

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**
Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών
ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ



**NATIONAL TECHNICAL
UNIVERSITY OF ATHENS**
School of Rural & Surveying Engineering
GEOINFORMATICS
POST-GRADUATE PROGRAMME

ΧΡΗΣΗ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΚΛΙΣΙΜΕΤΡΩΝ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΔΟΜΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ



Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Παναγιωτοπούλου Σταματία

Επιβλέπων: Γκίκας Βασίλειος,
Καθηγητής ΕΜΠ



ΧΡΗΣΗ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΚΛΙΣΙΜΕΤΡΩΝ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΔΟΜΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΝΑΓΙΩΤΟΠΟΥΛΟΥ ΣΤΑΜΑΤΙΑ

Επιβλέπων: Γκίκας Βασίλειος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή:

(Υπογραφή)

.....
Γκίκας Βασίλειος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....
Αραμπατζή Ορθοδοξία
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....
Σταθάς Δημοσθένης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2019

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία αποτελεί το τελευταίο βήμα για την ολοκλήρωση των μεταπτυχιακών μου σπουδών στο Δ.Π.Μ.Σ: “Γεωπληροφορική” του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Θα ήθελα να ευχαριστήσω κάποιους ανθρώπους που υπήρξαν αρωγοί, ο καθένας με το δικό του τρόπο, για την ολοκλήρωση τόσο της μεταπτυχιακής μου εργασίας όσο και των σπουδών μου.

Πρωτίστως, ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στον επιβλέπων Καθηγητή της εργασίας αυτής κ. Βασίλειο Γκίκα για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντας μου τη συγκεκριμένη εργασία, τις γνώσεις που μου προσέφερε και τις πολύτιμες συμβουλές του καθόλη την διάρκεια των τελευταίων μηνών.

Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στην αδερφή μου Παναγιωτοπούλου Μαριέλλα και στους γονείς μου Ιωάννη και Αικατερίνη Παναγιωτοπούλου για την πολύτιμη βοήθεια του, τη συμπαράστασή τους, την ηθική και ψυχολογική υποστήριξη σε κάθε επιλογή μου. Τέλος, ευχαριστώ τους φίλους και συγγενείς μου που με ενθάρρυναν στην προσπάθειά μου και ιδιαίτερα σε κάθε μου δυσκολία.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας είναι η χρήση ενός δικτύου ψηφιακών κλισιμέτρων υψηλής ακρίβειας για παρακολούθηση δομικής κατάστασης σε γέφυρες. Παρουσιάζεται, λοιπόν, ένα σύστημα μακροχρόνιας παρακολούθησης της ημι-στατικής και δυναμικής συμπεριφοράς της γέφυρας σε δοκούς πολλαπλών ανοιγμάτων στο κόμβο Μεταμόρφωσης της Αττικής Οδού ΑΕ.

Ειδικότερα, η μελέτη έχει ως στόχο στη συλλογή και την ανάλυση των μετρήσεων που προέκυψαν από τα ψηφιακά κλισίμετρα ακριβείας (*Nivel220 Leica Geosystems*) για τον υπολογισμό των ημι-στατικών κλίσεων (μικρο-μετατοπίσεις και μικρο-στροφές) των θέσεων παρατήρησης.

Η επεξεργασία των δεδομένων πραγματοποιείται με τη συγγραφή αλγορίθμου στη γλώσσα προγραμματισμού MATLAB για τη διαχείριση των δεδομένων. Παρουσιάζονται, λοιπόν, η συλλογή και η μεταφορά δεδομένων, η διαχείριση και η επεξεργασία και ανάλυση τους. Επιπλέον, αναφέρονται οι μέθοδοι επεξεργασίας σήματος, οι τύποι εξομάλυνσης θορύβου των δεδομένων και οι τεχνικές στατιστικής ανάλυσης που αναπτύχθηκαν.

ABSTRACT

The aim of this postgraduate thesis is the using a Network of high precision digital inclinometer for Structure Health Monitoring applied in bridges. The system for long-term monitoring presents for monitoring the quasi static and dynamic behavior of the Multi-span Beam bridge at the junction of Metamorphosis and Attiki Odos AE.

Particularly, the thesis aims are the acquisition and analysis of the tilt data from the high precision digital inclinometer (*Nivel220 Leica Geosystems*) for extracting the quasi static inclinations of the bridge.

Data processing includes the setup of programming code in MATLAB language to manipulate the data. The tiltmeter monitoring system setup including raw data transfer, manipulation, analysis and processing are presenting. Moreover, the signal processing techniques, the data filtering types and statistical tools are described.

Περιεχόμενα

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	4
Ενόργανη Παρακολούθηση Δομικών Έργων	4
1.1 Γενικά.....	4
1.2 Τι είναι Παρακολούθηση Δομικής Κατάστασης (Structural Health Monitoring – SHM)	4
1.2.1 Σχεδίαση και Υλοποίηση ενός Συστήματος ΠΔΚ	5
1.3 Μέθοδοι πειραματικής μηχανικής.....	6
1.3.1 Επιταχυνσιόμετρα	7
1.3.2 Επιμηκυνσιόμετρα.....	10
1.3.3 Ψηφιακά Κλισιόμετρα	10
1.3.4 Αισθητήρες οπτικών ινών.....	11
1.3.5 Γραμμικός Μεταβλητός Διαφορικός Μετασχηματιστής	12
1.4 Τοπογραφικές μέθοδοι	13
1.4.1 Συστήματα δορυφορικού εντοπισμού (GNSS – Global Navigation Satellite System)..	13
1.4.3 Επίγειο σύστημα radar μικροκυματικής συμβολομετρίας (GBSAR- Ground Based SAR)19	
1.4.2 Γεωδαιτικοί σταθμοί αυτόματης αναγνώρισης και παρακολούθησης στόχου (RTS- Robotic Total Station)	22
1.4.4 Επίγειοι σαρωτές Laser	24
1.4.5 Μέθοδος βασισμένη σε ψηφιακές εικόνες (image-based measurement method)	27
1.4.6 Άλλοι μέθοδοι (UAV -Drones).....	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	31
Γενική επισκόπηση γεφυρών	31
2.1 Ορισμός της γέφυρας.....	31
2.2 Κύρια τμήματα γεφυρών.....	31
2.2 Τύποι γεφυρών.....	34
2.3 Μεθοδολογίες Παρακολούθησης Γεφυρών	39
2.3.1 Οπτικός Έλεγχος	40
2.3.2 Έλεγχος με όργανα	40
2.3.3 Συστήματα Ενόργανης Παρακολούθησης Γεφυρών	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	44

Ψηφιακά κλισίμετρα: Βασικές αρχές λειτουργίας και τεχνικές εφαρμογής τους	44
3.1 Γενικές αρχές κλισιμέτρων	44
3.2 Ψηφιακά κλισίμετρα	45
3.2.1 Nivel 220 Leica	46
3.3 Αναγκαιότητα κλισιμέτρων στη παρακολούθηση δομικής κατάστασης γεφυρών	51
3.3.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση	52
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	57
Γέφυρα μελέτης και συλλογή δεδομένων ψηφιακών κλισιμέτρων	57
4.1 Γενική περιγραφή της γέφυρας.....	57
4.2 Προπαρασκευαστικές εργασίες και συλλογή δεδομένων πεδίου	59
4.2.1 Επιλογή και εγκατάσταση των αισθητήρων	60
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	65
Ανάλυση δεδομένων.....	65
5.1 Γενικά.....	65
5.2 Τύποι σημάτων.....	65
5.3 Ανάλυση χρονοσειρών	66
5.3.1 Είδη σφαλμάτων.....	67
5.3.2 Βασικά στατιστικά μεγέθη	68
5.4 Επεξεργασία ψηφιακών σημάτων – Ψηφιακά Φίλτρα.....	70
5.4.1 Φίλτρο εξομάλυνσης Κινητού μέσου	72
5.4.2 Φίλτρο εξομάλυνσης Savitzky-Golay.....	73
5.5 Ανάλυση δεδομένων στο επίπεδο συχνοτήτων.....	74
5.5.1 Η έννοια της συχνότητας.....	75
5.5.2 Μετασχηματισμός Fourier διακριτού χρόνου	76
5.5.3 Ταχύς Μετασχηματισμός Fourier, FFT	78
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....	80
Ανάλυση δεδομένων ψηφιακών κλισιμέτρων.....	80
6.1 Εισαγωγή	80
6.2 Στατιστική ανάλυση δεδομένων κλίσεων πυλώνα	80
6.3 Επεξεργασία δεδομένων κλίσεων.....	89
6.3.1 Ανάλυση των δεδομένων κλίσεων στο πεδίο του χρόνου.....	89
6.3.2 Επεξεργασία δεδομένων κλίσεων.....	93
6.3.3 Συσχέτιση με θερμοκρασιακές μεταβολές	97

6.3.4 Ανάλυση δεδομένων στο πεδίο των συχνοτήτων.....	100
6.4 Ανάλυση εποχικότητας δεδομένων	101
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7	105
Συμπεράσματα	105
Βιβλιογραφία	107

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1. 1: Αναπαράσταση του σχεδιασμού και υλοποίησης ενός Συστήματος Ενόργανης Παρακολούθησης της υγείας των κατασκευών	6
Σχήμα 1. 2: Α) Πιεζοωμικός επιταχυνσιογράφος, Β) Πιεζοηλεκτρικός επιταχυνσιογράφος, Γ) Επιταχυνσιογράφος με οπτικές ίνες	9
Σχήμα 1. 3: Διάταξη ενός επιμηκυνσιομέτρου	10
Σχήμα 1. 4: Αισθητήρας παραμόρφωσης τύπου FGB (μοντέλο FBG-ST-320)	11
Σχήμα 1. 5: Τμήματα από τα οποία αποτελείται ο Γραμμικός Μεταβλητός Διαφορικός Μετασχηματιστής ..	12
Σχήμα 1. 6: Το δορυφορικό σύστημα NAVSTAR/GPS.....	14
Σχήμα 1.7: Σχηματική απεικόνιση εφαρμογής GNSS για παρακολούθηση των μετακινήσεων γέφυρας.....	16
Σχήμα 1. 8: Σχεδιασμός και υλοποίηση του συστήματος παρακολούθησης με χρήση GNSS	17
Σχήμα 1.9: Σχεδιασμός και υλοποίηση της μεθόδου PPP.....	17
Σχήμα 1. 10: Ρομποτικός Γεωδαιτικός Σταθμός – Leica TS16,Leica Geosystems	23
Σχήμα 1. 11: Εφαρμογή για παρακολούθηση γέφυρας με την χρήση Ρομποτικού γεωδαιτικού σταθμού.....	24
Σχήμα 1. 12: Τεχνική IBIS-S	20
Σχήμα 1. 13:Το σύστημα IBIS-L: αποτελείται από τον αισθητήρα ραντάρ GBSAR τοποθετημένο σε έναν γραμμικό σαρωτή ο οποίος έχει υποδοχή για ηλεκτρικό ρεύμα και για επεξεργασία έχει την δυνατότητα να συνδεθεί με Η/Υ υπολογιστή	21
Σχήμα 1.14: Επίγειος σαρωτής Leica ScanStation C10.....	25
Σχήμα 1. 15: Επίγειος σαρωτής διαφοράς φάσης Leica RTC360	26
Σχήμα 1. 16: Σαρωτής τριγωνισμού, Konica Minolta VI-910.....	27
Σχήμα 1. 17: Παραδείγματα ρωγμών σε πραγματικές δομές στα οποία εφαρμόστηκαν μέθοδοι επεξεργασίας εικόνας όπως κατάτμηση.....	28
Σχήμα 1.18: Θερμική εικόνα της γέφυρας.....	28
Σχήμα 1. 19: Παραδείγματα εφαρμογών UAV για παρακολούθηση δομικής κατάστασης γέφυρας	30
Σχήμα 2. 1: Τμήματα από τα οποία αποτελείται η γέφυρα.....	31

Σχήμα 2. 2: Γέφυρα Τσάκωνα.....	33
Σχήμα 2. 3: Γέφυρα Γκόλντεν Γκέιτ, Golden Gate Bridge, Σαν Φρανσίσκο.....	34
Σχήμα 2. 4: Γέφυρα Ρίου-Αντιρρίου, Πάτρα, Ελλάδα.....	35
Σχήμα 2. 5: Γέφυρα Fred Hartman, Τέξας, Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής.....	36
Σχήμα 2. 6: Γέφυρα Lake Pontchartrain Causeway, Νότια Λουϊζιάνα.....	37
Σχήμα 2. 7: Γέφυρα πορθμού Ευρίπου, Χαλκίδα, Ελλάδα.....	37
Σχήμα 2. 8: Εγκατάσταση οπτικών ινών στον φορέα της γέφυρας.....	40
Σχήμα 2. 9: Απεικόνιση των διαφόρων σταδίων του συστήματος Ενεργής Παρακολούθησης Δομικής κατάστασης γέφυρας.....	42
Σχήμα 3. 1: Ηλεκτρολυτικά κλισίμετρα.....	45
Σχήμα 3. 2: (α) Κλισίμετρο υψηλής ακρίβειας Model A701-2A/B, (β)Οριζόντιο κλισίμετρο, Applied Geomechanics (γ) Ψηφιακό κλισίμετρο υψηλής ευαισθησίας Nivel220.....	46
Σχήμα 3. 3 Ψηφιακό κλισίμετρο υψηλής ευαισθησίας Nivel220, Leica Geosystems.....	47
Σχήμα 3. 4: Εξαρτήματα του αισθητήρα.....	47
Σχήμα 3. 5: Εξαρτήματα του αισθητήρα.....	48
Σχήμα 3. 6: Συνδεσμολογία του Nivel220 με πολλαπλούς αισθητήρες και Η/Υ.....	49
Σχήμα 3. 7 : Σύστημα αισθητήρων που εγκαθίσταται στην γέφυρα.....	51
Σχήμα 3. 8: Αποτελέσματα μακροχρόνιας παρακολούθησης της γέφυρας σε σχέση με ημερήσια παρακολούθηση.	52
Σχήμα 3. 9: Απεικόνιση των θέσεων των κλισιμέτρων στην γέφυρα.....	52
Σχήμα 3. 10: Θέσεις των κλισιμέτρων στον φορέα της γέφυρας.....	53
Σχήμα 3. 11: Θέσεις των κλισιμέτρων στον φορέα της γέφυρας.....	54
Σχήμα 3. 12: Απεικόνιση των θέσεων των κλισιμέτρων στον φορέα.....	54
Σχήμα 3. 13: Εγκατάσταση και διασύνδεση των Κλισιμέτρων.....	55
Σχήμα 3. 14: Εκτίμηση των μετακινήσεων.....	56
Σχήμα 3. 15 Διάγραμμα μετατόπισης για χρονική διάρκεια 1 έτους των μετακινήσεων από τα κλισίμετρα και τον γεωδαιτικό σταθμό σε σχέση με την θερμοκρασία.....	56
Σχήμα 4. 1: Θέση γέφυρας, Μεταμόρφωση	58

Σχήμα 4. 2: Γέφυρα στον κόμβο Μεταμόρφωσης	58
Σχήμα 4. 3: Στοιχεία ενός συστήματος ΠΔΚ.....	59
Σχήμα 4. 4 :Θέσεις των κλισίμετρων στη στέψη των υψηλών βάθρων M6, M7, M8 και στο έδαφος.	61
Σχήμα 4. 5 : Εγκαταστημένο κλισίμετρο στη στέψη του πυλώνα M8.....	62
Σχήμα 4. 6: (α) Αισθητήρας θερμοκρασίας υγρασίας HMP 110, Vaisala, (β) Αισθητήρας θερμοκρασίας / πίεσης	62
Σχήμα 4. 7: Θέσεις εγκατάστασης των αισθητήρων καταγραφής μετεωρολογικών δεδομένων	63
Σχήμα 4. 8: Μέση θερμοκρασία για τον Ιανουάριο 2018	64
Σχήμα 5. 1: Τύποι σημάτων: (α) Συνεχούς χρόνου, (β) Διακριτού χρόνου.....	66
Σχήμα 5. 2: Κανονική κατανομή.....	69
Σχήμα 5. 3: Ιστόγραμμα συχνοτήτων	70
Σχήμα 5. 4: Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας του φιλτραρίσματος	71
Σχήμα 5.5: Εφαρμογή φίλτρου στα σήμα εισόδου με διαφορετικά μεγέθη παραθύρου	73
Σχήμα 5. 6: Εξομάλυνση μεταξύ πέντε σημείων για διαφορετικούς βαθμούς πολυωνυμικής συνάρτησης $n = 0, 1$ και 2	74
Σχήμα 5. 7 Σχηματική αναπαράσταση του μετασχηματισμού από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο των συχνοτήτων.....	75
Σχήμα 5. 8: Παράδειγμα του μετασχηματισμού DFT.....	77
Σχήμα 5. 9: Απεικόνιση μετασχηματισμού IDFT	77
Σχήμα 5. 10: Αριθμός διεργασιών με τον μετασχηματισμό DFT σε σχέση με την FFT	78
Σχήμα 5. 11: Σχηματική αναπαράσταση του κατακερματισμού FFT σε N σχηματισμούς DFT	79
Σχήμα 6. 1: : Διατμητική επίδραση που παρατηρούνται στα δεδομένα κλίσεων.....	81
Σχήμα 6. 2: Διαγράμματα πλήθους εμφανίσεων κλίσεων στη στέψη του M8 (ΚΛ8).....	82
Σχήμα 6. 3: Διαγράμματα πλήθους εμφανίσεων κλίσεων στη στέψη του M7 (ΚΛ7).....	82
Σχήμα 6. 4: Διαγράμματα πλήθους εμφανίσεων κλίσεων στη στέψη του M6 (ΚΛ8).....	83
Σχήμα 6. 5: Χρονοσειρές πρωτογενών κλίσεων στη στέψη του πυλώνα M8 (ΚΛ8).....	83
Σχήμα 6. 6 :Χρονοσειρές πρωτογενών κλίσεων στη στέψη του πυλώνα M7 (ΚΛ8).....	84
Σχήμα 6. 7: Χρονοσειρές πρωτογενών κλίσεων στη στέψη του πυλώνα M6 (ΚΛ8).....	84

