



ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΚΛΙΣΙΜΕΤΡΩΝ
ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΣΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ ΥΨΗΛΩΝ
ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΕΝΑΝΤΙ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ

ΣΑΡΑΦΙΑΝ ΚΡΙΣΤΙΝΕ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:

Β. ΓΚΙΚΑΣ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2012



Ευχαριστίες

Για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας συνέβαλαν αρκετά άτομα, τα οποία θα ήθελα να ευχαριστήσω, το καθένα ξεχωριστά, για τη συνδρομή του.

Κατ' αρχήν θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κο. Γκίκα για την εμπιστοσύνη, τις συμβουλές και την καθοδήγησή του αφενός και τη συμμετοχή του στα πρακτικά ζητήματα αφετέρου.

Ευχαριστίες επίσης θα ήθελα να αποδώσω στον φίλο μου και συνεργάτη υποψήφιο διδάκτορα Γ. Πηνιώτη, για τις συμβουλές του, την καθοδήγηση και την προσωπική του ενασχόληση κατά τη διάρκεια της εργασίας, καθώς και στον υποψήφιο διδάκτορα Θ. Μπίμη για την συμβολή του στα πρακτικά ζητήματα και την προσωπική του ενασχόληση.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να αποδώσω στον ηλεκτρολόγο / ηλεκτρονικό - εναερίτη Α. Κουστούκη, για την βοήθειά του κατά την τοποθέτηση του εξοπλισμού στην κατασκευή.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους εκπροσώπους της ΔΕΗ για την παραχώρηση των εγκαταστάσεων και την διευκόλυνση που παρείχαν.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω ολόκληρη την οικογένειά μου, χωρίς τη συμβολή και αμέριστη συμπαράσταση των οποίων δεν θα είχε ολοκληρωθεί η εργασία.

Περιεχόμενα

Ευρετήριο Σχημάτων	v
Ευρετήριο Πινάκων	viii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	ix
ABSTRACT	x
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	1
1.1 Γενικά	1
1.2 Δυναμική συμπεριφορά υψηλών κατασκευών	2
1.3 Μελέτη της επίδρασης του ανέμου στις κατασκευές	3
1.3.1 Γενικά	3
1.3.2 Χαρακτηριστικά του ανέμου	3
1.3.3 Επίδραση του ανέμου στις κατασκευές	4
1.3.4 Σχεδιασμός έναντι ανέμου	8
1.4 Συστήματα παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας ('υγείας') των κατασκευών (Structural Health Monitoring, SHM)	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	13
2.1 Γενικά	13
2.2 Τοπογραφικές μέθοδοι	14
2.2.1 Ρομποτικός Γεωδαιτικός Σταθμός (RTS)	14
2.2.2 Δορυφορικό Σύστημα Εντοπισμού (GNSS)	18
2.2.3 Επίγειο Radar Πραγματικού / Συνθετικού Ανοίγματος (Ground Based Real / Synthetic Aperture Radar)	20
2.2.4 Επίγειος σαρωτής Laser (Laser Scanner)	26
2.2.5 Βιντεομετρία (Συστήματα οπτικής παρακολούθησης)	28
2.3 Μέθοδοι πειραματικής μηχανικής	29
2.3.1 Κλισίμετρα (Inclinometers)	29
2.3.2 Επιταχυνσιόμετρα (Accelerometers)	29
2.3.3 Οπτικές ίνες (Fiber optics)	31
2.4 Ολοκληρωμένα Συστήματα Παρακολούθησης (Integrated Deformation Monitoring Systems)	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	37
3.1 Γενικά – Αρχή λειτουργίας	37
3.1.1 Ιστορική εξέλιξη	38
3.2 Ψηφιακά κλισίμετρα	40
3.2.1 Αρχή λειτουργίας	41
3.2.2 Πηγές σφαλμάτων	41
3.2.3 Πλεονεκτήματα – Περιορισμοί	41

3.3	Πρωτογενείς μετρήσεις και παράγωγα μεγέθη	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4		44
4.1	Περιοχή μελέτης και περιγραφή υψηλής κατασκευής	44
4.1.1	ΑΗΣ Λαυρίου, ΔΕΗ Α.Ε.	44
4.1.2	Παρακαμπτήριος καμινάδα μονάδας IV	45
4.2	Μέθοδοι καταγραφής και εξοπλισμός	47
4.2.1	Ψηφιακό κλισιόμετρο (NIVEL 220, Leica Geosystems)	47
4.2.2	RADAR Μικροκυματικής ακτινοβολίας (IBIS-S, IDS SpA)	52
4.2.3	Ρομποτικός Γεωδαιτικός Σταθμός (TCA 1800, Leica Geosystems)	59
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5		63
5.1	Προπαρασκευαστικές εργασίες	63
5.1.1	Επιλογή / υλοποίηση γεωμετρίας παρατήρησης	63
5.1.2	Λογισμικό επικοινωνίας μετρήσεων κλισιόμετρου – Η/Υ	67
5.1.3	Σύστημα συνεχούς τροφοδοσίας κλισιόμετρου	67
5.1.4	Εγκατάσταση ψηφιακού κλισιόμετρου – στόχου	67
5.2	Συλλογή δεδομένων πεδίου	70
5.2.1	Μετρήσεις - 20/06/2012	70
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6		73
6.1	Γενικά	73
6.2	Ανάλυση δεδομένων στο πεδίο του χρόνου και του χώρου	73
6.2.1	Τύποι σημάτων	74
6.2.2	Ανάλυση χρονοσειρών	75
6.2.3	Ανάλυση δεδομένων στο πεδίο του χώρου	80
6.3	Ανάλυση δεδομένων στο πεδίο των συχνοτήτων	80
6.3.1	Η έννοια της συχνότητας	81
6.3.2	Μετασχηματισμός Fourier	82
6.3.3	Φασματική Ανάλυση με Ελάχιστα Τετράγωνα (LSSA)	84
6.3.4	Μετασχηματισμός Lomb (LNB)	85
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7		86
7.1	Επεξεργασία δεδομένων πεδίου	86
7.1.1	Επεξεργασία δεδομένων ψηφιακού κλισιόμετρου NIVEL	89
7.1.2	Επεξεργασία δεδομένων συστήματος RADAR	93
7.1.3	Επεξεργασία δεδομένων Ρομποτικού Γεωδαιτικού Σταθμού	97
7.2	Ανάλυση επεξεργασμένων δεδομένων	100
7.2.1	Υπολογισμός και αξιολόγηση μετατοπίσεων στο πεδίο του χρόνου	100
7.2.2	Υπολογισμός και αξιολόγηση μετατοπίσεων στο πεδίο του χώρου	109
7.2.3	Υπολογισμός και αξιολόγηση συχνοτήτων ταλάντωσης	113
7.2.4	Συσχέτιση με μετεωρολογικά δεδομένα	119
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8		122

8.1	Αναφορικά με τις μεθόδους καταγραφής	122
8.2	Αναφορικά με την κατασκευή	124
8.3	Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση	126
	Βιβλιογραφία	127

Ευρετήριο Σχημάτων

- Σχήμα 1.1: Στιγμιότυπο από την κατάρρευση της γέφυρας Tacoma Narrows στην Πολιτεία της Washington
- Σχήμα 1.2: Στιγμιότυπα της καταστροφής των πύργων ψύξης στο Ferrybridge του Ην. Βασιλείου
- Σχήμα 1.3: Δημιουργία δινών πίσω από κύλινδρο με αποτέλεσμα εγκάρσιες στην διεύθυνση του ανέμου ταλαντώσεις
- Σχήμα 1.4: Χαρακτηριστική δημιουργία δινών στην θάλασσα πίσω από το νησί
- Σχήμα 1.5: Χαρακτηριστική εικόνα του φαινομένου του πτερυγισμού (flutter)
- Σχήμα 1.6: Ο πτερυγισμός (flutter) παρουσιάζεται συχνά στα πτερύγια των αεροπλάνων και μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια ελέγχου και καταστροφή
- Σχήμα 1.7: Ο ουρανοξύστης Burj Khalifa στο Dubai
- Σχήμα 1.8: Halifax Metro Center στον Καναδά
- Σχήμα 1.9: Η βασιλική βίλλα στην Monza της Ιταλίας
- Σχήμα 2.1: Τρεις χαρακτηριστικοί ρομποτικοί γεωδαιτικοί σταθμοί. Από αριστερά προς τα δεξιά διακρίνονται οι: Leica TPS1200, Topcon GPT9000, Trimble S8
- Σχήμα 2.2: Σχηματική αναπαράσταση του σφάλματος της χρονικής διαφοράς μέτρησης του ζεύγους γωνία-απόσταση
- Σχήμα 2.3: Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου του σχετικού κινηματικού εντοπισμού
- Σχήμα 2.4: Ακτινική ανάλυση
- Σχήμα 2.5: Τεχνική συμβολομετρίας
- Σχήμα 2.6: Διαδοχική ενίσχυση συνεχούς σήματος (Stepped Frequency - Continuous Wave, SF-CW)
- Σχήμα 2.7: Αναπαράσταση της τεχνικής SF-CW (α). στο πεδίο του χρόνου και (β). στο πεδίο των συχνοτήτων
- Σχήμα 2.8: Επίγεια Μικροκυματικά Radar της εταιρίας IDS
- Σχήμα 2.9: Ανάλυση Μικροκυματικών Radar
- Σχήμα 2.10: Σύστημα Βιντεομετρίας της εταιρίας Imetrum, Video Gauge
- Σχήμα 2.11: Επιταχυνσιόμετρο
- Σχήμα 2.12: Αισθητήρας παραμόρφωσης τύπου FBG
- Σχήμα 2.13: Στιγμιότυπο από τοποθέτηση αισθητήρων οπτικής ίνας τύπου FBG στο τείχος της Ακρόπολης στα πλαίσια διερεύνησης της δομικής συμπεριφοράς του Τείχους
- Σχήμα 2.14: Σχηματική αναπαράσταση παρακολούθησης φράγματος με ολοκληρωμένο σύστημα
- Σχήμα 2.15: Παράδειγμα των δυνατοτήτων των λογισμικών ανάλυσης. Το συγκεκριμένο λογισμικό είναι το GeoMos Analyzer
- Σχήμα 2.16: Εικόνες από την εγκατάσταση Ολοκληρωμένου Συστήματος Παρακολούθησης για την κατασκευή της γραμμής Γ του υπογείου σιδηροδρόμου στη Ρώμη. Διακρίνονται η ειδική κατασκευή εγκατάστασης του Ρομποτικού Γεωδαιτικού Σταθμού, ο δέκτης GPS και το ψηφιακό κλισίμετρο.
- Σχήμα 2.17 α,β και γ: Στιγμιότυπα εγκατάστασης Ολοκληρωμένου Συστήματος Παρακολούθησης για την υπογειοποίηση λεωφόρου στην πόλη Detroit Lakes της Minnesota των Η.Π.Α.
- Σχήμα 3.1: Παραδοσιακό κλισίμετρο πλοίου
- Σχήμα 3.2: Το κλισίμετρο του Melick (1889)
- Σχήμα 3.3: Το κλισίμετρο του Well
- Σχήμα 3.4: Αρχή λειτουργίας του ηλεκτρονικού κλισιμέτρου
- Σχήμα 3.5: Τύποι κλισιμέτρων MEMS
- Σχήμα 3.6: Παραδείγματα ψηφιακών διαξονικών κλισιμέτρων
- Σχήμα 3.7: Γεωμετρία μετατροπής γωνιακής μέτρησης του κλισιμέτρου σε απόσταση

-
- Σχήμα 4.1: Άποψη του ΑΗΣ Λαυρίου
Σχήμα 4.2: Διάταξη μονάδων του ΑΗΣ Λαυρίου
Σχήμα 4.3: Παρακαμπτήριος καμινάδα Μονάδας IV
Σχήμα 4.4: Αισθητήρας NIVEL200
Σχήμα 4.5: Στοιχεία του αισθητήρα NIVEL200
Σχήμα 4.6: Συνδεσμολογία μεταξύ HY και πολλαπλών αισθητήρων NIVEL220
Σχήμα 4.7: Λογισμικό NIVEL Tool
Σχήμα 4.8: Το σύστημα IBIS-S
Σχήμα 4.9: Διαδικασία εστίασης (focusing)
Σχήμα 4.10: Διάγραμμα ακτινικής ανάλυσης
Σχήμα 4.11: Μετατροπή ακτινικής σε οριζόντια μετακίνηση
Σχήμα 4.12: Λογισμικό Leica Controller
Σχήμα 5.1: Γεωμετρία παρατήρησης του συστήματος IBIS
Σχήμα 5.2: Θέση εγκατάστασης συστήματος κλισιμέτρου-στόχου στην καμινάδα
Σχήμα 5.3: Άποψη τελικής θέσης συστημάτων στην περιοχή μελέτης οριζοντιογραφικά
Σχήμα 5.4: Άποψη τελικής θέσης συστημάτων στην περιοχή μελέτης υψομετρικά
Σχήμα 5.5: Εγκατάσταση συστήματος κλισιμέτρου-στόχου στην καμινάδα
Σχήμα 5.6: Στιγμιότυπα ανύψωσης εξοπλισμού στην καμινάδα
Σχήμα 5.7: Διάγραμμα έντασης και διεύθυνσης του ανέμου για το χρονικό διάστημα 14:23-16:03
Σχήμα 5.8: Διάγραμμα θερμοκρασίας για το χρονικό διάστημα 14:23-16:03
Σχήμα 6.1: Τύποι σημάτων
Σχήμα 6.2: Ανάλυση χρονοσειράς
Σχήμα 6.3: Κανονική κατανομή
Σχήμα 6.4: Παράδειγμα εμφάνισης γραμμικής τάσης σε θερμοκρασιακά δεδομένα
Σχήμα 6.5: Παράδειγμα ιστογράμματος συχνοτήτων
Σχήμα 7.1: Διαστήματα κοινών μετρήσεων μεταξύ των τριών συστημάτων
Σχήμα 7.2: Συστήματα συντεταγμένων των τριών αισθητήρων
Σχήμα 7.3: Γραφική αναπαράσταση στροφής συστήματος αξόνων
Σχήμα 7.4: Διαγράμματα πλήθους εμφανίσεων των παρατηρήσεων του NIVEL
Σχήμα 7.5: Διαγράμματα χρονοσειρών γωνιών NIVEL
Σχήμα 7.6: Διαγράμματα χρονοσειρών φαινόμενων μετακινήσεων NIVEL
Σχήμα 7.7: Διάγραμμα εδαφικής (ground range) ανάλυσης
Σχήμα 7.8: Πολικό διάγραμμα φάσης
Σχήμα 7.9: Πολικό διάγραμμα φάσης α. πριν και β. μετά τη διόρθωση λόγω ανεπιθύμητων επιστροφών (clutter)
Σχήμα 7.10: Διάγραμμα χρονοσειράς ανηγμένων μετακινήσεων IBIS για Rbin80 (H=73.30m)
Σχήμα 7.11: Διαγράμματα πλήθους εμφανίσεων των μετακινήσεων από το RTS
Σχήμα 7.12: Διαγράμματα χρονοσειρών μετακινήσεων RTS
Σχήμα 7.13: Διαγράμματα χρονοσειρών υψομετρικών διαφορών από RTS
Σχήμα 7.14: Διαγράμματα φαινόμενων μετακινήσεων ως προς το χρόνο για το NIVEL, στο χρονικό διάστημα 14:49:29-15:08:13
Σχήμα 7.15: Μεγέθυνση στα α. 100sec και β. 10sec του διαγράμματος φαινόμενων μετακινήσεων ως προς το χρόνο για το NIVEL, στο χρονικό διάστημα 14:49:29-15:08:13
Σχήμα 7.16: Διάγραμμα μετακινήσεων ως προς το χρόνο για το IBIS, στο χρονικό διάστημα 14:49:29-15:08:13
Σχήμα 7.17: Μεγέθυνση στα α. 100sec και β. 10sec του διαγράμματος μετακινήσεων ως προς το χρόνο για το IBIS, στο χρονικό διάστημα 14:49:29-15:08:13
Σχήμα 7.18: Διάγραμμα ανηγμένων μετακινήσεων και αντίστοιχων τιμών SNR ως προς το ύψος της καμινάδας για το IBIS, στο χρονικό διάστημα 14:49:29-15:08:13
Σχήμα 7.19: Διαγράμματα μετακινήσεων ως προς το χρόνο για το RTS, στο χρονικό διάστημα 14:49:29-15:08:13

-
- Σχήμα 7.20: Μεγέθυνση στα α. 100sec και β. 10sec του διαγράμματος μετακινήσεων ως προς το χρόνο για το RTS, στο χρονικό διάστημα 14:49:29-15:08:13
- Σχήμα 7.21: Συγκριτικό διάγραμμα φαινόμενων μετακινήσεων από NIVEL και ανηγμένων μετακινήσεων από IBIS, στο χρονικό διάστημα 14:49:29-15:08:13
- Σχήμα 7.22: Μεγέθυνση στα α. 100sec και β. 10sec του συγκριτικού διαγράμματος φαινόμενων μετακινήσεων από NIVEL και ανηγμένων μετακινήσεων από IBIS, στο χρονικό διάστημα 14:49:29-15:08:13
- Σχήμα 7.23: Συγκριτικό διάγραμμα φαινόμενων μετακινήσεων από NIVEL και μετακινήσεων από RTS, στο χρονικό διάστημα 14:49:29-15:08:13
- Σχήμα 7.24: Μεγέθυνση στα α. 100sec και β. 10sec του συγκριτικού διαγράμματος φαινόμενων μετακινήσεων από NIVEL και μετακινήσεων από RTS, στο χρονικό διάστημα 14:49:29-15:08:13
- Σχήμα 7.25: Διάγραμμα οριζοντιογραφίας από NIVEL (με φαινόμενες μετακινήσεις) για το χρονικό διάστημα 14:49:29-15:08:13
- Σχήμα 7.26: Διάγραμμα οριζοντιογραφίας από IBIS για το χρονικό διάστημα 14:49:29-15:08:13
- Σχήμα 7.27: Διάγραμμα οριζοντιογραφίας από RTS για το χρονικό διάστημα 14:49:29-15:08:13
- Σχήμα 7.28: Συγκριτικά διαγράμματα οριζοντιογραφίας α. από NIVEL, β. από RTS, γ. από IBIS, για το χρονικό διάστημα 14:49:29-15:08:13
- Σχήμα 7.29: Κύριες συχνότητες ταλάντωσης καμινάδας κατά τον άξονα X από NIVEL
- Σχήμα 7.30: Κύριες συχνότητες ταλάντωσης καμινάδας κατά τον άξονα Y από NIVEL
- Σχήμα 7.31: Διάγραμμα συχνοτήτων για το σύστημα IBIS
- Σχήμα 7.32: Κύριες συχνότητες ταλάντωσης κατασκευής από το σύστημα IBIS
- Σχήμα 7.33: Δευτερεύουσες συχνότητες ταλάντωσης κατασκευής
- Σχήμα 7.34: Αποτέλεσμα ταλάντωσης του συστήματος IBIS στη ζώνη των συχνοτήτων
- Σχήμα 7.35: Κύριες συχνότητες ταλάντωσης καμινάδας κατά τον άξονα X από RTS
- Σχήμα 7.36: Κύριες συχνότητες ταλάντωσης καμινάδας κατά τον άξονα Y από RTS
- Σχήμα 7.37: Διαγράμματα μετακινήσεων κατά τους άξονες X και Y από το NIVEL και διαγράμματα έντασης και διεύθυνσης ανέμου για στο χρονικό διάστημα 14:49:29-15:08:13
- Σχήμα 7.38: Διάγραμμα μετακινήσεων κατά τον άξονα Y από το IBIS και διαγράμματα έντασης και διεύθυνσης ανέμου στο χρονικό διάστημα 14:49:29-15:08:13
- Σχήμα 7.39: Διαγράμματα μετακινήσεων κατά τους άξονες X και Y από το RTS και διαγράμματα έντασης και διεύθυνσης ανέμου στο χρονικό διάστημα 14:49:29-15:08:13

Ευρετήριο Πινάκων

- Πίνακας 4.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά NIVEL 200
Πίνακας 4.2: Τεχνικά χαρακτηριστικά συστήματος IBIS-S
Πίνακας 4.3: Ακρίβειες μέτρησης Leica TCA1800
Πίνακας 4.4: Εμβέλεια λειτουργίας αναγνώρισης (ATR) και παρακολούθησης (LOCK) στόχου για το Leica TCA1800
Πίνακας 4.5: Ακρίβεια τοποθέτησης σταυρονήματος στο κέντρο του πρίσματος για το Leica TCA1800
Πίνακας 4.6: Χαρακτηριστικά τηλεσκοπίου και αναζήτησης στόχου για το Leica TCA1800
Πίνακας 5.1: Αρχεία μετρήσεων του συστήματος IBIS
Πίνακας 5.2: Αρχεία μετρήσεων του κλισιμέτρου NIVEL
Πίνακας 5.3: Αρχεία μετρήσεων του RTS
Πίνακας 5.4: Χρονικές διαφορές μεταξύ των χρονομέτρων των φορητών Η/Υ των 3 συστημάτων
Πίνακας 6.1: Αντιστοίχιση σημάτων με τον κατάλληλο μετασχηματισμό Fourier
Πίνακας 7.1: Χρονικές διαφορές για τον συγχρονισμό της χρονομέτρησης των 3 συστημάτων
Πίνακας 7.2: Συγχρονισμένα αρχεία μετρήσεων του συστήματος IBIS
Πίνακας 7.3: Συγχρονισμένα αρχεία μετρήσεων του συστήματος NIVEL
Πίνακας 7.4: Συγχρονισμένα αρχεία μετρήσεων του συστήματος RTS
Πίνακας 7.5: Διαστήματα κοινών μετρήσεων μεταξύ των τριών συστημάτων
Πίνακας 7.6: Στατιστικά στοιχεία μετρήσεων γωνιών από NIVEL μετά την αφαίρεση των τιμών πάνω από 1.5 mrad
Πίνακας 7.7: Στατιστικά στοιχεία φαινομένων μετακινήσεων από NIVEL μετά την αφαίρεση των τιμών πάνω από 1.5 mrad
Πίνακας 7.8: Συσχετισμός μεταξύ Rbin και πραγματικού ύψους στην κατασκευή
Πίνακας 7.9: Στατιστικά στοιχεία ανηγμένων μετακινήσεων από IBIS
Πίνακας 7.10: Στατιστικά στοιχεία δεδομένων RTS μετά την αφαίρεση των χονδροειδών σφαλμάτων
Πίνακας 8.1: Συγκεντρωτικός πίνακας συχνοτήτων καμινάδας από τα τρία συστήματα καταγραφής
Πίνακας 8.2: Συγκεντρωτικός πίνακας μεγεθών παραμόρφωσης καμινάδας από τα τρία συστήματα καταγραφής

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία έχει δυο στόχους: πρώτον, την αξιολόγηση της επίδοσης ενός ψηφιακού κλισιμέτρου στην παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς μιας υψηλής κατασκευής υπό την επίδραση ισχυρού ανέμου· δεύτερον, τη σύγκριση της μεθόδου αυτής με άλλες δυο: ένα ρομποτικό γεωδαιτικό σταθμό (RTS) και ένα επίγειο radar μικροκυματικής συμβολομετρίας (GB-RAR).

Ως κατασκευή μελέτης επιλέχθηκε η παρακαμπτήριος καμινάδα της Μονάδας IV του ΑΗΣ Λαυρίου της ΔΕΗ Α.Ε. Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν το ψηφιακό κλισίμετρο Leica NIVEL220, ο ρομποτικός σταθμός Leica TCA1800 και το radar IDS IBIS-S. Για την υλοποίηση του πειράματος προηγήθηκαν προπαρασκευαστικές εργασίες που περιελάμβαναν το σχεδιασμό των μετρήσεων, καθώς και την προετοιμασία και εγκατάσταση του απαραίτητου εξοπλισμού. Η συλλογή δεδομένων πραγματοποιήθηκε υπό συνθήκες έντασης ανέμου της τάξης των 13m/sec.

Η επεξεργασία των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε, σε πρώτη φάση, για το κάθε σύστημα ξεχωριστά. Στη συνέχεια, απομονώθηκε ένα κοινό για όλα τα συστήματα χρονικό διάστημα μετρήσεων διάρκειας 18min, για το οποίο αναλύθηκαν και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των παρατηρήσεων.

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων του IBIS προέκυψαν μετακινήσεις της καμινάδας της τάξης των $\pm 2\text{mm}$ και δυο κύριες συχνότητες ταλάντωσης στα 0.66Hz και 0.96Hz. Αντίστοιχα, από τα αποτελέσματα του RTS προέκυψαν μετακινήσεις της καμινάδας της τάξης των $\pm 5\text{mm}$ και δυο κύριες συχνότητες ταλάντωσης στα 0.65Hz και 1.06Hz. Η διαφορά όσον αφορά το μέγεθος της παραμόρφωσης αποδίδεται κυρίως στην αβεβαιότητα των μετρήσεων του κάθε οργάνου. Από τις παρατηρήσεις του NIVEL, για την ίδια διεύθυνση παρατήρησης, προέκυψαν δυο κύριες συχνότητες ταλάντωσης στα 0.97Hz και 0.65Hz και φαινόμενες μετακινήσεις, οι οποίες δεν ανταποκρίνονται στα πραγματικά μεγέθη παραμορφώσεων, μπορούν, ωστόσο, να αποδώσουν την τάση μεταβολής της κίνησης.

ABSTRACT

The present paper focuses on two objectives: firstly, the evaluation of the use of a precise digital inclinometer in the dynamic deformation monitoring of a tall structure, under heavy wind-loading conditions; secondly, the assessment of the method in contrast to a robotic total station (RTS) and a ground based real aperture radar (GB-RAR).

The research site selected for this purpose was a chimney located in the atmospheric power plant of the Greek Public Power Corporation S.A. in Lavrio. Measurements were acquired with the Leica NIVEL220 digital inclinometer, the Leica TCA1800 robotic total station and the IDS IBIS-S radar. Necessary preliminary works included the project's design, as well as the preparation and installation of all the required equipment. Measurements took place under a mean wind speed of 13m/sec.

The measurements were initially processed for each system separately. Next, a common 18min time period for all these systems was selected and the measurements were processed and analysed, in order to evaluate and compare each system's results and performance.

Analysis of the IBIS measurements revealed a deformation of about $\pm 2\text{mm}$ and two fundamental frequencies, namely at 0.66Hz and 0.96Hz. In that order, measurements acquired with the RTS system produced roughly $\pm 5\text{mm}$ of deformation and two fundamental frequencies as well, at 0.65Hz and 1.06Hz. This discrepancy between the two deformation values can be attributed mainly to the measurement uncertainty of each system. Finally, processing and analysis of the NIVEL measurements resulted in two fundamental frequencies, at 0.97Hz and 0.65Hz and in apparent (pseudo) deformation values, which, although not of any practical assessing value, can successfully describe the trend of the movement.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς των κατασκευών αποτελεί ένα εξελισσόμενο πεδίο, όπου η ανάπτυξη της τεχνολογίας έχει συμβάλλει παρέχοντας καινοτόμες πρακτικές και συστήματα παρακολούθησης. Μέσα σε αυτά τα πλαίσια, οι νέες μέθοδοι και όργανα μελετώνται και αξιολογούνται προκειμένου να επαληθεύονται και να τεκμηριώνονται.

Αντικείμενο της εργασίας

Αντικείμενο της εργασίας είναι η παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς της παρακαμπτηρίου καμινάδας της μονάδας IV του ΑΗΣ Λαυρίου της ΔΕΗ Α.Ε. υπό την επίδραση ισχυρού ανέμου, με χρήση τριών διαφορετικών συστημάτων: ενός ψηφιακού κλισιμέτρου, ενός ρομποτικού γεωδαιτικού σταθμού και ενός επίγειου radar μικροκυματικής ακτινοβολίας πραγματικού ανοίγματος.

Στόχος της εργασίας είναι η αξιολόγηση της επίδοσης του ψηφιακού κλισιμέτρου στην παρακολούθηση υψηλών κατασκευών και για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τα δύο άλλα, διαφορετικού τύπου και ακριβείας, συστήματα. Στα πλαίσια αυτού του στόχου, υπολογίζονται και συγκρίνονται τα χαρακτηριστικά της κίνησης της καμινάδας, όπως αυτή καταγράφεται από τον κάθε αισθητήρα. Επιπλέον, συγκρίνονται τα τρία συστήματα καταγραφής ως προς την απόδοσή τους.

Δομή της εργασίας

Η παρούσα εργασία περιλαμβάνει συνολικά οκτώ κεφάλαια, το περιεχόμενο των οποίων παρουσιάζεται συνοπτικά παρακάτω.

Στο Πρώτο Κεφάλαιο γίνεται αναφορά στη δυναμική συμπεριφορά των κατασκευών, δίνοντας ιδιαίτερο βάρος στην επίδραση του ανέμου. Παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του ανέμου, αναλύεται και περιγράφεται η επίδρασή του στις κατασκευές και αναφέρονται οι συνήθεις προσεγγίσεις του προβλήματος κατά την φάση σχεδιασμού. Τέλος, παρουσιάζονται τα Συστήματα Παρακολούθησης Δομικής Ακεραιότητας ή 'Υγείας' των Κατασκευών (SHM).

Στο Δεύτερο Κεφάλαιο παρουσιάζονται οι συνήθεις μέθοδοι παρακολούθησης της δυναμικής συμπεριφοράς κατασκευών. Αναλυτικότερα παρουσιάζονται οι

Ρομποτικοί Γεωδαιτικοί Σταθμοί και τα Radar Μικροκυματικής Συμβολομετρίας. Τέλος, γίνεται αναφορά και στα Ολοκληρωμένα Συστήματα Παρακολούθησης.

Στο Τρίτο Κεφάλαιο, αρχικά δίνονται γενικές πληροφορίες όσον αφορά τα κλισίμετρα. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στα ψηφιακά κλισίμετρα και στις δυνατότητές τους. Τέλος, θίγεται το πρόβλημα της γεωμετρίας στις εφαρμογές με κλισίμετρο, δηλαδή της μετατροπής των γωνιακών μετρήσεων σε μεγέθη μετακίνησης.

Το Τέταρτο Κεφάλαιο αναφέρεται, στο πρώτο μέρος, στην κατασκευή όπου πραγματοποιήθηκε η μελέτη, δηλαδή την παρακαμπτήριο καμινάδα της μονάδας IV του ΑΗΣ Λαυρίου. Στη συνέχεια, δίνονται λεπτομέρειες για τις συγκεκριμένες μεθόδους καταγραφής που επιλέχθηκαν για τη μελέτη της καμινάδας.

Στο Πέμπτο Κεφάλαιο παρουσιάζονται κατ' αρχήν οι προπαρασκευαστικές εργασίες γραφείου και υπαίθρου. Το δεύτερο μέρος του Κεφαλαίου αναφέρεται στη συλλογή των δεδομένων πεδίου και στις επικρατούσες συνθήκες.

Στο Έκτο Κεφάλαιο περιγράφονται οι μέθοδοι επεξεργασίας των δεδομένων. Αρχικά γίνεται αναφορά στους τύπους των σημάτων και στα σφάλματα που υπεισέρχονται σε αυτά, ενώ στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά τα βασικά στατιστικά μεγέθη και οι μέθοδοι επεξεργασίας και ανάλυσης σημάτων στο πεδίο του χρόνου, του χώρου και των συχνοτήτων.

Το Έβδομο Κεφάλαιο αναφέρεται στα στάδια της επεξεργασίας των μετρήσεων για κάθε σύστημα ξεχωριστά και στα αποτελέσματα που προκύπτουν από την επεξεργασία αυτή, για ένα κοινό χρονικό διάστημα παρατηρήσεων διάρκειας 18 min. Η ανάλυση και η συσχέτιση με τα μετεωρολογικά δεδομένα γίνεται για το ίδιο διάστημα.

Τέλος, στο Όγδοο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την διαδικασία των μετρήσεων, καθώς και από την επεξεργασία και ανάλυσή τους. Τα συμπεράσματα αφορούν τόσο στις μεθόδους καταγραφής, όσο και στη συμπεριφορά της κατασκευής. Κλείνοντας, με βάση τα συμπεράσματα που προκύπτουν, αναφέρονται κάποιες προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Μελέτη Δυναμικής Συμπεριφοράς Τεχνικών Έργων – Έμφαση στην επίδραση του Ανέμου

Σε αυτό το Κεφάλαιο γίνεται αναφορά στη δυναμική συμπεριφορά των κατασκευών, δίνοντας ιδιαίτερο βάρος στην επίδραση του ανέμου. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του ανέμου, αναλύεται η επίδρασή του στις κατασκευές, αναφέρονται ειδικότερα φαινόμενα που περιγράφουν αυτή την επίδραση και παρουσιάζονται οι συνήθεις προσεγγίσεις του προβλήματος κατά την φάση σχεδιασμού. Τέλος, παρουσιάζονται τα Συστήματα Παρακολούθησης Δομικής Ακεραιότητας ή 'Υγείας' των Κατασκευών (SHM).

1.1 Γενικά

Ο έλεγχος της ασφάλειας, της ποιότητας και της αξιοπιστίας των κατασκευών, αλλά και των φυσικών διεργασιών, αποτελούσε ανέκαθεν πρόκληση για τους μηχανικούς. Στην σημερινή εποχή, η πρόκληση αυτή είναι εντονότερη από ποτέ.

Από τη μια μεριά, η ραγδαία αύξηση του ανθρώπινου πληθυσμού, σε συνδυασμό με την εξέλιξη των κοινωνικών δομών και οικονομικών συνθηκών, έχει οδηγήσει σε φαινόμενα έντονης αστικοποίησης και εκμετάλλευσης φυσικών πόρων. Το γεγονός αυτό οδήγησε τη βιομηχανία της κατασκευής δομικών / τεχνικών έργων σε άνθηση, με τη δημιουργία υπεράριθμων, μεγάλης κλίμακας και πολλές φορές υπερμεγεθών κατασκευών, επιτομών τεχνολογικής εξέλιξης, αλλά και αρχιτεκτονικής.

Από την άλλη μεριά, οι κλιματικές αλλαγές, η επιδείνωση της έντασης και της συχνότητας των καιρικών εξάρσεων, καθώς και άλλα φυσικά φαινόμενα, όπως είναι οι σεισμοί, προκαλούν τεράστιες καταστροφές με τεράστιο κόστος, σε ανθρώπινες ζωές, αλλά και πόρους, φυσικούς και οικονομικούς.

Η παρακολούθηση της συμπεριφοράς, λοιπόν, των κατασκευών πριν, κατά τη διάρκεια και μετά το πέρας τέτοιων φαινομένων, αποτελεί ένα πεδίο που έχει γνωρίσει μεγάλη εξέλιξη τις τελευταίες δεκαετίες, με τη συμβολή της τεχνολογίας. Νέα όργανα, νέες μέθοδοι, νέες θεωρίες παρέχουν καλύτερη και ακριβέστερη κατανόηση των φαινομένων και της συμπεριφοράς των κατασκευών.

1.2 Δυναμική συμπεριφορά υψηλών κατασκευών

Όλες οι κατασκευές υπόκεινται σε φορτίσεις που προκαλούν παραμορφώσεις. Οι φορτίσεις αυτές προκύπτουν κυρίως λόγω:

- α. του ιδίου τους στατικού φορτίου
- β. περιβαλλοντικών φαινομένων, όπως μεταβολές θερμοκρασίας, άνεμος, σεισμός, χιόνι κ.ο.κ.
- γ. φορτίσεων που προκύπτουν από την χρήση που εξυπηρετούν (π.χ. κυκλοφοριακός φόρτος μιας γέφυρας, συγκέντρωση πληθυσμού σε στάδιο).

Το είδος και το μέγεθος των παραμορφώσεων που υφίστανται οι κατασκευές εξαρτώνται από παράγοντες όπως είναι τα υλικά και ο τρόπος κατασκευής τους, τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά και η γήρανση (κόπωση) που έχουν υποστεί.

Η δυναμική συμπεριφορά των κατασκευών στις εξωτερικές φορτίσεις λαμβάνεται υπόψη από τους μελετητές στην φάση του σχεδιασμού, κυρίως σε ιδιαίζουσες, υπερμεγέθεις ή ξεχωριστής σημασίας κατασκευές. Στις πιο απλές περιπτώσεις, οι παράμετροι δυναμικής συμπεριφοράς (απόσβεση, ακαμψία, ιδιοσυχνότητα, επιτάχυνση) προκύπτουν από μαθηματικά μοντέλα, πρότυπα και κανονισμούς, προσομοιώσεις σε μικρότερης κλίμακας ομοιώματα (όπως ανεμοσήραγγες, σεισμικές τράπεζες) και προϋποθέτουν γνώση των αναμενόμενων φορτίσεων και των επιδράσεων από άλλες κατασκευές. Σε κάποιες περιπτώσεις, όταν οι κατασκευές είναι περίπλοκες, τα πρότυπα και οι κανονισμοί ανεπαρκείς και οι εξωτερικοί παράγοντες ασταθείς και απρόβλεπτοι (π.χ. μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές φορτίσεις, εξωτερικοί κίνδυνοι), απαιτείται παρακολούθηση της συμπεριφοράς της κατασκευής στο πέρασμα του χρόνου. Σε αυτές τις περιπτώσεις, εγκαθίστανται συστήματα παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας των κατασκευών (SHM) (§1.4).

Οι υψηλές και εύκαμπτες κατασκευές, όπως είναι οι ιστοί, οι καμινάδες, οι πύργοι, είναι ιδιαίτερος ευάλωτες στις θερμοκρασιακές μεταβολές και στις ανεμοπιέσεις. Στην επόμενη παράγραφο γίνεται μια σύντομη αναφορά στην επίδραση του ανέμου στις κατασκευές, στα χαρακτηριστικά του, στο είδος των παραμορφώσεων που προκαλεί, καθώς και στις μεθόδους προσομοίωσης κατά την φάση του σχεδιασμού.

1.3 Μελέτη της επίδρασης του ανέμου στις κατασκευές

1.3.1 Γενικά

Άνεμος είναι η οριζόντια, κυρίως, κίνηση μεγάλων μαζών του ατμοσφαιρικού αέρα και προκαλείται από τρεις βασικούς παράγοντες:

- α. Την ηλιακή ενέργεια που απορροφά η ατμόσφαιρα και η επιφάνεια του εδάφους, δημιουργώντας έτσι διαφορές στην κατανομή της ατμοσφαιρικής πίεσης
- β. Την περιστροφή της Γης γύρω από τον άξονά της (και την συνεπαγόμενη δύναμη Coriolis) και
- γ. Την ανομοιομορφία του γήινου αναγλύφου.

Εξαιτίας των τριών αυτών παραγόντων, δημιουργούνται διαφορές πιέσεων στην επιφάνεια της Γης και οι αέριες μάζες κινούνται για να αντισταθμίσουν την διαφορά, δημιουργώντας τον άνεμο.

1.3.2 Χαρακτηριστικά του ανέμου

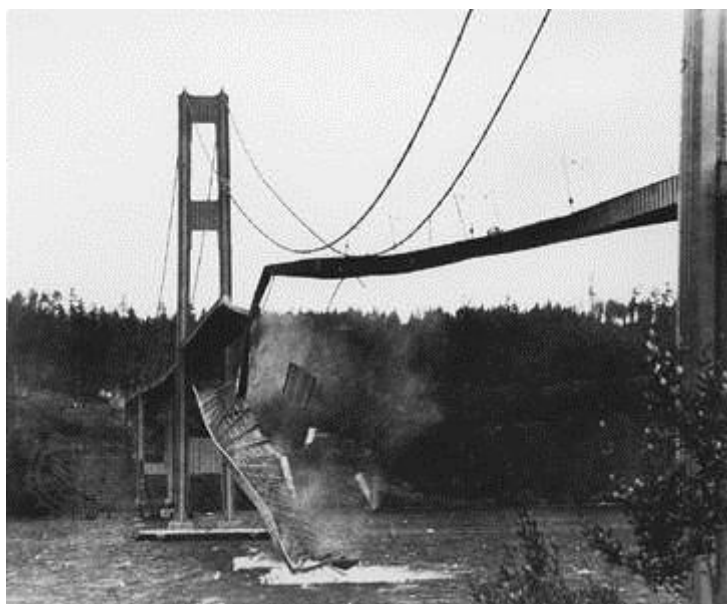
Τα κύρια χαρακτηριστικά του ανέμου είναι (Τριανταφυλλίδης, 2009):

- Η ένταση (ταχύτητα) (speed, velocity)
- Η διεύθυνση (direction)
Τόσο η ένταση όσο και η διεύθυνση του ανέμου εξαρτώνται από την τραχύτητα του εδάφους, την ύπαρξη επιφανειακών εμποδίων (π.χ. ψηλά κτίρια) και το τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής.
- Το επίπεδο τύρβης (ή τυρβώδους ροής) (turbulence). Σε κατάσταση τυρβώδους ροής, οι τρεις συνιστώσες της ταχύτητας και η πίεση παρουσιάζουν έντονες διακυμάνσεις χρονικά. Οποιαδήποτε τυρβώδης ροή περιέχει μεγάλο αριθμό δινών (eddies) με πολύ διαφορετικές διαστάσεις και περιστροφικά χαρακτηριστικά. Η εμφάνιση υψηλής τύρβης εξαρτάται από τις γενικές ατμοσφαιρικές συνθήκες, από την ύπαρξη μεμονομένων κτιρίων ή άλλων εμποδίων και από την τραχύτητα του εδάφους.
- Η διάτμηση (shear). Ως διάτμηση ορίζεται η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος πάνω από το έδαφος. Ο βαθμός της διάτμησης του ανέμου εξαρτάται από δύο παράγοντες: την ατμοσφαιρική μίξη και την τραχύτητα του εδάφους.
- Η ύπαρξη ανεμοριπών (gusts)
Γενικά, η μέση ταχύτητα του ανέμου κατά τη χρονική διάρκεια ενός δεκαλέπτου τείνει να αυξάνει με το ύψος, ενώ η ύπαρξη ανεμοριπών τείνει να μειώνεται με το ύψος (Mendis et al., 2007).

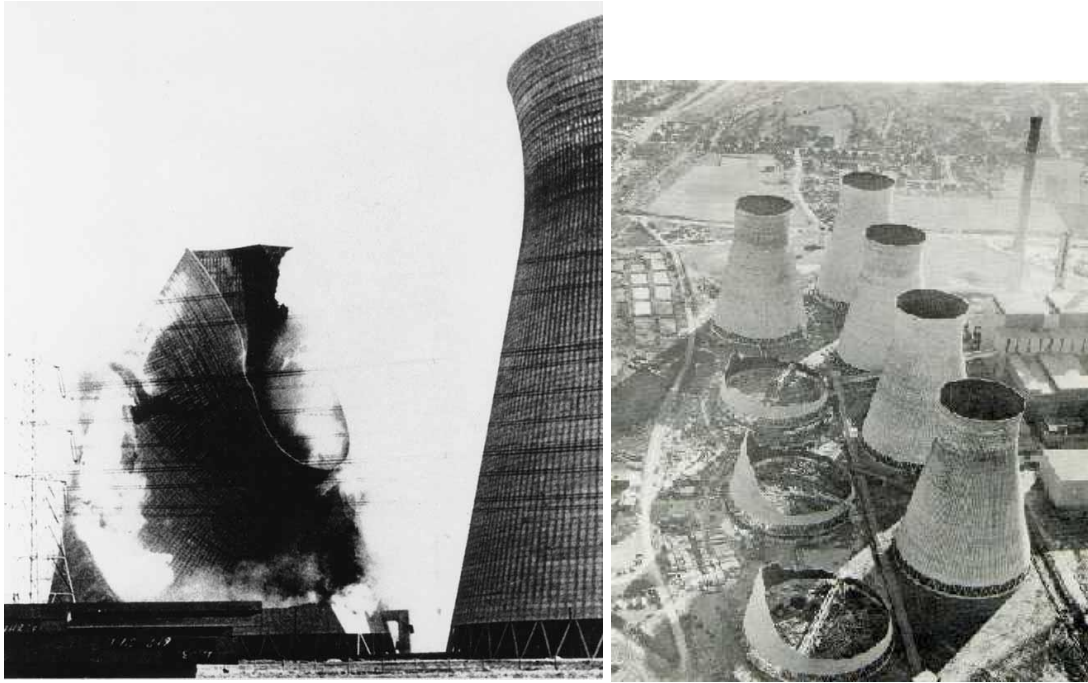
1.3.3 Επίδραση του ανέμου στις κατασκευές

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω, ο άνεμος είναι ένα εξαιρετικά πολύπλοκο φαινόμενο. Αποτελείται από πληθώρα δινών μεταβαλλόμενου μεγέθους και περιστροφικών χαρακτηριστικών, που κινούνται ως προς την επιφάνεια της Γης. Οι δίνες αυτές δίνουν στον άνεμο τον θυελλώδη (gusty) ή τυρβώδη (turbulent) χαρακτήρα του. Η δυναμική φόρτιση σε μια κατασκευή εξαρτάται από τον χαρακτήρα των δινών.

Σε ορισμένες περιπτώσεις και υπό την κατάλληλη δυναμική φόρτιση, μπορεί να ακολουθήσει αστοχία της κατασκευής. Από το πιο γνωστά παραδείγματα κατάρρευσης κατασκευών λόγω ανέμου είναι αυτό της γέφυρας Tacoma Narrows στην Πολιτεία της Washington, στις Η.Π.Α. το 1940, με ταχύτητα ανέμου 19m/sec (8 Beaufort) μόλις 4 μήνες μετά την κατασκευή της (Σχήμα 1.1) και αυτό της κατάρρευσης 3 πύργων ψύξης του σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο Ferrybridge του Ην. Βασιλείου το 1965 (Σχήμα 1.2).



Σχήμα 1.1: Στιγμιότυπο από την κατάρρευση της γέφυρας Tacoma Narrows στην Πολιτεία της Washington (<http://www.engineeringcivil.com>)



α. Στιγμιότυπο της καταστροφής (Holmes, 2001) β. Συνολική άποψη της καταστροφής (<http://www.knottingley.org>)

Σχήμα 1.2: Στιγμιότυπα της καταστροφής των πύργων ψύξης στο Ferrybridge του Ην. Βασιλείου

Οι δονήσεις που δέχεται μια κατασκευή εξαιτίας του ανέμου εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τα χαρακτηριστικά της. Τα τέσσερα κύρια χαρακτηριστικά είναι το γεωμετρικό σχήμα, ο συντελεστής ακαμψίας ή ευκαμψίας (stiffness or flexibility), ο συντελεστής απόσβεσης (damping) και η γήρανση ή κόπωση (fatigue damage). Επιπρόσθετα, εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του ανέμου.

Η επίδραση του ανέμου στις κατασκευές συνήθως αποτελείται από τρεις συνιστώσες (Yigit et al., 2010):

- ✚ την μόνιμη ή στατική (static) συνιστώσα, που προκύπτει από την μέση ένταση του ανέμου
- ✚ την ημι-μόνιμη ή ημι-στατική συνιστώσα (quasi-static) που προκαλείται από χαμηλής συχνότητας διακυμάνσεις της έντασης του ανέμου (σχετικά σταθερή φόρτιση μεγάλης περιόδου). Η παραμόρφωση που προκαλείται εκφράζει τη μέση εκτροπή από τη θέση ηρεμίας της κατασκευής για ένα χρονικό διάστημα (Δασκαλάκης et al., 2008).
- ✚ την δυναμική (dynamic) συνιστώσα που προκαλείται από διακυμάνσεις της έντασης του ανέμου, η συχνότητα των οποίων κυμαίνεται στα επίπεδα της κυρίαρχης συχνότητας της κατασκευής. Η δυναμική συνιστώσα μπορεί να διακριθεί περαιτέρω σε επικρατούσες και δευτερεύουσες συνιστώσες. Οι επικρατούσες (resonant) συνιστώσες σχετίζονται με την απόκριση της κατασκευής κοντά στην ιδιοσυχνότητα ταλάντωσης, ενώ οι δευτερεύουσες

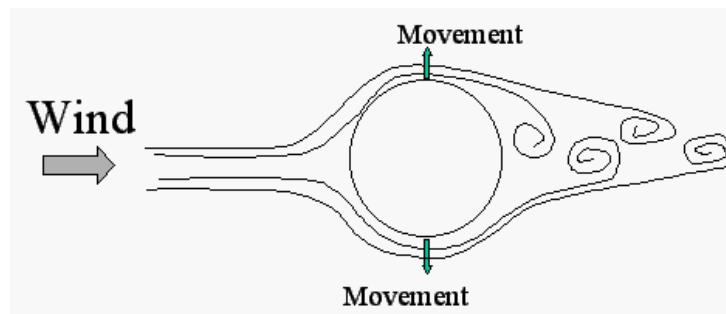
(secondary), εκφράζουν ένα πλήθος συχνοτήτων απορρόφησης και λαμβάνουν εν γένει μικρότερες τιμές από την τιμή της ιδιοσυχνότητας (Δασκαλάκης et al., 2008).

Τρεις είναι οι κύριες πηγές των αεροδυναμικών διεγέρσεων που προκαλούν τις δυναμικές αποκρίσεις (Davenport, 1995):

- α. δυνάμεις που προκαλούνται από διακυμάνσεις της τυρβώδους ροής και προκαλούν τόσο επικρατούσες όσο και δευτερεύουσες αποκρίσεις ομοαξονικά και εγκάρσια της διεύθυνσης του ανέμου.
- β. δυνάμεις που προκαλούνται από δίνες πίσω από την κατασκευή, που προκαλούν κυρίως επικρατούσες αποκρίσεις, εγκάρσια στην διεύθυνση της ανεμοπίεσης.
- γ. δυνάμεις που προκαλούνται από την κίνηση της κατασκευής, οι σημαντικότερες των οποίων είναι οι δυνάμεις αεροδυναμικής απόσβεσης που ελέγχουν το μέγεθος της δυναμικής απόκρισης, αυξάνοντας ή μειώνοντας την ικανότητα απόσβεσης της κατασκευής. Η αρνητική αεροδυναμική απόσβεση συνδέεται κατά κύριο λόγο με την εγκάρσια κίνηση και μπορεί να προκαλέσει μεγάλου πλάτους ταλαντώσεις που σε ακραίες περιπτώσεις οδηγούν την κατασκευή σε αστάθεια.

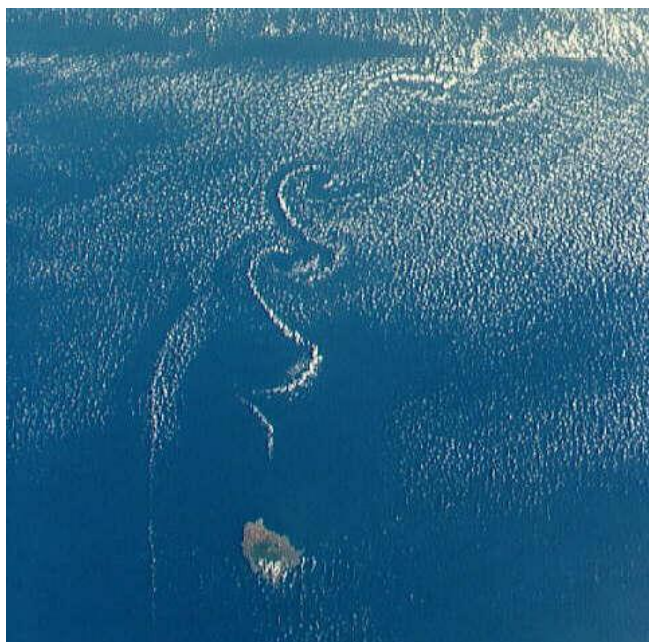
Η δυναμική συμπεριφορά των κατασκευών υπό την επίδραση του ανέμου μπορεί να περιγραφεί από ειδικότερα φαινόμενα, όπως (Mendis et al., 2007)¹:

- πλήγμα (buffeting), που περιγράφεται ως δονήσεις πολύ υψηλής συχνότητας που προκαλούνται από απότομη αύξηση φόρτισης (buffet = παλλόμενα κρουστικά κύματα)
- περιδίνηση (εγκάρσιες ταλαντώσεις) (vortex shedding), που είναι η δημιουργία δινών κατάντι της κατασκευής (Σχήμα 1.3).



Σχήμα 1.3: Δημιουργία δινών πίσω από κύλινδρο με αποτέλεσμα εγκάρσιες στην διεύθυνση του ανέμου ταλαντώσεις (www.mecaenterprises.com)

¹ Οι ορισμοί έχουν προκύψει από μετάφραση των αγγλικών όρων σύμφωνα με το Ευρετήριο Όρων Ευρωκωδίκων του Τμήματος Τυποποίησης του ΤΕΕ (αγγλική σειρά)



Σχήμα 1.4: Χαρακτηριστική δημιουργία δινών στην θάλασσα πίσω από το νησί (www.engineering.uiowa.edu)

- καλπασμός (galloping): το φαινόμενο αυτό περιγράφεται ως έντονος κυματισμός και στρέβλωση και είναι αυτό που προκάλεσε την κατάρρευση της γέφυρας Tacoma Narrows.
- πτερυγισμός (flutter), που οφείλεται σε αυτοδιεγχειρόμενη ταλάντωση (όταν μια αυθαίρετα μικρή μετατόπιση ενός στοιχείου (π.χ. ενός φτερού αεροσκάφους) έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης του ρεύματος αέρα, που οδηγεί σε αύξηση του συντελεστή άνωσης (lift) και σε ακόμα μεγαλύτερη μετατόπιση από τη θέση ισορροπίας (Σχήμα 1.6)).



Σχήμα 1.5: Χαρακτηριστική εικόνα του φαινομένου του πτερυγισμού (flutter) (www.flickr.com)



Σχήμα 1.6: Ο πτερυγισμός (flutter) παρουσιάζεται συχνά στα πτερύγια των αεροπλάνων και μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια ελέγχου και καταστροφή (www.article.wn.com)

Οι εύκαμπτες κατασκευές έχουν συνήθως πιο έντονη δυναμική απόκριση ομοαξονικά με τη διεύθυνση του ανέμου, ως αποτέλεσμα πληγμάτων λόγω έντονης τύρβης. Αποκρίσεις εγκάρσια στην διεύθυνση του ανέμου προκαλούνται από τα φαινόμενα περιδίνησης (vortex shedding) ή καλπασμού (galloping). Για κατασκευές όπως κτίρια, καμινάδες κτλ. ο πτερυγισμός (flutter) και ο καλπασμός (galloping) δεν αποτελούν κατά κανόνα πρόβλημα (Mendis et al., 2007), όπως για παράδειγμα στα πτερύγια των ανεμογεννητριών ή σε γέφυρες αντίστοιχα.

1.3.4 Σχεδιασμός έναντι ανέμου

Κατά γενικό κανόνα, στη διάθεση του μηχανικού τίθενται τρεις προσεγγίσεις για την αξιολόγηση της δυναμικής συμπεριφοράς των κατασκευών (Davenport, 1995). Όλες περιλαμβάνουν μαθηματικά μοντέλα και ανεμοσήραγγες.

- α. Αεροελαστικό μοντέλο (Aeroelastic modeling): σε αυτήν την προσέγγιση προσομοιώνονται όλες οι κρίσιμες δυναμικές και αεροδυναμικές ιδιότητες του ανέμου και της κατασκευής. Η απόκριση της πραγματικής κατασκευής συνάγεται άμεσα από τις μετρήσεις στο ομοίωμα.
- β. Μοντέλο εκτίμησης δύναμης (Force measurements ή Force balance tests): σε αυτήν την προσέγγιση οι μόνιμες και οι δυναμικές επιδράσεις μελετώνται σε άκαμπτα ομοιώματα, σε ροές υπό κλίμακα. Κατόπιν ένα μαθηματικό μοντέλο της δομής χρησιμοποιείται για να προκύψουν οι αποκρίσεις.

