: View of the plant IV and the chimney being studied (red arrow)

(Πηγή: www.metka.gr)

Γενικά, η καπνοδόχος εξυπηρετεί την ομαλή μετάβαση των προϊόντων καύσης στην ατμόσφαιρα από λέβητες. Τα καυσαέρια μέσω μιας χημικής αντίδρασης μεταξύ των πρώτων υλών που λαμβάνει χώρα στον λέβητα της μονάδας αποκτούν την επιθυμητή θερμότητα και στην συνέχεια εισέρχονται στην καπνοδόχο μέσω μιας ειδικής

σύνδεσης. Η μεταφορά τους στην ατμόσφαιρα στηρίζεται στις συνθήκες υπερπίεσης που δημιουργούνται στο εσωτερικό της, λόγω της μεγάλης υψομετρικής διαφοράς, οι οποίες συμβάλουν στον ελκυσμό τους.

3.4.4 Προβλήματα δονήσεων κατά τη διάρκεια λειτουργίας της καπνοδόχου και ιστορικό

Στην παρακαμπτήριο καπνοδόχο της μονάδας IV, η οποία αποτελεί αντικείμενο μελέτης της συγκεκριμένης εργασίας, έχουν παρατηρηθεί δονήσεις κατά τη διάρκεια του κύκλου φόρτισης της μηχανής. Στον παρελθόν, έχουν διεξαχθεί πολλές έρευνες προκειμένου να επιλυθεί το συγκεκριμένο πρόβλημα και έχουν πραγματοποιηθεί πολλές μετρήσεις, οι οποίες οδήγησαν σε τροποποίηση του σχεδιασμού της καπνοδόχου. Μερικά από τα μέτρα που έχουν ληφθεί είναι τα εξής:

- Αφαίρεση των αποστατών και αντικατάσταση τους με αποστάτες που διαθέτουν ελατήρια.
- Πλήρωση του τμήματος μεταξύ της εξωτερικής και της εσωτερικής διαμέτρου με περλίτη.
- Εγκατάσταση ενός άξονα εκτροπής της πτέρυγας και μιας πλάκας ρύθμισης της ροής.

Τα παραπάνω μέτρα δεν είχαν το επιθυμητό αποτέλεσμα. Γι αυτό έγινε μια άλλη προσέγγιση. Τοποθετήθηκαν διαμήκη ενισχυτικά ελάσματα στο εσωτερικό τμήμα της καπνοδόχου ανά 10 deg έως το ύψος των 62 m περίπου, για να εξαλειφθεί το πρόβλημα των δονήσεων. Ωστόσο, οι δονήσεις συνεχίστηκαν.

Η εταιρία ATEA Environment ανέλαβε τη διεξαγωγή μετρήσεων στην κατασκευή προκειμένου να προκύψουν συμπεράσματα για τη δυναμική της συμπεριφορά. Στην κορυφή της καπνοδόχου (στο ύψος των 80 m), έχει προσδιοριστεί ότι η μέγιστη ταχύτητα ροής του φυσικού αερίου είναι 32 m/s. Επίσης, οι γεωμετρικές διαστάσεις της καπνοδόχου και η ροή του φυσικού αερίου κατά τη λειτουργία της μηχανής είναι συγκεκριμένες. Σύμφωνα με αυτές τις προδιαγραφές, λήφθηκαν μετρήσεις για τη μελέτη της δόνησης της καπνοδόχου στις 9-03-2000 και στις 10-3-2000. Τα είδη των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν είναι τα εξής:

➤ **Μετρήσεις θορύβου με ακουστικά συστήματα**

Οι μετρήσεις θορύβου έγιναν στην περίφραξη της μονάδας παραγωγής ενέργειας, σε απόσταση 1 m και 10 m από την παρακαμπτήριο καπνοδόχο στο επίπεδο του εδάφους και στο δακτυλιοειδές τμήμα της καπνοδόχου σε τρία ύψη: στα 25 m, στα 35 m και στα 65 m.

Οι μετρήσεις λήφθηκαν τόσο κατά τη διάρκεια λειτουργίας της καπνοδόχου όσο και όταν δεν βρισκόταν σε λειτουργία και έγιναν με αναφορά στα πρότυπα ISO.

➤ **Μετρήσεις πίεσης και ταχύτητας του ανέμου στο δακτυλιοειδές τμήμα**

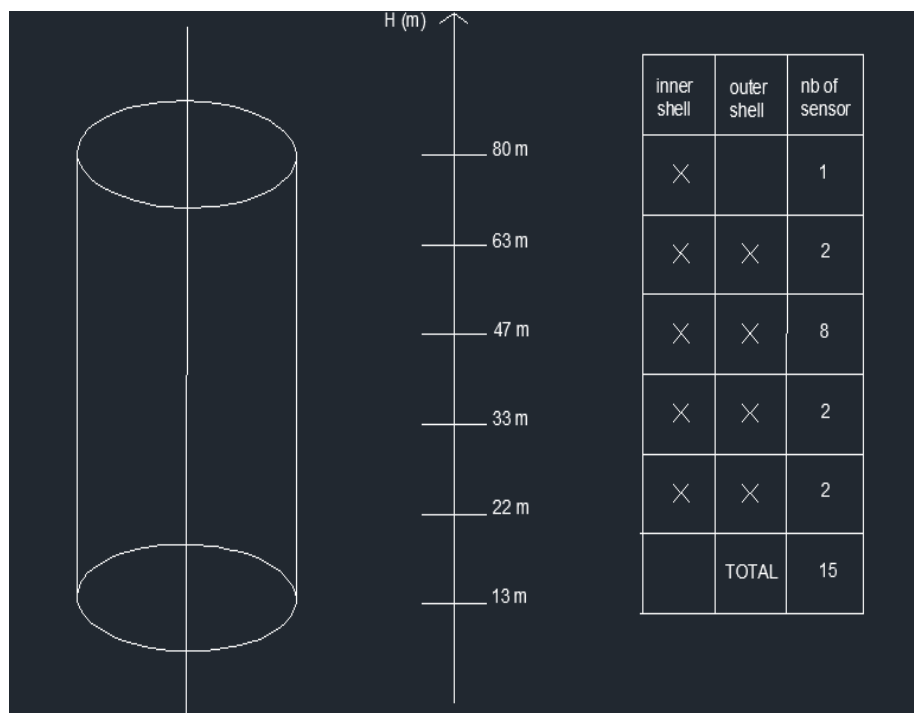
Πραγματοποιήθηκε μέτρηση της πίεσης και της ταχύτητας του ανέμου με ανεμόμετρο στο δακτυλιοειδές τμήμα στο ύψος των 25 m. Η ταχύτητα του ανέμου ήταν 10 km/h στις 9-03-2000 και 12 km/h-25 km/h στις 10-03-2000.

➤ **Μετρήσεις θερμοκρασίας**

Η θερμοκρασία στο εσωτερικό της καπνοδόχου προσδιορίστηκε με έναν εξ' επαφής αισθητήρα μέτρησης της θερμοκρασίας και η τιμή της ήταν 28 ° C στο ύψος των 25 m.

➤ **Μετρήσεις κραδασμών με αισθητήρες**

Προκειμένου να μετρηθεί η δόνηση της καπνοδόχου χρησιμοποιήθηκαν 15 αισθητήρες για τη μέτρηση των δονήσεων της καπνοδόχου στο εσωτερικό και εξωτερικό τμήμα της. Τα σημεία τοποθέτησης των αισθητήρων παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.6.



Σχήμα 3.6: Τοποθέτηση και αριθμός αισθητήρων στα σημεία μέτρησης
Figure 3.6: The location and the number of the sensors at the measuring points
(Πηγή: Αναφορά της ATEA Environment)

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων και η αξιολόγηση των μετρήσεων θα γίνει σε επόμενο κεφάλαιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ ΤΗΣ ΠΑΡΑΚΑΜΠΗΡΙΟΥ ΚΑΠΝΟΔΟΧΟΥ, ΜΟΝΑΔΑΣ IV, ΑΗΣ ΛΑΥΡΙΟΥ

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο 4 περιγράφονται λεπτομερώς οι εργασίες πεδίου. Αρχικά αναφέρεται ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για τις μετρήσεις και οι παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη προκειμένου να επιλεγεί η θέση τοποθέτησής του. Παρουσιάζεται σχηματικά η γεωμετρία παρατήρησης της καπνοδόχου. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στη διαδικασία εγκατάστασης του οργάνου και στις παραμέτρους που ορίζονται προκειμένου να ξεκινήσει η λήψη των μετρήσεων. Αναλύονται οι συνθήκες φόρτισης και το διάγραμμα του φορτίου της μηχανής με βάση το οποίο επιλέγονται οι πέντε ομάδες μετρήσεων. Τέλος, με τη βοήθεια των διαγραμμάτων περιγράφονται η θερμοκρασία στο εσωτερικό της καπνοδόχου κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του πειράματος, καθώς και τα μετεωρολογικά δεδομένα (ταχύτητα και διεύθυνση του ανέμου συναρτήσει του χρόνου).

4.2 Εξοπλισμός παρατήρησης και Επιλογή Σημείου Τοποθέτησής του

Για τη μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς της καπνοδόχου της μονάδας IV του ΑΗΣ Λαυρίου χρησιμοποιείται το επίγειο σύστημα radar μικροκυματικής συμβολομετρίας IBIS-S. Πραγματοποιήθηκαν αρκετές επισκέψεις στο ενεργειακό κέντρο ηλεκτροπαραγωγής πριν από τη διεξαγωγή του τελικού πειράματος προκειμένου να γίνει αναγνώριση της περιοχής, εξοικείωση με την κατασκευή και να επιλεγεί το σημείο τοποθέτησης του συστήματος IBIS-S. Για την επιλογή του συγκεκριμένου σημείου λαμβάνονται υπόψη οι εξής παράγοντες:

- Απαραίτητη είναι η εξασφάλιση αμοιβαίας ορατότητας μεταξύ της καπνοδόχου και του σημείου εγκατάστασης του οργάνου χωρίς την παρουσία εμποδίων (π.χ. δέντρα, κτίρια κ.ά.)
- Το σημείο εγκατάστασης πρέπει να είναι σταθερό και να υπάρχει αρκετός χώρος γύρω από αυτό προκειμένου να τοποθετηθεί ο τρίποδας με τον αισθητήρα και ο υπόλοιπος εξοπλισμός (θήκη, υπολογιστής, μπαταρίες).

Επιπλέον, ο μεγάλος χώρος επιτρέπει στους χειριστές του οργάνου να κινούνται με άνεση γύρω από αυτό.

- Το σημείο πρέπει να είναι εύκολα προσβάσιμο ώστε ο εξοπλισμός να μεταφερθεί με ασφάλεια σε αυτό.

Λαμβάνοντας υπόψη τους παραπάνω παράγοντες και μετά από την αναγνώριση της περιοχής αποφασίζεται το σύστημα IBIS-S να τοποθετηθεί στην μεταλλική στέγη ενός κτιρίου της μονάδας IV (Σχήμα 4.2). Η πρόσβαση εκεί δεν είναι πολύ εύκολη καθώς είναι σε αρκετά μεγάλο ύψος από το έδαφος και προκειμένου να ανέβει το συνεργείο του πειράματος μέσω της κατακόρυφης σκάλας (Σχήμα 4.1) χρειάζονται ζώνες ασφαλείας. Ιδιαίτερα δύσκολη είναι η μεταφορά του οργάνου και ο απαιτούμενος εξοπλισμός επάνω στη στέγη. Ένα άτομο από το συνεργείο ανεβαίνει πρώτο και στη συνέχεια με τη βοήθεια σκοινιών ανεβαίνει όλος ο εξοπλισμός. Ωστόσο, εκτός από τη δύσκολη πρόσβαση, το συγκεκριμένο σημείο είναι το μοναδικό που εξασφαλίζει όλους τους υπόλοιπους από τους προαναφερθέντες παράγοντες.



Σχήμα 4.1: Σκάλα για την πρόσβαση στη στέγη
Figure 4.1: Ladder to access the roof

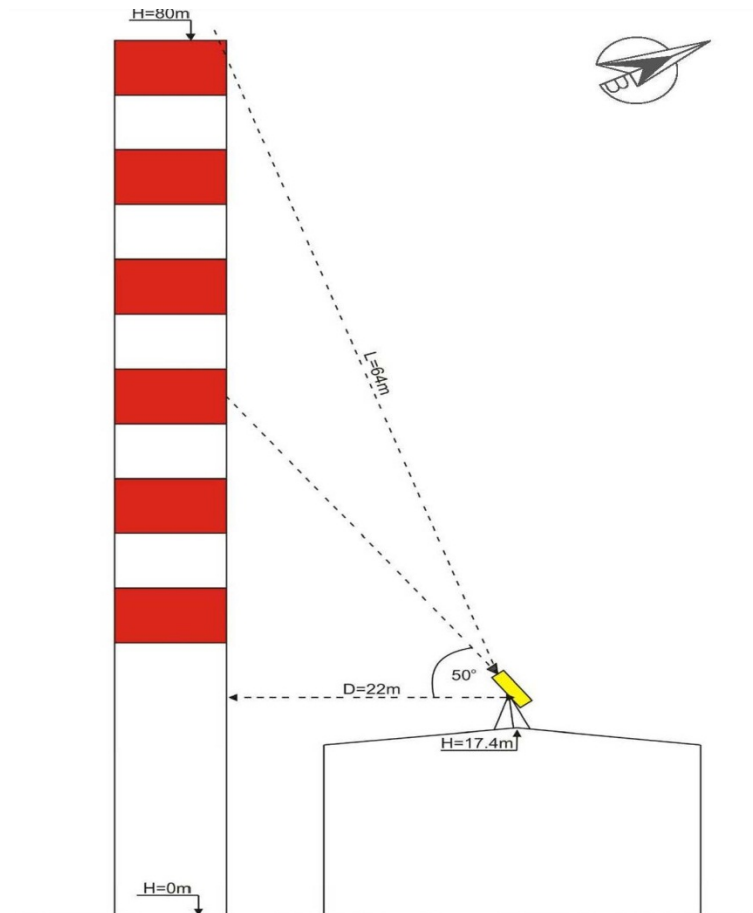
Κατόπιν αποτύπωσης στην στέγη με τη βοήθεια γεωδαιτικού σταθμού, διαπιστώνεται πως η καταλληλότερη γεωμετρία παρατήρησης ανάμεσα στον αισθητήρα και στο στόχο είναι σε οριζόντια απόσταση 22.0 m και σε γωνία ύψους 50 deg. Από αυτή τη θέση το radar παρακολουθεί την καμινάδα από το ύψος των 25.0 m έως την κορυφή της. Πρέπει να σημειωθεί πως με τη συγκεκριμένη γεωμετρία παρατήρησης η δέσμη που εκπέμπει το radar προσπίπτει μόνο πάνω στην καπνοδόχο που μελετάται. Με διαφορετική γεωμετρία, η δέσμη προσπίπτει και στις άλλες καπνοδόχους που βρίσκονται γύρω και επομένως προκύπτουν εσφαλμένα συμπεράσματα. Στα Σχήματα 4.2 και 4.3 απεικονίζονται η θέση τοποθέτησης του οργάνου, η περιοχή και η γεωμετρία παρατήρησης της καπνοδόχου.



Σχήμα 4.2: Θέση τοποθέτησης του οργάνου (κίτρινος κύκλος) και περιοχή παρατήρησης της καπνοδόχου (κίτρινο τρίγωνο)

Figure 4.2: Installation location of the instrument (yellow circle) and the area of observation of the stack (yellow triangle)

(Πηγή: www.metka.gr)



Σχήμα 4.3: Σχηματική αναπαράσταση γεωμετρίας του πειράματος
Figure 4.3: Schematic representation of experiment's geometry

4.3 Συνθήκες Φόρτισης και Διεξαγωγή Μετρήσεων

Οι συνθήκες λειτουργίας και φόρτισης της μονάδας κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων οριστικοποιήθηκαν σε συνεννόηση με τη ΔΕΗ ΑΕ. Για το σκοπό αυτό έγινε ανασκόπηση των συνθηκών λειτουργίας της μονάδας κατά τη λήψη των μετρήσεων της περιόδου 2000 και αποφασίστηκαν τα εξής. Εκκίνηση του αεροστροβίλου σε ανοικτό κύκλο και επιβολή σταδιακής φόρτισης μέχρι του μέγιστου επιτρεπόμενου φορτίου (≈ 110 MW), λειτουργία του αεροστροβίλου σε αυτές τις συνθήκες για διάρκεια 120 min, επιβολή σταδιακής μείωσης του φορτίου έως την τιμή 80 MW και λειτουργία της μονάδας σε αυτές τις συνθήκες για διάρκεια περίπου 20 min πριν σταδιακά τεθεί σε κράτηση.

Η μέρα που επιλέχτηκε για τη διεξαγωγή του πειράματος είναι το Σάββατο 24 Μαρτίου 2012. Η συγκεκριμένη μέρα προέκυψε κατόπιν συνεννόησης με τη ΔΕΗ διότι κατά τη διάρκεια του πειράματος η καπνοδόχος θα βρίσκεται σε συγκεκριμένη

λειτουργία και θα πρέπει μεγάλο μέρος της Αττικής να τροφοδοτηθεί με ηλεκτρικό ρεύμα από τον ΑΗΣ της Πτολεμαΐδας αντί από του Λαυρίου. Επίσης, τη συγκεκριμένη μέρα η ένταση του ανέμου δεν πρέπει να έχει μεγάλη τιμή ώστε να προκύψουν συμπεράσματα για τη δυναμική συμπεριφορά της κατασκευής κατά τα διάρκεια φόρτισης της μηχανής και όχι να επηρεάζονται σημαντικά από την ένταση του ανέμου. Επιπλέον, τα μετεωρολογικά δεδομένα πρέπει να είναι ανάλογα με αυτά που επικρατούσαν κατά τη διεξαγωγή μετρήσεων της ΑΤΕΑ Environment το έτος 2000 έτσι ώστε να αποτελέσματα από τις δύο ομάδες μετρήσεων να είναι μεταξύ τους συγκρίσιμα.

Προκειμένου να ληφθούν οι μετρήσεις με το σύστημα IBIS-S είναι απαραίτητο να γίνουν ορισμένες προεργασίες. Αρχικά, με τη βοήθεια σκιοιού τα μέλη του συνεργείου ανεβάζουν στη στέγη όλο τον απαραίτητο εξοπλισμό. Ο τρίποδας τοποθετείται σε απόσταση 22.0 m από την κατασκευή, όπως είχε ήδη συμφωνηθεί σε προηγούμενη επίσκεψη. Οριζοντιώνεται με τη βοήθεια της αεροστάθμης και τοποθετείται πάνω σε αυτόν ο αισθητήρας. Στον αισθητήρα βιδώνονται κεραίες τύπου H12-V39 που σημαίνει ότι το οριζόντιο πλάτος της δέσμης της κεραίας είναι 12 deg και το κατακόρυφο είναι 39 deg. Στο πάνω μέρος του αισθητήρα τοποθετείται το οπτικό τηλεσκόπιο που χρησιμοποιείται για τη στόχευση του επιθυμητού σημείου της καπνοδόχου. Στη συνέχεια, το όργανο συνδέεται με τον υπολογιστή μέσω κατάλληλης συνδεσμολογίας και δύο μπαταρίες των 12 V συνδέονται η μία με τον αισθητήρα και η άλλη με τον υπολογιστή προκειμένου να καταστεί δυνατή η συνεχής παροχή ρεύματος. Ο υπολογιστής είναι χρήσιμος για τη ρύθμιση των παραμέτρων λήψης, την αποθήκευση του ληφθέντος σήματος, την επεξεργασία των δεδομένων και την ένδειξη των πρώτων αποτελεσμάτων στο πεδίο.

Πριν ξεκινήσει η λήψη μετρήσεων ρυθμίζονται ορισμένες παράμετροι στον σύστημα:

- Ανάλυση απόστασης: 0.75 m
- Μέγιστη απόσταση λήψης: 100 m
- Συχνότητα δειγματοληψίας: 200 Hz
- Μήκος κατασκευής: 70 m
- Γεωμετρία παρατήρησης (όπως περιγράφηκε στην § 4.2)

Μόλις οριστούν οι παράμετροι το σύστημα είναι έτοιμο να καταγράψει μετρήσεις (Σχήμα 4.4).



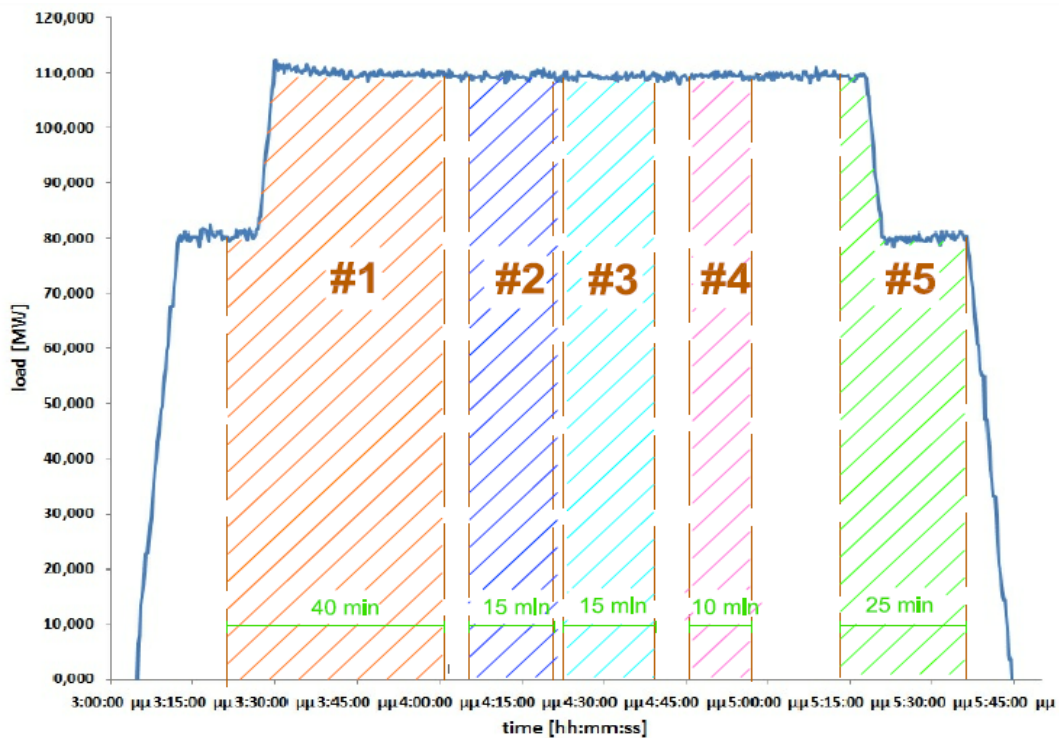
Σχήμα 4.4: Παρατήρηση της καπνοδόχου από το σύστημα IBIS-S
Figure 4.4: Observation of the stack from the IBIS-S system

Πραγματοποιούνται πέντε ομάδες μετρήσεων κυμαινόμενης διάρκειας, κατά τον κύκλο φόρτισης της μηχανής. Η ώρα έναρξης, λήξης και η διάρκεια καθεμιάς από αυτές παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1. Η φόρτιση της μηχανής ξεκινάει στις 15:04:45 και τελειώνει στις 17:44:30. Σε αυτό το χρονικό διάστημα το φορτίο της μηχανής λαμβάνει διαφορετικές τιμές και με αυτό το κριτήριο επιλέγονται οι ομάδες μετρήσεων. Σύμφωνα με παλαιότερες έρευνες που είχαν γίνει στην καπνοδόχο (μετρήσεις της ATEA Environment) αλλά και με όσα συζητηθήκαν με τους μηχανικούς της ΔΕΗ, παρατηρείται δόνηση της καπνοδόχου περίπου 15 min αφότου το φορτίο της μηχανής έχει πάρει τη μέγιστη τιμή του (110 MW). Η έρευνα που πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του συστήματος IBIS-S έδειξε πως η δόνηση εμφανίζεται 7.5 min μετά τη σταθεροποίηση του φορτίου στα 110 MW. Ωστόσο, θεωρείται σωστό να ληφθούν μετρήσεις όταν το φορτίο είναι στα 80 MW και αυξάνεται μέχρι να φτάσει στα 110 MW, όταν έχει σταθεροποιηθεί στα 110 MW, αλλά και όταν μειώνεται και φτάνει πάλι στα 80 MW ώστε να υπάρχει η δυνατότητα

σύγκρισης και εξαγωγής συμπερασμάτων. Το διάγραμμα φόρτισης της μηχανής και οι ομάδες μετρήσεων παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.5.