Σχήμα 6. 8: Μέσες ημερήσιες τιμές κλίσεων στη στέψη του πυλώνα M8 (ΚΛ8).....	85
Σχήμα 6. 9: Μέγιστες ημερήσιες τιμές κλίσεων στη στέψη του πυλώνα M8 (ΚΛ8).....	85
Σχήμα 6. 10: Μέσες ημερήσιες τιμές κλίσεων στη στέψη του πυλώνα M6 (ΚΛ8).....	86
Σχήμα 6. 11: Μέγιστες ημερήσιες τιμές κλίσεων στη στέψη του πυλώνα M6 (ΚΛ8).....	86
Σχήμα 6. 12 :Μέσες ημερήσιες τιμές κλίσεων στη στέψη του πυλώνα M7 (ΚΛ8).....	87
Σχήμα 6. 13: Μέγιστες ημερήσιες τιμές κλίσεων στη στέψη του πυλώνα M7.....	87
Σχήμα 6. 14 :Γράφημα που απεικονίζει το στατιστικό δείκτη RMS των κλίσεων στη στέψη των πυλώνων M6, M7, M8.....	88
Σχήμα 6. 15 : Πρωτογενείς παρατηρήσεις κλίσεων στις διευθύνσεις x, γ στις στέψεις των πυλώνων M6, M7, M8 (ΚΛ8).....	89
Σχήμα 6. 16 :Χρονοσειρά πρωτογενών μετρήσεων κλίσεων κατά την διεύθυνση x στον πυλώνα M8 (ΚΛ8) για ένα μήνα και για δύο διαδοχικές ημέρες παρατηρήσεων.....	90
Σχήμα 6. 17: Χρονοσειρά πρωτογενών μετρήσεων κλίσεων κατά την διεύθυνση γ στον πυλώνα M8 (ΚΛ8) για ένα μήνα και για δύο διαδοχικές ημέρες παρατηρήσεων.....	91
Σχήμα 6. 18:Χρονοσειρά πρωτογενών μετρήσεων κλίσεων κατά την διεύθυνση x στον πυλώνα M7 (ΚΛ8) για ένα μήνα και για δύο διαδοχικές ημέρες παρατηρήσεων.....	91
Σχήμα 6. 19 :Χρονοσειρά πρωτογενών μετρήσεων κλίσεων κατά την διεύθυνση x στον πυλώνα M6 (ΚΛ8) για ένα μήνα και για δύο διαδοχικές ημέρες παρατηρήσεων.....	92
Σχήμα 6. 19: Χρονοσειρά πρωτογενών μετρήσεων κλίσεων κατά την διεύθυνση γ στον πυλώνα M7 (ΚΛ8) για ένα μήνα και για δύο διαδοχικές ημέρες παρατηρήσεων.....	92
Σχήμα 6. 21: Χρονοσειρά πρωτογενών μετρήσεων κλίσεων κατά την διεύθυνση γ στον πυλώνα M6 (ΚΛ8) για ένα μήνα και για δύο διαδοχικές ημέρες παρατηρήσεων.....	93
Σχήμα 6. 22: Διάγραμμα για την επιλογή του παραθύρου για το φίλτρο κινητού διαμέσου.....	94
Σχήμα 6. 23: Διάγραμμα ροής των μεθόδων για την επεξεργασία των σημάτων εισόδου.....	94
Σχήμα 6. 24: Πρωτογενή και φιλτραρισμένα δεδομένα κλίσεων (x διεύθυνση) στη στέψη του πυλώνα M8 (ΚΛ8).....	95
Σχήμα 6. 25: Πρωτογενή και φιλτραρισμένα δεδομένα κλίσεων (γ διεύθυνση) στη στέψη του πυλώνα M8 (ΚΛ8)	95
Σχήμα 6. 26: Πρωτογενή και φιλτραρισμένα δεδομένα κλίσεων (x διεύθυνση) στη στέψη του πυλώνα M7 (ΚΛ8)	95
Σχήμα 6. 27: Πρωτογενή και φιλτραρισμένα δεδομένα κλίσεων (γ διεύθυνση) στη στέψη του πυλώνα M7 (ΚΛ8).....	96
Σχήμα 6. 28: Πρωτογενή και φιλτραρισμένα δεδομένα κλίσεων (x διεύθυνση) στη στέψη του πυλώνα M6 (ΚΛ8)	96
Σχήμα 6. 29: Πρωτογενή και φιλτραρισμένα δεδομένα κλίσεων (γ διεύθυνση) στη στέψη του πυλώνα M6 (ΚΛ8).....	96

Σχήμα 6.30: Πρωτογενείς μετρήσεις θερμοκρασίας στην στέψη του πυλώνα M8 (ΚΛ8) για τον μήνα Ιανουάριος 2018.....	97
Σχήμα 6.31: Χρονοσειρές φιλτραρισμένων κλίσεων για τα ψηφιακά κλισίμετρα και τιμή θερμοκρασίας για το διάστημα Ιανουάριος 2018.....	98
Σχήμα 6.32: Φιλτραρισμένα δεδομένα κλίσεων κατά x , y στη στέψη του πυλώνα M8 και οι τιμές θερμοκρασίας για το χρονικό διάστημα 14-01-18 00:00 – 16-01-18 00:00.....	99
Σχήμα 6.33: Φιλτραρισμένα δεδομένα κλίσεων κατά x , y στη στέψη του πυλώνα M7 και οι τιμές θερμοκρασίας για το χρονικό διάστημα 14-01-18 00:00 – 16-01-18 00:00.....	99
Σχήμα 6.34: Φιλτραρισμένα δεδομένα κλίσεων κατά x , y στη στέψη του πυλώνα M6 και οι τιμές θερμοκρασίας για το χρονικό διάστημα 14-01-18 00:00 – 16-01-18 00:00.....	100
Σχήμα 6.35: Υπολογισμένα φάσματα συχνοτήτων για τα δεδομένα κλίσης στη στέψη του πυλώνα M8 στις διευθύνσεις x , y	101
Σχήμα 6.36: Διάγραμμα δεδομένων κλίσεων κατά την x διεύθυνση για το βάθρο M8 ως προς τον χρόνο.....	102
Σχήμα 6.37: Διάγραμμα δεδομένων κλίσεων κατά την y διεύθυνση για το βάθρο M8 ως προς τον χρόνο.....	103
Σχήμα 6.38: Φιλτραρισμένα δεδομένα κλίσεων κατά τις x , y διευθύνσεις για το βάθρο M8 ως προς τον χρόνο.....	103
Σχήμα 6.39: Δεδομένα κλίσεων κατά την διεύθυνση x ως προς την y διεύθυνση στη στέψη του πυλώνα M8.....	104

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά του ψηφιακού κλισίμετρου Nivel220.....	50
Πίνακας 4.1: Στατιστικά στοιχεία θερμοκρασίας.....	64
Πίνακας 6.1: Στατιστικά στοιχεία μετρήσεων κλίσεων στην στέψη των πυλώνων M6, M7, M8.....	82
Πίνακας 6.2: Στατιστικά στοιχεία δεδομένων κλίσεων στη στέψη του πυλώνα M8.....	102

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι γέφυρες και οι διάφορες τεχνικές κατασκευές, διαδραματίζουν βασικό ρόλο στα δίκτυα μεταφορών και υπάρχουν διάφοροι λόγοι για τους οποίους είναι πλέον αναγκαία η επιθεώρηση, η συντήρηση και η επισκευή τους. Η πολυπλοκότητα των συστημάτων μεταφορών και οι αυξημένες απαιτήσεις για αποδοτικότητα, αξιοπιστία και ασφάλεια των οδικών υποδοχών οδήγησαν στη δημιουργία συστημάτων παρακολούθησης με σκοπό την διαχείρισή τέτοιων κατασκευών (γέφυρες). Ιδιαίτερη βαρύτητα οφείλει να δοθεί στον τομέα της συντήρησης των συστημάτων μεταφορών και ιδίως της οδικής υποδομής, ώστε να διασφαλιστεί η λειτουργικότητα, η ασφάλεια και η αξιοπιστία της μελλοντικά. Ειδικά στο αντικείμενο της διαχείρισης γεφυρών, πρωτοπόρος στα Ελληνικά χρονικά είναι η ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ Α.Ε., η οποία στα πλαίσια ερευνητικού έργου της ΓΓΕΤ, αναπτύσσει σύστημα διαχείρισης του δικτύου των γεφυρών της.

Τα υψηλό κόστος κατασκευής των γεφυρών, οι διαφορές μεταξύ μελέτης και κατασκευής είτε λόγω των ιδιαίτερων τοπικών συνθηκών, είτε λόγω των κατασκευαστικών ατελειών, δημιουργούν την ανάγκη καταγραφής και αντιμετώπισης μεταβολών στη συμπεριφορά των κατασκευών εξ' αιτίας διαφορετικών διεγέρσεων (όπως περιβαλλοντικές, σεισμικές, φορτίσεις λόγω ανέμου, ακόμα και φορτία λειτουργίας), οδηγούν στην εφαρμογή της ενόργανης παρακολούθησης ως μέρος της ευρύτερης παρακολούθησης της "υγείας" των κατασκευών (Structural Health Monitoring) με στόχο την εξαγωγή συμπερασμάτων που αφορούν τον βαθμό λειτουργικής συμπεριφοράς τους και δομικής ακεραιότητά τους.

Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης πραγματοποιείται ο σχεδιασμός, η ανάπτυξη και η εφαρμογή ενός συστήματος αισθητήρων κλίσης υψηλής ακρίβειας για την καταγραφή της απόκρισης και την αξιολόγηση της ημι-στατικής συμπεριφοράς της γέφυρας σε δοκούς πολλαπλών ανοιγμάτων κλάδων 5 και 8 στο κόμβο Μεταμόρφωσης με την Αττική Οδό ΑΕ. Ειδικότερα, δίνεται έμφαση στην ημι-στατική συμπεριφορά τριών πυλώνων της γέφυρας σε σχέση με τις θερμοκρασιακές μεταβολές και τα φορτία διερχόμενων οχημάτων, αλλά και, εκτιμάται η εποχικότητα τους για διαφορετικούς μήνες παρατήρησης.

Στο **Κεφάλαιο 1**, γίνεται αναφορά ως προς την αναγκαιότητα και το αντικείμενο της διαδικασίας παρακολούθησης της δομικής κατάστασης των τεχνικών έργων. Συγκεκριμένα, περιγράφεται το σύστημα Ενόργανης Παρακολούθησης Δομικής Κατάστασης. Στην συνέχεια, παρατίθενται οι μέθοδοι και οι τύποι οργάνων παρακολούθησης της δομικής κατάστασης των τεχνικών έργων ενώ γίνεται

διαχωρισμός τους σε μεθόδους πειραματικής μηχανικής και τοπογραφικές μεθόδους. Αναλύονται οι αρχές λειτουργίας των μεθόδων μέτρησης, οι πηγές των σφαλμάτων τους, οι ακρίβειες, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τους κατά τη διαδικασία παρακολούθησης των κατασκευών.

Στο **Κεφάλαιο 2**, παρουσιάζεται μια γενική επισκόπηση των γεφυρών. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται τα κύρια τμήματα από τα οποία αποτελείται μια γέφυρα, περιγράφονται οι διαφορετικές κατηγορίες γεφυρών καθώς και τα συνήθη συστήματα παρακολούθησης και διαχείρισης γεφυρών (bridge management system).

Στο **Κεφάλαιο 3**, εξετάζονται τα χαρακτηριστικά και η δυνατότητα εφαρμογής ψηφιακών κλισιμέτρων σε διάφορες εφαρμογές. Συγκεκριμένα, γίνεται αναφορά στους διάφορους τύπους κλισιμέτρων καθώς και στα πεδία εφαρμογής τους και ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στα ψηφιακά κλισίμετρα υψηλής ευαισθησίας Nivel220 της εταιρίας Leica Geosystems τα οποία αποτελούν το κύριο όργανο μέτρησης της διπλωματικής αυτής. Τέλος, πραγματοποιείται σχετικά με τα συστήματα SHM -Structural Health Monitoring εφαρμοζόμενα σε γέφυρες με την χρήση ψηφιακών αισθητήρων κλίσης.

Στο **Κεφάλαιο 4**, δίνονται ορισμένα βασικά στοιχεία για την οδική γέφυρα κλάδου 5&8 στον κόμβο Μεταμόρφωσης. Πραγματοποιείται μια γενική περιγραφή της γέφυρας και αναφέρονται τα δομικά της στοιχεία. Επίσης, περιγράφονται αναλυτικά οι προπαρασκευαστικές εργασίες και οι εργασίες πεδίου. Δίνεται ο σχεδιασμός των εργασιών πεδίου, περιγράφεται η γεωμετρία παρατήρησης της γέφυρας, οι θέσεις τοποθέτησης των κλισιμέτρων. Τέλος, περιγράφονται οι διαδικασίες συλλογής των δεδομένων πεδίου ενώ γίνεται αναφορά στα μετεωρολογικά δεδομένα που επικρατούν στην περιοχή κατά την χρονική περίοδο διεξαγωγής των μετρήσεων.

Στο **Κεφάλαιο 5**, γίνεται αναφορά στις τεχνικές ανάλυσης και επεξεργασίας που χρησιμοποιήθηκαν για τα δεδομένα κλίσεων. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται αναφορά στους τύπους 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 και των συχνοτήτων.

Στο **Κεφάλαιο 6**, παρουσιάζονται τα στάδια της ανάλυσης των μετρήσεων ψηφιακών κλισιμέτρων για τα διαθέσιμα δεδομένα παρατήρησης. Το Κεφάλαιο αυτό χωρίζεται σε τρία μέρη: στο πρώτο μέρος γίνεται απεικόνιση των διαθέσιμων πρωτογενών μετρήσεων κλίσης και αναλύονται οι στατιστικές παράμετροι των παρατηρήσεων.

Στο δεύτερο μέρος ακολουθεί η επεξεργασία των δεδομένων που προέκυψαν από τα κλισίμετρα για ένα μήνα παρατηρήσεων και η συσχέτιση τους με τα μετεωρολογικά δεδομένα. Στο τρίτο μέρος παρουσιάζεται η εποχικότητα που παρουσιάζουν τα δεδομένα στην διάρκεια ενός έτους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Ενόργανη Παρακολούθηση Δομικών Έργων

1.1 Γενικά

Στο παρόν Κεφάλαιο γίνεται αναφορά ως προς την αναγκαιότητα και το αντικείμενο της διαδικασίας παρακολούθησης της δομικής κατάστασης των τεχνικών έργων. Συγκεκριμένα, περιγράφεται το σύστημα Ενόργανης Παρακολούθησης Δομικής Κατάστασης. Στην συνέχεια, παρατίθενται οι μέθοδοι και οι τύποι οργάνων παρακολούθησης της δομικής κατάστασης των τεχνικών έργων ενώ γίνεται διαχωρισμός τους σε μεθόδους πειραματικής μηχανικής και τοπογραφικές μεθόδους. Αναλύονται οι αρχές λειτουργίας των μεθόδων μέτρησης, οι πηγές των σφαλμάτων τους, οι ακρίβειες, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τους κατά τη διαδικασία παρακολούθησης των κατασκευών.