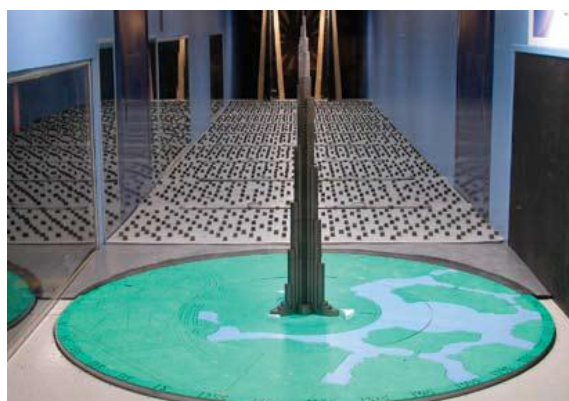
γ. Αναλυτικό μοντέλο (Analytical model): σε αυτήν την προσέγγιση, η δυναμική συμπεριφορά συνάγεται από γενικές πληροφορίες όσον αφορά τις ιδιότητες των τυρβωδών ροών και τα βασικά αεροδυναμικά χαρακτηριστικά.

Η πρώτη προσέγγιση προϋποθέτει την κατανόηση των κανόνων προσομοίωσης υπό κλίμακα (σχετικά με τη μάζα, το μήκος και το χρόνο), χωρίς την απαίτηση εξοικείωσης με ακριβείς μηχανισμούς αεροδυναμικής. Οι δυο τελευταίες μέθοδοι, αντίθετα, προϋποθέτουν την πλήρη κατανόηση του μηχανισμού της αεροδυναμικής διέγερσης.

Σε κατασκευές υψηλών απαιτήσεων, μπορεί να εφαρμοστούν περισσότερες από μια μέθοδοι, ώστε να συγκριθούν τα αποτελέσματά τους. Από τα τελευταία παραδείγματα τέτοιου είδους κατασκευών είναι το Burj Dubai Tower ή Burj Khalifa όπως είναι πλέον γνωστό, ένας ουρανοξύστης στο Dubai, ύψους 829.84m (Σχήμα 1.7).



α. Άποψη του ουρανοξύστη
(<http://burjdubaiphotos.blogspot.gr>)



β. Ομοίωμα για Αεροελαστικό μοντέλο κλίμακας 1:500 (Irwin et al., 2006)



γ. Ομοίωμα για μοντέλο εκτίμησης δύναμης κλίμακας 1:50 (Irwin et al., 2006)

Σχήμα 1.7: Ο ουρανοξύστης Burj Khalifa στο Dubai

Η μελετητική ομάδα εφάρμοσε μετρήσεις και ελέγχους σε ανεμοσήραγγες με ομοιώματα κλίμακας 1:500 και 1:50. Οι μελέτες πραγματοποιήθηκαν τόσο σε Αεροελαστικό μοντέλο, όσο και σε Μοντέλο εκτίμησης δύναμης. Επιπρόσθετα, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις μεγεθών ανεμοπίεσης τοπικά και μελέτες επίδρασης ανέμου στους πεζούς με ομοιώματα κλίμακας 1:250 (Irwin et al., 2006).

Σε κατασκευές τόσο περίπλοκες και πολυδάπανες, όπως ο ουρανοξύστης Burj Khalifa, εγκαθίστανται συνήθως και συστήματα παρακολούθησης της δομικής τους ακεραιότητας.

1.4 Συστήματα παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας ('υγείας') των κατασκευών (Structural Health Monitoring, SHM)

Η παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας των κατασκευών αποτελεί ένα νέο επιστημονικό πεδίο, που σκοπό έχει να παράσχει αξιόπιστα και αντικειμενικά - κατά το δυνατόν - στοιχεία σχετικά με την ασφάλεια και τη λειτουργική ικανότητα πολύπλοκων κατασκευών. Αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο που συμπληρώνει αποτελεσματικά τις παραδοσιακές μεθόδους ελέγχου των κατασκευών, δηλαδή τον επιτόπιο έλεγχο και τις προσομοιώσεις.

Με τον όρο «*Παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας ή 'υγείας' των κατασκευών (Structural Health Monitoring, SHM)*» εννοείται η στρατηγικά σχεδιασμένη διαδικασία της ανίχνευσης και της αναγνώρισης των μεταβολών στα υλικά κατασκευής ή και στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά μιας κατασκευής, οι οποίες υποβαθμίζουν τη λειτουργία της.

Η διαδικασία παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας (SHM) περιλαμβάνει την παρατήρηση του συστήματος της κατασκευής σε διάρκεια χρόνου. Μια σειρά αισθητήρων παρέχουν δεδομένα από περιοδικές μετρήσεις μεγεθών σχετικών με την κινηματική συμπεριφορά της κατασκευής. Από τις μετρήσεις αυτές προκύπτουν τα παράγωγα μεγέθη παραμορφώσεων, τα οποία αφού υποστούν στατιστική επεξεργασία, δίνουν πληροφορίες σχετικά με την τρέχουσα κατάσταση «υγείας» του συστήματος.

Τα συστήματα SHM χρησιμοποιούνται τόσο για παρακολούθηση μακράς διάρκειας, παρέχοντας πληροφορία σχετικά με τη λειτουργική ικανότητα της κατασκευής κατά τη λειτουργία της ή λόγω γήρανσης εξαιτίας των περιβαλλοντικών συνθηκών, όσο και μετά από ακραία φαινόμενα, όπως σεισμοί ή ισχυροί άνεμοι, για ταχεία αναγνώριση, παρέχοντας - σε πραγματικό χρόνο - πληροφορίες σχετικά με την ακεραιότητα της κατασκευής (en.wikipedia).

Ο σχεδιασμός της εγκατάστασης ενός συστήματος SHM περιλαμβάνει τα εξής στάδια (Inaudi et al., 2009):

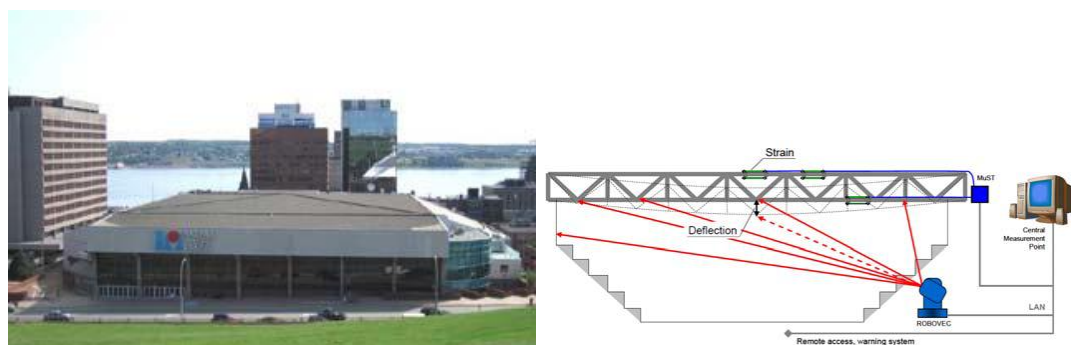
- Αναγνώριση - σε συνεργασία με τους μελετητές - των πιθανών αιτίων και σημείων υποβάθμισης της κατασκευής - σε κανονικές και οριακές συνθήκες - και του συνεπαγόμενου κινδύνου που αυτές επιφέρουν.
- Θέσπιση μεθόδων αντιμετώπισης των αναμενόμενων αιτιών υποβάθμισης και σχεδιασμός του κατάλληλου συστήματος SHM.
- Επιλογή και τοποθέτηση των κατάλληλων αισθητήρων.
- Συλλογή, επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων.

Τα πλεονεκτήματα της εγκατάστασης ενός συστήματος SHM είναι ουσιαστικά:

- ✓ Τα δεδομένα που προκύπτουν από το σύστημα παρακολούθησης είναι - κατά το δυνατόν - αξιόπιστα και αντικειμενικά και χρησιμοποιούνται για να βελτιώσουν την λειτουργία, τη συντήρηση και την επισκευή της κατασκευής. Εξασφαλίζεται έτσι, στο βάθος του χρόνου, η αξιοπιστία και η ασφαλής λειτουργία της επένδυσης.
- ✓ Η σύγκριση της συμπεριφοράς της κατασκευής σε πραγματικές συνθήκες σε σχέση με την πρότυπη συμπεριφορά (βασισμένη σε προσομοιώσεις και ομοιώματα) παρέχει στους μηχανικούς ένα ισχυρό εργαλείο βελτίωσης του σχεδιασμού των κατασκευών, με βάση το ζητούμενο τρίπτυχο ασφάλεια-οικονομία-αντοχή στο χρόνο.

Τα τελευταία χρόνια συστήματα SHM έχουν εγκατασταθεί σε κατασκευές όπως γέφυρες, στάδια, ουρανοξύστες κλπ. Χαρακτηριστικά αναφέρονται:

- ✚ η γέφυρα Ρίο-Αντίρριο, που ενσωματώνει πάνω από 100 αισθητήρες παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο, τόσο της δομής της κατασκευής, όσο και του κυκλοφοριακού φόρτου. Ολοκληρωμένα συστήματα διαχείρισης και παρακολούθησης είναι επίσης εγκατεστημένα σε άλλες γέφυρες ανά τον κόσμο.
- ✚ το Halifax Metro Center στον Καναδά (Σχήμα 1.8) ένα αθλητικό και εκθεσιακό κέντρο - στάδιο, όπου το σύστημα SHM εγκαταστάθηκε για να παρακολουθείται η παραμόρφωση της στέγης του σταδίου σε συνθήκες ισχυρής χιονόπτωσης και σε περιπτώσεις εκδηλώσεων που απαιτούν την ανάρτηση βαρύ εξοπλισμού από την στέγη (π.χ. συναυλίες) (Inaudi et al., 2009)



Σχήμα 1.8: Halifax Metro Center στον Καναδά (Inaudi et al., 2009)

- ✚ Η βασιλική βίλλα στην Monza της Ιταλίας (Royal Villa, Monza) (Σχήμα 1.9), όπου το σύστημα SHM εγκαταστάθηκε κατά τη διάρκεια της ανακαίνισης, λόγω της στατικής πολυπλοκότητας και της αβέβαιης δομικής συμπεριφοράς. Η παρακολούθηση έλαβε χώρα πριν, κατά τη διάρκεια και μετά τις εργασίες και τα στοιχεία από το σύστημα καθοδηγούσαν τις εργασίες ανακαίνισης (Inaudi et al., 2009).



Σχήμα 1.9: Η βασιλική βίλλα στην Monza της Ιταλίας (Inaudi et al., 2009)

Λόγω της φύσης ενός συστήματος SHM, επιβάλλεται ο συνδυασμός πολλών και ετερογενών αισθητήρων. Απαιτείται λοιπόν ένα ολοκληρωμένο σύστημα συλλογής και διαχείρισης των δεδομένων, ώστε να εξασφαλίζεται η ορθή συσχέτιση και άρα ερμηνεία των δεδομένων. Τον ρόλο αυτόν παίζουν τα Ολοκληρωμένα Συστήματα Παρακολούθησης (Automatic Deformation Monitoring Systems) (§2.4).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Μέθοδοι Παρακολούθησης Δυναμικής Συμπεριφοράς Τεχνικών Έργων

Σε αυτό το Κεφάλαιο παρουσιάζονται οι μέθοδοι παρακολούθησης της δυναμικής συμπεριφοράς κατασκευών. Αρχικά γίνεται αναφορά στις παραμέτρους που καθορίζουν την επιλογή της μεθόδου και των οργάνων και στη συνέχεια παρουσιάζεται συνοπτικά η κάθε μέθοδος. Αναλυτικότερα παρουσιάζονται οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία, δηλαδή οι Ρομποτικοί Γεωδαιτικοί Σταθμοί και τα Radar Μικροκυματικής Συμβολομετρίας. Λεπτομερέστερη αναφορά για τα κλισίμετρα γίνεται στο Κεφάλαιο 3. Τέλος, γίνεται αναφορά και στα Ολοκληρωμένα Συστήματα Παρακολούθησης.

2.1 Γενικά

Πολυάριθμα ατυχήματα και καταστροφές αποδεικνύουν τον κίνδυνο που συνοδεύει αφενός τα μεγάλα τεχνικά έργα και αφετέρου τις φυσικές δομές και σχηματισμούς. Έτσι, η παρακολούθηση της συμπεριφοράς των κατασκευών κρίνεται πια απαραίτητη, προκειμένου να εξασφαλίζεται η ορθή λειτουργία, η ασφάλεια και η βιωσιμότητά τους. Με τον όρο παρακολούθηση εννοείται η συλλογή δεδομένων που αφορούν κινηματικά χαρακτηριστικά μιας κατασκευής ή περιοχής με τρόπο περιοδικό και αυτοματοποιημένο. Καθώς διατίθενται πληθώρα αισθητήρων και μεθοδολογιών, η επιλογή, κάθε φορά, του κατάλληλου συστήματος εξαρτάται από παράγοντες όπως:

- ✚ Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τα υλικά κατασκευής, που καθορίζουν τις διαστάσεις και τα κινηματικά χαρακτηριστικά της κατασκευής ή της περιοχής μελέτης. Από αυτά εξαρτώνται το οπτικό πεδίο του οργάνου, η απαιτούμενη συχνότητα δειγματοληψίας και το εύρος μέτρησης.
- ✚ Την επιλογή κατάλληλων σημείων παρατήρησης, ώστε να περιγράφεται επαρκώς η κίνηση του αντικειμένου μελέτης. Η επιλογή του κατάλληλου αισθητήρα εξαρτάται από τη δυνατότητα πρόσβασης και τοποθέτησης των αισθητήρων στα σημεία αυτά.
- ✚ Την ευρύτερη τοπογραφία της περιοχής, που καθορίζει τις ορατότητες, την προσβασιμότητα στο αντικείμενο μελέτης, καθώς και το βεληνεκές του οργάνου παρατήρησης.
- ✚ Τη ζητούμενη διάρκεια παρακολούθησης, τις καιρικές και ατμοσφαιρικές συνθήκες καθώς και την ώρα που θα πραγματοποιηθεί η καταγραφή, που καθορίζουν την επιλογή των κατάλληλων οργάνων και μεθόδων.

- ✚ Τη ζητούμενη ακρίβεια των παρατηρήσεων.

Γενικά, οι μέθοδοι και τα όργανα παρακολούθησης συμπεριφοράς των κατασκευών μπορούν να διακριθούν σε δυο μεγάλες κατηγορίες: τις τοπογραφικές μεθόδους και τις μεθόδους πειραματικής μηχανικής.

2.2 Τοπογραφικές μέθοδοι

Παρόλο που οι τοπογραφικές μέθοδοι δεν αποτελούσαν τον παραδοσιακό τρόπο παρακολούθησης της δυναμικής συμπεριφοράς των κατασκευών, η χρήση τους, τόσο αυτόνομα όσο και σε συνδυασμό με τους κλασσικούς γεωτεχνικούς αισθητήρες (επιταχυνσιόμετρα, κλισίμετρα, οπτικές ίνες κτλ.), μελετάται και σταδιακά γενικεύεται (Yigit et al., 2010), (Gikas et al., 2008), (Erol, 2010) κτλ. Το μεγάλο πλεονέκτημα των τοπογραφικών μεθόδων είναι ότι, σε αντίθεση με τους γεωτεχνικούς αισθητήρες της πειραματικής μηχανικής, παρέχουν άμεσα το ζεύγος [χρόνος - θέση σε προκαθορισμένο σύστημα αναφοράς] για τα σημεία παρακολούθησης. Κατά συνέπεια, μεγέθη όπως μετακίνηση, ταχύτητα, επιτάχυνση εξάγονται άμεσα, χωρίς τη χρήση πολύπλοκων μαθηματικών μεθόδων.

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται οι Ρομποτικοί Γεωδαιτικοί Σταθμοί (RTS), το Δορυφορικό Σύστημα Παρακολούθησης (GPS), το Επίγειο Μικροκυματικό Radar (GB-RAR), ο Επίγειος Σαρωτής Laser (Laser Scanner) και τα συστήματα Βιντεομετρίας (ανάλυσης εικόνας - βίντεο).

2.2.1 Ρομποτικός Γεωδαιτικός Σταθμός (RTS)

Οι Ρομποτικοί Γεωδαιτικοί Σταθμοί (Robotic Total Station, RTS) αποτελούν εξέλιξη των απλών γεωδαιτικών σταθμών. Τα ξεχωριστά τους χαρακτηριστικά είναι η δυνατότητά τους να ανιχνεύουν και να παρακολουθούν έναν κινούμενο στόχο και ο τηλεχειρισμός τους. Αυτά τα χαρακτηριστικά ενίσχυσαν τη χρήση τους στην κατασκευή και παρακολούθηση τεχνικών έργων, αλλά και σε τομείς όπως η μετρολογία, η γεωργία (καθοδήγηση αγροτικών μηχανημάτων) κτλ. Τελευταία χρησιμοποιούνται και στην παρακολούθηση δυναμικής συμπεριφοράς κατασκευών (κτιρίων, γεφυρών, φραγμάτων κλπ. (Ψιμούλης, 2005), (Μπακογιάννης, 2010), (Σπυράκης, 2011), (Gikas et al., 2008) κ.ά.).



Σχήμα 2.1: Τρεις χαρακτηριστικοί ρομποτικοί γεωδαιτικοί σταθμοί. Από αριστερά προς τα δεξιά διακρίνονται οι: Leica TPS1200 (www.stroygeocenter.ru), Topcon GPT9000 (www.topconuniversity.com), Trimble S8 (www.hlse.com.au)

■ Αρχές λειτουργίας

Η βασική αρχή λειτουργίας των ρομποτικών γεωδαιτικών σταθμών όσον αφορά τη μέτρηση και την καταγραφή γωνιών και μηκών είναι ίδια με αυτή των κοινών γεωδαιτικών σταθμών. Οι ξεχωριστές τους ιδιότητες έγκεινται στην ενσωμάτωση τριών διαφορετικών χαρακτηριστικών:

- στην αυτόματη περιστροφή του τηλεσκοπίου του οργάνου κατά τον πρωτεύοντα και δευτερεύοντα άξονα,
- στην αυτόματη αναγνώριση και παρακολούθηση στόχων (Automatic Target Recognition, ATR) και
- στον τηλεχειρισμό του οργάνου.

Η αυτόματη περιστροφή του τηλεσκοπίου υλοποιείται με δύο διαφορετικές τεχνολογίες. Η πρώτη αποτελεί ευρεσιτεχνία της εταιρείας Trimble και είναι γνωστή με το όνομα MagDrive®. Η βασική αρχή λειτουργίας στηρίζεται στη χρήση ενός ομοαξονικά τοποθετημένου “τυμπάνου” με ενσωματωμένους μαγνήτες, το οποίο περιστρέφεται γύρω από ένα πηνίο σταθερά συνδεδεμένο με τη βάση του οργάνου. Η δεύτερη τεχνολογία εισήχθη και χρησιμοποιείται από τις εταιρείες Topcon και Leica Geosystems. Βασίζεται στη χρήση σερβομηχανισμών (servomotors), οι οποίοι είναι ηλεκτρικοί κινητήρες με δυνατότητα πλήρους ελέγχου της ταχύτητας και της γωνίας περιστροφής του άξονά τους (Νησωτάκης, 2008).

Ο εντοπισμός του πρίσματος (αναγνώριση και παρακολούθηση, ATR) επιτυγχάνεται με τη βοήθεια αλγορίθμων, οι οποίοι διαφοροποιούνται ανάλογα με την τεχνική της αναγνώρισης. Έτσι, η εταιρεία Leica Geosystems χρησιμοποιεί σύστημα ενεργητικής αναγνώρισης στόχου. Το όργανο εκπέμπει μια αόρατη ακτίνα laser, η οποία ανακλάται από το πρίσμα και επιστρέφει στο όργανο ομοαξονικά με τη διεύθυνση εκπομπής της, όπου προσπίπτει σε μια διάταξη CCD². Για την έναρξη της διαδικασίας απαιτείται η χειροκίνητη τοποθέτηση του σταυρονήματος μέσα στο πρίσμα από το χειριστή του οργάνου. Κατόπιν εκτελείται σπυροειδής σάρωση του στόχου διάρκειας 2-4 sec. Το κέντρο του στόχου εντοπίζεται από την ισχύ του σήματος που εκπέμπεται και επιστρέφει στο όργανο. Κατά τη λειτουργία παρακολούθησης στόχου (tracking), η διαδικασία αναγνώρισης στόχου επαναλαμβάνεται αυτοματοποιημένα, ενώ για τον ακριβέστερο αναλυτικό υπολογισμό των μετρημένων στοιχείων, εμπλέκονται στη διαδικασία ειδικοί αλγόριθμοι παρεμβολής που στηρίζονται στην αρχή λειτουργίας του φίλτρου Kalman. Οι αλγόριθμοι αυτοί διακρίνονται με βάση τον χονδρικό εντοπισμό και τον ακριβή εντοπισμό του πρίσματος (Μπακογιάννης, 2010).

Στο σύστημα παθητικής αναγνώρισης, το όργανο λειτουργεί πλέον ως δέκτης μιας ακτινοβολίας που εκπέμπεται από το στόχο (ενεργός στόχος). Αξίζει να αναφερθεί ότι στα παθητικά συστήματα, η ακτίνα δεν εκπέμπεται ομοαξονικά με τον άξονα σκόπευσης, αλλά παρουσιάζει μια εκκεντρότητα ως προς αυτόν, με αποτέλεσμα να μην επιτρέπεται η λειτουργία του συστήματος σε δεύτερη θέση τηλεσκοπίου.

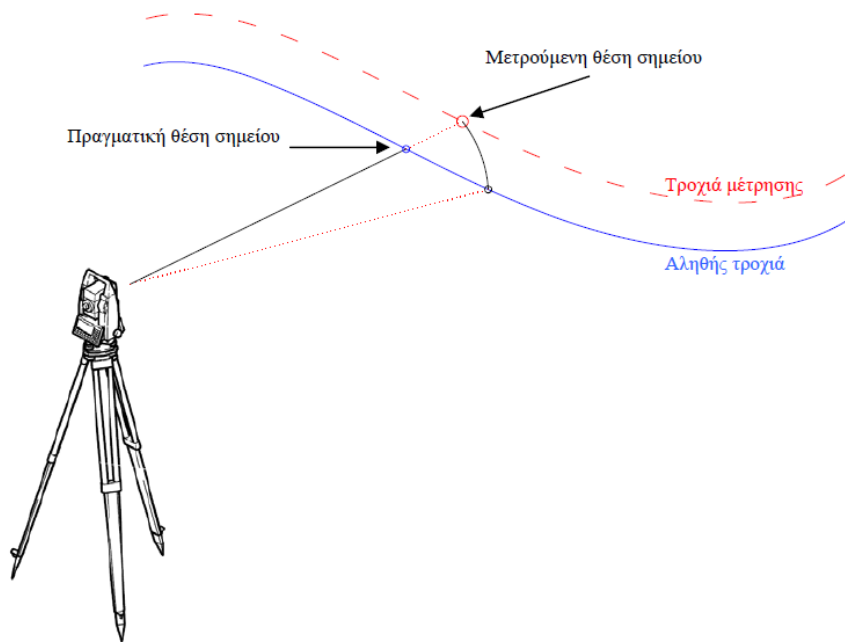
■ Πηγές σφαλμάτων

Οι πηγές σφαλμάτων που υπεισέρχονται στις μετρήσεις του RTS είναι αυτές που προκαλούν σφάλματα και στις μετρήσεις με έναν κλασσικό γεωδαιτικό σταθμό, όπως κέντρωσης, οριζοντίωσης, διάθλασης, καταφώτου, καμπυλότητας της γης κτλ.

² "Ο ανιχνευτής **charge-coupled device (CCD)**, που μεταφράζεται ως «συσκευή (ή διάταξη) συζευγμένου φορτίου», είναι ένας καταχωρητής ολίσθησης, μια πολύ μικρή πλάκα πάνω στην οποία βρίσκονται διατεταγμένα έως και μερικά εκατομμύρια στοιχεία ενός ημιαγωγίου υλικού ευαίσθητου στο φως (συνήθως πυριτίου) και χρησιμεύει για τη λήψη ειδώλων (φωτογραφιών και βίντεο). Όταν ο ανιχνευτής εκτίθεται σε μια φωτεινή πηγή, σε καθένα απ' αυτά τα στοιχεία απελευθερώνονται ηλεκτρικά φορτία (ηλεκτρόνια) σε ευθεία αναλογία με τα φωτόνια που πέφτουν πάνω στο στοιχείο. Μετά την έκθεση στο φως, ο αριθμός των συγκεντρωμένων ηλεκτρονίων στο κάθε στοιχείο καθορίζει τη φωτεινότητα του αντίστοιχου σημείου πάνω στην οθόνη του υπολογιστή με τον οποίο είναι συνδεδεμένος ο ανιχνευτής CCD. Έτσι η φωτογραφημένη εικόνα ανασυντίθεται σημείο προς σημείο στην οθόνη." (el.wikipedia)

Επιπλέον, στις μετρήσεις των ρομποτικών γεωδαιτικών σταθμών υπεισέρχονται:

- σφάλματα που προέρχονται από τη λειτουργία των μηχανισμών αυτοματοποίησης της λειτουργίας του οργάνου (σερβομηχανισμοί, σύστημα αυτόματης αναγνώρισης στόχου).
- το σφάλμα της χρονικής διαφοράς μεταξύ της μέτρησης γωνίας (γίνεται ακαριαία) και της μέτρησης απόστασης (κατά κανόνα χρειάζεται περισσότερο χρόνο για να ολοκληρωθεί), που οδηγεί στην καταγραφή λανθασμένου ζεύγους γωνίας-μήκους και κατά συνέπεια, στον λανθασμένο υπολογισμό της θέσης του σημείου (Σχήμα 2.2). Το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται όταν ο στόχος είναι σε συνεχή κίνηση. Στα σύγχρονα συστήματα (όπως το Leica TPS1200) το πρόβλημα έχει περιοριστεί σημαντικά.



Σχήμα 2.2: Σχηματική αναπαράσταση του σφάλματος της χρονικής διαφοράς μέτρησης του ζεύγους γωνία-απόσταση

- σφάλματα που παρουσιάζονται εξαιτίας: της παρεμβολής εμποδίων ανάμεσα στο όργανο και στο στόχο, με αποτέλεσμα την "απώλεια" του στόχου από το όργανο, της ηλεκτρονικής οριζοντίωσης και των εμπλεκόμενων αλγορίθμων και της εξασθένησης του σήματος παρακολούθησης του στόχου, λόγω απόστασης.
- σφάλματα λόγω της αβεβαιότητας ταύτισης του κέντρου του σταυρονήματος στο κέντρο του ανακλαστήρα με το σύστημα ATR, που εξαρτάται από την ποιότητα της διάταξης CCD, τις δυνατότητες των σερβομηχανισμών, την απόδοση του σχετικού αλγορίθμου, τον τύπο του ανακλαστήρα και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Η αβεβαιότητα αυτή κυμαίνεται από $\pm 2\text{mm}$ έως $\pm 5\text{mm}$ (Σπυράκης, 2011).

- Ακόμα, οι πηγές εξωτερικής ακτινοβολίας και οι αντανakλάσεις μπορούν να επηρεάσουν σε μεγάλο βαθμό τη διαδικασία των μετρήσεων (Μπακογιάννης, 2010).

■ Πλεονεκτήματα – Περιορισμοί

Τα βασικά πλεονεκτήματα των ρομποτικών γεωδαιτικών σταθμών είναι τα εξής (Σπυράκης, 2011):

- Είναι κατάλληλα για ακριβή παρακολούθηση, αφού μπορούν να καταγράψουν με ακρίβεια (αβεβαιότητες από $\pm 5-10\text{mm}$) το εύρος ταλάντωσης, ακόμα και για ταλαντώσεις της τάξης του 1cm .
- Μπορούν να προσδιορίσουν με ακρίβεια συχνότητες ταλάντωσης από 1Hz - 3Hz περίπου.

Οι περιορισμοί στη χρήση των ρομποτικών γεωδαιτικών σταθμών, εκτός από αυτούς που απορρέουν από τις πηγές σφαλμάτων, είναι και οι εξής:

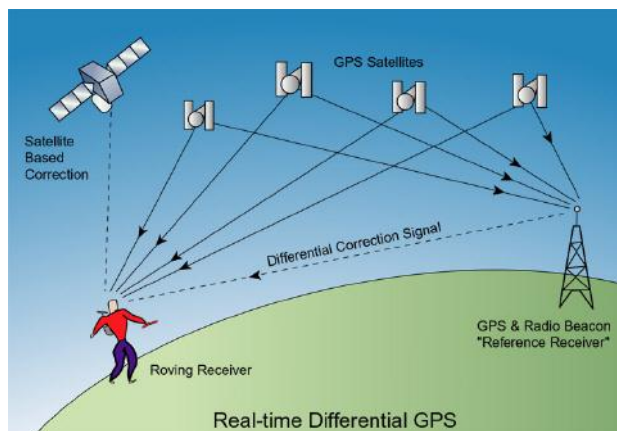
- Επηρεάζονται από τις καιρικές συνθήκες.
- Είναι αναγκαστική η τοποθέτηση πρίσματος στο σημείο ελέγχου και η ύπαρξη ανεμπόδιστης οπτικής επαφής μεταξύ τους. Η απόσταση οργάνου-πρίσματος δεν πρέπει να υπερβαίνει τα $500-700\text{m}$ (Δασκαλάκης et al., 2008).
- Δεν είναι κατάλληλοι για παρακολούθηση κατασκευών με υψηλές συχνότητες ταλάντωσης, ακόμα και με κατάλληλη προσθήκη λογισμικού, οπότε και αυξάνεται η συχνότητα καταγραφής τους έως και 10Hz (Σπυράκης, 2011).

2.2.2 Δορυφορικό Σύστημα Εντοπισμού (GNSS)

Το GNSS (Global Navigation Satellite System) είναι ένα δορυφορικό σύστημα τρισδιάστατου εντοπισμού θέσης σε παγκόσμια κλίμακα. Το αρχικό σύστημα (GPS) αναπτύχθηκε και λειτουργεί υπό τον έλεγχο του Υπουργείου Αμύνης των Η.Π.Α.. Καθώς πλέον λειτουργούν και εναλλακτικά συστήματα όπως το ρώσικο GLONASS και το ευρωπαϊκό Galileo, έχει καθιερωθεί να αναφερόμαστε στο σύνολο ως GNSS (Global Navigation Satellite System). Το σύστημα αποτελείται από τρία τμήματα: το δορυφορικό, το τμήμα ελέγχου και το τμήμα των χρηστών. Χρησιμοποιείται ευρέως σε κάθε είδους τοπογραφικές - γεωδαιτικές εργασίες, ενώ τα τελευταία χρόνια η χρήση του έχει επεκταθεί και σε εφαρμογές παρακολούθησης δυναμικής συμπεριφοράς κατασκευών.

Η αρχή λειτουργίας του GNSS βασίζεται στις μετρήσεις κώδικα και φάσης του φέροντος σήματος που λαμβάνουν οι επίγειοι δέκτες (2 συνήθως) από τους δορυφόρους. Με απαίτηση μετρήσεων από τους δέκτες με τουλάχιστον 4 κοινούς

δορυφόρους, το σύστημα προσδιορίζει την σχετική θέση του ενός δέκτη ως προς τον άλλο με ακρίβεια μερικών χιλιοστών του μέτρου.



Σχήμα 2.3: Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου του σχετικού κινηματικού εντοπισμού (<http://www.directionsmag.com>)

Για τις εφαρμογές παρακολούθησης δυναμικής συμπεριφοράς κατασκευών, η κατάλληλη τεχνική μετρήσεων είναι ο σχετικός κινηματικός εντοπισμός (με επίλυση είτε σε πραγματικό χρόνο (real time kinematic) είτε εκ των υστέρων (post-processed kinematic)) (Σχήμα 2.3). Ο ένας δέκτης (base) παραμένει σταθερός σε γνωστό σημείο αναφοράς. Οι διορθώσεις που προκύπτουν στο σήμα του, λόγω της γνωστής του θέσης, χρησιμοποιούνται για να βελτιώσουν τη θέση του κινούμενου δέκτη (rover). Η απόσταση μεταξύ τους πρέπει να είναι της τάξης των μερικών δεκάδων μέτρων, ώστε να υπάρχει ισοδυναμία στις διορθώσεις.

Οι μετρήσεις με GNSS παρέχουν τη θέση του δέκτη ως αποτέλεσμα επεξεργασίας των μετρήσεων κώδικα και φάσης του φέροντος σήματος. Με δεδομένη τη θέση, παράγωγα μεγέθη, όπως η μετατόπιση, η ταχύτητα, η επιτάχυνση υπολογίζονται μέσω απλών μαθηματικών σχέσεων. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την υψηλή συχνότητα δειγματοληψίας (πρόσφατα έως και 100Hz) των δεκτών, καθιστά το σύστημα GNSS ένα χρήσιμο εργαλείο σε εφαρμογές παρακολούθησης δυναμικής συμπεριφοράς κατασκευών. Οι μετρήσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν ανεξαρτήτως καιρικών συνθηκών και ώρας και χωρίς να υπάρχει απαίτηση ορατότητας μεταξύ των δεκτών. Δεν μπορούν όμως να πραγματοποιηθούν σε κλειστούς χώρους, καθώς απαιτείται ορατότητα προς τους δορυφόρους. Επίσης, σε πολλές περιπτώσεις παρουσιάζονται πρακτικοί περιορισμοί όσον αφορά τις θέσεις εγκατάστασης των δεκτών, λόγω ιδιομορφιών των κατασκευών. Επιπρόσθετα, υπάρχουν μια σειρά από παράγοντες που υποβιβάζουν την ακρίβεια των μετρήσεων όπως είναι η κακή γεωμετρία των δορυφόρων, η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, σφάλματα χρονομέτρων, συνθήκες που προκαλούν πολλαπλές διαδρομές στο σήμα (multipath error), οι ιονοσφαιρικές και τροποσφαιρικές επιδράσεις κ.ά. Οι παράγοντες αυτοί υποβιβάζουν την ακρίβεια

του συστήματος, κυρίως σε περιπτώσεις μόνιμων και ημι-μόνιμων παραμορφώσεων (Yigit et al., 2010).

2.2.3 Επίγειο Radar Πραγματικού / Συνθετικού Ανοιγματος (Ground Based Real / Synthetic Aperture Radar)

Το Επίγειο Radar Πραγματικού ή Συνθετικού Ανοιγματος (Ground Based Real / Synthetic Aperture Radar³, GB-RAR/SAR) βασίζει την λειτουργία του στις αρχές της μικροκυματικής συμβολομετρίας. Χρησιμοποιείται σε εφαρμογές παρακολούθησης συμπεριφοράς κατασκευών, τόσο υψηλής όσο και χαμηλής δυναμικής. Συνδυάζει μεγάλη ακρίβεια (μεγαλύτερη του mm), μεγάλες συχνότητες δειγματοληψίας και έχει το πλεονέκτημα ότι δεν απαιτείται προσβασιμότητα στο σημείο μελέτης.

Τα επίγεια Radar διαχωρίζονται σε δυο τύπους:

- ✚ Το Radar Πραγματικού Ανοιγματος (RAR), που διακρίνει μεταβολές στη θέση κατά τη μία διάσταση, ακτινικά και
- ✚ Το Radar Συνθετικού Ανοιγματος (SAR), που διακρίνει μεταβολές στη θέση σε δύο διαστάσεις.

Οι διαφορές μεταξύ των δυο τύπων εξηγούνται σε επόμενη παράγραφο.

Τα επίγεια συστήματα μικροκυματικών radar βρίσκουν εφαρμογή σε ποικίλες εφαρμογές, όπως παρακολούθηση τεχνικών έργων (κτίρια, γέφυρες, φράγματα), προσδιορισμό ιδιοσυχνοτήτων κατασκευών, παρακολούθηση ηφαιστειών, κατολισθήσεων κτλ.

■ Αρχή λειτουργίας

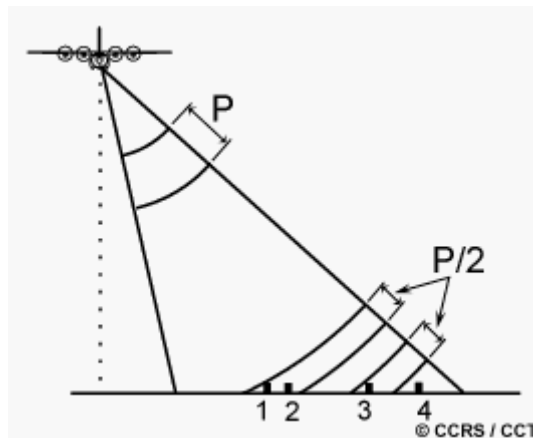
Η βασική αρχή της μικροκυματικής συμβολομετρίας (microwave interferometry) είναι η ανίχνευση της έντασης και της φάσης ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος που εκπέμπεται από έναν αισθητήρα (κεραία του radar) και ανακλάται από το αντικείμενο μελέτης (Rödelsperger et al., 2010). Το radar διαθέτει και έναν δέκτη που προσλαμβάνει την ανακλώμενη ακτινοβολία. Με τον υπολογισμό του χρόνου μετάδοσης και επιστροφής του ηλεκτρομαγνητικού κύματος ανιχνεύεται η θέση του αντικείμενου στο χώρο. Αν το αντικείμενο κινείται, παρατηρείται μια ισοδύναμη αλλαγή στη συχνότητα των ραδιοκυμάτων λόγω του φαινομένου

³ Στην βιβλιογραφία κάποιες φορές αναφέρεται και ως Terrestrial Aperture Radar .

Doppler⁴, η οποία και ανιχνεύεται από το radar. Με τον τρόπο αυτό προσδιορίζεται η ακτινική (κατά τη διεύθυνση σκόπευσης) μετατόπιση της θέσης του αντικειμένου.

■ Χαρακτηριστικά και τεχνικές μετρήσεων radar

A. Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά των μετρήσεων με συστήματα radar είναι η *ακτινική ανάλυση* (*range resolution*) που είναι η ελάχιστη ακτινική απόσταση μεταξύ δυο αντικειμένων, κατά μήκος του σκοπευτικού άξονα του radar, ώστε αυτά να διαχωρίζονται. Η απόσταση αυτή (*range bin*) εξαρτάται από το μήκος του εκπεμπόμενου από το radar παλμού και πρέπει να είναι το μισό τουλάχιστον του μήκους του εκπεμπόμενου παλμού. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4, τα αντικείμενα 1 και 2 δεν είναι διαχωρίσιμα, ενώ τα αντικείμενα 3 και 4 είναι. Ο βαθμός της ακτινικής ανάλυσης εξαρτάται από το πλάτος του παλμού (τη διάρκεια εκπομπής του), από τον τύπο και το μέγεθος των στόχων και από την απόδοση του δέκτη (Ανδρουλάκη, 2011).



Σχήμα 2.4: Ακτινική ανάλυση (<http://www.nrcan.gc.ca>)

B. Στις μετρήσεις με radar χρησιμοποιούνται ευρέως δύο τεχνικές επεξεργασίας σήματος, οι οποίες παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω:

i. Η Συμβολομετρία (Interferometry) (IBIS-S Controller Software User Manual, 2009).

Συμβολομετρία είναι μια τεχνική radar που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της μετακίνησης συγκρίνοντας τις φάσεις των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που ανακλώνται από το αντικείμενο σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Οι διαφορές των φάσεων ($\Delta\phi$) υπολογίζονται σε κάθε φατνίο

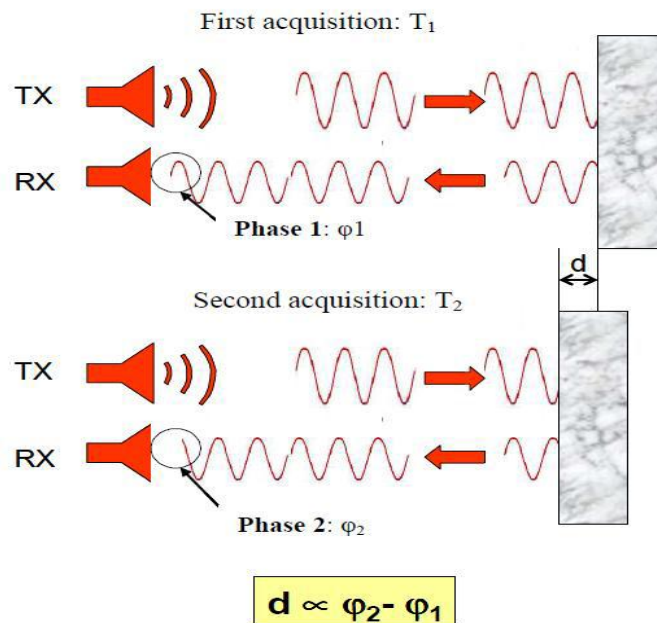
⁴ Φαινόμενο Doppler ονομάζεται η παρατηρούμενη αλλαγή στη συχνότητα και το μήκος κύματος ενός κύματος από παρατηρητή που βρίσκεται σε σχετική κίνηση με την πηγή των κυμάτων.

ακτινικής απόστασης (range bin) και συνδέονται με τη μετακίνηση (d) με τη σχέση:

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

όπου λ : το μήκος κύματος.

Η αρχή της συμβολομετρίας απεικονίζεται στο Σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5: Τεχνική συμβολομετρίας (IBIS-S Controller Software User Manual, 2009)

Σημειώνεται ότι ο παραπάνω τύπος δίνει την μετατόπιση κατά μήκος του σκοπευτικού άξονα του radar. Για τον υπολογισμό της ανηγμένης μετακίνησης κατά τη διεύθυνση κίνησης του αντικειμένου απαιτείται η γνώση της κατεύθυνσης κίνησης της κατασκευής.

- ii. Η τεχνική διαδοχικής ενίσχυσης συνεχούς σήματος (Stepped Frequency - Continuous Wave, SF-CW) (Coppi et al., 2010).

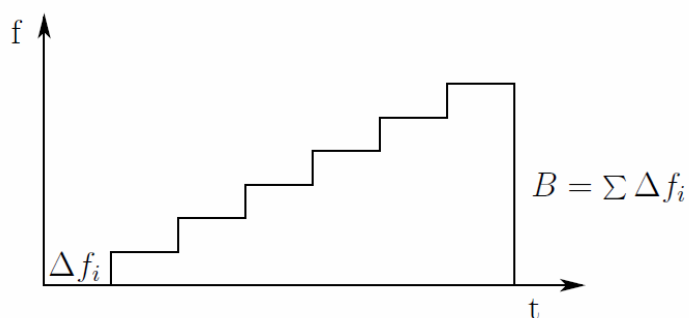
Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται για την ανίχνευση της θέσης διαφορετικών στόχων κατά μήκος του σκοπευτικού άξονα του radar και συνίσταται στη μετάδοση σειρών ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μεγάλης διάρκειας (Continuous Wave) σε διαφορετικές συχνότητες (Stepped Frequency). Πιο συγκεκριμένα, πρόκειται για μεταβολή του εύρους των συχνοτήτων με στόχο την αύξηση της ακτινικής ανάλυσης (μείωση του όρου ΔR). Δεδομένου ότι η ακτινική ανάλυση (ΔR) συνδέεται με το εύρος συχνοτήτων (B) μέσω της σχέσης:

$$\Delta R = \frac{c}{2B} \quad (2.2)$$

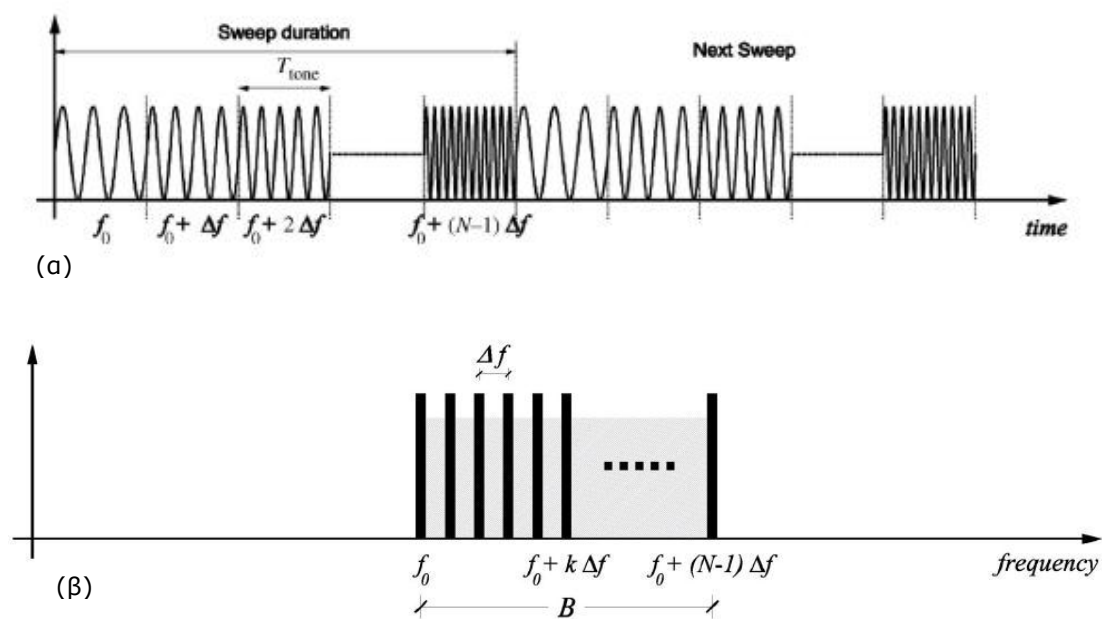
όπου c η ταχύτητα του φωτός, η τεχνική επιτυγχάνει ένα εύρος συχνοτήτων

$$B = (N - 1)\Delta f \quad (2.3)$$

μέσω της μετάδοσης συνεχόμενων ομάδων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων N παλμών η κάθε μία, των οποίων η συχνότητα αυξάνεται γραμμικά κατά σταθερή ποσότητα Δf , όπως φαίνεται στα Σχήματα 2.6 και 2.7.



Σχήμα 2.6: Διαδοχική ενίσχυση συνεχούς σήματος (Stepped Frequency - Continuous Wave, SF-CW) (Marambio et al., 2009)



Σχήμα 2.7: Αναπαράσταση της τεχνικής SF-CW (α). στο πεδίο του χρόνου και (β). στο πεδίο των συχνοτήτων (Corpi et al., 2010)

■ Τύποι Μικροκυματικών Radar

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, τα επίγεια radar μικροκυματικής συμβολομετρίας διαχωρίζονται σε δυο τύπους :

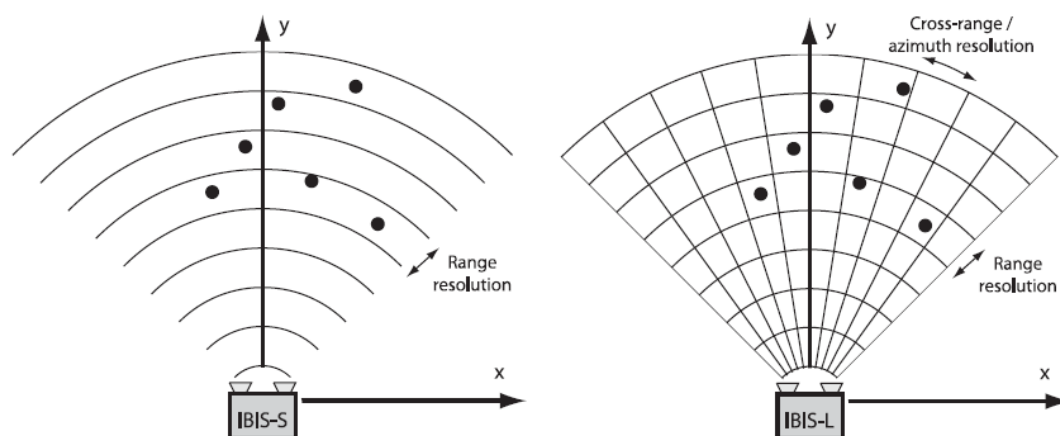
- A. Το Radar Πραγματικού Ανοίγματος (RAR) (Σχήμα 2.8.α), που διακρίνει μεταβολές στη θέση κατά τη μία διάσταση, ακτινικά. Αντικείμενα των οποίων η απόσταση είναι μικρότερη από την ακτινική ανάλυση (βρίσκονται δηλαδή στο ίδιο range bin) επιστρέφουν συνολική ακτινοβολία και αναγνωρίζονται ως ένα. (Σχήμα 2.9.α).
- B. Το Radar Συνθετικού Ανοίγματος (SAR) (Σχήμα 2.8.β) διακρίνει μεταβολές στη θέση σε δύο διαστάσεις. Το radar κινείται κατά μήκος του άξονα x, κάθετα στην εκπεμπόμενη ακτίνα (Line Of Site, LOS) (Σχήμα 2.9.β), καθιστώντας το ικανό να διαχωρίζει αντικείμενα που βρίσκονται στην ίδια απόσταση, αλλά σε διαφορετικό αζιμούθιο.



α. Radar Πραγματικού Ανοίγματος (RAR)

β. Radar Συνθετικού Ανοίγματος (SAR)

Σχήμα 2.8: Επίγεια Μικροκυματικά Radar της εταιρίας IDS (Rödelsperger et al., 2010)



α. Radar Πραγματικού Ανοίγματος (RAR)

β. Radar Συνθετικού Ανοίγματος (SAR)

Σχήμα 2.9: Ανάλυση Μικροκυματικών Radar (Rödelsperger et al., 2010)

■ Πηγές σφαλμάτων

Η βασική πηγή σφαλμάτων στις μετρήσεις με το radar προκύπτει από την επίδραση του μέσου διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, δηλαδή της *ατμόσφαιρας*. Σφάλματα λόγω διάθλασης και διάχυτης αντανάκλασης αλλοιώνουν σημαντικά τις μετρήσεις. Επιπλέον, οι αλλαγές στις ατμοσφαιρικές συνθήκες (και ιδιαίτερως η υγρασία) επηρεάζουν σημαντικά τις μετρήσεις. Για μικρές αποστάσεις (της τάξης των 300-500m) και για παρακολούθηση δυναμικών φαινομένων (μικρής διάρκειας παρατήρηση) μπορεί να γίνει η παραδοχή ότι οι ατμοσφαιρικές συνθήκες δεν παρουσιάζουν σημαντικές διακυμάνσεις (Rödelsperger et al., 2010). Για μεγαλύτερες αποστάσεις ή για παρακολούθηση στατικών φαινομένων (μεγάλης διάρκειας παρατήρηση) η επίδραση της ατμόσφαιρας δεν μπορεί να αγνοηθεί.

Σφάλματα στις μετρήσεις του radar υπεισέρχονται επίσης λόγω των ανακλάσεων των ραδιοκυμάτων σε ανεπιθύμητα αντικείμενα, όπως η βροχή, το χιόνι, τα πουλιά κ.ο.κ. ή αντικείμενα πάνω στην κατασκευή (π.χ. κιγλιδώματα), τα οποία όμως εμφανίζουν διαφορετική κινηματική συμπεριφορά, αλλοιώνοντας έτσι τις μετρήσεις που αφορούν την κυρίως κατασκευή. Τα σφάλματα αυτά χαρακτηρίζονται με τον όρο *ανεπιθύμητες επιστροφές* (*clutter*). Σε περιπτώσεις σταθερών ανεπιθύμητων αντικειμένων, οι ανεπιθύμητες επιστροφές απομακρύνονται με συγκεκριμένες τεχνικές (μετάθεση του κέντρου του πολικού διαγράμματος φάσης). Η αντιμετώπιση περιπτώσεων με κινούμενα ανεπιθύμητα αντικείμενα είναι πιο πολύπλοκη και απαιτεί την ανάλυση των χρονοσειρών στο πεδίο του χρόνου, των συχνοτήτων και της χωρικής κατανομής των δεδομένων (Luzi et al., 2012).

■ Πλεονεκτήματα-Περιορισμοί

Τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί των μετρήσεων με τα επίγεια συστήματα radar σε σχέση με άλλες μεθόδους παρακολούθησης (ταχυμετρικές, κλισίμετρο κτλ.) μπορούν να συνοψιστούν στα εξής (Rödelsperger et al., 2010):

A. Πλεονεκτήματα

- Δεν απαιτείται προσβασιμότητα στο σημείο ελέγχου, καθιστώντας τα πολύ χρήσιμα για δύσβατες ή άβατες περιοχές (κατολισθήσεις, ηφαιστεια).
- Είναι δυνατή η ταυτόχρονη παρακολούθηση όλων των στόχων μέσα στην περιοχή μελέτης, αντί για μεμονωμένους στόχους.
- Παρέχουν ανεξαρτησία από τις καιρικές συνθήκες και την ώρα της ημέρας.
- Παρέχουν υψηλή ακρίβεια μετρήσεων και χωρική ανάλυση (κυρίως στα συστήματα RAR), σε συνδυασμό με υψηλές συχνότητες καταγραφής.

B. Περιορισμοί

- ✘ Οι περιορισμοί λόγω των σφαλμάτων που υπεισέρχονται στις μετρήσεις (ατμόσφαιρα, ανεπιθύμητες επιστροφές).
- ✘ Οι σχετικές μετατοπίσεις προκύπτουν κατά τη μία (RAR) ή τις δύο διαστάσεις (SAR).
- ✘ Οι σχετικές μετατοπίσεις προκύπτουν κατά την ακτινική διεύθυνση (LOS). Για να γίνει η αναγωγή στον επιθυμητό άξονα χρειάζεται η γνώση της διεύθυνσης κίνησης της κατασκευής και βεβαίως της γεωμετρίας παρατήρησης.
- ✘ Τα αντικείμενα που απέχουν απόσταση μικρότερη από την ακτινική ανάλυση του κάθε συστήματος radar, επιστρέφουν συνολική ακτινοβολία και αναγνωρίζονται ως ένα, με αποτέλεσμα την πιθανή εισαγωγή σφαλμάτων στις μετρήσεις, ειδικά στην περίπτωση περίπλοκης κατασκευής.

2.2.4 Επίγειος σαρωτής Laser (Laser Scanner)

Οι 3D σαρωτές laser είναι συσκευές υψηλής τεχνολογίας που έχουν την ικανότητα να αποτυπώνουν με ακρίβεια την επιφάνεια των αντικειμένων και να παρέχουν σε πραγματικό χρόνο τρισδιάστατα δεδομένα στο χρήστη. Χρησιμοποιούν lasers μήκους κύματος στο ορατό και στο υπέρυθρο φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Ανάλογα με τον τρόπο υπολογισμού της απόστασης με τη χρήση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, οι σαρωτές διακρίνονται σε αυτούς που χρησιμοποιούν (Gikas, 2012):

- α. μεθόδους τριγωνισμού (triangulation)
- β. μεθόδους συμβολομετρίας (interferometry)
- γ. μεθόδους μέτρησης διαφοράς χρόνου (time of flight), που με τη σειρά τους διακρίνονται σε:
 - i. σαρωτές παλμού (pulsed time of flight)
 - ii. σαρωτές διαφοράς φάσης (phase difference)

Οι σαρωτές που ανήκουν στην πρώτη κατηγορία είναι ακριβείς σε αποστάσεις μερικών μέτρων. Έτσι, είναι περισσότερο κατάλληλοι για βιομηχανικές εφαρμογές. Οι σαρωτές που ανήκουν στη δεύτερη κατηγορία επιτυγχάνουν πολύ υψηλή ακρίβεια σε μετρήσεις (<mm) πολύ μικρών αποστάσεων και μετακινήσεων. Από τους σαρωτές της τρίτης κατηγορίας, οι σαρωτές παλμού έχουν μεγάλη εμβέλεια (>2km), αλλά μικρότερη ακρίβεια σε σχέση με τους σαρωτές διαφοράς φάσης και είναι κατάλληλοι για τις τοπογραφικές και γεωδαιτικές εργασίες. Οι σαρωτές διαφοράς φάσης έχουν περιορισμένη εμβέλεια (μέχρι 100m), αλλά είναι ταχύτεροι και πολύ ακριβείς. Χρησιμοποιούνται κατά βάση σε εφαρμογές αποτύπωσης ακριβείας μικρών αντικειμένων (π.χ. γεωμετρική τεκμηρίωση ιστορικών μνημείων) (Gikas, 2012).