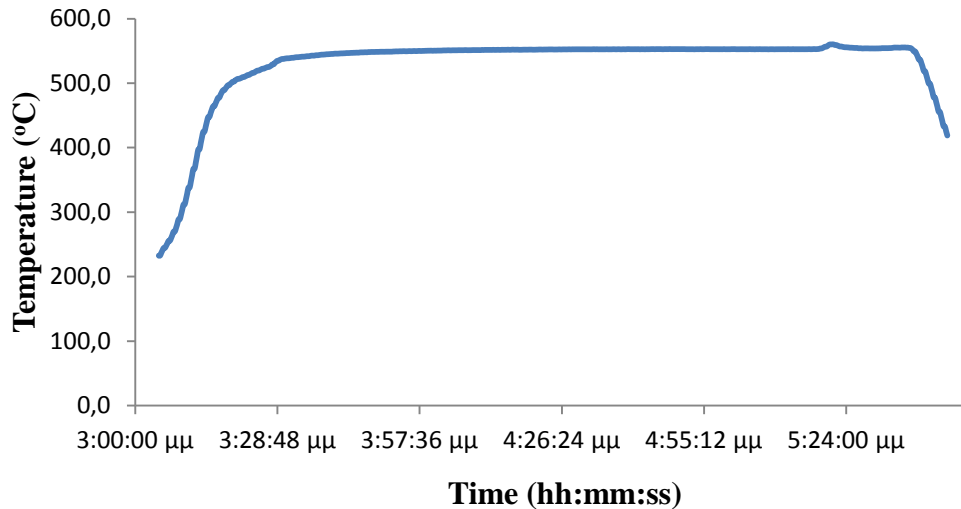
α/α Μέτρησης	Ημερομηνία	Έναρξη μέτρησης (hh:mm:ss)	Λήξη μέτρησης (hh:mm:ss)	Διάρκεια μέτρησης (hh:mm:ss)	Μέσο φορτίο (MW)
#1	24-3-2012	15:23:00	16:03:02	00:40:02	80-110
#2	24-3-2012	16:06:11	16:21:11	00:15:00	110
#3	24-032012	16:24:00	16:39:00	00:15:00	110
#4	24-03-2012	16:46:49	16:56:50	00:10:01	110
#5	24-03-2012	17:13:26	17:38:27	00:25:01	110-80

Πίνακας 4.1: Ώρα έναρξης, λήξης και διάρκεια κάθε μέτρησης
Table 4.1: Start time, end time and duration of each measurement



Σχήμα 4.5: Διάγραμμα φορτίου της μηχανής και χρονική αλληλουχία μετρήσεων
Figure 4.5: Diagram of machine load and sequence of measurements
 (Πηγή: ΑΗΣ Λαυρίου)

Κατά τη διάρκεια του πειράματος καθώς το φορτίο της μηχανής λαμβάνει διαφορετικές τιμές, μεταβάλλεται και η θερμοκρασία στο εσωτερικό της καπνοδόχου. Στο Σχήμα 4.6 παρουσιάζεται το διάγραμμα των τιμών της θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο. Είναι εμφανές πως υπάρχει μεγάλη συνάφεια ανάμεσα σε αυτό το διάγραμμα και σε εκείνο που απεικονίζει το φορτίο της μηχανής (Σχήμα 4.5). Συγκεκριμένα, η θερμοκρασία μεταβάλλεται όπως και το φορτίο.



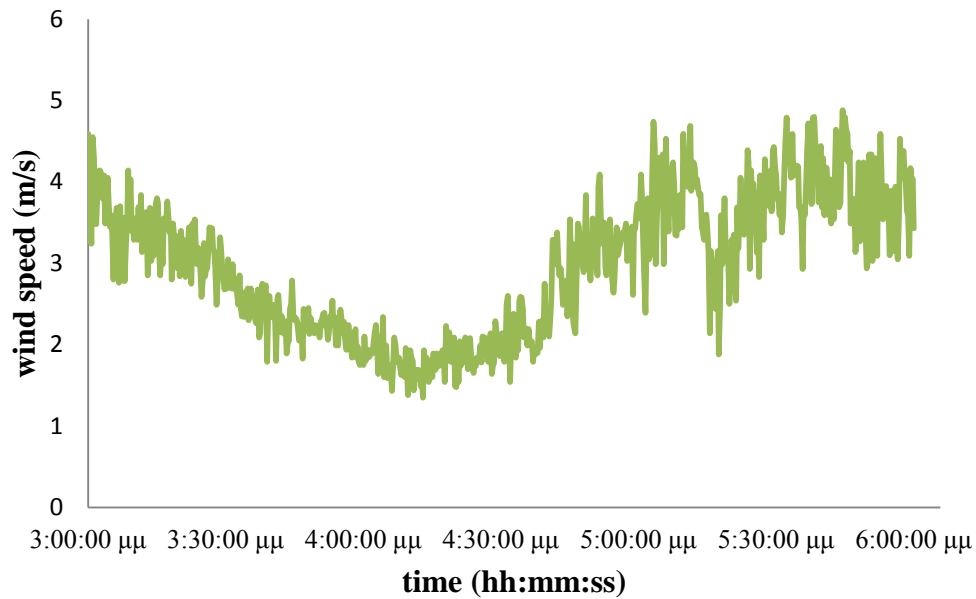
Σχήμα 4.6: Διάγραμμα της θερμοκρασίας της καπνοδόχου σε συνάρτηση με το χρόνο
Figure 4.6: Diagram of the temperature of the stack versus time
(Πηγή: ΑΗΣ Λαυρίου)

4.4 Μετεωρολογικά Δεδομένα

Ο σχεδιασμός του πειράματος προβλέπει τη λήψη μετρήσεων σε συνθήκες μικρής έντασης του ανέμου. Το γεγονός της μειωμένης έντασης του ανέμου επιδιώκεται προκειμένου να εξαχθούν όσο το δυνατόν πολυτιμότερα συμπεράσματα για τη δυναμική συμπεριφορά της κατασκευής κατά τον κύκλο φόρτισης της μηχανής χωρίς την επίδραση ισχυρού ανέμου. Στα Σχήματα 4.8 και 4.9 παρουσιάζονται τα μετεωρολογικά δεδομένα (ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου) από το μετεωρολογικό σταθμό του ΑΗΣ Λαυρίου (Σχήμα 4.7) για όλη τη χρονική διάρκεια του πειράματος (3:00:00 μμ-6:00:00 μμ). Όπως είναι εμφανές, η μέση ταχύτητα του ανέμου είναι 2.97 m/s και η διεύθυνσή του είναι 50.72 deg.

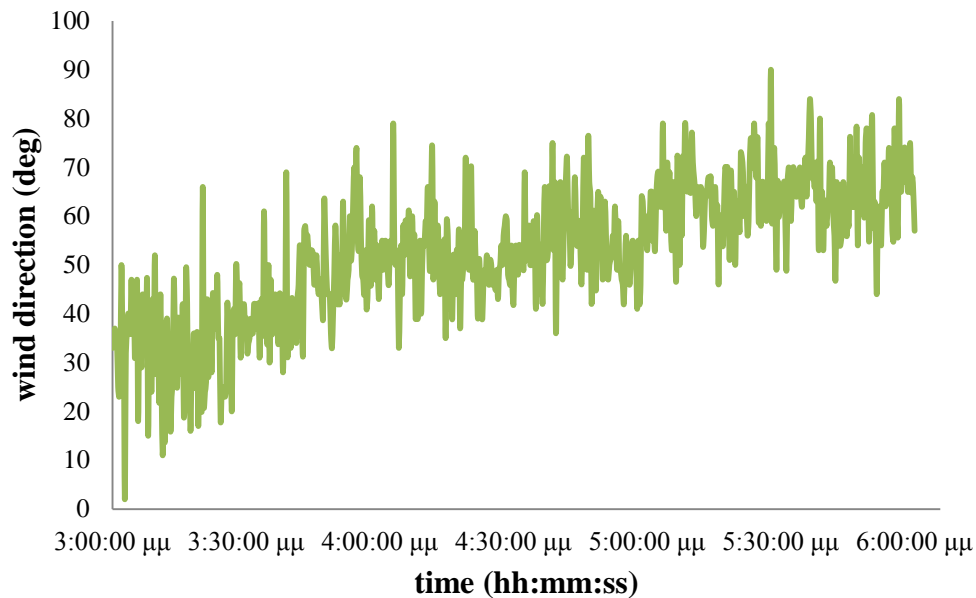


Σχήμα 4.7: Μετεωρολογικός σταθμός
Figure 4.7: Meteorological station



Σχήμα 4.8: Διάγραμμα της ταχύτητας του ανέμου σε συνάρτηση με το χρόνο κατά τη διάρκεια του πειράματος στις 24-03-2012

Figure 4.8: Diagram of wind speed vs time during the experiment on 24-03-2012
(Πηγή: Μετεωρολογικός σταθμός ΑΗΣ Λαυρίου)



Σχήμα 4.9: Διάγραμμα της διεύθυνσης του ανέμου σε συνάρτηση με το χρόνο κατά τη διάρκεια του πειράματος στις 24-03-2012

Figure 4.9: Diagram of wind direction vs time during the experiment on 24-03-2012
(Πηγή: Μετεωρολογικός σταθμός ΑΗΣ Λαυρίου)

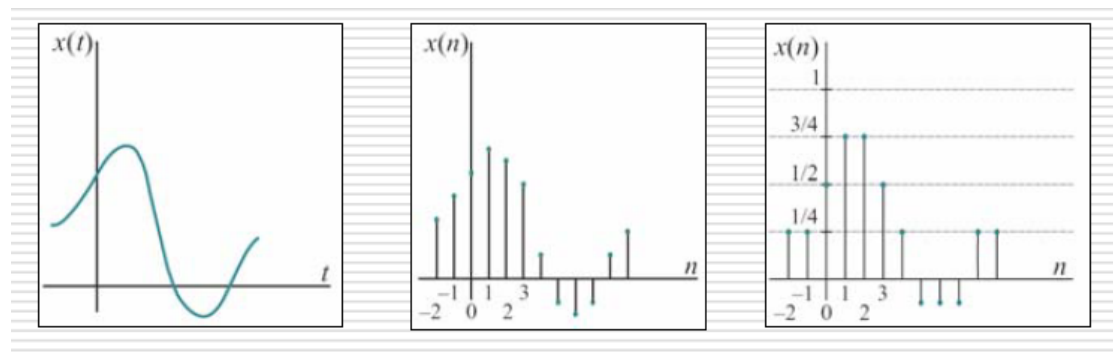
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο 5 περιγράφεται η φασματική ανάλυση δεδομένων που αποτελεί τη μεθοδολογία επεξεργασίας των μετρήσεων πεδίου. Αρχικά, δίνονται πληροφορίες για τα είδη των σημάτων. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται αναλυτικά οι μέθοδοι φασματικής ανάλυσης που είναι οι σειρές Fourier, ο Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier (DFT) και ο Αντίστροφος Διακριτός μετασχηματισμός Fourier (IDFT), ο ταχύς μετασχηματισμός Fourier (FFT). Τέλος, αναλύεται το θεώρημα δειγματοληψίας και η περίπτωση της φασματικής επικάλυψης.

5.2 Ορισμός, Τύποι Σημάτων και Επεξεργασία τους

Το σήμα ορίζεται ως οι τιμές που λαμβάνει μία ποσότητα y (εξαρτημένη μεταβλητή) η οποία μεταβάλλεται συναρτήσει μίας άλλης ποσότητας x (ανεξάρτητη μεταβλητή). Αν οι ποσότητες x και y λαμβάνουν συνεχείς τιμές τότε το σήμα είναι μία συνάρτηση $y(x)$ και χαρακτηρίζεται αναλογικό ή σήμα συνεχούς χρόνου συνεχούς πλάτους. Αν η ποσότητα y λαμβάνει συνεχείς τιμές αλλά η ποσότητα x μόνο διακριτές τιμές τότε το σήμα λέγεται διακριτού χρόνου και πρόκειται για μία ακολουθία $y[n]$, ενώ αν τα x και y λαμβάνουν διακριτές τιμές έχουμε πάλι ακολουθία $y[n]$ και το σήμα λέγεται ψηφιακό ή διακριτού χρόνου διακριτού πλάτους. (Σχήμα 5.1)



Σχήμα 5.1: Διαχωρισμός του σήματος σε αναλογικό (αριστερά), διακριτού χρόνου (κέντρο) και ψηφιακό (δεξιά)

Figure 5.1: Separation of the signal to analog (left), discrete-time (center) and digital (right)

(Πηγή: Βεσκούκης Β., Παραδείσης Δ., Αργιαλάς Δ., Δεληκαράογλου Δ., Καραθανάση Β.,

Μασσίνας Β., 2004)

Τα σήματα περιέχουν πληροφορία σχετικά με τη συμπεριφορά ή τη φύση ενός φαινομένου. Καθένα από τα παραπάνω σήματα είναι απαραίτητο να το επεξεργαστούμε, να εξάγουμε χρήσιμη πληροφορία και να εξαλείψουμε κατά το δυνατόν τον θόρυβο, να το αποθηκεύσουμε ή να το μεταδώσουμε. Οι εφαρμογές της επεξεργασίας σήματος είναι πάρα πολλές στις τεχνολογικές επιστήμες και βρίσκεται στη βάση τομέων όπως οι τηλεπικοινωνίες, η επεξεργασία εικόνας, βίντεο και ήχου, η συμπίεση δεδομένων κ.ά. Χρησιμοποιείται συχνά σε διάφορες εργασίες που άπτονται στο πεδίο εφαρμογών του σύγχρονου μηχανικού. Ένα ψηφιακό σήμα μπορεί να προκύψει από ένα αναλογικό σήμα, μέσω μίας διεργασίας γνωστής ως δειγματοληψίας. Στη συνέχεια, θα παρουσιαστούν διάφορες μέθοδοι για την επεξεργασία του σήματος.

5.3 Μέθοδοι Φασματικής Ανάλυσης

Πολλές φορές η ανάλυση στο πεδίο του χρόνου δεν επαρκεί για να περιγράψει πλήρως ένα φαινόμενο. Γι αυτό είναι αναγκαία η μετάβαση στο πεδίο των συχνοτήτων προκειμένου να αντληθούν πληροφορίες για τα δεδομένα που χαρακτηρίζουν το φαινόμενο. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται με τη φασματική ανάλυση των δεδομένων μέσω της οποίας από κάθε σήμα προκύπτουν τα χαρακτηριστικά μιας συνάρτησης (κυρίως το εύρος και το φάσμα συχνοτήτων ταλάντωσης). Η φασματική ανάλυση επιτυγχάνεται με την ευρέως διαδεδομένη μέθοδο των μετασχηματισμών Fourier.

Η *ανάλυση Fourier* αποτελεί ένα πεδίο των εφαρμοσμένων μαθηματικών το οποίο προέκυψε από την προσπάθεια αναπαράστασης μίας συνάρτησης ως αθροίσματος απλούστερων περιοδικών τριγωνομετρικών συναρτήσεων. Επομένως κεντρική ιδέα στην ανάλυση Fourier είναι η προσπάθεια για κατανόηση των ιδιοτήτων μίας συνάρτησης (η οποία μπορεί να αναπαριστά π.χ. ένα σήμα) μέσω διάσπασής της σε γνωστά, στοιχειώδη μέρη (*αποσύνθεση*) όπως για παράδειγμα σε ημιτονοειδείς συναρτήσεις διαφορετικών συχνοτήτων. Η αντίστροφη διαδικασία, η κατασκευή μίας συνάρτησης από γνωστές, βασικές συναρτήσεις, ονομάζεται *σύνθεση*. Με τον όρο *ανάλυση Fourier* αναφερόμαστε και στις δύο διεργασίες. Η μέθοδος αυτή εφαρμόστηκε για πρώτη φορά από τον Joseph Fourier στην προσπάθειά του να ερευνήσει τη διάδοση της θερμότητας.

5.3.1 Σειρές Fourier

Οι *σειρές Fourier* στα μαθηματικά, λαμβάνουν περιοδικά σήματα που ικανοποιούν ορισμένες συνθήκες (συνθήκες Dirichlet) και τα αναλύουν σε αθροίσματα συναρτήσεων ημιτόνων και συνημιτόνων διαφορετικών συχνοτήτων. Η διαδικασία αυτή εκφράζεται μέσω του τριγωνομετρικού αναπτύγματος των σειρών το οποίο είναι δυνατόν μέσω μιας απλής αντικατάστασης να απεικονισθεί και με εκθετική μορφή. Η σειρά Fourier γράφεται ως εξής:

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{m=1}^{\infty} a_m \cos(2\pi m f_0 t) + \sum_{m=1}^{\infty} b_m \sin(2\pi m f_0 t) \quad (5.1)$$

Όπου οι συντελεστές a_m , b_m , a_0 υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (5.2)$$

$$a_m = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos(2\pi m f_0 t) dt \quad (5.3)$$

$$b_m = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin(2\pi m f_0 t) dt \quad (5.4)$$

Το διάστημα ολοκλήρωσης $[0, T]$ μπορεί να αντικατασταθεί με οποιοδήποτε της μορφής $[c, T+c]$. Συχνά χρησιμοποιείται το $[-T/2, T/2]$. Οι συχνότητες mf_0 είναι γνωστές ως *αρμονικές* και αποτελούν ακέραια πολλαπλάσια της f_0 και οι συντελεστές a_m , b_m εκφράζουν το βαθμό συμβολής της κάθε αρμονικής στην αναπαραγωγή του κύριου σήματος.

Στην πράξη αντί της άπειρης σειράς η συνάρτηση προσεγγίζεται με πεπερασμένο πλήθος προσθετέων. Με τη χρήση του τύπου του Euler:

$$e^{i2\pi m f_0 t} = \cos(2\pi m f_0 t) + i \sin(2\pi m f_0 t) \quad (5.5)$$

η σειρά Fourier μπορεί να γραφεί με μιγαδικούς όρους ως εξής:

$$x(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} c_m e^{i2\pi f_0 m t} \quad (5.6)$$

Όπου c_m είναι μιγαδικοί αριθμοί που υπολογίζονται από τη σχέση:

$$c_m = \frac{1}{2} (a_m - i b_m) \quad (5.7)$$

Ο Μετασχηματισμός Fourier αποτελεί γενίκευση της σειράς Fourier με μιγαδικούς όρους. Αντί των διακριτών όρων c_m χρησιμοποιεί την συνεχή συνάρτηση $F(t)$:

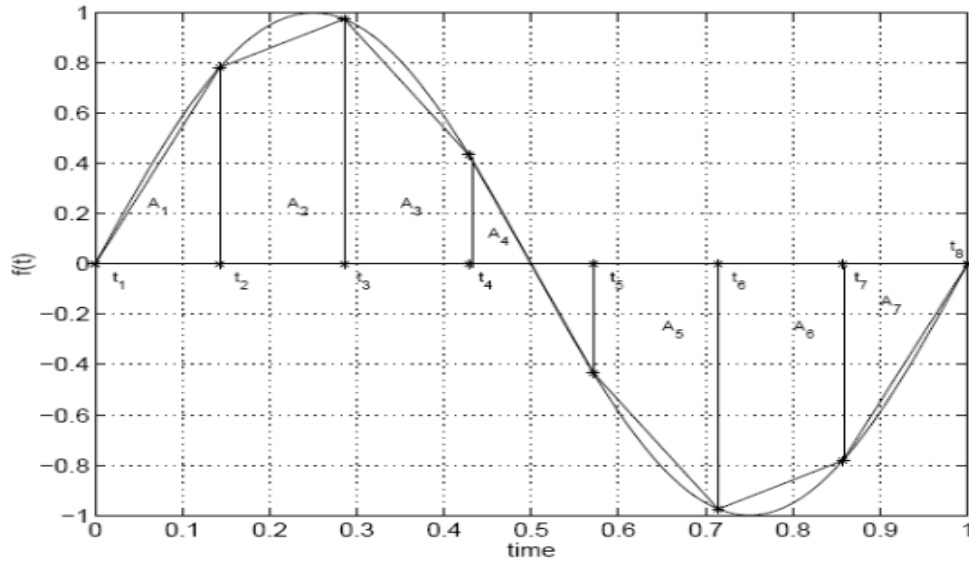
$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(x) e^{2\pi i x t} dx \quad (5.8)$$

με

$$F(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-2\pi i x t} dx \quad (5.9)$$

5.3.2 Διακριτός μετασχηματισμός Fourier (Discrete Fourier Transform- DFT) και αντίστροφος διακριτός μετασχηματισμός Fourier (Inverse Discrete Fourier Transform- IDFT)

Τα δεδομένα που λαμβάνονται κατά τη συλλογή μετρήσεων είναι διακριτά και όχι συνεχή. Επομένως, προκύπτει η ανάγκη μετάβασης στο πεδίο των συχνοτήτων μέσω του Διακριτού Μετασχηματισμού Fourier (DFT). Ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier στηρίζεται στον κανόνα του τραπεζίου σύμφωνα με τον οποίο τα διακριτά σημεία προβάλλονται ανά δύο στον άξονα των τετμημένων και δημιουργούνται τραπέζια. Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 5.2 προβάλλονται οκτώ σημεία (t_1, t_2, t_3, \dots) με συχνότητα δειγματοληψίας 10 Hz που περιγράφουν ένα περιοδικό φαινόμενο.



Σχήμα 5.2: Σχηματική αναπαράσταση του κανόνα του τραπεζίου
Figure 5.2: Schematic representation of trapezoidal rule
 (Πηγή: Brian D. Storey)

Αν τα τραπέζια ονομαστούν ως A_1, A_2, \dots, A_j και η συχνότητα δειγματοληψίας θεωρηθεί σταθερή τότε η άθροιση των εμβαδών των τραπεζίων δίνει :

$$\int f(t) dt = \Delta t \left(\frac{f(t_1)}{2} + \frac{f(t_n)}{2} + \sum_{j=2}^{n-1} f(t_j) \right) \quad (5.10)$$

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

$$a_n = \Delta t \left(\sin 2\pi n t_1 f(t_1) + \sin(2\pi n t_n) f(t_n) + 2 \sum_{j=2}^{n-1} f(t_j) \right) \quad (5.11)$$

$$b_n = \Delta t \left(\cos 2\pi n t_1 f(t_1) + \cos(2\pi n t_n) f(t_n) + 2 \sum_{j=2}^{n-1} f(t_j) \right) \quad (5.12)$$

Η μέθοδος του τραπεζίου με τον τρόπο που παρουσιάστηκε είναι μια γραφική μέθοδος για τον υπολογισμό του διακριτού μετασχηματισμού Fourier. Προκειμένου να υπολογιστεί ποσοτικά εφαρμόζεται η μέθοδος που ακολουθεί.