1.2 Τι είναι Παρακολούθηση Δομικής Κατάστασης (Structural Health Monitoring – SHM)

Η ενόργανη παρακολούθηση δομικών κατασκευών (Structural Health Monitoring -SHM), αποσκοπεί στην αξιολόγηση της στατικής ή δυναμικής συμπεριφοράς τους και στην αποτίμηση της δομικής ακεραιότητάς τους. Ουσιαστικά, το αντικείμενο της Παρακολούθησης Δομικής Κατάστασης – ΠΔΚ είναι να καταγράψει επί τόπου της συμπεριφορά μιας κατασκευής με ακρίβεια, να εκτιμήσει την επίδραση σε αυτήν στα διάφορα φορτία λειτουργίας, να ανιχνεύσει πιθανές βλάβες και να προσδιορίσει την κατάσταση της κατασκευής. Μπορεί να προσεγγιστεί με διάφορους ορισμούς αναλόγως την σκοπιά αλλά και το αντικείμενο ενδιαφέροντος.

Οι Xu and Li (2010), όρισαν το σύστημα ενόργανης παρακολούθησης (SHM- Structure Health Monitoring) ως ένα σύστημα που υλοποιείται από τα εξής υπό-συστήματα: σύστημα με δίκτυα ενεργών αισθητήρων τα οποία εγκαθίστανται στην επιφάνεια ή ενσωματώνονται στο σώμα του φορέα των κατασκευών, σύστημα συλλογής και μετάδοσης δεδομένων, σύστημα επεξεργασίας δεδομένων και ελέγχου και σύστημα δομικής συμπεριφοράς.

Η ενόργανη παρακολούθηση των δομικών κατασκευών είναι μία βασική μέθοδος δομικού ελέγχου η οποία περιλαμβάνει: την καταγραφή της δυναμικής συμπεριφορά μιας κατασκευής με ικανοποιητική ακρίβεια, την ανίχνευση βλαβών ή φθορών αλλά και τυχόν παραμορφώσεων σε λειτουργικά και ίδια φορτία λειτουργίας. Ο στόχος είναι η καταγραφή, με ειδικές καταγραφικές μονάδες, βασικών παραμέτρων της μηχανικής απόκρισης των δομικών κατασκευών, όπως η επιτάχυνση, η παραμόρφωση και η μετακίνηση, αλλά, και μεταβολών στη δυναμική συμπεριφορά της κατασκευής λόγω ακραίων φορτίσεων (σεισμικές δράσεις) [Karbhari 2005].

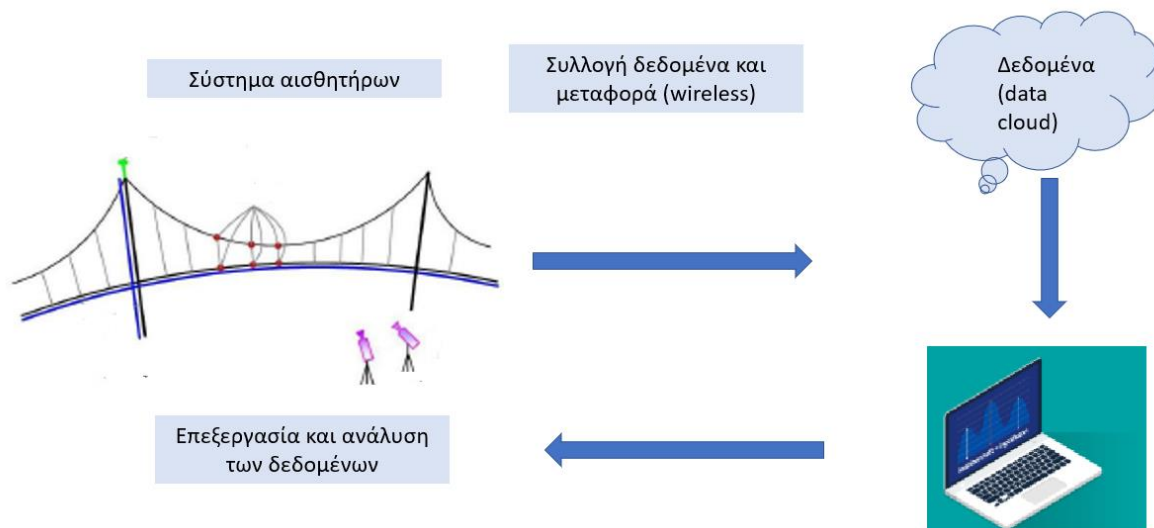
Οι αισθητήρες αποκτούν διάφορους τύπους δεδομένων (είτε συνεχή ή περιοδικά δεδομένα), τα οποία στη συνέχεια συλλέγονται, αναλύονται και αποθηκεύονται για μελλοντική ανάλυση.

Εκτός από την ανάγκη για περιοδική αξιολόγηση της κατάστασης και μακροπρόθεσμη παρακολούθηση για καλύτερη διαχείριση των υφιστάμενων δομών, οι ακόλουθοι παράγοντες συμβάλλουν επίσης στην πρόσφατη ταχεία ανάπτυξη και πρόοδο των τεχνολογιών Παρακολούθησης Δομικής Κατάστασης [Bisby, 2006]:

- οι πρόσφατες εξελίξεις στις τεχνολογίες με ηλεκτρονικά κυκλώματα υψηλής ταχύτητας, το χαμηλό κόστος αυτών στις περισσότερες περιπτώσεις αισθητήρων και η ανάπτυξη αποτελεσματικών μεθόδων επεξεργασίας σημάτων (π.χ. αισθητήρες οπτικών ινών (FOS) και έξυπνα υλικά).
- οι εξελίξεις στις τεχνολογίες της επικοινωνίας, ευρεία χρήση του διαδικτύου και ασύρματης επικοινωνίας.
- η πρόοδος στα συστήματα επεξεργασίας δεδομένων, συμπεριλαμβανομένων μοντέλων ανίχνευσης ζημιών και αλγορίθμων τεχνητής νοημοσύνης.

1.2.1 Σχεδίαση και Υλοποίηση ενός Συστήματος ΠΔΚ

Ένα σύστημα ΠΔΚ πρέπει να σχεδιαστεί ανάλογα με τα αντικείμενα παρακολούθησης και λαμβάνοντας υπόψη ότι η κάθε κατασκευή έχει τα δικά της χαρακτηριστικά και απαιτήσεις. Συνεπώς, χρειάζεται να εκτιμηθούν οι ανάγκες συντήρησης, επισκευής ή αντικατάστασης των εξαρτημάτων της κατασκευής. Λαμβάνοντας υπόψη το πεδίο εφαρμογής του Συστήματος Παρακολούθησης Δομικής Κατάστασης, απαιτείται ένα λεπτομερές σύστημα το οποίο θα πρέπει να είναι σε θέση να παρέχει πληροφορίες της δυναμικής συμπεριφοράς των κρίσιμων δομικών στοιχείων. Ένα σύστημα για την ΠΔΚ συντίθεται από διάφορα μετρητικά όργανα και διατάξεις όπως: Σύστημα αισθητήρων, Σύστημα συλλογής μετρήσεων, Σύστημα διασύνδεσης και ρύθμισης όλου του συστήματος των αισθητήρων για την μεταφορά των δεδομένων στο γραφείο, Σύστημα επεξεργασίας και ανάλυσης των δεδομένων, Σύστημα αξιολόγησης και εκτίμησης των αποτελεσμάτων ως προς την δομική κατάσταση της κατασκευής (Σχήμα 1.1).



Σχήμα 1. 1: Αναπαράσταση του σχεδιασμού και υλοποίησης ενός Συστήματος Ενόργανης Παρακολούθησης της "υγείας" των κατασκευών

Figure 1.1: Presentation of the design and implementation of a Structural Health System to verify the structure health

1.3 Μέθοδοι πειραματικής μηχανικής

Τα Σύγχρονα Συστήματα Δομικής Παρακολούθησης Τεχνικών Έργων υλοποιούνται μέσω δικτύων αισθητήρων τα οποία μπορούν να εξάγουν συμπεράσματα μέσω της ενόργανης παρακολούθησης για την δυναμική συμπεριφορά της γέφυρας. Καταγράφονται, λοιπόν, μετρήσεις επιτάχυνσης, παραμόρφωσης, μετακίνησης, ταχύτητας ανέμου, θερμοκρασίας. Τα κύρια χαρακτηριστικά τους τα οποία επηρεάζουν και την αποδοτικότητα τους είναι:

- Η **Ευαισθησία** (sensitivity), που αποτελεί το πηλίκο της ηλεκτρικής τάσης εξόδου προς το μηχανικό μέγεθος προς μέτρηση (μετατόπιση, ταχύτητα, επιτάχυνση). Αυτό ισχύει για αισθητήρες μετατροπής ενέργειας. Για τους παθητικούς αισθητήρες οι οποίοι απαιτούν τροφοδοσία ρεύματος η ευαισθησία ορίζεται σε όρους "ηλεκτρικής τάσης εξόδου" ανά μονάδα μέτρησης ανά μονάδα της τάσης του ρεύματος εισαγωγής (Mv/mm/V).
- Η **Εγκάρσια ευαισθησία** (cross-axis or transverse sensitivity), ορίζεται η ευαισθησία σε κίνηση παράλληλα προς το επίπεδο το οποίο είναι κάθετο στον άξονα κύριας ευαισθησίας. Δηλώνεται ως ποσοστό της ευαισθησίας του κύριου άξονα.
- Η **διακριτότητα** (resolution), είναι η μικρότερη μεταβολή στο μετρούμενο μέγεθος η οποία μπορεί να παράγει την μικρότερη μεταβολή στο ηλεκτρικό σήμα εξόδου και μπορεί να καταγραφεί.

- Η **Μετάθεση φάσης** (phase shift), είναι η χρονική καθυστέρηση μεταξύ της δημιουργίας της κίνησης και της παραγωγής του ηλεκτρικού σήματος του συστήματος.
- Οι **Απαιτήσεις βαθμονόμησης** (calibration requirements), είναι η επιτρεπόμενη διακύμανση στο ηλεκτρικά παραγόμενο σήμα από σταθερού εύρους μηχανική κίνηση, όταν υπάρχουν αλλαγές στο εύρος συχνοτήτων των δεδομένων, περιβαλλοντικές αλλαγές, στο εύρος των δεδομένων ή και στην ώρα συλλογής των δεδομένων.
- Η **Περιβαλλοντική ευαισθησία** (environmental sensitivity), μεταφράζεται ως την απόκριση του αισθητήρα μέτρησης σε συνθήκες υγρασίας, θερμοκρασίας, ακουστικό θόρυβο.
- Το **μέγεθος** και η **μάζα** του αισθητήρα, που ανάλογα με το μέγεθος τους επηρεάζεται η ευαισθησία του αισθητήρα σε χαμηλές συχνότητες.

[Σαλονικιός, 2009]

Για την παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας διάφορων τεχνικών έργων, χρησιμοποιούνται είτε μέθοδοι πειραματικής μηχανικής είτε τοπογραφικές μέθοδοι. Οι μέθοδοι πειραματικής μηχανικής στηρίζονται στη λήψη μετρήσεων από αισθητήρες όπως επιταχυνσιόμετρα, οπτικές ίνες, επιμηκυνσιόμετρα, κλισίμετρα, κ.α. Παρακάτω θα παρουσιαστούν συνοπτικά κάποια από τα είδη αισθητήρων που χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές Ενόργανης Παρακολούθησης Κατασκευών.

1.3.1 Επιταχυνσιόμετρα

Τα επιταχυνσιόμετρα χρησιμοποιούνται ευρέως για την παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς κατασκευών. Είναι αισθητήρες που μετρούν, αναλύουν και απεικονίζουν την επιτάχυνση σε ένα, δύο ή τρεις διευθύνσεις. Διαχωρίζονται με βάση του κύκλου λειτουργίας τους, τον τρόπο κατασκευής και με το πεδίο εφαρμογής τους αλλά η αρχή λειτουργίας τους είναι κοινή: μια μάζα διεγείρεται από μια δύναμη και καταγράφεται η επιτάχυνση της. Διαφορετικές εκδοχές επιταχυνσιόμετρων έχουν χρησιμοποιηθεί ως συσκευές μέτρησης σε διάφορες εφαρμογές παρακολούθησης δομικών έργων, επειδή τα δεδομένα επιτάχυνσης μπορούν να παράσχουν πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τα δυναμικά χαρακτηριστικά ενός αντικειμένου. Τα δεδομένα επιτάχυνσης που προκύπτουν με διαδικασίες μετα-επεξεργασίας (post-processing) έχουν την δυνατότητα να υπολογίσουν την συχνότητα ταλάντωσης μιας κατασκευής.

Αυτά τα όργανα εξάγουν επίσης πολλά δεδομένα που απαιτούν εντατική επεξεργασία, αλλά, αποτελούν από τις καλύτερες επιλογές για τη μέτρηση δυναμικών ιδιοτήτων μιας δομής.

Τέσσερα είδη επιταχυνσιογράφων χρησιμοποιούνται κυρίως και είναι τα εξής:

- Πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα (piezoelectric accelerometer)

Ο πιο δημοφιλής τύπος επιταχυνσιόμετρου είναι το πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιόμετρο. Αυτός ο τύπος αισθητήρας λειτουργεί με βάση ένα κρύσταλλο το οποίο όταν διεγείρεται από την ταλαντευόμενη μάζα η οποία πιέζεται παράγει ηλεκτρικό ρεύμα τάσης ανάλογο της επιτάχυνσης διέγερσης. Έχουν πολλά πλεονεκτήματα, όπως μικρό μέγεθος, υψηλή απόδοση, ανθεκτικότητα, ευρεία εμβέλεια συχνοτήτων, και δυνατότητα παρακολούθησης ενός ευρέως φάσματος δυναμικών φαινομένων. Τα βασικά στοιχεία που αποτελούν το πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιόμετρο είναι η βάση του, ένα πιεζοηλεκτρικό στοιχείο και μια σεισμική μάζα, Σχήμα 1.2. Λόγω της λειτουργίας του ο πιεζοηλεκτρικός επιταχυνσιογράφος μπορεί να καταγράψει επιταχύνσεις σχετικά υψηλών συχνοτήτων (από 3 έως 5000 Hz) και για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται για την μέτρηση των κυμάτων της διάδοσης του ήχου, στην αεροναυπηγική, στις δοκιμές μμηχανών αλλά και ως σύστημα ελέγχου των κατασκευών [Kulwanoski & Schnellinger, 2004].

- Πιεζωμικός επιταχυνσιογράφος (Piezoresistive Accelerometers)

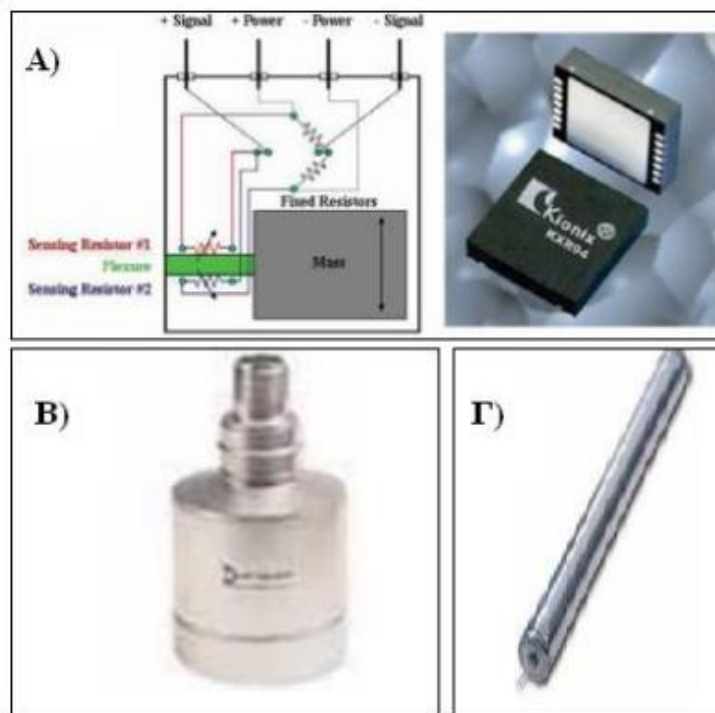
Ένας άλλος τύπος επιταχυνσιομέτρου είναι ο πιεζωμικός ο οποίος αποτελείται από ένα ηλεκτρικό κύκλωμα στο οποίο η ταλαντευόμενη μάζα παίζει το ρόλο διακόπτη. Με την διέγερση της μάζας ανοιγοκλείνει το κύκλωμα και η τάση που παράγεται είναι ανάλογη της επιτάχυνσης. Το κύριο πλεονέκτημα αυτού του τύπου επιταχυνσιόμετρου είναι το μικρό μέγεθος. Ο πιεζωμικός μπορεί να καταγράψει και μικρότερες συχνότητες (της τάξης του 0.5 Hz) και για αυτό χρησιμοποιείται και σε κρουστικές δοκιμές (π.χ. crash test αυτοκινήτων).