Οι επίγειοι σαρωτές μπορούν επίσης να διακριθούν, ως προς το οπτικό τους πεδίο σε: σαρωτές – κάμερα (camera scanner), πανοραμικούς σαρωτές (panorama scanner) και υβριδικούς σαρωτές (hybrid scanner).

Η διαδικασία λειτουργίας των σαρωτών laser είναι η ακόλουθη: Αρχικά ορίζονται τα όρια της προς σάρωση περιοχής και η πυκνότητα σάρωσης. Κατόπιν, μια CCD κάμερα, που βρίσκεται ενσωματωμένη στο σαρωτή, στέλνει την εικόνα της επιφάνειας στον ηλεκτρονικό υπολογιστή με τον οποίο αυτός είναι συνδεδεμένος και ξεκινά η εκπομπή παλμού laser προς το αντικείμενο με προκαθορισμένο γωνιακό βήμα. Η εκτροπή της ακτίνας επιτυγχάνεται με διάφορες οπτικομηχανικές διατάξεις (κάτοπτρα), που κινούνται με την βοήθεια κινητήρων (σερβοκινητήρων, ηλεκτρονικών κ.ά). Κατά τη διάρκεια της σάρωσης, καταγράφεται ο χρόνος μετάβασης και επιστροφής της δέσμης, προκειμένου να υπολογιστεί η απόσταση για κάθε σημείο. Οι πληροφορίες μεταφέρονται σε πραγματικό χρόνο στον ηλεκτρονικό υπολογιστή, δημιουργώντας έτσι το τρισδιάστατο ανάγλυφο της επιφάνειας που σαρώθηκε.

Μετά τη σάρωση μιας περιοχής, τα παραγόμενα αρχεία (νέφος σημείων, point cloud) περιέχουν τις σφαιρικές συντεταγμένες των σημείων, που μετατρέπονται σε καρτεσιανές, με αρχή αξόνων τον σαρωτή. Καταγράφεται επίσης και η ένταση του επιστρεφόμενου σήματος. Παράγεται, έτσι, μια ακριβής ψηφιακή καταγραφή του αντικειμένου.

Το βεληνεκές μέτρησης των σαρωτών κυμαίνεται από 1.5m έως και πάνω από 2000m και η ακρίβεια προσδιορισμού των συντεταγμένων από $\pm 4\text{mm}$ έως $\pm 45\text{mm}$. Η ακρίβεια προσδιορισμού των συντεταγμένων εξαρτάται από:

- Την απόσταση από το αντικείμενο
- Την ταχύτητα σάρωσης
- Τα χαρακτηριστικά του αντικειμένου (γεωμετρικά και το υλικό της επιφάνειας που σαρώνεται) και το περιβάλλον
- Τη μέθοδο μέτρησης που χρησιμοποιεί κάθε σύστημα
- Την ακρίβεια του μηχανισμού σάρωσης και άλλους παράγοντες που προέρχονται από μηχανικές, οπτικές ή ηλεκτρονικές πηγές.

2.2.5 Βιντεομετρία (Συστήματα οπτικής παρακολούθησης)

Τα συστήματα βιντεομετρίας που χρησιμοποιούνται στην παρακολούθηση των κατασκευών στηρίζονται σε βασικές αρχές της φωτογραμμετρίας και ανάλυσης εικόνας που αφορά σε μετρήσεις από κοντινές αποστάσεις (close-range photogrammetry).

Τέτοιου είδους συστήματα αποτελούνται από ψηφιακές βιντεοκάμερες υψηλής ευκρίνειας κατάλληλα σχεδιασμένες για τέτοιους σκοπούς, κατάλληλους φακούς ανάλογα με το μέγεθος του αντικειμένου και την απόσταση παρακολούθησης και κατάλληλο λογισμικό επεξεργασίας. Μπορούν να παρακολουθήσουν αντικείμενα μικρότερα του 1mm σε απόσταση μεγαλύτερη των 100m, με συχνότητες δειγματοληψίας έως και 15Hz (www.imetrum.com).



Σχήμα 2.10: Σύστημα Βιντεομετρίας της εταιρίας Imetrum, Video Gauge (Μπακογιάννης, 2010)

Τα συστήματα οπτικής παρακολούθησης επιτρέπουν τον ακριβή προσδιορισμό της δισδιάστατης θέσης στόχων πάνω σε ψηφιακή εικόνα. Δεν απαιτείται η τοποθέτηση ειδικών στόχων, καθώς το λογισμικό μπορεί να αναγνωρίσει χαρακτηριστικά σημεία, όπως βίδες ή ειδικά πρότυπα. Ο χρήστης 'μαθαίνει' στο λογισμικό να αναγνωρίζει τα χαρακτηριστικά σημεία και κατόπιν το σύστημα παρακολουθεί αυτά τα σημεία σε κάθε εικόνα. Από τη μέτρηση των σημείων υπολογίζονται χαρακτηριστικά όπως δισδιάστατη (με μια κάμερα) ή τρισδιάστατη (με δυο κάμερες με αποκατεστημένο εξωτερικό προσανατολισμό) μετατόπιση, παραμόρφωση, ταχύτητα, επιτάχυνση, περιστροφή κ.ά.

Τα συστήματα οπτικής παρακολούθησης έχουν το προτέρημα ότι συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα των ψηφιακών τεχνικών ανάλυσης εικόνας με τις φωτογραμμετρικές μεθόδους. Επιπλέον, δεν απαιτείται πρόσβαση στο αντικείμενο μελέτης. Παρουσιάζουν, ωστόσο, το μειονέκτημα της δύσκολης αποκατάστασης της κλίμακας μεταξύ εικόνας και αντικειμένου.

2.3 Μέθοδοι πειραματικής μηχανικής

Οι μέθοδοι πειραματικής μηχανικής εφαρμόζονται κατά παράδοση στις εφαρμογές παρακολούθησης της δυναμικής συμπεριφοράς των κατασκευών. Χρησιμοποιούνται σε κατασκευές όπως ψηλά κτίρια, γέφυρες, φράγματα κτλ. Είναι αισθητήρες μικρού μεγέθους και βάρους, εύκολοι στην τοποθέτηση, με δυνατότητες σύνδεσης σε σειρά. Παρακάτω γίνεται αναφορά στα επιταχυνσιόμετρα και τις οπτικές ίνες, ενώ αναλυτικά παρουσιάζονται τα κλισίμετρα στο Κεφάλαιο 3.

2.3.1 Κλισίμετρα (Inclinometers)

Κλισίμετρο καλείται οποιαδήποτε διάταξη μέτρησης γωνιών κλίσης μεταξύ μιας επιφάνειας και της κατακορύφου. Λεπτομερέστερη αναφορά γίνεται στο Κεφάλαιο 3.

2.3.2 Επιταχυνσιόμετρα (Accelerometers)

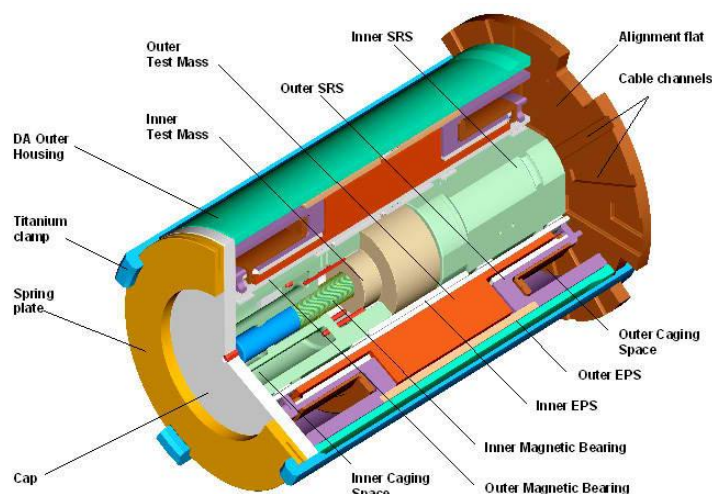
Τα επιταχυνσιόμετρα είναι αισθητήρες μέτρησης και καταγραφής επιτάχυνσης. Βρίσκουν εφαρμογή σε καταγραφή επιταχύνσεων σεισμού, αλλά και παρακολούθηση εύκαμπτων κατασκευών, όπως γέφυρες, ψηλά κτίρια κτλ. Ακόμα, αποτελούν μέρος των Αδρανειακών Συστημάτων Πλοήγησης (INS). Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στη μέτρηση της επιτάχυνσης μιας μάζας που

διεγείρεται από εξωτερικές δυνάμεις (σεισμός, άνεμος, βαρύτητα κ.ά.). Η ολοκλήρωση της επιτάχυνσης ως προς το χρόνο δίνει την ταχύτητα. Η διπλή ολοκλήρωση δίνει τη θέση.

Τα επιταχυνσιόμετρα μπορούν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- στα επιταχυνσιόμετρα ανοικτού κύκλου λειτουργίας (open loop), στα οποία γίνεται προσδιορισμός της δύναμης που μετατοπίζει την μάζα από την θέση ισορροπίας και
- στα επιταχυνσιόμετρα κλειστού κύκλου λειτουργίας (closed loop), στα οποία γίνεται προσδιορισμός της δύναμης που απαιτείται για την διατήρηση της δόκιμης μάζας στην θέση ισορροπίας.

Τα επιταχυνσιόμετρα κατηγοριοποιούνται επίσης ανάλογα με τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά τους σε: πιεζοηλεκτρικά, με σερβομηχανισμούς, ανίχνευσης δονήσεων, μικρο-ηλεκτρομηχανικά (MEMS) κ.ά.



Σχήμα 2.11: Επιταχυνσιόμετρο (<http://einstein.stanford.edu>)

Τα επιταχυνσιόμετρα παρουσιάζουν τα εξής βασικά μειονεκτήματα:

- Πρώτον, τα σφάλματα κατά τον προσδιορισμό της μετακίνησης είναι συσσωρευτικά και αυξάνονται σημαντικά όταν οι επιταχύνσεις είναι ιδιαίτερα υψηλές (Ψιμούλης, 2005).
- Δεύτερον, βασικό τους μειονέκτημα είναι ότι, επειδή μετρούν την επιτάχυνση, για το υπολογισμό της μετατόπισης απαιτείται διπλή ολοκλήρωση (προσδιορισμός σταθεράς).
- Τρίτον, οι συχνότητες καταγραφής των επιταχυνσιόμετρων κυμαίνονται συνήθως από 25 έως 400 Hz (Νικητοπούλου, 2002). Τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά τους όμως (δύσκαμπτο ελατήριο, υψηλού ιξώδους αποσβεστήρας), τους καθιστούν ακατάλληλους για την παρακολούθηση στατικών και ημι-στατικών μετακινήσεων (Ψιμούλης, 2005).

2.3.3 Οπτικές ίνες (Fiber optics)

Οι αισθητήρες οπτικών ινών αποτελούν τη μετεξέλιξη των συμβατικών μηκυνσιομέτρων και άλλων κοινών οργάνων μέτρησης (Καραλάκης et al., 2011). Χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο στην παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας των κατασκευών (Structural Health Monitoring, SHM). Βρίσκουν εφαρμογή σε κτίρια, γέφυρες, αεροσκάφη, πλοία κ.α. για την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο της ακεραιότητάς τους.

Οι αισθητήρες οπτικών ινών συνδυάζονται σε καλώδια οπτικών ινών που καταλήγουν σε μία ειδική συσκευή αποκωδικοποίησης του οπτικού σήματος. Η συσκευή αυτή στη διεθνή ορολογία ονομάζεται *interrogator*, όρος που έχει πλέον καθιερωθεί και στην Ελληνική γλώσσα (Καραλάκης et al., 2011).

Όσον αφορά τις εφαρμογές παρακολούθησης της ακεραιότητας των κατασκευών (Structural Health Monitoring, SHM), ο πιο ενδεδειγμένος και διαδεδομένος τύπος αισθητήρα οπτικής ίνας είναι ο αισθητήρας τύπου Fiber Bragg Grating (FBG)⁵. Ενσωματώνεται ως τμήμα (<1cm) της οπτικής ίνας, το οποίο πρώτα πρέπει να έχει υποστεί ειδική κατεργασία. Το ανακλώμενο μήκος κύματος, που μεταβάλλεται λόγω της παραμόρφωσης, καταγράφεται από τον ειδικό εξοπλισμό (*interrogator*) που παρακολουθεί σε τακτά διαστήματα χρόνου τις μεταβολές (Καραλάκης et al., 2011). Οι αισθητήρες τύπου FBG έχουν πολύ υψηλές συχνότητες δειγματοληψίας (μπορούν να φτάσουν και τα 20KHz), ενώ το εύρος μέτρησής τους μπορεί να κυμανθεί από nm έως cm.



Σχήμα 2.12: Αισθητήρας παραμόρφωσης τύπου FBG (<http://www.fbg.co.kr>)

Παραδείγματα εφαρμογών ενόργανης παρακολούθησης με χρήση οπτικών ινών είναι οι εφαρμογές εντός οπλισμένου σκυροδέματος, όπως π.χ. σε σκυροδέτηση φρεατοπασσάλου ή η τοποθέτηση καλωδίου στον οργανισμό πλήρωσης ενός κτιρίου. Αντίστοιχα, εφαρμογή με πολύ μεγάλη οικονομική σημασία αποτελεί η

⁵ Οι αισθητήρες τύπου FBG έχουν το χαρακτηριστικό ότι ο δείκτης διάθλασης του γυάλινου πυρήνα της ίνας αλλάζει περιοδικά με αποτέλεσμα να λειτουργεί σαν οπτικό φίλτρο στην εισερχόμενη ακτινοβολία και να αντανάκλα μια ελάχιστη ποσότητα σε συγκεκριμένη περιοχή του οπτικού φάσματος. Αυτή η τροποποιημένη περιοχή είναι ευαίσθητη στις τάσεις εφελκυσμού και συμπίεσης και στις μεταβολές θερμοκρασίας (Καραλάκης et al., 2011).

παρακολούθηση αγωγών (νερού, πετρελαίου ή φυσικού αερίου), ώστε να εντοπίζεται σημείο πιθανής διαρροής, καθίζησης, ή βλάβης (Καραλάκη et al., 2011).



Σχήμα 2.13: Στιγμιότυπο από τοποθέτηση αισθητήρων οπτικής ίνας τύπου FBG στο τείχος της Ακρόπολης στα πλαίσια διερεύνησης της δομικής συμπεριφοράς του Τείχους (Αστρεϊνίδης et al., 2008)

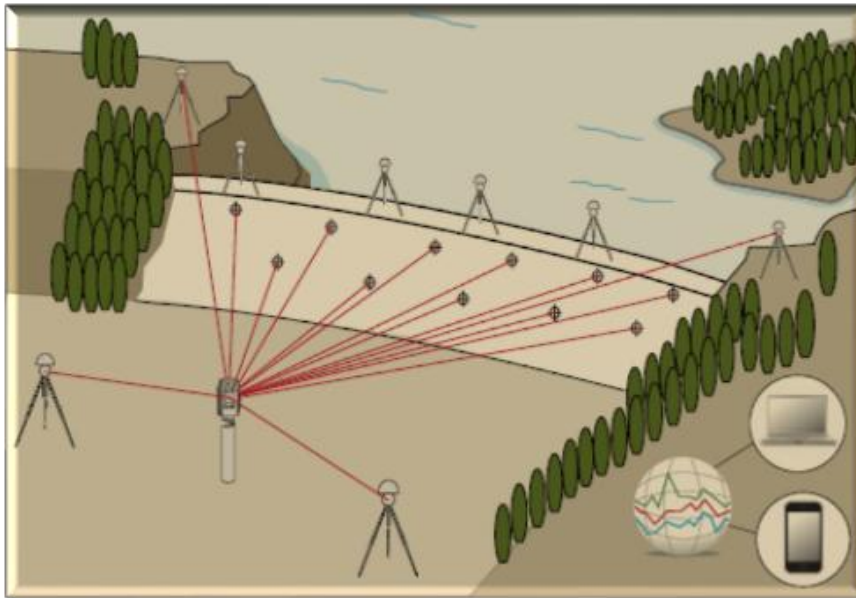
Τα πλεονεκτήματα των αισθητήρων οπτικών ινών, όπως το μικρό βάρος και μέγεθος, η ελαστικότητα, η χαμηλή κατανάλωση, η αντίσταση στις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, η παροχή μετρήσεων ακριβείας χωρίς την απαίτηση ρυθμίσεων ή διακρίβωσης, η μεγάλη ευαισθησία τους και η ανθεκτικότητά τους στο περιβάλλον και στη θερμοκρασία αντισταθμίζονται από το σχετικά μεγάλο κόστος και την μεγάλη τους ευαισθησία και σε άλλες μεταβλητές εκτός από τη μετρούμενη.

2.4 Ολοκληρωμένα Συστήματα Παρακολούθησης (Integrated Deformation Monitoring Systems)

Καθώς οι κατασκευές γίνονται πιο περίπλοκες, οι ανάγκες στον τομέα παρακολούθησης των κατασκευών εξελίσσονται, οι απαιτήσεις αυξάνονται και οι προκλήσεις μεγαλώνουν. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται συστηματικά στην παρακολούθηση συμπεριφοράς κατασκευών (GPS, επιταχυνσιόμετρα, κλισίμετρα, RTS κτλ.) παρέχουν, ο καθένας, διαφορετικό μετρούμενο μέγεθος, με διαφορετικές συχνότητες δειγματοληψίας και με διαφορετική ακρίβεια.

Έτσι, ο συνδυασμός διαφορετικών αισθητήρων σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα είναι πολλές φορές απαραίτητος, αφενός για τη μοναδική συνεισφορά του κάθε αισθητήρα (σημείο τοποθέτησης, ρυθμός δειγματοληψίας, ακρίβεια), και αφετέρου για να ξεπεραστούν οι ενδεχόμενες εγγενείς αδυναμίες του κάθε αισθητήρα. Ο συνδυασμός τους ωστόσο προϋποθέτει την ύπαρξη κατάλληλου λογισμικού, που να μπορεί να συλλέξει, να συγχρονίσει και στη συνέχεια να διαχειριστεί και να

αναλύσει τα διαφορετικού τύπου δεδομένα, ώστε να είναι δυνατή η εξαγωγή των επιθυμητών κάθε φορά πληροφοριών από τον χρήστη. Τα συστήματα αυτά ονομάζονται Ολοκληρωμένα Συστήματα Παρακολούθησης Παραμορφώσεων (Automatic Deformation Monitoring Systems), δηλαδή “ένα πολύπλοκο σύνολο από αλληλεπιδρώντα, αλληλοσυσχετιζόμενα και αλληλεξαρτώμενα στοιχεία εξοπλισμού και λογισμικού, που, μόλις εγκατασταθεί και ρυθμιστεί, λειτουργεί χωρίς περαιτέρω ανθρώπινη παρέμβαση” (en.wikipedia).

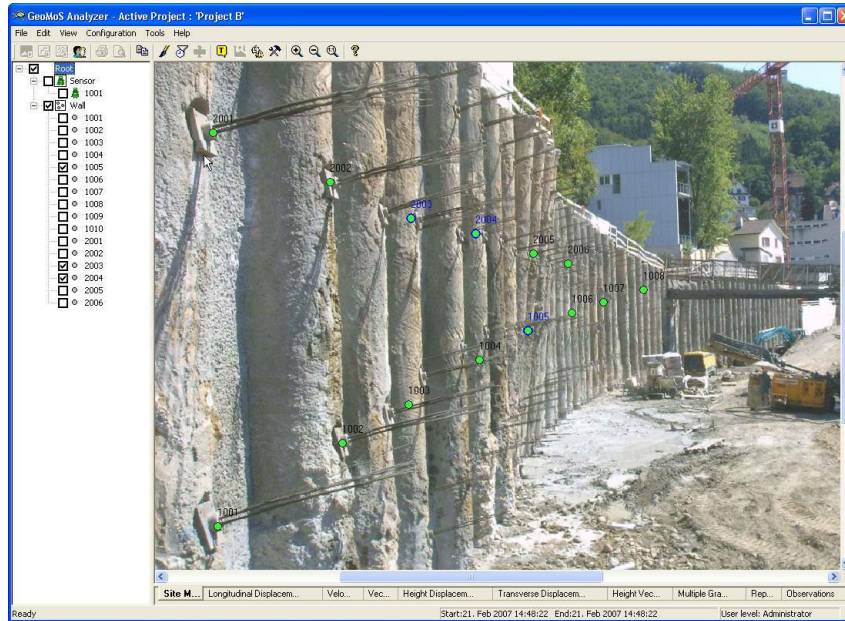


Σχήμα 2.14: Σχηματική αναπαράσταση παρακολούθησης φράγματος με ολοκληρωμένο σύστημα (<http://measutronics.com>)

Τα Ολοκληρωμένα Συστήματα Παρακολούθησης Παραμορφώσεων (Automatic Deformation Monitoring Systems) αποτελούνται από:

- τους αισθητήρες, στους οποίους περιλαμβάνονται: τοπογραφικά συστήματα (RTS, GNSS, χωροβάτες), αισθητήρες πειραματικής μηχανικής, όπως κλισίμετρα, επιταχυνσιόμετρα, κ.ά και αισθητήρες μέτρησης περιβαλλοντικών στοιχείων, όπως θερμομέτρα, βαρόμετρα, ανεμόμετρα κλπ., όλα τελευταίας τεχνολογίας
- τα συστήματα επικοινωνίας (ενσύρματη και ασύρματη επικοινωνία, WiMAX⁶)
- το λογισμικό συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων
- το λογισμικό ανάλυσης των μετρήσεων (στατιστική ανάλυση, μετεπεξεργασία, συνόρθωση, οπτικοποίηση)

⁶ Το WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) είναι ένα “πρωτόκολλο ασύρματης επικοινωνίας, σχεδιασμένο να παρέχει δεδομένα σε ταχύτητες 30-40 Mbps (Mbit/sec), με στόχο να φτάσει το 1 Gbit/sec για σταθερούς σταθμούς” (en.wikipedia).



Σχήμα 2.15: Παράδειγμα των δυνατοτήτων των λογισμικών ανάλυσης. Το συγκεκριμένο λογισμικό είναι το GeoMos Analyzer (<http://www.intec.com.my>)

Τέτοιου είδους ολοκληρωμένα συστήματα αναπτύσσονται τα τελευταία χρόνια από τις εταιρίες και η χρήση τους έχει αποτρέψει πολλές φορές καταστροφές και απώλεια ζώων. Ενδεικτικά αναφέρονται το σύστημα GeoMos της Leica Geosystems και το σύστημα Trimble 4D της Trimble.

Παρακάτω περιγράφονται εν συντομία δυο παραδείγματα εγκατάστασης και χρήσης Ολοκληρωμένων Συστημάτων Παρακολούθησης.

Α. Κατά την κατασκευή της νέας γραμμής Γ του υπογείου σιδηροδρόμου στην Ρώμη. Η νέα γραμμή θα διέσχιζε την πόλη με 25.5km υπόγειας σήραγγας και 30 σταθμούς. Έτσι, εγκαταστάθηκε, το 2008, ένα πλήρως αυτοματοποιημένο σύστημα παρακολούθησης της σταθερότητας και της ασφάλειας των κτιρίων (πάνω από 1.000 κτίρια) στην λεκάνη επιρροής των εκσκαφών. Συμπεριλήφθηκαν και τα αρχαία μνημεία κοντά στη νέα γραμμή, με ιδιαίτερη αντιμετώπιση εξαιτίας της ευαισθησίας τους. Για την παρακολούθηση εγκαταστάθηκαν Ρομποτικοί Γεωδαιτικοί Σταθμοί σε ειδικές κατασκευές και βάθρα, η σταθερότητα των οποίων ελεγχόταν με ψηφιακά κλισίμετρα και συστήματα GNSS (Σχήμα 2.16). Το όλο σύστημα διαχειριζόταν το λογισμικό GeoMos της Leica (IMoSS Corporation, 2008).



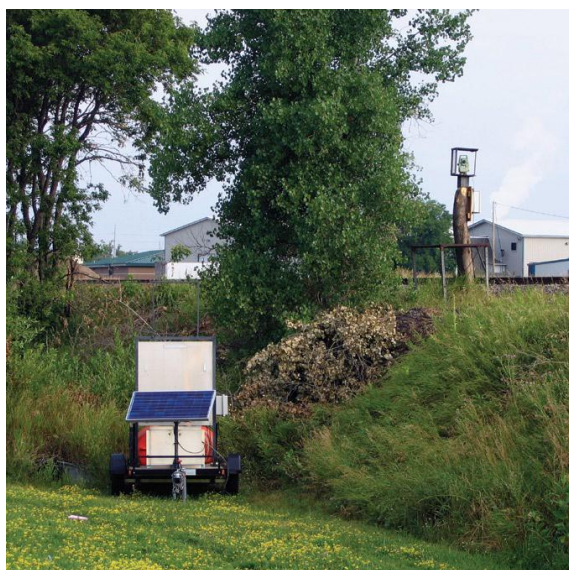
Σχήμα 2.16: Εικόνες από την εγκατάσταση Ολοκληρωμένου Συστήματος Παρακολούθησης για την κατασκευή της γραμμής Γ του υπογείου σιδηροδρόμου στη Ρώμη. Διακρίνονται η ειδική κατασκευή εγκατάστασης του Ρομποτικού Γεωδαιτικού Σταθμού, ο δέκτης GPS και το ψηφιακό κλισίμετρο (<http://www.imoss.com>)

Β. Κατά την υπογειοποίηση της λεωφόρου Roosevelt στην πόλη Detroit Lakes της Minnesota των Η.Π.Α. Το κυρίως τεχνικό έργο περιελάμβανε την υπογειοποίηση της στάθμης της λεωφόρου κατά 7.5 περίπου μέτρα, έτσι ώστε να περνάει κάτω από την υπάρχουσα σιδηροδρομική γραμμή και τον εθνικό αυτοκινητόδρομο 10 και την κατασκευή 2 γεφυρών αντίστοιχα. Καθώς η περιοχή καλύπτεται από λίμνες, ήταν απαραίτητος ο καταβιβασμός της στάθμης του νερού κατά 1.5m περίπου, με άμεσο κίνδυνο την καθίζηση της περιοχής. Επικίνδυνες ήταν επίσης οι δονήσεις που θα προκαλούνταν από την κατασκευή των γεφυρών και της υποδομής. Οι δυο αυτοί παράγοντες θα μπορούσαν να προκαλέσουν παραμορφώσεις στις σιδηροδρομικές γραμμές και εκτροχιασμούς τρένων. Κρίθηκε λοιπόν απαραίτητη η εγκατάσταση ενός πλήρως αυτοματοποιημένου συστήματος παρακολούθησης του εδάφους της περιοχής και για το σκοπό αυτό επιλέχθηκε το GeoMos της Leica. Χρησιμοποιήθηκαν Ρομποτικοί Γεωδαιτικοί Σταθμοί και συνολικά 68 πρίσματα (Σχήμα 2.17). Το σύστημα εγκαταστάθηκε το 2006 και

λειτούργησε αποτρεπτικά για ατυχήματα λόγω των καθιζήσεων, σημαίνοντας συναγερμό όταν οι καθιζήσεις ξεπερνούσαν τα όρια ασφαλείας (Speed, 2007).



α. Εγκατάσταση του γεωδαιτικού σταθμού σε στηθαίο κτιρίου



β. Εγκατάσταση γεωδαιτικού σταθμού πάνω σε κορμό δέντρου και ηλεκτροδότησή του με Φ/Β πίνακα



γ. Άποψη μέρους του εργοταξίου

Σχήμα 2.17: Στιγμιότυπα εγκατάστασης Ολοκληρωμένου Συστήματος Παρακολούθησης για την υπογειοποίηση λεωφόρου στην πόλη Detroit Lakes της Minnesota των Η.Π.Α. (Speed, 2007)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Ψηφιακά Κλισίμετρα και Δυνατότητες Εφαρμογής στη Μελέτη Συμπεριφοράς των Κατασκευών

Σε αυτό το Κεφάλαιο δίνονται λεπτομέρειες όσον αφορά τα κλισίμετρα, δηλαδή τη γενική αρχή λειτουργίας τους, την κατασκευαστική και τεχνολογική τους εξέλιξη. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στα ψηφιακά κλισίμετρα και στις δυνατότητές τους. Τέλος, θίγεται το πρόβλημα της γεωμετρίας στις εφαρμογές με κλισίμετρο, δηλαδή η μετατροπή των γωνιακών μετρήσεων σε μεγέθη μετακίνησης.

3.1 Γενικά – Αρχή λειτουργίας

Κλισίμετρο καλείται οποιαδήποτε διάταξη μέτρησης είτε απευθείας της γωνίας μεταξύ μιας επιφάνειας και της κατακόρυφου ή στοιχείων που οδηγούν σε αυτή. Επιπλέον και εάν η απόσταση από το αντικείμενο είναι γνωστή, κάποιοι τύποι κλισιμέτρων υπολογίζουν και το ύψος του αντικειμένου.

Τα κλισίμετρα έχουν χρησιμοποιηθεί σε ποικίλες επιστήμες και εφαρμογές. Ενδεικτικά αναφέρονται η δασολογία, η μετεωρολογία, η ναυσιπλοΐα και πλοήγηση γενικότερα, η ηφαιστειολογία, η υδραυλική, η ξυλουργική, η μηχανουργία κ.ο.κ., και φυσικά η τοπογραφία.



Σχήμα 3.1: Παραδοσιακό κλισίμετρο πλοίου

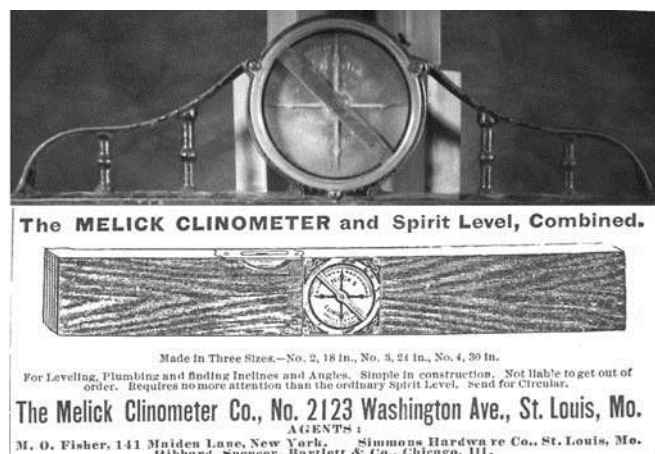
Τα κλισίμετρα μπορούν να διαχωριστούν σε δύο γενικές κατηγορίες :

- α. Αυτά που χρησιμοποιούν κάποιο βάρος (π.χ. νήμα της στάθμης) για να οριστεί η κατακόρυφος.
- β. Αυτά που χρησιμοποιούν κάποιο υγρό μέσο, η θέση ισορροπίας του οποίου ορίζει το οριζόντιο επίπεδο.

3.1.1 Ιστορική εξέλιξη

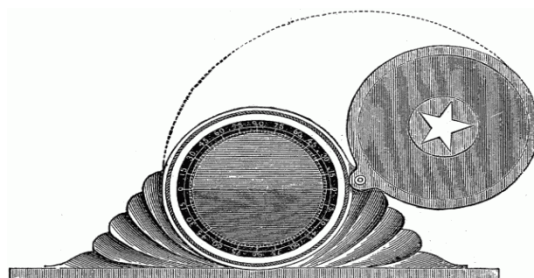
Διάφορες κατασκευές έχουν κατά καιρούς χρησιμοποιηθεί ως κλισίμετρα. Μια διάταξη αποτελούμενη από δύο δοχεία με νερό που ενώνονταν με ένα μακρύ σωλήνα με νερό χρησιμοποιούνταν για την παρακολούθηση ηφαιστειών. Οποιαδήποτε αλλαγή στην κλίση θα καταγραφόταν σαν αλλαγή στην στάθμη του υγρού σε κάποιο από τα δοχεία (en.wikipedia). Τέτοιου είδους κατασκευές ήταν, βέβαια, εξαιρετικά ευάλωτες στις περιβαλλοντικές συνθήκες.

Τα πρώτα σύγχρονα κλισίμετρα κατασκευάστηκαν κατά τον 19^ο αιώνα. Ανήκουν κατά βάση στην πρώτη κατηγορία. Εφευρέτης του κλισιμέτρου θεωρείται από κάποιους ο William B. Melick, επειδή αυτός το ονόμασε έτσι το 1889, παρόλο που είχαν προηγηθεί και άλλες κατασκευές. Το κλισίμετρο του Melick (Σχήμα 3.2) αποτελείται από έναν περιστρεφόμενο βαθμονομημένο δίσκο και σταθερούς δείκτες. Ο δίσκος αναρτάται από μια βάση διαγώνια τοποθετημένη στο μπροστινό μέρος και κινείται με την βοήθεια ενός εσωτερικού εκκρεμούς πακτωμένου στο πίσω μέρος. Για ευκολότερη ανάγνωση, ο δίσκος μπορούσε να πακτωθεί με τη βοήθεια δύο κουμπιών (Gehring, 2002).



Σχήμα 3.2: Το κλισίμετρο του Melick (1889) (Gehring, 2002)

Τα πρώτα κλισίμετρα της δεύτερης κατηγορίας, όπως του Well (Σχήμα 3.3), αποτελούνταν από δύο βασικά μέρη: μια επίπεδη βάση και έναν κοίλο δίσκο με υγρό. Η γυάλινη πρόσοψη του δίσκου ήταν βαθμονομημένη κατάλληλα, ώστε να δίνεται η γωνία της θέσης ισορροπίας του υγρού σε σχέση με την επίπεδη βάση (Websters Dictionary Online).



Σχήμα 3.3: Το κλισίμετρο του Well (en.wikipedia)

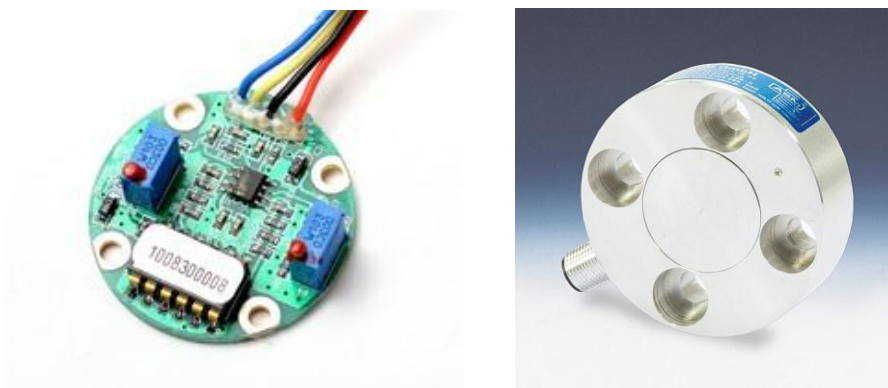
Στις αρχές του 1900, η ανάγνωση των γωνιών έγινε πιο ακριβής χάρη στη χρήση γυάλινων σωλήνων ακριβούς καμπυλότητας γεμάτων με υγρό. Μια ασφάλινη μπάλα μέσα στο υγρό παρείχε ακριβή οπτική ανάγνωση της τιμής της γωνίας (Websters Dictionary Online).

Το πρώτο ηλεκτρονικό κλισίμετρο αποτελείτο από ένα εκκρεμές και ένα ποτενσιόμετρο (Websters Dictionary Online). Τα ηλεκτρονικά (ψηφιακά) κλισίμετρα χρησιμοποιούν μια φυσαλίδα για την υλοποίηση του οριζοντίου επιπέδου. Μια διάταξη από ηλεκτρόδια (Σχήμα 3.4) καταγράφει με ακρίβεια τη θέση της φυσαλίδας στο ηλεκτρολυτικό διάλυμα (en.wikipedia). Η ακρίβεια των ψηφιακών κλισιμέτρων μεταβάλλεται συνήθως από 0.01° έως $\pm 2^\circ$. Πολύ υψηλής ακρίβειας αισθητήρες μπορεί να επιτύχουν ακρίβειες έως και 0.001° .



Σχήμα 3.4: Αρχή λειτουργίας του ηλεκτρονικού κλισιμέτρου (en.wikipedia)

Τέλος, η ανάπτυξη της συστημάτων μικρο-Ηλεκτρομηχανικής (MEMS) έθεσε νέα δεδομένα για όλων των ειδών τους αισθητήρες (κλισίμετρα, επιταχυνσιόμετρα κτλ.), λόγω της μείωσης τόσο του μεγέθους όσο και του κόστους. Πλέον βρίσκονται ενσωματωμένα σε συσκευές όπως κινητά τηλέφωνα, ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές κτλ.



Σχήμα 3.5: Τύποι κλισιμέτρων MEMS

Σήμερα στην αγορά διατίθενται πληθώρα αισθητήρων που καλύπτουν όλες τις ανάγκες της αγοράς. Σε τεχνικές εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων, όπως είναι η μελέτη της απόκρισης κατασκευών σε δυναμικά φορτία, χρησιμοποιούνται τα ψηφιακά κλισίμετρα.

3.2 Ψηφιακά κλισίμετρα

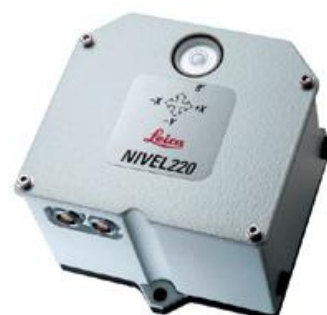
Τα σύγχρονα ψηφιακά κλισίμετρα, μονοαξονικά ή διαξονικά, χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές παρακολούθησης κατασκευών, τόσο αυτόνομα, όσο και σε συνδυασμό με άλλους αισθητήρες. Βρίσκουν εφαρμογή σε γέφυρες, φράγματα, ψηλά κτίρια, σήραγγες, ιστούς αλλά και σε περιπτώσεις παρακολούθησης ηφαιστειακών και τεκτονικών δραστηριοτήτων, σε εφαρμογές υδραυλικής, εξορύξεων κτλ.



α. Κλισίμετρο της εταιρείας Applied Geomechanics (www.carboceramics.com)



β. Κλισίμετρο της εταιρείας Applied Geomechanics σχεδιασμένο ειδικά για ηφαιστειακές, τεκτονικές και υδραυλικές εφαρμογές (www.esands.com)



γ. Κλισίμετρο της εταιρείας Leica Geosystems

Σχήμα 3.6: Παραδείγματα ψηφιακών διαξονικών κλισιμέτρων

Όσον αφορά τις εφαρμογές παρακολούθησης δυναμικής συμπεριφοράς κατασκευών, τα ψηφιακά κλισίμετρα χρησιμοποιούνται με επιτυχία για την ανίχνευση παραμορφώσεων σε πραγματικό χρόνο και για να προσδιορίσουν τις συχνότητες ταλάντωσης μιας κατασκευής. Υστερούν στον προσδιορισμό μεγεθών όπως το εύρος της ταλάντωσης, γιατί η παραμόρφωση προκύπτει ως γωνιακό μέγεθος. Ως εκ τούτου, σε δυναμικά φαινόμενα η χρήση τους μπορεί να είναι συμπληρωματική με άλλα μέσα.

3.2.1 Αρχή λειτουργίας

Τα ψηφιακά κλισίμετρα εκμεταλλεύονται τις ιδιότητες αγώγιμων υγρών και έχουν την ιδιότητα να μεταφράζουν αλλαγές στην ηλεκτρική αγωγιμότητα του υγρού σε αλλαγές στην κλίση. Ο προσδιορισμός της κλίσης στηρίζεται στη μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης μεταξύ ηλεκτροδίων στην ελεύθερη επιφάνεια αγώγιμου υγρού το οποίο ισορροπεί σε ειδική μικρο-κάψουλα στο εσωτερικό περίβλημα του οργάνου (Gikas et al., 2008).

3.2.2 Πηγές σφαλμάτων

Σφάλματα στις μετρήσεις με το ψηφιακό κλισίμετρο μπορεί να προκύψουν από πηγές όπως:

- Σφάλμα απόκλισης: Το σφάλμα αυτό σχετίζεται με την ελάχιστη απόκλιση από τη θέση ισοροπίας (σημείο μηδέν) της κάψουλας του κλισιμέτρου. Το σφάλμα αυτό συνήθως απαλοίφεται κατά την αναγωγή των μετρήσεων.
- Την μη ορθή εγκατάσταση του αισθητήρα και μη ορθή οριζοντίωσή του, που μπορεί να προκαλέσει οι μετρημένες τιμές κλίσης να μην αναφέρονται στην κατακόρυφο.
- Απότομες θερμοκρασιακές μεταβολές

3.2.3 Πλεονεκτήματα – Περιορισμοί

Τα σύγχρονα ψηφιακά κλισίμετρα παρουσιάζουν τα εξής πλεονεκτήματα:

- ✓ έχουν μικρό μέγεθος και βάρος και μπορούν να τοποθετηθούν εύκολα.
- ✓ μπορούν να παρέχουν μετρήσεις σε δυο άξονες, με ακρίβειες καλύτερες του 0.001 mrad.

Στον αντίποδα, παρουσιάζουν τους παρακάτω περιορισμούς:

- ✘ έχουν μεγάλη ευαισθησία στις θερμοκρασιακές μεταβολές
- ✘ δεν μπορούν να παρέχουν μετακινήσεις κατά τον κατακόρυφο άξονα z
- ✘ έχουν σχετικά μικρό εύρος μέτρησης
- ✘ παρουσιάζουν αδυναμία λήψης αξιόπιστων μετρήσεων σε υψηλές συχνότητες (> 5 Hz) λόγω της αδράνειας του υγρού, και ως εκ τούτου θεωρούνται ανεπαρκή για παρακολουθήσεις δυναμικών παραμορφώσεων υψηλής συχνότητας (Gikas et al., 2008).

3.3 Πρωτογενείς μετρήσεις και παράγωγα μεγέθη

Ένα χαρακτηριστικό του κλισιμέτρου είναι ότι μετράει την παραμόρφωση ως γωνία. Σε συνθήκες παρακολούθησης κατασκευών σε πραγματικό χρόνο, όταν δηλαδή το ζητούμενο είναι να μην ξεπεράσει η παραμόρφωση κάποιο όριο ασφαλείας, αυτό μπορεί να είναι αρκετό. Σε άλλου τύπου εφαρμογές όμως (ιδίως σε περιπτώσεις συνδυασμού τεχνικών, π.χ. εφαρμογή με GPS ή RTS και κλισιμέτρο), το μέγεθος της γωνιακής παραμόρφωσης πρέπει να μετατραπεί σε μετατόπιση, προκειμένου να καταστεί συγκρίσιμο με τα άλλα.

Όπως παρατηρούμε από το Σχήμα 3.7, η εφαρμογή της σχέσης

$$D = H \cdot \sin\alpha \quad (3.1)$$

όπου H : το ύψος της κατασκευής σε m (θεωρείται ότι η αλλαγή στο ύψος της κατασκευής λόγω της κάμψης της είναι αμελητέα) και

α : η γωνία που προκύπτει από το κλισιμέτρο σε rad

για τον υπολογισμό της μετατόπισης, θα δώσει ως αποτέλεσμα μια πλασματική μετατόπιση (D), μεγαλύτερη της πραγματικής (d). Ο λόγος $\frac{D}{d}$ εξαρτάται από το

ύψος H της κατασκευής, το μέγεθος της γωνίας α (πόσο εύκαμπτη είναι η κατασκευή), καθώς επίσης και από την ομοιομορφία της συμπεριφοράς της. Σε εφαρμογές, στις οποίες η χρήση του κλισιμέτρου συνδυάζεται με τοπογραφικές μεθόδους (π.χ. GPS, RTS, επίγειο radar), από τις οποίες η μετατόπιση προκύπτει άμεσα, μπορεί να εκτιμηθεί ο λόγος $\frac{D}{d}$ μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Τεχνική Περιγραφή Κατασκευής και Μέθοδοι Καταγραφής

Το παρόν Κεφάλαιο χωρίζεται σε δύο μέρη. Το πρώτο μέρος αναφέρεται στην κατασκευή όπου πραγματοποιήθηκε η μελέτη, δηλαδή την παρακαμπτήριο καμινάδα της μονάδας IV του ΑΗΣ Λαυρίου. Δίνονται κάποια γενικά στοιχεία για την περιοχή μελέτης, τις εγκαταστάσεις και το ιστορικό της, καθώς και ειδικά στοιχεία όσον αφορά την εν λόγω καμινάδα, δηλαδή τη χρήση της και τη γεωμετρία της. Το δεύτερο μέρος του Κεφαλαίου αναφέρεται στις μεθόδους καταγραφής που επιλέχθηκαν για την μελέτη της καμινάδας.

4.1 Περιοχή μελέτης και περιγραφή υψηλής κατασκευής

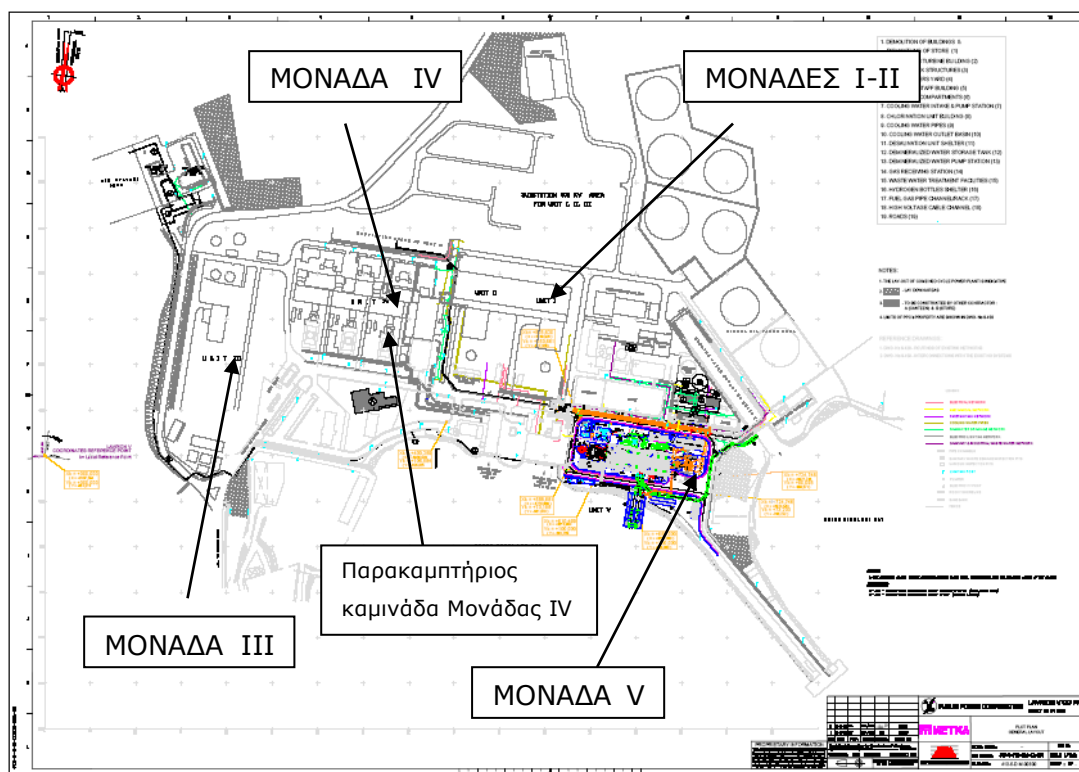
4.1.1 ΑΗΣ Λαυρίου, ΔΕΗ Α.Ε.

Το Ενεργειακό Κέντρο Ηλεκτροπαραγωγής Λαυρίου (ΑτμοΗλεκτρικός Σταθμός (ΑΗΣ) Λαυρίου, ΔΕΗ Α.Ε.) αποτελεί ένα από τα πιο σύγχρονα και μεγαλύτερα κέντρα παραγωγής ηλεκτρισμού της ΔΕΗ. Βρίσκεται στο ΝΑ άκρο της ηπειρωτικής Στεράς Ελλάδας, στον όρμο του Αγ. Νικολάου, 4.5km ΒΑ της πόλης του Λαυρίου και 42km ΝΑ της πολύ πυκνοκατοικημένης και βιομηχανικής περιοχής Αθήνας-Πειραιά.



Σχήμα 4.1: Άποψη του ΑΗΣ Λαυρίου (Αργυριάδης et al., 2006)

Το Ενεργειακό Κέντρο Ηλεκτροπαραγωγής Λαυρίου είναι εγκατεστημένο σε οικόπεδο έκτασης 405 στρεμμάτων και αποτελείται από πέντε αυτόνομα συγκροτήματα παραγωγής ρεύματος (Μονάδες I-V). Η κατασκευή του Σταθμού ξεκίνησε το 1969 και τέθηκε σε λειτουργία το 1972. Η Μονάδα V τέθηκε σε λειτουργία το 2006. Η διάταξη των Μονάδων παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2: Διάταξη μονάδων του ΑΗΣ Λαυρίου (Αργυριάδης et al., 2006)

Η εγκατεστημένη ισχύς του Σταθμού είναι 1580MW περίπου (Αργυριάδης et al., 2006). Για καύσιμο χρησιμοποιείται φυσικό αέριο, βαρύ (Μαζούτ) και ελαφρύ (Diesel) πετρέλαιο.

4.1.2 Παρακαμπτήριος καμινάδα μονάδας IV

Η κατασκευή που επιλέχθηκε για την εκπόνηση της εργασίας ήταν η παρακαμπτήριος καμινάδα της Μονάδας IV (Σχήμα 4.2).

Η Μονάδα IV είναι συνδυασμένου κύκλου και αποτελείται από:

- τρεις αεριοστρόβιλους ονομαστικής ισχύος 119MW
- τρεις αντίστοιχους λέβητες ανάκτησης θερμότητας και
- έναν ατμοστρόβιλο ονομαστικής ισχύος 203MW.

Η συνολική ισχύς της Μονάδας είναι 560MW. Η κατασκευή της ξεκίνησε το 1996 και τέθηκε σε λειτουργία σταδιακά από το 1998. Για καύσιμο χρησιμοποιείται φυσικό αέριο ή εναλλακτικά ελαφρύ πετρέλαιο (Diesel).

Τα καυσαέρια, μετά την έξοδο από τον αεριοστρόβιλο, οδηγούνται στον αντίστοιχο λέβητα ανάκτησης θερμότητας, όπου ψύχονται. Από εκεί, μέσω μεταλλικής καπνοδόχου, οδηγούνται στην ατμόσφαιρα. Κάθε λέβητας είναι εφοδιασμένος με παρακαμπτήρια διάταξη, οι οποίες σε κάποιες καταστάσεις της Μονάδας (εκκινήσεις, κρατήσεις, ανωμαλίες κτλ.) οδηγούν τον ατμό στον αμοστρόβιλο. Η καμινάδα κάθε λέβητα είναι τοποθετημένη πάνω στο λέβητα και έχει ύψος 80m από την επιφάνεια της γης. Συνολικά, στη Μονάδα υπάρχουν έξι καμινάδες (Έντυπο υλικό ΔΕΗ, 2003).

Γενικά, το σχήμα και το ύψος της καμινάδας επιλέγονται ώστε η διοχέτευση των καυσαερίων στην ατμόσφαιρα να γίνεται το δυνατόν γρήγορα και ομαλά. Σε περίπτωση που δεν συμβαίνει αυτό, δημιουργούνται ταλαντώσεις στην κατασκευή (τιράγιο). Το κυλινδρικό σχήμα ελαχιστοποιεί την τριβή των καυσαερίων στα τοιχώματα της καμινάδας, ενώ η επιλογή του ύψους καθορίζεται από τη δημιουργία ικανής διαφοράς πίεσης ώστε τα καυσαέρια να διοχετεύονται γρήγορα στην ατμόσφαιρα και να διαχέονται. Τα διπλά τοιχώματα εξασφαλίζουν την διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας καθ' ύψος της κατασκευής, ώστε τα καυσαέρια να συναντούν ομοιόμορφη θερμοκρασία.

Η συγκεκριμένη καμινάδα, που χρησιμοποιήθηκε για την εργασία (Σχήμα 4.3), είναι, όπως αναφέρθηκε, μεταλλική, κυλινδρικής σταθερής διατομής, με διπλά τοιχώματα, με διάμετρο 6.37m και ύψος 79.90m. Αποτελείται από 13 τμήματα που συνδέονται μεταξύ τους με φλάντζα.



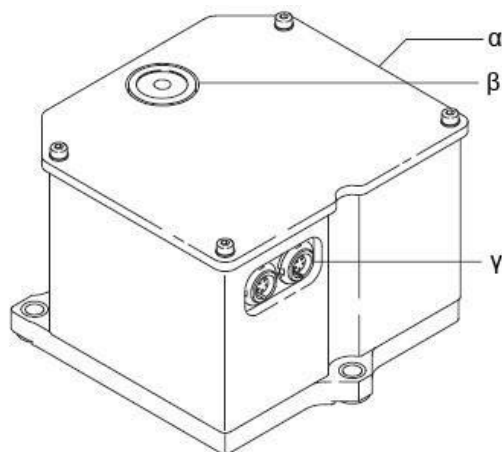
Σχήμα 4.3: Παρακαμπτήριοι καμινάδα Μονάδας IV

4.2 Μέθοδοι καταγραφής και εξοπλισμός

Όπως έχει προαναφερθεί, η συλλογή δεδομένων για την παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς της καμινάδας έγινε με τρεις μεθόδους. Με ψηφιακό κλισίμετρο, με radar μικροκυματικής συμβολομετρίας και με ρομποτικό γεωδαιτικό σταθμό. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι συγκεκριμένοι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους.

4.2.1 Ψηφιακό κλισίμετρο (NIVEL 220, Leica Geosystems)

Το κλισίμετρο NIVEL 220 της εταιρίας LEICA (Σχήμα 4.4) - που αποτελεί μέρος της σειράς NIVEL 200 - είναι ένας διαξονικός, υψηλής ακριβείας αισθητήρας, για την ταυτόχρονη μέτρηση της τιμής και της κατεύθυνσης της γωνίας κλίσης, καθώς και της θερμοκρασίας (NIVEL200 User Manual, 2006). Χρησιμοποιείται σε εφαρμογές (συνήθως χαμηλής δυναμικής) παρακολούθησης φραγμάτων, γεφυρών, ψηλών κτιρίων κ.ά., ακόμα και για την παρακολούθηση της κινηματικής συμπεριφοράς των βάθρων που χρησιμεύουν ως τριγωνομετρικά σημεία παρατήρησης και αναφοράς.



- α) Περίβλημα
- β) Σφαιρική αεροστάθμη
- γ) Βύσματα

Σχήμα 4.4: Αισθητήρας NIVEL200 (NIVEL200 User Manual, 2006)

■ Τεχνικά χαρακτηριστικά

Παρακάτω παρατίθενται μερικά από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα.