Ως γνωστόν, ένα ημιτονοειδές σήμα διακριτού χρόνου συμβολίζεται με $x(n)$ και είναι μια ακολουθία αριθμών που μπορεί να εκφραστεί και ως:

$$x(n) = A \cos(2\pi fn + \theta) \quad (5.13)$$

όπου n ακέραιος αριθμός που αντιπροσωπεύει τη θέση του δείγματος, A το πλάτος του σήματος, f η συχνότητα του σήματος και θ η φάση του. Ένα σήμα της παραπάνω μορφής είναι μια συνεχής συνάρτηση $X(e^{j\omega})$. Ο μετασχηματισμός Fourier διακριτού χρόνου της ακολουθίας $x(n)$ πεπερασμένου μήκους N στο διάστημα $n < 0$ και $n \geq N$ με $0 \leq \omega \leq 2\pi$ ισούται με:

$$X(e^{j\omega}) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\omega n} \quad (5.14)$$

Εάν τώρα στο ενδιαμέσο διάστημα $0 \leq n \leq N-1$ λάβουμε δείγματα της συνεχούς συνάρτησης $X(e^{j\omega})$ σε ισαπέχοντα διαστήματα στη συχνότητα $\omega_k = k \Delta\omega = k(2\pi/N)$, $k=0,1,\dots,N-1$ τότε προκύπτουν οι τιμές:

$$X(k) \equiv X\left(\frac{2\pi k}{N}\right) = X(e^{j\omega})|_{\omega = 2\pi k/N} = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j2\pi kn/N}, \quad k=0,1,\dots,N-1 \quad (5.15)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι, επειδή η $X(e^{j\omega})$ είναι περιοδική με περίοδο 2π , μόνο τα δείγματα της βασικής περιοχής των συχνοτήτων είναι απαραίτητα. Δεδομένου ότι τα δείγματα αυτά προκύπτουν από τον υπολογισμό του μετασχηματισμού Fourier $X(e^{j\omega})$ σε N ισαπέχουσες διακριτές συχνότητες, η παραπάνω σχέση ονομάζεται *διακριτός μετασχηματισμός Fourier* της $x(n)$. Αποδεικνύεται, ωστόσο, πως μπορούμε να ανακατασκευάσουμε την ακολουθία $x(n)$ από τα δείγματα της $X(k)$ στη συχνότητα, με βάση τη σχέση:

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k)e^{j2\pi kn/N} \quad n=0,1,\dots,N-1 \quad (5.16)$$

η οποία αποτελεί τον *αντίστροφο διακριτό μετασχηματισμό Fourier (IDFT)*.

Με τον IDFT πραγματοποιείται η μετάβαση από το πεδίο των συχνοτήτων στο πεδίο του χρόνου. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, χρησιμοποιείται ο αντίστροφος διακριτός μετασχηματισμός Fourier διότι ο αισθητήρας του radar πρωτογενώς μετράει τη διαφορά φάσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μεταξύ της

μιας εκπομπής και της επόμενης και επεξεργάζεται τις πληροφορίες φάσεις για να εντοπίσει τις μετατοπίσεις.

5.3.3 Ταχύς μετασχηματισμός Fourier (Fast Fourier Transform- FFT)

Ο ταχύς μετασχηματισμός *Fourier (FFT)* είναι ένας αλγόριθμος για τον υπολογισμό του DFT. Οι αλγόριθμοι FFT βασίζονται στις ιδιότητες των πινάκων και σε περιορισμούς επί των σημάτων. Ο FFT χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές όπως στην ψηφιακή επεξεργασία σήματος, στην επίλυση μερικών διαφορικών εξισώσεων, σε αλγορίθμους για γρήγορο υπολογισμό πολλαπλασιασμού μεγάλων ακεραίων. Πρακτικά δεν υπάρχει ένας μόνο αλγόριθμος αλλά πολλοί διαφορετικοί που ικανοποιούν το συγκεκριμένο σκοπό. Οι διάφορες τους εντοπίζονται κυρίως στο πλήθος και στο είδος των πράξεων καθώς επίσης και στο μέγεθος της απαιτούμενης μνήμης. Το κοινό χαρακτηριστικό όλων αυτών είναι το γεγονός ότι χρειάζονται $(N/2) \log_2 N$ μιγαδικούς πολλαπλασιασμούς για τον υπολογισμό ενός DFT N -σημείων. Ο ταχύς μετασχηματισμός Fourier αναφέρεται σε μια πεπερασμένου μήκους ακολουθία N σημείων υπολογίζεται από τη σχέση:

$$F(k) = F\left(\frac{k}{NT}\right) = \sum_{n=0}^{N-1} f(nT_s) e^{-2\pi k n / N} \quad k=0,1,\dots,N-1 \quad (5.17)$$

Όπου

- F_k είναι το νέο σήμα που προκύπτει από τον μετασχηματισμό μιας χρονοσειράς που αποτελείται από N διακριτές τιμές
- N το πλήθος των διακριτών τιμών της χρονοσειράς που μετασχηματίζεται
- T_s είναι το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο τιμών της χρονοσειράς

Με την εφαρμογή του συγκεκριμένου μετασχηματισμού προκύπτει ένα νέο σήμα N τιμών όπου κάθε τιμή αντιστοιχεί σε μία συχνότητα οι οποίες απέχουν μεταξύ τους κατά συχνότητα:

$$f_s = \frac{1}{NT_s} \quad (5.18)$$

Η τιμή F_k που αντιστοιχεί σε κάθε συχνότητα είναι γνωστή ως amplitude (εύρος). Η τιμή της κάθε συχνότητας εκφράζει στο βαθμό συμμετοχής της στη χρονοσειρά. Το

Πιο ουσιαστικό στοιχείο στον FFT είναι η μειωμένη υπολογιστική πολυπλοκότητά του, δηλαδή, το συνολικό πλήθος πράξεων (πολλαπλασιασμών και προσθέσεων). Πρέπει, επίσης, να τονιστεί πως ο FFT εφαρμόζεται μόνο για πλήθος δειγμάτων που είναι δύναμη του δύο. Το γεγονός αυτό αποτελεί και τον περιορισμό του, δηλαδή ότι δεν μπορεί να εφαρμοστεί για τυχαίο πλήθος σημείων όπως ο DFT. Ένα ακόμα μειονέκτημα του FFT είναι το γεγονός ότι επιβάλλεται τα διακριτά σημεία της χρονοσειράς να είναι χρονικά ισαπέχοντα.

Κατά την επεξεργασία των μετρήσεων που λαμβάνονται από το επίγειο σύστημα radar μικροκυματικής συμβολομετρίας, για τη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, χρησιμοποιείται ο ταχύς μετασχηματισμός Fourier (FFT) για να προκύψουν η κύρια και οι δευτερεύουσες συχνότητες ταλάντωσης από τις χρονοσειρές που μετρώνται.

5.4 Το Θεώρημα Δειγματοληψίας

Το θεώρημα της δειγματοληψίας απαντά στο ερώτημα του ποιος πρέπει να είναι ο ρυθμός δειγματοληψίας F_s για τη σωστή αναπαράσταση ενός σήματος. Δηλαδή, πόσο συχνά πρέπει να λαμβάνονται μετρήσεις ώστε να προσδιοριστούν με ακρίβεια τα χαρακτηριστικά ενός φαινομένου. Το θεώρημα αυτό διατύπωσε ο Nyquist (1928) και στη συνέχεια ο Shannon (1949) ως εξής:

«Η συχνότητα F_s , με την οποία λαμβάνονται τα δείγματα ενός σήματος, πρέπει να είναι τουλάχιστον διπλάσια από την υψηλότερη συχνότητα F_{max} που περιέχεται στο σήμα»

Δηλαδή:

$$F_s \geq 2F_{max} \quad (5.19)$$

Πιο συγκεκριμένα, το θεώρημα δειγματοληψίας εξηγεί πως για να μην χαθεί πληροφορία θα πρέπει να λαμβάνονται τουλάχιστον δύο δείγματα ανά περίοδο (της υψηλότερης συχνότητας του σήματος). Στην περίπτωση που η συνθήκη αυτή δεν ικανοποιείται τότε εμφανίζεται το φαινόμενο της φασματικής επικάλυψης (spectral overlap) ή της χαμηλού ρυθμού δειγματοληψίας (aliasing). Σε αυτή την περίπτωση, η μορφή του φάσματος του αρχικού σήματος δεν διατηρείται στο φάσμα του

δειγματοληπτούμενου σήματος, με συνέπεια να μην είναι δυνατή η ακριβής ανακατασκευή του αρχικού σήματος.

Στην περίπτωση του πειράματος που έγινε για την παρούσα εργασία, ορίζεται ως συχνότητα δειγματοληψίας η τιμή 200 Hz που είναι η μέγιστη που παρέχει το όργανο ώστε να καλύπτει τις ανάγκες του πειράματος. Όπως διαπιστώνεται στη συνέχεια, η μέγιστη συχνότητα ταλάντωσης που εμφανίζεται είναι περίπου 99 Hz. Επομένως, για τη σωστή αναπαράσταση του αρχικού σήματος, πρέπει το radar να καταγράψει σε συχνότητα τουλάχιστον 198 Hz. Η συχνότητα δειγματοληψίας που ορίστηκε (200 Hz) υπερβαίνει το θεωρητικό όριο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

6.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων που συλλέγονται στο πεδίο. Αρχικά, περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο επιλέγονται τα σημεία της καπνοδόχου που αναλύονται εκτενέστερα. Στην συνέχεια, ακολουθεί η ανάλυση στο πεδίο του χρόνου στην οποία επεξηγούνται τα διαγράμματα της μετατόπισης σε συνάρτηση με το χρόνο. Επιπλέον, γίνεται ανάλυση στο πεδίο των συχνοτήτων και παρουσιάζονται τα διαγράμματα των συχνοτήτων μετατόπισης. Με αυτή τη μέθοδο προκύπτουν οι κύριες και δευτερεύουσες συχνότητες ταλάντωσης της κατασκευής. Τέλος, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων που έχουν προκύψει από την εταιρία ΑΤΕΑ Environment στο παρελθόν με αυτά που προέκυψαν από τις μετρήσεις του ΕΜΠ.

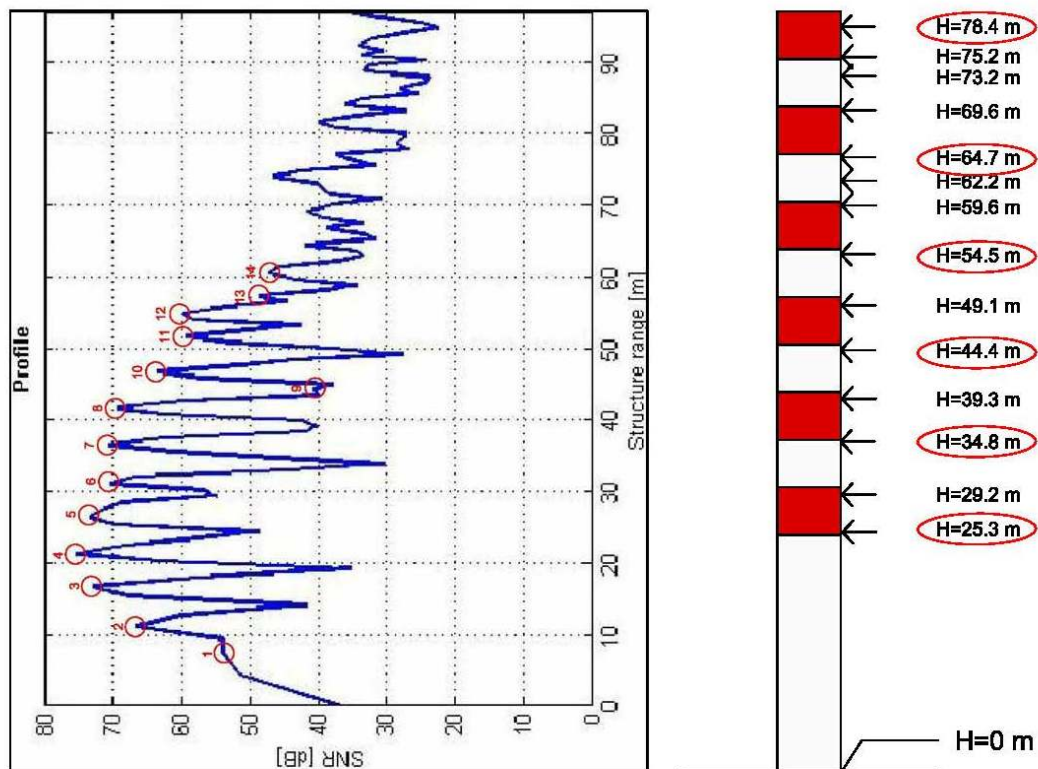
6.2 Προεπεξεργασία Μετρήσεων και Επιλογή Σημείων για Ανάλυση

Η επεξεργασία των δεδομένων που λαμβάνονται γίνεται σε αρκετά βήματα. Αρχικά, εντοπίζονται τα σημεία που μετρώνται επάνω στην κατασκευή. Στο Σχήμα 6.1 (αριστερά), παρουσιάζεται το διάγραμμα του θορύβου του σήματος των σημείων στα οποία προσπίπτει η ηλεκτρομαγνητική δέσμη που εκπέμπει η κεραία του radar στο ορατό τμήμα της καπνοδόχου σε συνάρτηση με την απόστασή τους από το σημείο εγκατάστασης του οργάνου καθ' ύψος της κατασκευής. Τα σημεία πρέπει είναι σε διαφορετικές αποστάσεις και γωνίες από τον άξονα του συστήματος διότι διαφορετικά θα υπάρχουν σφάλματα στις μετρήσεις.

Στο διάγραμμα του σχήματος 6.1 υπάρχουν 14 εμφανείς κορυφές (σημεία σε κόκκινο κύκλο) οι οποίες αντιστοιχούν σε σημεία πάνω στην κατασκευή με καλή ανακλαστικότητα. Για κάθε ένα από αυτά αφαιρείται ο τυχόν θόρυβος προκειμένου να αντιμετωπιστεί η επίδραση των μη επιθυμητών κινούμενων στόχων (remove clutter). Τα ύψη των 14 σημείων από τη βάση της καπνοδόχου παρουσιάζονται στο ίδιο σχήμα (δεξιά). Ο αισθητήρας μπορεί να ανιχνεύσει ταυτόχρονα τη μετατόπιση και την απόκρισή τους. Τέλος, οι μετατοπίσεις που μετρούνται στην διεύθυνση

σκόπευσης προβάλλονται στη διεύθυνση της μετακίνησης σύμφωνα με τη γεωμετρία παρατήρησης που έχει προσδιοριστεί με τη βοήθεια γεωδαιτικού σταθμού.

Προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα για τη δυναμική συμπεριφορά της κατασκευής κατά τον κύκλο φόρτισης της μηχανής επιλέγονται για περαιτέρω ανάλυση 6 σημεία από τα 14, περίπου ισαπέχοντα και με όσο το δυνατόν καλύτερη ανακλαστικότητα. Κριτήριο επιλογής είναι η «ταύτιση» των σημείων αυτών με εκείνα που μετρήθηκαν από την εταιρία ATEA Environment κατά την περίοδο 2000 ώστε να είναι συγκρίσιμα. Τα ύψη αυτών εμφανίζονται στις κόκκινες ελλείψεις. Στον Πίνακα 6.1 παρουσιάζονται τα 6 σημεία, η κεκλιμένη απόστασή τους από το όργανο και το ύψος στο οποίο αντιστοιχούν μετρημένο από τη βάση της καπνοδόχου.



Σχήμα 6.1: Παρουσίαση σημείων με μεγάλη ανακλαστικότητα και τα ύψη στα οποία αντιστοιχούν πάνω στην καπνοδόχο

Figure 6.1: Presentation of points with high reflectivity and the heights to which they correspond over the stack

α/α σημείου	Κεκλιμένη απόσταση (m)	Ύψος (m)
32	23.2	25.3
38	27.7	34.8
47	34.5	44.4
58	42.7	54.5
70	51.7	64.7
87	64.4	78.4

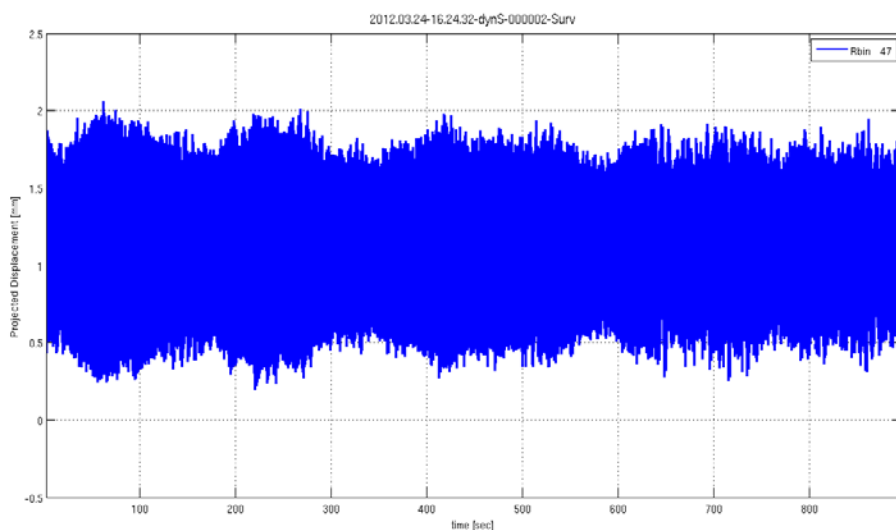
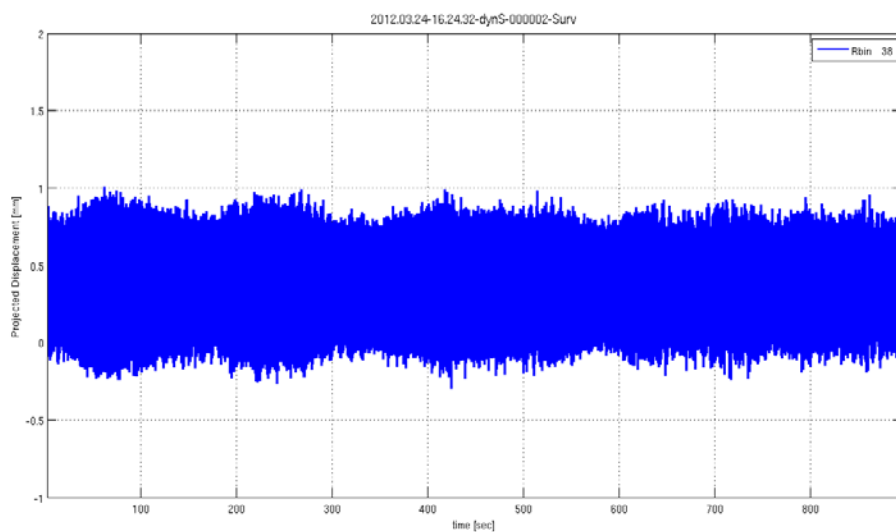
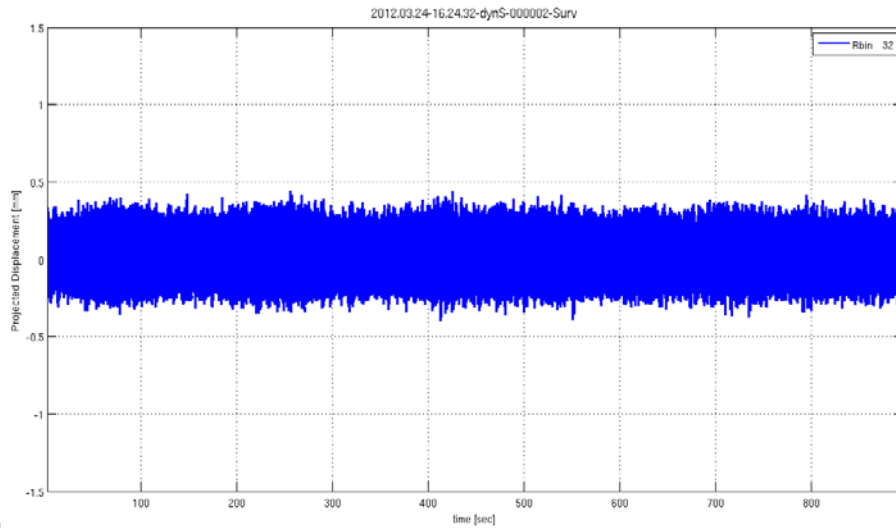
Πίνακας 6.1: Τα 6 σημεία που επιλέχθηκαν για περαιτέρω ανάλυση, η κεκλιμένη απόστασή τους από το όργανο και το ύψος στο οποίο αντιστοιχούν πάνω στην καπνοδόχο

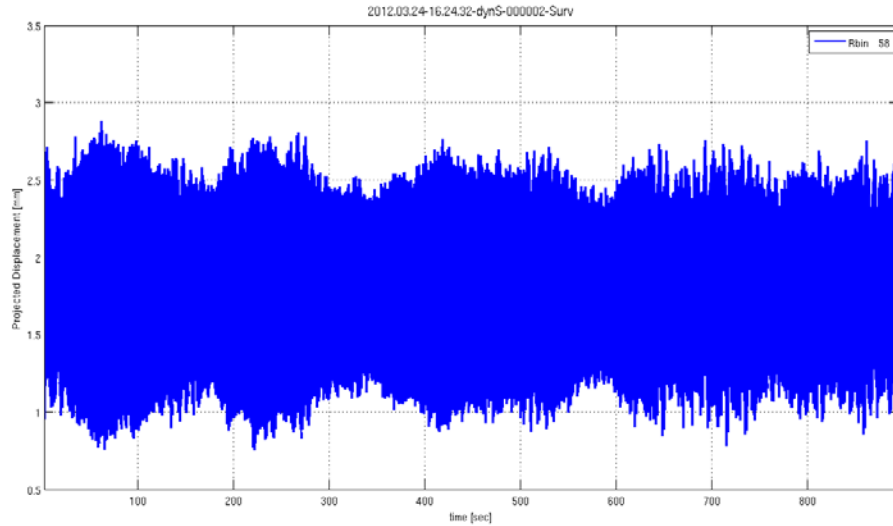
Table 6.1: The 6 points were selected for further analysis, the slope distance from the instrument and the height at which they corresponds over the stack