- Επιμηκυνσιομετρικός επιταχυνσιογράφος (strain gauge accelerometer)

Ο επιμηκυνσιομετρικός επιταχυνσιογράφος αποτελείται από ένα μονοβάθμιο ταλαντωτή (μάζας-ελατηρίου-αποσβεστήρα).

- Επιταχυνσιόμετρα με οπτικές ίνες

Πρόκειται για επιταχυνσιόμετρο όπου το φως που συγκεντρώνεται στους δέκτες είναι ανάλογο με την επιτάχυνση που εφαρμόζεται. Σημαντικό χαρακτηριστικό τους είναι η ελαχιστοποίηση της επίδρασης ηλεκτρομαγνητικών και ραδιοφωνικών παρεμβολών επειδή πραγματοποιείται μόνο η μεταφορά του φωτός αποκλειστικά διαμέσου της καλωδίωσης.



Σχήμα 1. 2: Α) Πιεζωμικός επιταχυνσιογράφος, Β) Πιεζοηλεκτρικός επιταχυνσιογράφος, Γ) Επιταχυνσιογράφος με οπτικές ίνες.

Figure 1.2: Α) Piezoresistive Accelerometers, Β) piezoelectric accelerometer, Γ) accelerometer with fiber optics
(Πηγή: www.tkmactions.tee.gr)

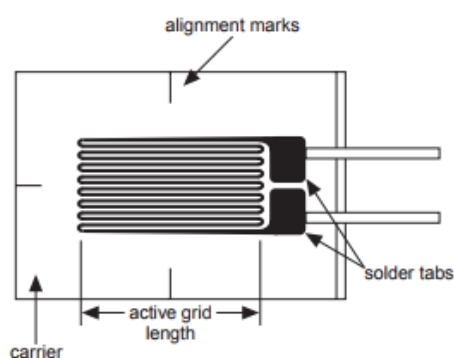
Μειονεκτήματα των επιταχυνσιογράφων:

- Λόγω της δυσκαμψίας του ελατηρίου και της απόσβεσης του ταλαντωτή, ο επιταχυνσιογράφος μπορεί να καταγράψει κυρίως υψίσυχνες κινήσεις (συνήθως $>0.5-1\text{Hz}$) και όχι τις χαμηλόσυχνες ($<0.1-0.2\text{Hz}$) που οφείλονται σε ανεμοπιέσεις, θερμοκρασιακές μεταβολές κ.α.
- Οι εκτιμήσεις ταχυτήτων και μετακινήσεων επηρεάζονται από σφάλματα των καταγραφών της επιτάχυνσης και της ασάθειας δειγματοληψίας η συσσώρευση των οποίων (λόγω του Νόμου Μετάδοσης των Σφαλμάτων) καταλήγει η τελική εκτίμηση της μετατόπισης να είναι ανάλογη του τετραγώνου του χρόνου της καταγραφής και πολλές φορές στατιστικά μη σημαντική.
- Με την πάροδο του χρόνου τα ρολόγια των οργάνων παρουσιάζουν σφάλματα.
- Είναι αναγκαία η τοποθέτηση των επιταχυνσιόμετρων σε απευθείας επαφή με την κατασκευή παρακολούθησης.

1.3.2 Επιμηκυνσιόμετρα

Τα επιμηκυνσιόμετρα χρησιμοποιούνται για την μέτρηση των μετατοπίσεων σε συγκεκριμένα σημεία των κατασκευών και γεφυρών, υπό την επίδραση διαφόρων φορτίσεων και χρησιμοποιούνται ευρέως για Παρακολούθηση Δομικής Κατάστασης (ΠΔΚ) σε κατασκευές για πολλούς λόγους. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα αυτών των αισθητήρων, στις απλές μορφές τους, είναι το χαμηλό κόστος τους.

Βέβαια, τα επιμηκυνσιόμετρα μπορούν να μετρήσουν την καταπόνηση μιας δομής μόνο σε μία θέση και είναι ωφέλιμα για την καταγραφή επιμηκύνσεων ενός φορέα για μικρό χρονικό διάστημα. Οι πληροφορίες που αποκτώνται από αυτούς τους αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων της δομής για να βοηθήσει στην ανίχνευση ενδεχόμενης ζημίας στην κατασκευή.



Σχήμα 1. 3: Διάταξη ενός επιμηκυνσιομέτρου
 Figure 1.3: Setup of a strain gauge
 (Πηγή: www.elektron.pol.lublin.pl)

1.3.3 Ψηφιακά Κλισίμετρα

Τα κλισίμετρα (inclinometers) είναι απλές διατάξεις ή όργανα που μετρούν μεταβολές διεύθυνσης του οριζοντα ανάλογο με τον τρόπο εγκατάστασης τους, θετικές ή αρνητικές κλίσεις. Κλισίμετρα που διαθέτουν εξαιρετικά ευαίσθητους αισθητήρες, έχουν ανάλυση της τάξης των 0.0001 deg. Η τελική ακρίβεια βέβαια που επιτυγχάνεται, εξαρτάται τόσο από το είδος του οργάνου όσο και από το εύρος της μετρούμενης γωνίας και ανάλογα με την περίπτωση μπορεί να περιοριστεί στις 0.01 deg. Τα σύγχρονα κλισίμετρα υψηλής ακριβείας χρησιμοποιούνται για ταυτόχρονες μετρήσεις κλίσης, διεύθυνσης μετακίνησης και θερμοκρασίας βασιζόμενης σε οπτοηλεκτρονική μέθοδο. Χρησιμοποιούνται για μεγάλες κατασκευές και εφαρμογές παρακολούθησης κατασκευών όπως φράγματα, γέφυρες και ψηλά κτίρια και όπου απαιτούνται υψηλής ακριβείας πληροφορίες για την κλίση και την διεύθυνση των μετατοπίσεων. Τα χαρακτηριστικά των κλισιμέτρων αναλύονται διεξοδικά στο Κεφάλαιο 3.

1.3.4 Αισθητήρες οπτικών ινών

Οι αισθητήρες οπτικών ινών (Fiber Optic Sensors), είναι όργανα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό διάφορων μεγεθών (π.χ. μετακινήσεις, ταχύτητες). Συνδυάζονται επί καλωδίων οπτικών ινών που καταλήγουν σε μία ειδική συσκευή αποκωδικοποίησης του οπτικού σήματος. Οι βασικές συνιστώσες της παραπάνω διάταξης διακρίνονται σε:

1. Αποκωδικοποιητής σήματος
2. Οπτική ίνα που διατρέχει το φορέα ή το τεχνικό έργο
3. Επί μέρους αισθητήρες της οπτικής ίνας



Σχήμα 1. 4: Αισθητήρας παραμόρφωσης τύπου FGB(μοντέλο FBG-ST-320)

Figure 1.4: Fiber optic sensor (FBG-ST-320 model)

(Πηγή: <http://www.fbg.co.kr>)

Ένας από τους συνηθέστερους τύπους αισθητήρων οπτικών ινών είναι η ο αισθητήρας τύπου Bragg (Fiber Bragg Grating-FBG). Οι αισθητήρες τύπου FBG οι αισθητήρες μεταβάλλουν το μήκος κύματος των πηγών ανακλώμενου φωτός. Ενσωματώνονται ως τμήμα <math><1\text{ cm}</math> της οπτικής ίνας, το οποίο έχει υποστεί ήδη ειδική επεξεργασία. Το ανακλώμενο μήκος κύματος που μεταβάλλεται λόγω παραμόρφωσης καταγράφεται από τον ειδικό εξοπλισμό (interrogator- αποκωδικοποιητή) που παρακολουθεί σε τακτά χρονικά διαστήματα τις μεταβολές. Επίσης, έχουν αρκετά υψηλές συχνότητες δειγματοληψίας έως και 20 KHz.

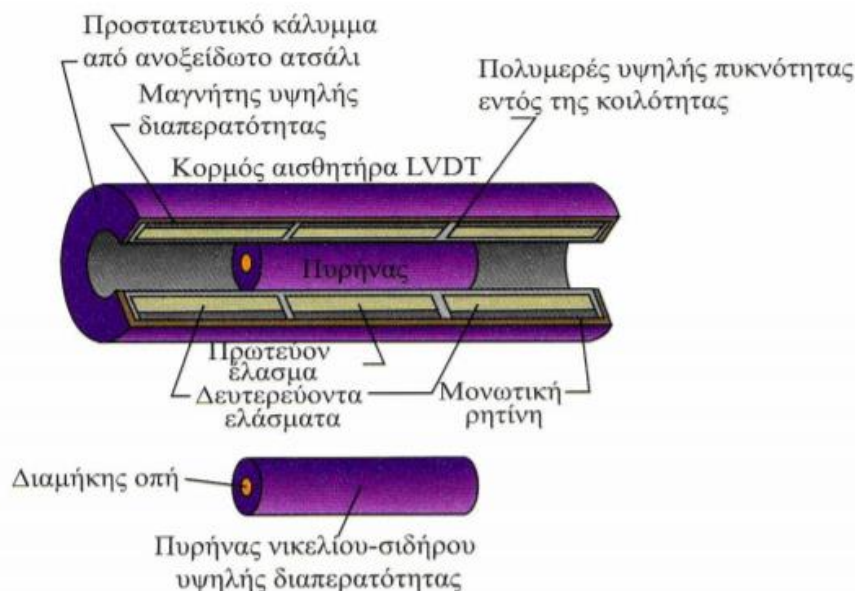
Το σημαντικότερο πλεονέκτημα για τη χρήση των οπτικών ινών είναι η ικανότητα να μετρά πολλές παραμέτρους με μία μόνο ίνα. Ένα άλλο αξιοσημείωτο πλεονέκτημα έναντι άλλων τύπων αισθητήρων είναι η δυνατότητα μέτρησης αλλαγών σε όλο το μήκος μιας ίνας και όχι σε μια συγκεκριμένη θέση. Οι αισθητήρες οπτικών ινών δεν επηρεάζονται από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, κάτι που αποτελεί κοινό πρόβλημα με πολλές άλλες επιλογές αισθητήρων, [Καραλάκης et al., 2011]. Η τεχνολογία τους μπορεί εύκολα να ενσωματωθεί σε άλλες συσκευές όπως τα επιταχυνσιόμετρα και οι ηλεκτρικοί μετατροπείς και έχουν χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση ποικιλίας μετρήσεων, όπως η τάση, μετατόπιση, πίεση, κλίση, επιτάχυνση, διάβρωση, στο σκυρόδεμα.

Τα κύρια πλεονεκτήματα των αισθητήρων οπτικών ινών όσον αφορά την χρήση τους σε ενόργανη παρακολούθηση δομικής κατάστασης τεχνικών έργων είναι:

- Έχουν αμελητέο βάρος και μικρό μέγεθος, άρα μπορούν να τοποθετηθούν σε δύσκολα σημεία και πολύπλοκες διατάξεις.
- Παρουσιάζουν μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας (έως και 50°C), άρα μεγάλη ανθεκτικότητα σε ακραίες συνθήκες περιβάλλοντος.
- Μεγάλη ταχύτητα δειγματοληψίας μετρήσεων και δυνατότητα επανάληψης μέτρησης κατά την διάρκεια ενός φαινομένου (διέλευση μεγάλου οχήματος, ισχυροί άνεμοι κ.α.)

1.3.5 Γραμμικός Μεταβλητός Διαφορικός Μετασχηματιστής

Ο Γραμμικός Μεταβλητός Διαφορικός Μετασχηματιστής (Linear Variable Differential Transducers - LVDT) (Σχήμα 1.6), είναι ένας αισθητήρας με τον οποίο μπορούμε να ανιχνεύσουμε την θέση ή και την μετατόπιση, ως προς ένα αρχικό σημείο, ενός αντικειμένου ή μιας διεύθυνσης. Συνήθως, συνδέεται σε δύο θέσεις της κατασκευής προς παρακολούθηση για την μέτρηση των σχετικών μετατοπίσεων [Fazlul H. C et.al, 2015].



Σχήμα 1. 5: Τμήματα από τα οποία αποτελείται ο Γραμμικός Μεταβλητός Διαφορικός Μετασχηματιστής

Figure 1.5: Components of the Linear Variable Differential Transducer

(Πηγή: elearning.teicm.gr)

Ο Γραμμικός Μεταβλητός Διαφορικός Μετασχηματιστής είναι όργανο μεγάλης ακρίβειας αλλά μικρού εύρους μέτρησης (μερικά εκατοστά). Χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις που χρειαζόμαστε να

μετρήσουμε με μεγάλη ακρίβεια μικρές μετατοπίσεις. Ο αισθητήρας έχει την δυνατότητα να προσδιορίσει την σχετική μετατόπιση σε μια διεύθυνση ενός σημείου σχετικό με ένα άλλο σημείο στην κατασκευή και η χρήση τους προσφέρεται για μακροχρόνια παρακολούθηση δομικής κατάστασης τεχνικών έργων λόγω της σταθερότητας τους.

1.4 Τοπογραφικές μέθοδοι

Στην συγκεκριμένη ενότητα παρουσιάζονται οι πειραματικές μέθοδοι μηχανικής οι οποίοι βασίζονται σε τοπογραφικές μεθόδους για την παρακολούθηση της δομικής κατάστασης τεχνικών έργων. Έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι που βασίζονται κυρίως στα συστήματα δορυφορικού εντοπισμού GNSS, σε γεωδαιτικούς σταθμούς ακριβείας αναγνώρισης και παρακολούθησης στόχου (Robotic Total Station-RTS), επίγειο σύστημα radar μικροκυματικής συμβολομετρίας και στους επίγειους σαρωτές laser (laser scanner). Στην συνέχεια λοιπόν θα γίνει συνοπτική αναφορά στις εν λόγω μεθόδους.

1.4.1 Συστήματα δορυφορικού εντοπισμού (GNSS – Global Navigation Satellite System)

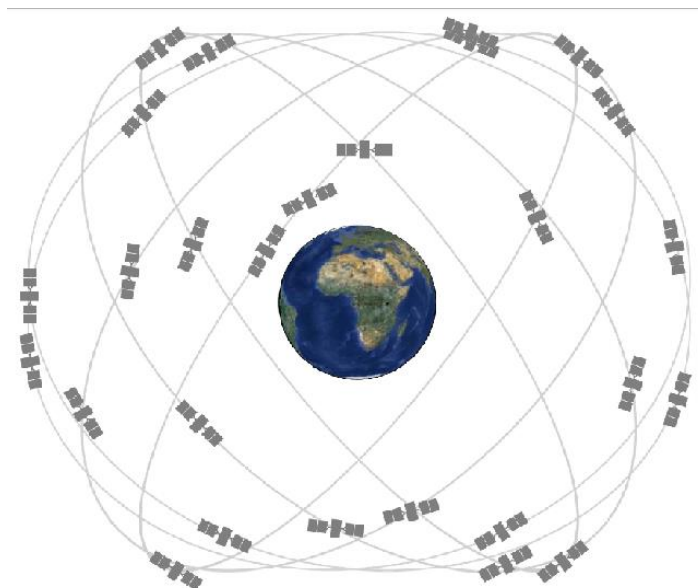
Ο προσδιορισμός της θέσης και της ταχύτητας ενός αντικειμένου σε πραγματικό χρόνο καθώς και η πλήρης καταγραφή της τροχιάς του είναι σήμερα δυνατή, με τη χρήση των δορυφορικών συστημάτων πλοήγησης. Με τον όρο δορυφορικό σύστημα εντοπισμού θέσης εννοείται ένα σύστημα προσδιορισμού των απόλυτων και σχετικών συντεταγμένων σημείων επί της γης με την επεξεργασία μετρήσεων προς ή και από τεχνητούς δορυφόρους.

- **Σύστημα NAVSTAR GPS**

Το NAVSTAR ή απλά, GPS (Navigation Satellite Timing And Ranging, Global Positioning Systems), είναι ένα παγκόσμιο δορυφορικό σύστημα προσδιορισμού θέσης, χρόνου και ταχύτητας. Σχεδιάστηκε το 1970, με ευθύνη του Υπουργείου Άμυνας των Η.Π.Α, αρχικά, για την εξυπηρέτηση στρατιωτικών σκοπών αλλά και αναγκών ναυσιπλοΐας. Το σύστημα εξελίχθηκε ραγδαία τις ακόλουθες δεκαετίες βελτιώνοντας σημαντικά την ακρίβειά του και το 1993 επετράπη τελικά η χρήση του για πολιτικούς-γεωδαιτικούς σκοπούς από το ευρύ κοινό.