Εύρος μέτρησης (range):	A	± 1.5 mrad (± 960 cc)
	B	± 2.5 mrad (± 1600 cc)
	Γ	± 3.0 mrad (± 1900 cc)
Ακρίβεια (accuracy) (διαχωρίζεται ανάλογα με το εύρος μέτρησης A, B και Γ):	A	± 0.0047 mrad (± 3 cc)
	B	± 0.0141 mrad (± 9 cc)
	Γ	± 0.0471 mrad (± 30 cc)
Απόδοση (resolution):	0.001 mrad	
Συχνότητα δειγματοληψίας (sampling rate):	1 Hz	
Ευσαιθησία θέσης ισορροπίας (zero-point stability):	< 0.00471 mrad/°C	
Σφάλμα θέσης ισορροπίας (equipoise error):	0.00204 mrad (1.3cc). Ισχύει για θερμοκρασία < +15°C.	
Θερμοκρασία λειτουργίας:	-20 έως +50 °C	
Διαστάσεις	90 x 90 x 63 mm (Μ x Π x Υ)	
Βάρος	850 gr	

Πίνακας 4.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά NIVEL 200 (NIVEL200 User Manual, 2006)

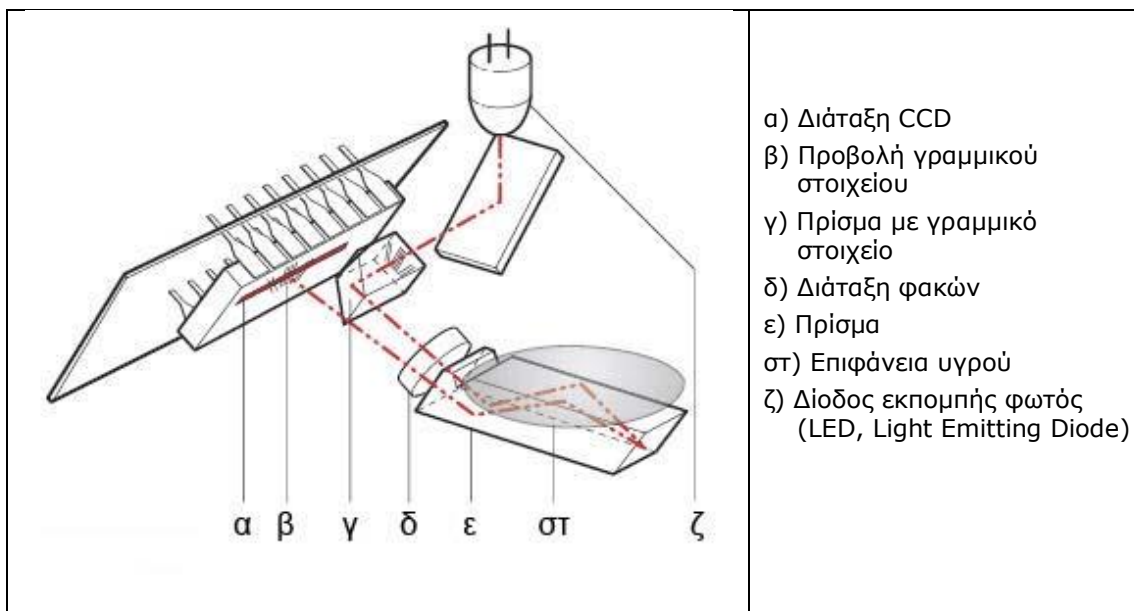
Να σημειωθεί εδώ ότι, παρόλο που η συχνότητα δειγματοληψίας του αισθητήρα είναι κατασκευαστικά 1 Hz, παρέχεται η δυνατότητα για μεγαλύτερη συχνότητα δειγματοληψίας με κατάλληλη παρέμβαση στο λογισμικό. Έτσι, η συχνότητα καταγραφής του NIVEL κατά τη διάρκεια των μετρήσεων ήταν περίπου 3 Hz.

■ Αρχή λειτουργίας

Η λειτουργία του αισθητήρα βασίζεται σε αρχές της οπτοηλεκτρονικής⁷. Το οριζόντιο επίπεδο ορίζεται από τη θέση ισορροπίας ενός υγρού και η γωνία μεταξύ αυτού και του αισθητήρα μεταβάλλεται αναλόγως με την κλίση του αντικειμένου στο οποίο έχει προσαρτηθεί ο αισθητήρας. Η γωνία αυτή καταγράφεται από μια

⁷ **Οπτοηλεκτρονική (Opto-electronics)** ή **οπτικοηλεκτρονική (optical electronics)** είναι "ο κλάδος της φυσικής και της ηλεκτρονικής που ασχολείται με διατάξεις στερεάς κατάστασης για την παραγωγή, διαμόρφωση, εκπομπή και ανίχνευση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στο υπεριώδες, υπέρυθρο και ορατό τμήμα του φάσματος. Επομένως, το αντικείμενο της Οπτοηλεκτρονικής είναι η μελέτη και η εφαρμογή ηλεκτρονικών διατάξεων και εξαρτημάτων που αλληλεπιδρούν με το φως. Ο όρος "φως", εκτός από το ορατό περιλαμβάνει και τις αόρατες μορφές ακτινοβολίας όπως οι ακτίνες γ, οι ακτίνες Χ, την υπεριώδη και την υπέρυθη. Οι οπτοηλεκτρονικές διατάξεις είναι ουσιαστικά οπτο-ηλεκτρικοί ή ηλεκτρο-οπτικοί μορφοτροπείς (transducers) που μετατρέπουν την οπτική ακτινοβολία σε ηλεκτρικό σήμα και το αντίστροφο" (el.wikipedia).

οπτοηλεκτρονική διάταξη και μετατρέπεται σε ηλεκτρονικό σήμα (NIVEL200 User Manual, 2006).



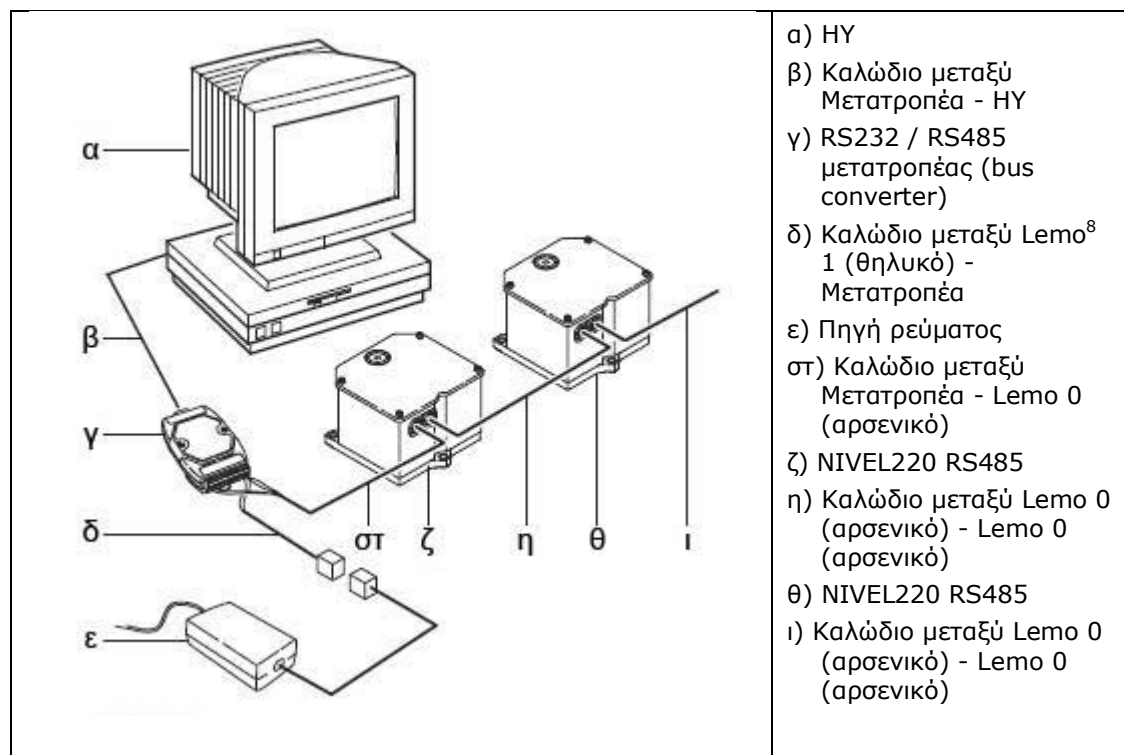
Σχήμα 4.5: Στοιχεία του αισθητήρα NIVEL200

Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.5:

- Το γραμμικό στοιχείο (γ) είναι ενσωματωμένο σε ένα πρίσμα.
- Το γραμμικό στοιχείο (γ) φωτίζεται με ένα LED (ζ).
- Το γραμμικό στοιχείο μέσω ενός πρίσματος (ε), καθώς και η επιφάνεια του υγρού (στ) προβάλλονται πάνω στην διάταξη CCD (α) μέσω της διάταξης των φακών (δ).
- Η επιφάνεια του υγρού (στ) παραμένει οριζόντια, ανεξάρτητα από την κλίση του αισθητήρα, έτσι ώστε η γωνία κλίσης να αντιστοιχεί στη γωνία μεταξύ της επιφάνειας του υγρού και της βάσης του αισθητήρα.

■ Συνδεσμολογία

Στο Σχήμα 4.6 περιγράφεται σχηματικά η τυπική συνδεσμολογία μεταξύ του αισθητήρα και του ηλεκτρονικού υπολογιστή (Η/Υ). Σημειώνεται ότι, από τη σειρά NIVEL200, μόνο ο αισθητήρας NIVEL220 είναι κατάλληλος για εφαρμογές παρακολούθησης με διασύνδεση πολλαπλών αισθητήρων σε σειρά.



Σχήμα 4.6: Συνδεσμολογία μεταξύ ΗΥ και πολλαπλών αισθητήρων NIVEL220 (NIVEL200 User Manual, 2006)

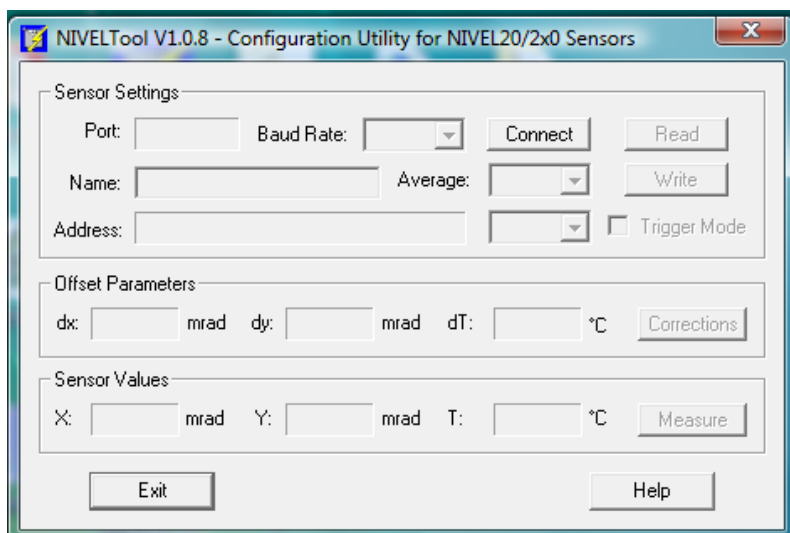
Κάθε καλώδιο χαρακτηρίζεται από έναν κωδικό, ώστε να διευκολύνεται η συνδεσμολογία με βάση το εγχειρίδιο εγκατάστασης. Η συνδεσμολογία ολοκληρώνεται με την τοποθέτηση, στο τέλος της σειράς, μιας τερματικής αντίστασης (terminator resistor).

■ Λογισμικό συλλογής και επεξεργασίας

Το σύστημα του κλισιμέτρου NIVEL220 συμπληρώνεται από το κατάλληλο λογισμικό, το NIVEL Tool. Μέσω του λογισμικού είναι δυνατή η ρύθμιση και ο χειρισμός του αισθητήρα. Παρακάτω παρατίθενται μερικές από τις δυνατότητες που παρέχει το λογισμικό:

- Ηλεκτρονική αεροστάθμη
- Ρύθμιση του αισθητήρα (ονομασία, θύρα σύνδεσης κ.ά)
- Ρύθμιση παραμέτρων συλλογής δεδομένων (διάρκεια, κ.ά)
- Έναρξη και λήξη συλλογής δεδομένων

⁸ LEMO είναι τύπος βύσματος, που έχει πάρει την ονομασία του από την ομώνυμη εταιρία που τα κατασκευάζει.



Σχήμα 4.7: Λογισμικό NIVEL Tool

Να σημειωθεί ότι σε εφαρμογές παρακολούθησης με διασύνδεση πολλαπλών αισθητήρων σε σειρά, κάθε αισθητήρας πρέπει να ρυθμιστεί (ονομασία, θύρα κλπ.) αυτόνομα και κατόπιν να πραγματοποιηθεί η διασύνδεσή τους.

Τέλος, όσον αφορά την επεξεργασία των παρατηρήσεων με το ψηφιακό κλισίμετρο, χρησιμοποιήθηκαν τα προγράμματα Microsoft EXCEL και MathWorks MATLAB.

■ Εξοπλισμός

Στη συνέχεια παρατίθεται ο απαιτούμενος εξοπλισμός κατά τις μετρήσεις με το ψηφιακό κλισίμετρο NIVEL. Όπως εξηγείται στο παρακάτω Κεφάλαιο, ο εξοπλισμός αυτός εγκαταστάθηκε στην καμινάδα και ήταν έτοιμος προς χρήση.

- Ψηφιακό κλισίμετρο NIVEL220
- Τρικόχλιο
- Φωτοβολταϊκός πίνακας
- Συσσωρευτής
- Μετασχηματιστής μεταξύ Φωτοβολταϊκού-Συσσωρευτή
- Μετατροπέας για το NIVEL
- Φορητός Η/Υ
- 2 ασύρματα modem
- Απαιτούμενα καλώδια σύνδεσης

4.2.2 RADAR Μικροκυματικής συμβολομετρίας (IBIS-S, IDS SpA)

Το σύστημα IBIS-S (Image By Interferometric Survey-Structures) είναι ένα Επίγειο Radar Πραγματικού Ανοίγματος (GB-RAR). Αναπτύχθηκε μέσω συνεργασίας του Πανεπιστημίου της Φλωρεντίας και της ιταλικής εταιρείας IDS (Ingegneria Dei Sistemi S.p.A.). Παρέχει τη δυνατότητα στατικής και δυναμικής παρακολούθησης. Σε κατάσταση δυναμικής λειτουργίας επιτρέπει συχνότητες δειγματοληψίας έως 200Hz, ενώ η στατική λειτουργία έχει σχεδιαστεί για μακράς διάρκειας παρακολούθηση μιας κατασκευής με συχνότητα δειγματοληψίας ≥ 2 sec (Rödelsperger et al., 2010).



Σχήμα 4.8: Το σύστημα IBIS-S (Rödelsperger et al., 2010)

Το όλο σύστημα αποτελείται από (Σχήμα 4.8):

- τον αισθητήρα, που εκπέμπει και λαμβάνει τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα.
- τις κεραίες. Το σύστημα διαθέτει 2 κεραίες, μία για την εκπομπή και μία για τη λήψη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Κάθε μία από τις κεραίες χαρακτηρίζεται από τον κυρίως λοβό, δηλαδή τη γωνιακή περιοχή μέσα στην οποία συγκεντρώνεται το μεγαλύτερο τμήμα της ισχύος της ακτινοβολίας. Ο τύπος κεραίας που χρησιμοποιήθηκε στη συγκεκριμένη εφαρμογή είναι ο IBIS-H20, που λειτουργεί στο τμήμα Ku της

ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, δηλαδή μεταξύ 17.1 και 17.3GHz και εύρος συχνοτήτων 300MHz. Με το συγκεκριμένο τύπο κεραίας, από απόσταση 10m από το στόχο, δέχεται ακτινοβολία μια περιοχή περίπου 3m². Η περιοχή αυτή μεγαλώνει, ανάλογα με τη γωνία παρατήρησης.

- το οπτικό τηλεσκόπιο, που χρησιμοποιείται για τον προσανατολισμό των κεραιών
- έναν τρίποδα, πάνω στον οποίο προσαρμόζεται ο αισθητήρας
- έναν φορητό υπολογιστή, εφοδιασμένο με το λογισμικό συλλογής δεδομένων

■ Τεχνικά χαρακτηριστικά

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος IBIS-S μπορούν να συνοψιστούν στον παρακάτω Πίνακα 4.2:

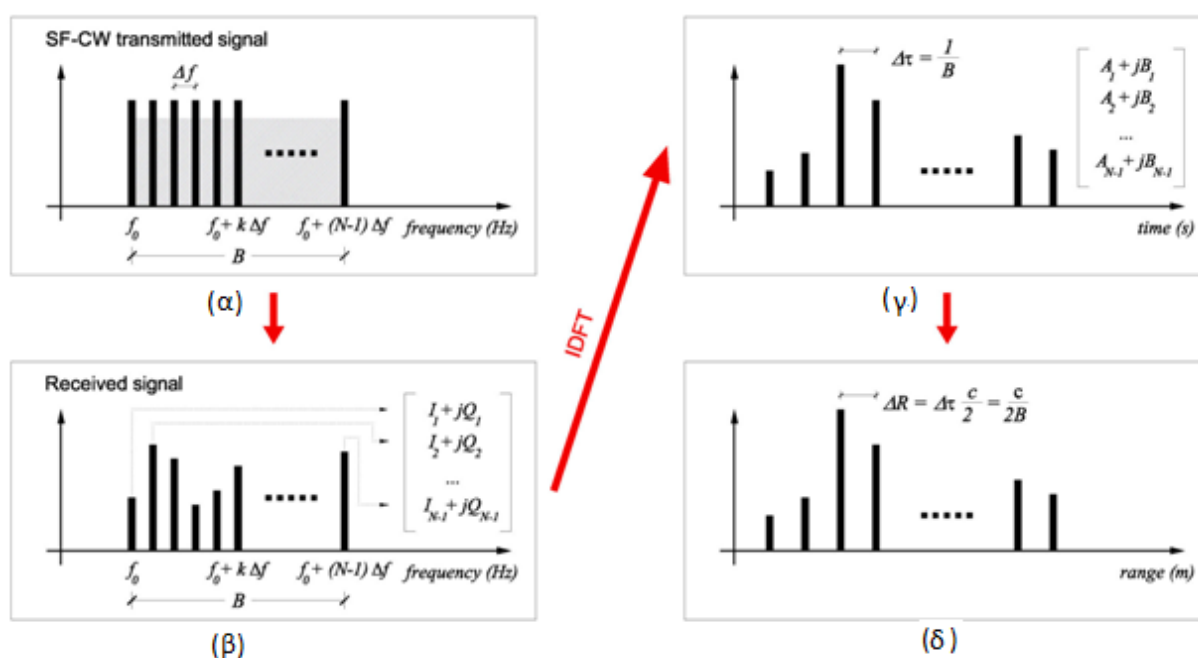
Συχνότητα εκπεμπόμενου ηλεκτρομαγνητικού κύματος	17.2GHz (Ku Band)
Μήκος εκπεμπόμενου ηλεκτρομαγνητικού κύματος	17.2mm
Μέγιστη απόσταση λειτουργίας	500m (για δυναμική λειτουργία) 1000m (για στατική λειτουργία)
Συχνότητα δειγματοληψίας	έως 200Hz (για δυναμική λειτουργία) ≥2 sec (για στατική λειτουργία)
Μέγιστο εύρος συχνοτήτων	300 MHz
Ακτινική ανάλυση (Range resolution)	έως 0.75m
Βέλτιση ακρίβεια ακτινικά	0.01mm
Εύρος μετακίνησης που μπορεί να ανιχνευθεί	από μm έως cm
Διαστάσεις αισθητήρα	375x270x115mm
Βάρος	12kgr
Αυτονομία	5hr

Πίνακας 4.2: Τεχνικά χαρακτηριστικά συστήματος IBIS-S (IBIS-S Controller Software User Manual, 2009)

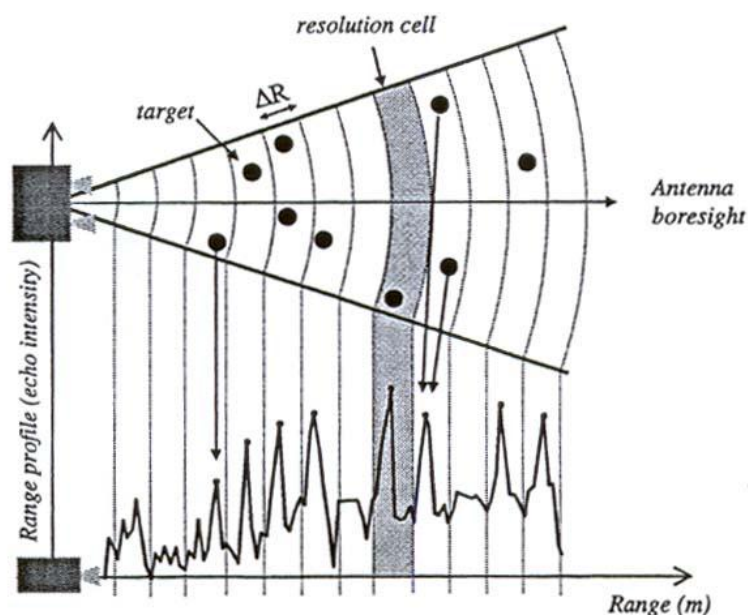
Η συχνότητα δειγματοληψίας εξαρτάται από την απόσταση παρατήρησης και συγκεκριμένα, όσο αυξάνεται η απόσταση, τόσο μικραίνει η συχνότητα. Αντίθετα, η συχνότητα δειγματοληψίας αυξάνεται, όσο μειώνεται η ακτινική ανάλυση.

■ Αρχή λειτουργίας

Η αρχή λειτουργίας του συστήματος IBIS-S ακολουθεί τις αρχές που αναπτύχθηκαν στο Κεφάλαιο 2 σχετικά με τη λειτουργία των Επίγειων Μικροκυματικών Radar. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, που παράγεται σύμφωνα με την τεχνική της Διαδοχικής Ενίσχυσης Συνεχούς Σήματος (SF-CW), ανακλάται από το αντικείμενο μελέτης και μέρος της επιστρέφει στο δέκτη του αισθητήρα. Το σήμα που επιστρέφει αποτελείται από N δείγματα (Σχήμα 4.9.β), κατά αντιστοιχία με τις N διακριτές συχνότητες που παρήχθησαν κατά την εκπομπή του (Σχήμα 4.9.α). Εφαρμόζοντας έναν Αντίστροφο Μετασχηματισμό Fourier (IDFT), το διάγραμμα συχνοτήτων του λαμβανόμενου σήματος μετατρέπεται σε διάγραμμα χρόνου (Σχήμα 4.9.γ). Τέλος, δεδομένου ότι η ταχύτητα κίνησης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος στο κενό είναι ίση με την ταχύτητα του φωτός (c) και με γνωστά τα χρονικά διαστήματα μεταξύ κάθε παλμού διαφορετικής συχνότητας ($\Delta\tau$), προκύπτει το διάγραμμα όπου φαίνεται η απόσταση κάθε σημείου-στόχου από το όργανο (Σχήμα 4.9.δ.), καθώς και η μεταξύ τους απόσταση που δεν μπορεί να είναι μικρότερη από το μέγεθος της ακτινικής ανάλυσης ΔR . Η διαδικασία αυτή ονομάζεται *εστίαση (focusing)*.



Σχήμα 4.9: Διαδικασία εστίασης (focusing) (Coppi et al., 2010)



Σχήμα 4.10: Διάγραμμα ακτινικής ανάλυσης (Corpi et al., 2010)

Η απόκριση από το κάθε φαντίο ακτινικής ανάλυσης (range bin) περιλαμβάνει δυο τύπους πληροφορίας:

- την ένταση του σήματος επιστροφής, που εξαρτάται από την ανακλαστικότητα και
- τη φάση του σήματος επιστροφής, που εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ του οργάνου και του φαντίου

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.10, τα σημεία με κύκλο αντιστοιχούν σε θέσεις με καλή επιστροφή σήματος. Διαφορετικοί στόχοι θα διαχωριστούν, εάν η μεταξύ τους απόσταση είναι μεγαλύτερη από την ακτινική ανάλυση ΔR . Αντίθετα, μπορεί να προκύψουν σφάλματα από την συνεισφορά πολλαπλών στόχων που βρίσκονται μέσα στην ίδια ακτινική απόσταση (range bin).

Αφού δημιουργηθεί το διάγραμμα ακτινικής απόστασης, αξιολογείται η μετακίνηση για κάθε φαντίο ακτινικής ανάλυσης με τη χρήση της Συμβολομετρίας (Interferometry) (βλ. §2.2.3), σύμφωνα με τη σχέση:

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

όπου λ : το μήκος κύματος και

$\Delta\varphi$: οι διαφορές των φάσεων σε κάθε φαντίο ακτινικής απόστασης (range bin).

Το σφάλμα της υπολογισμένης ακτινικής μετατόπισης εξαρτάται από το λόγο SNR (§6.2.2) και δίνεται από τη σχέση (Corpi et al., 2010):

$$\sigma_d = \frac{\lambda}{4\pi} \frac{1}{\sqrt{SNR}} \quad (4.2)$$

όπου λ το μήκος κύματος.

Όπως έχει αναφερθεί, η σχέση 4.1 δίνει την ακτινική μετατόπιση. Για τον υπολογισμό της ανηγμένης μετακίνησης κατά τη διεύθυνση κίνησης του αντικειμένου απαιτείται η γνώση της κατεύθυνσης κίνησης της κατασκευής και χρησιμοποιείται η σχέση (IBIS-S Controller Software User Manual, 2009):

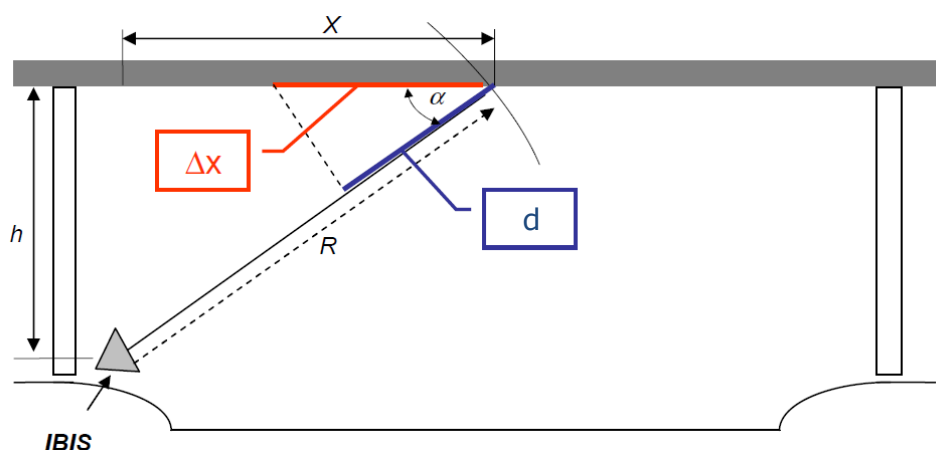
$$\Delta x = \frac{d}{\cos\alpha} = \frac{d}{X} R \quad (4.3)$$

όπου Δx : η οριζόντια μετακίνηση

X : η οριζόντια απόσταση radar - στόχου

R : η ακτινική απόσταση radar - στόχου

α : η γωνία πρόσπτωσης της δέσμης του radar στην κατασκευή



Σχήμα 4.11: Μετατροπή ακτινικής σε οριζόντια μετακίνηση (IBIS-S Controller Software User Manual, 2009)

Σύμφωνα με τη σχέση 4.3, η αβεβαιότητα της ανηγμένης μετατόπισης αυξάνει κατά $\frac{R}{X}$ (Rödelsperger et al., 2010).

■ Παράγοντες που επηρεάζουν τις μετρήσεις

Τρεις είναι οι παράγοντες που μπορεί να επηρεάσουν τις μετρήσεις με το σύστημα IBIS (Luzi et al., 2012):

- Ο πρώτος παράγοντας είναι η ταλάντωση του ίδιου του συστήματος μέτρησης. Από πειραματικές μετρήσεις, βρέθηκε ότι η συχνότητα ταλάντωσης του συστήματος αισθητήρας-τρίποδας βρίσκεται στην περιοχή των 10Hz,

αναλόγως με το ύψος του τρίποδα. Η επίδραση αυτή μπορεί εύκολα να εξαλειφθεί εφαρμόζοντας ένα φίλτρο, για παράδειγμα ένα άνω όριο στη συχνότητα.

- Ένας δεύτερος παράγοντας είναι η επίδραση της ατμόσφαιρας. Παρόλο που η επίδραση της ατμόσφαιρας δεν είναι τόσο έντονη στις μικροκυματικές τεχνικές όσο στις αντίστοιχες οπτικές, δεν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα, εξαιτίας της μεγάλης ευαισθησίας των μετρήσεων φάσης. Ένας τρόπος αντιμετώπισης της παραπάνω επίδρασης είναι ο αποκλεισμός των συχνοτήτων κάτω από την τιμή των 0.2 - 0.25Hz.
- Τρίτος παράγοντας που μπορεί να επηρεάσει τις μετρήσεις με το σύστημα IBIS είναι η παρουσία διαφόρων επιφανειακών στοιχείων, όπως παραθυρόφυλλα, κιγκλιδώματα κτλ., που ταλαντώνονται ανεξάρτητα από την κυρίως κατασκευή. Η επιστροφή του σήματος από τέτοια στοιχεία αναμιγνύεται με το σήμα από την κυρίως κατασκευή. Η αντιμετώπιση αυτής της περίπτωσης είναι πολύπλοκη και απαιτεί την ανάλυση των χρονοσειρών στο πεδίο του χρόνου, των συχνοτήτων και της χωρικής κατανομής των δεδομένων (Luzi et al., 2012).

■ Πλεονεκτήματα - Περιορισμοί

Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει το σύστημα IBIS-S, επιπλέον των γενικότερων πλεονεκτημάτων των επίγειων μικροκυματικών radar (§2.2.3), μπορούν να συνοψιστούν στα εξής:

- ✓ Συνδυάζει υψηλή ακτινική ανάλυση (μέχρι 0.75m) και υψηλή συχνότητα δειγματοληψίας (μέχρι 200Hz)
- ✓ Το σύστημα, υπό κατάλληλες συνθήκες μέτρησης, μπορεί να διακρίνει μετατοπίσεις από μερικά μm έως cm. Το εύρος αυτό είναι αξιόλογο και επιτρέπει στο σύστημα να χρησιμοποιείται σε μεγάλη ποικιλία κατασκευών (Luzi et al., 2012).
- ✓ Λειτουργία ανεξαρτήτως ώρας και καιρού.
- ✓ Δυνατότητα αυτόνομης συνεχόμενης λειτουργίας, χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση και δυνατότητα έγκαιρης προειδοποίησης σε περίπτωση κινδύνου.
- ✓ Ταχεία εγκατάσταση του συνολικού συστήματος.
- ✓ Το γεγονός ότι δεν απαιτείται προσβασιμότητα καθιστά το σύστημα κατάλληλο για μετρήσεις υψηλών κεραιών, καμινάδων ή πύργων και, ακόμα, σε κατασκευές που επικαλύπτονται με στοιχεία όπως αγάλματα, νωπογραφίες κτλ.

Οι περιορισμοί του συστήματος IBIS-S, επιπλέον των γενικότερων περιορισμών των επίγειων μικροκυματικών radar (§2.2.3), μπορούν να συνοψιστούν στους εξής:

- ✘ Οι σχετικές μετατοπίσεις προκύπτουν κατά τη μία διεύθυνση και ακτινικά με αποτέλεσμα να προαπαιτείται η γνώση της διεύθυνσης κίνησης της κατασκευής, ώστε να πραγματοποιηθεί η σωστή αναγωγή.
- ✘ Σε περίπτωση μη ύπαρξης στόχων με ικανή ανακλαστικότητα, υπάρχει η δυνατότητα τοποθέτησης ειδικών ανακλαστήρων. Στην περίπτωση όμως αυτή, απαιτείται πρόσβαση στο αντικείμενο μελέτης.
- ✘ Δεν είναι δυνατή η παρακολούθηση πλαγιών ή άλλων περιοχών καλυμμένων π.χ. με φυτικά στοιχεία, καθώς η ακτινοβολία στην Ku περιοχή του φάσματος δεν διεισδύει στην φυτική βλάστηση.

■ Λογισμικό συλλογής και επεξεργασίας

Ως λογισμικό διαχείρισης του συστήματος IBIS-S διατίθεται το IBIS-S Controller. Είναι εγκατεστημένο στο φορητό Η/Υ που συνοδεύει το σύστημα και χρησιμοποιείται για τον έλεγχό του, τη συλλογή και παρουσίαση των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, την αποθήκευση και την προεπεξεργασία των δεδομένων.

Το λογισμικό χωρίζεται σε ενότητες. Αρχικά εισάγεται ο επιθυμητός τρόπος λειτουργίας (στατική ή δυναμική), στη συνέχεια ορίζονται οι παράμετροι μέτρησης, όπως μέγιστη συχνότητα καταγραφής, τύπος κεραίας κτλ., ακολουθεί ο ορισμός της σχετικής γεωμετρίας μεταξύ οργάνου και στόχου και, τέλος, το όνομα του αρχείου καταγραφής. Υπάρχει η δυνατότητα παρακολούθησης των μετρήσεων κατά τη διάρκεια της συλλογής και η δυνατότητα προεπεξεργασίας, δηλαδή εξαγωγής συχνότητας ταλάντωσης και μετακίνησης της κατασκευής, μετά το πέρας της συλλογής των δεδομένων.

Ως λογισμικό επεξεργασίας χρησιμοποιείται το IBIS Data Viewer ή IBIS-DV. Μέσα από το περιβάλλον του λογισμικού ορίζεται ο τύπος της κατασκευής (οριζόντια ή κατακόρυφη), η γεωμετρία παρατήρησης και άλλες παράμετροι όπως ο τύπος της κεραίας, η συχνότητα δειγματοληψίας κτλ. Στη συνέχεια εκτελείται η επεξεργασία των παρατηρήσεων και δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει τα επιθυμητά φαινόμενα ακτινικής ανάλυσης (range bin) για τα οποία θα προκύψουν τα αποτελέσματα. Ακολουθεί η ανάλυση των δεδομένων για κάθε επιλεγμένο φαινόμενο (απαλοιφή ανεπιθύμητων επιστροφών (clutter) όπου χρειάζεται, καθορισμός άνω και κάτω ορίων στο χρόνο ή τη συχνότητα), και η εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε πολικό ή καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, με τη μορφή γραφήματος ή πίνακα

δεδομένων. Το λογισμικό έχει τη δυνατότητα να υπολογίσει ένταση (amplitude) και φάση ταλάντωσης, μετακίνηση, ταχύτητα και επιτάχυνση, είτε ακτινικά (LOS) είτε ανηγμένα ως προς την κίνηση της κατασκευής, στο πεδίο του χρόνου και στο πεδίο των συχνοτήτων.

Περαιτέρω επεξεργασία των δεδομένων που προέκυψαν από το λογισμικό IBIS-DV, έγινε με το μαθηματικό πακέτο MATLAB της MathWorks.

■ Εξοπλισμός

- Αισθητήρας IBIS-S
- 2 κεραίες συστήματος τύπου IBIS-H20
- Τρίποδας του συστήματος
- Φορητός υπολογιστής του συστήματος
- 2 συσσωρευτές
- Απαιτούμενα καλώδια σύνδεσης

4.2.3 Ρομποτικός Γεωδαιτικός Σταθμός (TCA 1800, Leica Geosystems)

Ο Ρομποτικός Γεωδαιτικός Σταθμός (RTS) Leica TCA1800 είναι όργανο υψηλών επιδόσεων, κατάλληλο για απαιτητικές εφαρμογές. Χρησιμοποιείται σε τεχνικά έργα υψηλών προδιαγραφών, όπως σήραγγες και γέφυρες, σε εφαρμογές μόνιμης παρακολούθησης κατασκευών, για έλεγχο μηχανών κ.ά.

■ Τεχνικά χαρακτηριστικά

Ο σταθμός TCA1800 ενσωματώνει όλες τις ξεχωριστές λειτουργίες των ρομποτικών γεωδαιτικών σταθμών, όπως είναι η αυτόματη περιστροφή, η αυτόματη αναγνώριση στόχου (ATR), η παρακολούθηση κινούμενου πρίσματος (LOCK) και ο τηλεχειρισμός (RCS). Ξεχωριστό, ακόμη, χαρακτηριστικό, του οργάνου είναι η ατέρμονη κίνηση.

Η περιστροφή του τηλεσκοπίου επιτυγχάνεται μέσω ενός συστήματος σερβομηχανισμών. Οι λειτουργίες αυτόματης αναγνώρισης και παρακολούθησης στόχου βασίζονται σε σύστημα ενεργητικής παρακολούθησης και πραγματοποιούνται με τη βοήθεια CCD διατάξεων και ειδικών αλγορίθμων.

Σε εφαρμογές παρακολούθησης κινούμενου στόχου, διατίθενται δύο μέθοδοι μέτρησης μηκών η TRK (TRaCKing) και η ταχύτερη RTRK (Rapid TRaCKing). Με την μέθοδο RTRK, η οποία και χρησιμοποιήθηκε κατά την διάρκεια των μετρήσεων, μπορούν να επιτευχθούν συχνότητες καταγραφής έως 6.7 Hz (Πίνακας 4.3).

Στους παρακάτω πίνακες παρατίθενται μερικά από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του σταθμού, και κυρίως αυτά που αφορούν σε κινηματικό εντοπισμό.

Είδος Μέτρησης		Ακρίβεια	Χρόνος ολοκλήρωσης	Συχνότητα δειγματοληψίας	Απόδοση
Γωνίες		±1" (±3cc)	-	-	1"
Μήκη	Standard	±1mm±2ppm	3sec	-	0.1mm
	Fast	±3mm±2ppm	1sec	-	
	TRK	±5mm±2ppm	0.3sec	3.3 Hz	
	RTRK	±10mm±2ppm	0.15sec	6.7 Hz	

Πίνακας 4.3: Ακρίβειες μέτρησης Leica TCA1800 (Leica TPS-1000 User Manual)

Λειτουργία	Τύπος πρίσματος	Εμβέλεια (με μέτριες ατμοσφαιρικές συνθήκες) (m)
ATR	Απλό	1000
	360°	500
LOCK	Απλό	500
	360°	350

Πίνακας 4.4: Εμβέλεια λειτουργίας αναγνώρισης (ATR) και παρακολούθησης (LOCK) στόχου για το Leica TCA1800 (Leica TPS-1000 User Manual)

Είδος μέτρησης	Απόσταση από όργανο (m)	Ακρίβεια τοποθέτησης σταυρονήματος (σε απλό πρίσμα) (mm)
Τυπική	έως 400	2
	> 400	εξαρτάται από την ακρίβεια μέτρησης γωνιών
Ακριβής	έως 200	1
	> 200	εξαρτάται από την ακρίβεια μέτρησης γωνιών

Πίνακας 4.5: Ακρίβεια τοποθέτησης σταυρονήματος στο κέντρο του πρίσματος για το Leica TCA1800 (Leica TPS-1000 User Manual)

Ταχύτητα περιστροφής τηλεσκοπίου (για κινηματικό εντοπισμό)	στα 20m	0.2m/sec
	στα 100m	1m/sec
Χρόνος αναζήτησης στόχου	2-4 sec	
Πεδίο αναζήτησης στόχου	1° 33'	
Χρόνος 'κλειδώματος' στόχου σε ενεργό πεδίο ATR	< 1 sec	
Δυνατότητα ανάκτησης στόχου μετά από παρεμβολή εμποδίου	Ναι	

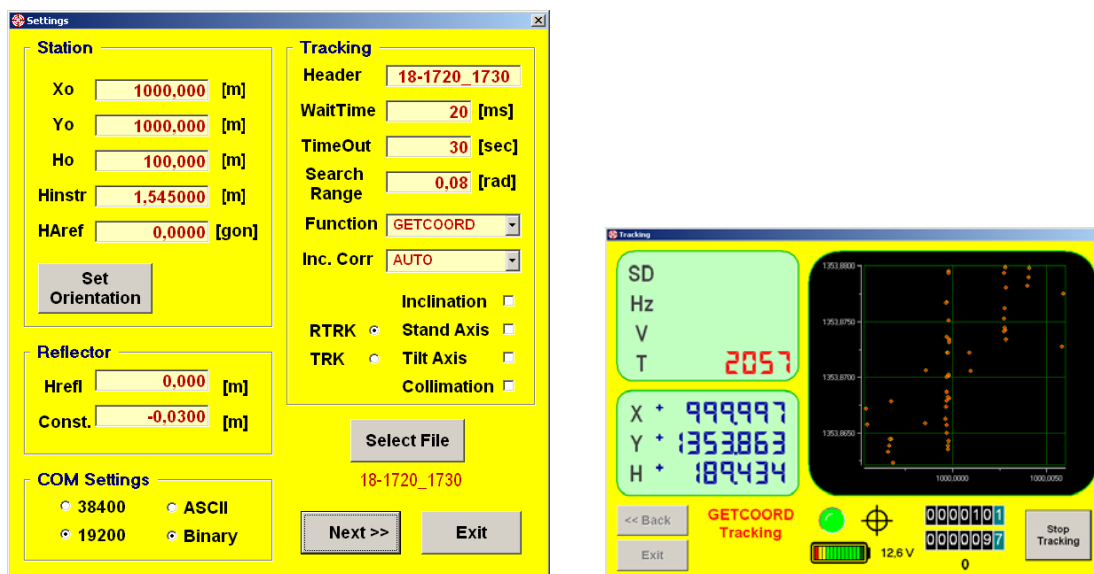
Πίνακας 4.6: Χαρακτηριστικά τηλεσκοπίου και αναζήτησης στόχου για το Leica TCA1800 (Leica TPS-1000 User Manual)

■ Λογισμικό συλλογής και επεξεργασίας

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για τον χειρισμό του οργάνου κατά τη διάρκεια των μετρήσεων ονομάζεται Leica Controller και αναπτύχθηκε - για το συγκεκριμένο όργανο - στα πλαίσια μεταπτυχιακής εργασίας (Δασκαλάκης, 2005). Το λογισμικό αναπτύχθηκε κατά βάση για εφαρμογές δυναμικής παρακολούθησης κατασκευών και παρακολούθηση κινούμενου στόχου. Η υλοποίησή του έγινε σε γλώσσες προγραμματισμού Visual Basic 6.0 και C++, η οποία υποστηρίζει το πρωτόκολλο επικοινωνίας GeoCOM της Leica.

Το περιβάλλον του λογισμικού επιτρέπει τον απόλυτο έλεγχο του οργάνου από τον υπολογιστή, πριν και κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Αρχικά εισάγονται οι παράμετροι μέτρησης, όπως συντεταγμένες στάσης, ύψος στόχου, γωνία προσανατολισμού, όνομα αρχείου καταγραφής, μέθοδος μέτρησης κ.ά. Το λογισμικό έχει σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να καταγράφει τις παρατηρήσεις και με τις δυο μεθόδους, TRK και RTRK.

Με το συγκεκριμένο λογισμικό, η συχνότητα καταγραφής με τη μέθοδο RTRK κυμαίνεται στα 5.8 Hz (αυξάνει ο χρόνος ολοκλήρωσης της μέτρησης σε 0.17sec). Το όργανο έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παρακολούθηση φαινομένων συχνότητας έως 2.9 Hz (κατά το θεώρημα των Nyquist-Shannon). Σημαντικό χαρακτηριστικό του λογισμικού είναι η ακριβής επισήμανση του χρόνου των παρατηρήσεων, που εφαρμόζεται ακολουθώντας την ακρίβεια του εσωτερικού χρονομέτρου του οργάνου (0.001 sec).



α. Οθόνη εισαγωγής αρχικών παραμέτρων

β. Οθόνη παρακολούθησης μετρήσεων

Σχήμα 4.12: Λογισμικό Leica Controller

Για την επεξεργασία των παρατηρήσεων που προέκυψαν από το RTS, χρησιμοποιήθηκαν τα προγράμματα Microsoft EXCEL και MathWorks MATLAB.

■ Εξοπλισμός

Τέλος, ο απαραίτητος εξοπλισμός, για τις μετρήσεις με το RTS, ακολουθεί παρακάτω:

- Γεωδαιτικός Σταθμός Leica TCA1800
- Τρίποδας
- Τρικόχλιο
- Φορητός υπολογιστής
- 1 συσσωρευτής 12V
- Απαιτούμενα καλώδια σύνδεσης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Προπαρασκευαστικές Εργασίες και Συλλογή Δεδομένων Πεδίου

Το παρόν Κεφάλαιο χωρίζεται σε δύο μέρη: το πρώτο μέρος αναφέρεται στις εργασίες (γραφείου και υπαίθρου) που προηγήθηκαν των μετρήσεων και πιο συγκεκριμένα στα κριτήρια που συνετέλεσαν στην επιλογή των θέσεων παρατήρησης και στην προετοιμασία των συστημάτων (τροφοδοσία, επικοινωνία, εγκατάσταση). Το δεύτερο μέρος αναφέρεται στη συλλογή των δεδομένων πεδίου και στις επικρατούσες συνθήκες και ολοκληρώνεται με την παρουσίαση κάποιων διαγραμμάτων όσον αφορά τις ανεμολογικές συνθήκες κατά τη διάρκεια των παρατηρήσεων.

5.1 Προπαρασκευαστικές εργασίες

Οι προπαρασκευαστικές εργασίες περιελάμβαναν τόσο την προετοιμασία (σχεδιασμός μετρήσεων και προετοιμασία εξοπλισμού) στο Εργαστήριο, όσο και την υλοποίηση των παραπάνω στο πεδίο. Οι απαιτούμενες επαφές μεταξύ της διεύθυνσης του ΑΗΣ Λαυρίου και του Εργαστηρίου είχαν πραγματοποιηθεί ήδη για την διεκπόνηση άλλων ερευνητικών εργασιών.

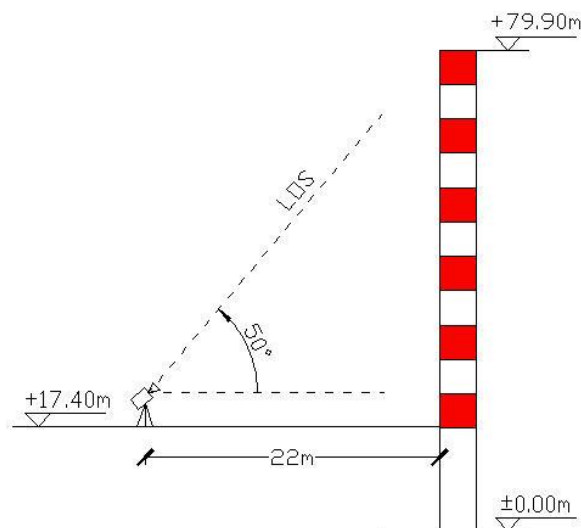
5.1.1 Επιλογή / υλοποίηση γεωμετρίας παρατήρησης

Στόχος των εργασιών ήταν η λήψη ταυτόχρονων μετρήσεων στην καμινάδα με 3 διαφορετικά όργανα: το ρομποτικό γεωδαιτικό σταθμό, το ψηφιακό κλισίμετρο και το radar μικροκυματικής συμβολομετρίας. Ιδανικά, θα έπρεπε οι παρατηρήσεις να αναφέρονται στο ίδιο σημείο (κατά προτίμηση το ψηλότερο) της καμινάδας και οι διευθύνσεις σκόπευσης να είναι παράλληλες. Στην πραγματικότητα αυτό δεν ήταν δυνατό, λόγω των παρακάτω περιορισμών, που αποτέλεσαν και τα κριτήρια για τη σχετική θέση τοποθέτησης του εξοπλισμού:

- Περιορισμοί στην τοποθέτηση του Radar σε σχέση με την καμινάδα μελέτης.

Η θέση τοποθέτησης του radar επιλέχθηκε με κριτήρια: α. το άνοιγμα του λοβού της κεραίας να καλύπτει την καμινάδα, β. την καλή επιστροφή σήματος από την καμινάδα και γ. οι όμορες καμινάδες να μην προκαλούν ανεπιθύμητες επιστροφές στις μετρήσεις. Τελικά και μετά από δοκιμές, η απόσταση τοποθέτησης του Radar από την καμινάδα προέκυψε 22m. Η

διεύθυνση σκόπευσης του Radar (LOS) αποτέλεσε κριτήριο για την τοποθέτηση και των υπολοίπων αισθητήρων. Η γεωμετρία για το IBIS αποτυπώνεται στο σκαρίφημα του Σχήματος 5.1.



Σχήμα 5.1: Γεωμετρία παρατήρησης του συστήματος IBIS

■ Η τοπογραφία της περιοχής.

Το τοπογραφικό ανάγλυφο αλλά και η διαμόρφωση της ευρύτερης περιοχής μελέτης δεν επέτρεπαν την τοποθέτηση του γεωδαιτικού σταθμού σε σημείο τέτοιο, ώστε η διεύθυνση σκόπευσης να είναι παράλληλη με το LOS του Radar. Επιπλέον, η τοπογραφία της περιοχής περιόριζε και τις ορατότητες μεταξύ πιθανών σημείων τοποθέτησης του RTS και του στόχου.

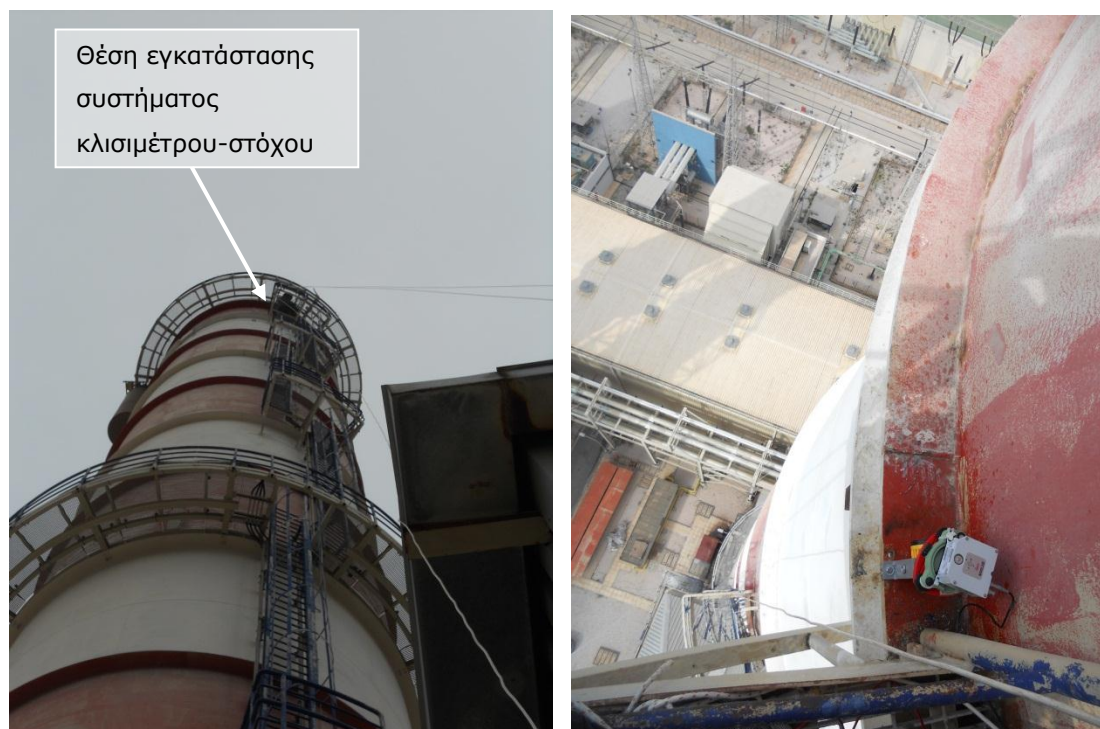
■ Περιορισμοί στην τοποθέτηση του RTS

Η τοποθέτηση του RTS έπρεπε να γίνει σε τέτοιο σημείο ώστε, αφενός να μην σχηματίζει η διεύθυνση σκόπευσης πολύ μικρή γωνία ύψους, αφετέρου η απόσταση από την καμινάδα να μην ξεπερνάει τα 300-400m. Περιορισμό επίσης αποτελούσε η θέση τοποθέτησης του στόχου. Έγιναν μερικές δοκιμές, έτσι ώστε να βρεθεί η βέλτιστη θέση. Λόγω της μικρής διάρκειας των παρατηρήσεων, παράγοντες όπως η ύπαρξη σταθερής τροφοδοσίας ή η προστασία από τον άνεμο δεν αποτέλεσαν κριτήριο.

■ Περιορισμοί στην τοποθέτηση του κλισιμέτρου και του στόχου.

Βασικό περιορισμό στην τοποθέτηση του συστήματος κλισίμετρο-στόχος πάνω στην καμινάδα αποτέλεσε η θέση της κατακόρυφης σκάλας της καμινάδας, που ήταν και η μόνη πρόσβαση. Επίσης, η ορατότητα του στόχου από την θέση του RTS έπρεπε να είναι εξασφαλισμένη. Κρίθηκε ότι στην κορυφή της καμινάδας οι συνθήκες δεν ήταν κατάλληλες για τη λειτουργία του κλισιμέτρου (έντονες αυξομειώσεις θερμοκρασίας λόγω

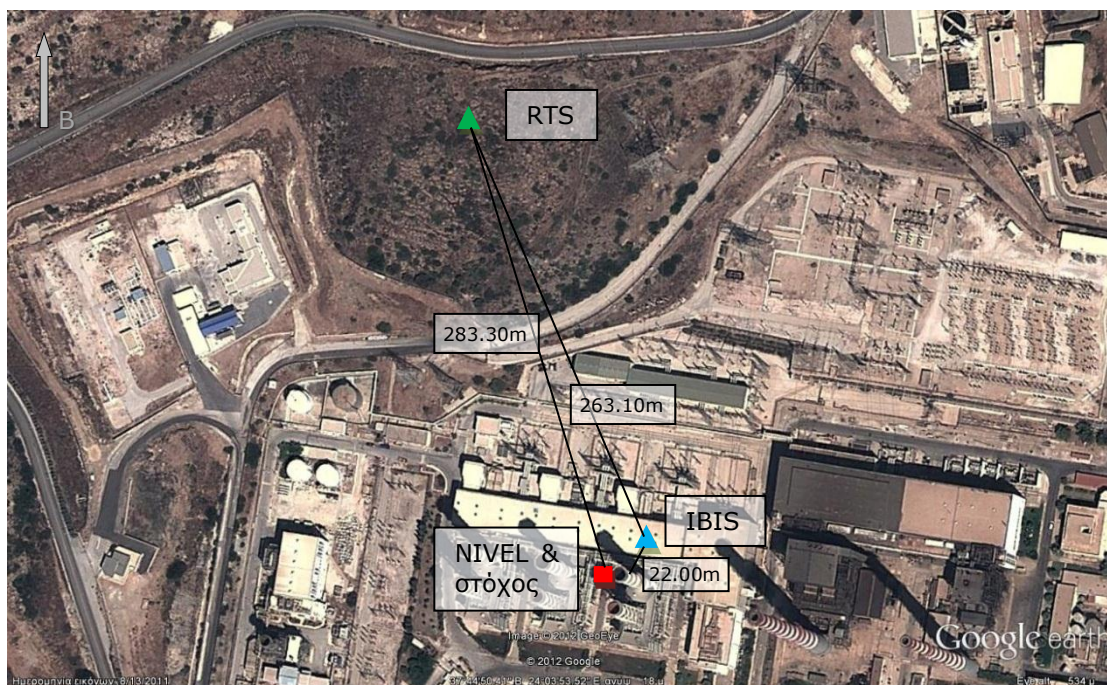
καυσαερίων, δονήσεις κτλ.), επομένως το κλισιόμετρο και ο στόχος τοποθετήθηκαν στην τελευταία γραδελάδα, 5m κάτω από την κορυφή της καμινάδας (Σχήμα 5.2).



Σχήμα 5.2: Θέση εγκατάστασης συστήματος κλισιόμετρου-στόχου στην καμινάδα

Οι τελικές θέσεις για την τοποθέτηση των αισθητήρων αποφασίστηκαν μετά από διερευνητικές επισκέψεις στην περιοχή μελέτης και δοκιμές. Για να είναι οι παρατηρήσεις ομοιογενείς, κρίθηκε αναγκαία και η ταύτιση των διευθύνσεων σκόπευσης, με προσανατολισμό του NIVEL κατά την εγκατάστασή του και στροφή των παρατηρήσεων του NIVEL και του RTS κατά την επεξεργασία.

Στα παρακάτω σκαριφήματα φαίνονται οι σχετικές θέσεις των τριών συστημάτων παρατήρησης με την καμινάδα μελέτης, οριζοντιογραφικά (Σχήμα 5.3) και υψομετρικά (Σχήμα 5.4).