6.3 Ανάλυση στο Πεδίο του Χρόνου

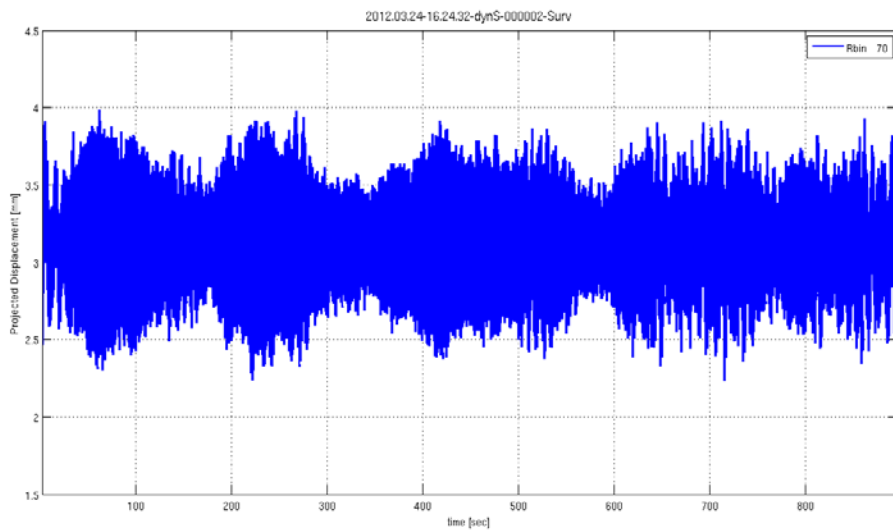
Όπως έχει αναφερθεί, η μέτρηση της μετατόπισης (d) ενός αντικειμένου προκύπτει από τη διαφορά φάσης ($\Delta\varphi$) που μετριέται από τον αισθητήρα του radar κατά τις διάφορες στιγμές της λήψης. Η διαδικασία αυτή γίνεται με τον αντίστροφο διακριτό μετασχηματισμό Fourier (IDFT). Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, ο προσδιορισμός και η μελέτη των διαγραμμάτων μετατόπισης-χρόνου πραγματοποιείται για όλες τις ομάδες δεδομένων που συλλέγονται στο πεδίο. Ωστόσο, για λόγους συντομίας, ακολουθούν τα διαγράμματα της μετατόπισης σε συνάρτηση με το χρόνο μόνο για την τρίτη ομάδα μετρήσεων διάρκειας 15 min (16:24:00-16:39:00) και όταν το φορτίο της μηχανής είναι στα 110 MW. Άλλωστε, αυτά δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις σε σχέση με όλα τα υπόλοιπα όσον αφορά τα χαρακτηριστικά που μελετώνται. Τέλος, τα διαγράμματα αυτά αναφέρονται στα 6 ύψη της καπνοδόχου που έχουν επιλεγεί. (Σχήμα 6.2)

Μελέτη κραδασμών παρακαμπτήριου καπνοδόχου σε οριακές συνθήκες φόρτισης του αεροστροβίλου με τη μέθοδο της μικροκυματικής συμβολομετρίας

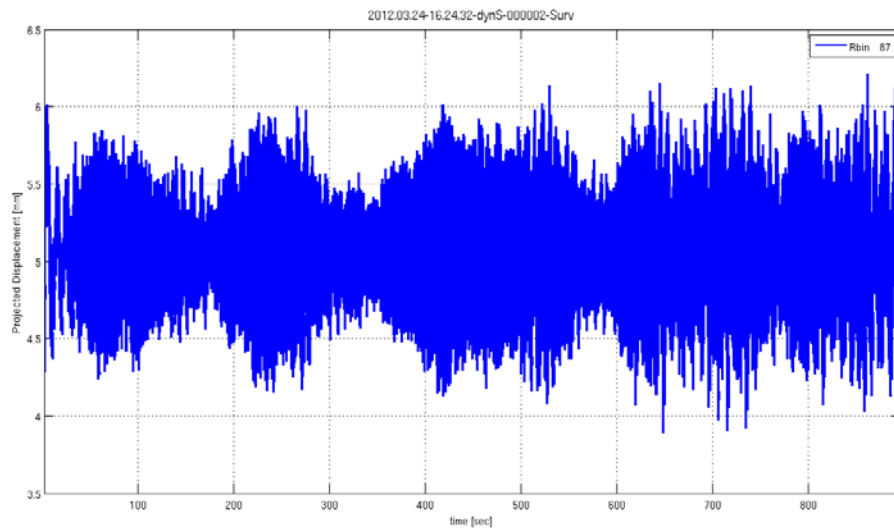




(δ)



(ε)



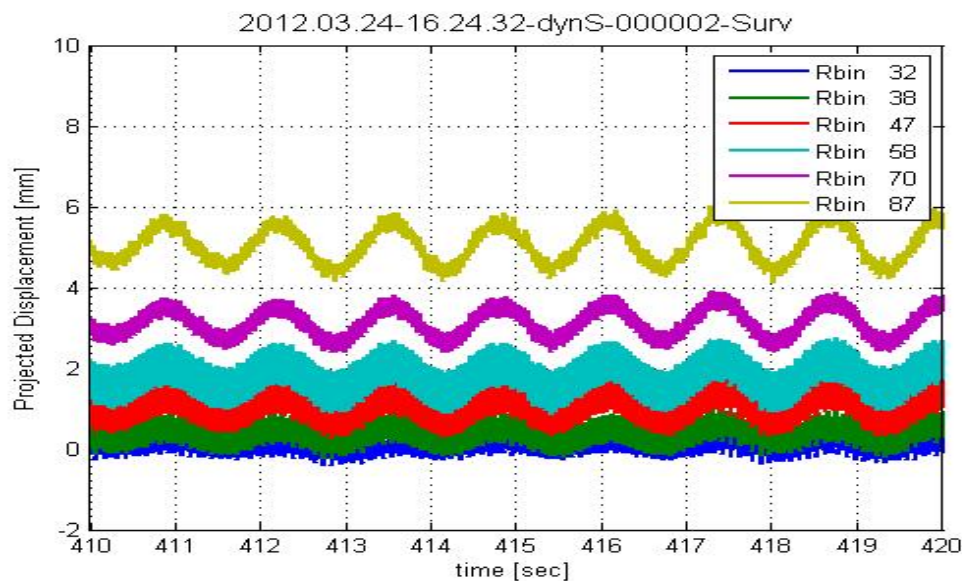
(στ)

Σχήμα 6.2: Μέτρηση της μετατόπισης σημείου στο ύψος των 25.3 m (α), 34.8 m (β), 44.4 m (γ), 54.5 m (δ), 64.7 m (ε), 78.4 m (στ) για το χρονικό διάστημα 15 min

Figure 6.2: Displacement measure point at 25.3 m (a), 34.8 m (b), 44.4 m (c), 54.5 m (d), 64.7 m (e), 78.4 m (f) height for the time period of 15 min

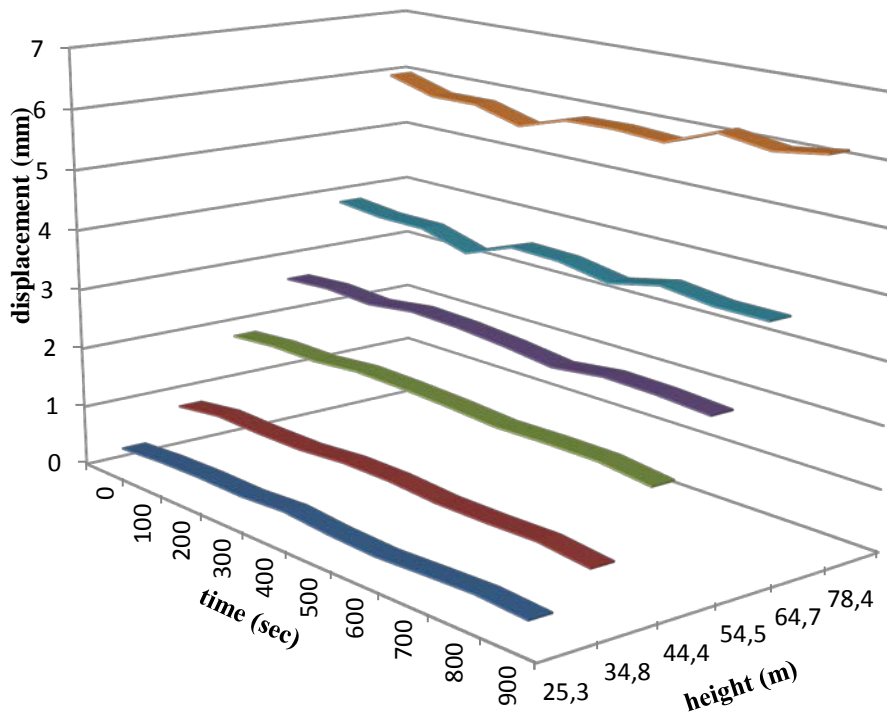
Παρατηρώντας τα διαγράμματα του Σχήματος 6.2 προκύπτουν πολύ ενδιαφέροντα στοιχεία σχετικά με τη δυναμική συμπεριφορά της κατασκευής. Διαπιστώνεται πως τα διαγράμματα των χρονοσειρών εμφανίζουν μια περιοδικότητα στην αλλαγή του εύρους ταλάντωσης. Στο Σχήμα 6.2 (α) που αντιστοιχεί στο ύψος των 25.3 m το εύρος ταλάντωσης κυμαίνεται περίπου στα 0.8 mm με ακραίες τιμές μεταξύ -0.4 mm και +0.4 mm. Στο Σχήμα 6.2 (β) που αναφέρεται στο ύψος των 34.8 m το εύρος ταλάντωσης αυξάνεται στα 1.3 mm με ακραίες τιμές -0.3 έως 1.0 mm. Καθώς αυξάνεται το ύψος και φτάνει τα 44.4 m (Σχήμα 6.2 (γ)) αυξάνεται και το εύρος στα 1.8 mm με ακραίες τιμές 0.2 mm έως 2.0 mm. Μία ακόμα μεγαλύτερη αύξηση του ύψους στα 54.5 m επιφέρει αύξηση στο εύρος ταλάντωσης και φτάνει την τιμή των 2.0 mm με ακραίες τιμές 0.8 mm έως 2.8 mm (Σχήμα 6.2 (δ)). Τέλος, στα ύψη των 64.7 m και 78.4 m το εύρος είναι 1.6 mm και 2.0 mm με ακραίες τιμές 2.3 mm έως 3.9 mm και 4 mm έως 6 mm αντίστοιχα (Σχήμα 6.2 (ε) και (στ)).

Μια διαφορετική εικόνα των μετρήσεων μετατόπισης στα 6 σημεία που επιλέχθηκαν καθ' ύψος της κατασκευής παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.3. Προκειμένου να γίνει εμφανής η ομοιότητα στο μοτίβο της περιοδικής κίνησης το διάγραμμα αναφέρεται σε ένα σύντομο χρονικό διάστημα 10 sec. Πρέπει, επίσης, να σημειωθεί πως παρατηρείται αύξηση στο εύρος της μετακίνησης από το ύψος των 25.3 m έως την κορυφή της κατασκευής (H=78.4 m).



Σχήμα 6.3: Διάγραμμα μετατόπισης-χρόνου για 6 σημεία καθ' ύψος της καπνοδόχου (Range Bins 32, 38, 47, 58, 70, 87) για χρονικό διάστημα 10 sec

Figure 6.3: Diagram of displacement-time for 6 points in height of stack (Range Bins 32, 38, 47, 58, 70, 87) for the time interval of 10 sec



Σχήμα 6.4: Μέγιστες μετακινήσεις που μετρήθηκαν για ένα τμήμα της καπνοδόχου που αντιστοιχεί σε εύρος διαστήματος 25.3 m-78.4 m για χρονική διάρκεια 15 min

Figure 6.4: Maximum displacements measured for a section of the stack that corresponds to range interval 25.3 m-78.4 m for a period of 15 min

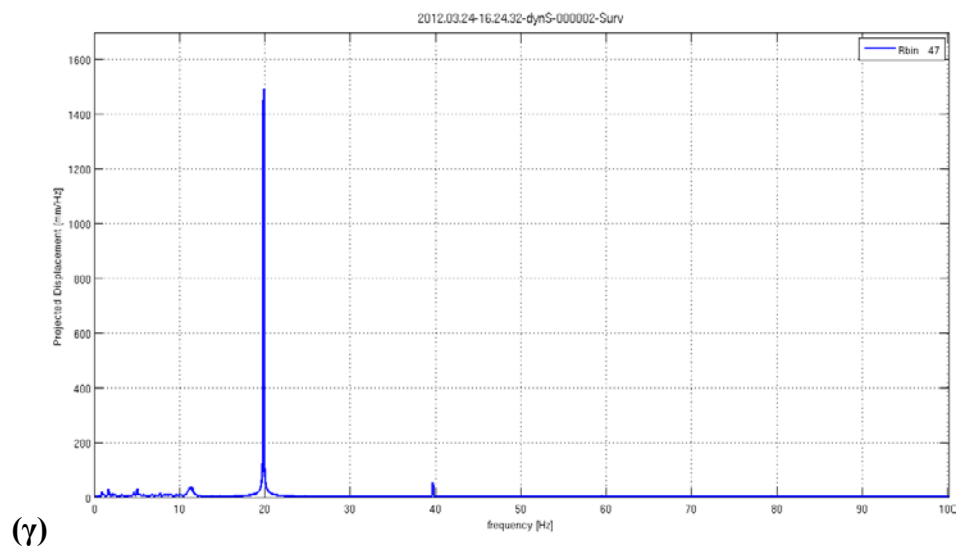
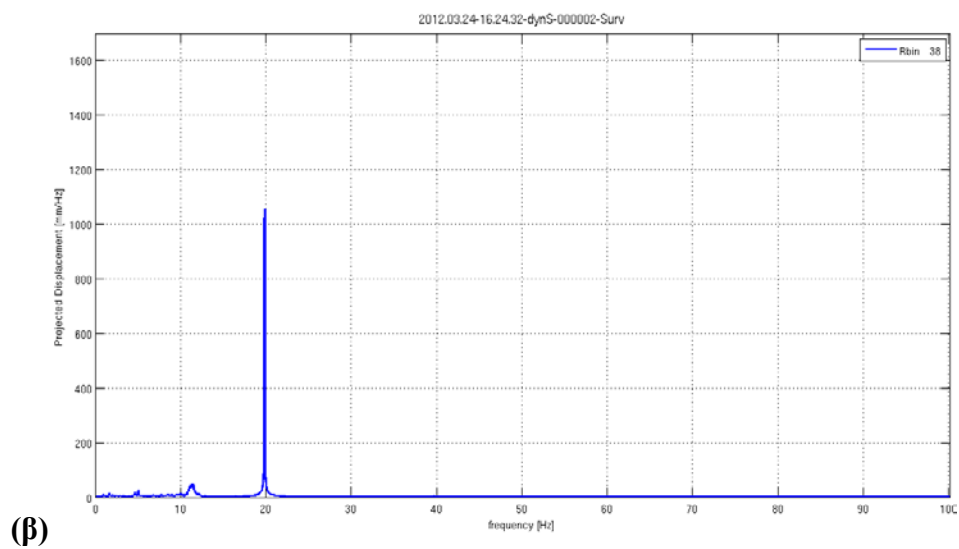
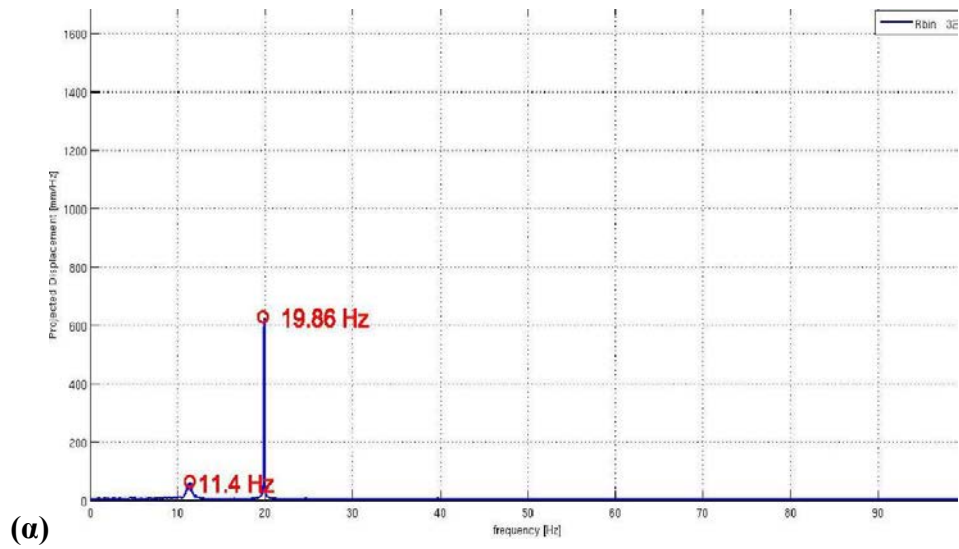
Στο Σχήμα 6.4 φαίνονται οι τιμές της μέγιστης μετακίνησης συναρτήσει του χρόνου για κάθε ένα από τα 6 παρατηρούμενα σημεία της κατασκευής που αντιστοιχούν στο εύρος διαστήματος 25.3 m-78.4 m. Είναι εμφανές πως οι μετατοπίσεις αυξάνονται βαθμιαία καθ' ύψος της κατασκευής, ξεκινώντας με 0.4 mm στο χαμηλότερο παρατηρούμενο σημείο (H=25.3 m) και φτάνοντας τα 6.0 mm στην κορυφή της καπνοδόχου (H=78.4 m). Το συμπέρασμα αυτό είναι αναμενόμενο και προκύπτει με την κοινή λογική απλά με το συγκεκριμένο διάγραμμα ποσοτικοποιείται ώστε να μπορεί να συγκριθεί με τις προδιαγραφές του σχεδιασμού της κατασκευής και με σκοπό τον έλεγχο της ποιότητας.

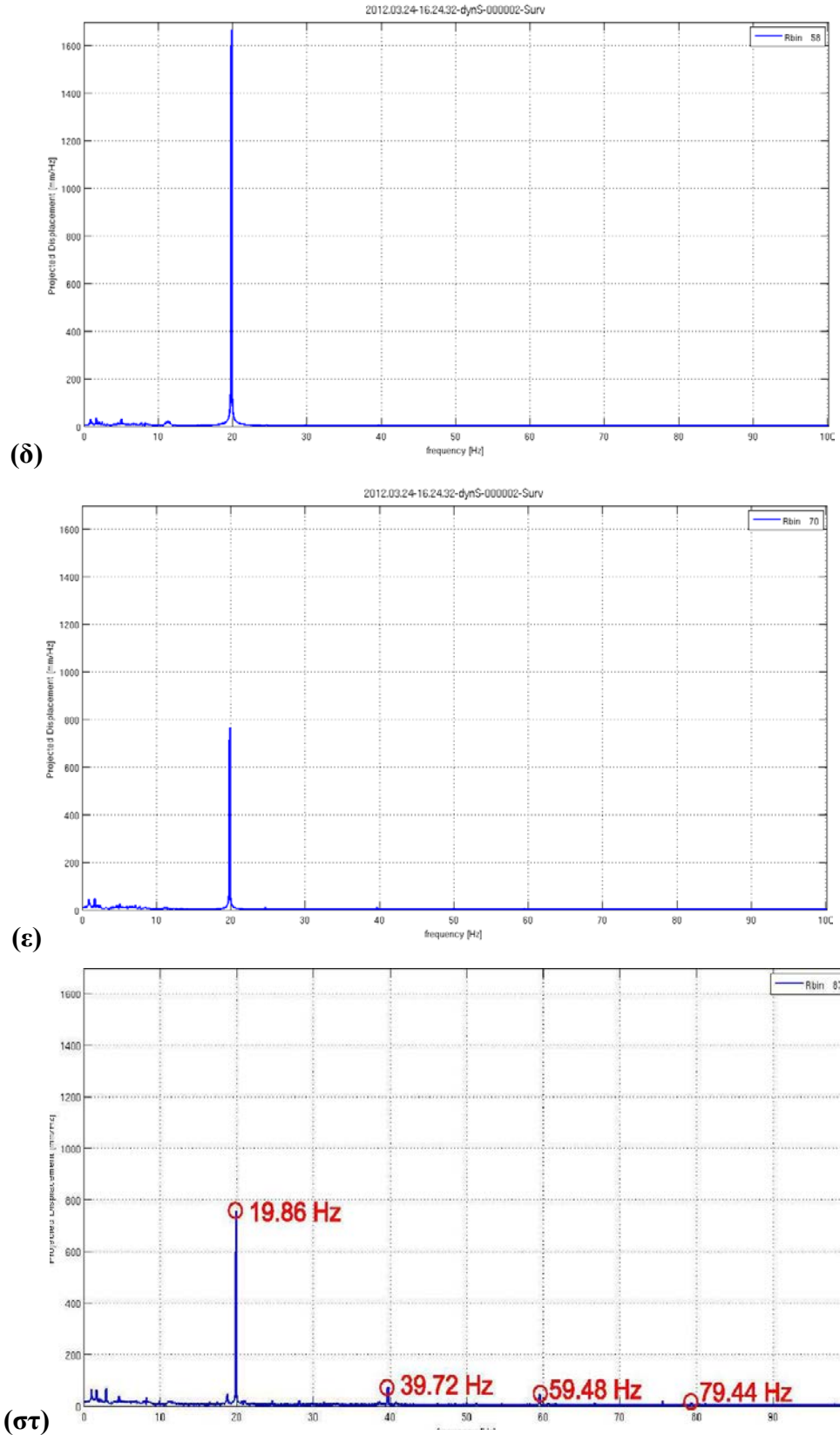
6.4 Ανάλυση στο Πεδίο των Συχνοτήτων

Όπως διακρίνεται και από τα διαγράμματα μετατόπισης-χρόνου η κίνηση της κατασκευής είναι περιοδική. Επομένως είναι αναγκαίο να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά της ταλάντωσης. Αυτό επιτυγχάνεται με την εφαρμογή της μεθόδου

φασματικής ανάλυσης (βλ. Κεφ.5 § 5.3). Κατά τη φασματική ανάλυση χρονοσειράς μεταφέρονται τα δεδομένα από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο των συχνοτήτων αναδεικνύοντας τις συχνότητες που εμφανίζονται στη χρονοσειρά. Μέθοδο φασματικής ανάλυσης αποτελεί ο μετασχηματισμός Fourier που επιτυγχάνεται με διάφορους τρόπους όπως τον διακριτό μετασχηματισμός Fourier (DFT) ή τον ταχύ μετασχηματισμό Fourier (FFT). Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιείται ο ταχύς μετασχηματισμός Fourier (FFT). Η μέθοδος εφαρμόζεται για όλες τις ομάδες μετρήσεων. Ωστόσο, για την 1^η και 5^η ομάδα τα αποτελέσματα που προκύπτουν δεν είναι αντιπροσωπευτικά καθώς το φορτίο της μηχανής μεταβάλλεται. Θεωρείται, λοιπόν, σκόπιμο να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα για την 3^η ομάδα μετρήσεων όπου το φορτίο της μηχανής έχει σταθεροποιηθεί στα 110 MW. Όπως είναι αναμενόμενο η ανάλυση στα διαφορετικά ύψη της καπνοδόχου καταλήγει σε παρόμοια αποτελέσματα τα παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.5.