Αποτελείται από ένα σχηματισμό τριάντα ένα δορυφόρων και από τους δέκτες στην γήινη επιφάνεια (Σχήμα 1.6). Οι δέκτες, παρέχουν ακριβείς πληροφορίες για τη θέση ενός σημείου, το υψόμετρό του,

την ταχύτητα και την κατεύθυνση της κίνησης του με την προϋπόθεση λήψης σήματος από τέσσερις τουλάχιστον δορυφόρους.



Σχήμα 1. 6: Το δορυφορικό σύστημα NAVSTAR/GPS

Figure 1.6: The NAVSTAR/GPS satellite system

(Πηγή:www.gps.gov)

Σχηματίζει ένα παγκόσμιο δίκτυο με εμβέλεια που καλύπτει ξηρά, θάλασσα και αέρα και είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να εξασφαλίζει συνεχή, παγκόσμια, κάτω από οποιοσδήποτε καιρικές συνθήκες, πλοήγηση (τριδιάστατη θέση, ταχύτητα, χρόνο) σε απεριόριστο αριθμό χρηστών [Leick, 2003].

- **Σύστημα GLONASS**

Το δορυφορικό σύστημα GLONASS, αναπτύχθηκε από την πρώην Σοβιετική Ένωση το 1976 και ολοκληρώθηκε το 1995 [www.russianspaceweb.com]. Τη δεκαετία του 2000 η κυβέρνηση της Ρωσίας αποφάσισε να το αναβαθμίσει και σήμερα αποτελείται από ένα σύστημα 28 δορυφόρων, εκ των οποίων, οι 24 βρίσκονται σε κανονική κατάσταση λειτουργίας. Οι δορυφόροι περιστρέφονται σε 3 τροχιακά επίπεδα με 8 δορυφόρους σε κάθε τροχιά. Η τροχιά τους είναι σχεδόν κυκλική με κλίση 64.8° ως προς το επίπεδο του Ισημερινού. Το μέσο ύψος τους από την επιφάνεια της Γης είναι 19.100 km [www.russianspaceweb.com].

- **Σύστημα GALILEO**

Το GALILEO είναι ένα ευρωπαϊκό παγκόσμιο σύστημα δορυφορικού εντοπισμού το οποίο αναπτύσσεται από την Ευρωπαϊκή Ένωση και τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος. Αναμένεται να έχει

ολοκληρωθεί το 2020, μέσω ενός σχηματισμού 30 δορυφόρων τοποθετημένων σε 3 τροχιακά επίπεδα, με μέσο ύψος από την επιφάνεια της γης 23.222 km και κλίση 56° ως προς το επίπεδο του Ισημερινού.

- **Σύστημα BeiDou**

Το σύστημα BeiDou είναι ένα παγκόσμιο σύστημα πλοήγησης που θα αποτελείται από 35 δορυφόρους όταν θα αναπτυχθεί πλήρως. Το 2011 ξεκίνησε να παρέχει υπηρεσίες στους Κινέζους πολίτες σε καθεστώς δοκιμαστικής αξιολόγησης. Οι 25 δορυφόροι περιστρέφονται σε μέση τροχιά 21.500 km από την επιφάνεια της Γης και οι τρεις σε επικλινή γεωστατική τροχιά με κλίση 55° [en.beidou.gov.cn].

- **Σύστημα IRNSS**

Το Ινδικό IRNSS (Indian Regional Navigation Satellite System), είναι ένα αυτόνομο τοπικό σύστημα πλοήγησης κάτω από τον απόλυτο έλεγχο της Ινδικής κυβέρνησης. Θα αποτελείται από 7 δορυφόρους οι 3 εκ των οποίων θα είναι σε γεωστατική τροχιά. Θα περιστρέφονται όλοι οι δορυφόροι με τέτοιο τρόπο ώστε να βρίσκονται σε συνεχή επικοινωνία με το Ινδικό δίκτυο των κέντρων ελέγχου [www.irnss.isro.gov.in].

- **Σύστημα QZSS**

Το Ιαπωνικό QZSS (Quasi-Zenith Satellite System), είναι συμπληρωματικό δίκτυο του GPS, που επαυξάνει τις δυνατότητες του GPS στην περιοχή της Ιαπωνίας. Αποτελείται από 4 δορυφόρους ο πρώτος εκ των οποίων εκτοξεύτηκε στις 11 Σεπτεμβρίου του 2010. Οι δορυφόροι του θα περιστρέφονται με τέτοιο τρόπο, ώστε πάντα ένας από τους αυτούς να είναι κοντά στο ζενίθ, όταν θα βρίσκεται πάνω από την Ιαπωνία [www.qzs.jp/en].

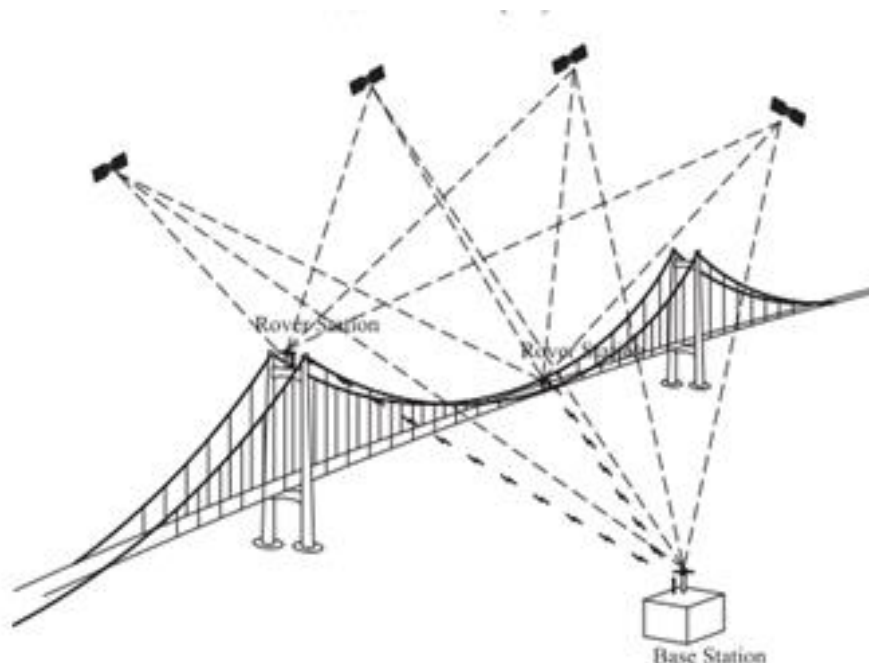
1.4.1.α Μέθοδοι μετρήσεων GNSS για την παρακολούθηση κατασκευών, ακρίβειες εντοπισμού και αξιολόγηση

Τα τελευταία χρόνια έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές μελέτες με χρήση του GNSS στην παρακολούθηση της δομικής κατάστασης τεχνικών έργων όπως γέφυρες μεγάλου και μικρού ανοίγματος, φράγματα και ψηλά κτίρια.

Με τη χρήση GNSS πραγματοποιούνται μετρήσεις σε τρεις διαστάσεις (X,Y,Z-καρτεσιανές συντεταγμένες) για στατικές ή και δυναμικές εφαρμογές και είναι εφικτή η αξιολόγηση της δυναμικής συμπεριφοράς μιας κατασκευής, η αξιολόγηση της σχετικά με τα δυναμικά φορτία από τα οποία πλήττεται (π.χ. σεισμικές δονήσεις, ισχυροί άνεμοι κ.α.) αλλά και από τα ημι-στατικά φαινόμενα (π.χ.

θερμοκρασιακές μεταβολές), όπως, και η μέτρηση της συχνότητας ταλάντωσης της. Η λειτουργία του GNSS στηρίζεται σε μετρήσεις της φάσης του φέροντος σήματος, το οποίο λαμβάνουν δυο επίγειοι δέκτες (base station – reference station). Ο ένας δέκτης (σταθμός αναφοράς-base station) τοποθετείται σε σταθερό σημείο εκτός της κατασκευής και ο δεύτερος (κινούμενος-rover station) σε σημείο ελέγχου της κατασκευής, χωρίς ωστόσο να απαιτείται οπτική επαφή μεταξύ τους.

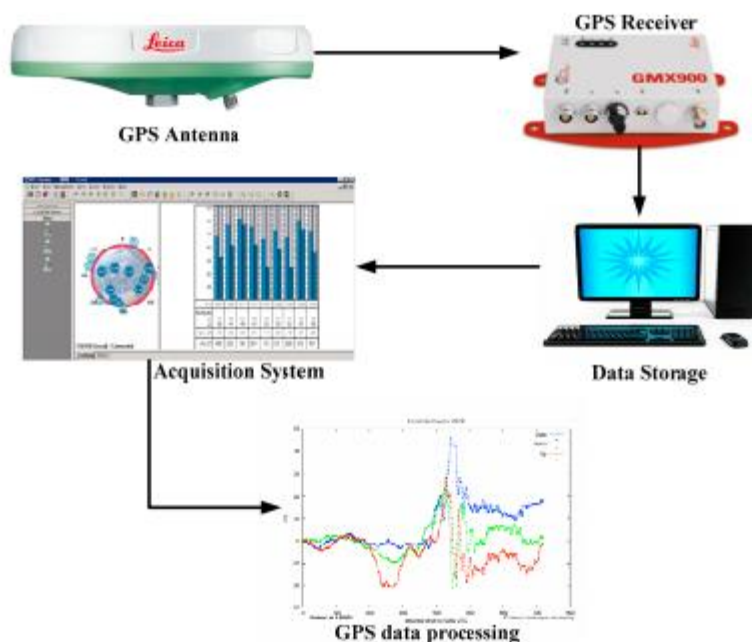
Σε πολλές εφαρμογές ΠΔΚ χρησιμοποιούνται ευρέως οι τεχνικές: κινηματικός εντοπισμός σε πραγματικό χρόνο RTK (Real Time Kinematic), (Σχήμα 1.7), και η δικτυακή τεχνική RTK – NRTK. Με την χρήση GNSS υπάρχει η δυνατότητα απόκρισης δυναμικών φαινομένων έως και 50 Hz. Το δορυφορικό σύστημα εντοπισμού χρησιμοποιείται ευρέως για τέτοιου είδους γεωδαιτικές εφαρμογές και όλη η συνδεσμολογία του συστήματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.8.



Σχήμα 1. 7: Σχηματική απεικόνιση εφαρμογής GNSS για παρακολούθηση των μετακινήσεων γέφυρας

Figure 1.7: Presentation of the GNSS method for deflection bridge monitoring

(Πηγή: Young Jong Kang et al., 2013)

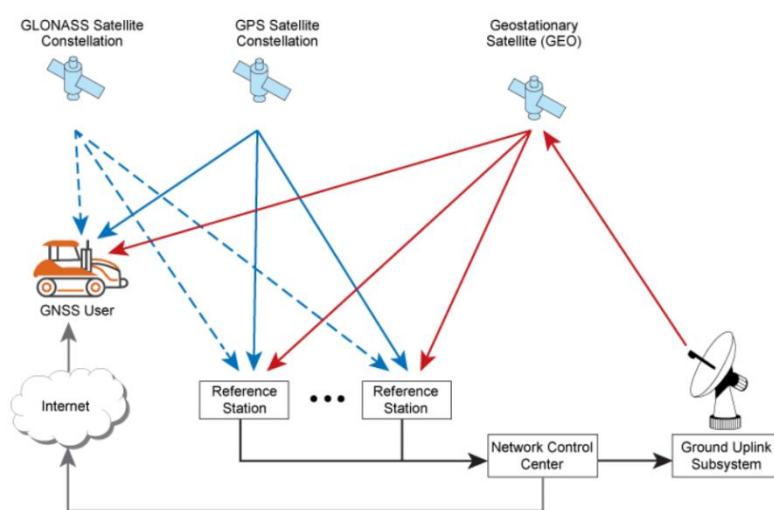


Σχήμα 1. 8: Σχεδιασμός και υλοποίηση του συστήματος παρακολούθησης με την χρήση GNSS

Figure 1.8: Design and implementation of the monitoring system with GNSS

(Πηγή: Mosbeh R. et al., 2017)

Όπως προαναφέρθηκε οι τεχνικές GNSS κατηγοριοποιούνται σε στατικές, ημι-στατικές και δυναμικές μετρήσεις με ακρίβεια μέτρησης 1–2cm οριζοντιογραφικά και 2-5 cm υψομετρικά. Επίσης, μπορεί να γίνει και χρήση της μεθόδου απόλυτου προσδιορισμού θέσης με χρήση τόσο των ψευδοαποστάσεων όσο και των μετρήσεων του φέροντος κύματος καθώς και προϊόντων ακριβείας με την χρήση μεθόδου PPP (Precise-Point-Positioning) η οποία εξαρτάται από τα ρολόγια των δορυφόρων και την ακρίβεια των τροχιών με μικρότερες ακριβείες. Στο Σχήμα 1.9 παρουσιάζεται η μέθοδος.



Σχήμα 1.9: Σχεδιασμός και υλοποίηση της μεθόδου PPP

Figure 1.9: Design and implementation of the PPP method

(Πηγή: www.novatel.com)

Τα βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι τα εξής:

- Υψηλή συχνότητα καταγραφής (20 Hz και σε ερευνητικό επίπεδο έως 100 Hz) έτσι ώστε να μπορεί να καλύψει και τις ιδιοσυχνότητες των κατασκευών.
- Δεν επηρεάζεται η μέτρηση από τις καιρικές συνθήκες .
- Η διαδικασία των μετρήσεων είναι αρκετά απλή και δεν απαιτείται πολύς χρόνος προετοιμασίας.
- Μπορεί να συνδυαστεί με άλλα όργανα μέτρησης και σύγχρονες εφαρμογές (π.χ. αδρανειακά συστήματα).
- Για τον προσδιορισμό θέσης δεν απαιτείται αμοιβαία ορατότητα μεταξύ του σταθερού και του κινούμενου σταθμού. Απαιτείται μόνο λήψη ικανοποιητικού αριθμού δορυφόρων, τουλάχιστον 4-5 (ανοικτός ορίζοντας).
- Παρέχει τη δυνατότητα καταγραφής δεδομένων καθ' όλη τη διάρκεια της μέρας και της νύχτας.
- Παρέχει καλή ακρίβεια εντοπισμού οριζοντιογραφικά (1-2 cm).

Τα βασικά μειονεκτήματα της μεθόδου είναι:

- Απαιτεί ανοικτό ορίζοντα για να έχει οπτική επαφή με δορυφόρους συνεπώς δυσχεραίνεται η χρήση του σε περιβάλλοντα με εμπόδια τεχνητά ή φυσικά (ψηλά κτίρια, δέντρα) .
- Το σήμα της κεραίας των δορυφόρων επηρεάζεται άμεσα από την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που μπορεί να εκπέμπεται στην περιβάλλουσα περιοχή που βρίσκεται ο δέκτης (πυλώνες και κεραίες κινητής τηλεφωνίας) και κατά συνέπεια να δημιουργούνται παρεμβολές π.χ. στις συχνότητες L1, L2 του δορυφορικού συστήματος GPS.
- Το σήμα των δορυφόρων παρουσιάζει το φαινόμενο των πολλαπλών διαδρομών όταν ανακλάται σε διάφορες επιφάνειες πριν φτάσει στο δέκτη.
- Παρέχει μειωμένη ακρίβεια προσδιορισμού υψομετρικά (2-5 cm).
- Απαιτείται για την επίτευξη της καλύτερης ακρίβειας απαιτείται το μήκος της βάσης μεταξύ των δεκτών να μην ξεπερνά τα 30 km για την περίπτωση διορθώσεων από τον κοντινότερο σταθμό (Single base). Με τις δικτυακές τεχνικές NRTK (VRS και MAC) οι βάσεις μπορούν να ξεπερνούν τα 60 km.

- Οι μετρήσεις ενδέχεται να περιέχουν σφάλματα που οφείλονται σε κακή γεωμετρία των δορυφόρων (DOP).