Σχήμα 5.3: Άποψη τελικής θέσης συστημάτων στην περιοχή μελέτης οριζοντιογραφικά



Σχήμα 5.4: Άποψη τελικής θέσης συστημάτων στην περιοχή μελέτης υψομετρικά

5.1.2 Λογισμικό επικοινωνίας μετρήσεων κλισιμέτρου – Η/Υ

Επειδή η πρόσβαση στο κλισίμετρο δεν ήταν δυνατή κάθε φορά που θα ήταν επιθυμητή η συλλογή δεδομένων, χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα ασύρματης επικοινωνίας, το οποίο αναπτύχθηκε και υλοποιήθηκε από τους Θ. Μπίμη και Γ. Πηγιώτη. Για την ασύρματη επικοινωνία χρησιμοποιήθηκαν 2 ασύρματα modems (radio modems) εμβέλειας 3km. Ένα από αυτά συνδέθηκε με το ψηφιακό κλισίμετρο μέσω θύρας RS232 και το άλλο συνδέθηκε με το φορητό υπολογιστή που χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο της διαδικασίας μέτρησης με το κλισίμετρο. Η επικοινωνία των 2 modems επιτεύχθηκε μέσω ειδικού προγραμματισμού από τον Θ. Μπίμη.

5.1.3 Σύστημα συνεχούς τροφοδοσίας κλισιμέτρου

Επειδή, όπως αναφέρθηκε, η πρόσβαση στο κλισίμετρο δεν θα ήταν δυνατή κάθε φορά, ώστε να συνδέεται με πηγή ρεύματος, εγκαταστάθηκε ένα σύστημα συνεχούς τροφοδοσίας του, μέσω φωτοβολταϊκού. Το κλισίμετρο συνδέθηκε με συσσωρευτή, ο οποίος φορτιζόταν μέσω φωτοβολταϊκού πίνακα. Η όλη κατασκευή περιτυλίχθηκε με διαφανή μεμβράνη, ώστε να προστατεύεται από την βροχή και την υγρασία.

5.1.4 Εγκατάσταση ψηφιακού κλισιμέτρου – στόχου

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την εγκατάσταση του κλισιμέτρου και του στόχου ήταν ο ακόλουθος:

- Ασύρματοι επικοινωνίας
- Ζώνες ασφαλείας, σχοινιά, τροχαλία, κράνη
- Τσάντες μεταφοράς
- Στόχος (πρίσμα ειδικά διαμορφωμένο μέσα σε σιδερένιο πλαίσιο, στο πάνω μέρος του οποίου βρίσκεται βίδα, όπου βιδώνει το τρικόχλιο).
- Τρικόχλιο
- Κλισίμετρο Nivel. Το κλισίμετρο προσαρτήθηκε με δέστρες (tire-up) στο τρικόχλιο, ώστε να βιδωθεί πάνω στο πρίσμα.
- Μετατροπέας Nivel και καλώδιο
- Φορητός Η/Υ
- Σύστημα ασύρματης επικοινωνίας κλισιμέτρου – φορητού Η/Υ
- Τρυπάνι μαγνητικό
- Μπαλαντέζα

- Δέστρες (tire-up)
- Σφιγκτήρας
- Πυξίδα
- Μέτρο
- Κόφτης
- Μονωτική ταινία
- Ράμα
- Βίδες, άλλεν, καρυδάκια
- Κατσαβίδια
- Κλειδιά
- Πένσα
- Σφυρί
- Συσσωρευτής
- Φωτοβολταϊκός πίνακας
- Διαφανής μεμβράνη
- Φωτογραφική μηχανή
- Πινακίδα γραφής

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η θέση τοποθέτησης του κλισιμέτρου ήταν περιορισμένη στα σημεία εκατέρωθεν και κατά μήκος της σκάλας πρόσβασης. Το κλισίμετρο και ο στόχος τοποθετήθηκαν στην τελευταία γραδελάδα, πάνω στην φλάντζα που ενώνει τα 2 κομμάτια της καμινάδας, 5m κάτω από την κορυφή της, δηλαδή σε ύψος $79.90\text{m}-5\text{m}=74.90\text{m}$. Για την εγκατάσταση τρυπήθηκε η φλάντζα με τρυπάνι, ώστε να τοποθετηθεί ο στόχος και από πάνω, το σύστημα κλισιμετρο-τρικόχλιο (Σχήμα 5.5).



Σχήμα 5.5: Εγκατάσταση συστήματος κλισιμέτρου-στόχου στην καμινάδα

Αναγκαίος ήταν και ο προσανατολισμός του κλισιμέτρου, ώστε ένας από τους άξονές του να είναι παράλληλος με τη διεύθυνση σκόπευσης (LOS) του IBIS. Επειδή η χρήση πυξίδας ήταν αδύνατη, ο προσανατολισμός επιτεύχθηκε με αξονική μετατόπιση, δηλαδή υλοποίηση της διεύθυνσης του LOS στη θέση τοποθέτησης του κλισιμέτρου. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν η εξής: Αρχικά αποτυπώθηκαν με το RTS η θέση του IBIS και ένα προκαθορισμένο σημείο πάνω στην καμινάδα που ανήκει στον άξονα LOS, ώστε να υλοποιηθεί η διεύθυνση. Ακολούθησε η χάραξη μέσω παραλληλίας 2 σημείων πάνω στην φλάντζα, που απείχαν μεταξύ τους 1.20m.

Για την εγκατάσταση του εξοπλισμού έγιναν 2 επισκέψεις στην περιοχή μελέτης (η εγκατάσταση του IBIS είχε προηγηθεί για τις ανάγκες άλλης ερευνητικής εργασίας):

1. 24-02-2012: Αναρρίχηση στην καμινάδα, διερεύνηση θέσης τοποθέτησης κλισιμέτρου και πρίσματος, αποτυχία εγκατάστασης κλισιμέτρου και στόχου (ακατάλληλο τρυπάνι), διερεύνηση τοποθέτησης θέσης RTS.
2. 16-03-2012: Αναρρίχηση στην καμινάδα με την βοήθεια επαγγελματία εναερίτη, εγκατάσταση του κλισιμέτρου και του στόχου, οριζοντίωση και προσανατολισμός του κλισιμέτρου, έλεγχος ασύρματης επικοινωνίας με φορητό Η/Υ, ρύθμιση του κλισιμέτρου μέσω του Nivel Tool.

Για την αναρρίχηση στην καμινάδα λήφθηκαν όλα τα απαιτούμενα μέτρα ασφαλείας και για την ανύψωση των εργαλείων και του εξοπλισμού χρησιμοποιήθηκε ειδικό σύστημα μεταφοράς με σχοινιά και τροχαλία (Σχήμα 5.6).



Σχήμα 5.6: Στιγμιότυπα ανύψωσης εξοπλισμού στην καμινάδα

Να σημειωθεί ότι κατά την αναρρίχηση στην καμινάδα και την εγκατάσταση του εξοπλισμού, αντιμετωπίστηκαν δυσκολίες λόγω του αέρα, του κρύου, του βάρους του εξοπλισμού και των δονήσεων από την λειτουργία των εγκαταστάσεων. Να σημειωθεί επίσης, ότι η χρήση της πυξίδας δεν ήταν δυνατή, εξαιτίας των ισχυρών ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών από τη λειτουργία της εγκατάστασης.

5.2 Συλλογή δεδομένων πεδίου

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια μίας ημέρας. Η ημερομηνία διεξαγωγής των μετρήσεων επιλέχθηκε με κριτήριο την προβλεπόμενη ένταση του ανέμου στην περιοχή (min 7 Beaufort (15m/sec), χωρίς βροχόπτωση). Πραγματοποιήθηκαν δύο επισκέψεις στην περιοχή μελέτης με σκοπό την διεξαγωγή των μετρήσεων. Κατά την πρώτη επίσκεψη στις 10/04/2012, δεν έγινε δυνατή η πραγματοποίηση μετρήσεων με το NIVEL, επειδή λόγω περιορισμένης ηλιοφάνειας, το σύστημα τροφοδοσίας του δεν απέδωσε. Τελικά, πραγματοποιήθηκε μια σειρά μετρήσεων, στις 20-06-2012.

Κατά τη διάρκεια των παρατηρήσεων καταγραφόταν ο χρόνος έναρξης των μετρήσεων από τον φορητό Η/Υ του κάθε αισθητήρα, έτσι ώστε να υπάρχει χρονική συσχέτιση κατά την διαδικασία του συγχρονισμού των παρατηρήσεων.

5.2.1 Μετρήσεις - 20/06/2012

Μετά την πρώτη αποτυχημένη προσπάθεια στις 10/04/2012, οι μετρήσεις τελικά πραγματοποιήθηκαν στις 20-06-2012. Η ένταση του ανέμου σύμφωνα με τις προβλέψεις ήταν 6-7 Beaufort (12-15m/sec), με ηλιοφάνεια.

Εγκαταστάθηκαν τα συστήματα του IBIS και του RTS, ελέγχθηκε η επικοινωνία του NIVEL με τον φορητό υπολογιστή και άρχισε η καταγραφή των μετρήσεων με τα συστήματα. Το συνεργείο αποτελούνταν από 2 επιμέρους ομάδες, μία για τον χειρισμό του IBIS και μία για τον χειρισμό των RTS και NIVEL. Η διάρκεια των μετρήσεων ήταν συνολικά περίπου 1 ώρα και 45 λεπτά.

Η συλλογή δεδομένων, τόσο με το σύστημα IBIS όσο και με το NIVEL, πραγματοποιήθηκε χωρίς προβλήματα. Καταγράφηκαν από 3 σειρές μετρήσεων για το κάθε σύστημα στα αντίστοιχα αρχεία, που παρατίθενται στους παρακάτω πίνακες:

Αρχείο	Έναρξη	Λήξη	Διάρκεια
2012.06.20-14.30.10-dynS-000000-Surv	14:30:10	14:45:10	15min 00sec
2012.06.20-14.46.30-dynS-000001-Surv	14:46:30	15:11:30	25min 00sec
2012.06.20-15.14.21-dynS-000002-Surv	15:14:21	15:29:21	15min 00sec

Πίνακας 5.1: Αρχεία μετρήσεων του συστήματος IBIS

Αρχείο	Έναρξη	Λήξη	Διάρκεια
lavrio_2012_06_20_#1	14:31:07	15:05:25	34min 18sec
lavrio_2012_06_20_#2	15:07:25	15:14:58	7min 33sec
lavrio_2012_06_20_#3	15:17:19	15:32:02	14min 43sec

Πίνακας 5.2: Αρχεία μετρήσεων του κλισιμέτρου NIVEL

Προβλήματα παρουσιάστηκαν κατά την συλλογή δεδομένων με το σύστημα του RTS, το οποίο 'πάγωνε', πιθανώς λόγω ανεπαρκούς υπολογιστικής ισχύος του φορητού υπολογιστή του. Μετά από αρκετές επανεκκινήσεις τόσο του γεωδαιτικού σταθμού, όσο και του υπολογιστή, αντικαταστάθηκε ο υπολογιστής και η επίδοση του συστήματος βελτιώθηκε, χωρίς το πρόβλημα του 'παγώματος' να εξαλειφθεί. Με το RTS καταγράφηκαν τελικά 2 σειρές μετρήσεων στα αντίστοιχα αρχεία καταγραφής που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Αρχείο	Έναρξη	Λήξη	Διάρκεια
rtrk5	14:23:27	14:42:19	18min 52sec
rtrk6	14:49:36	15:27:16	37min 40sec

Πίνακας 5.3: Αρχεία μετρήσεων του RTS

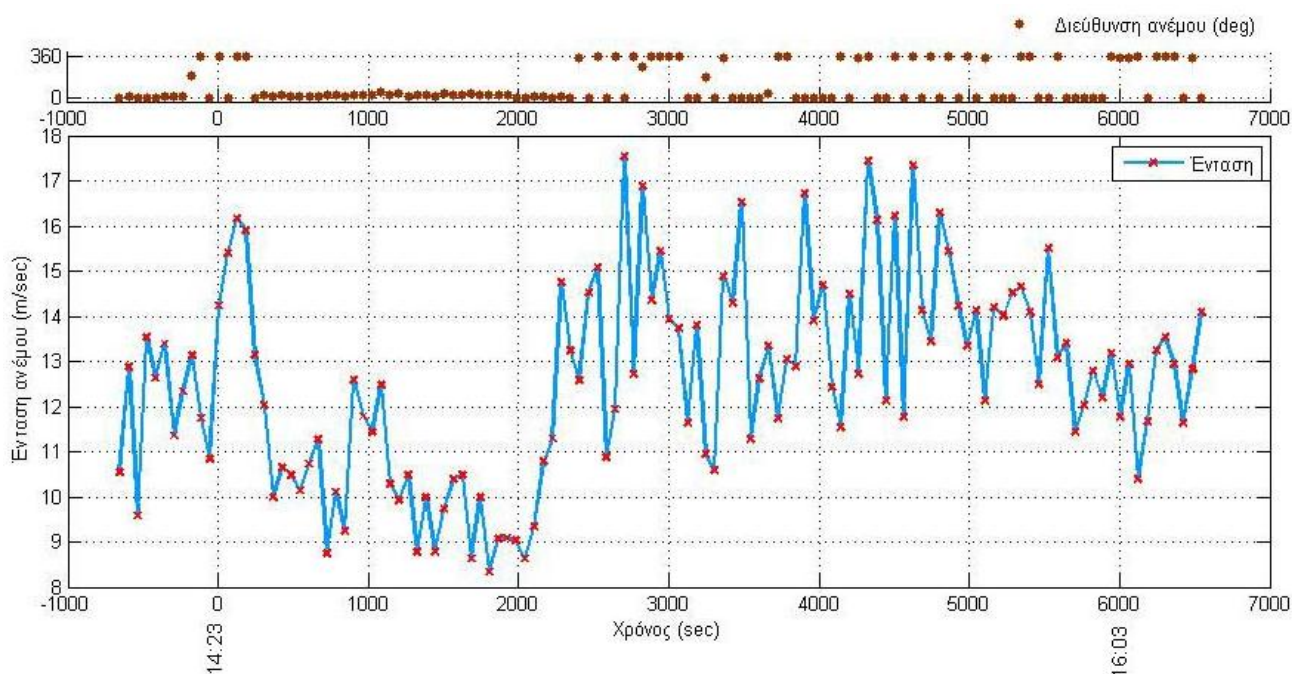
Επίσης, από τις καταγραφές των χρονομέτρων των φορητών Η/Υ του κάθε αισθητήρα, προκύπτουν οι παρακάτω χρονικές διαφορές:

	Φορητός Η/Υ IBIS	Φορητός Η/Υ RTS	Φορητός Η/Υ NIVEL
Διαφορά χρονομέτρου (sec)	+7	0	+175

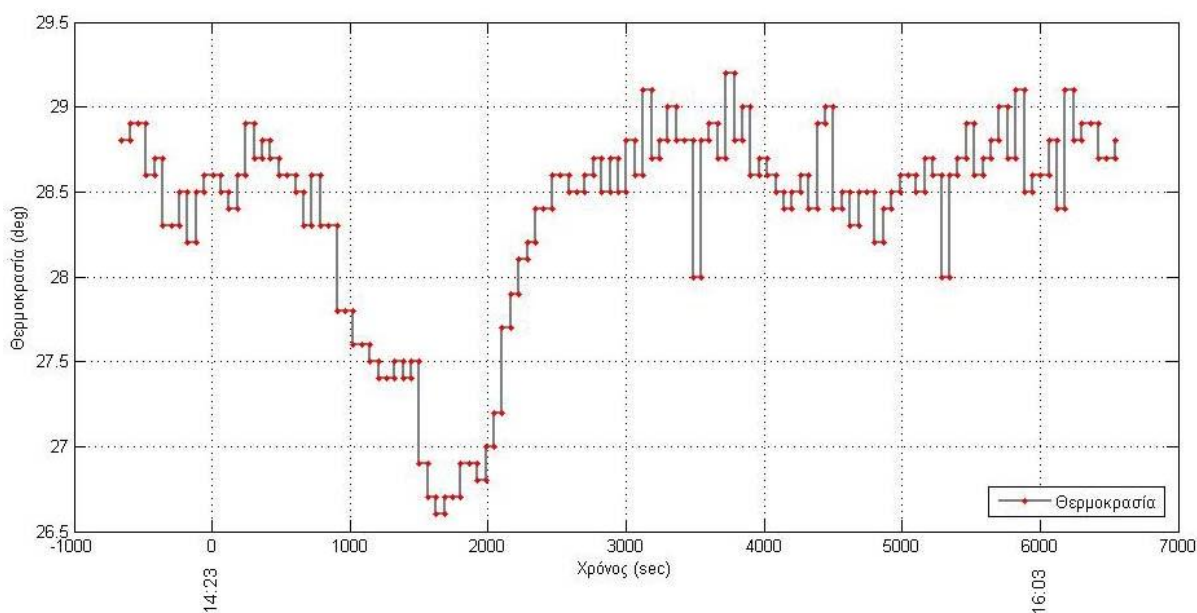
Πίνακας 5.4: Χρονικές διαφορές μεταξύ των χρονομέτρων των φορητών Η/Υ των 3 συστημάτων

Τα μετεωρολογικά δεδομένα (ένταση και διεύθυνση του ανέμου, θερμοκρασία και υγρασία) για την ημέρα των μετρήσεων προέκυψαν από τον μετεωρολογικό σταθμό της ΔΕΗ στο Λαύριο, περίπου 2.2km νότια από τον ΑΗΣ. Τα δεδομένα συγχρονίστηκαν με το χρόνο του συστήματος IBIS. Όπως προκύπτει από τα μετεωρολογικά δεδομένα, η μέση τιμή της έντασης του ανέμου για το χρονικό διάστημα των παρατηρήσεων (14:23 – 16:03) ήταν 12.7m/sec (περίπου 6 Beaufort), ενώ η διεύθυνσή του την πρώτη ώρα των παρατηρήσεων ήταν Β-ΒΑ, ενώ την δεύτερη ώρα ήταν κυρίως Βόρεια με ριπές από Νότο. Η μέση τιμή της θερμοκρασίας ήταν περίπου 28.5°C, χωρίς σημαντικές μεταβολές. Παρακάτω

παράτιθενται τα διαγράμματα έντασης ανέμου, διεύθυνσης ανέμου και θερμοκρασίας, όπως προέκυψαν από τα δεδομένα για το χρονικό διάστημα 14:23 – 16:03.



Σχήμα 5.7: Διάγραμμα έντασης και διεύθυνσης του ανέμου για το χρονικό διάστημα 14:23-16:03



Σχήμα 5.8: Διάγραμμα θερμοκρασίας για το χρονικό διάστημα 14:23-16:03

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Μεθοδολογία Ανάλυσης Δεδομένων

Το παρόν Κεφάλαιο αναφέρεται στις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να γίνει η επεξεργασία των δεδομένων. Έτσι, αρχικά γίνεται αναφορά στους τύπους των σημάτων και στα σφάλματα που υπεισέρχονται σε αυτά, ενώ στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά τα βασικά στατιστικά μεγέθη και οι μέθοδοι επεξεργασίας και ανάλυσης σημάτων στο πεδίο του χρόνου, του χώρου και των συχνοτήτων.

6.1 Γενικά

Η ανάλυση των χρονοσειρών που σχηματίζουν τα δεδομένα που προκύπτουν από την παρακολούθηση της συμπεριφοράς κατασκευών και φυσικών δομών έχει στόχο τον προσδιορισμό βασικών παραμέτρων της κίνησής τους και της φύσης του σήματος, όπως περιοδικότητα, εύρος κίνησης, ιδιοσυχνότητα, περίοδο κτλ. Από τις παραμέτρους αυτές προκύπτουν και οι απαντήσεις στα πρακτικά ερωτήματα που αντιμετωπίζουν οι μηχανικοί.

Η επεξεργασία και η ανάλυση του σήματος γίνεται τόσο στο πεδίο του χρόνου και του χώρου, όσο και στο πεδίο των συχνοτήτων, χρησιμοποιώντας μεθόδους μαθηματικής ανάλυσης και στατιστικής.

6.2 Ανάλυση δεδομένων στο πεδίο του χρόνου και του χώρου

Η ανάλυση των δεδομένων στο πεδίο του χρόνου περιλαμβάνει στατιστική επεξεργασία των χρονοσειρών, εντοπισμό πιθανών χονδροειδών σφαλμάτων, διαγράμματα συχνοτήτων εμφάνισης (ιστόγραμμα). Στο πεδίο του χώρου, η ανάλυση περιλαμβάνει τη δημιουργία των διαγραμμάτων οριζοντιογραφίας.

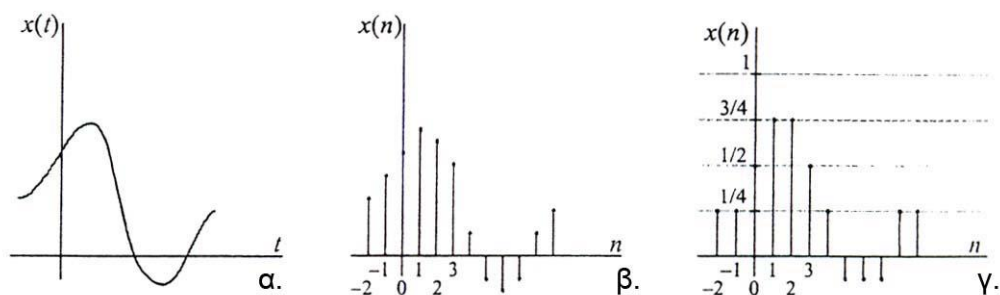
Με το όρο *χρονοσειρά* εννοούμε μια σειρά από παρατηρήσεις που λαμβάνονται σε ορισμένες χρονικές στιγμές ή περιόδους.

6.2.1 Τύποι σημάτων

Γενικά, ως *σήμα* ορίζεται (Σκόδρας et al., 2002) “το σύνολο των τιμών που λαμβάνει μια φυσική ποσότητα. Μαθηματικά αυτό εκφράζεται ως συνάρτηση ή ακολουθία μιας ή περισσότερων ανεξάρτητων μεταβλητών. Τα σήματα περιέχουν πληροφορία σχετικά με τη συμπεριφορά ή την φύση ενός φαινομένου”. Ειδικότερα, στα πλαίσια αυτής της εργασίας, ο όρος *σήμα* αναφέρεται σε οποιαδήποτε συνάρτηση μεταξύ μιας ανεξάρτητης μεταβλητής (x) (στην περίπτωση μας ο χρόνος) και μιας εξαρτημένης μεταβλητής (y), που ονομάζεται και πλάτος (amplitude) του σήματος.

Τα σήματα ταξινομούνται σε δυο μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με την τιμή της ανεξάρτητης μεταβλητής, δηλαδή στα (Σκόδρας et al., 2002):

- α. *Συνεχούς χρόνου* (και συνεχούς πλάτους) ή **αναλογικά**, στα οποία η ανεξάρτητη μεταβλητή (χρόνος) είναι συνεχής και
- β. *Διακριτού χρόνου*, στα οποία η ανεξάρτητη μεταβλητή (χρόνος) λαμβάνει τιμές σε διακριτά χρονικά διαστήματα. Αυτά με την σειρά τους διαχωρίζονται σε:
 - i. *Συνεχούς πλάτους* και
 - ii. *Διακριτού πλάτους* ή **ψηφιακά**.



Σχήμα 6.1: Τύποι σημάτων: (α) αναλογικό, (β) διακριτού χρόνου, (γ) ψηφιακό (Σκόδρας et al., 2002)

Επίσης, τα σήματα διακρίνονται σε (Ψηφιακή Επεξεργασία Σημάτων, 2009):

- *Περιοδικά*, που επαναλαμβάνονται σε σταθερά χρονικά διαστήματα. Ένα σήμα είναι περιοδικό όταν ισχύει:

$$x(t) = x(t + T_0)$$

για κάθε t , όπου T_0 θετική σταθερά.

- *Απεριοδικά*, δηλαδή τα σήματα που δεν είναι περιοδικά.

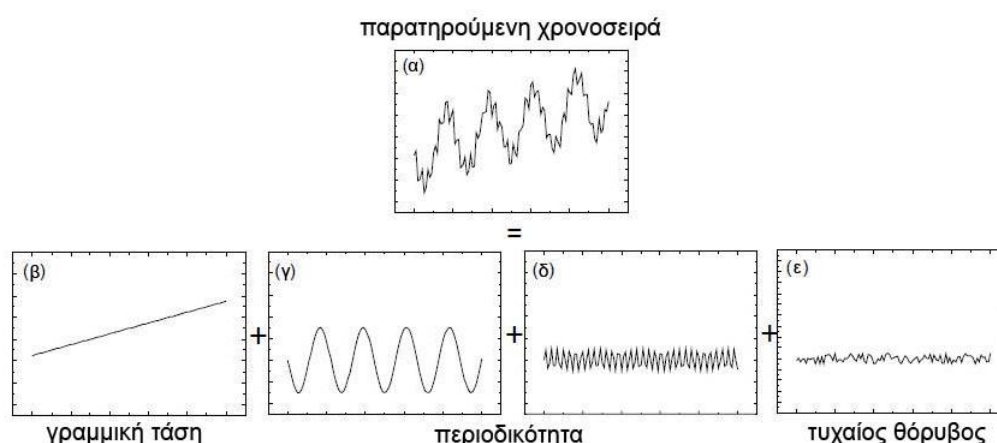
- Σήματα *ενέργειας*: έχουν πεπερασμένη ενέργεια και μηδενική ισχύ και
 - Σήματα *ισχύος*: έχουν άπειρη ενέργεια και πεπερασμένη και μη-μηδενική ισχύ.
- ❖ *Καθοριστικά*: σήματα των οποίων η φυσική περιγραφή είναι εντελώς γνωστή, είτε σε μαθηματική ή γραφική μορφή και
 - ❖ *Πιθανοτικά*: σήματα των οποίων οι τιμές δεν μπορούν να προβλεφθούν ακριβώς, αλλά περιγράφονται μέσω συναρτήσεων πιθανοτήτων, π.χ. μέσος όρος.

Με βάση παλαιότερες έρευνες σε καμινάδες παρόμοιου τύπου (Μαριτσούδης, 2008), (Ανδρουλάκη, 2011), θεωρείται αναμενόμενο ότι η κίνηση της υπο μελέτη καμινάδας, λόγω της επίδρασης του ανέμου, έχει περιοδική μορφή. Έτσι, στις επόμενες παραγράφους, η ύπαρξη περιοδικότητας θεωρείται δεδομένη.

6.2.2 Ανάλυση χρονοσειρών

Κάθε σήμα που εμφανίζει περιοδικά χαρακτηριστικά, ανάλογα με το φαινόμενο που παρατηρείται, μπορεί να αναλυθεί σε επιμέρους συνιστώσες, οι οποίες επιθέμενες παράγουν το αρχικό σήμα. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.2, η χρονοσειρά (α), που παρατηρείται πρωτογενώς από κάποιο όργανο, αναλύεται σε τέσσερις επιμέρους συνιστώσες, οι οποίες εκφράζουν:

- Γραμμική μεταβολή ή τάση (trend) (β)
- Περιοδική διακύμανση ημιτονοειδούς μορφής της κύριας συχνότητας (γ)
- Περιοδική διακύμανση δευτερεύουσας συχνότητας (δ)
- Θόρυβο των μετρήσεων (ε)



Σχήμα 6.2: Ανάλυση χρονοσειράς (Pytharouli et al., 2004)

■ Είδη σφαλμάτων

Έχει καθιερωθεί τα σφάλματα των μετρήσεων να κατατάσσονται σε *χονδροειδή, συστηματικά* και *τυχαία*.

Τα *χονδροειδή* σφάλματα (outliers) οφείλονται σε απροσεξία του παρατηρητή (σε περιπτώσεις μη αυτοματοποιημένης διαδικασίας καταγραφής), σε ξαφνική μεταβολή των συνθηκών μέτρησης και εντοπίζονται με επανάληψη της μέτρησης. Γενικά, εντοπίζονται εύκολα, καθώς αποκλείουν σημαντικά από τη μέση τιμή.

Τα *συστηματικά* παρουσιάζουν σταθερότητα ή περιοδικότητα σε μέγεθος και πρόσημο και μπορούν σε μεγάλο βαθμό να εκφραστούν με κάποια μαθηματική σχέση. Οφείλονται σε παράγοντες όπως ατέλειες οργάνων, ατελείς ρυθμίσεις οργάνων, καιρικές συνθήκες κ.ά. Το μεγαλύτερο ποσοστό των συστηματικών σφαλμάτων αντιμετωπίζεται με συναρτησιακά μοντέλα. Το υπόλοιπο ποσοστό, μαζί με τα *τυχαία* σφάλματα, αντιμετωπίζεται με μοντέλα της Στατιστικής.

Μια άλλη έννοια που χρησιμοποιείται - στην φασματική ανάλυση - για να περιγράψει τα τυχαία σφάλματα είναι ο *θόρυβος*. Ο θόρυβος που συνοδεύει το μετρούμενο σήμα προέρχεται τόσο από τις επιμέρους μονάδες κάθε ηλεκτρικής μετρητικής διάταξης, όσο και από εξωτερικές πηγές (π.χ. ατμόσφαιρα). Ο θόρυβος μπορεί να είναι *τυχαίος* και *συστηματικός*.

Ο *τυχαίος* θόρυβος (πιο γνωστός και ως λευκός θόρυβος), με σταθερή φασματική πυκνότητα, δηλαδή την ίδια ένταση σε κάθε συχνότητα, θεωρείται ιδανικός (Erol, 2010). Στην πράξη όμως, οι παρατηρήσεις περιλαμβάνουν κυρίως μη-λευκό θόρυβο, που είναι μια συνάρτηση του χρόνου σε κάποια ζώνη συχνοτήτων. Ο *συστηματικός* θόρυβος μπορεί να αποτελείται από συστηματικά και μη-συστηματικά μέρη και μπορεί να εκφραστεί με μαθηματικές συναρτήσεις.

Χαρακτηριστικός δείκτης, που χρησιμοποιείται για να περιγράψει την ποιότητα του σήματος σε σχέση με το θόρυβο, είναι ο λόγος σήματος/θόρυβο (signal-to-noise ratio, SNR), για τον οποίο γίνεται λόγος παρακάτω.

■ Βασικά στατιστικά μεγέθη / Στατιστική επεξεργασία

Στις παρακάτω παραγράφους παρουσιάζονται μερικά βασικά μεγέθη και έννοιες που χρησιμοποιούνται στη στατιστική ανάλυση σήματος, όπως η μέση τιμή, η διακύμανση, ο λόγος σήματος/θόρυβο (SNR), η κατανομή, η γραμμική τάση και το ιστόγραμμα συχνοτήτων.

i. Μέση τιμή

Αν x_1, x_2, \dots, x_n είναι οι τιμές των ισοβαρών παρατηρήσεων ενός δείγματος μιας μεταβλητής x , η μέση (αριθμητική) τιμή (μ) του δείγματος ορίζεται από τη σχέση:

$$\mu = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (6.1)$$

ii. Διακύμανση (μεταβλητότητα και τυπική απόκλιση)

Ο όρος $|x_i - \mu|$ περιγράφει πόσο απέχει το δείγμα i από την μέση τιμή. Έτσι, διαφορετικά δείγματα από τον ίδιο πληθυσμό μπορεί να έχουν την ίδια ή παραπλήσια μέση τιμή, αλλά να διασκορπίζονται περισσότερο ή λιγότερο γύρω από αυτή. Κύρια μέτρα της διασποράς των δεδομένων είναι η *μεταβλητότητα* (σ^2) και η *τυπική απόκλιση* (σ). Η μεταβλητότητα (σ^2) εκφράζει τη διακύμανση των παρατηρήσεων γύρω από την αριθμητική μέση τιμή και ορίζεται από τη σχέση:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 \quad (6.2)$$

Η μεταβλητότητα απορρέει από την αρχή των ελαχίστων τετραγώνων και περιγράφει την κατανομή των τυχαιών σφαλμάτων. Συνήθως, αντί της μεταβλητότητας, χρησιμοποιείται η τυπική απόκλιση (σ) που είναι η θετική ρίζα της μεταβλητότητας (σ^2), μετριέται στην ίδια μονάδα με το εξεταζόμενο μέγεθος και εκφράζει την πιθανότητα 68% μια τιμή του δείγματος να απέχει από τη μέση τιμή.

iii. Λόγος σήματος/θόρυβο (Signal-to-Noise Ratio, SNR)

Ενώ η μέση τιμή περιγράφει τις παρατηρήσεις, η τυπική απόκλιση περιγράφει τον θόρυβο και άλλες παρεμβολές. Η σύγκριση των δυο μεταβλητών παρέχει το λόγο σήματος/θόρυβο (SNR), που δίνεται από τη σχέση 6.3, και περιγράφει την ποιότητα του σήματος:

$$SNR = \frac{\mu}{\sigma} \quad (6.3)$$

Ο λόγος SNR συγκρίνει την ένταση του ανακλώμενου σήματος από έναν επιθυμητό στόχο με την ένταση του θορύβου. Όσο ψηλότερος είναι ο λόγος SNR, τόσο καλύτερη είναι η ποιότητα του σήματος και άρα και η μέτρηση. Ο λόγος SNR παρέχει και το άνω όριο στην ακρίβεια που μπορεί να επιτευχθεί σύμφωνα με τη σχέση:

$$\sigma_{\varphi} = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot SNR}} \quad (6.4)$$

Ο δείκτης SNR εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ανακλαστικότητα του στόχου και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες (Rödelsperger et al., 2010).

iv. Κατανομή

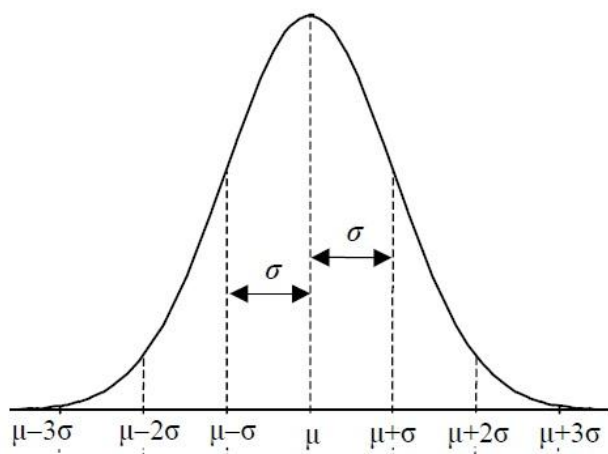
Τα σήματα που προκύπτουν από τυχαίες διαδικασίες ακολουθούν συνήθως την κανονική κατανομή γύρω από την μέση τιμή τους (σύμφωνα και με το Θεώρημα Κεντρικού Ορίου των Πιθανοτήτων). Η κανονική κατανομή ή αλλιώς κατανομή Gauss περιγράφεται από την εξίσωση:

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (6.5)$$

όπου: $P(x)$: η συνάρτηση της κατανομής

μ : η μέση τιμή

σ : η τυπική απόκλιση



Σχήμα 6.3: Κανονική κατανομή (<http://androulakis.bma.upatras.gr>)

Τα βασικά χαρακτηριστικά της κανονικής κατανομής είναι ότι ακολουθεί το σχήμα της “καμπάνας” και ως εκ τούτου είναι συμμετρική. Αποτέλεσμα αυτού είναι ο μέσος να είναι ίσος με τη διάμεσο και την επικρατούσα τιμή (σημείο μέγιστης συχνότητας εμφάνισης). Η παράμετρος (μ) καθορίζει τη θέση της κατανομής πάνω στον άξονα x , ενώ η παράμετρος (σ) το πόσο “απλώνεται” η κατανομή κατά μήκος του άξονα x .

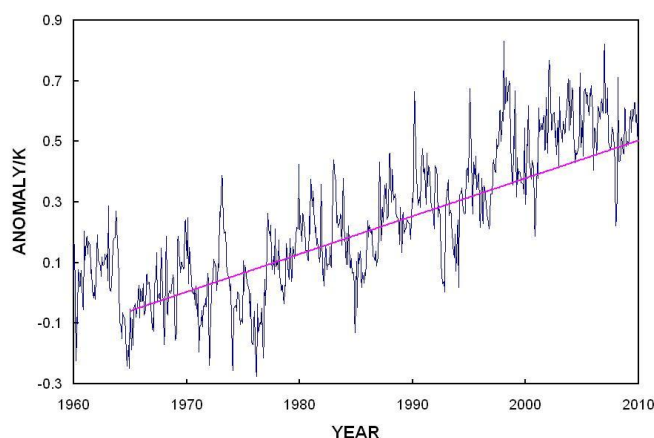
Αξίζει να σημειωθεί ότι σε μία κανονική κατανομή το εύρος ισούται περίπου με έξι φορές τη μέση τιμή. Επίσης, σε μια δειγματοληψία από κανονική κατανομή, το

68,3% των τιμών απέχει το πολύ κατά σ από τη μέση τιμή, βρίσκεται δηλαδή στο διάστημα $[\mu - \sigma, \mu + \sigma]$. Το 95,5% των τιμών βρίσκεται στο $[\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma]$ και το 99,7% στο $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$.

v. Γραμμική τάση (linear trend)

Η εκτίμηση της τάσης σε χρονοσειρές είναι μια στατιστική τεχνική για την ανάδειξη μιας γενικής συμπεριφοράς των παρατηρήσεων. Μια απλή μέθοδος εκτίμησης τάσης είναι τα Ελάχιστα Τετράγωνα. Σε τυχαία δεδομένα, η συμπεριφορά των παρατηρήσεων ακολουθεί συνήθως την κανονική κατανομή.

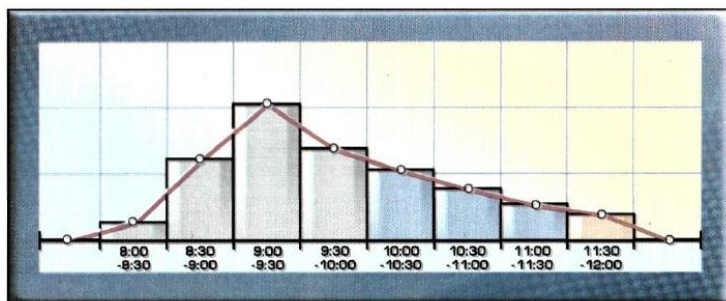
Γραμμική τάση (linear trend) παρουσιάζεται όταν εμφανίζεται αυξητική ή μειωτική τάση στις τιμές των δεδομένων, σχετικά με τη μέση τιμή, γραμμικά με την πάροδο του χρόνου.



Σχήμα 6.4: Παράδειγμα εμφάνισης γραμμικής τάσης σε θερμοκρασιακά δεδομένα (<http://rabett.blogspot.gr>)

vi. Ιστογράμμα συχνοτήτων

Τα ιστογράμματα συχνοτήτων ή διαγράμματα πλήθους εμφανίσεων αποτελούν τη γραφική αναπαράσταση της κατανομής μιας σειράς μετρήσεων, ομαδοποιώντας τις σε κλάσεις. Ο αριθμός των κλάσεων εξαρτάται από το μέγεθος του δείγματος και την επιθυμητή ανάλυση. Αποτελούνται από παρακείμενα ορθογώνια, η βάση των οποίων (άξονας x) αποτελεί το εύρος της κλάσης και το ύψος (άξονας y) αποτελεί την συχνότητα εμφάνισης των τιμών μέσα στο δεδομένο εύρος. Το εμβαδόν κάθε ορθογωνίου εκφράζει την πιθανότητα εμφάνισης των δειγμάτων στη συγκεκριμένη κλάση.



Σχήμα 6.5: Παράδειγμα ιστογράμματος συχνοτήτων (<http://digitalschool.minedu.gov.gr>)

Τα ιστογράμματα συχνοτήτων παρέχουν πληροφορίες όσον αφορά την κατανομή και τη διασπορά των μετρήσεων.

6.2.3 Ανάλυση δεδομένων στο πεδίο του χώρου

Η ανάλυση των δεδομένων στο πεδίο του χώρου περιλαμβάνει κατά βάση τη δημιουργία διαγραμμάτων οριζοντιογραφίας, που απεικονίζουν την κίνηση του παρατηρούμενου σημείου στο χώρο κατά τη διάρκεια του χρόνου. Τέτοιου είδους διαγράμματα είναι χρήσιμα γιατί παρέχουν εποπτεία. Από αυτά προκύπτουν εύκολα το εύρος της κίνησης, καθώς και η τάση (trend) και η μορφή (pattern) που εμφανίζει η κίνηση στο χώρο.

6.3 Ανάλυση δεδομένων στο πεδίο των συχνοτήτων

Η ανάλυση των δεδομένων στο πεδίο των συχνοτήτων ή αλλιώς φασματική ανάλυση του σήματος, έχει στόχο την αποκάλυψη πιθανής περιοδικότητας της κίνησης και την εξαγωγή παραμέτρων όπως οι κύριες συχνότητες ταλάντωσης, το πλάτος της ταλάντωσης, κ.ά.

Ανάλογα με τη δομή των δεδομένων, είναι δυνατόν να υπερισχύει μια συγκεκριμένη συνιστώσα του σήματος, η οποία μπορεί να αναγνωριστεί εύκολα, με τη χρήση απλών τεχνικών, όπως η προσαρμογή πολυωνυμικής συνάρτησης. Συνήθως όμως οι παρατηρήσεις είναι πιο πολύπλοκες και απαιτούνται ειδικές φασματικές τεχνικές ανάλυσης των δεδομένων. Οι τεχνικές αυτές είναι είτε μη-παραμετρικές, όπως οι μετασχηματισμοί Fourier, ή παραμετρικές όπως η Φασματική Ανάλυση με Ελάχιστα Τετράγωνα (Least Square Spectral Analysis, LSSA) και το περιοδόγραμμα Lomb. Οι μετασχηματισμοί Fourier βρίσκουν εφαρμογή σε μεγάλης μήκους σειρές με ισαπέχοντα δεδομένα, ενώ η μέθοδος

LSSA και το περιοδόγραμμα Lomb μπορούν να εφαρμοστούν και σε μικρότερου μήκους σειρές με μη-ισαπέχοντα δεδομένα (Erol, 2010).

6.3.1 Η έννοια της συχνότητας

Βασική έννοια για την φασματική ανάλυση είναι η συχνότητα (f). Σχετίζεται με την αρμονική ταλάντωση που περιγράφεται από ημιτονοειδείς συναρτήσεις και σχετίζεται άμεσα με την έννοια του χρόνου, αφού η διάστασή της είναι το αντίστροφο του χρόνου. Μια απλή αρμονική ταλάντωση ορίζεται μαθηματικά από το ημιτονοειδές σήμα *συνεχούς* χρόνου:

$$x(t) = A \cdot \cos(\Omega t + \theta), \quad -\infty < t < +\infty \quad (6.6)$$

όπου: A : το πλάτος (amplitude) του ημιτονοειδούς

θ : η αρχική φάση σε rad

Ω : η γωνιακή συχνότητα σε rad/sec. Ισχύει ότι: $\Omega = 2\pi F$, όπου

F : η συχνότητα σε κύκλους/sec (Hz).

Αντίστοιχα, ένα ημιτονοειδές σήμα *διακριτού* χρόνου μπορεί να εκφραστεί ως:

$$x(n) = A \cdot \cos(\omega n + \theta), \quad -\infty < n < +\infty \quad (6.7)$$

όπου: n : ακέραια μεταβλητή, η οποία αντιπροσωπεύει τον αριθμό (τη θέση) του δείγματος

A : το πλάτος (amplitude) του ημιτονοειδούς

θ : η αρχική φάση σε rad

ω : η γωνιακή συχνότητα σε rad/δείγμα. Ισχύει ότι: $\omega = 2\pi f$, όπου

f : η συχνότητα σε κύκλους/δείγμα.

Ένα ημιτονοειδές σήμα διακριτού χρόνου παρουσιάζει τις ακόλουθες ιδιότητες (Σκόδρας et al., 2002):

- Τα σήματα, των οποίων οι συχνότητες διαφέρουν κατά ακέραιο πολλαπλάσιο του 2π , ταυτίζονται.
- Ο μέγιστος ρυθμός ταλάντωσης επιτυγχάνεται για $\omega = \pi$ (ή $\omega = -\pi$) ή ισοδύναμα για $f = \frac{1}{2}$ (ή $f = -\frac{1}{2}$).

Δηλαδή, τα ημιτονοειδή σήματα διακριτού χρόνου είναι διαφορετικά για συχνότητες (ω) στο διάστημα $[-\pi, \pi]$ και (f) στο διάστημα $[-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}]$.

Αν ορίσουμε ως F_s τη συχνότητα δειγματοληψίας ενός αναλογικού (συνεχούς) σήματος $x(t)$ σε διακριτό $x(n)$, η ελάχιστη τιμή της F_s , ώστε να μην χάνεται σημαντική πληροφορία, καθορίζεται από το θεώρημα δειγματοληψίας Nyquist-Shannon. Σύμφωνα με το θεώρημα (Σκόδρας et al., 2002):

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.

$$F_s \geq 2 \cdot F_{max} \quad (6.8)$$

Με άλλα λόγια, για να περιγραφεί επαρκώς η ταλάντωση μιας κατασκευής κύριας συχνότητας 0.15Hz, πρέπει η δειγματοληψία να γίνει με συχνότητα τουλάχιστον 0.3Hz.

6.3.2 Μετασχηματισμός Fourier

Οι μετασχηματισμοί Fourier, αποτελούν μια «οικογένεια» μετασχηματισμών, που χρησιμοποιούνται κατά κόρον στην επεξεργασία σήματος, αναλύοντας τις χρονοσειρές, όταν αυτές πληρούν ορισμένες συνθήκες (συνθήκες Dirichlet), σε ημιτονοειδείς συναρτήσεις.

Γενικά, ανάλογα με τις ιδιότητες του σήματος είναι δυνατόν να εφαρμοστεί και διαφορετικού τύπου μετασχηματισμός. Έτσι για (Smith, 1999):

Σήματα	Χρησιμοποιείται
Απεριοδικά και συνεχούς χρόνου	Μετασχηματισμός Fourier
Περιοδικά και συνεχούς χρόνου	Σειρά Fourier
Απεριοδικά και διακριτού χρόνου	Μετασχηματισμός Fourier Διακριτού Χρόνου (DTFT)
Περιοδικά και διακριτού χρόνου	Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier (DFT)

Πίνακας 6.1: Αντιστοίχιση σημάτων με τον κατάλληλο μετασχηματισμό Fourier

Σε ψηφιακά συστήματα ο μόνος μετασχηματισμός που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι ο Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier (DFT) (Smith, 1999), ο οποίος παρουσιάζεται συνοπτικά παρακάτω.

■ Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier (DFT)

Για σήματα πεπερασμένου μήκους και διακριτού χρόνου, όπως είναι τα ψηφιακά, η μετάβαση από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο των συχνοτήτων γίνεται μέσω του Διακριτού Μετασχηματισμού Fourier (Discrete Fourier Transform, DFT).

Ο Ευθύς Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier (DFT) $X(k)$ ενός σήματος διακριτού χρόνου $x(n)$, N αριθμού δειγμάτων εκφράζεται από μία από τις παρακάτω σχέσεις (Σκόδρας et al., 2002):

- Είτε με την μιγαδική του μορφή:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-\frac{i2\pi kn}{N}} \quad (6.9)$$

- ή την ημιτονοειδή του μορφή:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \left(\cos \frac{2\pi kn}{N} - i \sin \frac{2\pi kn}{N} \right) \quad (6.10)$$

όπου $k=0,1,\dots,N-1$, παράμετρος συχνότητας $f=k/N$.

Το εύρος τιμών των συχνοτήτων (f) ορίζεται στο διάστημα $\left[\frac{1}{2t_r}, \frac{N}{2t_r} \right]$, όπου t_r το μήκος της χρονοσειράς. Το άνω όριο του διαστήματος $\frac{N}{2t_r}$ αποτελεί τη συχνότητα Nyquist-Shannon (F_c), που είναι και η μέγιστη συχνότητα του φάσματος (Pytharouli et al., 2007).

Η αντίστροφη διαδικασία, δηλαδή η σύνθεση του σήματος στο πεδίο του χρόνου από τις τιμές στο πεδίο των συχνοτήτων, επιτυγχάνεται μέσω του Αντίστροφου Διακριτού Μετασχηματισμού Fourier (Inverse DFT, IDFT). Έτσι, η ακολουθία $x(n)$ μπορεί να ανακατασκευαστεί από τα δείγματα $X(k)$ στη συχνότητα, με βάση τη σχέση (Σκόδρας et al., 2002):

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{\frac{i2\pi kn}{N}} \quad (6.11)$$

$n=0,1,\dots, N-1$.

Οι περιορισμοί και οι προϋποθέσεις εφαρμογής του μετασχηματισμού DFT είναι:

- Το σήμα πρέπει να είναι περιοδικό και διακριτού χρόνου.
- Τα δεδομένα πρέπει να είναι ισαπέχοντα.
- Οι συνηθέστεροι αλγόριθμοι υπολογισμού του DFT προϋποθέτουν ο αριθμός των δειγμάτων N να είναι δύναμη του 2, δηλαδή $N=2^k$. Αν υπάρχουν περιττά δεδομένα, αυτά απορρίπτονται. Αν υπολείπονται δεδομένα, τότε είτε υπολογίζονται με παρεμβολή ή αντικαθίστανται με 0, μειώνοντας την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

Ο πιο συνήθης αλγόριθμος υπολογισμού του DFT είναι ο FFT (Fast Fourier Transform).

■ Ταχύς Μετασχηματισμός Fourier (FFT)

Ο Ταχύς Μετασχηματισμός Fourier (Fast Fourier Transform, FFT) είναι ένας από τους πιο διαδεδομένους αλγόριθμους υπολογισμού του DFT. Η αρχή του είναι ότι κατακερματίζει έναν μετασχηματισμό DFT N σημείων σε N μετασχηματισμούς DFT του ενός σημείου (Smith, 1999). Το ουσιαστικό του πλεονέκτημα είναι η σχετικά μικρή υπολογιστική πολυπλοκότητα, με άμεση συνέπεια το κέρδος, τόσο σε πράξεις όσο και σε χρόνο υπολογισμού. Ενδεικτικό είναι ότι ο χρόνος υπολογισμού του DFT για μια σειρά N σημείων είναι $O(N^2)$, ενώ με τον FFT μειώνεται σε $O(N\log N)$.

Ο Ταχύς Μετασχηματισμός Fourier (FFT) $X(k)$ ενός πεπερασμένου σήματος διακριτού χρόνου $x(n)$, N αριθμού δειγμάτων θα έχει ως αποτέλεσμα ένα νέο σήμα N δειγμάτων στη συχνότητα. Κάθε τιμή $X(k)$ αντιστοιχεί σε μια συχνότητα και αποτελεί το εύρος ή μέτρο (amplitude). Οι τιμές απέχουν μεταξύ τους κατά συχνότητα ίση με: $f_s = \frac{1}{NT_s}$, όπου T_s : το χρονικό διάστημα μεταξύ τιμών της χρονοσειράς (Ψιμούλης, 2005).

Το μέγεθος της κάθε συχνότητας εκφράζει την σημαντικότητα με την οποία συμμετέχει η αντίστοιχη συχνότητα στη χρονοσειρά. Δηλαδή μεγάλη τιμή του μεγέθους $X(k)$ σημαίνει μεγάλη συμμετοχή της αντίστοιχης συχνότητας στη χρονοσειρά. Άρα αν μια χρονοσειρά παρουσιάζει μια περιοδικότητα, τότε η αντίστοιχη συχνότητα θα παρουσιάζει μεγάλη τιμή μεγέθους (Ψιμούλης, 2005).

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, βασικός περιορισμός του αλγορίθμου είναι η προϋπόθεση ο αριθμός των δειγμάτων N να είναι δύναμη του 2, δηλαδή $N=2^k$.

6.3.3 Φασματική Ανάλυση με Ελάχιστα Τετράγωνα (LSSA)

Μια μέθοδος η οποία μπορεί να αναλύσει τόσο ισαπέχουσες όσο και μη-ισαπέχουσες χρονικά παρατηρήσεις είναι η Φασματική Ανάλυση με Ελάχιστα Τετράγωνα (Least Square Spectral Analysis, LSSA). Η μέθοδος αυτή προσδιορίζει τις συχνότητες που εμφανίζονται στη χρονοσειρά, με βάση την προσαρμογή ημιτονοειδούς συνάρτησης. Η αρχή της προσαρμογής είναι να ελαχιστοποιηθεί το τετράγωνο των υπολοίπων (residuals) των διαφορών της χρονοσειράς που προκύπτει από τις προσδιοριστέες συχνότητες από την αρχική χρονοσειρά (Ψιμούλης, 2005).

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι:

- ✓ Οι διακριτές τιμές δεν χρειάζεται να είναι ισαπέχουσες και
- ✓ Οι τιμές της χρονοσειράς μπορούν να μην είναι ισοβαρείς.
- ✓ Επιπλέον, οι διαθέσιμοι αλγόριθμοι παρέχουν τη δυνατότητα στατιστικής ανάλυσης των αποτελεσμάτων, όπως είναι το επίπεδο σημαντικότητας των συχνοτήτων που προκύπτουν από τη φασματική ανάλυση (Pagiatakis, 1999).

6.3.4 Μετασχηματισμός Lomb (LNB)

Μια πιο απλοποιημένη μέθοδος, κατάλληλη για τη φασματική ανάλυση χρονοσειρών που περιέχουν και μη-ισαπέχοντα χρονικά σημεία, είναι το Κανονικοποιημένο Περιοδόγραμμα Lomb (Lomb Normalized Periodogram, LNB). Διαφέρει από τη γενική μορφή της LSSA στο ότι θεωρεί όλες τις παρατηρήσεις ισοβαρείς.

Η φασματική ανάλυση με το κανονικοποιημένο περιοδόγραμμα Lomb $P(T)$, μιας χρονοσειράς N σημείων, για περίοδο T , υπολογίζεται με βάση τη σχέση (Pytharoulis et al., 2007):

$$P(T) = \frac{1}{2\sigma^2} \left[\frac{[\sum_{i=1}^N (x_i - \mu) \cos(\omega(t_i - \tau))]^2}{\sum_{i=1}^N \cos^2(\omega(t_i - \tau))} \right] + \left[\frac{[\sum_{i=1}^N (x_i - \mu) \sin(\omega(t_i - \tau))]^2}{\sum_{i=1}^N \sin^2(\omega(t_i - \tau))} \right] \quad (6.12)$$

όπου: μ : η μέση τιμή των παρατηρήσεων

σ^2 : η μεταβλητότητα των παρατηρήσεων

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

ω : η γωνιακή συχνότητα $\omega = \frac{2\pi}{T}$

τ : σταθερά που προκύπτει από τη σχέση: $\tan(2\omega\tau) = \frac{\sum_{i=1}^N \sin(2\omega t_i)}{\sum_{i=1}^N \cos(2\omega t_i)}$ (6.13)

Η τιμή $P(T)$ του περιοδογράμματος είναι αδιάστατη και εκφράζει την πιθανότητα ύπαρξης περιοδικότητας με περίοδο T στα δεδομένα. Κάθε τιμή $P(T)$ υπολογίζεται για μια συχνότητα (ω) και αποτελεί το εύρος ή μέτρο (amplitude) που αντιστοιχεί σε αυτήν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Επεξεργασία και Ανάλυση Δεδομένων

Το παρόν Κεφάλαιο χωρίζεται σε δύο μέρη: στο πρώτο μέρος παρουσιάζονται τα στάδια της επεξεργασίας των μετρήσεων για κάθε σύστημα ξεχωριστά και κάποιες χρονοσειρές των μετρήσεων τους για το συνολικό διάστημα παρατήρησης. Στο δεύτερο μέρος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την επεξεργασία αυτή, για ένα κοινό χρονικό διάστημα παρατηρήσεων διάρκειας 18 min. Η ανάλυση και η συσχέτιση με τα μετεωρολογικά δεδομένα γίνεται για αυτό το διάστημα των 18 min.