Μελέτη κραδασμών παρακαμπτήριου καπνοδόχου σε οριακές συνθήκες φόρτισης του αεροστροβίλου με τη μέθοδο της μικροκυματικής συμβολομετρίας



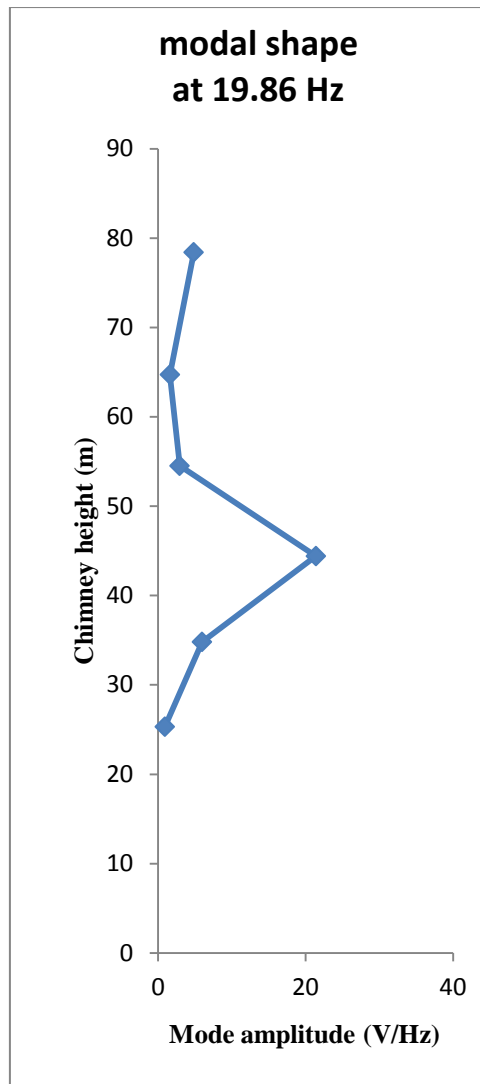


Σχήμα 6.5: Απόκριση συχνότητων μετατόπισης της καπνοδόχου στο ύψος των 25.3 m (α), 34.8 m (β), 44.4 m (γ), 54.5 m (δ), 64.7 m (ε), 78.4 m (στ) για το χρονικό διάστημα 15 min
Figure 6.5: Displacement frequency response of stack at 25.3 m (a), 34.8 m (b), 44.4 m (c), 54.5 m (d), 64.7 m (e), 78.4 m (f) height for the time period of 15 min

Όπως παρατηρείται και στα παραπάνω διαγράμματα η κύρια συχνότητα ταλάντωσης της καπνοδόχου είναι 19.86 Hz. Εκτός από αυτή είναι εμφανείς και άλλες συχνότητες στα 11.4 Hz, 39.72 Hz, 59.48 Hz και 79.44 Hz που παρουσιάζονται στα Σχήματα 6.5 (α), (στ). Οι συχνότητες 39.72 Hz και 79.44 Hz ονομάζονται αρμονικές καθώς αποτελούν ακέραια πολλαπλάσια της κύριας. Πρέπει να αναφερθεί πως εκτός από τις δεσπόζουσες συχνότητες, υπάρχουν και άλλες τυχαίες με μικρότερη σημαντικότητα που είναι δύσκολο να αναγνωριστούν εξαιτίας της εξαιρετικά χαμηλής ισχύος τους.

Σε όλα τα διαγράμματα που διεξάγονται (για τις πέντε ομάδες μετρήσεων και για όλα τα ύψη επάνω στην κατασκευή) η τιμή της κύριας συχνότητας είναι της τάξης των 19.85 Hz. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς αν η κατασκευή εμφανίζει για διαφορετικές ομάδες δεδομένων, ταλαντώσεις σε διαφορετικές τιμές συχνοτήτων, τότε θα δημιουργούνταν πιθανότητες αστοχίας της κατασκευής. Η κύρια συχνότητα ταλάντωσης αντιστοιχεί σε περίοδο $T=0.05 \text{ sec}$ ($T = \frac{1}{f}$).

Το Σχήμα 6.6 δείχνει πως η κύρια συχνότητα ταλάντωσης (19.86 Hz) επηρεάζει τη συμπεριφορά της καπνοδόχου. Ειδικότερα, απεικονίζει την μεταβολή του εύρους της ταλάντωσης καθ' ύψος της κατασκευής για συγκεκριμένη τιμή συχνότητας. Το γεγονός ότι στο εύρος διαστήματος 35 m-55 m το διάγραμμα εμφανίζει μια μεγάλη καμπύλη πιθανόν να οφείλεται σε ενισχύσεις που έχουν τοποθετηθεί στο εσωτερικό της κατασκευής στο συγκεκριμένο τμήμα για να αποφευχθεί η έντονη δόνηση που παρατηρείται κατά τη φόρτιση της μηχανής. Να σημειωθεί πως το συγκεκριμένο διάγραμμα αναφέρεται στην 3^η ομάδα μετρήσεων ενώ και οι υπόλοιπες ομάδες έδωσαν παρόμοια αποτελέσματα.



Σχήμα 6.6: Κατάσταση λειτουργίας στη συχνότητα των 19.86 Hz
Figure 6.6: Modal shape at the frequency of 19.86 Hz

6.5 Σύγκριση των Αποτελεσμάτων της ATEA Environment και του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου

Όπως έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 3 (§ 3.4.4) στην παρακαμπτήριο καπνοδόχο της μονάδας IV του ενεργειακού κέντρου ηλεκτροπαραγωγής του Λαυρίου έχουν πραγματοποιηθεί μετρήσεις στο παρελθόν από την εταιρία ATEA Environment προκειμένου να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα των δονήσεων της καπνοδόχου. Οι μετρήσεις έγιναν στις 9-03-2000 και 10-03-2000. Θεωρείται σκόπιμο να συγκριθούν τα αποτελέσματα της ATEA Environment με αυτά του ΕΜΠ που προέκυψαν από τη διεξαγωγή μετρήσεων στις 24-03-2012 για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Για να είναι δυνατή η σύγκριση πρέπει να επιλεχθούν τα σημεία των οποίων οι τιμές του ύψους πλησιάζουν μεταξύ των δύο κατηγοριών μετρήσεων. Στο

➤ Για $H_{ATEA}= 22.0\text{ m}$ και $H_{EMΠ}=25.3\text{ m}$

Συχνότητα Επιτάχυνσης (Hz)	ATEA 9-03-2000	ATEA 10-03-2000	EMΠ 24-03-2012					
			#1	#2	#3	#4	#5	
5.0	○							
11.4	●		●	●	●	●	●	●
19.8	●		●	●	●	●	●	●
31.4	○	○						
50.0	●		●	●	●	●	●	●
59.4				○	○			
75.6			○	○	○	○	○	○
85.9	○	○						
93.7		○						

(α)

➤ Για $H_{ATEA}= 47.0\text{ m}$ και $H_{EMΠ}=44.4\text{ m}$

Συχνότητα Επιτάχυνσης (Hz)	ATEA 9-03-2000	ATEA 10-03-2000	EMΠ 24-03-2012					
			#1	#2	#3	#4	#5	
4.3	○							
11.4	○							
19.8	●	●	●	●	●	●	●	●
31.4	○	○						
50.0	●		●	●	●	●	●	●
58.0	○							
59.4				○	○			
61.5				○	○			
75.6	○	○	○					
85.9	○							
96.0		○						
99.0	○		○	○	○			

(β)

➤ Για $H_{ATEA}= 63.0\text{ m}$ και $H_{EMΠ}=64.7\text{ m}$

Συχνότητα Επιτάχυνσης (Hz)	ATEA 9-03-2000	ATEA 10-03-2000	EMΠ 24-03-2012					
			#1	#2	#3	#4	#5	
5.0	○							
11.4	○							
19.8	●		●	●	●	●	●	●
24.6	○		○	○	○			
31.8		○						
32.0	○							
50.0	●		●	●	●	●	●	●
58.5	○							
59.4				○	○			
61.4	○							
75.6			○	○	○	○	○	○
85.9	○							

(γ)

Πίνακας 6.2: Αντιπαραβολή κύριων συχνοτήτων επιτάχυνσης από τις μετρήσεις ATEA-EMΠ για τα ύψη $H_{ATEA}= 22.0\text{ m}$ - $H_{EMΠ}=25.3\text{ m}$ (α), $H_{ATEA}= 63.0\text{ m}$ - $H_{EMΠ}=64.7\text{ m}$ (β), $H_{ATEA}= 63.0\text{ m}$ - $H_{EMΠ}=64.7\text{ m}$ (γ), αντίστοιχα

Table 6.2: Comparison between the main acceleration frequency from the measurements of ATEA-NTUA for the heights $H_{ATEA}= 22.0\text{ m}$ - $H_{EMΠ}=25.3\text{ m}$ (a), $H_{ATEA}= 63.0\text{ m}$ - $H_{EMΠ}=64.7\text{ m}$ (b), $H_{ATEA}= 63.0\text{ m}$ - $H_{EMΠ}=64.7\text{ m}$ (c), respectively

Όπως είναι φανερό από τους παραπάνω πίνακες, ορισμένες συχνότητες επιτάχυνσης εμφανίζονται ταυτόχρονα και στις δύο κατηγορίες μετρήσεων (ATEA-EMΠ). Ωστόσο, υπάρχουν και διαφορετικές συχνότητες. Το γεγονός αυτό πιθανόν οφείλεται στις διαφορετικές μεθόδους μέτρησης και στην αλλαγή της συμπεριφοράς της κατασκευής. Επιπλέον, τα σημεία των οποίων συγκρίνονται οι συχνότητες δεν αντιστοιχούν ακριβώς στα ίδια ύψη αλλά είναι τα πλησιέστερα. Ωστόσο, επισημαίνεται ότι οι καιρικές συνθήκες κατά τις ημέρες των πειραμάτων είναι ανάλογες. Η ταχύτητα του ανέμου στις 9-03-2000 είναι 2.78 m/s, στις 10-03-2000 είναι μεταξύ 3.33 m/s και 6.94 m/s, ενώ στις 24-03-2012 είναι περίπου 2.97 m/s.

Πιο αναλυτικά, στους Πίνακες 6.2 (α), (β), (γ) οι μαύρες κουκίδες δείχνουν τις συχνότητες που εμφανίζονται και στις δύο σειρές μετρήσεων (ATEA-EMΠ) ταυτόχρονα ενώ οι άσπρες κουκίδες δείχνουν τις συχνότητες που εμφανίζονται ανεξάρτητα για κάθε σειρά. Στον Πίνακα 6.2 (α) (για $H_{ATEA}= 22.0$ m και $H_{EMΠ}=25.3$ m) εμφανίζονται ταυτόχρονα οι συχνότητες των 11.4 Hz, 19.8 Hz και 50.0 Hz. Στον Πίνακα 6.2 (β) (για $H_{ATEA}= 47.0$ m και $H_{EMΠ}=44.4$ m) κοινές είναι οι συχνότητες των 19.8 Hz και 50.0 Hz. Επίσης, οι συχνότητες των 75.6 Hz και 99 Hz εμφανίζονται στις μετρήσεις της ATEA και του EMΠ αλλά όχι ταυτόχρονα σε όλες τις ομάδες μετρήσεων. Τέλος, στον Πίνακα 6.2 (γ) (για $H_{ATEA}= 63.0$ m και $H_{EMΠ}=64.7$ m) εμφανίζονται ταυτόχρονα οι συχνότητες των 19.8 Hz και 50.0 Hz. Τέλος, η συχνότητα των 24.6 Hz εμφανίζεται στις μετρήσεις της ATEA (9-03-2000) και μόνο στις ομάδες #1,#2,#3 του EMΠ.

Επιπλέον, με το κίτρινο χρώμα επισημαίνονται οι κύριες συχνότητες επιτάχυνσης για κάθε διατομή για τις σειρές μετρήσεων του EMΠ και με το κυανό χρώμα οι κύριες συχνότητες επιτάχυνσης για τις σειρές μετρήσεων της ATEA. Στα τρία ύψη που μελετώνται η κύρια συχνότητα για τις μετρήσεις του EMΠ είναι 19.8 Hz. Στο ύψος $H=22.0$ m η κύρια συχνότητα για τις μετρήσεις της ATEA είναι 31.4 Hz και τις δύο μέρες μετρήσεων (9-03-2000, 10-03-2000), στο ύψος $H=47.0$ m είναι 11.4 Hz στις 9-03-2000 και 31.4 Hz στις 10-03-2000 ενώ στο ύψος $H=63.0$ m είναι 11.4 Hz στις 9-03-2000 και 31.8 Hz στις 10-03-2000.

Στα πλαίσια της σύγκρισης των αποτελεσμάτων της ATEA Environment και του EMΠ δημιουργήθηκε και ο Πίνακας 6.3 στον οποίο απεικονίζονται οι μέσες

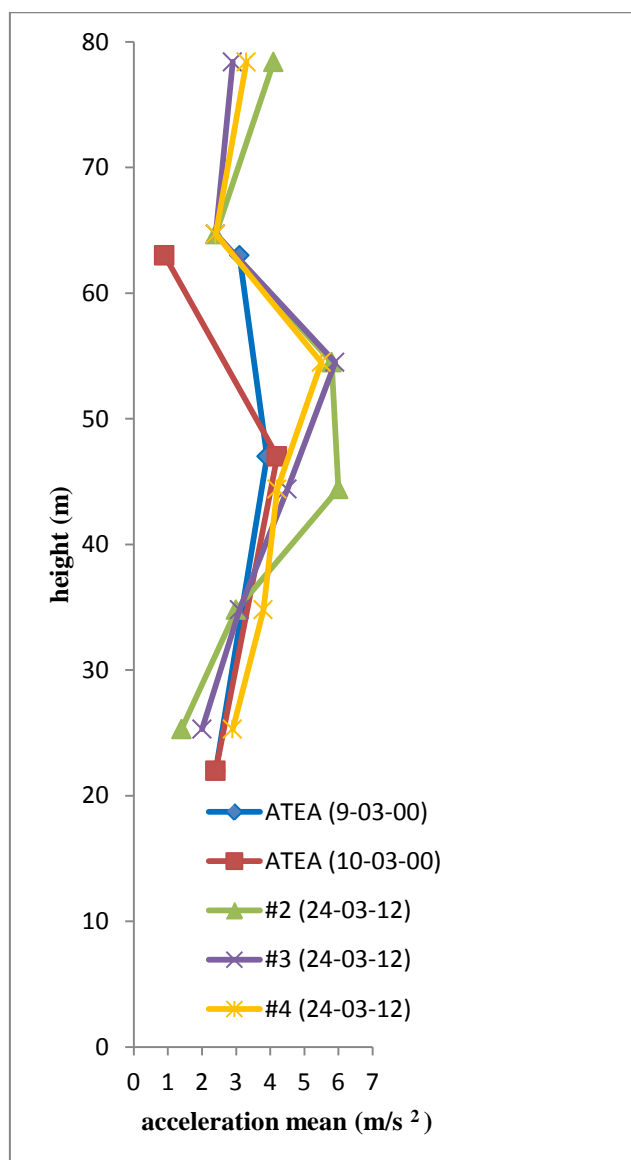
επιταχύνσεις για τις 6 διατομές της κατασκευής που εξετάζονται. Για τα σημεία που αντιστοιχούν σε παραπλήσιες τιμές ύψους ανάμεσα στην ΑΤΕΑ και το ΕΜΠ υπολογίζεται η διαφορά της επιτάχυνσης. Όπως είναι εμφανές, οι διαφορές των μέσων επιταχύνσεων μεταξύ των δύο σειρών μετρήσεων κυμαίνονται από 0.3-0.7 m/s² κατά απόλυτη τιμή. Επομένως, παρατηρείται κάποια αλλαγή στη συμπεριφορά της κατασκευής από την περίοδο του 2000 έως την περίοδο του 2012. Η ερμηνεία του συγκεκριμένου φαινομένου αποτελεί αντικείμενο μελέτης άλλων επιστημονικών κλάδων (π.χ. πολιτικοί μηχανικοί κ.ά)

Επιπλέον, το διάγραμμα του Σχήματος 6.8 απεικονίζει τις μέσες τιμές επιτάχυνσης καθ' ύψος της καμινάδας για τις μετρήσεις της ΑΤΕΑ (9-03-2000, 10-03-2000) και του ΕΜΠ (#2,#3,#4). Παρά τις διαφορές στις απόλυτες τιμές των μέσων επιταχύνσεων, στο διάγραμμα διακρίνεται παρόμοια τάση στη μεταβολή της μέσης επιτάχυνσης για όλες τις σειρές μετρήσεων. Επιπλέον, παρατηρείται ότι υπάρχει συμβατότητα μεταξύ των σειρών μετρήσεων του ΕΜΠ σε όλα τα ύψη, ενώ μεταξύ των σειρών μετρήσεων της ΑΤΕΑ διαπιστώνεται έντονη μεταβολή της επιτάχυνσης στο ύψος των 62.0 m. Όπως είναι εμφανές, δημιουργείται καμπύλη στο ύψος των 62.0 m. Το γεγονός αυτό, ίσως οφείλεται σε επεμβάσεις που έχουν γίνει στο εσωτερικό της καπνοδόχου και έχουν μεταβάλει τη στατική της κατάσταση.

H (m)	$\bar{\alpha}_{\text{EMΠ}}$ (m/s ²)	$\bar{\alpha}_{\text{ATEA}}$ (m/s ²)	$\delta\bar{\alpha}$ (m/s ²)
22.0	-	2.4	0.3
25.3	2.1	-	
34.8	3.4	-	-
44.4	4.8	-	-0.7
47.0	-	4.1	
54.5	5.6	-	-
63.0	-	2.0	-0.4
64.7	2.4	-	
78.4	3.5	-	

Πίνακας 6.3: Οι μέσες επιταχύνσεις των σημείων που μετρήθηκαν από ΑΤΕΑ-ΕΜΠ και οι διαφορές τους

Table 6.3: The average accelerations of points measured from ΑΤΕΑ-NTUA and their differences



Σχήμα 6.8: Διάγραμμα μέσων τιμών επιτάχυνσης σε συνάρτηση με το ύψος της καπνοδόχου-μετρήσεις ATEA (9-03-2000, 10-03-2000) και ΕΜΠ (σειρές #2, #3, #4)
Figure 6.8: Diagram of acceleration mean in connection with the height of the stack-measurements ATEA (9-03-2000, 10-03-2000) and NTUA (series #2, #3, #4)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο 7 αναφέρονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρακολούθηση της παρακαμπτήριου καπνοδόχου του ΑΗΣ Λαυρίου με τη μέθοδο της μικροκυματικής συμβολομετρίας. Τα συμπεράσματα χωρίζονται στις δύο κατηγορίες:

- Σε αυτά που αφορούν τη δυναμική συμπεριφορά της κατασκευής
- Σε αυτά που αφορούν τη μέθοδο παρακολούθησης που χρησιμοποιήθηκε

7.2 Συμπεράσματα Σχετικά με τη Δυναμική Συμπεριφορά της Κατασκευής

Ένας από τους βασικούς στόχους της συγκεκριμένης μελέτης αποτελεί η εξαγωγή συμπερασμάτων για τη δυναμική συμπεριφορά της παρακαμπτήριου καπνοδόχου του ΑΗΣ Λαυρίου και τα οποία είναι:

- Όπως αναμένεται, τα κινηματικά χαρακτηριστικά της κατασκευής εμφανίζουν έντονα περιοδικό χαρακτήρα.
- Η κύρια συχνότητα ταλάντωσης της κατασκευής είναι $f=19.85$ Hz. Η συγκεκριμένη τιμή εμφανίζεται σε όλες τις ομάδες μετρήσεων και σε όλα τα ύψη της κατασκευής που εξετάστηκαν. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει την ακρίβεια της μεθόδου και συνοχή στη συμπεριφορά της κατασκευής. Η παρουσία κύριας συχνότητας, $f=19.85$ Hz, αποδίδεται στις συνθήκες φόρτισης της μονάδας.
- Η κύρια συχνότητα ταλάντωσης αντιστοιχεί σε περίοδο $T=0.05$ sec ($T = \frac{1}{f}$).
- Το εύρος ταλάντωσης της κατασκευής κυμαίνεται από 0.8 mm έως 2.0 mm όταν το φορτίο της μηχανής λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του (110 MW). Είναι αξιοσημείωτο ότι το εύρος της ταλάντωσης αυξάνεται καθ' ύψος της κατασκευής.
- Οι μέγιστες μετακινήσεις αυξάνονται βαθμιαία καθ' ύψος της κατασκευής, ξεκινώντας με 0.4 mm στο χαμηλότερο παρατηρούμενο σημείο (H=25.3 m) και φτάνοντας τα 6.0 mm στην κορυφή της καπνοδόχου (H=78.4 m).

- Κατά τη σύγκριση των αποτελεσμάτων από τις μετρήσεις της ΑΤΕΑ Environment και του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου προκύπτει ότι ορισμένες συχνότητες επιτάχυνσης εμφανίζονται ταυτόχρονα και στις δύο σειρές μετρήσεων (ΑΤΕΑ-ΕΜΠ). Οι βασικές κοινές συχνότητες επιτάχυνσης που εμφανίζονται στα συγκρίσιμα ύψη στην κατασκευή και σε όλες τις ομάδες μετρήσεων είναι αυτές των 11.4 Hz, 19.8 Hz και 50.0 Hz. Ωστόσο, υπάρχουν και διαφορετικές συχνότητες. Το γεγονός αυτό οφείλεται στις διαφορετικές μεθόδους μέτρησης και στην αλλαγή στην συμπεριφορά της κατασκευής.
- Οι διαφορές των μέσων επιταχύνσεων μεταξύ των δύο σειρών μετρήσεων (ΑΤΕΑ-ΕΜΠ) στα τρία ύψη που συγκρίνονται είναι 0.3 m/s^2 , -0.7 m/s^2 , -0.4 m/s^2 . Επομένως, παρατηρείται αλλαγή στη συμπεριφορά της κατασκευής από την περίοδο του 2000 έως της περίοδο του 2012 η οποία μπορεί να ερμηνευθεί από άλλους επιστημονικούς κλάδους.

7.3 Συμπεράσματα Σχετικά με τη Μέθοδο Παρακολούθησης της Καπνοδόχου

Από την επεξεργασία και ανάλυση των μετρήσεων που ελήφθησαν στην καπνοδόχο κατά της διάρκεια του κύκλου λειτουργίας της μηχανής, σε ότι αφορά την αποτελεσματικότητα, ακρίβεια και αξιοπιστία της μεθόδου παρακολούθησης με το επίγειο σύστημα radar μικροκυματικής συμβολομετρίας προκύπτει ότι:

- Το IBIS-S είναι εν γένει εύχρηστο. Ωστόσο, η φύση των μετρήσεων και οι ιδιαιτερότητες που απορρέουν από την επεξεργασία των μετρήσεων προϋποθέτουν εκτεταμένη εκπαίδευση τόσο στις εργασίες πεδίου όσο και γραφείου.
- Το βασικό του πλεονέκτημα είναι ότι δεν απαιτείται η τοποθέτηση στόχου στην παρατηρούμενη κατασκευή.
- Μπορεί να μετρήσει τη δυναμική απόκριση πολλών σημείων της κατασκευής ταυτόχρονα. Ωστόσο, μόνο σε μια τομή.
- Μπορεί να παρακολουθεί την ταλάντωση μιας κατασκευής εξ αποστάσεως, χωρίς να χρειάζεται πρόσβαση σε αυτή.
- Ουσιώδες χαρακτηριστικό είναι η υψηλή ανάλυση απόστασης που φτάνει τα 0.75 m για οποιαδήποτε απόσταση παρατήρησης που βρίσκεται εντός των

ορίων λειτουργίας του αισθητήρα. Αυτό είναι πολύ σημαντικό καθώς επιτρέπει την λήψη υψηλής ακρίβειας μετρήσεων μετατόπισης σε μικρές και μεγάλες αποστάσεις λειτουργίας.