1.4.3 Επίγειο σύστημα radar μικροκυματικής συμβολομετρίας (GBSAR- Ground Based SAR)

Για την παρακολούθηση κατασκευών όπως, γέφυρες χρησιμοποιούνται σε αρκετές εφαρμογές νέες τεχνολογίες τόσο για στατικές όσο και για δυναμικές εφαρμογές που συμβάλλουν στην αξιολόγηση και την ανάλυση τους. Τα επίγεια συστήματα radar (Ground based SAR) GBSAR αναπτύχθηκαν από την Ιταλική εταιρία IDIS (Ingegneria dei Sistemi S.p.A.) σε συνεργασία με το τμήμα Electronics and Telecommunication του πανεπιστημίου της Φλωρεντίας και βασίζεται σε ένα συνεκτικό σύστημα ραντάρ μικροκυματικής συμβολομετρίας το οποίο παρέχει ανίχνευση μετακινήσεων σε μια διεύθυνση με υψηλή χωρική ανάλυση και ακρίβεια (0.1-1 mm). Οι μετρήσεις μπορούν να αξιοποιηθούν, με τη χρήση συμβολομετρικών τεχνικών ώστε να αντληθούν πληροφορίες σχετικά με την παραμόρφωση της προς μέτρηση επιφάνειας.

Αρχικά κατηγοριοποιείται σε τρεις τεχνικές:

- **Διαμόρφωση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας** (SF-CW: Stepped-Frequency Continuous Wave) for obtaining range resolution
- **Συμβολομετρία** (Interferometry technique) for the determination of object displacements with high precision and accuracy
- **GB-SAR** for obtaining azimuth or cross-range resolution

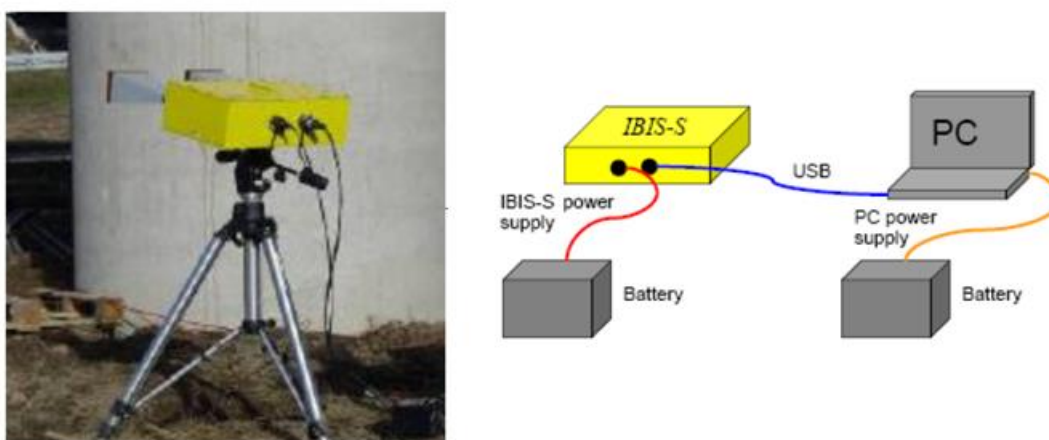
Στις μετρήσεις ραντάρ για εφαρμογές υψηλής και χαμηλής δυναμικής χρησιμοποιείται κυρίως η τεχνολογία *Image By Interferometric Survey* ή *IBIS* που διαφοροποιείται σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους μέτρησης των μετακινήσεων των κατασκευών και των παραμορφώσεων του εδάφους, τόσο σε στατικές (αργές μετατοπίσεις) όσο και σε δυναμικές μετρήσεις μετατοπίσεων/παραμορφώσεων. Για στατική παρακολούθηση γίνεται έλεγχος όσον αφορά τα φορτία των κατασκευών και έλεγχος πιθανών αστοχιών. Για τις εφαρμογές που απαιτούν δυναμική παρακολούθηση με τα συστήματα GBSAR ή RAR προσδιορίζεται η συμπεριφορά των κατασκευών σε πραγματικό χρόνο μετρώνας το φάσμα συχνοτήτων ταλάντωσης, την επιτάχυνση και τη μετατόπιση σημείων της κατασκευής.

1.4.3.α IBIS

Η τεχνική IBIS (Image By Interferometric Survey) είναι μια τεχνική που βασίζεται στο ραντάρ GB-SAR και δημιουργήθηκε από την εταιρία IDS (Ingegneria dei Sistemi S.p.A., Pisa). Υπάρχουν δύο διαφορετικές τεχνικές IBIS: IBIS-S η οποία είναι για δυναμικά φαινόμενα και η IBIS-L, η οποία χρησιμοποιείται κυρίως για στατικά φαινόμενα. Ο αισθητήρας ραντάρ για την λήψη και μετάδοση του σήματος της κεραίας είναι τοποθετημένος σε τρίποδο έτσι επιτυγχάνεται μόνο ανάλυση της εμβέλειας αλλά είναι δυνατή υψηλή συχνότητα δειγματοληψίας (μέχρι 200 Hz).

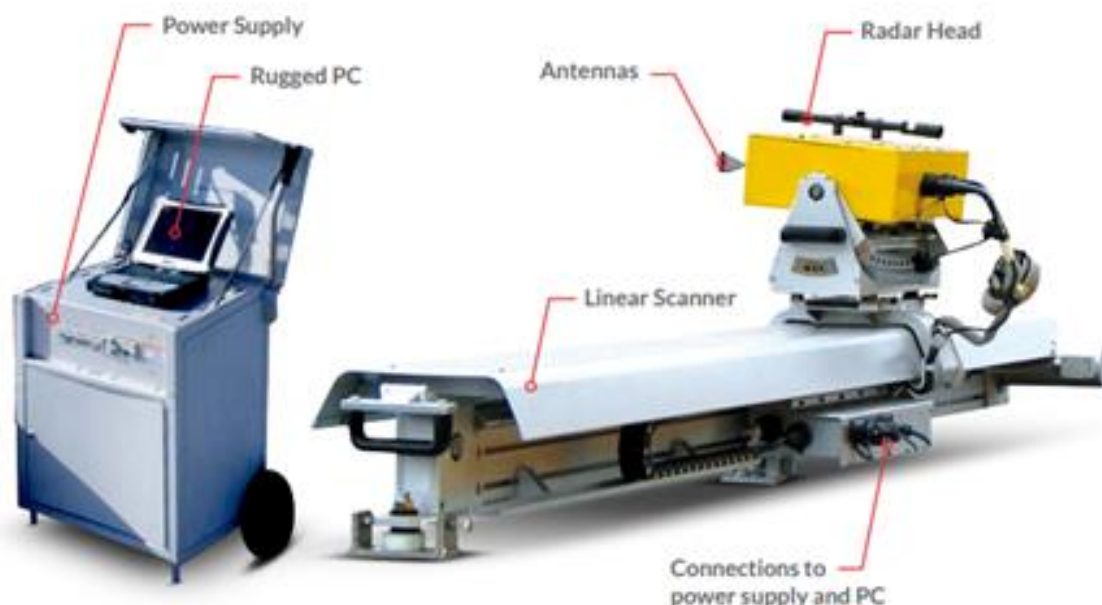
Συμπεραίνοντας η τεχνική IBIS είναι κατάλληλη για τις εξής εφαρμογές:

- Παρακολούθηση δομικής κατάστασης δομών όπως γέφυρες, ψηλά κτίρια.
- Προσδιορισμός των ιδιομορφών και ιδιοσυχνοτήτων της κατασκευής.
- Παρακολούθηση των δραστηριοτήτων εξόρυξης, καθιζήσεων εδάφους ή φράγματος.
- Παρακολούθηση αστοχιών σε περιβάλλον φυσικού εδάφους, ηφαίστεια, κατολισθήσεις.
- Δημιουργία Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους στην περίπτωση της τεχνικής IBIS-L, που το ραντάρ συνθετικού ανοίγματος κινείται κατά μήκος μιας γραμμής (Σχήμα 1.11).



Σχήμα 1. 12: Τεχνική IBIS-S

Figure 1.12: IBIS-S method



Σχήμα 1. 13: Το σύστημα IBIS-L: αποτελείται από τον αισθητήρα ραντάρ GBSAR τοποθετημένο σε έναν γραμμικό σαρωτή ο οποίος έχει υποδοχή για ηλεκτρικό ρεύμα και για επεξεργασία έχει την δυνατότητα να συνδεθεί με Η/Υ υπολογιστή.

(Πηγή: Γκίκας, 2016)

Figure 1.13: The system of IBIS-L: consists of the radar sensor GBSAR placed to a linear scanner which has power supply and can also connect with a computer for processing

(Πηγή: www.idsgeoradar.com)

Πλεονεκτήματα της μεθόδου:

- Υψηλή ακρίβεια μέτρησης: Παρουσιάζει ακρίβεια μετακινήσεων έως 1/10 mm.
- Υψηλή συχνότητα δειγματοληψίας: Συχνότητα δειγματοληψίας έως 200 Hz.
- Απομακρυσμένη λειτουργία: είναι σαφώς ένα πλεονέκτημα έναντι μιας ποικιλίας αισθητήρων και οργάνων παρακολούθησης που απαιτούν πρόσβαση στην προς μελέτη δομή. Ειδικά σε περιπτώσεις κατολισθήσεων, ηφαιστειών κ.τ.λ. που η προσβασιμότητα είναι αδύνατη
- Ευελιξία στην χρήση του: Έχει την δυνατότητα να δουλεύει καθόλη την διάρκεια της μέρας εφόσον είναι ανεξάρτητο από το φως του ήλιου αλλά και σε συνθήκες περιορισμένης ορατότητας (ομίχλη, νεφών, βροχής)
- Ταυτόχρονη παρακολούθηση όλων των στόχων μέσα στην ακτίνα με υψηλή ακρίβεια και χωρική ανάλυση: Τα περισσότερα όργανα έχουν περιορισμό είτε στην παροχή υψηλής ακρίβειας είτε αποτελέσματα σε υψηλή χωρική ανάλυση, ενώ το IBIS-L παρέχει και τα δύο. Λόγω

περιορισμών του κόστους, συχνά δεν είναι δυνατή η κάλυψη ολόκληρης της δομής με όργανα υψηλής ακρίβειας, ενώ το IBIS-L μπορεί να παρακολουθεί τις μετατοπίσεις εντός της διεύθυνσης της δέσμης του ραντάρ ταυτόχρονα με επίτευξη ακρίβειας έως και 0,1- 1 mm ανάλογα με την απόσταση οργάνου-στόχου

Μειονεκτήματα της μεθόδου:

- Η ακρίβεια μέτρησης εξαρτάται από την ανακλαστικότητα στόχου: Οι πλάγιες επιφάνειες που καλύπτονται εξ ολοκλήρου από βλάστηση ή δομές χωρίς σημεία αντανάκλασης είναι αδύνατο να σαρωθούν χωρίς πρόσθετους τεχνητούς ανακλαστήρες.
- Ατμοσφαιρική καθυστέρηση: Ένας από τους περιοριστικούς παράγοντες για την ακρίβεια της τεχνικής είναι η ατμόσφαιρα. Σε μακροπρόθεσμη παρακολούθηση, η ατμοσφαιρική καθυστέρηση πρέπει να διορθωθεί, γεγονός που καθιστά αναγκαία την ύπαρξη επιπλέον αισθητήρων και / ή σταθερών στόχων στην περιοχή που παρακολουθείται. Για μικρούς χρόνους παρατήρησης η επίδραση της ατμόσφαιρας δεν επηρεάζει την ακρίβεια των μετρήσεων.
- Μετατοπίσεις LOS (Line Of Sight): Η παρακολούθηση των μετακινήσεων περιορίζεται στις μονοδιάστατες μετατοπίσεις. Έτσι, πρέπει να υπάρχουν κάποιες γνώσεις ή παραδοχές εάν από τις μετατοπίσεις LOS προκύπτουν οριζόντιες ή κατακόρυφες μετατοπίσεις.
- Πολλές φορές όταν η εφαρμογή απαιτεί πολύ υψηλή ακρίβεια μπορεί να χρειαστεί να εγκατασταθούν ανακλαστήρες σε συγκεκριμένα σημεία ελέγχου. Αυτή η τεχνική μειώνει το θόρυβο του σήματος λόγω της καλύτερης ανακλαστικότητας. Η συγκεκριμένη διαδικασία όμως αναιρεί τον πλεονέκτημα της μέτρησης χωρίς να χρειάζεται η εγκατάσταση στόχου στην κατασκευή.

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

Ο Ρομποτικός Γεωδαιτικός Σταθμός ή Ρομποτικός Θεοδολικός (RTS-Robotic Total Station), χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση μετακινήσεων κτιρίων και εδάφους κυρίως κατά την διάρκεια κατασκευής σηράγγων και ορυχείων, αλλά και παρακολούθηση της δομικής κατάστασης και συμπεριφοράς γεφυρών και φραγμάτων. Το RTS βασίζεται στις αρχές του κοινού γεωδαιτικού σταθμού με επιπλέον χαρακτηριστικό ότι παρέχει την δυνατότητα προγραμματισμού ανίχνευσης και παρακολούθησης στόχου (ανακλαστήρες) με συχνότητα καταγραφής έως και 10 Hz.



Σχήμα 1. 10: Ρομποτικός Γεωδαιτικός Σταθμός – Leica TS16, Leica Geosystems

Figure 1.10: Robotic Total Station – Leica TS16, Leica Geosystems
(Πηγή: www.leica-geosystems.com)

Η λειτουργία του RTS στηρίζεται στο σερβοκινητήρα και σε ένα μικρο-επεξεργαστή που διαθέτει και του επιτρέπουν να πραγματοποιεί είτε προγραμματισμένες σκοπεύσεις, είτε παρακολούθηση και μέτρηση των συντεταγμένων του κινητού στόχου. Το όργανο εκπέμπει μια δέσμη laser η οποία ανακλάται στον στόχο και επανέρχεται στο ρομποτικό γεωδαιτικό σταθμό (Σχήμα 1.10). Η αρχή εντοπισμού σημείων στο χώρο με πολικές συντεταγμένες επιτυγχάνεται μέσω μετρήσεων αποστάσεων και γωνιών και τη βοήθεια ειδικής διάταξης κάμερας CCD (Charge Couple Devise). Στην συνέχεια, υπολογίζονται οι πολικές συντεταγμένες του στόχου σε τοπικό σύστημα συντεταγμένων με την βοήθεια ενός Η/Υ υπολογιστή. Επίσης πλήθος τέτοιων οργάνων διαθέτουν τη δυνατότητα αυτόματης αναγνώρισης του στόχου ATR (Automatic Target Recognition).

Επίσης ο σερβομηχανισμός αυτός επιτρέπει την αυτόματη αναστροφή-περιστροφή του οργάνου και αναγνώριση του στόχου που είχε σκοπευθεί στην 1^η θέση με την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του να είναι της τάξης του 180 degrees/sec, [Leica Geosystems].



Σχήμα 1.11: Εφαρμογή για παρακολούθηση γέφυρας με την χρήση Ρομποτικού γεωδαιτικού σταθμού.

Figure 1.11: Implementation of bridge monitoring with the Robotic total station.

(Πηγή: Psimoulis & Stiros, 2007)

Τα συστήματα RTS, χάρη στη λειτουργία αλλά και την υψηλή συχνότητα καταγραφής (έως 10 Hz) είναι αρκετά δημοφιλή στις εφαρμογές παρακολούθησης δυναμικών μετακινήσεων κατασκευών.

1.4.4 Επίγειοι σαρωτές Laser

Οι σαρωτές laser (Terrestrial Laser scanner), χρησιμοποιούνται ευρέως τα τελευταία χρόνια σε πλειάδα εφαρμογών για παρακολούθηση τεχνικών έργων. Ουσιαστικά, προσδιορίζουν τις θέσεις σημείων σε τρεις διαστάσεις ως προς ένα τοπικό σύστημα αναφοράς, μετρώντας την απόσταση, την κατακόρυφη και την οριζόντια γωνία προς αυτά. Όλα τα όργανα αυτής της κατηγορίας, εκτός από τις πολικές συντεταγμένες, μετρούν και την ανακλαστικότητα του κάθε σημείου, ενώ έχουν τη δυνατότητα λήψης ψηφιακών φωτογραφιών της περιοχής ή του αντικειμένου που αποτυπώνεται. Τα δεδομένα συλλέγονται ως ομοιόμορφα κατανεμημένα 3D έγχρωμα (RGB) ή *gray-scaled* (ανάλογα με την ένταση του ανακλώμενου σήματος) σημεία με την επιθυμητή πυκνότητα (ανάλυση), το σύνολο των οποίων αποτελεί ένα νέφος σημείων (*point cloud*). Το πλήθος των σημείων που λαμβάνονται σε μία σάρωση εξαρτάται από τη γωνιακή ανάλυση του οργάνου, η οποία είναι συνάρτηση του γωνιακού βήματος των κινητήρων που περιστρέφουν τη μετρητική κεφαλή γύρω από τον οριζόντιο και τον

κατακόρυφο άξονα,
ανάλυση του δίσκου
τοποθετηθεί στον

Η λειτουργία τους
αντανάκλαση μιας
σαρώνει το
αποτύπωσης με
καταγραφής στα
όπως το Leica RTC360



καθώς και από την
κώδικα *Gray* που έχει
κάθε άξονα.