7.1 Επεξεργασία δεδομένων πεδίου

A. Συγχρονισμός

Το πρώτο στάδιο της επεξεργασίας των μετρήσεων, κοινό και για τα τρία συστήματα, είναι ο συγχρονισμός τους. Ο συγχρονισμός είναι απαραίτητος, γιατί το κάθε σύστημα καταγράφει μετρήσεις σύμφωνα με το χρόνο του αντίστοιχου φορητού Η/Υ. Κατά την διάρκεια των παρατηρήσεων καταγραφόταν ο χρόνος έναρξης των μετρήσεων από τον φορητό Η/Υ του κάθε συστήματος. Ο συγχρονισμός έγινε με βάση το σύστημα του IBIS. Στον Πίνακα 7.1 παρατίθενται οι διαφορές των χρονομέτρων των φορητών Η/Υ και η αναγωγή τους σε χρόνο του συστήματος IBIS.

	Φορητός Η/Υ IBIS	Φορητός Η/Υ RTS	Φορητός Η/Υ NIVEL
Διαφορά χρονομέτρου (sec)	+7	0	+175
Διόρθωση (sec)	0	-7	+168 (2min 48sec)

Πίνακας 7.1: Χρονικές διαφορές για τον συγχρονισμό της χρονομέτρησης των 3 συστημάτων

Μετά το συγχρονισμό προέκυψαν τα εξής:

Αρχείο IBIS	Έναρξη	Λήξη	Διάρκεια
2012.06.20-14.30.10-dynS-000000-Surv	14:30:10	14:45:10	15min 00sec
2012.06.20-14.46.30-dynS-000001-Surv	14:46:30	15:11:30	25min 00sec
2012.06.20-15.14.21-dynS-000002-Surv	15:14:21	15:29:21	15min 00sec

Πίνακας 7.2: Συγχρονισμένα αρχεία μετρήσεων του συστήματος IBIS

Αρχείο NIVEL	Έναρξη	Λήξη	Διάρκεια
lavrio_2012_06_20_#1	14:33:55	15:08:13	34min 18sec
lavrio_2012_06_20_#2	15:10:13	15:17:46	7min 33sec
lavrio_2012_06_20_#3	15:20:07	15:34:50	14min 43sec

Πίνακας 7.3: Συγχρονισμένα αρχεία μετρήσεων του συστήματος NIVEL

Αρχείο RTS	Έναρξη	Λήξη	Διάρκεια
rtrk5	14:23:20	14:42:12	18min 52sec
rtrk6	14:49:29	15:27:09	37min 40sec

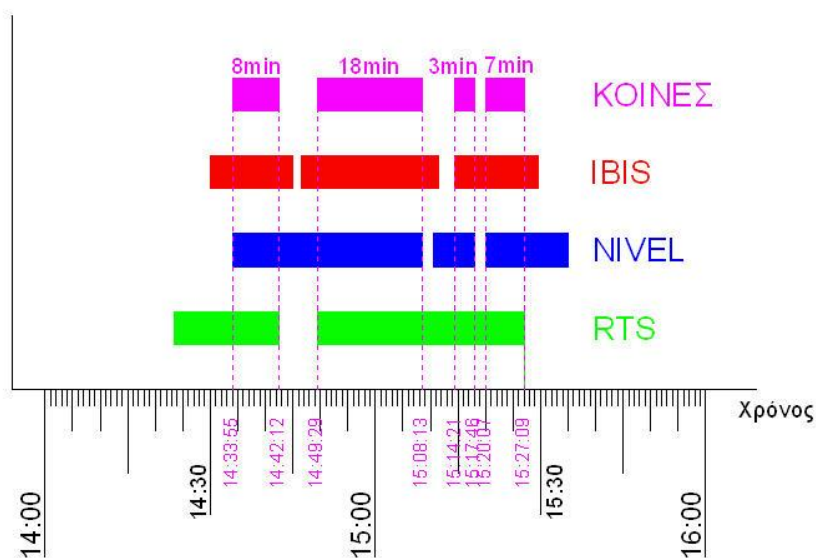
Πίνακας 7.4: Συγχρονισμένα αρχεία μετρήσεων του συστήματος RTS

Από τα παραπάνω προκύπτουν ότι τα χρονικά διαστήματα των κοινών μετρήσεων και με τα τρία συστήματα είναι τα εξής:

Έναρξη	Λήξη	Διάρκεια
14:33:55	14:42:12	8min 17sec
14:49:29	15:08:13	18min 44sec
15:14:21	15:17:46	3min 25sec
15:20:07	15:27:09	7min 2sec

Πίνακας 7.5: Διαστήματα κοινών μετρήσεων μεταξύ των τριών συστημάτων

Ο Πίνακας 7.5 αποδίδεται και σχηματικά στο Σχήμα 7.1.



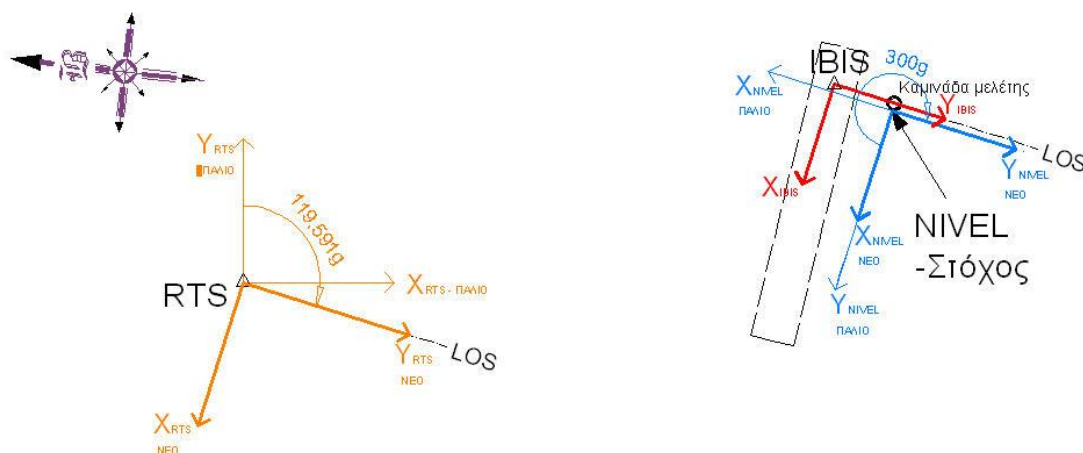
Σχήμα 7.1: Διαστήματα κοινών μετρήσεων μεταξύ των τριών συστημάτων

Β. Ταύτιση προσανατολισμού συστημάτων συντεταγμένων

Ένα επόμενο στάδιο επεξεργασίας, κοινό επίσης και για τα τρία συστήματα μέτρησης, είναι η ταύτιση του προσανατολισμού των συστημάτων συντεταγμένων τους, προκειμένου να υπάρχει ομοιογένεια στις μετρήσεις και αναφορά στη σύγκριση μεταξύ τους. Το στάδιο αυτή έπεται της αφαίρεσης μετρήσεων που θεωρούνται χονδροειδή σφάλματα κτλ. για κάθε σύστημα, αλλά περιγράφεται εδώ, επειδή η διαδικασία είναι κοινή.

Στο παρακάτω Σχήμα 7.2 παρουσιάζονται τα συστήματα συντεταγμένων για κάθε αισθητήρα σε σχέση με το Βορρά, καθώς και η γωνία στροφής για την ταύτιση του προσανατολισμού τους. Ως αναφορά επιλέχθηκε το σύστημα συντεταγμένων του IBIS.

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 7.2, για να ταυτιστεί το σύστημα του RTS με το σύστημα του IBIS ($Y_{IBIS}=LOS$), απαιτείται στροφή των συντεταγμένων κατά γωνία ίση με 119.5919 grad, ενώ για την αντίστοιχη διαδικασία όσον αφορά το σύστημα του NIVEL, η γωνία είναι ίση με 300 grad.

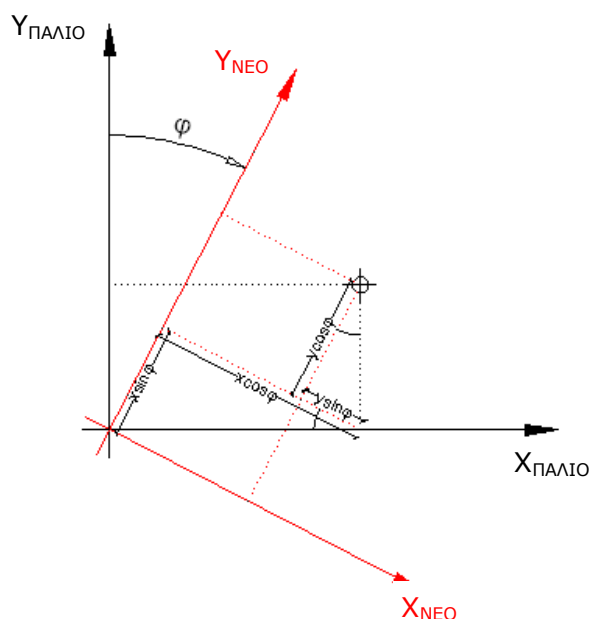


Σχήμα 7.2: Συστήματα συντεταγμένων των τριών αισθητήρων

Η διαδικασία της στροφής πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τη σχέση (Σχήμα 7.3):

$$\begin{bmatrix} X_{NEO} \\ Y_{NEO} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi \\ \sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{ΠΑΛΙΟ} \\ Y_{ΠΑΛΙΟ} \end{bmatrix} \quad (7.1)$$

όπου φ : η γωνία στροφής.



Σχήμα 7.3: Γραφική αναπαράσταση στροφής συστήματος αξόνων

Ακολουθεί η παρουσίαση της επεξεργασίας των δεδομένων για κάθε σύστημα ξεχωριστά.

7.1.1 Επεξεργασία δεδομένων ψηφιακού κλισιμέτρου NIVEL

A. Επεξεργασία χρονοσειρών γωνιών

Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 4.1 με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του NIVEL, ο αισθητήρας έχει τη δυνατότητα μέτρησης γωνιών με τιμές μέχρι ± 3.0 mrad, με μεταβαλλόμενη όμως ακρίβεια. Κρίθηκε σκόπιμο να ληφθούν υπόψη οι τιμές μέχρι ± 1.5 mrad (± 960 cc), με ενιαία ακρίβεια ± 0.0047 mrad (± 3 cc). Το ποσοστό των τιμών πάνω από 1.5 mrad επί του συνόλου των μετρήσεων υπολογίστηκε σε ποσοστό 3.1% για τον άξονα X και 9% για τον άξονα Y.

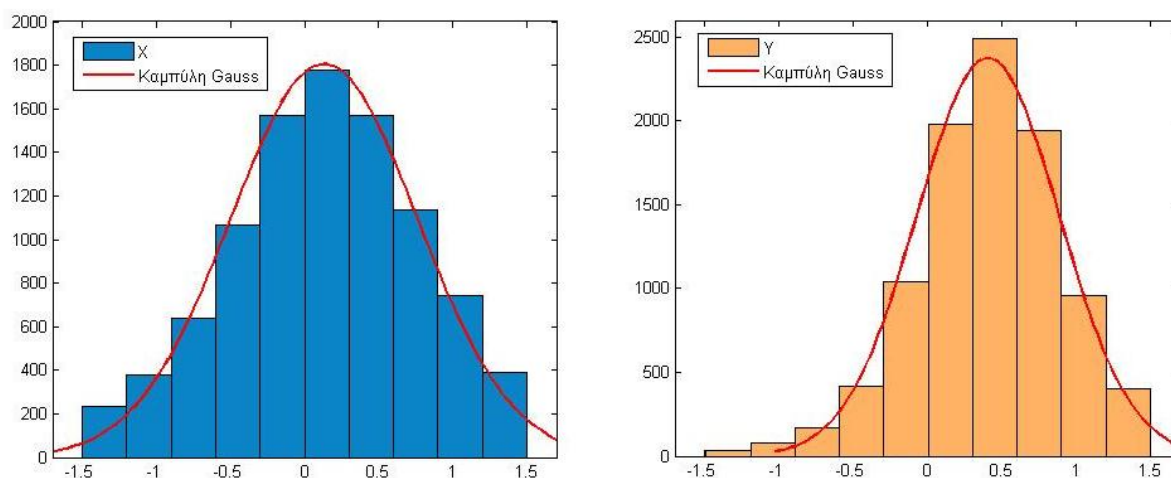
Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η στροφή του συστήματος των αξόνων, όπως περιγράφεται στη §7.1. Η γωνία στροφής, όπως φαίνεται από το Σχήμα 7.2 είναι 300grad.

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται μερικά στατιστικά στοιχεία που προέκυψαν από την επεξεργασία των μετρήσεων του NIVEL.

	X (mrad)	Y (mrad)
Μέγιστη τιμή (max)	1.500	1.500
Ελάχιστη τιμή (min)	-1.500	-1.490
Μέση τιμή (απόλυτη)	0.523	0.523
Εύρος	3.000	2.990
Τυπική απόκλιση (σ)	0.631	0.478
Μεταβλητότητα (σ^2)	0.40	0.23

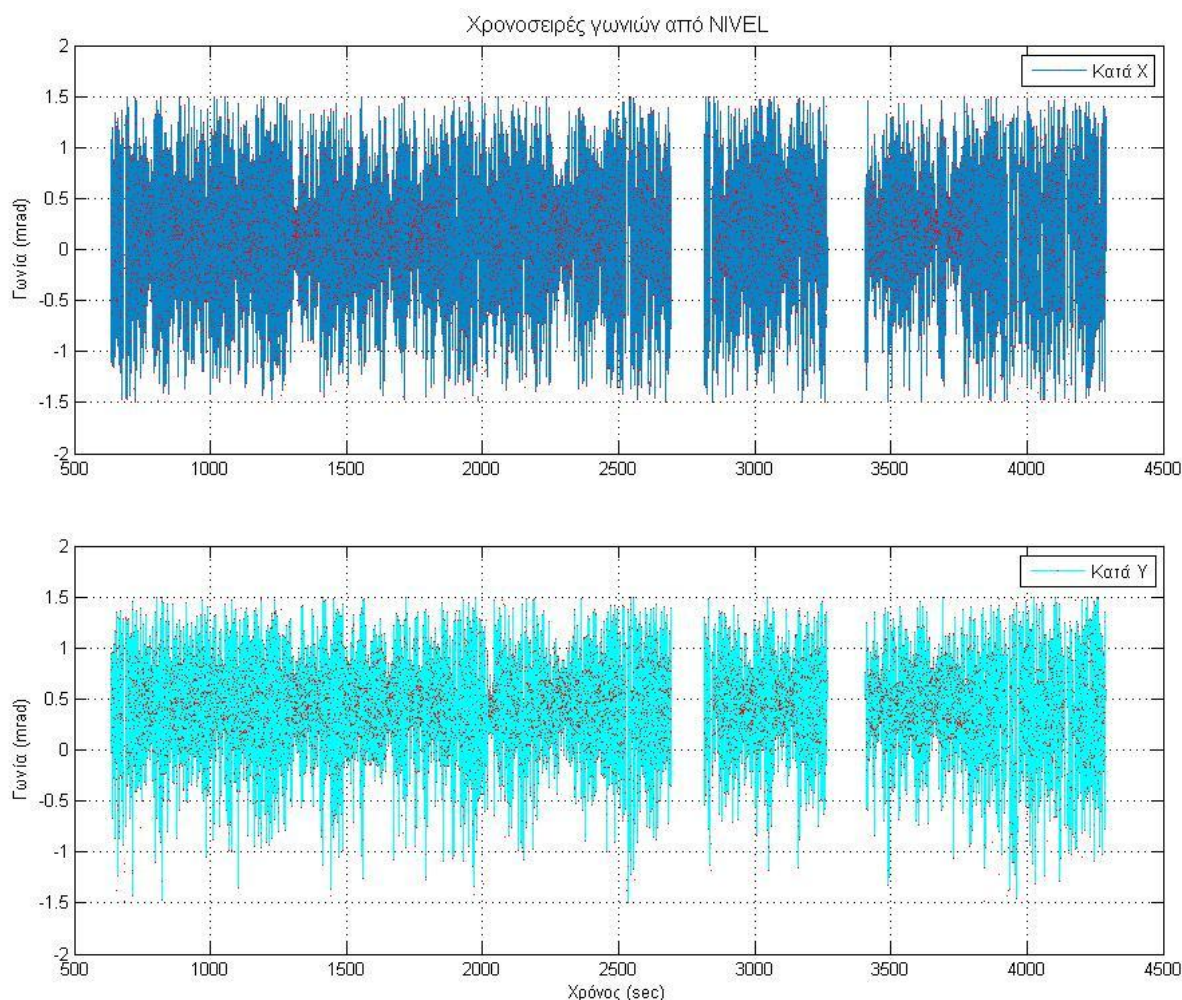
Πίνακας 7.6: Στατιστικά στοιχεία μετρήσεων γωνιών από NIVEL μετά την αφαίρεση των τιμών πάνω από 1.5 mrad

Στο Σχήμα 7.4 παρουσιάζονται τα διαγράμματα συχνότητας εμφάνισης (ιστογράμματα) για τις μετρήσεις γωνιών από το NIVEL. Όπως παρατηρείται από τα ιστογράμματα, οι παρατηρήσεις ακολουθούν ομοιόμορφη κατανομή γύρω από τη μέση τιμή. Το εύρος της κατανομής είναι περίπου 6 φορές η μέση τιμή, ενώ το μεγαλύτερο μέρος των παρατηρήσεων συγκεντρώνεται στο διάστημα $[-\sigma, +\sigma]$. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η κατανομή των παρατηρήσεων γωνιών του NIVEL ακολουθεί την καμπύλη Gauss, η οποία και έχει προσαρμοστεί στα αντίστοιχα ιστογράμματα του Σχήματος 7.4.



Σχήμα 7.4: Διαγράμματα πλήθους εμφανίσεων των παρατηρήσεων του NIVEL

Στο Σχήμα 7.5 παρουσιάζονται τα διαγράμματα των χρονοσειρών των συνολικών μετρήσεων γωνιών του NIVEL κατά τους άξονες X και Y. Τα διαστήματα που εμφανίζονται χωρίς τιμές είναι τα διαστήματα που μεσολαβούν μεταξύ των περιόδων συλλογής δεδομένων.



Σχήμα 7.5: Διαγράμματα χρονοσειρών γωνιών NIVEL

Β. Υπολογισμός μετακινήσεων

Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι μετακινήσεις σύμφωνα τη σχέση 3.1:

$$D = H \cdot \sin\alpha$$

όπου α : η μετρημένη από το NIVEL γωνία σε rad και

$H=74.90\text{m}$ το ύψος τοποθέτησης του NIVEL στην καμινάδα.

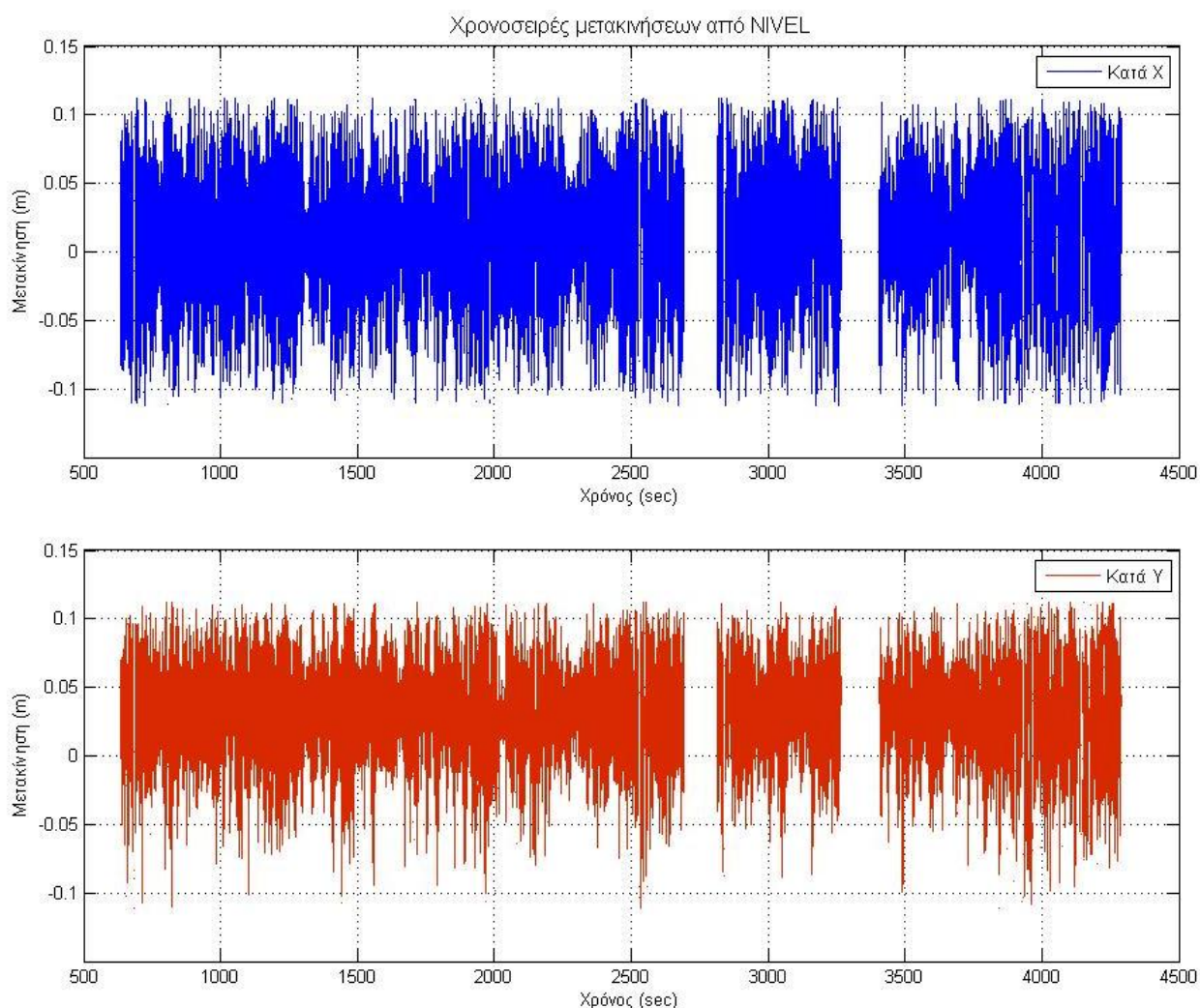
Η μετατροπή αυτή αποτελεί αρχική εκτίμηση και πραγματοποιείται με την παραδοχή ότι οι πλασματικές μετακινήσεις D που θα προκύψουν και οι οποίες στο εξής θα αναφέρονται ως *φαινόμενες (apparent)*, θα είναι μεγαλύτερες των πραγματικών d (§ 3.3). Η τάξη μεγέθους του λόγου $\frac{D}{d}$ θα εκτιμηθεί από τη σύγκριση μεταξύ των συστημάτων.

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται μερικά στατιστικά στοιχεία που προέκυψαν από την επεξεργασία των μετακινήσεων από το NIVEL.

	ΔX (m)	ΔY (m)
Μέγιστη τιμή (max)	0.112	0.112
Ελάχιστη τιμή (min)	-0.112	-0.112
Μέση τιμή (απόλυτη)	0.039	0.039
Εύρος	0.224	0.224
Τυπική απόκλιση (σ)	0.047	0.036
Μεταβλητότητα (σ^2)	0.002	0.001

Πίνακας 7.7: Στατιστικά στοιχεία φαινόμενων μετακινήσεων από NIVEL μετά την αφαίρεση των τιμών πάνω από 1.5 mrad

Στο Σχήμα 7.6 παρουσιάζονται τα διαγράμματα των χρονοσειρών των μετακινήσεων που προέκυψαν από τις συνολικές μετρήσεις γωνιών του NIVEL κατά τους άξονες X και Y. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, επειδή οι υπολογισμένες μετακινήσεις δεν είναι οι αναμενόμενες πραγματικές, αλλά φαινόμενες, τα διαγράμματα αυτά απλά περιγράφουν την τάση μεταβολής τους. Τα διαστήματα που εμφανίζονται χωρίς τιμές είναι τα διαστήματα που μεσολαβούν μεταξύ των περιόδων συλλογής δεδομένων.



Σχήμα 7.6: Διαγράμματα χρονοσειρών φαινόμενων μετακινήσεων NIVEL

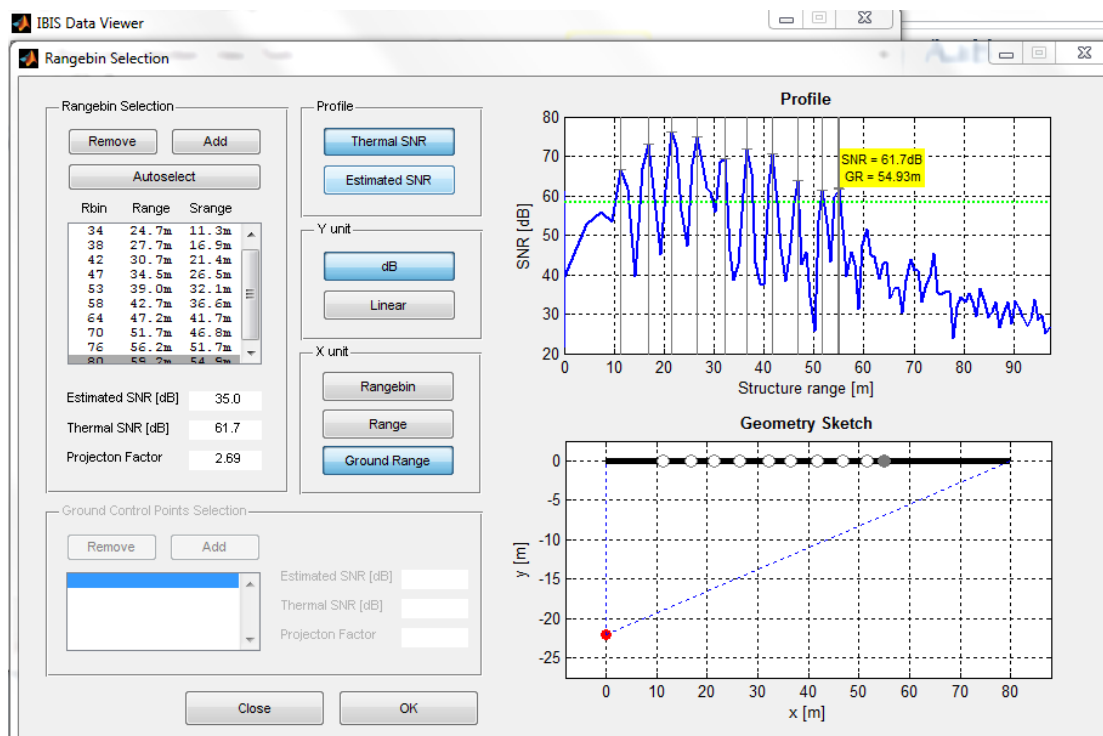
Η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιήθηκε επί του συνόλου των μετρήσεων. Στη συνέχεια, επαναλήφθηκε για το χρονικό διάστημα των κοινών μετρήσεων, που επιλέχθηκε για την ανάλυση, ξεχωριστά, προκειμένου να γίνει σύγκριση με τα υπόλοιπα συστήματα μέτρησης.

Γ. Υπολογισμός συχνοτήτων

Για τον υπολογισμό της συχνότητας ταλάντωσης της κατασκευής από τις μετρήσεις του NIVEL εφαρμόστηκε ο μετασχηματισμός Lomb, επειδή ο ρυθμός δειγματοληψίας δεν είναι σταθερός.

7.1.2 Επεξεργασία δεδομένων συστήματος RADAR

Όσον αφορά την επεξεργασία των μετρήσεων του IBIS, μετά την εισαγωγή τους στο πρόγραμμα επεξεργασίας IBIS-DV και την εισαγωγή των παραμέτρων γεωμετρίας, το πρόγραμμα δημιουργεί το διάγραμμα εδαφικής ακτινικής ανάλυσης (ground range profile). Στο διάγραμμα αυτό απεικονίζεται ο λόγος SNR (που περιγράφει την ποιότητα του σήματος) σε dB, σε σχέση με το μήκος της κατασκευής σε m, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.7.



Σχήμα 7.7: Διάγραμμα εδαφικής (ground range) ανάλυσης

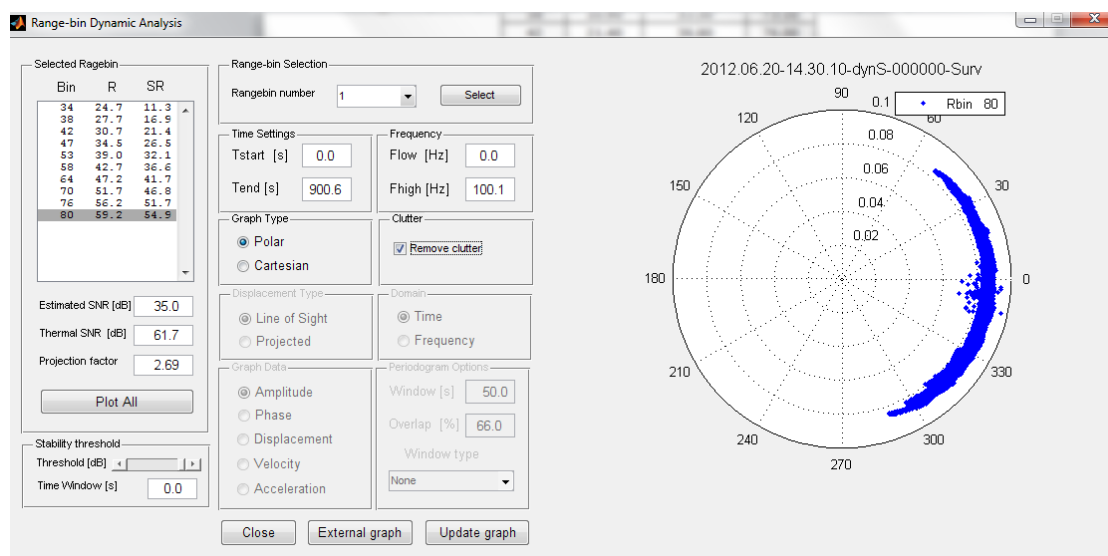
Από το διάγραμμα αυτό επιλέγονται και οι θέσεις (Rbin) για τις οποίες θα γίνει η ανάλυση. Η επιλογή των θέσεων γίνεται με κριτήριο την τιμή SNR, δηλαδή την καλή επιστροφή σήματος. Μια καλή τιμή SNR για την σωστή αξιολόγηση της δυναμικής συμπεροφοράς της κατασκευής είναι περίπου 70dB (Luzi et al., 2012). Η μικρότερη τιμή SNR που επαρκεί για την αξιολόγηση είναι 60dB. Στον Πίνακα 7.8 εμφανίζονται οι τιμές των Rbin με SNR πάνω από 60dB και η αντιστοίχισή τους με τις θέσεις (ύψος) στην καμινάδα.

Rbin	Srange (m)	Ύψος καμινάδας (m)	SNR (dB)
34	11.30	29.70	66.70
38	16.90	35.30	73.10
42	21.40	39.80	76.00
47	26.50	44.90	74.90
53	32.10	50.50	69.30
58	36.60	55.00	71.90
64	41.70	60.10	70.60
70	46.80	65.20	63.90
76	51.70	70.10	61.40
80	54.90	73.30	61.70

Πίνακας 7.8: Συσχετισμός μεταξύ Rbin και πραγματικού ύψους στην κατασκευή

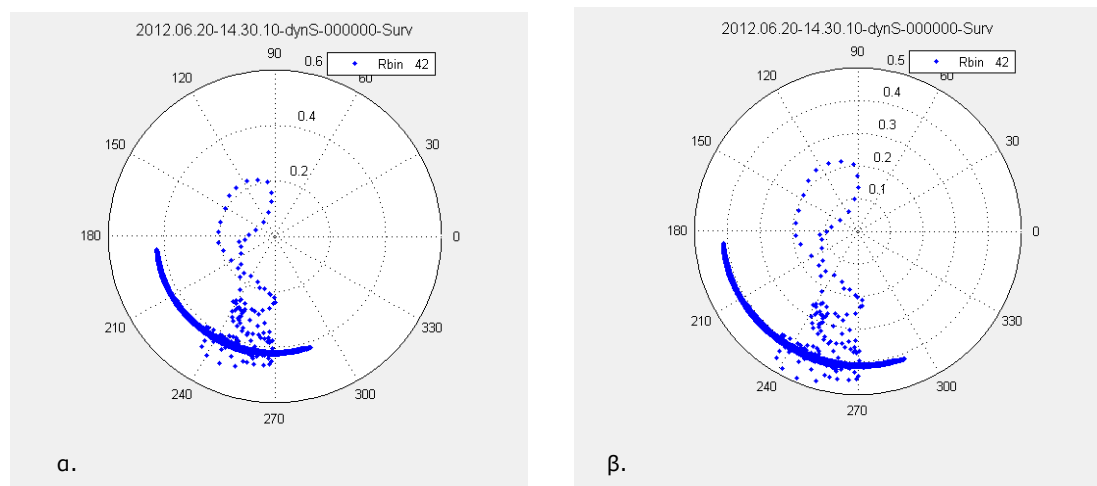
Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 7.8, η πλησιέστερη θέση στο ύψος εγκατάστασης του κλισιμέτρου και του στόχου (74.90m) είναι το Rbin 80 με ύψος 73.30m και SNR 61.70dB, που είναι οριακά επαρκές. Καθώς στόχος της εργασίας είναι η σύγκριση της συμπεριφοράς της καμινάδας με τα τρία συστήματα καταγραφής, για την πραγματοποίηση της ανάλυσης επιλέγεται το συγκεκριμένο Rbin.

Στη συνέχεια το πρόγραμμα πραγματοποιεί ανάλυση των μετρήσεων για κάθε επιλεγμένο Rbin. Αρχικά εμφανίζεται το πολικό διάγραμμα φάσης (Σχήμα 7.8), δηλαδή ένα κυκλικό διάγραμμα με ακτίνα την ένταση (amplitude) του σήματος και περίμετρο τις τιμές φάσης που λαμβάνει το συγκεκριμένο φαντίο (Rbin) κατά τη μετατόπισή του.



Σχήμα 7.8: Πολικό διάγραμμα φάσης

Κατά τη φάση αυτή πραγματοποιείται και η διόρθωση λόγω ανεπιθύμητων επιστροφών (clutter), αν χρειάζεται. Οι ανεπιθύμητες επιστροφές, εδώ, αφορούν στη συνεισφορά στην επιστροφή του σήματος κάποιου ακίνητου ανεπιθύμητου αντικειμένου εντοπιζονται στο πολικό διάγραμμα. Συγκεκριμένα, αν η διάταξη των τιμών του πολικού διαγράμματος φάσης είναι έκκεντρη ως προς το κέντρο αξόνων του, το πρόγραμμα παρέχει τη δυνατότητα διόρθωσης της εκκεντρότητας και, με τον τρόπο αυτό, απαλοιφής της επίδρασης των ανεπιθύμητων επιστροφών.



Σχήμα 7.9: Πολικό διάγραμμα φάσης α. πριν και β. μετά τη διόρθωση λόγω ανεπιθύμητων επιστροφών (clutter)

Αφού πραγματοποιηθούν οι απαιτούμενες διορθώσεις λόγω ανεπιθύμητων επιστροφών, προκύπτουν:

A. Τα διαγράμματα της ανηγμένης (projected) μετατόπισης (displacement) στο πεδίο του χρόνου.

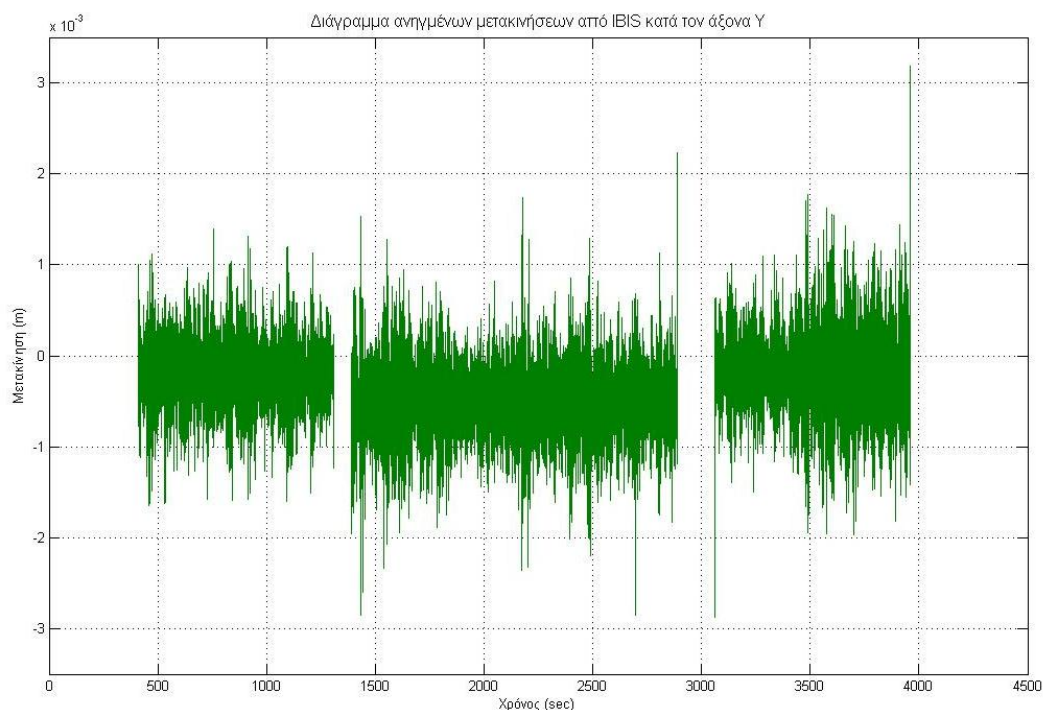
Τα διαγράμματα αυτά προκύπτουν με την εφαρμογή της σχέσης 4.3 στις υπολογισμένες μέσω του Αντίστροφου Διακριτού Μετασχηματισμού Fourier (IDFT) ακτινικές (LOS) μετατοπίσεις. Για τη δημιουργία τους λήφθηκε υπόψη η επίδραση της ατμόσφαιρας και η ταλάντωση του ίδιου του συστήματος (§4.2.2), οπότε τέθηκε ένα κάτω όριο στη συχνότητα ίσο με 0.2 και ένα άνω όριο ίσο με 9. Σύμφωνα με τις σχέσεις 4.2 και 4.3, οι ανηγμένες μετατοπίσεις έχουν υπολογιστεί με αβεβαιότητα της τάξης των $\pm 0.25\text{mm}$.

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται μερικά στατιστικά στοιχεία όσον αφορά τις ανηγμένες μετακινήσεις από το σύστημα IBIS.

	ΔY (m)
Μέγιστη τιμή (max)	0.0032
Ελάχιστη τιμή (min)	-0.0029
Μέση τιμή (απόλυτη)	0.00045
Εύρος	0.0061
Τυπική απόκλιση (σ)	4.5×10^{-4}
Μεταβλητότητα (σ^2)	0.2×10^{-6}

Πίνακας 7.9: Στατιστικά στοιχεία ανηγμένων μετακινήσεων από IBIS

Στο Σχήμα 7.10 παρουσιάζεται το διαγράμμα της χρονοσειράς των ανηγμένων μετακινήσεων που προέκυψαν από το σύστημα IBIS κατά τον άξονα Y για το ύψος 73.30m. Τα διαστήματα που εμφανίζονται χωρίς τιμές είναι τα διαστήματα που μεσολαβούν μεταξύ των περιόδων συλλογής δεδομένων.



Σχήμα 7.10: Διάγραμμα χρονοσειράς ανηγμένων μετακινήσεων IBIS για Rbin80 (H=73.30m)

Β. Μετά από τις διορθώσεις λόγω ανεπιθύμητων επιστροφών (clutter) δημιουργούνται επίσης τα διαγράμματα της ανηγμένης (projected) μετατόπισης (displacement) στο πεδίο των συχνοτήτων, από τα οποία προκύπτουν οι συχνότητες ταλάντωσης της κατασκευής.

Οι παραπάνω διαδικασίες πραγματοποιήθηκαν για το σύνολο των δεδομένων. Για να είναι δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα υπόλοιπα 2 συστήματα μέτρησης, τα δεδομένα διαχωρίστηκαν και επεξεργάστηκαν και σε κοινό χρονικό διάστημα μετρήσεων.

7.1.3 Επεξεργασία δεδομένων Ρομποτικού Γεωδαιτικού Σταθμού

Α. Επεξεργασία χρονοσειρών

Όσον αφορά τα δεδομένα του Ρομποτικού Σταθμού (RTS), αρχικά πραγματοποιήθηκε η αφαίρεση των χονδροειδών σφαλμάτων, των τιμών δηλαδή που αποκλείουν σημαντικά από τη μέση τιμή. Ως μέτρο απόκλισης τίθεται συνήθως η τιμή 3σ , όπου σ η τυπική απόκλιση των μετρήσεων. Το ποσοστό των χονδροειδών σφαλμάτων επί του συνόλου των μετρήσεων προέκυψε περίπου: 0.3% για τον άξονα Χ, 0.06% για τον άξονα Υ και 0.03% για τα υψόμετρα Η.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η στροφή του συστήματος των αξόνων, όπως περιγράφεται στην §7.1. Η γωνία στροφής, όπως φαίνεται από το Σχήμα 7.2 είναι 119.5907grad.

Β. Υπολογισμός μετακινήσεων.

Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι τιμές της μετακίνησης από τη σχέση:

$$\Delta x_i = x_i - \mu \quad (7.2)$$

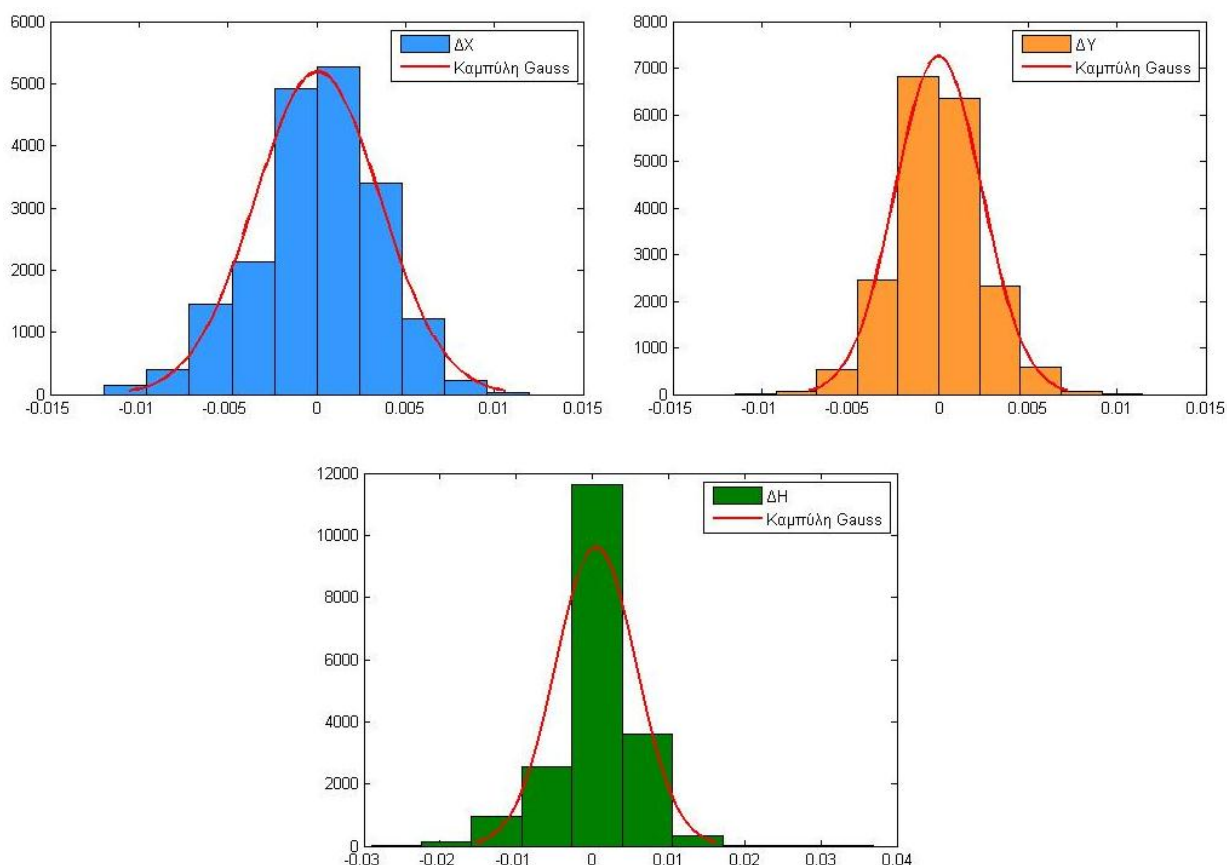
για κάθε i , όπου μ η μέση τιμή.

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται μερικά στατιστικά στοιχεία που προέκυψαν από την επεξεργασία των μετρήσεων του RTS.

	ΔX (m)	ΔY (m)	ΔH (m)
Μέγιστη τιμή (max)	0.012	0.012	0.036
Ελάχιστη τιμή (min)	-0.012	-0.012	-0.030
Μέση τιμή (απόλυτη)	0.003	0.002	0.004
Εύρος	0.024	0.024	0.066
Τυπική απόκλιση (σ)	0.004	0.002	0.005
Μεταβλητότητα (σ^2)	1.0×10^{-5}	0.6×10^{-5}	2.8×10^{-5}

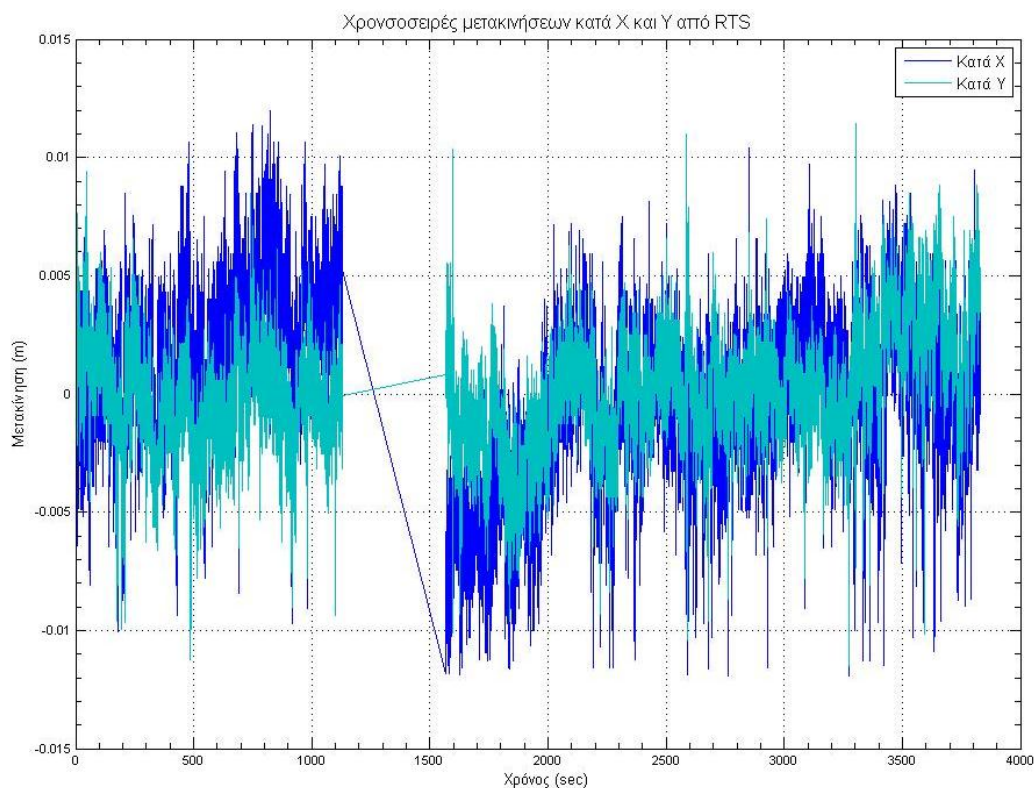
Πίνακας 7.10: Στατιστικά στοιχεία δεδομένων RTS μετά την αφαίρεση των χονδροειδών σφαλμάτων

Στο Σχήμα 7.11 παρουσιάζονται τα διαγράμματα συχνότητας εμφάνισης (ιστογράμματα) για τις μετακινήσεις, όπως προέκυψαν από τις μετρήσεις του RTS. Όπως παρατηρείται από τα ιστογράμματα, η κατανομή των παρατηρήσεων είναι σχετικά ομοιόμορφη ως προς τη μέση τιμή, ενώ το εύρος της είναι περίπου 6 φορές η μέση τιμή. Επιπλέον, το μεγαλύτερο μέρος των παρατηρήσεων συγκεντρώνεται στο διάστημα $[-\sigma, +\sigma]$. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η κατανομή των μετακινήσεων από το RTS ακολουθεί την κανονική κατανομή, η καμπύλη της οποίας έχει προσαρμοστεί στα αντίστοιχα ιστογράμματα του Σχήματος 7.11.

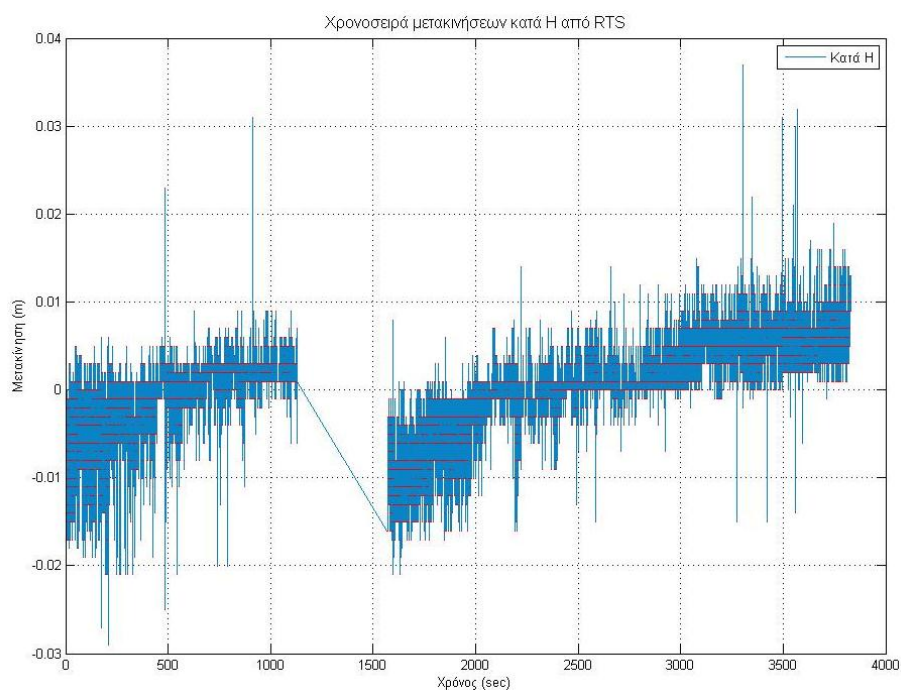


Σχήμα 7.11: Διαγράμματα πλήθους εμφανίσεων των μετακινήσεων από το RTS

Στα Σχήματα 7.12 και 7.13 παρουσιάζονται τα διαγράμματα των χρονοσειρών των συνολικών μετακινήσεων, όπως υπολογίστηκαν από τα δεδομένα του RTS, κατά τους άξονες X και Y, καθώς και των υψομετρικών διαφορών ΔH . Τα διαστήματα που εμφανίζονται χωρίς τιμές είναι τα διαστήματα που μεσολαβούν μεταξύ των περιόδων συλλογής δεδομένων.



Σχήμα 7.12: Διαγράμματα χρονοσειρών μετακινήσεων RTS



Σχήμα 7.13: Διαγράμματα χρονοσειρών υψομετρικών διαφορών από RTS

Η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιήθηκε επί του συνόλου των μετρήσεων. Στη συνέχεια, επαναλήφθηκε για το διάστημα των κοινών μετρήσεων, που επιλέχθηκε για την ανάλυση, ξεχωριστά, προκειμένου να γίνει σύγκριση με τα υπόλοιπα συστήματα μέτρησης.

B. Υπολογισμός συχνοτήτων

Για τον υπολογισμό της συχνότητας ταλάντωσης της κατασκευής από τις μετρήσεις του RTS εφαρμόστηκε ο μετασχηματισμός Lomb, επειδή ο ρυθμός δειγματοληψίας δεν είναι σταθερός.

7.2 Ανάλυση επεξεργασμένων δεδομένων

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η ανάλυση των επεξεργασμένων δεδομένων πραγματοποιήθηκε για ένα από τα παρακάτω χρονικά διαστήματα κοινών μετρήσεων, δηλαδή (βλέπε Πίνακα 7.5 και Σχήμα 7.1):

- α. 14:33:55 - 14:42:12, διάρκειας 8min
- β. 14:49:29 - 15:08:13, διάρκειας 18min
- γ. 15:14:21 - 15:17:46, διάρκειας 3min και
- δ. 15:20:07 - 15:27:09, διάρκειας 7min.

Το χρονικό διάστημα που επιλέχθηκε για να πραγματοποιηθεί η ανάλυση και η σύγκριση των αποτελεσμάτων από τα τρία συστήματα μέτρησης είναι το β', που είναι και το μεγαλύτερο.

Η ανάλυση πραγματοποιείται για το πεδίο του χρόνου, το πεδίο του χώρου και το πεδίο των συχνοτήτων. Σημειώνεται ότι σε όλα τα διαγράμματα έχει τεθεί ως τιμή 0sec η ώρα έναρξης του β' κοινού διαστήματος μετρήσεων, δηλαδή η ώρα 14:49:29. Σημειώνεται επίσης ότι οι τιμές των μετακινήσεων στα παρακάτω διαγράμματα έχουν μετατοπιστεί ως προς τη μέση τιμή τους, για λόγους σύγκρισης.

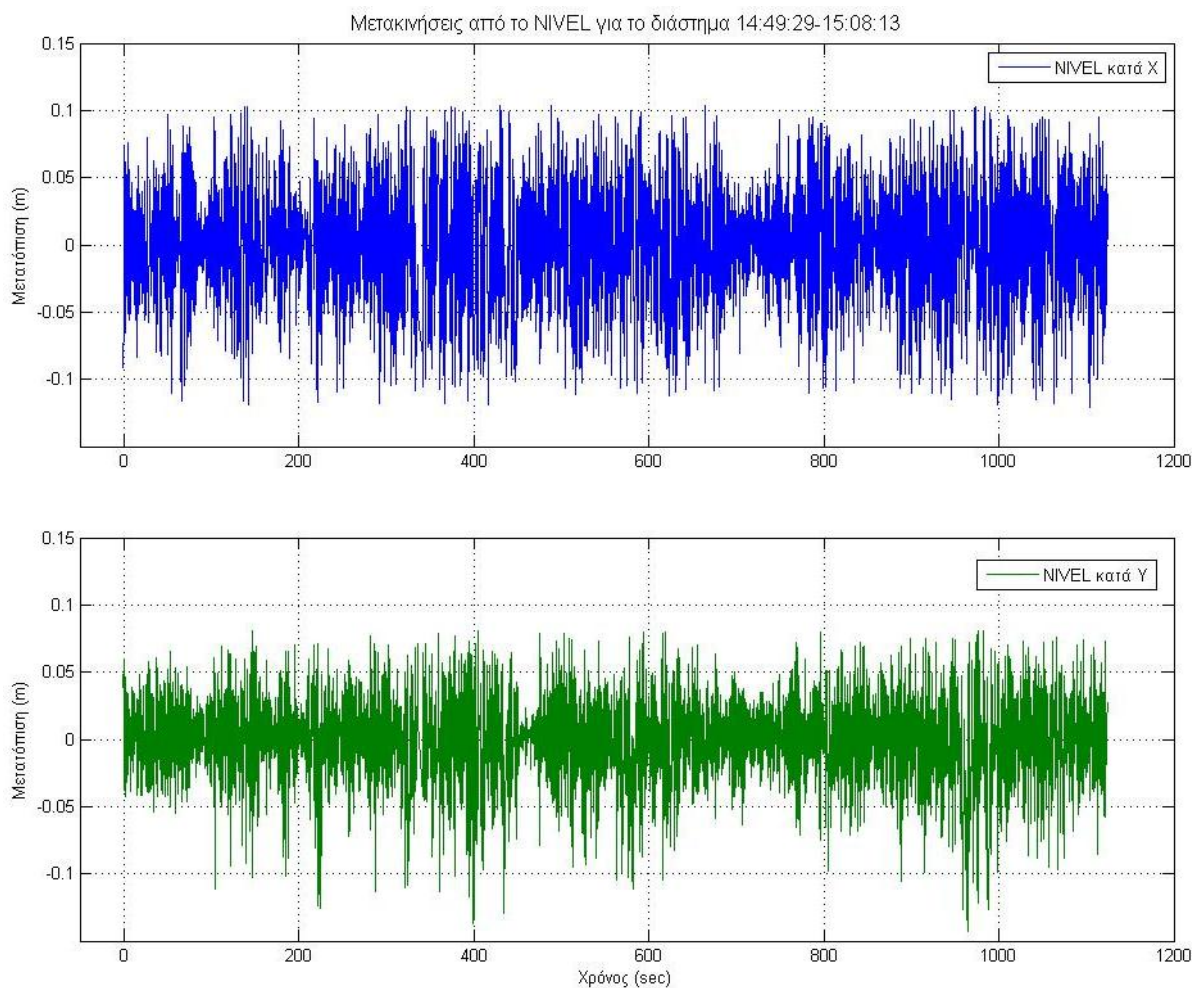
7.2.1 Υπολογισμός και αξιολόγηση μετατοπίσεων στο πεδίο του χρόνου

Παρακάτω παρουσιάζονται και αναλύονται τα διαγράμματα των χρονοσειρών των μετατοπίσεων από τα τρία συστήματα μέτρησης, όπως προέκυψαν μετά την επεξεργασία των δεδομένων τους για το β' κοινό διάστημα μετρήσεων, από 14:49:29 έως 15:08:13.