- Μπορεί να επεξεργαστεί τα δεδομένα που λαμβάνει και να εμφανίσει τη μετακίνηση ενός σημείου της κατασκευής που θα επιλεγεί σε πραγματικό χρόνο. Έτσι, επιτρέπει στο χρήστη να έχει μία εικόνα των μετακινήσεων απευθείας στο πεδίο.
- Η επίδραση των ατμοσφαιρικών συνθηκών στις μετρήσεις είναι ελάχιστη, εξαιτίας της δυναμικής φύσης των παρατηρήσεων.
- Η ακρίβεια προσδιορισμού των μετακινήσεων είναι μικρότερη από 0.1 mm, δηλαδή υψηλότερη σε σχέση με το παρατηρούμενο φαινόμενο (μετατοπίσεις της τάξης των 0.4 mm-6 mm).
- Η συχνότητα δειγματοληψίας της μεθόδου φτάνει 200 Hz και είναι υψηλότερη τόσο από την κύρια (19.85 Hz) όσο και από τις δευτερεύουσες συχνότητες ταλάντωσης της κατασκευής. Επομένως, ισχύει το θεώρημα του Nyquist.

Πέρα από τα θετικά αποτελέσματα πρέπει να αναφερθούν και ορισμένοι περιορισμοί που εμφανίζονται κατά τη χρήση του radar στην παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς των κατασκευών:

- Η απόδοση της μεθόδου εξαρτάται από την ανακλαστικότητα των σημείων από τα οποία αποτελείται η κατασκευή παρακολούθησης. Αν το υλικό της είναι τέτοιο που δεν επιτρέπει την καλή επιστροφή των εκπεμπόμενων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, πρέπει να εγκατασταθούν ανακλαστήρες επάνω στην κατασκευή. Στο πείραμα που πραγματοποιήθηκε, υπήρχαν αρκετά σημεία με καλή ανακλαστικότητα καθώς η καπνοδόχος είναι κατασκευασμένη από χάλυβα.
- Ως αποτέλεσμα των μονοδιάστατων δυνατοτήτων απεικόνισης του αισθητήρα του radar, πολλές φορές εμφανίζονται σφάλματα στις μετρήσεις, όταν διαφορετικά σημεία μιας κατασκευής βρίσκονται στην ίδια απόσταση από το radar.
- Το radar παρέχει τη μέτρηση της μεταβολής της θέσης του στόχου κατά μήκος της διεύθυνσης σκόπευσης (δηλαδή την ακτινική μετατόπιση). Ως εκ τούτου,

η εκτίμηση της πραγματικής μετατόπισης απαιτεί την εκ των προτέρων γνώση της διεύθυνσης της κίνησης αλλά και τη γεωμετρία παρατήρησης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξενόγλωσση

1. Gikas V., Daskalakis S., 2011. *Radar-based measurements of the oscillation parameters of large civil engineering structures*, International symposium of deformation monitoring, Hong Kong, November 2-4
2. Gentile C., 2010. *Application of microwave remote sensing to dynamic testing of stay-cables*, Article, Politecnico di Milano, Department of Structural Engineering, Milan, Italy
3. Mayer L., Yanev B., Olson L.D., Smyth A., 2009. *Monitoring of the Manhattan bridge for vertical and torsional performance with GPS and interferometric radar systems*
4. Gentile C., Bernardini G., *Application of radar technology to deflection measurements and OMA of bridges*, 3rd International Operational Modal Analysis Conference, Politecnico di Milano, Ingegneria Dei Sistemi, Milan, Pisa, Italy
5. Pieraccini M., Fratini M., Dei D., Atzeni C., 2009. *Structural testing of Historical Heritage Site Towers by microwave remote sensing.*, Journal of cultural heritage, Department of Electronics and Telecommunications, University of Florence, Florence, Italy
6. Gentile C., 2009. *Radar-based measurement of deflections on bridges and large structures: advantages, limitations and possible applications*, Thematic conference of smart structures and materials, Politecnico di Milano, Department of Structural Engineering, Milan, Italy
7. IDS Ingegneria Dei Sistemi, 2007. *IBIS-S: Bridge dynamic monitoring*, Case study, Pisa, Italy

8. IDS Ingegneria Dei Sistemi. *IBIS-S: Preventing structural failures utilizing microwave interferometry*, GeoRadar Division, Pisa, Italy
9. IDS Ingegneria Dei Sistemi. *IBIS-L: Preventing natural and manmade disasters utilizing microwave interferometry*, GeoRadar Division, Pisa, Italy
10. IDS Ingegneria Dei Sistemi, 2008. *IBIS-S System-Image By Interferometric Survey*, IBIS-S user manual, Pisa, Italy, November 27
11. IDS Ingegneria Dei Sistemi, 2009. *IBIS-S Image By Interferometric Survey Controller software*, IBIS-S controller v 02.01.005 user manual, Pisa, Italy, March 24
12. IDS Ingegneria Dei Sistemi, 2008. *Chimney dynamic test*, Case study, GeoRadar Division, Pisa, Italy
13. Pytharouli S., Kontogianni V., Psimoulis P., Stiros S., 2004. *Spectral analysis techniques in deformation analysis studies*, INGEO and FIG Regional Center and Eastern European Conference on Engineering Surveying, Bratislava, Slovakia, November 11-13
14. Roberts G., Baddley M., 2007. *Deformation monitoring trials using a Leica HDS3000*, Strategic Integration of Surveying Services, FIG working we
15. Brian D. Storey. *Computing Fourier Series and Power Spectrum with MATLAB*
16. ATEA Environment 2000. *Lavrion by pass stack measurements*, March 9-10

Ελληνική

1. Παραδείσης Δ., 2000. *Σημειώσεις Δορυφορικής Γεωδαισίας*, Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Αθήνα
2. Φωτίου Α., Πικρίδας Χ. 2006. *GPS και Γεωδαιτικές Εφαρμογές*
3. Μαρκέτου Ε. Γ., 1998. *Τεχνική Μηχανική-Αντοχή των Υλικών*, Τόμος ΙΙ, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα
4. Terzaghi K., Peck R. B., *Εφηρμοσμένη Εδαφομηχανική*, Τόμος ΙΙ, Εκδόσεις Γκιούρδας, Μετάφραση: Νικολαΐδης Αθανάσιος, Αθήνα 1969
5. Σακελλαρίου Μ., 2008. *Γεωτεχνική Μηχανική*, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Αθήνα
6. Στρατάκος Ι., Γκίκας Β., Σακελλαρίου Μ., Δασκαλάκης Σ., 2008. *Ενόργανη παρακολούθηση δυναμικής ταλάντωσης με τεχνικές πειραματικής μηχανικής και γεωδαιτικές μεθόδους*, 3^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας, Αθήνα, 5-7 Νοεμβρίου, Άρθρο 1875
7. Δασκαλάκης Σ., Γκίκας Β., 2008. *Παρακολούθηση και ανάλυση δυναμικής συμπεριφοράς μεταλλικών κατασκευών με χρήση γεωδαιτικής μεθοδολογίας*, 6ο Εθνικό Συνέδριο Μεταλλικών Κατασκευών, Ιωάννινα, Οκτώβριος 2-4
8. Σκόρδας Α., Αναστασόπουλος Β., *Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνων και Σημάτων*
9. Κοκκίνου Ε., 2007. *Καταγραφή ταλαντώσεων σιδηροδρομικής γέφυρας Γοργοποτάμου με ρομποτικό θεοδόλιχο (RTS)*, Διατριβή μεταπτυχιακού, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πάτρας, Πάτρα
10. Μαριτσούδης Δ., 2008. *Παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς της υψηλής καπνοδόχου του ΑΗΣ Λαυρίου της ΔΕΗ Α.Ε.*, Διπλωματική εργασία, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, Αθήνα

11. Μπακογιάννης Ν., 2010. *Μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς ανεμογεννητριών (Α/Γ) μέσω της συνδυασμένης καταγραφής και επεξεργασίας δεδομένων από ρομποτικό γεωδαιτικό σταθμό, 3Δ επίγειο σαρωτή LASER και σύστημα βιντεομετρίας*, Διπλωματική εργασία, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, Αθήνα
12. Νησωτάκης Γ., 2007. *Διερεύνηση λειτουργίας του γεωδαιτικού σταθμού Leica TCS-1800 για την παρακολούθηση κατασκευών σε συνθήκες ταλάντωσης με χρήση σεισμικής τράπεζας ακριβείας και μεθόδων φασματικής ανάλυσης*, Διπλωματική εργασία, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, Αθήνα
13. Σπυράκης Β., 2011. *Παρακολούθηση ταλαντώσεων τεχνικών έργων με χρήση συγχρονισμένων ρομποτικών γεωδαιτικών σταθμών: Εφαρμογή στην υψηλή γέφυρα του Ευρίπου*, Διπλωματική Εργασία, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, Αθήνα
14. Ψιμούλης Π., 2009. *Τεκμηρίωση δυνατότητας μετρήσεων ταλαντώσεων δύσκαμπτων κατασκευών με GPS και ρομποτικό θεοδόλιχο (RTS): Πειραματική, αναλυτική προσέγγιση και εφαρμογές*, Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πάτρας, Πάτρα
15. Κουκουβίνης Φ. Χ., 2008. *Μοντελοποίηση μονάδων ηλεκτροπαραγωγής για τον υπολογισμό της αύξησης του βαθμού απόδοσης από στοχοθετημένες δράσεις*, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα, σελ. 97
16. Παπαγεωργίου Π., 2008. *Αξιολόγηση των περιβαλλοντικών πτυχών και επιπτώσεων του Ατμοηλεκτρικού Σταθμού Λαυρίου*, Διπλωματική εργασία, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Αθήνα
17. Ανδρέου Π., 2011. *Συμπεριφορά, ανάλυση και διαστασιολόγηση μεταλλικών καπνοδόχων*, Μεταπτυχιακή εργασία, Διεπιστημονικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών (ADERS), Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα

18. Αργυριάδης Χ., Μπονατάκη Ε., 2006. *Ένταξη μονάδων φυσικού αερίου στο ελληνικό σύστημα ηλεκτροπαραγωγής: Αναδρομή-Τεχνολογίες*, 1^η διεθνής έκθεση ενέργειας, ΔΜΚΘ/ΔΕΗ Α.Ε., Νοέμβριος 23-25
19. Βαλάκας Ι., 2009. *Ψηφιακή επεξεργασία σήματος*, Διδακτορική διατριβή, κεφ. 3
20. Βεσκούκης Β., Παραδείσης Δ., Αργιαλάς Δ., Δεληκαράογλου Δ., Καραθανάση Β., Μασσίνας Β., 2005. *Στοιχεία επεξεργασίας σημάτων*, Διαλέξεις μαθήματος, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, Αθήνα
21. Λεκίδης Β., Καρακώστας Χ., Πανέτσος Π., Διαμαντουλάκη Ι., 2009. *Ενόργανη παρακολούθηση δομικής κατάστασης σημαντικών έργων με σκοπό την πληρέστερη συντήρησή τους*, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος, Τμήμα Κεντρικής Μακεδονίας, Θεσσαλονίκη
22. Χαλιμούρδας Σ., 2007. *Παρακολούθηση παραμορφώσεων και γεωμετρικής ποιότητας τεχνικών έργων με σύγχρονες γεωδαιτικές μεθόδους*, Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη
23. Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ), 2003. *Ενεργειακό Κέντρο Ηλεκτροπαραγωγής Λαυρίου*

Διαδίκτυο

1. www.wikipedia.org
2. www.idsgeoradar.com
3. www.imetrum.com

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

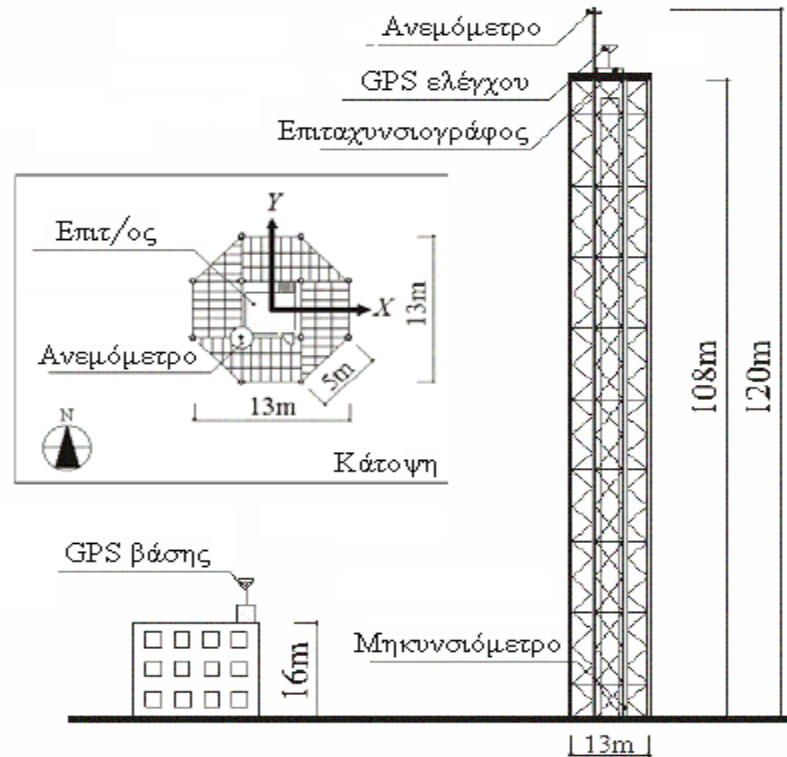
A. Παραδείγματα Δυναμικής Παρακολούθησης Τεχνικών Έργων

Στο παράρτημα A θα παρουσιαστούν παραδείγματα από τη διεθνή βιβλιογραφία που αφορούν την ενόργανη παρακολούθηση των τεχνικών έργων.

A.1 Μελέτη μετακινήσεων του τηλεπικοινωνιακού πύργου του Τόκιο με τη χρήση GPS και επιταχυνσιόμετρου

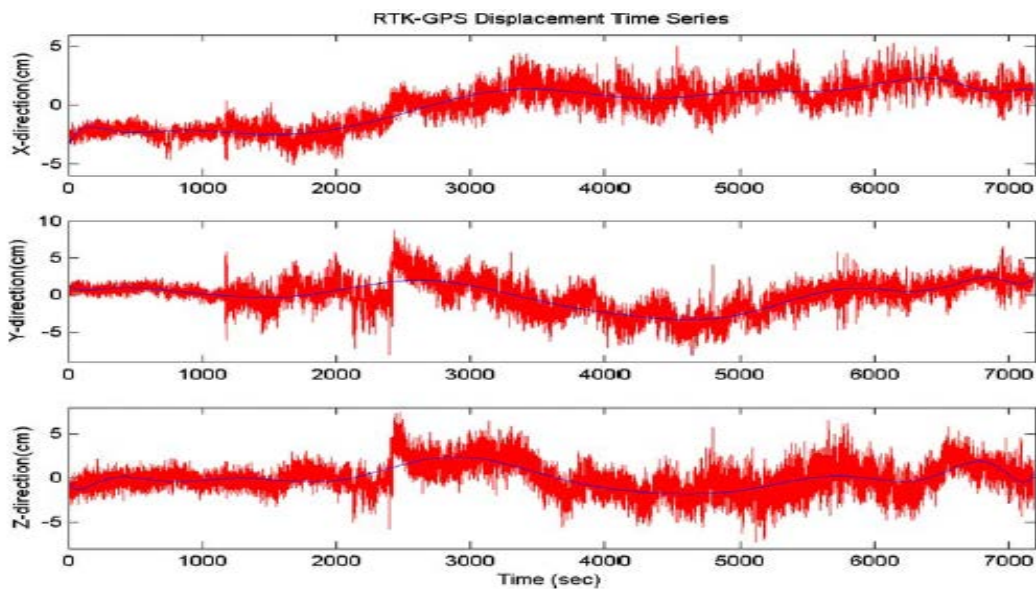
Τα τελευταία χρόνια, το GPS προτιμάται συχνά στη μέτρηση μετακινήσεων κατασκευών εξαιτίας της βελτίωσης της τεχνολογίας του GPS (αύξηση της συχνότητας καταγραφής, κ.ά). Η μετακίνηση τηλεπικοινωνιακού πύργου του Τόκιο, ύψους 108m, έχει μελετηθεί με GPS σε διεγέρσεις ανέμου και σεισμού. Για τις ανάγκες του πειράματος τοποθετήθηκαν GPS, ανεμόμετρο και επιταχυνσιόμετρο στην κορυφή του πύργου ενώ τοποθετήθηκε ένα δεύτερο GPS βάσης σε γειτονικό (~110m απόσταση) σταθερό σημείο. Αναλύθηκαν οι μετρήσεις των οργάνων για τις διεγέρσεις: του τυφώνα Νο.21 και ενός σεισμού (Ms 7). Από την ανάλυση των καταγραφών παρατηρήθηκε ότι :

- οι ημιστατικές μετακινήσεις κατά την διάρκεια του τυφώνα ήταν ~4-5cm
- οι συχνότητες της φασματικής ανάλυσης των μετρήσεων GPS (0.5-0.6 Hz και 2.16 Hz) συμφωνούν με αυτές του επιταχυνσιογράφου
- Εμφανίστηκαν συχνότητες 0-0,2Hz που οφείλονται σε θόρυβο των καταγραφών λόγω πολυανάκλασης και σε υπολογιστικά σφάλματα



Σχήμα A1.1: Σχεδιάγραμμα πύργου του Τόκιου όπου υποδεικνύονται οι θέσεις που τοποθετήθηκαν τα όργανα καταγραφής (GPS, επιταχυνσιογράφος, ανεμόμετρο)

Figure A1.1: Figure Tokyo Tower which indicates the positions placed the instruments for recording (GPS, accelerometer, anemometer)
(πηγή: Τροποποιημένο από Li et al., 2004)



Σχήμα A1.2: Διαγράμματα καταγραφών GPS της κίνησης της κορυφής του πύργου του Τόκιου κατά την διάρκεια του τυφώνα

Figure A1.2: GPS charts recording the movement of the top of Tokyo Tower during typhoon
(πηγή: Τροποποιημένο από Li et al., 2004)

A.2 Παρακολούθηση ταλαντώσεων της γέφυρας του Ευρίπου με τη χρήση GPS

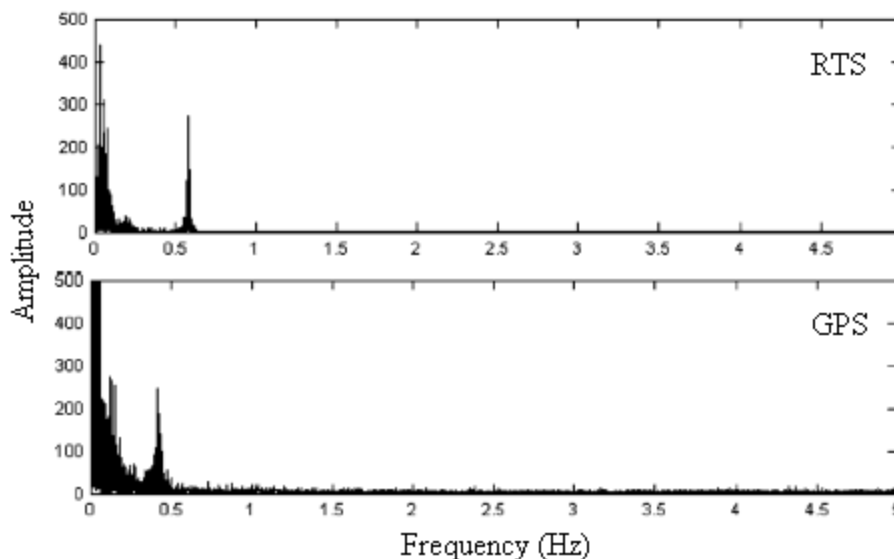
Η Γέφυρα του Ευρίπου είναι καλωδιωτή γέφυρα συνολικού μήκους 395m στην οποία υπάρχει μόνιμο δίκτυο 43 επιταχυνσιογράφων των οποίων οι καταγραφές συγχρονίζονται με χρήση GPS. Για την καταγραφή των μετακινήσεων λόγω κυκλοφοριακού φόρτου τοποθετήθηκαν ένας δέκτης GPS και ένας ανακλαστήρας στο μέσο του κεντρικού ανοίγματος, ενώ παραπλεύρως τοποθετήθηκαν ένα δεύτερο GPS (βάση) και ένα RTS τύπου LEICA TCA 1800.



Σχήμα A2.1: Γέφυρα Ευρίπου, όπου στο μέσο του κεντρικού ανοίγματος τοποθετήθηκαν ένας δέκτης GPS και ένας ανακλαστήρας, για την καταγραφή των μετακινήσεων λόγω του κυκλοφοριακού φόρτου.

Figure A2.1: Euripus bright, where in the middle of the central span placed a GPS receiver and a reflector to record the movements due to congestion.

(πηγή: Τροποποιημένο από Lekidis et al., 2005)



Σχήμα A2.2: Φασματικές αναλύσεις FFT των κατακόρυφων μεταβολών θέσης ελέγχου της Γέφυρας του Ευρίπου με βάση RTS και GPS

Figure A2.2: FFT spectral analyzes of vertical changes in position control of the bridge of Euripus based GPS and RTS

(πηγή: Lekidis et al., 2005)

Από τις καταγραφές του RTS προέκυψαν μετρήσεις με ακρίβεια περίπου 5mm για τις οριζόντιες συντεταγμένες και 3mm για την κατακόρυφη. Με φασματική ανάλυση FFT προέκυψε κύρια συχνότητα στα 0.56Hz, καθώς και άλλες μη στατιστικά σημαντικές περίπου στα 0.35Hz. Από την αντίστοιχη ανάλυση FFT των καταγραφών του GPS προέκυψε κύρια συχνότητα στα 0.45Hz, ενώ από τις καταγραφές επιταχυνσιογράφων ~0.40Hz. Η διαφορά των εκτιμημένων συχνοτήτων οφείλεται πιθανότατα σε σφάλμα της περιόδου δειγματοληψίας

A.3 Παρακολούθηση δυναμικής συμπεριφοράς καπνοδόχου με χρήση του επίγειου συστήματος radar μικροκυματικής συμβολομετρίας (IBIS-S)

Προκειμένου να ελεγχθούν οι δυνατότητες του επίγειου συστήματος radar μικροκυματικής συμβολομετρίας (IBIS-S) στη δυναμική παρακολούθηση ψηλών και εύκαμπτων κατασκευών κατασκευών, πραγματοποιούνται μετρήσεις στην καπνοδόχο του Σχήματος A3.1, ύψους 183 m.



Σχήμα A3.1: Η παρακολούθηση της καπνοδόχου από το σύστημα IBIS-S
Figure A3.1: Monitoring of the stack by IBIS-S system
(πηγή: Ingegneria Dei Sistemi, 2008)

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του IBIS-S είναι η δυνατότητα παρακολούθησης μιας κατασκευής χωρίς να χρειάζεται πρόσβαση σε αυτή για να τοποθετηθούν

ανακλαστήρες η αισθητήρες. Κάθε ασυνέχεια της κατασκευής, όπως μια τραχιά επιφάνεια, αποτελεί πηγή ανάκλασης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που παράγονται από τον αισθητήρα και προσπίπτουν πάνω στην κατασκευή.