στηρίζεται στην
ακτίνας laser που
αντικείμενο
συχνότητα
σύγχρονα όργανα
έως δύο εκατομμύρια

σημεία ανά δευτερόλεπτο και μπορεί να επιτευχθεί ακρίβεια μέτρησης της τάξης του χιλιοστού.

Διαχωρίζονται σε πολλές κατηγορίες: επαφής και μη επαφής με το αντικείμενο προς σάρωση, παθητικοί και ενεργητικοί.

Οι ενεργητικοί σαρωτές TLS μη επαφής χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

- **Σαρωτές time-of flight (ToF)**, διαμόρφωσης φέροντος κύματος ή παλμού: Οι συγκεκριμένοι σαρωτές μετρούν την διαφορά χρόνου μεταξύ εκπεμπόμενου & λαμβανόμενου σήματος από τον σαρωτή. Είναι σχετικά αργοί στο πεδίο με συχνότητα καταγραφής 40 -50.000 σημεία/sec και η εμβέλεια τους είναι έως και εκατοντάδες μέτρα ή λίγα χιλιόμετρα .
- **Σαρωτές διαφοράς φάσης - Phase shift**: Πραγματοποιούν μέτρηση της διαφοράς φάσης μεταξύ εκπεμπόμενου και λαμβανόμενου σήματος από τον σαρωτή. Η συχνότητα καταγραφής σημείων είναι αρκετά γρήγορη καταγράφοντας έως και 1000K σημεία/sec. Ένα μειονέκτημα τους είναι η μειωμένη τους εμβέλεια η οποία είναι περίπου 70 m.

Σχήμα 1. 14: Επίγειος σαρωτής Leica ScanStation C10.

Figure 1.14: Terrestrial laser scanner Leica ScanStation C10.
(Πηγή: www.leica-geosystems.com)



Σχήμα 1.15: Επίγειος σαρωτής διαφοράς φάσης Leica RTC360.

Figure 1.15: Terrestrial phase-shift laser scanner Leica RTC360.
(Πηγή: www.leica-geosystems.com)

- Σαρωτές τριγωνισμού- Triangulation Scanners:** Χρησιμοποιούν και αυτοί οι σαρωτές laser για την σάρωση της προς μετρούμενης επιφάνειας, αλλά, σε αντίθεση με τις προηγούμενες μεθόδους οι συγκεκριμένοι σαρωτές χρησιμοποιούν την ακτίνα laser για να «φωτίσουν» σημεία πάνω στο αντικείμενο και μία ή δύο κάμερες CCD για να εντοπίσουν τα σημεία που φωτίζει κάθε φορά η ακτίνα. Η ονομασία του προήλθε από το τρίγωνο που σχηματίζεται μεταξύ του πομπού laser, της δέσμης laser προβαλλόμενη στο αντικείμενο και την κάμερα CCD. Έχει την δυνατότητα επίτευξης υψηλής ακρίβειας σε μικρές αποστάσεις από το αντικείμενο αλλά προκαλούνται προβλήματα σε περιπτώσεις φαινομένων σκιών λόγω απόστασης πομπού και δέκτη.

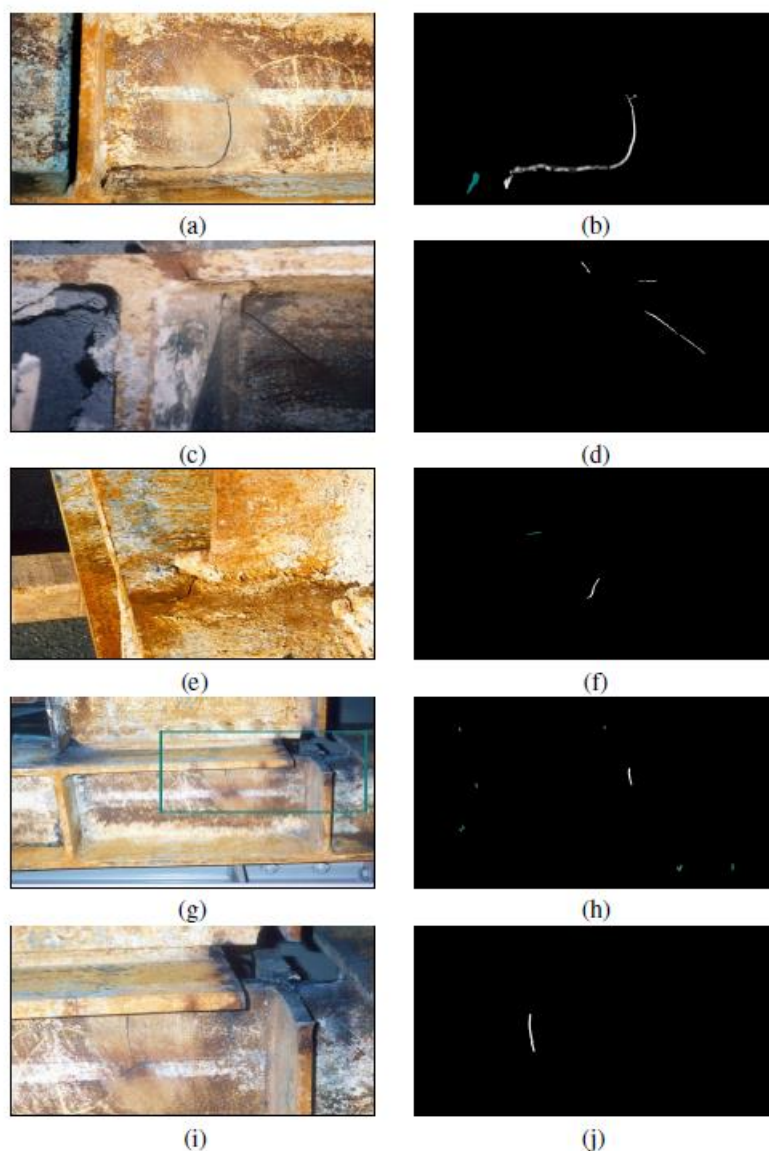


Σχήμα 1. 16: Σαρωτής τριγωνισμού, Konica Minolta VI-910.
Figure 1.16: Triangulation Scanner, Konica Minolta VI-910.

(Πηγή: www.konicaminolta.com)

1.4.5 Μέθοδος βασισμένη σε ψηφιακές εικόνες (image-based measurement method)

Αυτή η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί σε μεγάλο εύρος πεδίων για τη μέτρηση σε τρεις διαστάσεις της γεωμετρίας των κατασκευών από τις φωτογραφίες σε δύο διαστάσεις. Για την εφαρμογή της μεθόδου γίνεται χρήση καμερών για την καταγραφή ψηφιακών εικόνων μιας κατασκευής, οι οποίες αργότερα αναλύονται χρησιμοποιώντας εξελιγμένες τεχνικές επεξεργασίας εικόνας όπως η συσχέτιση ψηφιακών εικόνων. Οι μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ποσοτικοποίηση των μετατοπίσεων σε γέφυρες βασίζονται σε τεχνικές ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας και μπορούν να υποδεικνύουν τη θέση, τον αριθμό και τους τύπους των σχημάτων σε μια γέφυρα και αυτές οι πληροφορίες μπορούν να συνδυαστούν με μετρήσεις δομικής απόκρισης για ανίχνευση αστοχιών (Σχήμα 1.16). Επίσης, αυτές οι τεχνικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να καταγράψουν τις επιδράσεις των συνθηκών περιβάλλοντος και, ειδικότερα, αυτών που οφείλονται σε μεταβολές της θερμοκρασίας.



Σχήμα 1. 17: Παραδείγματα ρωγμών σε πραγματικές δομές στα οποία εφαρμόστηκαν μέθοδοι επεξεργασίας εικόνας όπως κατάτμηση.

Figure 1.17: Examples of cracks in real structures where image segmentation is applied

(Πηγή: Jahanshahi, 2011)

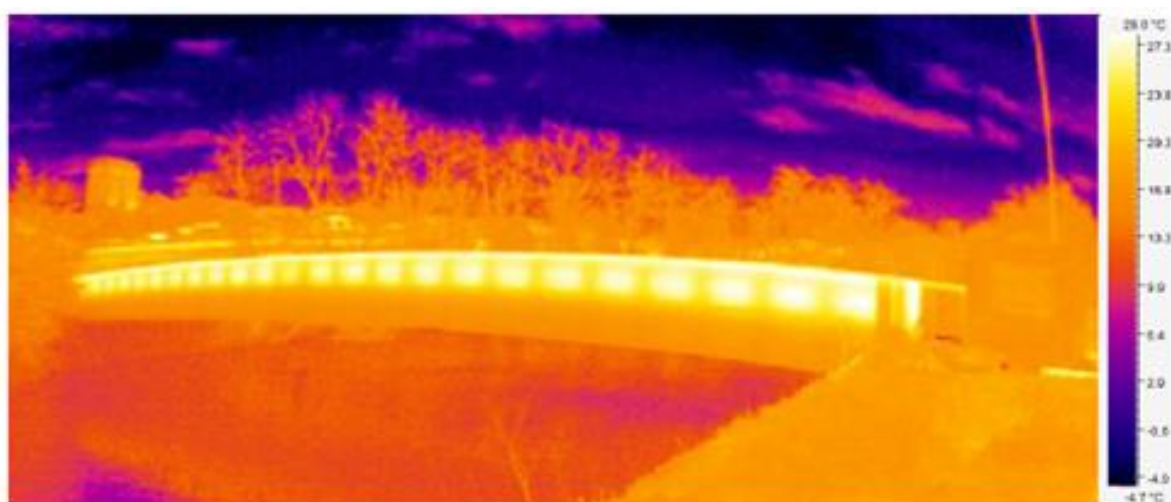
Υπάρχουν δύο ειδών κάμερες:

Οπτικές κάμερες (βίντεο / Σχήμα): Οι οπτικοί αισθητήρες είναι οι πιο συνηθισμένοι αισθητήρες και χρησιμοποιούνται ευρέως για σκοπούς ψηφιακής τηλεπισκόπησης. Η φασματική περιοχή αυτών των αισθητήρων είναι στο ορατό φάσμα, με άλλα λόγια, από μήκη κύματος 390 nm έως 700 nm.

Θερμικές κάμερες υπέρυθρης ακτινοβολίας (TIR): Οι θερμικές κάμερες μπορούν να μετρήσουν την εκπεμπόμενη ενέργεια μιας επιφάνειας και να την μετατρέψουν σε θερμοκρασία. Υπάρχουν δύο προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται: παθητική και ενεργή. Η παθητική προσέγγιση βασίζεται στις θερμικές ιδιότητες μόνο του υλικού και των δομών, οι οποίες έχουν διαφορετική θερμοκρασία από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Στην ενεργή χρησιμοποιείται μια εξωτερική πηγή θερμότητας / ψύξης για να διεγείρει την επιφάνεια του υλικού, επιτρέποντας στους αισθητήρες TIR να βρουν τη διαφορά την θερμική υπογραφή των δειγμάτων σε διαφορετικές θέσεις. Αποτελεί μια καθιερωμένη μέθοδος για την ανίχνευση “ζημιών” σε κατασκευές.

Μια φωτογραφική μηχανή θερμικής απεικόνισης (TIC) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση των κατανομών θερμοκρασίας σε γέφυρα πλήρους κλίμακας. Η θερμική εικόνα μιας χαλύβδινης γέφυρας παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.18.



Σχήμα 1. 18: Θερμική εικόνα της γέφυρας

Figure 1.18: Thermal image of the bridge

(Πηγή: Jahanshahi, 2011)

Προς το παρόν, οι τεχνολογίες βασισμένες σε ψηφιακές εικόνες χρησιμοποιούνται κυρίως για περιοδική παρακολούθηση.

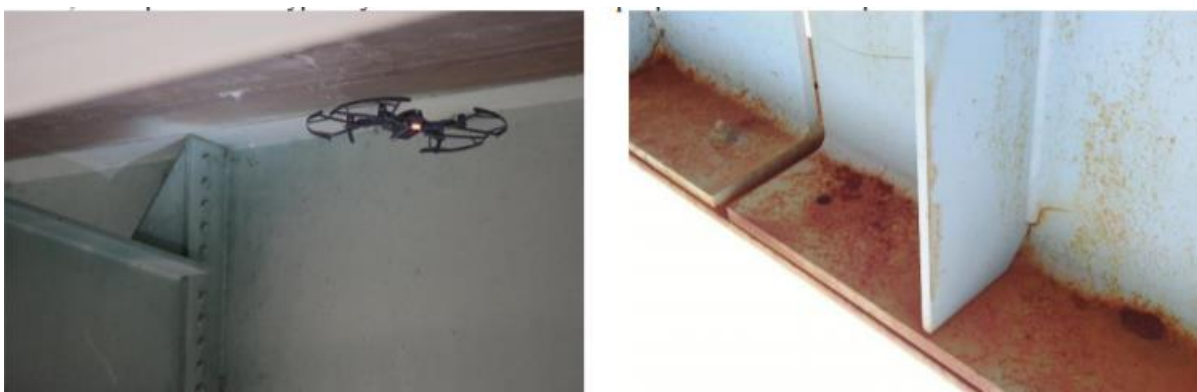
1.4.6 Άλλοι μέθοδοι (UAV -Drones)

Με την ονομασία **UAV** (unmanned aerial vehicles = μη επανδρωμένα αεροσκάφη) τα συστήματα αυτά τα τελευταία 10 χρόνια για εφαρμογές Ενόργανης παρακολούθησης Δομικών δομών. Στο παρελθόν, ο μόνος τρόπος να πραγματοποιηθεί επιθεώρηση στο κάτω μέρος της γέφυρας, ήταν να επιστρατευτούν ειδικές κατασκευές στήριξης του προσωπικού, είτε αναρριχητές που θα αναλάμβαναν το δύσκολο και επικίνδυνο έργο.

Τώρα, με ένα ή περισσότερα κατάλληλα εξοπλισμένα μη επανδρωμένα αεροσκάφη, η επιθεώρηση της γέφυρας μπορεί να διεξαχθεί γρήγορα, με ασφάλεια και ακρίβεια.

Τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη είναι εξοπλισμένα με κάμερες υψηλής ανάλυσης με απόδοση σε χαμηλό φωτισμό ή με φωτισμό που παρέχει το ίδιο το σκάφος.

Η σύνδεση βίντεο σε πραγματικό χρόνο επιτρέπει στο χειριστή να ελέγχει το drone αποτελεσματικά και με ασφάλεια. Οι μη επανδρωμένες / αυτοματοποιημένες προσεγγίσεις επιθεώρησης και συντήρησης σε βιομηχανίες υψηλής τεχνολογίας αποτελούν την καλύτερη επιλογή για την επίτευξη ελάχιστης αποτυχίας και βέλτιστου επιπέδου συντήρησης. Οι μη επανδρωμένες / αυτοματοποιημένες μέθοδοι έχουν τη δυνατότητα βελτίωσης και αυτοματοποίησης του ελέγχου των τεχνικών κατασκευών.



Σχήμα 1. 17: Παραδείγματα εφαρμογών UAV για παρακολούθηση δομικής κατάστασης γέφυρας

Figure 1.19: Examples of UAV applications for health structure monitoring of bridges
(Πηγή: Darshan, 2018)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Γενική επισκόπηση γεφυρών

Το Κεφάλαιο 2 περιλαμβάνει μια γενική επισκόπηση των γεφυρών. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται τα κύρια τμήματα από τα οποία αποτελείται μια γέφυρα, περιγράφονται οι διαφορετικές κατηγορίες γεφυρών καθώς και τα συνήθη συστήματα παρακολούθησης και διαχείρισης γεφυρών (bridge management system).