■ Υπολογισμός / παρουσίαση μετατοπίσεων NIVEL κατά X και Y

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα μετακινήσεων ως προς το χρόνο, όπως προέκυψαν από τις μετατροπές των γωνιών του NIVEL, για τους άξονες X και Y. Υπενθυμίζεται ότι:

- από τις πρωτογενείς παρατηρήσεις του NIVEL έχουν αφαιρεθεί οι τιμές γωνιών πάνω από 1.5 mrad και
- β. η μετακίνηση που εμφανίζεται στα διαγράμματα είναι η φαινόμενη D (§7.1.1) και εκφράζει την τάση μεταβολής.



Σχήμα 7.14: Διαγράμματα φαινόμενων μετακινήσεων ως προς το χρόνο για το NIVEL, στο χρονικό διάστημα 14:49:29-15:08:13

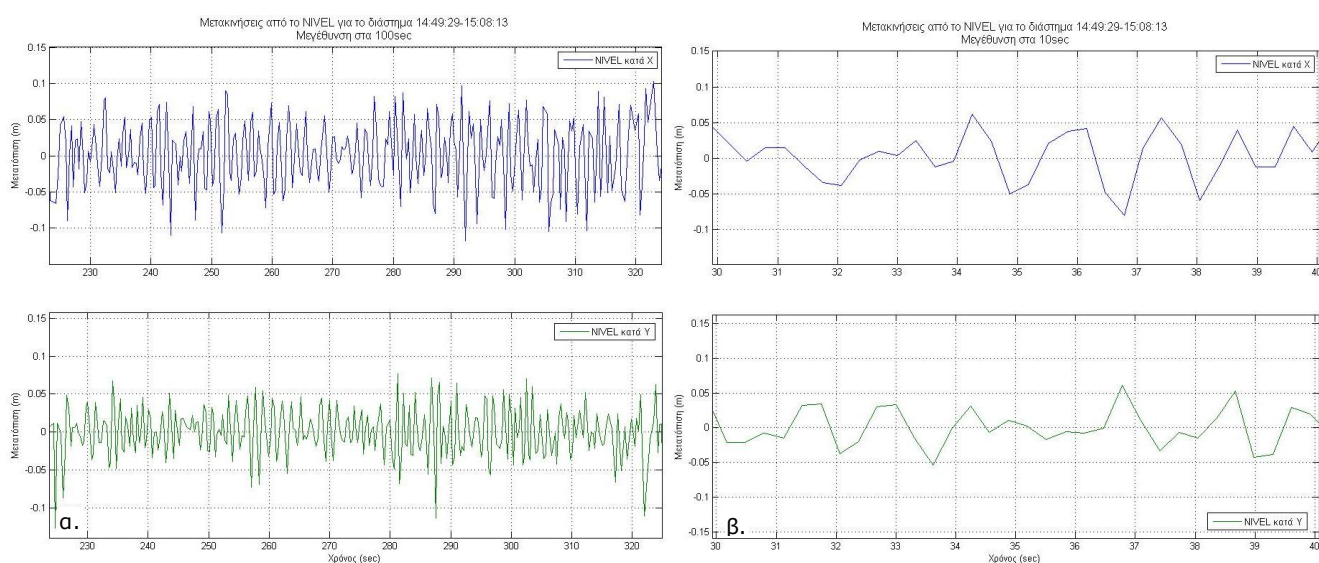
Όπως παρατηρείται από το διάγραμμα του Σχήματος 7.14, το φαινόμενο εύρος της ταλάντωσης για τον άξονα X είναι περίπου $\pm 10\text{cm}$. Για τον άξονα Y είναι από +8cm έως -15cm περίπου. Στον άξονα X παρουσιάζεται ομοιόμορφη ταλάντωση, ενώ στον άξονα Y φαίνεται ότι υπάρχει εντονότερη μετακίνηση προς το -Y (η καμινάδα κλίνει περισσότερο προς το βουνό, βόρεια).

Παρατηρείται, επίσης, ότι υπάρχουν κοινά διαστήματα ηρεμίας και εξάρσεων στις χρονοσειρές των 2 αξόνων (π.χ. έξαρση στα διαστήματα 200-450sec και 950-1050sec,

ηρεμία στο διάστημα 700-750sec). Συγκεκριμένα για τον άξονα Υ, έντονη μετακίνηση παρουσιάζεται στα διαστήματα: 100-450sec, 500-650sec και 900-1100sec.

Από τις χρονοσειρές των 2 αξόνων παρατηρείται, επίσης, η μεγάλη ευαισθησία του αισθητήρα του NIVEL.

Στο παρακάτω Σχήμα 7.15 παρατίθενται διαγράμματα μεγεθύνσεων των χρονοσειρών ως προς το χρόνο, στα 100sec (α) και στα 10sec (β).

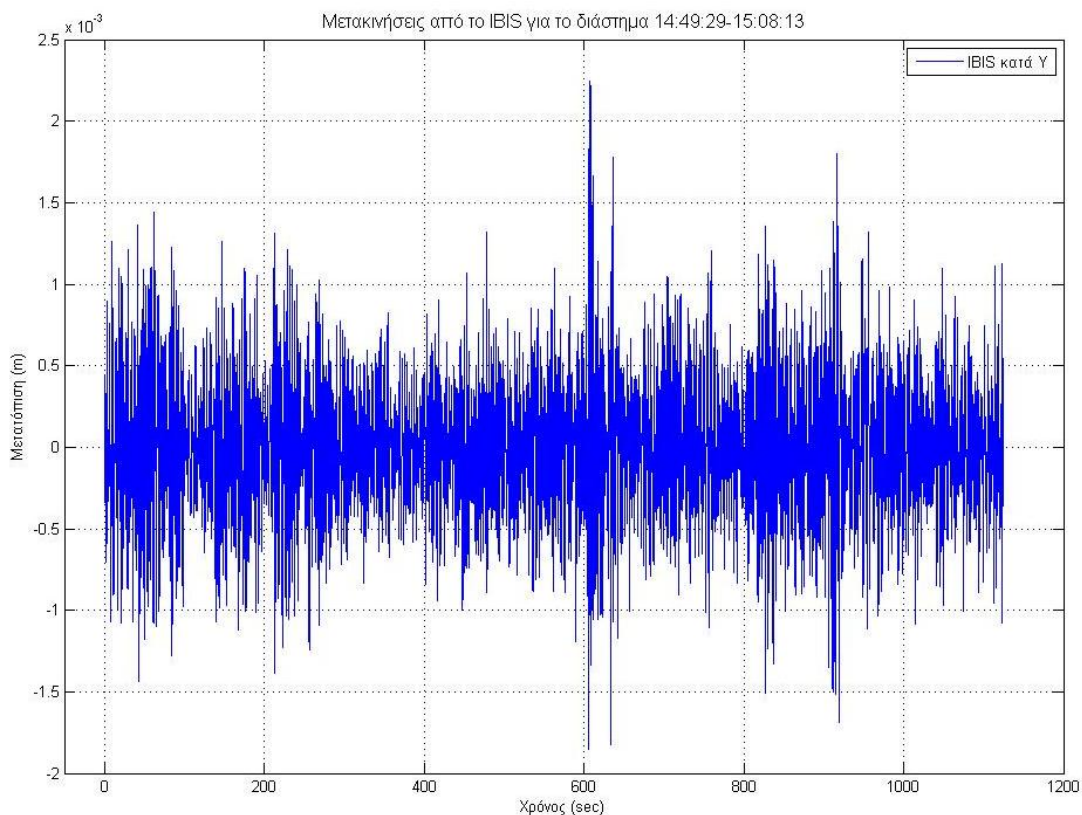


Σχήμα 7.15: Μεγέθυνση στα α. 100sec και β. 10sec του διαγράμματος φαινόμενων μετακινήσεων ως προς το χρόνο για το NIVEL, στο χρονικό διάστημα 14:49:29-15:08:13

Από τα παραπάνω διαγράμματα γίνεται εμφανής η ύπαρξη περιοδικότητας στην κίνηση της κατασκευής. Παρατηρείται, επίσης, ότι η μορφή της χρονοσειράς πλησιάζει τη μορφή μιας ημιτονοειδούς συνάρτησης, περιόδου T περίπου 1-1.5sec. Η μορφή αυτή θα μπορούσε επίσης να προκύψει από τη σύνθεση δυο βασικών συχνοτήτων μεταξύ 1 και 1.5sec.

■ Υπολογισμός / παρουσίαση μετατοπίσεων IBIS κατά Υ

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα μετακινήσεων ως προς το χρόνο, όπως προέκυψε από το πρόγραμμα επεξεργασίας IBIS-DV, για τις παρατηρήσεις του IBIS, κατά τον άξονα Υ, για το ύψος 73.30m.

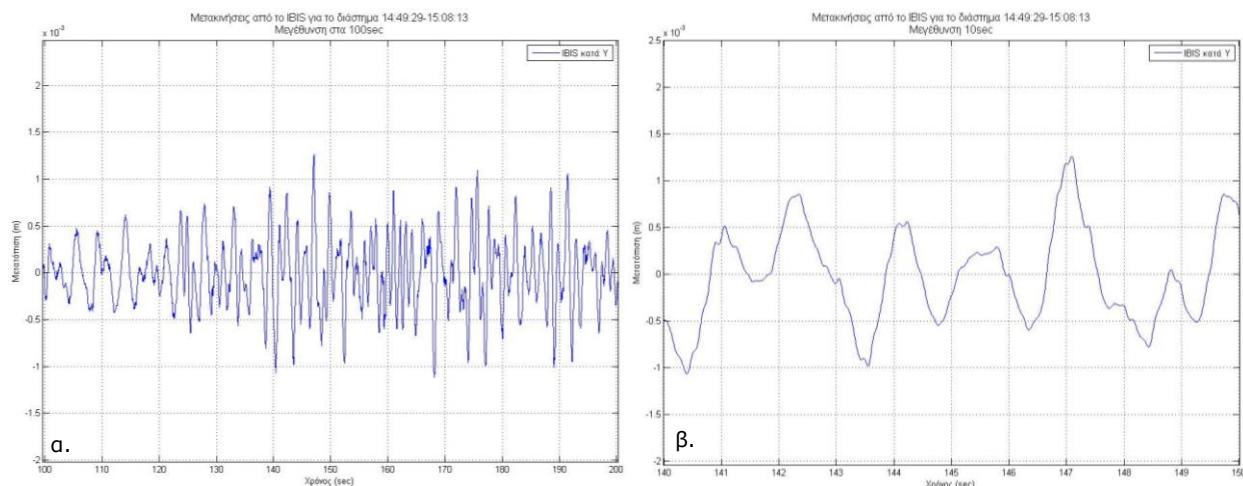


Σχήμα 7.16: Διάγραμμα μετακινήσεων ως προς το χρόνο για το IBIS, στο χρονικό διάστημα 14:49:29-15:08:13

Όπως παρατηρείται, το μέγιστο εύρος της ταλάντωσης για τον άξονα Y είναι από +2.5mm έως -2.0mm περίπου, αλλά οι τιμές συγκεντρώνονται κυρίως στο διάστημα ± 0.5 mm. Έντονη μετακίνηση παρουσιάζεται στα διαστήματα: 0-80sec, 120-220sec και 820-920sec. Στιγμιαίες εξάρσεις εμφανίζονται στις χρονικές στιγμές 600-650sec και 920sec.

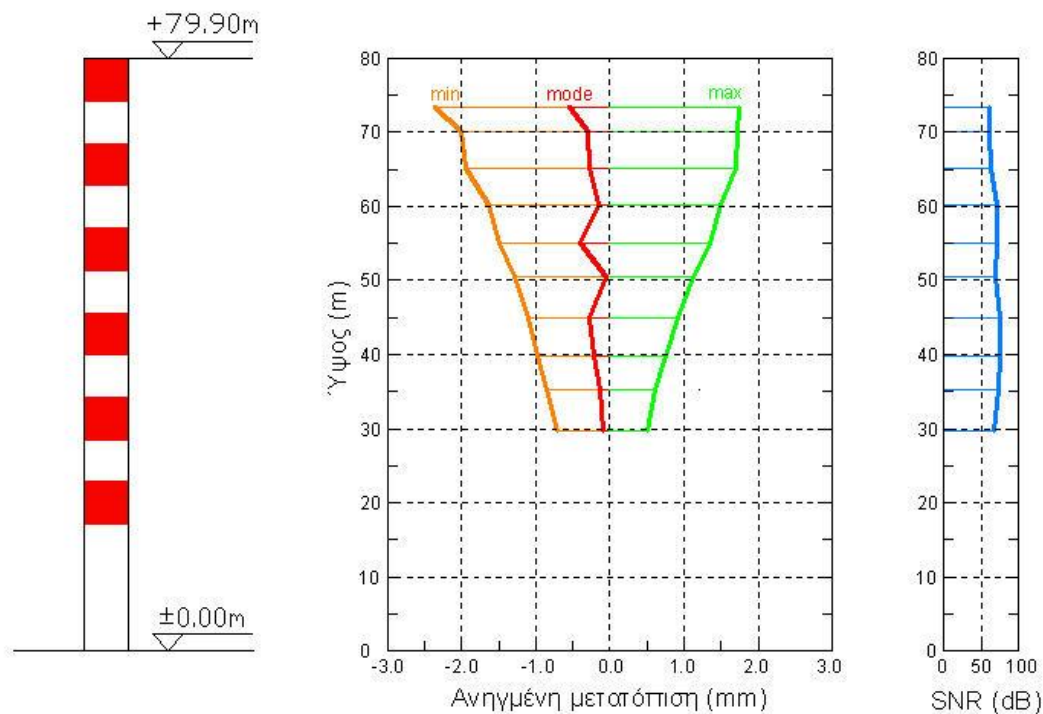
Από το διάγραμμα παρατηρείται και η μεγάλη ευαισθησία του αισθητήρα του IBIS.

Στο παρακάτω Σχήμα 7.17 παρατίθενται διαγράμματα μεγεθύνσεων των χρονοσειρών ως προς το χρόνο στα 100sec (α) και στα 10sec (β). Από τα διαγράμματα αυτά παρατηρείται, σε αντιστοιχία με τις χρονοσειρές από το NIVEL, η ύπαρξη περιοδικότητας 1-1.5sec.



Σχήμα 7.17: Μεγέθυνση στα α. 100sec και β. 10sec του διαγράμματος μετακινήσεων ως προς το χρόνο για το IBIS, στο χρονικό διάστημα 14:49:29-15:08:13

Προκειμένου να εξεταστεί η ομαλή συμπεριφορά της κατασκευής καθ' ύψος, κρίθηκε σκόπιμο να παρουσιαστεί το διάγραμμα της ανηγμένης μετακίνησης, όπως προκύπτει από το σύστημα IBIS, για το διάστημα κοινών μετρήσεων 14:49:29-15:08:13, σε όλα τα ύψη με καλή τιμή SNR (πάνω από 60dB).



Σχήμα 7.18: Διάγραμμα ανηγμένων μετακινήσεων και αντίστοιχων τιμών SNR ως προς το ύψος της καμινάδας για το IBIS, στο χρονικό διάστημα 14:49:29-15:08:13

Από το διάγραμμα του Σχήματος 7.18 συμπεραίνεται ότι:

- η μέγιστη και ελάχιστη τιμή της παραμόρφωσης της καμινάδας αυξάνει σχεδόν γραμμικά με το ύψος. Δηλαδή, η καμινάδα παρουσιάζει μια ομαλή παραμόρφωση

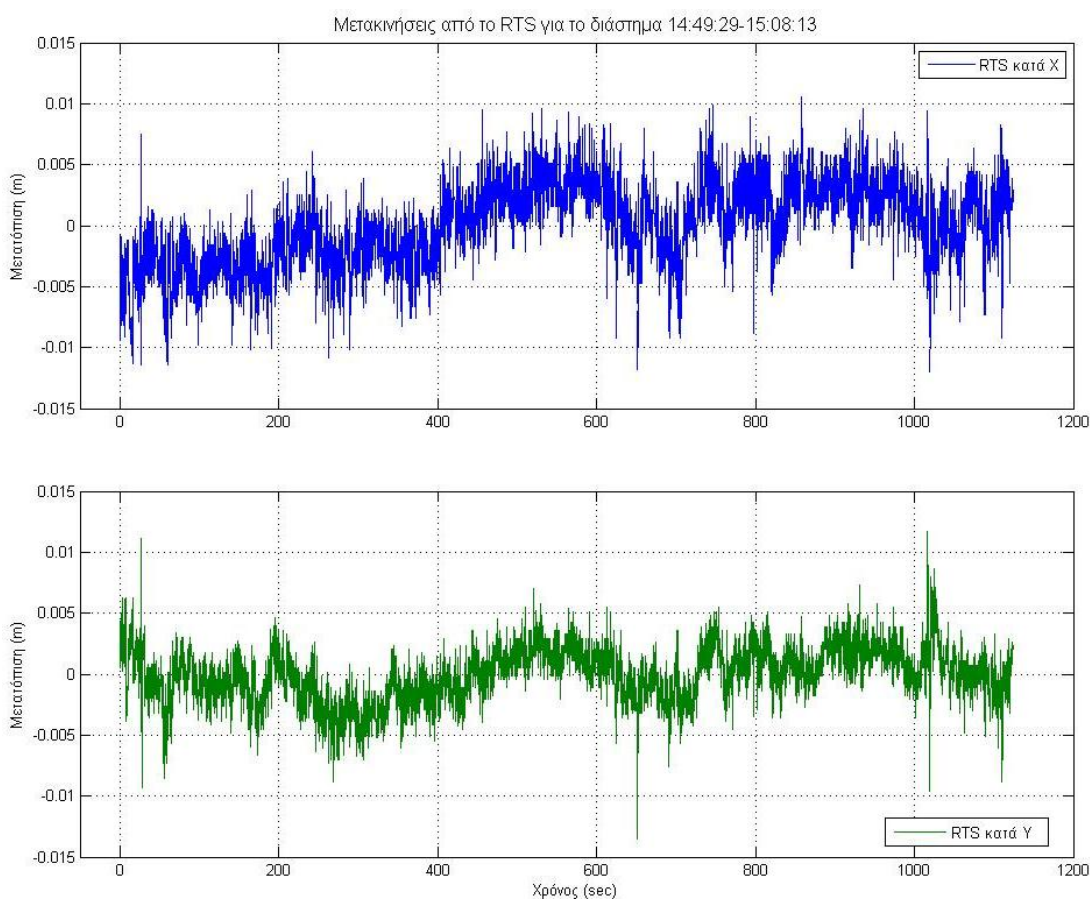
καθ' ύψος, ως προς τις μέγιστες (max) και ελάχιστες (min) τιμές σε όλο το χρονικό διάστημα παρατήρησης. Ωστόσο, η παραμόρφωση δεν είναι ομαλή αν εξεταστεί ως προς τη επικρατούσα τιμή της (mode).

- Το μέγεθος της παραμόρφωσης είναι μεγαλύτερο κατά τη διεύθυνση $-Y$ (η καμινάδα κλίνει περισσότερο προς το βουνό, βόρεια).

■ Υπολογισμός / παρουσίαση μετατοπίσεων RTS κατά X και Y

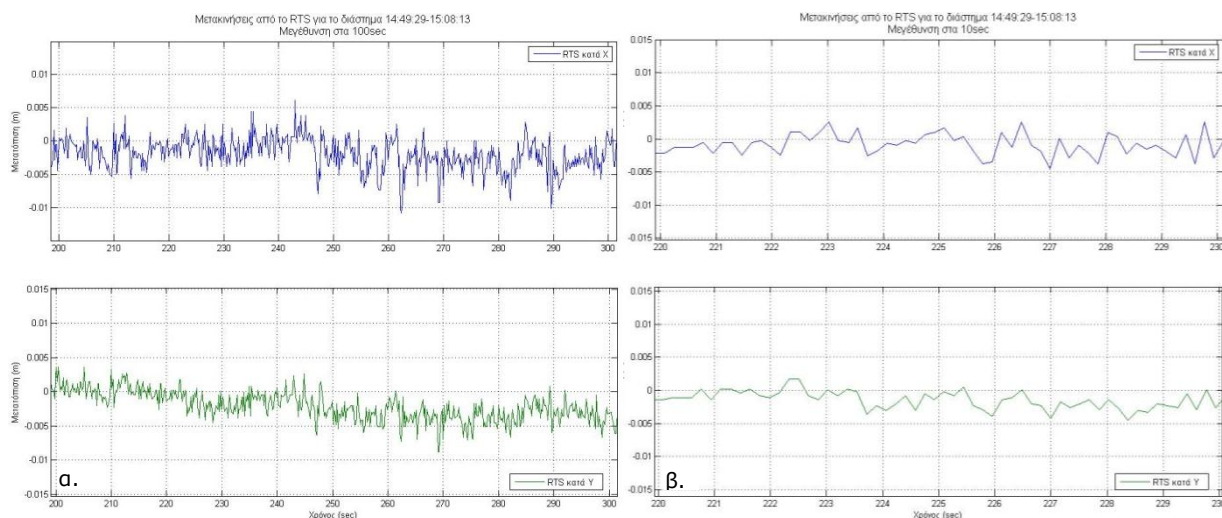
Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα μετακινήσεων ως προς το χρόνο, όπως προέκυψαν από τις διαφορές των συντεταγμένων του RTS, για τους άξονες X και Y.

Όπως παρατηρείται από το διάγραμμα του Σχήματος 7.19, το μεγαλύτερο μέρος των παρατηρήσεων και για τους 2 άξονες, αλλά ιδίως για τον άξονα Y, βρίσκεται εντός της ζώνης αβεβαιότητας του οργάνου ($\pm 10\text{mm}$). Το μέγιστο πλάτος της ταλάντωσης για τον άξονα X είναι $\pm 1.0\text{cm}$ περίπου, ενώ για τον άξονα Y, εμφανίζονται σποραδικά τιμές έντονης μετακίνησης, το πλάτος των οποίων αγγίζει και τα $\pm 1.4\text{cm}$ (25sec, 650sec, 1020sec και 1120sec), αλλά ο κύριος όγκος των τιμών είναι συγκεντρωμένος στο διάστημα $\pm 0.5\text{cm}$. Επίσης, στον άξονα X, παρατηρείται μια μετακίνηση της θέσης ισορροπίας μετά τα 400sec.



Σχήμα 7.19: Διαγράμματα μετακινήσεων ως προς το χρόνο για το RTS, στο χρονικό διάστημα 14:49:29-15:08:13

Στο παρακάτω Σχήμα 7.20 παρατίθενται διαγράμματα μεγεθύνσεων των χρονοσειρών ως προς το χρόνο στα 100sec (α) και στα 10sec (β).



Σχήμα 7.20: Μεγέθυνση στα α. 100sec και β. 10sec του διαγράμματος μετακινήσεων ως προς το χρόνο για το RTS, στο χρονικό διάστημα 14:49:29-15:08:13

Από τις παραπάνω χρονοσειρές, δεν είναι εύκολο να εντοπιστεί περιοδικότητα, καθώς είναι πολύ νοθευμένες με θόρυβο. Οποιοδήποτε συμπέρασμα θα προκύψει από την επεξεργασία στο πεδίο των συχνοτήτων.

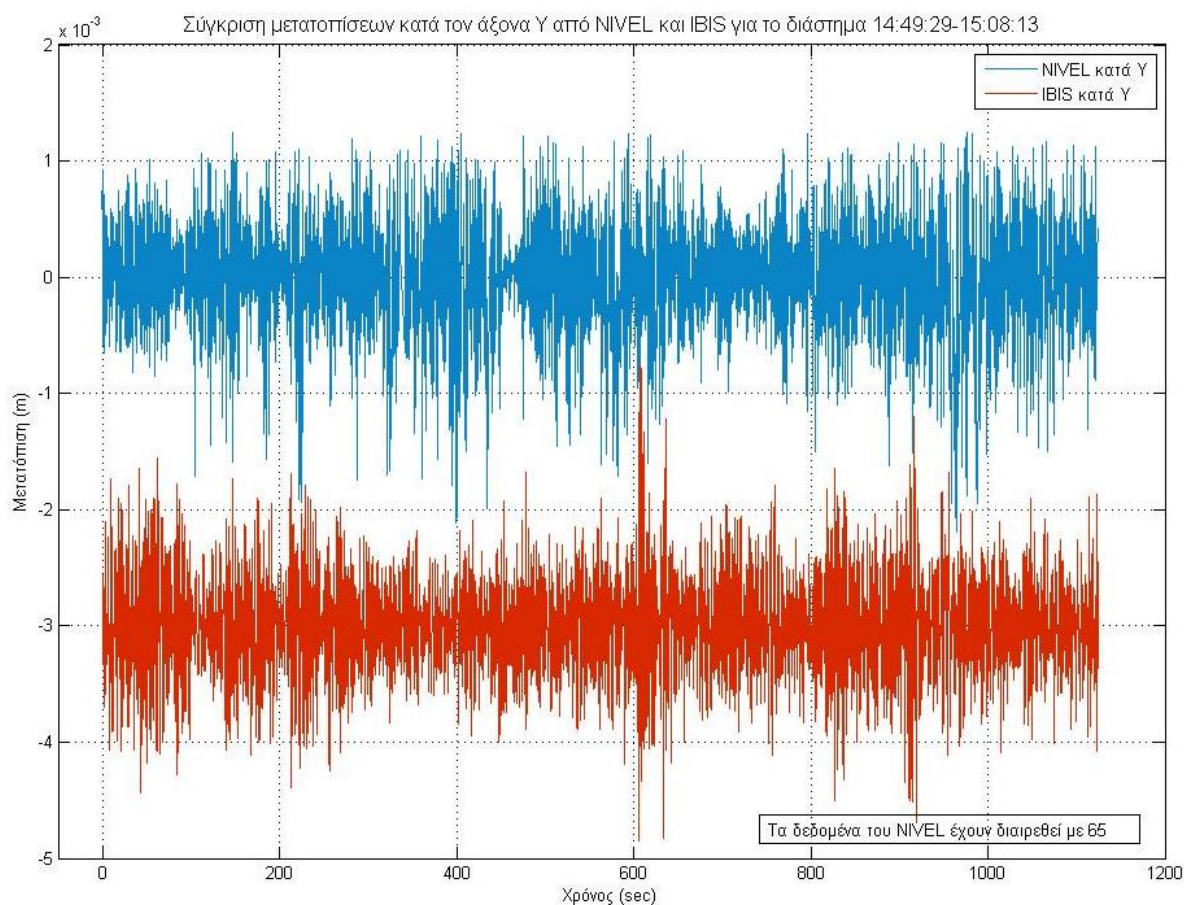
■ Συγκριτική αξιολόγηση

Παρακάτω παρατίθενται διαγράμματα σύγκρισης των χρονοσειρών μεταξύ των τριών συστημάτων μέτρησης. Συγκεκριμένα, συγκρίνονται τα αποτελέσματα μεταξύ NIVEL-IBIS και NIVEL-RTS. Επίσης, σε καθένα από τα διαγράμματα (εκτός των μεγεθύνσεων), η μία από τις δύο επιθέμενες χρονοσειρές έχει υποστεί μετάθεση κατά τον άξονα Y, ώστε να διακρίνεται.

Στα παρακάτω διαγράμματα, οι φαινόμενες μετακινήσεις από το NIVEL εμφανίζονται υπό κλίμακα, η οποία επιλέχθηκε μετά από δοκιμές. Έτσι, όσον αφορά τα διαγράμματα NIVEL-IBIS, η κλίμακα τέθηκε 1/65, ενώ στα αντίστοιχα διαγράμματα NIVEL-RTS, η κλίμακα τέθηκε ίση με 1/15.

Τα αποτελέσματα που μπορούν να εξαχθούν από τα παρακάτω συγκριτικά διαγράμματα, αφορούν κυρίως την τάση μεταβολής των μετακινήσεων και τη γενικότερη μορφή των χρονοσειρών. Να σημειωθεί ότι η σύγκριση έχει νόημα και άρα έχει πραγματοποιηθεί μόνο κατά τον άξονα Y.

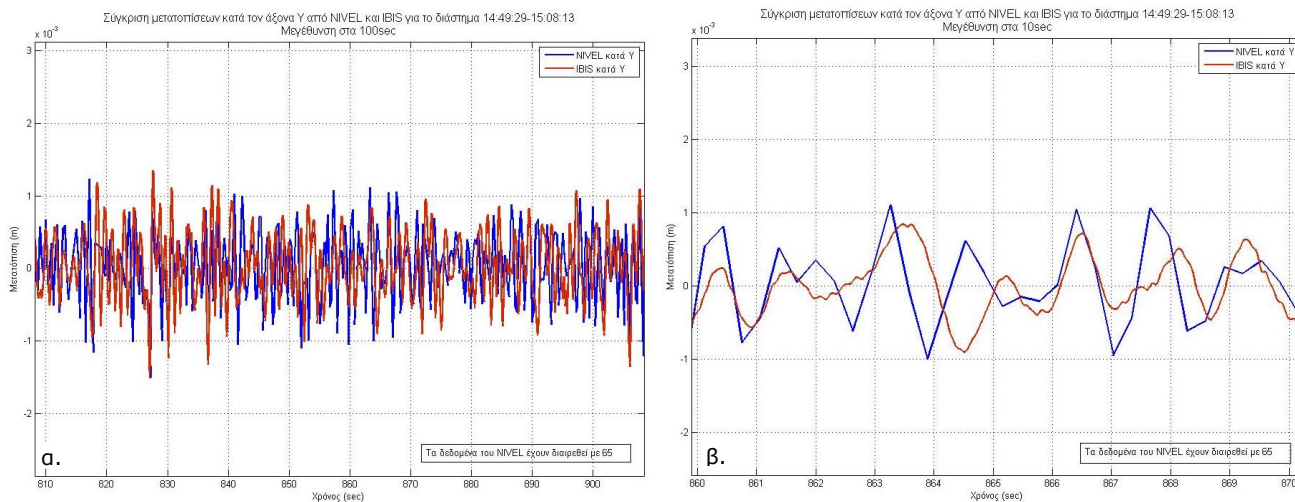
Α. Σύγκριση NIVEL-IBIS



Σχήμα 7.21: Συγκριτικό διάγραμμα φαινόμενων μετακινήσεων από NIVEL και ανηγμένων μετακινήσεων από IBIS, στο χρονικό διάστημα 14:49:29-15:08:13

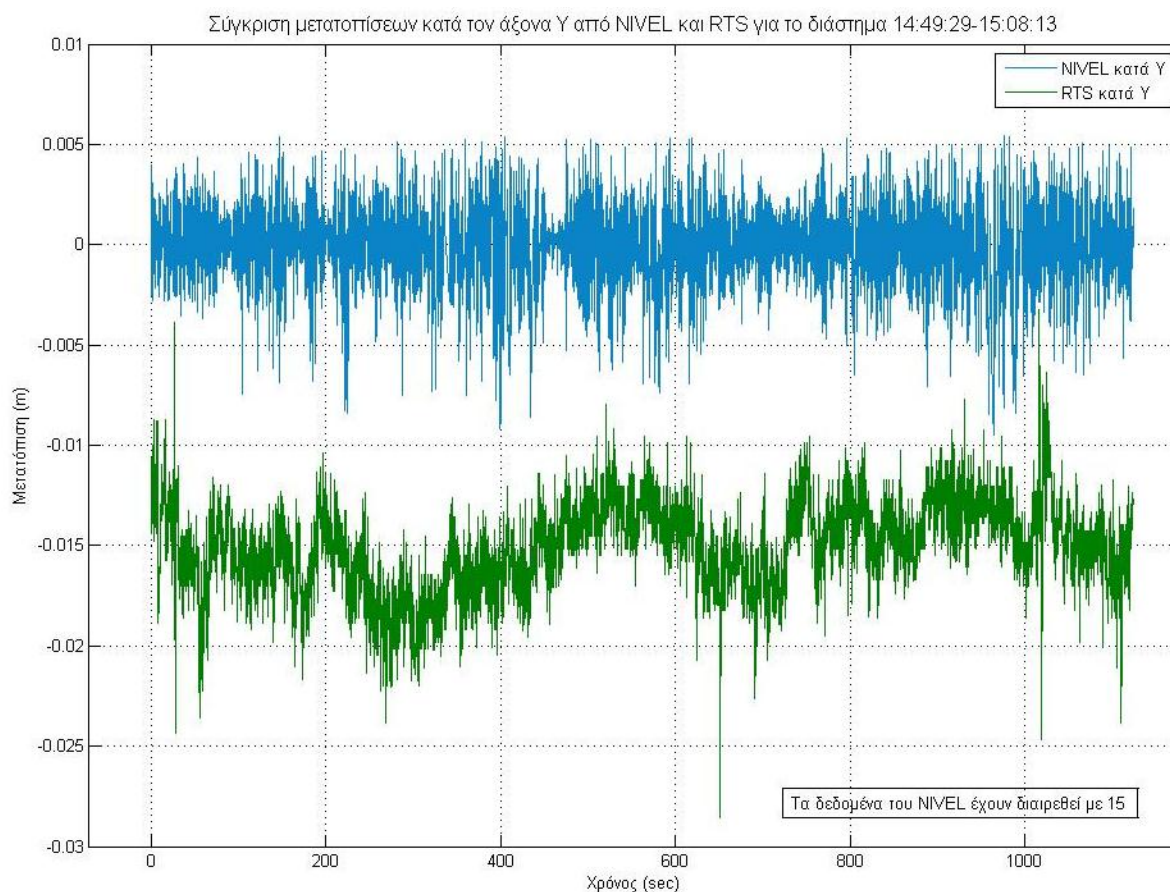
Από το διάγραμμα του Σχήματος 7.21 προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Στη χρονοσειρά του NIVEL παρατηρείται εντονότερη τάση μετακίνησης προς το $-Y$, ενώ η αντίστοιχη τάση στη χρονοσειρά του IBIS είναι ελάχιστη.
- Ενώ εμφανίζονται κάποια κοινά διαστήματα εξάρσεων (600-640sec, 820-920sec) και ηρεμίας (190-210sec, 640-700sec), στη χρονοσειρά του NIVEL δεν υπάρχει αντιστοίχιση των έντονων μετακινήσεων που καταγράφηκαν με το IBIS στα 600-650sec και 920sec. Αυτό θα μπορούσε να οφείλεται και στο γεγονός ότι αφαιρέθηκαν από τις παρατηρήσεις του NIVEL, οι μετρήσεις γωνιών πάνω από $\pm 1.5\text{mrad}$.



Σχήμα 7.22: Μεγέθυνση στα α. 100sec και β. 10sec του συγκριτικού διαγράμματος φαινομένων μετακινήσεων από NIVEL και ανηγμένων μετακινήσεων από IBIS, στο χρονικό διάστημα 14:49:29-15:08:13

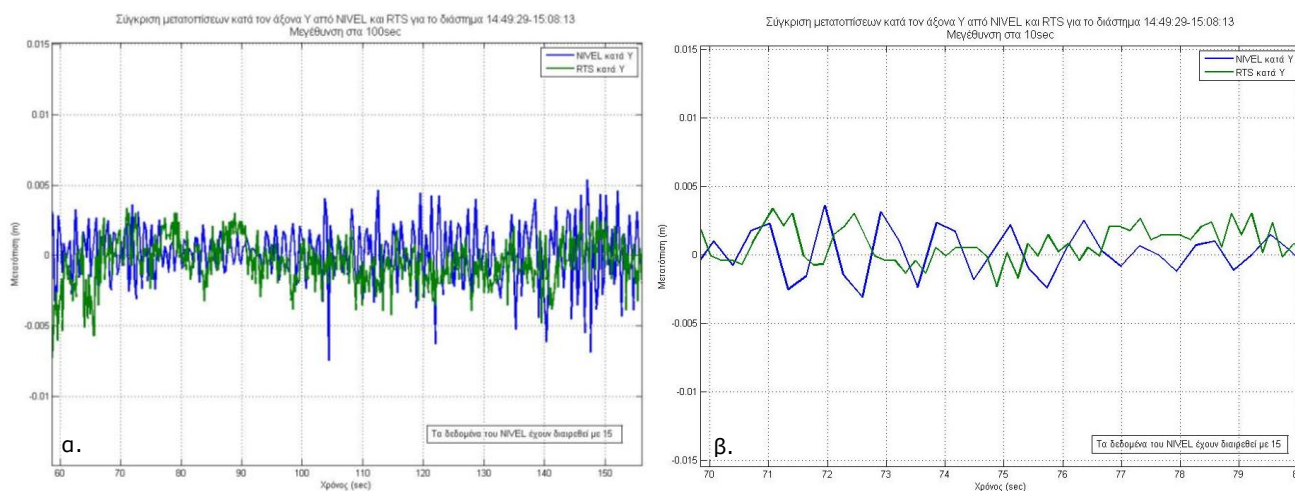
Β. Σύγκριση NIVEL-RTS



Σχήμα 7.23: Συγκριτικό διάγραμμα φαινομένων μετακινήσεων από NIVEL και μετακινήσεων από RTS, στο χρονικό διάστημα 14:49:29-15:08:13

Από το διάγραμμα του Σχήματος 7.23 προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Δεν υπάρχει αντιστοίχιση των έντονων τιμών μετακίνησης που καταγράφηκαν με το RTS στη χρονοσειρά του NIVEL. Αυτό θα μπορούσε να οφείλεται και στο γεγονός ότι αφαιρέθηκαν από τις παρατηρήσεις του NIVEL, οι μετρήσεις γωνιών πάνω από $\pm 1.5\text{mrad}$. Θα μπορούσε επίσης να οφείλεται στο σφάλμα της χρονικής διαφοράς καταγραφής γωνίας και μήκους των μετρήσεων του RTS.



Σχήμα 7.24: Μεγέθυνση στα α. 100sec και β. 10sec του συγκριτικού διαγράμματος φαινομένων μετακινήσεων από NIVEL και μετακινήσεων από RTS, στο χρονικό διάστημα 14:49:29-15:08:13

7.2.2 Υπολογισμός και αξιολόγηση μετατοπίσεων στο πεδίο του χώρου

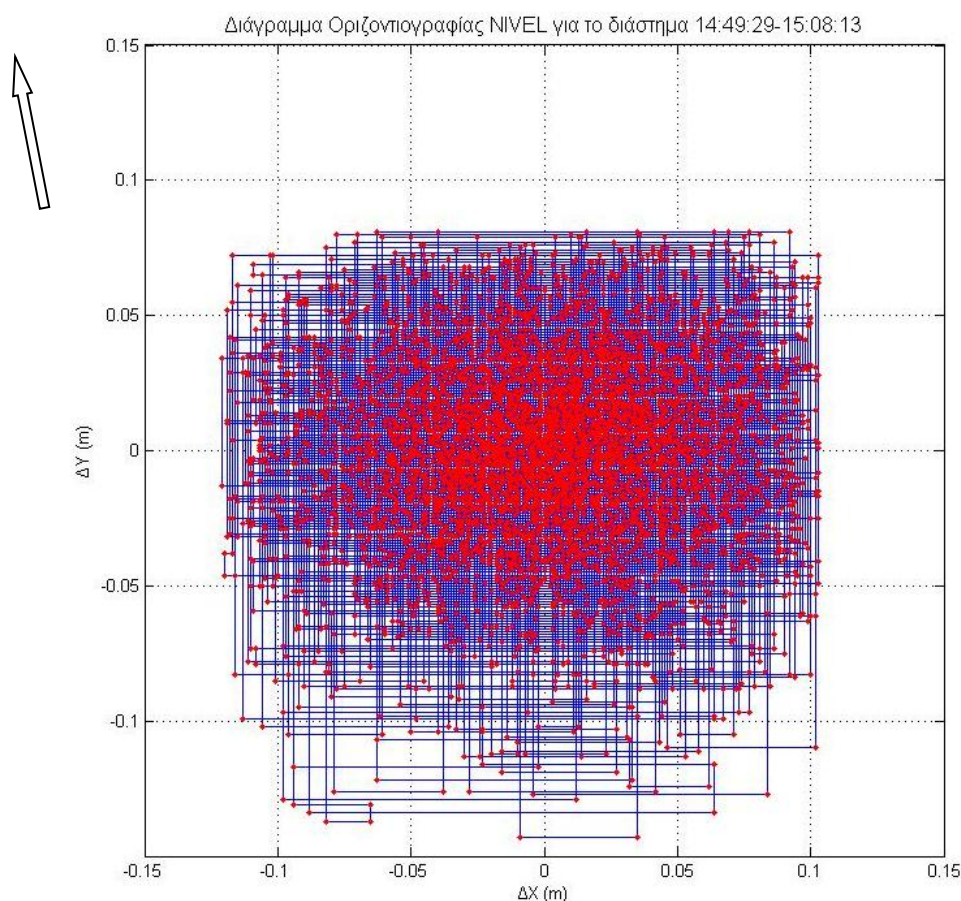
Παρακάτω παρουσιάζονται και αναλύονται τα διαγράμματα οριζοντιογραφίας των συστημάτων NIVEL, IBIS και RTS, όπως προέκυψαν μετά την επεξεργασία των δεδομένων τους για το β' κοινό διάστημα μετρήσεων, από 14:49:29 έως 15:08:13. Στα διαγράμματα έχει προστεθεί και το διάνυσμα της κυριάρχης τιμής της διεύθυνσης του ανέμου για το ίδιο διάστημα, δηλαδή Βόρειος (από 0°).

■ Διάγραμμα οριζοντιογραφίας NIVEL

Στο Σχήμα 7.25 παρουσιάζεται το διάγραμμα οριζοντιογραφίας από το NIVEL. Το διάγραμμα απεικονίζει τις φαινόμενες μετακινήσεις, όπως προέκυψαν από τη μετατροπή των γωνιών που καταγράφηκαν από το NIVEL.

Όπως παρατηρείται, η κίνηση των σημείων σχηματίζει μια έλλειψη στο χώρο με τον μεγάλο ημιάξονα να σχηματίζει γωνία με τον άξονα των X περίπου 20° . Ο μεγάλος

ημιάξονας δηλαδή βρίσκεται στη διεύθυνση Ανατολή-Δύση και κάθετα με το δάνυσμα της διεύθυνσης του ανέμου. Το εύρος της φαινόμενης μετακίνησης είναι περίπου $\pm 6-7\text{cm}$ για τον άξονα X και $\pm 5\text{cm}$ για τον άξονα Y.

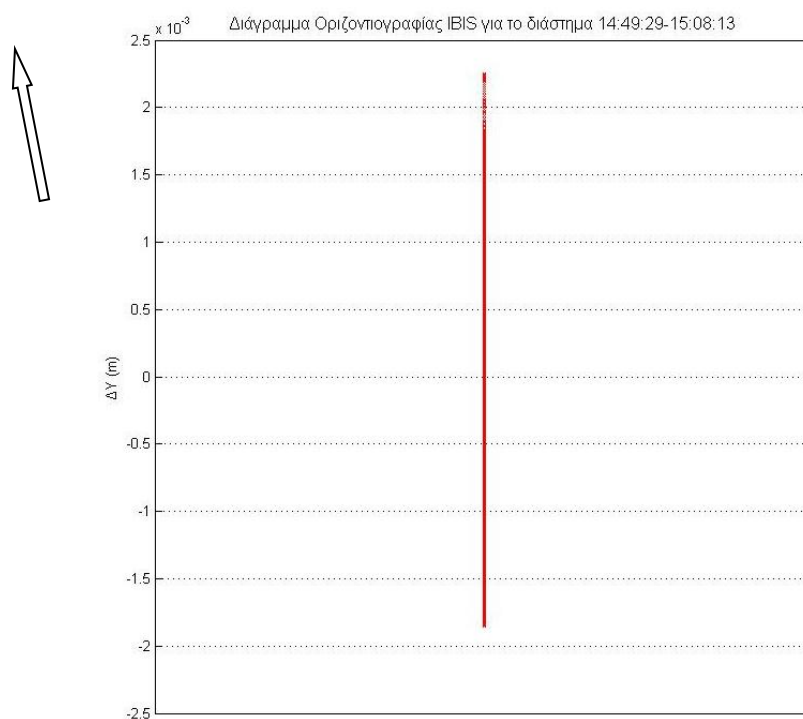


Σχήμα 7.25: Διάγραμμα οριζοντιογραφίας από NIVEL (με φαινόμενες μετακινήσεις) για το χρονικό διάστημα 14:49:29-15:08:13

■ Διάγραμμα οριζοντιογραφίας IBIS

Στο Σχήμα 7.26 παρουσιάζεται το διάγραμμα οριζοντιογραφίας από το IBIS. Το διάγραμμα απεικονίζει τις ανηγμένες μετακινήσεις, όπως προέκυψαν από το πρόγραμμα επεξεργασίας των παρατηρήσεων του συστήματος, IBIS-DV. Επειδή το σύστημα καταγράφει παραμορφώσεις κατά τη μία διεύθυνση, ακτινικά, το διάγραμμα οριζοντιογραφίας είναι μονοδιάστατο.

Όπως παρατηρείται, η κίνηση των σημείων περιορίζεται στη διεύθυνση του άξονα Y. Τα σημεία δεν διακρίνονται εξαιτίας της μεγάλης πυκνότητάς τους. Το εύρος της μετακίνησης είναι $\pm 1.8\text{mm}$ περίπου.

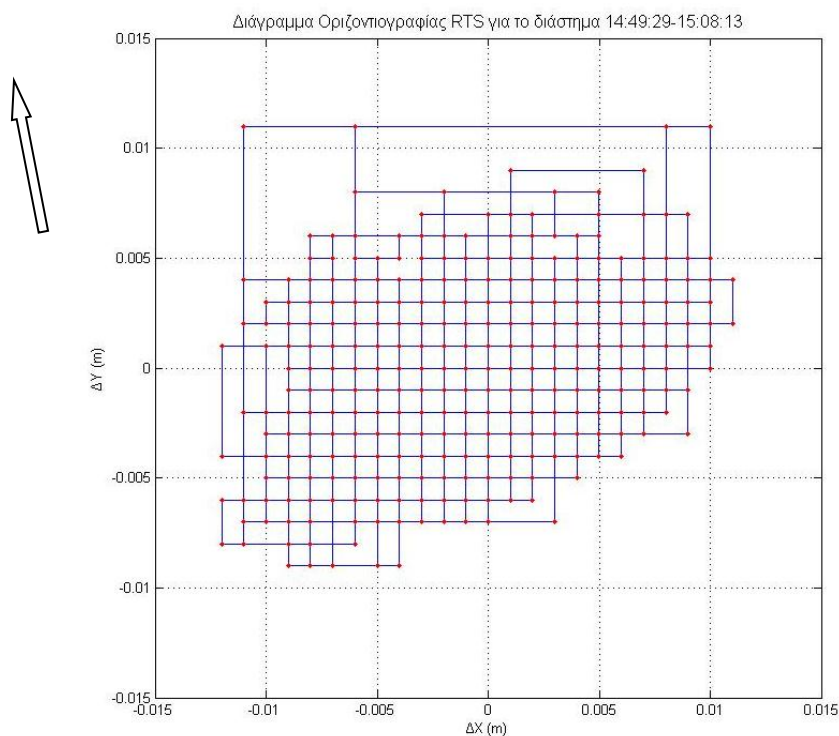


Σχήμα 7.26: Διάγραμμα οριζοντιογραφίας από IBIS για το χρονικό διάστημα 14:49:29-15:08:13

■ Διάγραμμα οριζοντιογραφίας RTS

Στο Σχήμα 7.27 παρουσιάζεται το διάγραμμα οριζοντιογραφίας από το RTS.

Όπως παρατηρείται, η κίνηση των σημείων σχηματίζει μια έλλειψη στο χώρο. Ο μεγάλος ημιάξονας της έλλειψης σχηματίζει γωνία περίπου 25° με τον άξονα X, βρίσκεται δηλαδή στη διεύθυνση Ανατολή-Δύση και σχεδόν κάθετα στο διάνυσμα της διεύθυνσης του ανέμου. Το εύρος της μετακίνησης είναι περίπου $\pm 6-7\text{mm}$ για τον άξονα X και $\pm 5\text{mm}$ για τον άξονα Y.

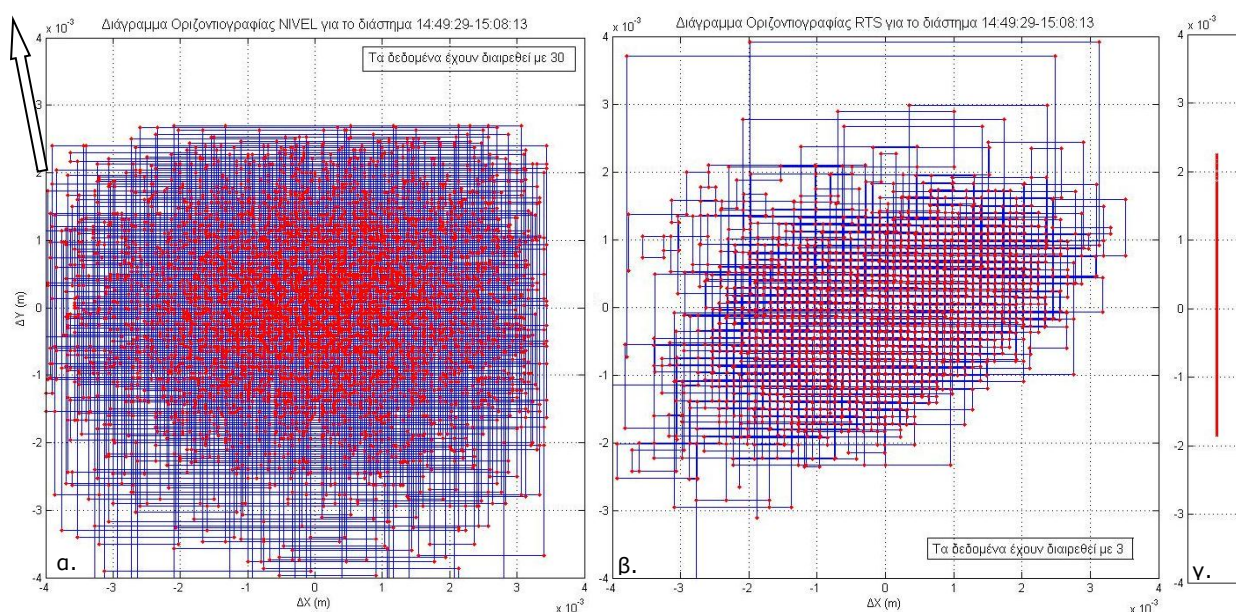


Σχήμα 7.27: Διάγραμμα οριζοντιογραφίας από RTS για το χρονικό διάστημα 14:49:29-15:08:13

Χαρακτηριστικό του διαγράμματος οριζοντιογραφίας των παρατηρήσεων με το RTS είναι η παρουσία της ομοιόμορφης τετραγωνικής κατανομής των παρατηρήσεων, πλευράς 1mm, που αποτελεί την ανάλυση των μετρήσεων του οργάνου.

■ Συγκριτική αξιολόγηση

Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα οριζοντιογραφίας από τα τρία συστήματα καταγραφής, διαμορφωμένα έτσι ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση μεταξύ τους. Ειδικότερα, τα διαγράμματα από το NIVEL και από το RTS εμφανίζονται υπό κλίμακα, με βάση την κλίμακα μεγέθους των μετακινήσεων από το διάγραμμα του IBIS. Έτσι, όσον αφορά το διάγραμμα του NIVEL η κλίμακα τέθηκε ίση με 1/30, ενώ στο αντίστοιχο διάγραμμα του RTS η κλίμακα τέθηκε ίση με 1/3.



Σχήμα 7.28: Συγκριτικά διαγράμματα οριζοντιογραφίας α. από NIVEL, β. από RTS, γ. από IBIS, για το χρονικό διάστημα 14:49:29-15:08:13

Από τη συγκριτική αξιολόγηση στο πεδίο του χώρου των τριών συστημάτων καταγραφής προκύπτουν τα εξής:

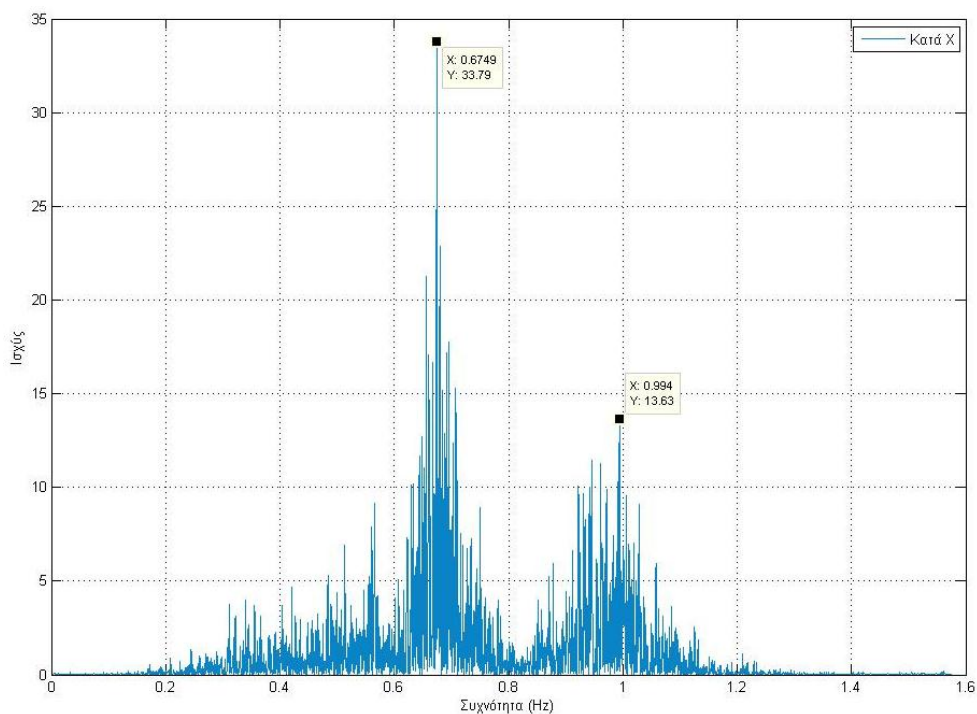
- Η μορφή της κίνησης της καμινάδας που καταγράφηκε από τους αισθητήρες NIVEL και RTS είναι παρόμοια. Οι κύριοι ημιάξονες ελλείψεων που σχηματίζονται από τις παρατηρήσεις του κάθε αισθητήρα είναι σχεδόν παράλληλοι μεταξύ τους και κάθετοι με το διάνυσμα της διεύθυνσης του ανέμου για το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα που αναλύεται.
- Όσον αφορά το μέγεθος της παραμόρφωσης, γίνεται η παραδοχή ότι η τάξη μεγέθους που προκύπτει από το IBIS ($\pm 1.8\text{mm}$ κατά Y) είναι η ορθότερη. Η διαφορά με το μέγεθος που καταγράφηκε από το RTS ($\pm 6\text{-}7\text{mm}$ κατά Y), αποδίδεται εν μέρει στη διαφορά του ύψους παρατήρησης και κυρίως στην αβεβαιότητα των μετρήσεων του RTS ($\pm 10\text{mm}$).