Η καλύτερη θέση εγκατάστασης του οργάνου είναι στη βάση της καμινάδας και σε απόσταση 50 m από αυτήν, έτσι ώστε η δέσμη της κεραίας του οργάνου να μπορεί να καλύψει ολόκληρο το ύψος της καμινάδας όπως φαίνεται στο Σχήμα A3.2. Συγκεκριμένα, από αυτή τη θέση το σύστημα IBIS-S παρακολουθεί την καπνοδόχο από το ύψος των 70 m έως την κορυφή της (183 m).

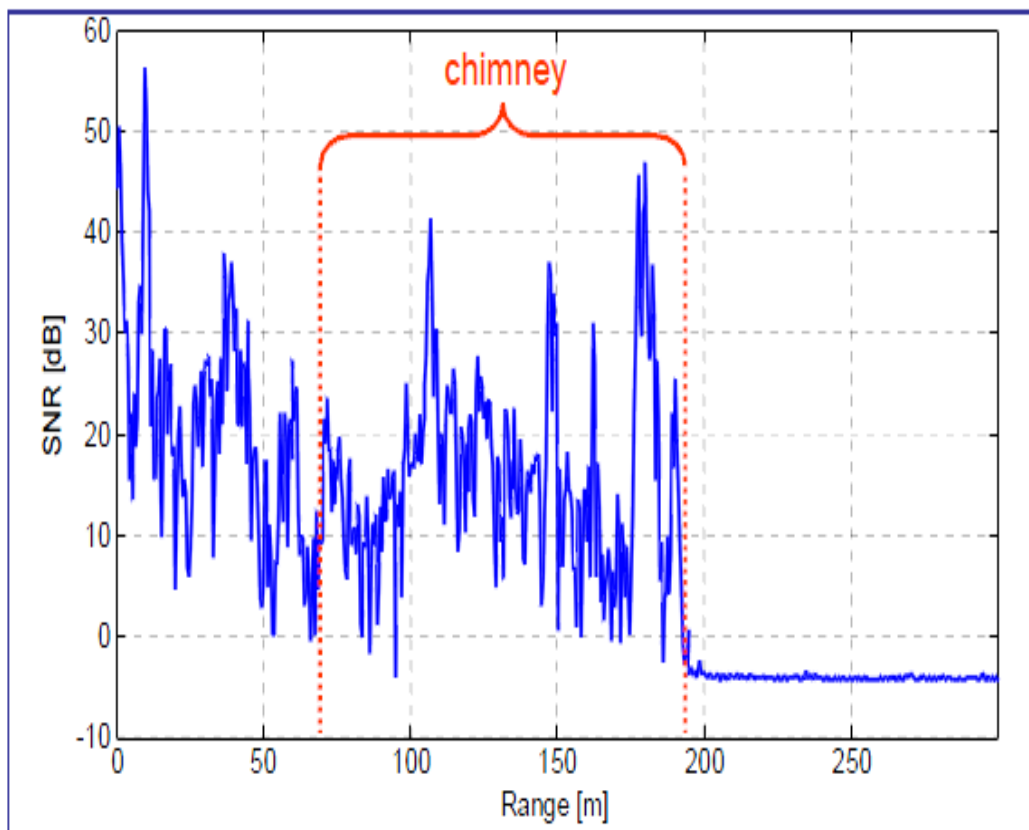


Σχήμα A3.2: Η περιοχή παρατήρησης της καπνοδόχου από το σύστημα IBIS-S
Figure A3.2: The area of observation of the stack by the IBIS-S system
(πηγή: Ingegneria Dei Sistemi, 2008)

Στο σύστημα ρυθμίζονται οι παρακάτω παράμετροι πριν ξεκινήσει η καταγραφή μετρήσεων:

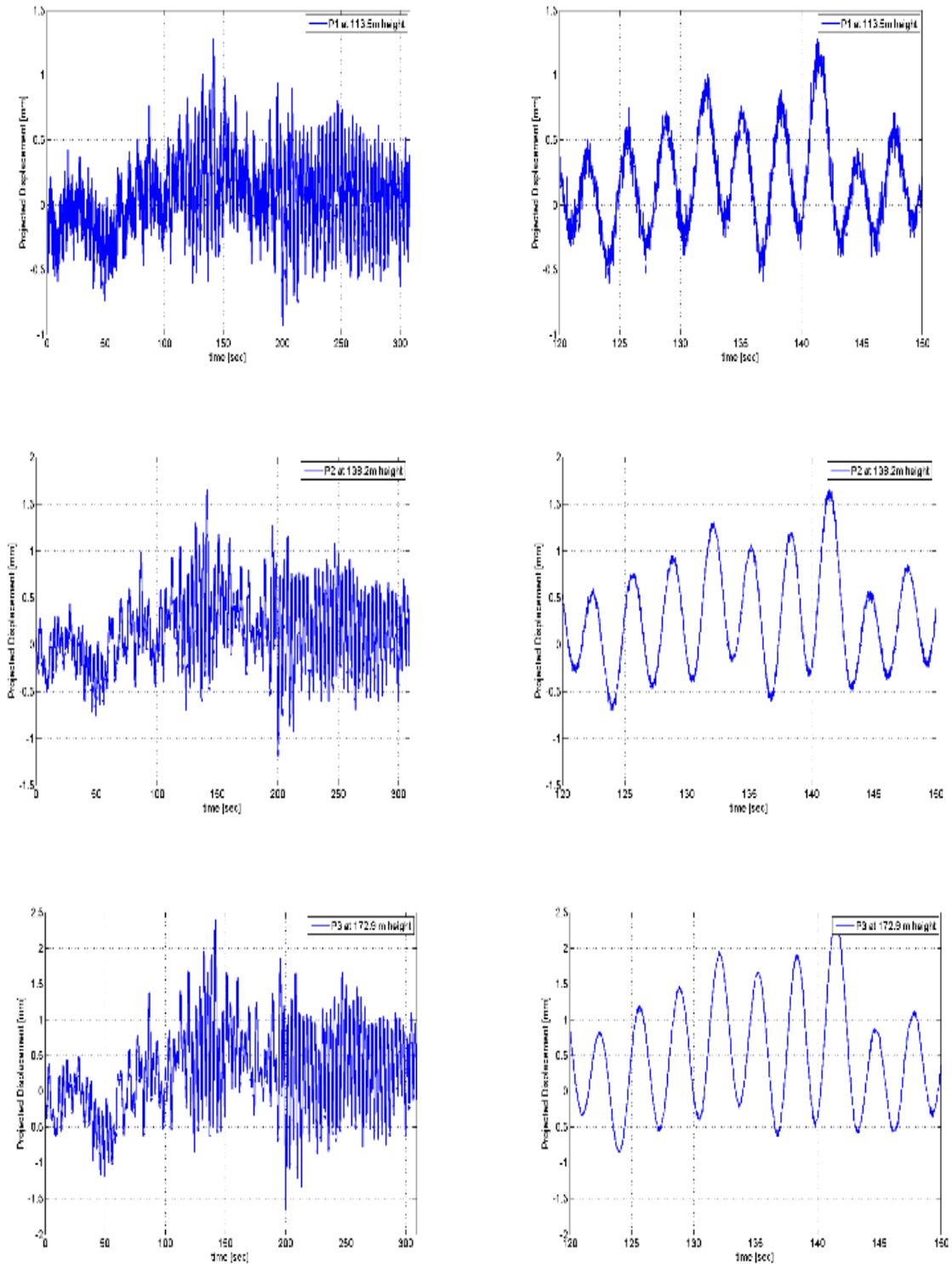
- Μέγιστη απόσταση: 300 m
- Συχνότητα δειγματοληψίας: 50 Hz
- Ανάλυση απόστασης: 0.75 m

Στο Σχήμα A3.3 παρουσιάζεται το διάγραμμα του θορύβου του σήματος των σημείων στα οποία προσπίπτει η ηλεκτρομαγνητική δέσμη που εκπέμπει η κεραία του radar στο ορατό τμήμα της καπνοδόχου σε συνάρτηση με την απόστασή τους από τη βάση της καπνοδόχου. Οι κορυφές που εμφανίζονται, αντιστοιχούν σε σημεία της καπνοδόχου με καλή ανακλαστικότητα για τα οποία θα πραγματοποιηθεί ανάλυση.



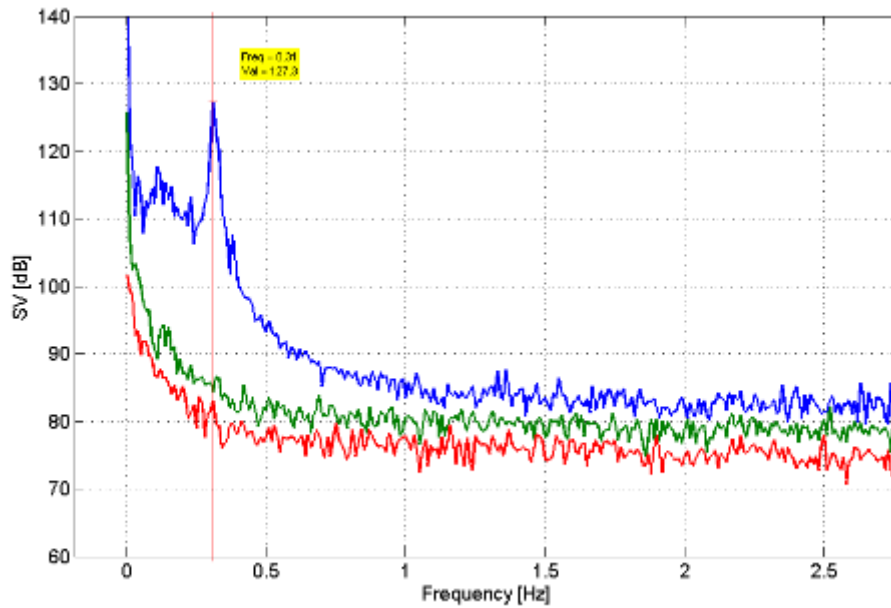
Σχήμα A3.3: Διάγραμμα του θορύβου του σήματος
Figure A3.3: Signal to noise ratio diagram
(πηγή: Ingegneria Dei Sistemi, 2008)

Στα διαγράμματα του Σχήματος A3.4 φαίνεται η μετατόπιση σε συνάρτηση με το χρόνο για τρία ύψη της κατασκευής ($H=113.5$ m, $H=138.5$ m, $H=172.9$ m) για ολόκληρη της διάρκειας μέτρησης (αριστερά) και για διάστημα 30 sec. Στα διαγράμματα είναι εμφανής η καλή ποιότητα του σήματος ακόμα και για μακρινές αποστάσεις.



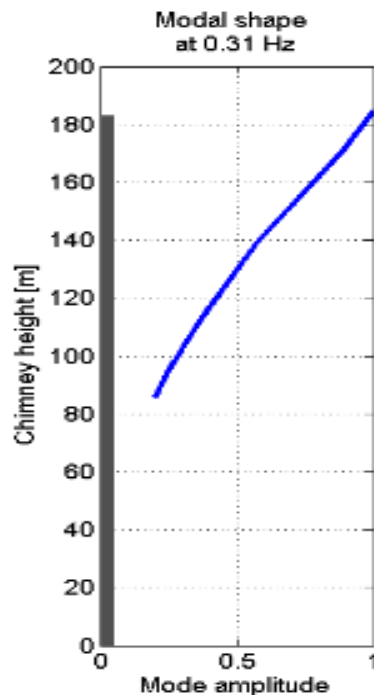
Σχήμα A3.4: Διαγράμματα μετατόπισης-χρόνου στα τρία ύψη της καπνοδόχου ($H=113.5$ m, $H=138.5$ m, $H=172.9$ m), για ολόκληρη τη διάρκεια μέτρησης (αριστερά) και για διάστημα 30 sec (δεξιά)
Figure A3.4: Diagram of displacement-time at three heights of the stack ($H=113.5$ m, $H=138.5$ m, $H=172.9$ m), for the entire duration of the measure and for a temporal zoom of 30 sec
(πηγή: Ingegneria Dei Sistemi, 2008)

Όσον αφορά το φάσμα των συχνοτήτων ταλάντωσης της κατασκευής φαίνεται στο Σχήμα A3.5. Η κύρια συχνότητα ταλάντωσης της κατασκευής είναι $f=0.31$ Hz.



Σχήμα A3.5: Ανάλυση συχνότητας με τη μέθοδο FDD
Figure A3.5: Frequency analysis using FDD method
(πηγή: Ingegneria Dei Sistemi, 2008)

Τέλος, στο Σχήμα A3.6 φαίνεται το modal shape για τη συχνότητα των 0.31 Hz. Ειδικότερα, το διάγραμμα αυτό δείχνει την μεταβολή του εύρους της ταλάντωσης καθ' ύψος της κατασκευής για συγκεκριμένη τιμή συχνότητας.



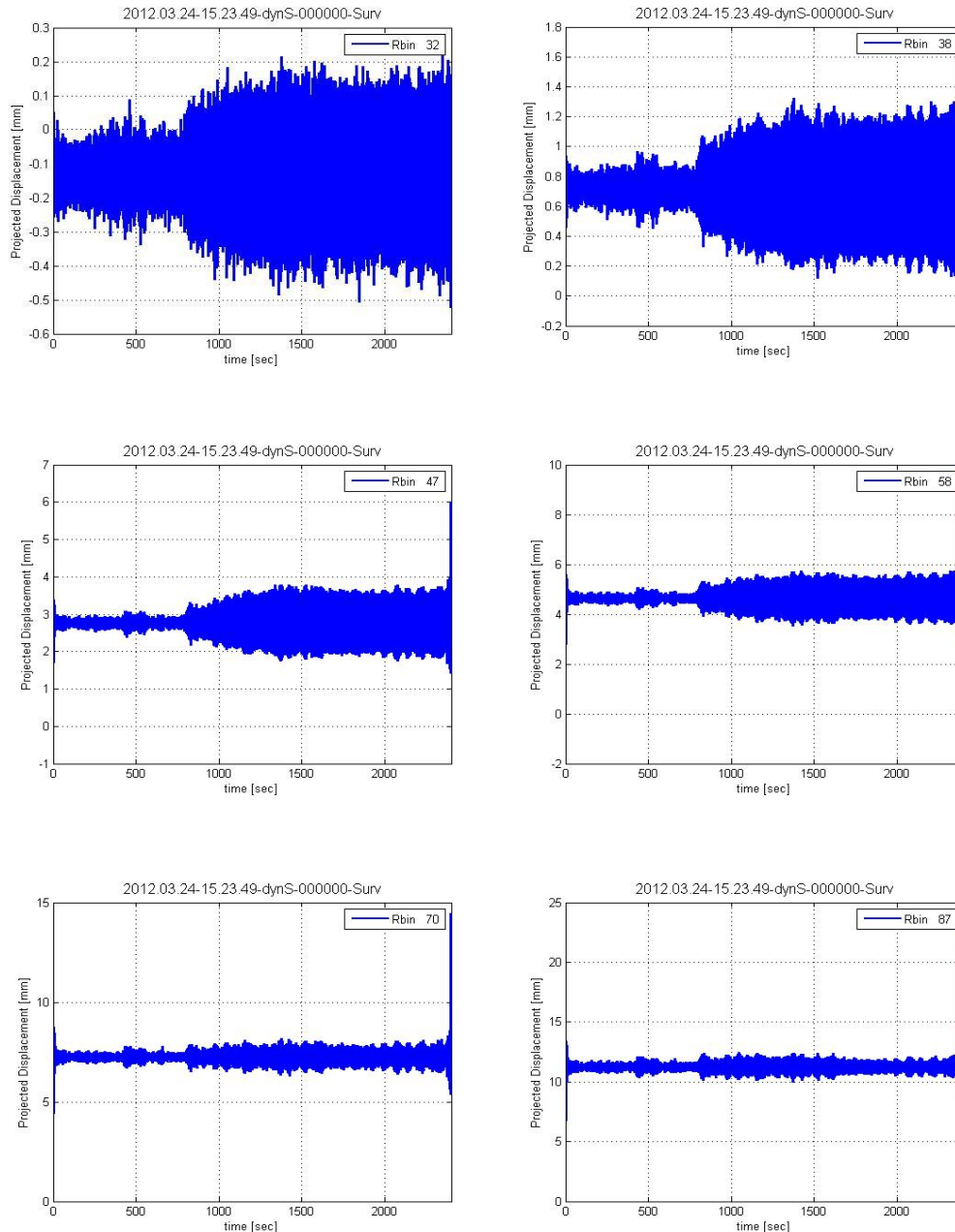
Σχήμα A3.6: Κατάσταση λειτουργίας στη συχνότητα των 0.31 Hz
Figure A3.6: Modal shape at 0.31 Hz frequency
(πηγή: Ingegneria Dei Sistemi, 2008)

Β. Αναλυτική Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

Στο παράρτημα Β θα παρουσιαστούν τα διαγράμματα μετατόπισης-χρόνου και μετατόπισης-συχνότητας που προέκυψαν από την επεξεργασία των μετρήσεων των πειραμάτων #1, #2, #4, #5.

Β1. Αποτελέσματα πειράματος #1

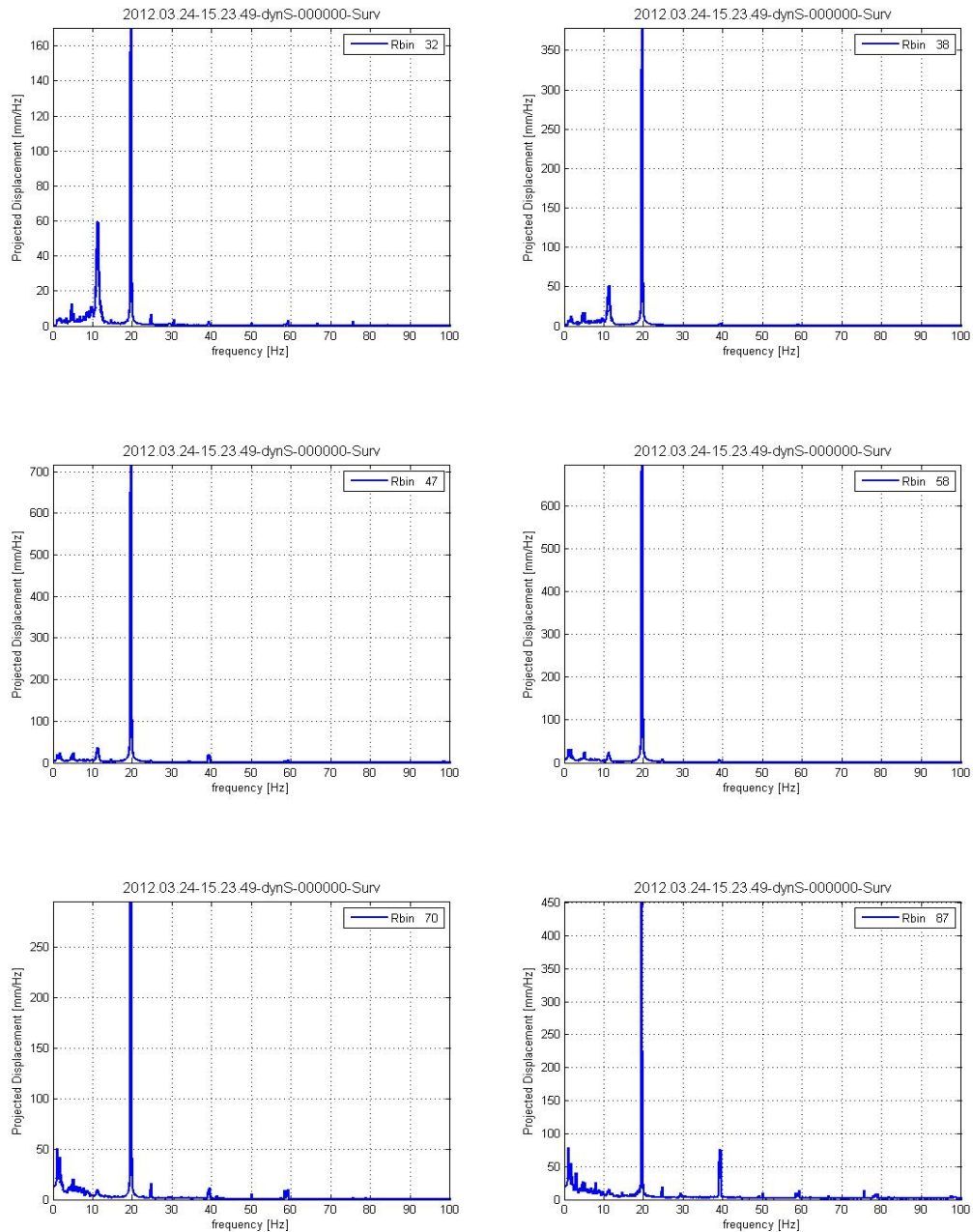
➤ Διαγράμματα μετατόπισης- χρόνου



Σχήμα Β1.1: Διάγραμμα μετατόπισης-χρόνου για 6 σημεία καθ' ύψος της καπνοδόχου (Range Bins 32, 38, 47, 58, 70, 87) για χρονικό διάστημα 40 min

Figure B1.1: Diagram of displacement-time for 6 points in height of stack (Range Bins 32, 38, 47, 58, 70, 87) for the time interval of 40 min

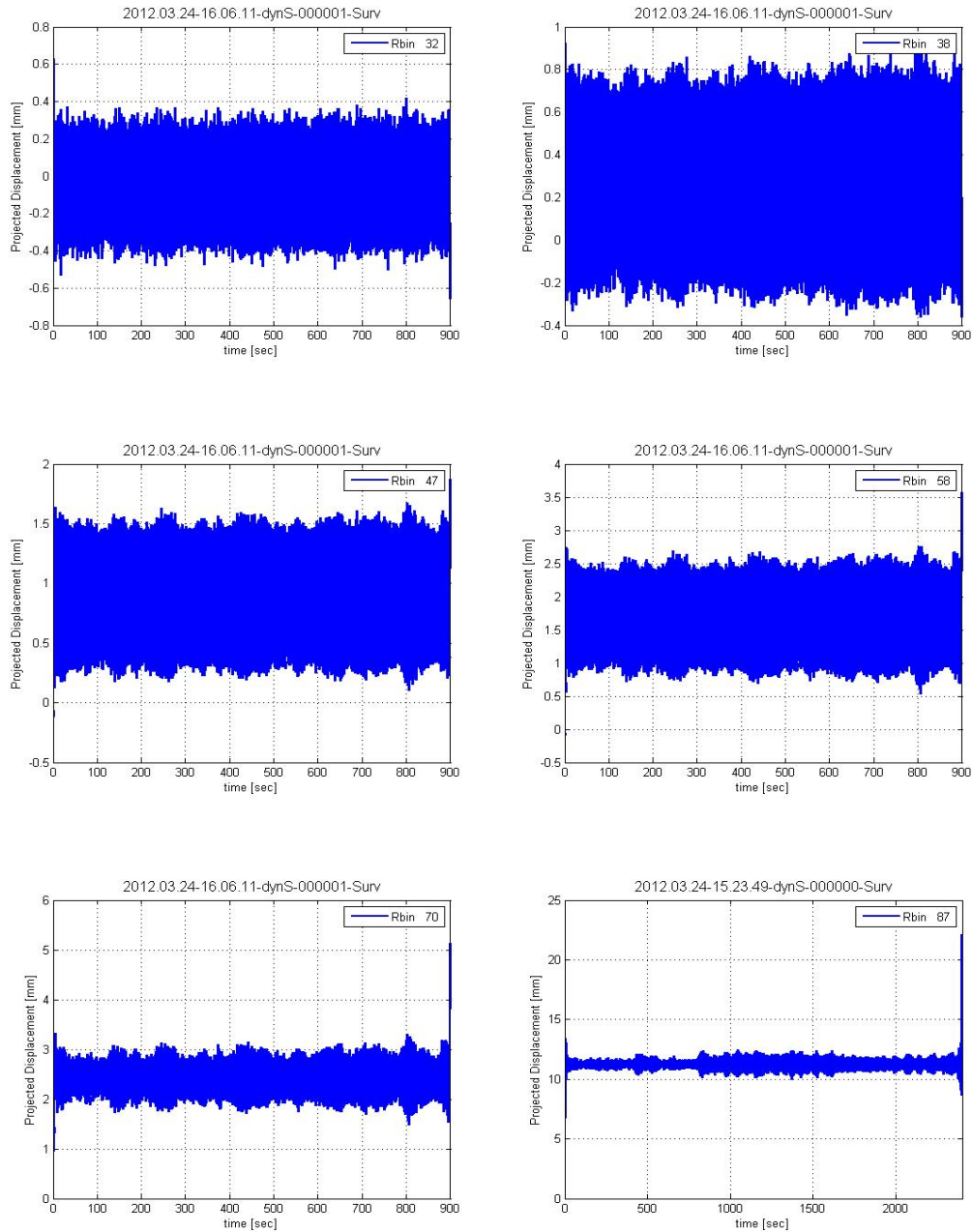
➤ **Διαγράμματα μετατόπισης-συχνότητας**