7.2.3 Υπολογισμός και αξιολόγηση συχνοτήτων ταλάντωσης

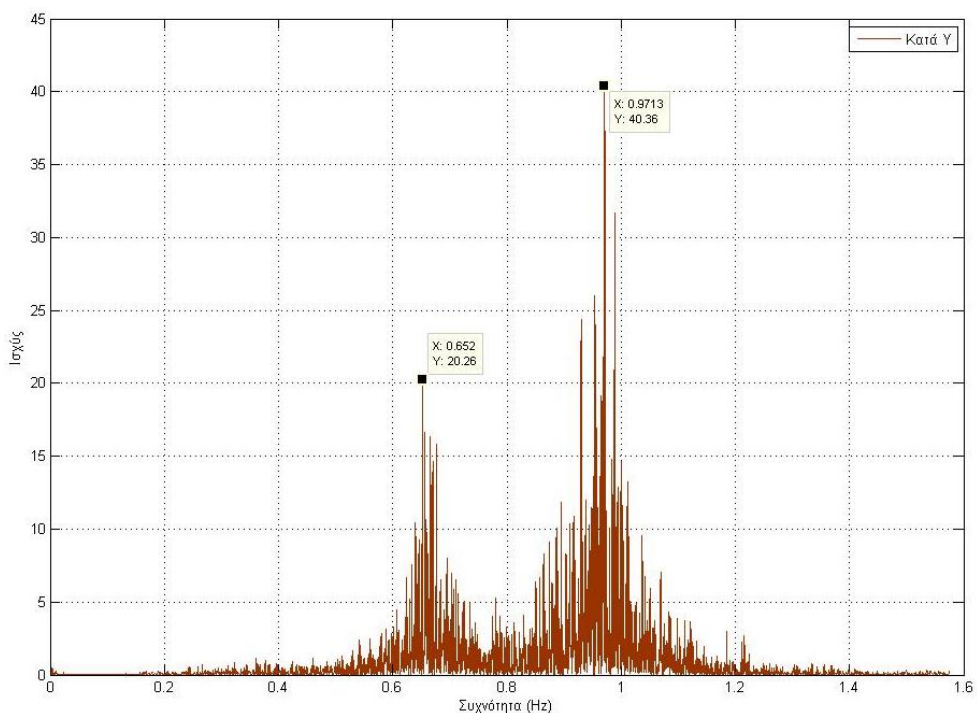
Παρακάτω παρουσιάζονται και αναλύονται τα διαγράμματα των συχνοτήτων, όπως προέκυψαν για τα τρία συστήματα μετά την επεξεργασία των δεδομένων τους, για το β' κοινό διάστημα μετρήσεων, από 14:49:29 έως 15:08:13. Σημειώνεται ότι επειδή μελετάται η επίδραση του ανέμου, αναμένεται ότι οι κύριες συχνότητες ταλάντωσης αναμένονται να είναι μικρότερες του 1Hz.

■ Υπολογισμός / παρουσίαση συχνοτήτων NIVEL

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 7.29, η κύρια συχνότητα ταλάντωσης της καμινάδας, κατά τον άξονα X, όπως υπολογίστηκε από τις μετρήσεις του NIVEL, προκύπτει 0.67 Hz. Κυρίαρχη εμφανίζεται και μια δεύτερη συχνότητα, στα 0.99Hz, φανερώνοντας 2 αρμονικές κινήσεις με περίοδο T ίση με 1.5sec και 1sec αντίστοιχα.



Σχήμα 7.29: Κύριες συχνότητες ταλάντωσης καμινάδας κατά τον άξονα X από NIVEL



Σχήμα 7.30: Κύριες συχνότητες ταλάντωσης καμινάδας κατά τον άξονα Y από NIVEL

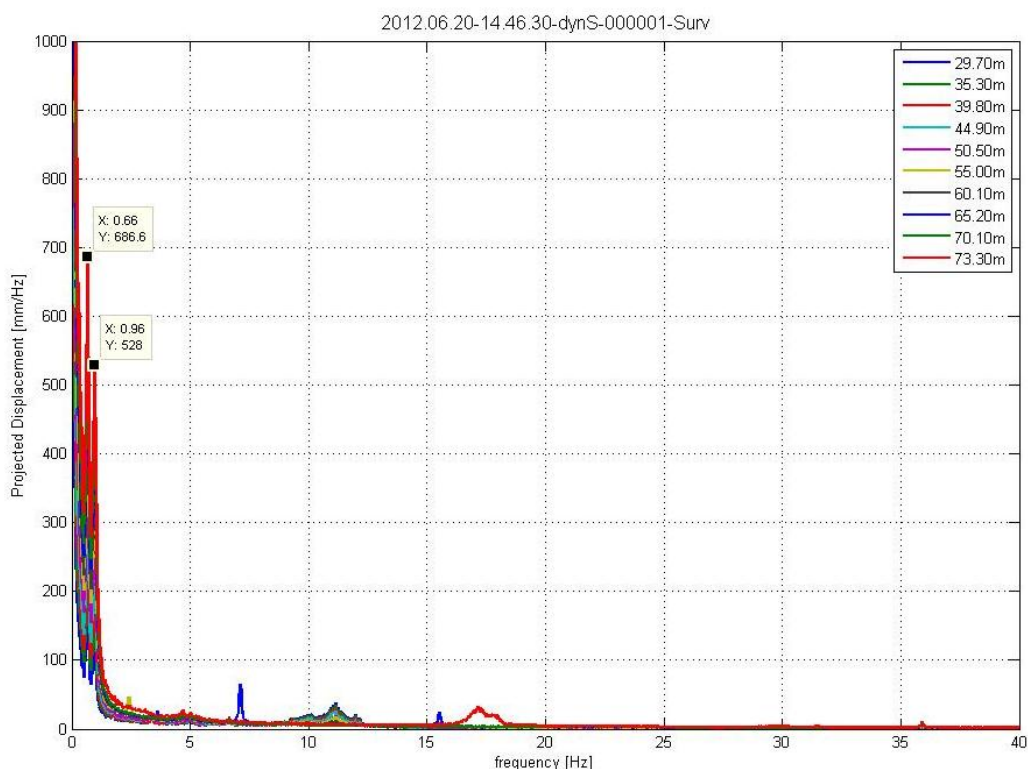
Αντίστοιχα, όπως φαίνεται από το Σχήμα 7.30, η κύρια συχνότητα ταλάντωσης της καμινάδας, κατά τον άξονα Υ, όπως υπολογίστηκε από τις μετρήσεις του NIVEL, προκύπτει 0.97 Hz (περιοδική κίνηση με περίοδο $T=1\text{sec}$). Και εδώ εμφανίζεται μια δεύτερη συχνότητα, στα 0.65Hz ($T=1.5\text{sec}$), φανερώνοντας την ύπαρξη 2 αρμονικών κινήσεων με περίοδο T ίση με 1sec και 1.5sec αντίστοιχα.

Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν και με την ανάλυση των χρονοσειρών των μετακινήσεων του NIVEL.

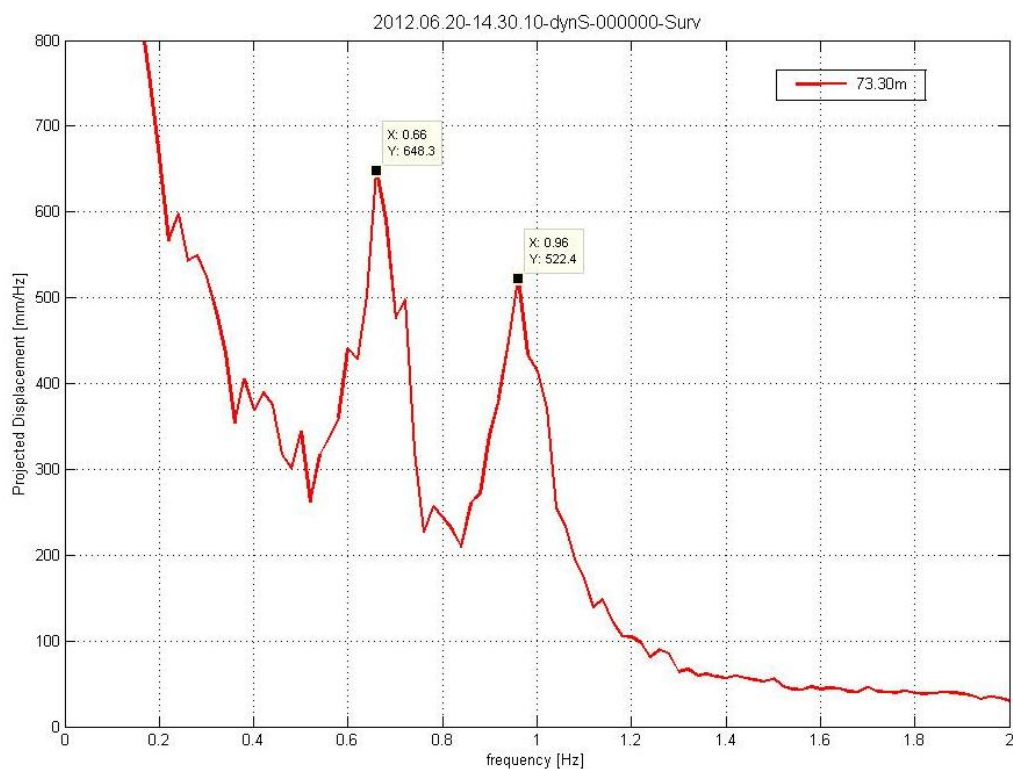
■ Υπολογισμός / παρουσίαση συχνοτήτων IBIS

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα των ανηγμένων μετακινήσεων από το IBIS στο πεδίο των συχνοτήτων, όπως προέκυψε από το πρόγραμμα επεξεργασίας IBIS-DV.

Από το διάγραμμα του Σχήματος 7.31 παρατηρείται η εμφάνιση 2 κύριων συχνοτήτων και μια έξαρση στην περιοχή των 10Hz. Οι 2 κύριες συχνότητες εμφανίζονται καλύτερα στο Σχήμα 7.32, από το οποίο προκύπτει ότι η κύρια συχνότητα ταλάντωσης της καμινάδας είναι στα 0.66Hz ($T=1.5\text{sec}$), ενώ εμφανίζεται και μια δεύτερη κύρια συχνότητα στα 0.96Hz ($T=1\text{sec}$).

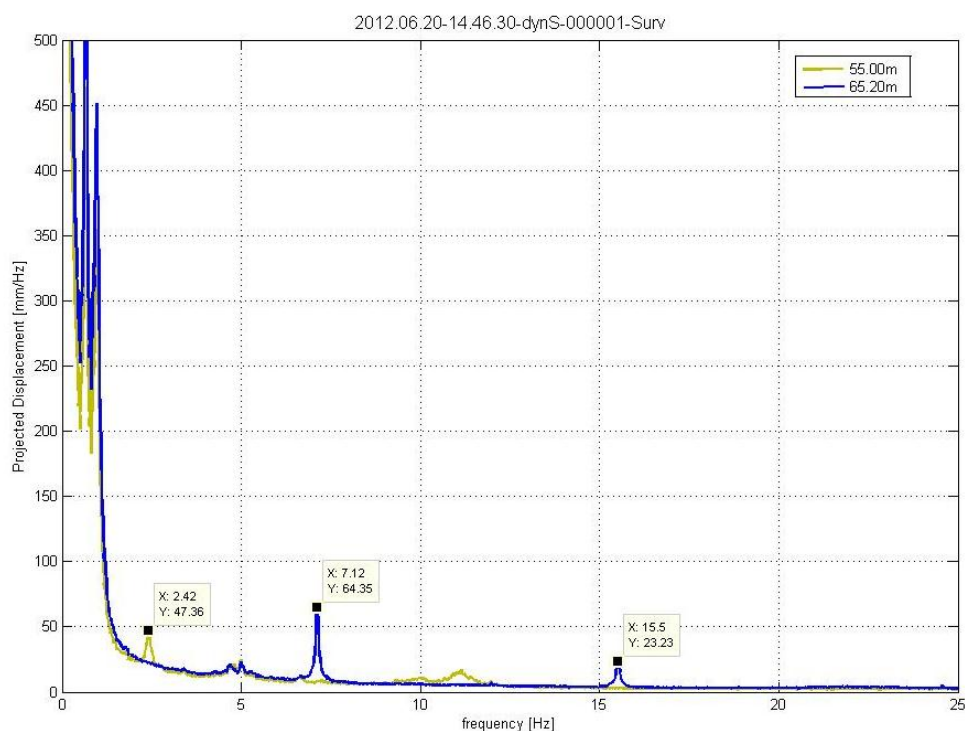


Σχήμα 7.31: Διάγραμμα συχνοτήτων για το σύστημα IBIS



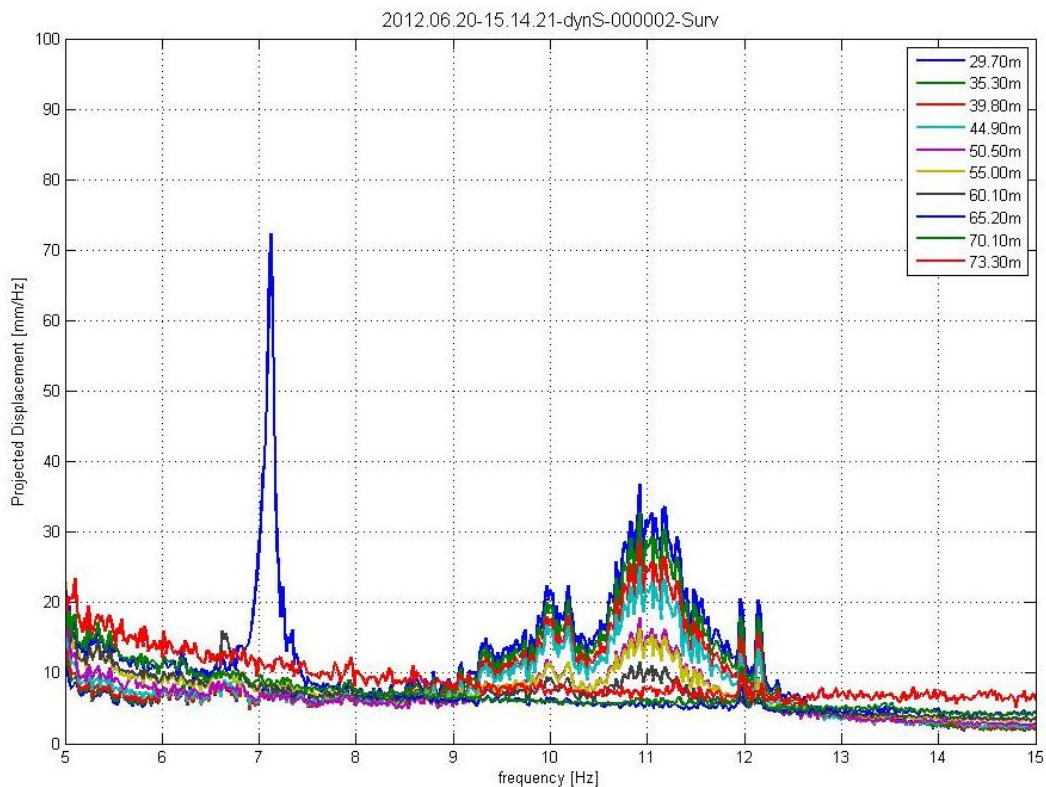
Σχήμα 7.32: Κύριες συχνότητες ταλάντωσης κατασκευής από το σύστημα IBIS

Στο Σχήμα 7.33 εμφανίζονται οι τρεις δευτερεύουσες συχνότητες ταλάντωσης της κατασκευής, στα 2.42 Hz, στα 7.12 Hz και στα 15.5 Hz, όπως προέκυψαν από τις καταγραφές του IBIS.



Σχήμα 7.33: Δευτερεύουσες συχνότητες ταλάντωσης κατασκευής

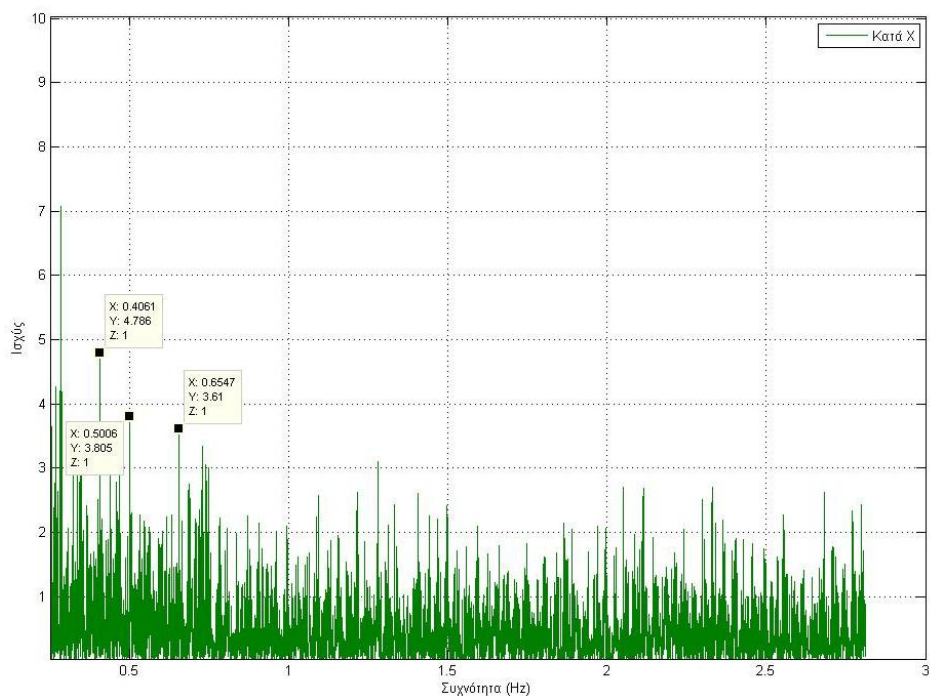
Στο Σχήμα 7.34 παρουσιάζεται η έξαρση που εμφανίζεται στο διάγραμμα του Σχήματος 7.31 και η οποία οφείλεται στην ταλάντωση του ίδιου του συστήματος τρίποδας-αισθητήρας IBIS. Όπως παρατηρείται, η ταλάντωση εντοπίζεται στην περιοχή 9-12Hz (Luzi et al., 2012).



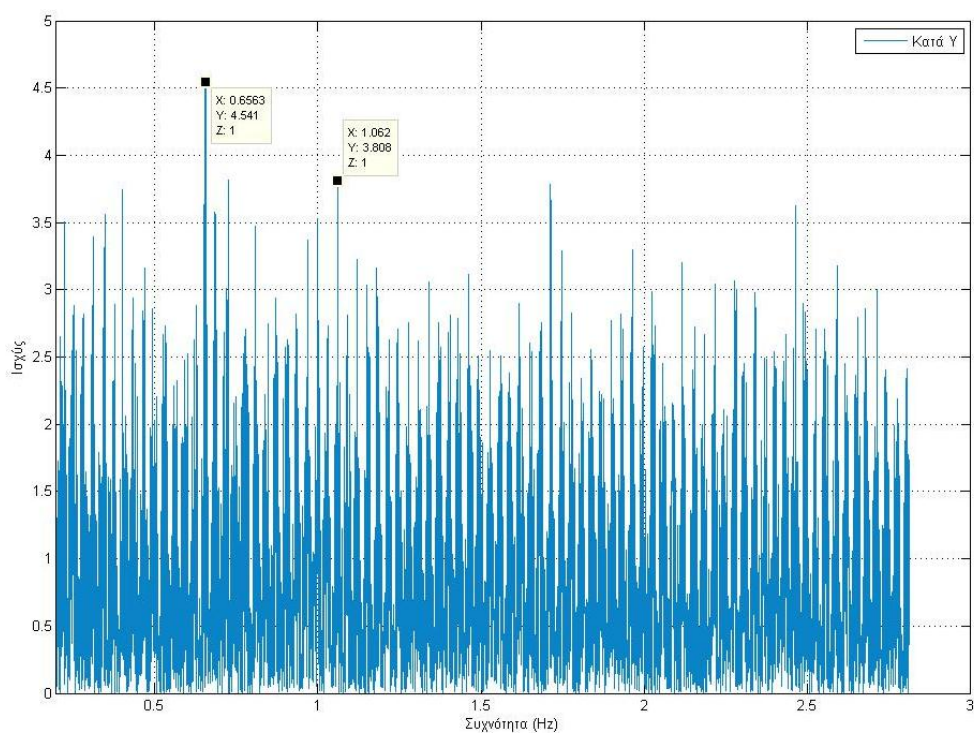
Σχήμα 7.34: Αποτέλεσμα ταλάντωσης του συστήματος IBIS στη ζώνη των συχνοτήτων

■ Υπολογισμός / παρουσίαση συχνοτήτων RTS

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα των συχνοτήτων, όπως προέκυψαν από τις παρατηρήσεις του RTS με εφαρμογή του μετασχηματισμού Lomb. Στα διαγράμματα αυτά εμφανίζεται και το επίπεδο σημαντικότητας, όπως υπολογίστηκε από τον αλγόριθμο του μετασχηματισμού.



Σχήμα 7.35: Κύριες συχνότητες ταλάντωσης καμινάδας κατά τον άξονα X από RTS



Σχήμα 7.36: Κύριες συχνότητες ταλάντωσης καμινάδας κατά τον άξονα Y από RTS

Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα των Σχημάτων 7.35 και 7.36 και επισημάνθηκε και στην ανάλυση των χρονοσειρών, οι μετρήσεις είναι νοθευμένες με θόρυβο, με αποτέλεσμα να μην αναδεικνύεται ξεκάθαρα κυρίαρχη συχνότητα. Στον άξονα X η συχνότητα που φαίνεται να κυριαρχεί είναι στα 0.4Hz ($T=2.5\text{sec}$), ενώ ξεχωρίζουν μια συχνότητα στα 0.5Hz ($T=2\text{sec}$) και μια στα 0.65Hz ($T=1.5\text{sec}$). Στον άξονα Y ξεχωρίζει μια συχνότητα στα 0.66Hz ($T=1.5\text{sec}$) και μια δεύτερη στα 1.1Hz ($T=0.9\text{sec}$) περίπου.

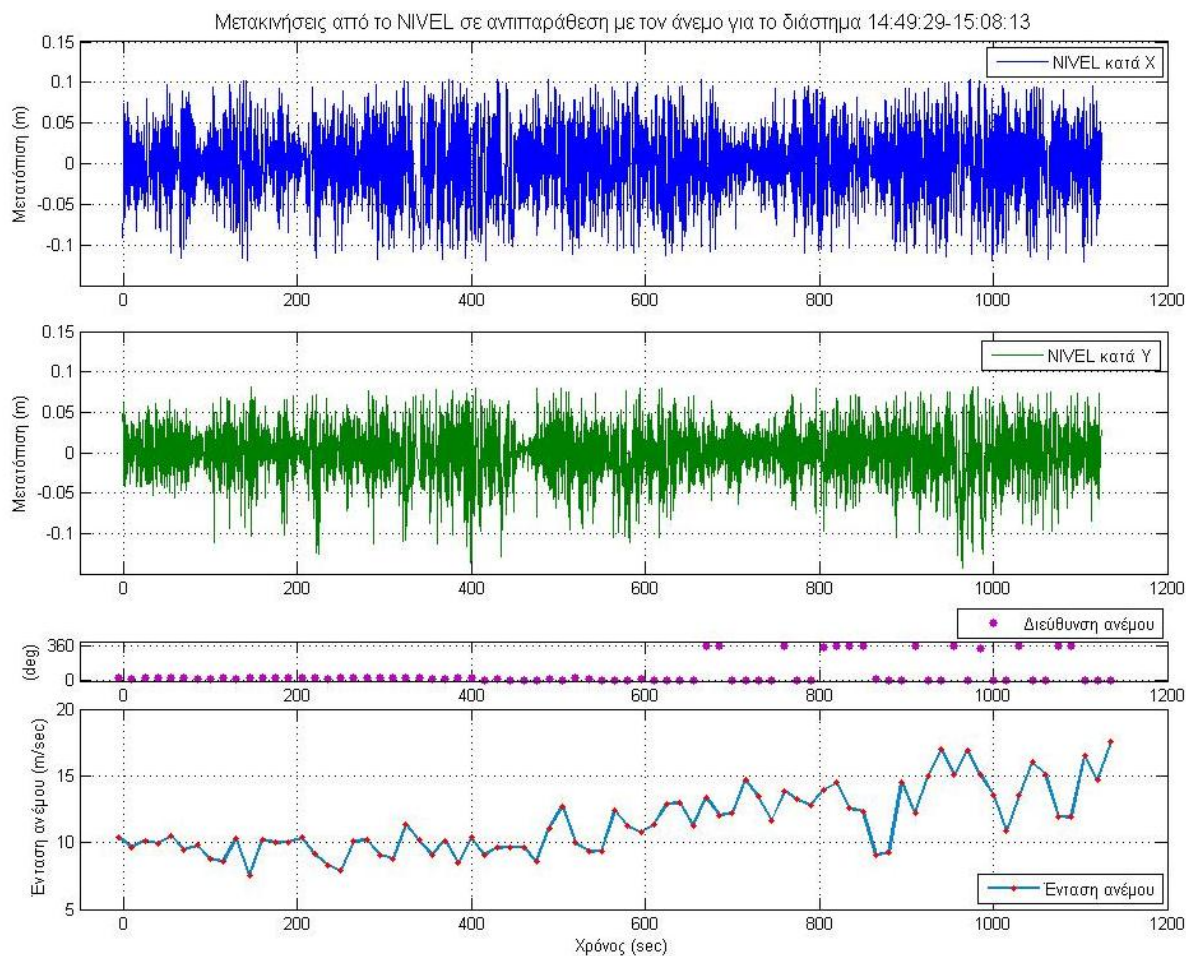
■ Συγκριτική αξιολόγηση

Όσον αφορά το πεδίο των συχνοτήτων, η συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων μπορεί να συνοψιστεί στα εξής:

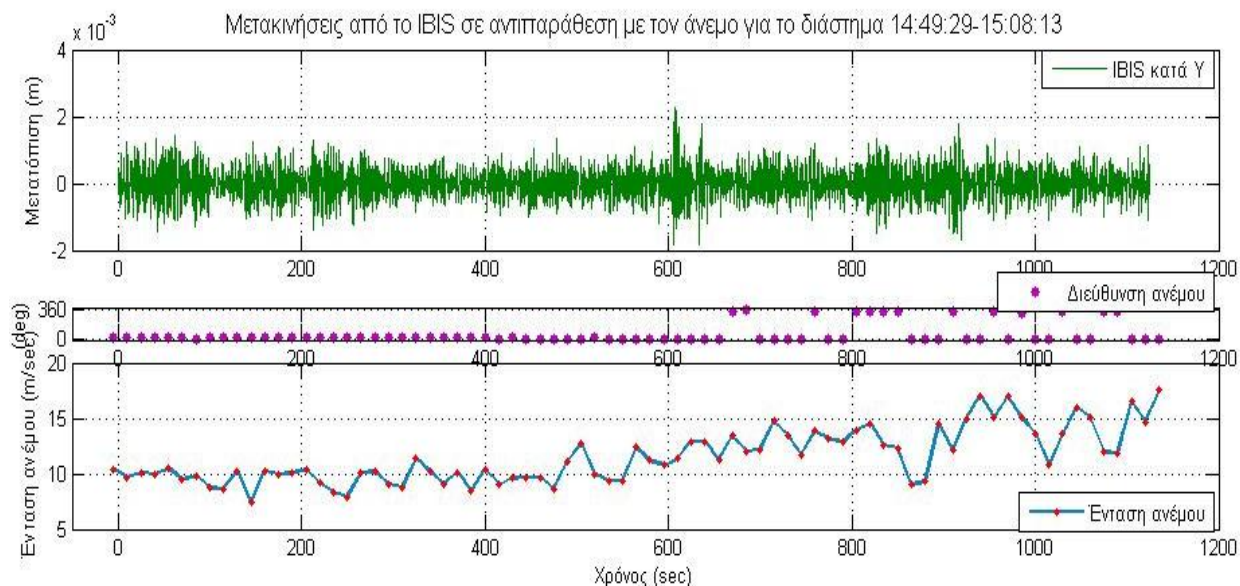
- Και από τα τρία συστήματα αναδεικνύονται 2 κυρίαρχες συχνότητες.
- Όσον αφορά τον άξονα Υ, οι συχνότητες, που προέκυψαν από τα IBIS (0.66Hz και 0.96Hz) και RTS (0.65Hz και 1.1Hz), αποκαλύπτουν την σύνθετη περιοδική κίνηση της καμινάδας με κύρια περίοδο $T=1.5\text{sec}$ και δευτερεύουσα $T=1\text{sec}$. Αξιοπρόσεκτο είναι το γεγονός ότι σύνθετη αυτή κίνηση καταγράφηκε και από το NIVEL, αλλά για τον εγκάρσιο άξονα Χ.

7.2.4 Συσχέτιση με μετεωρολογικά δεδομένα

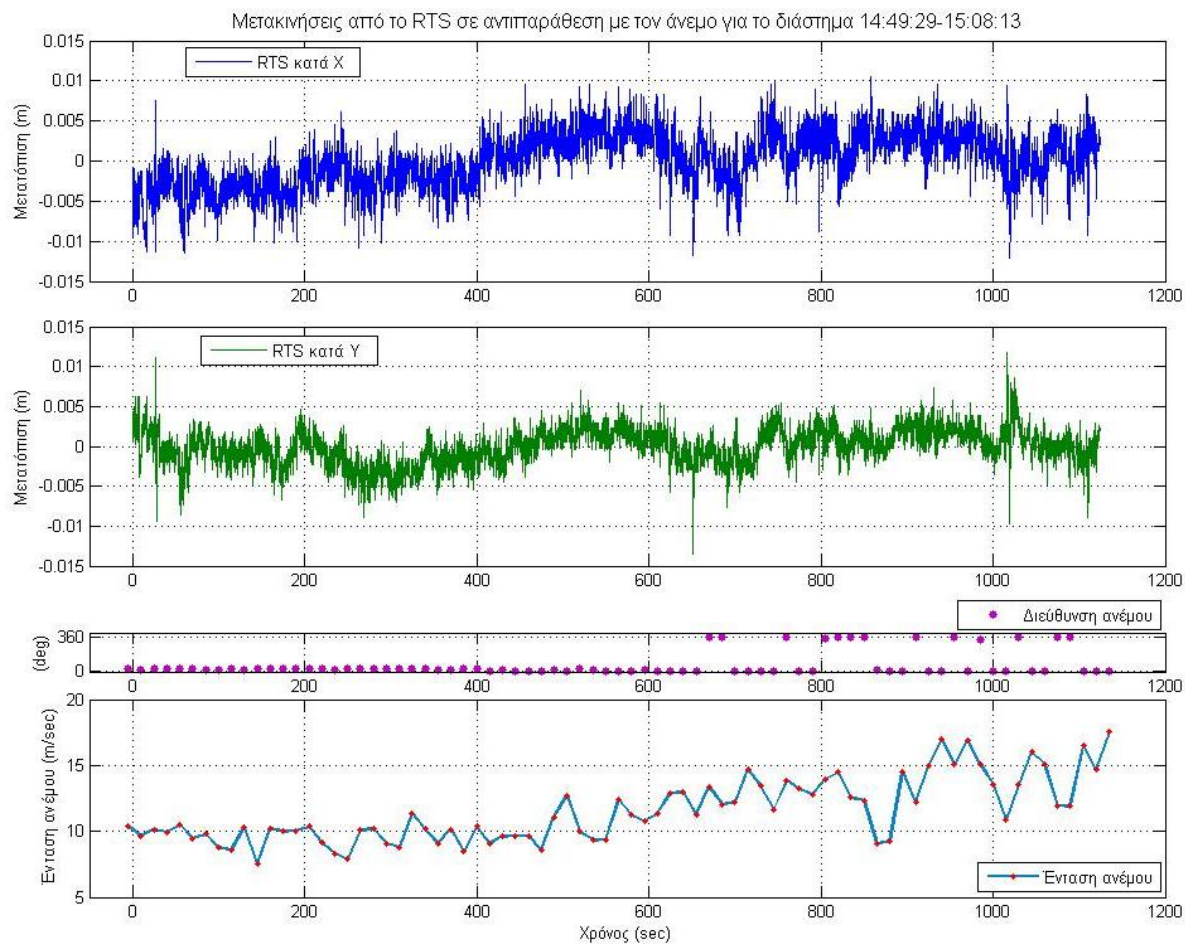
Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα των μετακινήσεων, όπως προέκυψαν από τα τρία συστήματα μέτρησης, σε αντιπαράθεση με την ένταση και τη διεύθυνση του ανέμου, στο β' διάστημα κοινών μετρήσεων, από 14:49:29-15:08:13. Σημειώνεται ότι, επειδή ο μετεωρολογικός σταθμός, από τον οποίο προέκυψαν τα ανεμολογικά στοιχεία, βρίσκεται σε απόσταση περίπου 2.2km από την περιοχή μελέτης, τα ανεμολογικά δεδομένα παρουσιάζονται μόνο ενδεικτικά, καθώς δεν αναμένεται συσχέτιση μεταξύ της συμπεριφοράς (και κυρίως της έντασης) του ανέμου και της κατασκευής.



Σχήμα 7.37: Διαγράμματα μετακινήσεων κατά τους άξονες X και Y από το NIVEL και διαγράμματα έντασης και διεύθυνσης ανέμου για στο χρονικό διάστημα 14:49:29-15:08:13



Σχήμα 7.38: Διάγραμμα μετακινήσεων κατά τον άξονα Y από το IBIS και διαγράμματα έντασης και διεύθυνσης ανέμου στο χρονικό διάστημα 14:49:29-15:08:13



Σχήμα 7.39: Διαγράμματα μετακινήσεων κατά τους άξονες X και Y από το RTS και διαγράμματα έντασης και διεύθυνσης ανέμου στο χρονικό διάστημα 14:49:29-15:08:13

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

Συμπεράσματα

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την διαδικασία των μετρήσεων, καθώς και από την επεξεργασία και ανάλυσή τους. Τα συμπεράσματα αφορούν αφενός στις μεθόδους καταγραφής και αφετέρου στη συμπεριφορά της κατασκευής. Τέλος, με βάση τα συμπεράσματα που προκύπτουν, αναφέρονται κάποιες προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση.

8.1 Αναφορικά με τις μεθόδους καταγραφής

Όσον αφορά τις μεθόδους καταγραφής που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, αναφέρονται οι εξής γενικές παρατηρήσεις:

- Οι συχνότητες δειγματοληψίας των τριών συστημάτων είναι κατάλληλες για την επαρκή καταγραφή της ταλάντωσης της κατασκευής υπό την επίδραση του ανέμου.
- Όσον αφορά τον συγχρονισμό των δεδομένων, παρόλο που έγινε μια προσπάθεια ταύτισης των χρονομέτρων των φορητών υπολογιστών των τριών συστημάτων, κρίνεται βέλτιστο οι μετρήσεις να ανάγονται σε χρόνο δορυφορικού συστήματος εντοπισμού (υψηλή ακρίβεια χρονομέτρων).

Ψηφιακό κλισίμετρο NIVEL

Όσον αφορά το ψηφιακό κλισίμετρο NIVEL τα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν είναι:

- Είναι αισθητήρας πολύ υψηλής ακριβείας, με υψηλή ανάλυση, κατάλληλος για χαμηλής δυναμικής φαινόμενα.
- Παρόλο που χρησιμοποιείται με επιτυχία για τον υπολογισμό συχνοτήτων ταλάντωσης, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί, αυτόνομα τουλάχιστον, για τον υπολογισμό παραμέτρων όπως το εύρος ταλάντωσης.
- Στις περιπτώσεις που το σημείο μελέτης-τοποθέτησης δεν είναι εύκολα προσβάσιμο, το σύστημα παρουσιάζει το μειονέκτημα της τροφοδοσίας. Αυτό έγινε φανερό και στην παρούσα εργασία. Παρόλο που είχε εγκατασταθεί σύστημα τροφοδοσίας μέσω φωτοβολταϊκού πίνακα, δεν

κατέσπει δυνατή η καταγραφή μετρήσεων κατά την πρώτη επίσκεψη, στις 10-04-2012, λόγω έλλειψης ηλιοφάνειας.

- Δεν μπορούν να υπολογιστούν παραμορφώσεις κατά τον κατακόρυφο άξονα.
- Αποτελεί μια σχετικά οικονομική λύση, σε περιπτώσεις παρακολούθησης κατασκευών σε πραγματικό χρόνο, όταν το ζητούμενο είναι π.χ. η διατήρηση της παραμόρφωσης εντός συγκεκριμένων ορίων ασφαλείας.
- Ενώ, γενικά, το σύστημα χρησιμοποιείται επιτυχώς για τον υπολογισμό των κύριων συχνοτήτων ταλάντωσης, στην παρούσα εργασία παρατηρείται μια διαφοροποίηση όσον αφορά τα μεγέθη των κύριων συχνοτήτων ανά άξονα, σε σχέση με τα άλλα 2 συστήματα μέτρησης.

Radar μικροκυματικής συμβολομετρίας IBIS-S

Όσον αφορά το σύστημα IBIS-S τα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν είναι τα εξής:

- Συνδυάζει υψηλή ακρίβεια, υψηλή χωρική ανάλυση και υψηλές συχνότητες καταγραφής.
- Το σύστημα, μετά από μελετημένη τοποθέτηση, παρακολουθεί με επιτυχία την κινηματική συμπεριφορά της κατασκευής.
- Σε αντίθεση με τα συστήματα NIVEL και RTS, το IBIS μπορεί να παρακολουθεί συγχρόνως όλη (ή το μεγαλύτερο μέρος) της κατασκευής, αλλά μόνο κατά τη μία διάσταση.
- Κατά τη συλλογή δεδομένων με το σύστημα IBIS, παρατηρήθηκε το φαινόμενο καθυστέρησης (ολίσθησης) του χρονομέτρου του Η/Υ του συστήματος.
- Παρόλο το υψηλό κόστος, δεν απαιτεί προσβασιμότητα, καταγράφει δεδομένα ανεξαρτήτως καιρικών συνθηκών και ώρας, καθιστώντας το ένα αξιόπιστο σύστημα για τη παρακολούθηση φαινομένων, τόσο χαμηλής όσο και υψηλής δυναμικής.

Ρομποτικός γεωδαιτικός σταθμός TCA1800

Όσον αφορά το σύστημα του RTS τα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν είναι τα εξής:

- Το σύστημα έχει χρησιμοποιηθεί επιτυχώς στην παρακολούθηση αντίστοιχων κατασκευών υπό την επίδραση του ανέμου (Μαριτσούδης,

2008), (Μαριτσούδης, 2008). Στη συγκεκριμένη περίπτωση, οι μετρήσεις που κατέγραψε το σύστημα ήταν νοθευμένες με θόρυβο, παρόλο που τα ποσοστά των χονδροειδών σφαλμάτων ήταν μικρά.

- Είναι το μόνο σύστημα από τα τρία, που έχει τη δυνατότητα καταγραφής των παραμορφώσεων της κατασκευής κατά τους τρεις άξονες.
- Η διαφορά στη τάξη μεγέθους του εύρους ταλάντωσης που προέκυψε από τα συστήματα RTS και IBIS (περίπου $\pm 5\text{mm}$ και $\pm 0.5\text{mm}$ αντίστοιχα), αποδίδεται στο μέγεθος της αβεβαιότητας των μετρήσεων του RTS κατά τον κινηματικό εντοπισμό με τη μέθοδο RTRK ($\pm 10\text{mm}$), έναντι του αντίστοιχου μεγέθους των μετρήσεων IBIS ($\pm 0.25\text{mm}$).
- Απαιτείται προσβασιμότητα στο σημείο μελέτης για την εγκατάσταση του στόχου.
- Η εφαρμογή της μεθόδου δεν είναι δαπανηρή και συνιστά μια αξιόπιστη εναλλακτική άλλων δαπανηρών συστημάτων, έχοντας υπόψη τα επιθυμητά μεγέθη ακρίβειας.

8.2 Αναφορικά με την κατασκευή

Όσον αφορά τα κινηματικά χαρακτηριστικά της κατασκευής, το γενικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι εμφανίζουν περιοδικό χαρακτήρα. Τα χαρακτηριστικά αυτά, όπως υπολογίστηκαν από τις καταγραφές των τριών συστημάτων, μπορούν να συνοψιστούν στους παρακάτω πίνακες (οι παραμορφώσεις που παρατίθενται για το NIVEL έχουν φαινόμενες τιμές):

	Κύριες συχνότητες (Hz)				Περίοδος (sec)			
	X		Y		X		Y	
	1	2	1	2	1	2	1	2
NIVEL	0.67	0.99	0.97	0.65	1.5	1	1	1.5
IBIS	-	-	0.66	0.96	-	-	1.5	1
RTS	0.40	0.65	0.65	1.06	2.5	1.5	1.5	1

Πίνακας 8.1: Συγκεντρωτικός πίνακας συχνοτήτων καμινάδας από τα τρία συστήματα καταγραφής

	Εύρος ταλάντωσης (mm)			Μετακίνηση (mm)	
	X	Y	H	X	Y
NIVEL (φαινόμενες)	±100	+80 έως -150	-	±60-70	±50
IBIS	-	±0.5 (max. ±2-2.5)	-	-	±1.8
RTS	±10	±5 (max. ±14)	+15 έως -20	±6-7	±5

Πίνακας 8.2: Συγκεντρωτικός πίνακας μεγεθών παραμόρφωσης καμινάδας από τα τρία συστήματα καταγραφής

Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 8.1, η κίνηση της καμινάδας περιγράφεται ως σύνθεση δυο αρμονικών με περιόδους 1.5sec και 1sec κατά τον άξονα Y. Αναντιστοιχία με τα άλλα δυο συστήματα παρουσιάζουν οι συχνότητες ταλάντωσης από το NIVEL, που παρουσιάζουν τα αντίστοιχα μεγέθη κατά τον άξονα X. Σε αντίστοιχες με την παρούσα μελέτες (Μαριτσούδης, 2008), (Ανδρουλάκη, 2011), συνήθως προκύπτει μία κύρια συχνότητα. Η παρουσία δύο κύριων συχνοτήτων θα μπορούσε να αποδοθεί στην πιθανή λειτουργία μηχανημάτων την ημέρα των μετρήσεων, που επηρεάζουν την ταλάντωση της καμινάδας.

Όσον αφορά το μέγεθος της παραμόρφωσης, όπως παρατηρείται από τον Πίνακα 8.2, η διαφορά στην τάξη μεγέθους των παραμορφώσεων μεταξύ των συστημάτων IBIS και RTS αποδίδεται κατά κύριο λόγο στη διαφορά της αβεβαιότητας των παρατηρήσεων των 2 συστημάτων, καθώς και στο διαφορετικό ύψος παρατήρησης.

Όσον αφορά τη μορφή της κίνησης της καμινάδας, όπως αυτή καταγράφηκε από τους αισθητήρες NIVEL και RTS και αποδίδεται στα αντίστοιχα διαγράμματα οριζοντιογραφίας, είναι παρόμοια. Οι κύριοι ημιάξονες των ελλείψεων που σχηματίζονται από τις παρατηρήσεις του κάθε αισθητήρα είναι σχεδόν παράλληλοι μεταξύ τους και εγκάρσιοι στο διάνυσμα της διεύθυνσης του ανέμου. Από την ανάλυση, επίσης, των παρατηρήσεων του NIVEL και του IBIS προκύπτει ότι η παραμόρφωση της καμινάδας είναι εντονότερη κατά τη διεύθυνση -Y, δηλαδή η καμινάδα γέρνει προς το βουνό, βόρεια. Τέλος, και με βάση το διάγραμμα των μετακινήσεων καθ' ύψος, όπως διαμορφώθηκε από τις παρατηρήσεις του IBIS, προκύπτει ότι η καμινάδα παρουσιάζει μια ομαλή παραμόρφωση καθ' ύψος, ως προς τις μέγιστες (max) και ελάχιστες (min) τιμές παραμόρφωσης.

Όσον αφορά τη συσχέτιση του ανέμου με την κίνηση της κατασκευής, δεν μπορούν να προκύψουν συμπεράσματα όσον αφορά την επίδραση της έντασης του ανέμου, καθώς τα μετεωρολογικά δεδομένα έχουν προκύψει από σταθμό περίπου 2km μακριά από την περιοχή μελέτης. Μπορεί όμως να προκύψει κάποια συσχέτιση της κίνησης της καμινάδας με τη διεύθυνση του ανέμου. Όπως προέκυψε από την ανάλυση, η κύρια διεύθυνση κίνησης της καμινάδας είναι κατά τον άξονα Υ, εγκάρσια της διεύθυνσης του ανέμου. Η συμπεριφορά αυτή είναι αναμενόμενη και συνάδει με το φαινόμενο της περιδίνησης, δηλαδή τη δημιουργία δινών πίσω από τον κύλινδρο της καμινάδας με αποτέλεσμα εγκάρσιες στη διεύθυνση του ανέμου ταλαντώσεις (βλ. Σχήμα 1.3). Όσον αφορά τις διακυμάνσεις της τυρβώδους ροής, αυτές προκαλούν αποκρίσεις τόσο ομοαξονικά όσο και εγκάρσια της διεύθυνσης του ανέμου.

8.3 Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση

Παρακάτω παρατίθενται κάποιες προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση που απορρέουν από τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας.

- Συλλογή μετεωρολογικών δεδομένων με τους κατάλληλους αισθητήρες από την περιοχή μελέτης, ώστε να είναι δυνατή η συσχέτιση με την κινηματική συμπεριφορά της κατασκευής.
- Καταγραφή της δυναμικής συμπεριφοράς της καμινάδας υπό παρόμοιες συνθήκες έντασης και διεύθυνσης ανέμου με εναλλακτικές μεθόδους, ώστε να επιβεβαιωθούν τα αποτελέσματα.
- Η περαιτέρω διερεύνηση της μετατροπής των γωνιακών μεγεθών που προκύπτουν από το NIVEL σε μεγέθη παραμόρφωσης, ώστε να καταστεί το σύστημα αυτόνομο.
- Συγχρονισμός των παρατηρήσεων με χρήση της τεχνολογίας δορυφορικού εντοπισμού (σύστημα GNSS).

Βιβλιογραφία

Ξένα Βιβλιογραφία

Coppi F., Gentile C. and Ricci P.P., A Software Tool for Processing the Displacement Time Series Extracted from Raw Radar Data, *The 9th Intentional Conference on Vibration Measurements by Laser and Noncontact Techniques and Short Course*, ed. Tomasini E.P., American Institute of Physics, 2010.

Davenport A.G., How can we simplify and generalize wind loads?, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic*, ed. B.V. Elsevier Science, 1995, Vol. 54/55, pp. 657-669.

Erol Bihter, Evaluation of High-Precision Sensors in Structural Monitoring, Geomatics Engineering Department, Civil Engineering Faculty; Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey, *Sensors*, 2010.

Gehring Jim, Gravity Inclinerometers, *THE TOOL SHED, A Journal of Tool Collecting published by CRAFTS of New Jersey*, 2002, <http://www.craftsofnj.org>

Gikas V. and Daskalakis S., Comparative Testing and Analysis of RTS versus GPS for Structural Monitoring Using Calibration Measurements upon Sinusoidal Excitation, *13th FIG Symposium on Deformation Measurement and Analysis, 4th IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering*, Lisbon, 2008.

Gikas V., Three-Dimensional Laser Scanning for Geometry Documentation and Construction Management of Highway Tunnels during Excavation, *Sensors*, 2012, Vol. 12, pp. 11249–11270.

Hedgecock Richard, History of the Inclinerometer, 2009, <http://ezinearticles.com>.

Holmes John D., Wind Loading of Structures, London, Spon Press, 2001. - This edition published in the Taylor & Francis e-Library, 2004.

IBIS-S Controller Software User Manual, IDS, Ingegneria Dei Sistemi S.p.A., 2009, v 02.01.005.

IMoSS Corporation, Project Case: Buildings and Monuments Monitoring Rome (IT), www.imoss.com, 2008.

Inaudi D. and Walder R., Integrated Structural Health Monitoring Systems for Buildings, 2009.

Irwin P.A. and Baker W.F., The Burj Dubai Tower Wind Engineering, *Structure Magazine*, 2006, pp. 28-31.

Leica TPS-1000 User Manual, v. 2.2

Luzi Guido, Monserrat Oriol and Crosetto Michele, The Potential of Coherent Radar to Support the Monitoring of the Health State of Buildings, *Research in Nondestructive Evaluation*, 2012, Vol. 23:3, pp. 125-145.

Marambio A, Pucci B. et al., TERRESTRIAL LASER SCANNER, TERRESTRIAL SYNTHETIC APERTURE RADAR, AND TOPOGRAPHIC DATA: AN INTEGRATION PROPOSAL, *8th International Geomatics Week*, Barcelona, 2009.

Mendis P., Ngo T. et al., Wind Loading on Tall Buildings, *EJSE International, EJSE Special Issue: Loading on Structures*, 2007.

NIVEL200 User Manual, 2006.

Pagiatakis S., D., Stochastic significance of peaks in the least-squares spectrum, *Journal of Geodesy*, 1999, Vol. 73, pp. 67-78.

Pytharouli Stella, Kontogianni V. et al., Spectral Analysis Techniques in Deformation Analysis Studies, *INGEO 2004 and FIG Regional Central and Eastern European Conference on Engineering Surveying*, Bratislava, Slovakia, 2004.

Pytharouli Stella and Stiros Stathis, Spectral analysis of unevenly spaced or discontinuous data using the "normperiod" code, Geodesy Laboratory, Department of Civil Engineering ; University of Patras, Greece, *Computers and Structures* 86 (2008), ScienceDirect, 2007, pp. 190-196.

Rödelsperger Sabine, Läufer G. et al., Monitoring of displacements with ground-based microwave interferometry: IBIS-S and IBIS-L, *Journal of Applied Geodesy*, 2010, Vol. 4, pp. 41-54.

Smith Steven W., The Scientist and Engineer's Guide to Digital Data Processing , San Diego, CA,,California Technical Publishing, 1999, Second Edition, DSPguide.com.

Speed Vicki, 24/7 Structural Monitoring, *The American Surveyor*, Cheves Media, October 2007, www.Amerisurv.com.

Yigit C.O., Li X. et al., Analysis Of Wind-Induced Response Of Tall Reinforced Concrete Building, *FIG Congress: Facing the Challenges – Building the Capacity*, Sydney, Australia, 2010.

Ελληνική Βιβλιογραφία

Ανδρουλάκη Α., Τεχνολογία Επίγειου Radar Συνθετικού Ανοίγματος - Εφαρμογή στη μέτρηση ταλαντώσεων υψηλών κατασκευών, Μεταπτυχιακή Εργασία, Δ.Π.Μ.Σ.: "Γεωπληροφορική"; Ε.Μ.Π., 2011.

Αργυριάδης Χ. και Μπονοτάκη Ε., ΕΝΤΑΞΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΣΤΟ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ: ΑΝΑΔΡΟΜΗ – ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ, *EnergyTec 2006, 1η ΔΙΕΘΝΗΣ ΕΚΘΕΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ- ΠΗΓΕΣ, ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ, ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ*, Αθήνα, 2006.

Αστρεινίδης Ε. και Εγγλέζος Δ., Ενόργανη Παρακολούθηση Παραμορφώσεων του Τείχους της Ακρόπολης με Αισθητήρες Οπτικών Ινών – Σύγκριση Μετρήσεων και Αναλυτικών Προβλέψεων, *3ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας*, 2008, Άρθρο 1891

Δασκαλάκης Σ. και Γκίκας, Β., Παρακολούθηση και Ανάλυση Δυναμικής Συμπεριφοράς Μεταλλικών Κατασκευών με Χρήση Γεωδαιτικής Μεθοδολογίας, 2008

Καραλάκης Ν. και Πολυχρονάκης Μ., Αισθητήρες Οπτικών Ινών, Τμήμα Φυσικής; Πανεπιστήμιο Κρήτης, Ηράκλειο, 2011

Κωτσιδης Ηλίας Α., Χρήση αισθητήρων οπτικών ινών για την μέτρηση παραμορφώσεων σε σύνθετα υλικά και συνδέσμους με κολλητικά μέσα [Report] : Μεταπτυχιακή Εργασία, Δ.Π.Μ.Σ.: "ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"; Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2012.

Μαριτσούδης Δ., Παρακολούθηση δυναμικής συμπεριφοράς της υψηλής καπνοδόχου του ΑΗΣ Λαυρίου της ΔΕΗ Α.Ε., Διπλωματική Εργασία, Σ.Α.Τ.Μ., Τομέας Τοπογραφίας; Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2008.

Μπακογιάννης Ν.Ι., Μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς ανεμογεννητριών (Α/Γ) μέσω της συνδυασμένης καταγραφής και επεξεργασίας δεδομένων από Ρομποτικό Γεωδαιτικό Σταθμό, 3D Επίγειο Σαρωτή Laser και Σύστημα Βιντεομετρίας, Διπλωματική Εργασία, Σ.Α.Τ.Μ., Τομέας Τοπογραφίας; Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2010.

Νησωτάκης Γ., Διερεύνηση λειτουργίας του Γεωδαιτικού Σταθμού Leica TCA-1800 για την παρακολούθηση κατασκευών σε συνήκες ταλάντωσης με χρήση σεισμικής τράπεζας ακριβείας και μεθόδων φασματικής ανάλυσης, Διπλωματική Εργασία, Σ.Α.Τ.Μ., Τομέας Τοπογραφίας; Ε.Μ.Π., Αθήνα,, 2008.

Σκόδρας, Α. και Αναστασόπουλος, Β., Ψηφιακή Επεξεργασία Σήματος και Εικόνας, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάτρα, 2002

Σπυράκης Β., Παρακολούθηση ταλαντώσεων τεχνικών έργων με χρήση συγχρονισμένων Ρομποτικών Γεωδαιτικών Σταθμών - Εφαρμογή στην υψηλή γέφυρα του Ευρίπου, Διπλωματική Εργασία, Σ.Α.Τ.Μ., Τομέας Τοπογραφίας; Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2011.

Τριανταφυλλίδης Κων/νος, Τεχνοοικονομική Μελέτη Αιολικού Πάρκου, Τμήμα Ηλεκτρολογίας Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, ΑΤΕΙ Χαλκίδας, 2009, <http://www.scribd.com>.

Ψηφιακή Επεξεργασία Σημάτων, Electrical & Computer Engineering, Σημειώσεις Μαθήματος, University of Cyprus, 2009.

Ψιμούλης Π., Συμβολή στη διερεύνηση της δυνατότητας καταγραφής ταλαντώσεων με τα γεωδαιτικά όργανα GPS-RTS, Μεταπτυχιακή Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών; Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, 2005.

Διαδικτυακοί τόποι

English wikipedia, <http://en.wikipedia.org>.

Greek wikipedia, <http://el.wikipedia.org>.

Websters Dictionary Online, <http://www.websters-dictionary-online.org>.