Σχήμα B1.2: Απόκριση συχνοτήτων μετατόπισης για 6 σημεία καθ' ύψος της καπνοδόχου (Range Bins 32, 38, 47, 58, 70, 87) για χρονικό διάστημα 40 min
Figure B1.2: Displacement frequency response for 6 points in height of stack (Range Bins 32, 38, 47, 58, 70, 87) for the time interval of 40 min

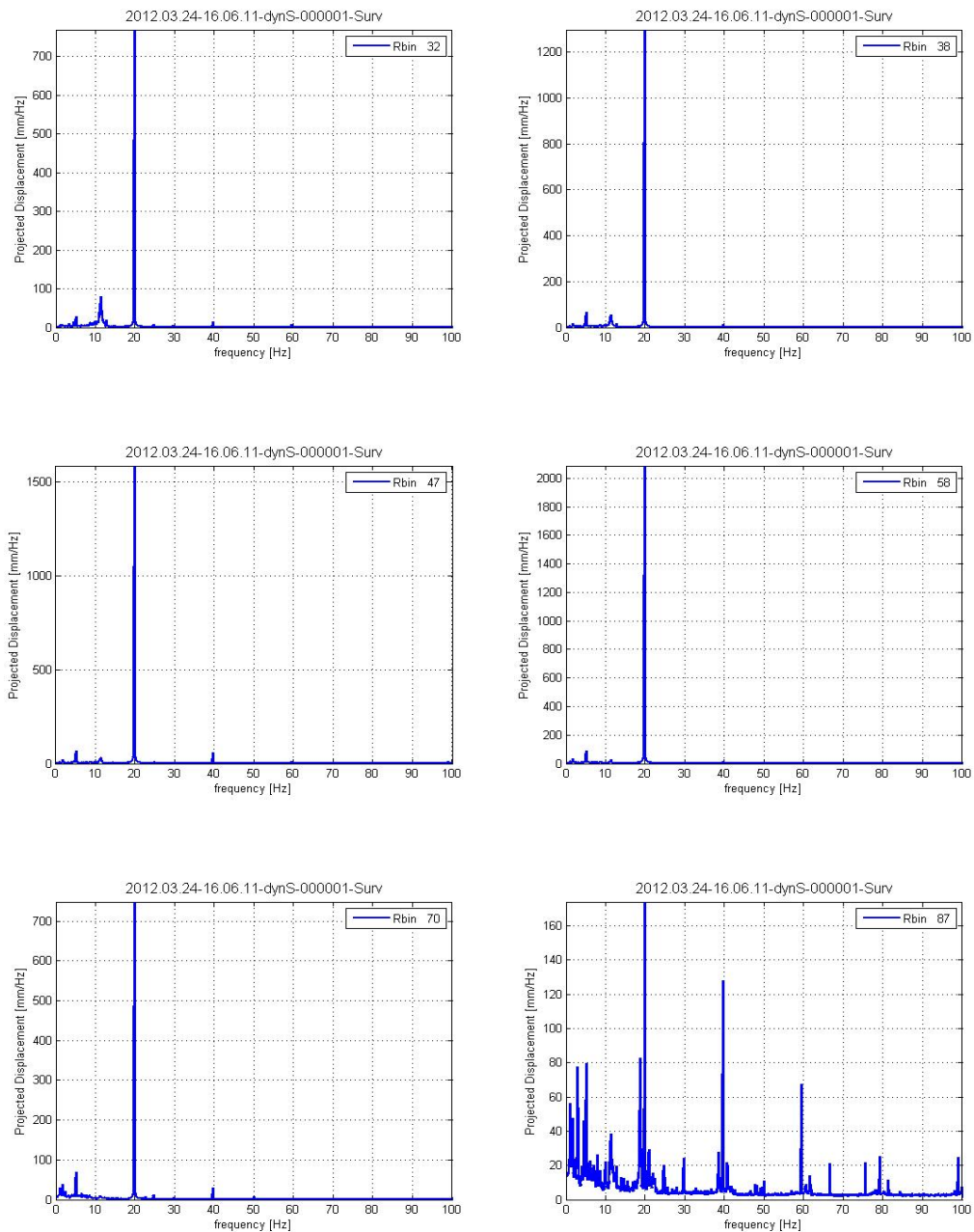
B2. Αποτελέσματα πειράματος #2

➤ Διαγράμματα μετατόπισης- χρόνου



Σχήμα B2.1: Διάγραμμα μετατόπισης-χρόνου για 6 σημεία καθ' ύψος της καπνοδόχου (Range Bins 32, 38, 47, 58, 70, 87) για χρονικό διάστημα 15 min
Figure B2.1: Diagram of displacement-time for 6 points in height of stack (Range Bins 32, 38, 47, 58, 70, 87) for the time interval of 15 min

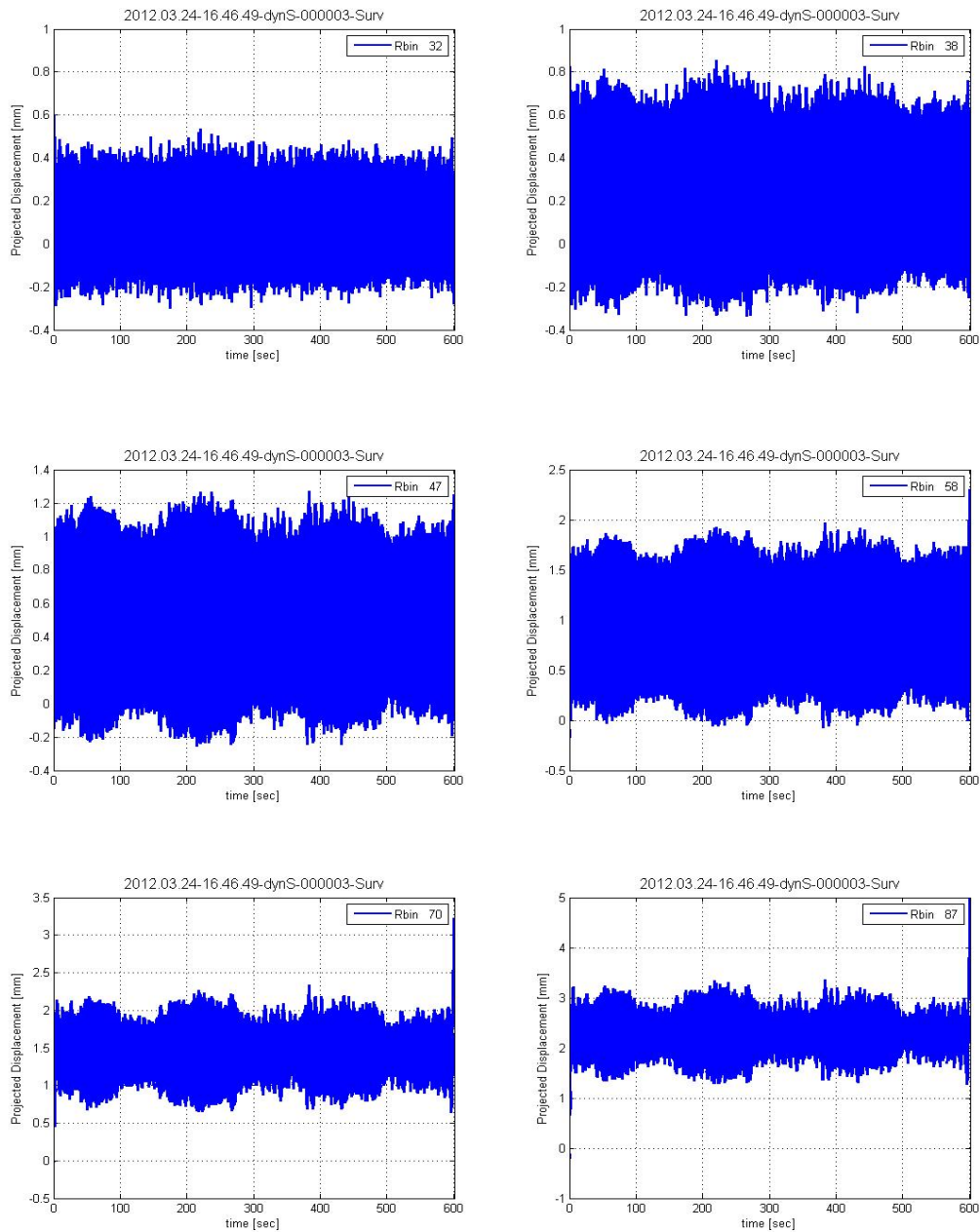
➤ **Διαγράμματα μετατόπισης- συχνότητας**



Σχήμα B2.2: Απόκριση συχνοτήτων μετατόπισης για 6 σημεία καθ' ύψος της καπνοδόχου (Range Bins 32, 38, 47, 58, 70, 87) για χρονικό διάστημα 15 min
Figure B2.2: Displacement frequency response for 6 points in height of stack (Range Bins 32, 38, 47, 58, 70, 87) for the time interval of 15 min

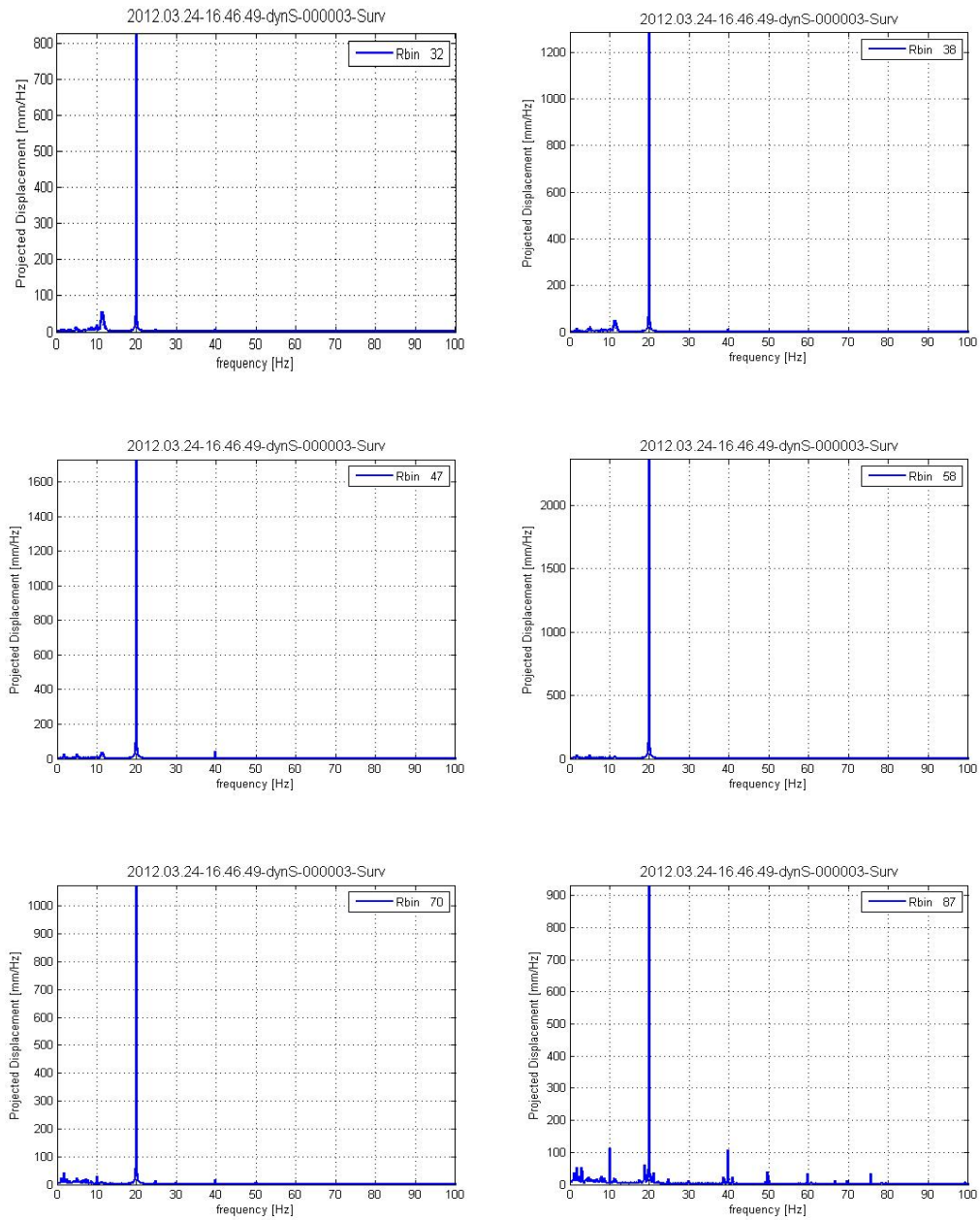
B3. Αποτελέσματα πειράματος #4

➤ Διαγράμματα μετατόπισης- χρόνου



Σχήμα B3.1: Διάγραμμα μετατόπισης-χρόνου για 6 σημεία καθ' ύψος της καπνοδόχου (Range Bins 32, 38, 47, 58, 70, 87) για χρονικό διάστημα 10 min
Figure B3.1: Diagram of displacement-time for 6 points in height of stack (Range Bins 32, 38, 47, 58, 70, 87) for the time interval of 10 min

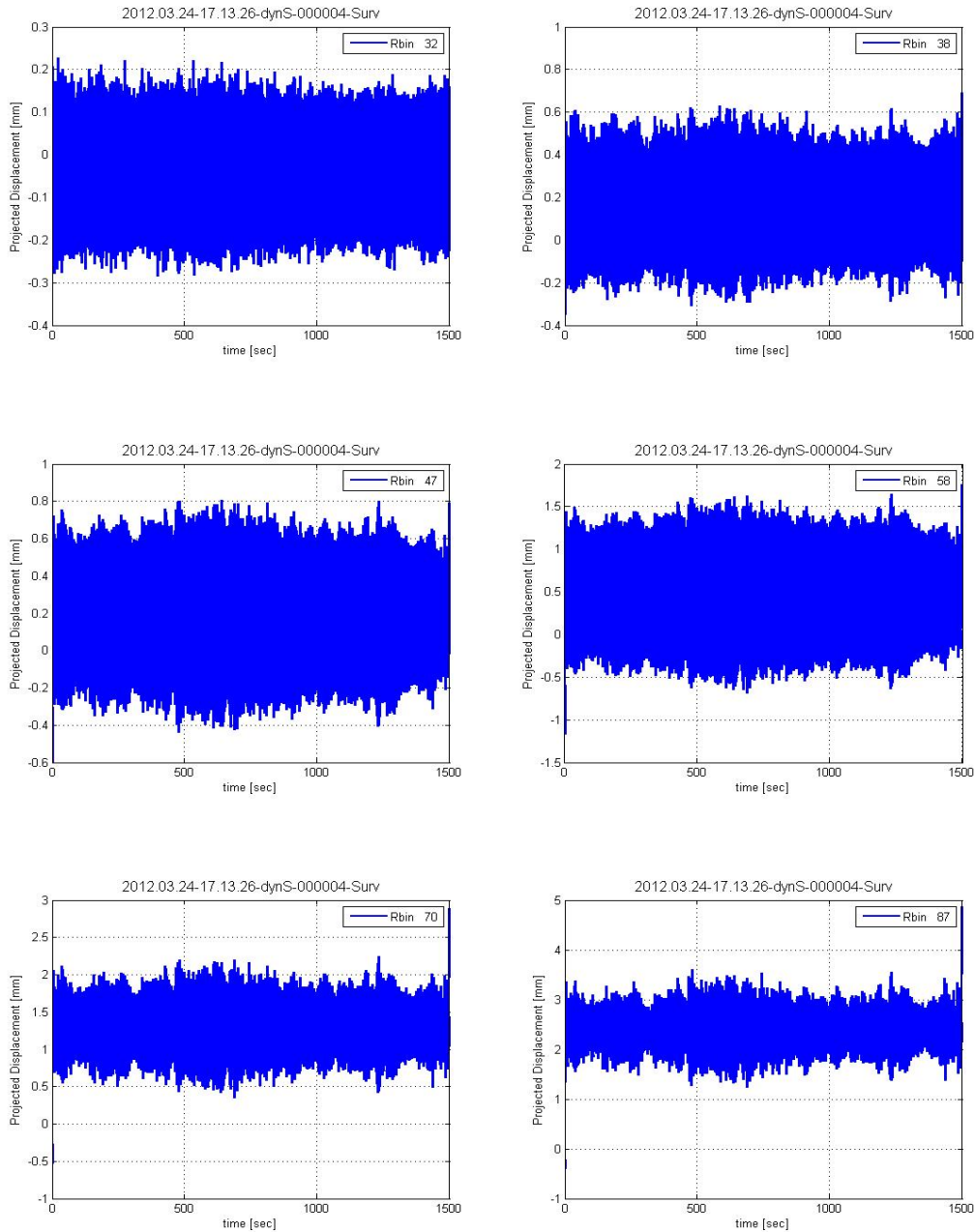
➤ **Διαγράμματα μετατόπισης- συχνότητας**



Σχήμα B3.2: Απόκριση συχνοτήτων μετατόπισης για 6 σημεία καθ' ύψος της καπνοδόχου (Range Bins 32, 38, 47, 58, 70, 87) για χρονικό διάστημα 10 min
Figure B3.2: Displacement frequency response for 6 points in height of stack (Range Bins 32, 38, 47, 58, 70, 87) for the time interval of 10 min

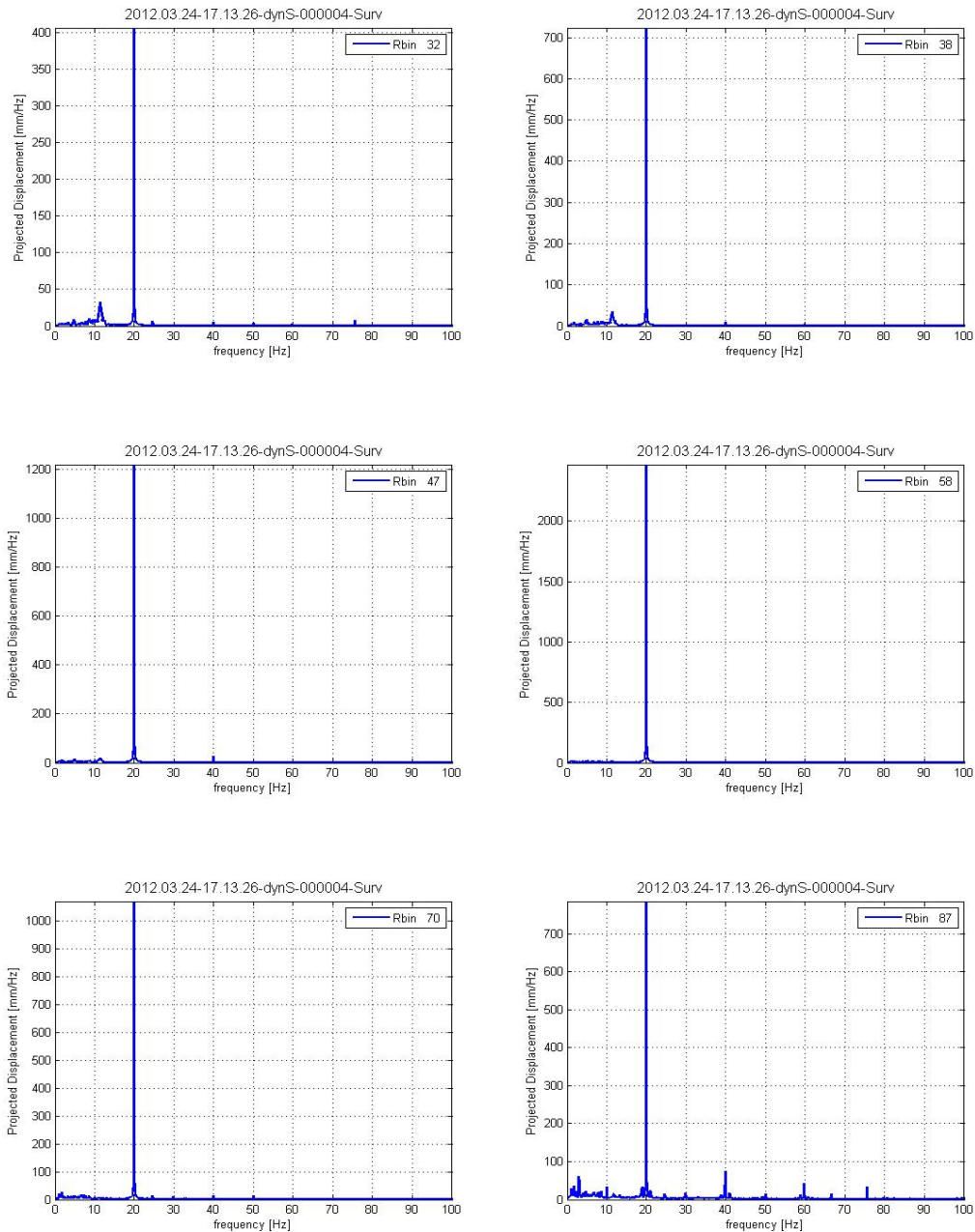
B4. Αποτελέσματα πειράματος #5

➤ Διαγράμματα μετατόπισης- χρόνου



Σχήμα B4.1: Διάγραμμα μετατόπισης-χρόνου για 6 σημεία καθ' ύψος της καπνοδόχου (Range Bins 32, 38, 47, 58, 70, 87) για χρονικό διάστημα 25 min
Figure B4.1: Diagram of displacement-time for 6 points in height of stack (Range Bins 32, 38, 47, 58, 70, 87) for the time interval of 25 min

➤ **Διαγράμματα μετατόπισης- συχνότητας**



Σχήμα B4.2: Απόκριση συχνοτήτων μετατόπισης για 6 σημεία καθ' ύψος της καπνοδόχου (Range Bins 32, 38, 47, 58, 70, 87) για χρονικό διάστημα 25 min

Figure B4.2: Displacement frequency response for 6 points in height of stack (Range Bins 32, 38, 47, 58, 70, 87) for the time interval of 25 min