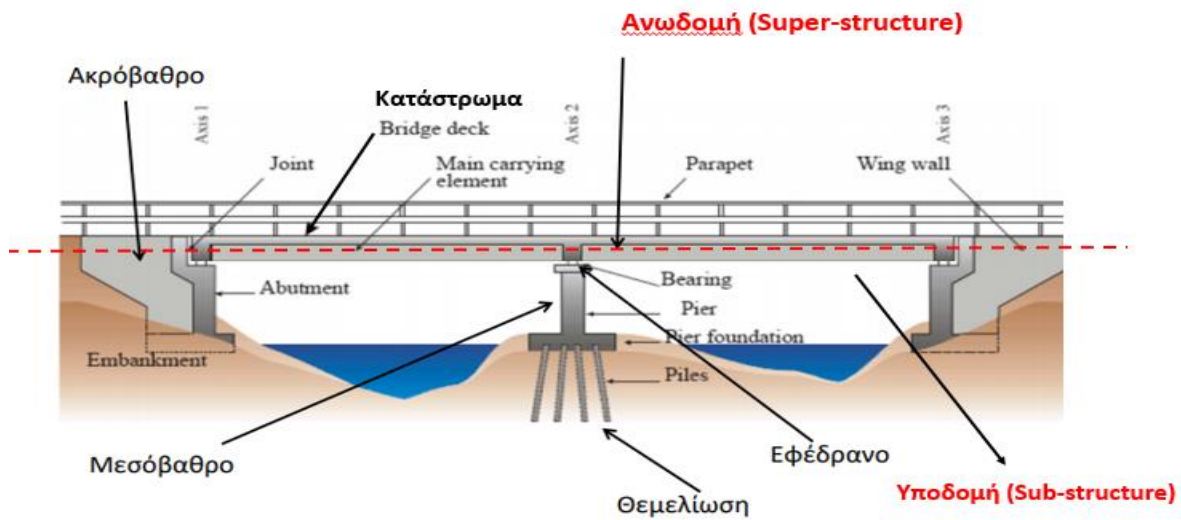
2.1 Ορισμός της γέφυρας

Γέφυρα είναι το τεχνικό έργο που αποκαθιστά τη συνέχεια μιας συγκοινωνιακής αρτηρίας (οδός, σιδηρόδρομος, πεζόδρομος) που διακόπτεται από φυσικό ή τεχνητό εμπόδιο. Τα υλικά που μπορεί να χρησιμοποιηθούν τις κατατάσσουν σε γέφυρες από ξύλο, από τοιχοποιία, από σίδηρο, από οπλισμένο σκυρόδεμα ή σύμμικτες κατασκευές.

2.2 Κύρια τμήματα γεφυρών

Τα τμήματα από τα οποία αποτελείται μια γέφυρα κατηγοριοποιούνται αρχικά, με την σπουδαιότητά τους, αλλά και με την θέση στην οποία βρίσκονται στην γέφυρα. Αρχικά, η γέφυρα χωρίζεται σε δύο βασικά τμήματα, την Ανωδομή (Super-structure) και την Υποδομή (Sub-structure).

Στα βασικά προαναφερθέντα τμήματα συμπεριλαμβάνονται δομικά και μη δομικά στοιχεία, ως δομικά, νοούνται στοιχεία, των οποίων ύπαρξη είναι απαραίτητη και οποιαδήποτε αστοχία θέτει σε κίνδυνο την «ζωή» της γέφυρας και μη δομικά είναι τα στοιχεία, των οποίων η αστοχία τους μπορεί να προκαλέσει δυσλειτουργία της γέφυρας, χωρίς όμως να θέτει σε κίνδυνο την ίδια την γέφυρα.



Σχήμα 2. 1: Τμήματα από τα οποία αποτελείται η γέφυρα

Figure 2.1: Main parts of the bridge

(Πηγή: Μπισκίνης, 2016)

Στην ανωδομή περιλαμβάνονται τα εξής στοιχεία:

i) Κατάστρωμα (bridge deck)

Κατασκευάζεται συνήθως από οπλισμένο ή σύμμικτο σκυρόδεμα το οποίο μπορεί να είναι συνεχές διακοπτόμενο και μπορεί να πάρει διάφορες σχεδιαστικές μορφές. Πάνω στο κατάστρωμα τοποθετείται το υλικό επίστρωσης (ασφαλτικό υλικό, γεωυφάσματα κτλ) το είδος του οποίου εξαρτάται από το είδος της χρήσης της γέφυρας.

Το κατάστρωμα αποτελείται συνήθως από δύο μέρη, από την πλάκα (deck slab), πάνω στην οποία τοποθετείται το υλικό επίστρωσης, και από τους δοκούς (beams, girders), οι οποίοι στηρίζονται στα βάθρα και πάνω στους οποίους τοποθετείται πλάκα. Στην συνέχεια με τον όρο κατάστρωμα θα εννοούμε τα δύο στοιχεία: Πλάκα καταστρώματος (deck slab) και Δοκοί (beams, girders).

ii) Αρμοί συστολής και διαστολής (expansion joints)

Είναι μηχανισμοί που βρίσκονται στην ανωδομή και συγκεκριμένα στα σημεία ασυνέχειας του καταστρώματος. Οι αρμοί μπορεί να είναι έγχυτης μορφής προκατασκευασμένοι από χάλυβα και ελαστικό υλικό. Επίσης, στην ανωδομή μπορούμε να συναντήσουμε και άλλα στοιχεία, όπως το υλικό επίστρωσης του καταστρώματος, τα πεζοδρόμια, τα στηθαία, το δίκτυο

απορροής του βρόχινου νερού, τις πινακίδες σήμανσης, τα μέσα φωτισμού και τυχόν δίκτυα (καλώδια σωλήνες).

Στην υποδομή παρατηρούνται τα παρακάτω στοιχεία:

i. Ακρόβαθρα (abutments).

Τα ακρόβαθρα είναι κατασκευές πάνω στις οποίες στηρίζεται η αρχή και το τέλος της ανωδομής. Κατασκευάζονται συνήθως από οπλισμένο σκυρόδεμα και το μέγεθος καθώς και το σχήμα τους μπορεί να πάρει πολλές μορφές ανάλογα με τις διαστάσεις και τη χρήση του φορέα της γέφυρας. Συνήθως τα ακρόβαθρα διαθέτουν πτερυγότοιχους (wing walls) που εκτείνονται δεξιά και αριστερά του ακροβάθρου με σκοπό να συγκρατήσουν το μεταβατικό επίχωμα.

ii. Μεσόβαθρα (column, piers, bent)

Στα μεσόβαθρα στηρίζεται η ανωδομή ανάμεσα στα ακρόβαθρα. Η ύπαρξή και το πλήθος αυτών εξαρτάται από το μέγεθος της γέφυρας και τις συνθήκες στήριξης που απαιτούνται. Κατασκευάζονται από οπλισμένο σκυρόδεμα και μπορούν να πάρουν πολλές μορφές. Τα μεσόβαθρα ενδέχεται να μην υπάρχουν σε γέφυρες μικρών διαστάσεων λ , ενώ κάποια από τα μη δομικά στοιχεία, όπως το υλικό επικάλυψης και τα στηθαία τα συναντάμε σε όλες τις γέφυρες.

iii. Εφέδρανα (bearings)

Τα εφέδρανα είναι μηχανικά συστήματα που βρίσκονται ανάμεσα στο κατάστρωμα και τα βάθρα και μεταφέρουν τις δυνάμεις και μετατοπίσεις της ανωδομής στην υποδομή. Οι μετατοπίσεις που παραλαμβάνουν οφείλονται σε συστολές και διαστολές του καταστρώματος λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών, είτε λόγω εξωτερικών παραγόντων όπως σεισμοί και καθιζήσεις. Τα εφέδρανα μπορεί να είναι μεταλλικές κατασκευές (χάλυβας κράματά του) ή και συνδυασμό χάλυβα με κάποιο ελαστικό υλικό.

Επίσης, στην υποδομή ανήκει και η θεμελίωση της γέφυρας, η οποία εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, σημαντικότεροι των οποίων είναι το έδαφος (ποιότητα του εδάφους, σεισμική επιτάχυνση, υδροφόρος ορίζοντας) αλλά και οι τελικές διαστάσεις της γέφυρας.

2.2 Τύποι γεφυρών

Οι γέφυρες με βάση ορισμένα κριτήρια χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες, οι κυριότερες από τις οποίες είναι οι ακόλουθες, [Ερμόπουλος Ι. Χ., 2004]:

- **Ανάλογα την χρήση του φορέα:** οδικές, σιδηροδρομικές, μικτές, πεζογέφυρες, γέφυρες αγωγών, γερανογέφυρες.
- **Ανάλογα με το υλικό κατασκευής:** οπλισμένου ή προεντεταμένου σκυροδέματος, χαλύβδινες, σύμμικτες, μεταλλικές.
- **Ανάλογα με την μέθοδο κατασκευής:** συμβατική, προωθούμενοι-αυτοφερόμενοι δοκοί, προβολοδόμηση, σταδιακή προώθηση, προκατασκευασμένοι δοκοί.
- **Ανάλογα με το είδος του φορέα:** πλακογέφυρες, μορφής πλακοδοκού, κιβωτοειδούς διατομής, πλαισιωτές, τοξωτές, κρεμαστές, καλωδιωτές.
- **Ανάλογα με την γεωμετρική χάραξη του άξονα:** ευθύγραμμες ή καμπύλες, οριζόντιες ή κεκλιμένες.

Στην συνέχεια γίνεται πιο εκτενής αναφορά σε κάποια από τα προαναφερθέντα είδη γεφυρών και θα επισημανθούν τα βασικά τους χαρακτηριστικά:

- **Τοξωτές γέφυρες**

Οι τοξωτές γέφυρες έχουν στηρίγματα σε κάθε άκρο και είναι σε μορφή τόξου. Το βάρος της γέφυρας μεταφέρεται και ωθεί τα βάθρα σε κάθε πλευρά. Στην Ελλάδα η Τοξωτή Γέφυρα Τσακώνας, είναι μια από τις μεγαλύτερες τοξωτές γέφυρες. Διασχίζει την Κοιλάδα της Τσακώνας και συνδέει μια επικίνδυνη τοποθεσία κοντά στη Μεγαλόπολη, όπου τα τελευταία χρόνια υπήρξαν πολλές κατολισθήσεις.



Σχήμα 2. 2: Γέφυρα Τσάκωνα

Figure 2.2: Tsakona bridge
(Πηγή: eclass.pat.teiwest.gr)

- **Κρεμαστές γέφυρες**

Στις κρεμαστές γέφυρες τα καλώδια σηκώνουν το βάρος του καταστρώματος κάθετα ως προς το φορέα της. Η χρήση τους είναι ευρεία σε περιπτώσεις διάβασης υδάτινων εμποδίων τα οποία διασχίζονται από πλοία. Έχουν μεγάλη ευαισθησία στις δυναμικές ταλαντώσεις. Η πιο γνωστή κρεμαστή γέφυρα αυτού του τύπου είναι η Golden Gate στο Σαν Φρανσίσκο, [el.wikipedia.org].



Σχήμα 2. 3: Γέφυρα Γκόλντεν Γκέιτ, Golden Gate Bridge, Σαν Φρανσίσκο
Figure 2.3: Golden Gate bridge, San Francisco
(Πηγή: Wikipedia.org)

- **Καλωδιωτές γέφυρες**

Οι καλωδιωτές γέφυρες έρχονται ουσιαστικά να καλύψουν το κενό μεταξύ των κρεμαστών γεφυρών και των συμβατικά κατασκευασμένων γεφυρών. Τα καλώδια σε αυτό τον τύπο γέφυρας είναι λοξά ή κατακόρυφα ως προς το κατάστρωμα. Η οικονομικότητα της κατασκευής μεγιστοποιείται για ανοίγματα της τάξης των 150 - 800 m. Από εκεί και πάνω (>1500m) επιλέγεται συνήθως κρεμαστός φορέας. Το στατικό σύστημα παίζει πρωταρχικό ρόλο. Τα βασικά στατικά συστήματα στις αναρτημένες από ευθύγραμμα καλώδια γέφυρες είναι ουσιαστικά τρία:

- Κατάστρωμα μεγάλης δυσκαμψίας αναρτώμενο από λίγα καλώδια σε συνδυασμό με μικρών διαστάσεων λιγυρούς πυλώνες.
- Πυλώνες μεγάλης δυσκαμψίας που δύνανται να αναλάβουν μεγάλες ροπές σε συνδυασμό με ελαφρύ κατάστρωμα, στηριζόμενο από πολλά καλώδια.
- Αγκυρωμένα σε ακρόβαθρα καλώδια τα οποία διέρχονται από την κορυφή των (εύκαμπτων) πυλώνων και αναρτούν το κατάστρωμα.



Σχήμα 2. 4: Γέφυρα Ρίου-Αντιρρίου, Πάτρα, Ελλάδα

Figure 2.4: Rio Antirion bridge, Patra, Greece
(Πηγή: <http://www.gefyra.gr>)

- **Σύμμικτες γέφυρες**

Οι σύμμικτες κατασκευές είναι κατασκευές από συνεργαζόμενα στοιχεία χάλυβα και σκυροδέματος στα οποία έχει εξασφαλιστεί η συνεργασία των δύο υλικών και η διαμήκης διατμητική τους σύνδεση με μηχανικά μέσα (διατμητικούς συνδέσμους) και όχι με συνάφεια, ώστε να αποφεύγεται η σχετική ολίσθηση στην διεπιφάνεια των υλικών και να διατηρείται η επιπεδότητα των διατομών στην καμπτική (κύρια) αλλά και την θλιπτική λειτουργία.

Στη σύμμικτη γεφυροποιία οι διατομές ποικίλουν. Οι μέθοδοι κατασκευής ξεκινούν από απλές εκτελέσεις πλάκας-δοκού και εκτείνονται μέχρι δύστροπες κιβωτοειδείς φορείς.

Οι σιδηρές διατομές που χρησιμοποιούνται, για μεγάλα ανοίγματα, είναι σχετικά λιγυρές, λεπτότοιχες και συχνά υπάγονται στις κατηγορίες 3 ή 4. Αυτό σημαίνει ότι σε πολλές περιπτώσεις τα εντατικά μεγέθη και τάσεις πρέπει να υπολογιστούν με ελαστική ανάλυση. Αυτό δεν ισχύει για το μεσαίο τμήμα του καταστρώματος, όπου ο χαλύβδινος φορέας βρίσκεται σε ζώνη εφελκυσμού: εδώ η φέρουσα ικανότητα της διατομής μπορεί να προσδιορισθεί και με πλαστική ανάλυση. Ωστόσο οι μεταβολές στις κατανομές των εντατικών μεγεθών οι οποίες προκύπτουν από τις ζώνες πλαστικής παραμόρφωσης στο μέσο τμήμα του φορέα, κατά κανόνα αγνοούνται.



Σχήμα 2. 5: Γέφυρα Fred Hartman, Τέξας, Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής
 Figure 2.5: Fred Hartman bridge, Texas, U.S. of America
 (Πηγή: <http://www.aecom.com>)

- **Γέφυρα σε δοκούς**

Η γέφυρα σε δοκούς αποτελείται από οριζόντιες αμφιαρθρωτές δοκούς που υποστηρίζονται στα άκρα τους με στηρίξεις. Όταν τα ανοίγματα είναι περισσότερα από ένα οι ενδιάμεσες υποστυλώσεις είναι γνωστές ως πυλώνες. Οι πρώτες γέφυρες σε δοκούς ήταν απλές κατασκευές που διαπερνούσαν ρέματα και ποτάμια. Στη σύγχρονη εποχή, οι γέφυρες σε δοκούς είναι μεγάλες γέφυρες από δοκούς χάλυβα και χαλύβδινα κιβώτια. Το βάρος ασκείται στο πάνω μέρος της δοκού και μεταφέρεται κατευθείαν προς τα άκρα και ωθεί προς τα κάτω τα βάθρα της γέφυρας. Αποτελείται κυρίως από ξύλο ή μέταλλο. Τα ανοίγματα αυτών των γεφυρών δεν υπερβαίνουν συνήθως τα 70 m ωστόσο το άνοιγμα της Rio-Niteroi Bridge, μιας γέφυρας με κιβωτοειδείς διατομή, είναι 300 m.

Η μεγαλύτερη γέφυρα σε δοκούς του κόσμου είναι η Lake Pontchartrain Causeway στη νότια Λουϊζιάνα στις Ηνωμένες Πολιτείες, μήκους 38,35 χιλιόμετρα, με επιμέρους ανοίγματα 17 m. Αυτός ο τύπος γεφυρών είναι πολύ διαδεδομένος στο σιδηροδρομικό δίκτυο της Ελλάδας.



Σχήμα 2. 6: Γέφυρα Lake Pontchartrain Causeway, Νότια Λουϊζιάνα

Figure 2.6: Lake Pontchartrain Causeway bridge, South Louisiana

(Πηγή: www.atlasobscura.com)

- **Κινητή Γέφυρα**

Οι γέφυρες αυτές σχεδιάστηκαν για να διευκολύνουν τη κυκλοφορία των πλοίων που υπό άλλες συνθήκες δεν θα χωρούσαν κάτω από τη γέφυρα λόγω του μεγάλου ύψους τους και κινούνται με ηλεκτρική ενέργεια.



Σχήμα 2. 7: Γέφυρα πορθμού Ευρίπου, Χαλκίδα, Ελλάδα

Figure 2.7: Euripou strait, Chalkida, Greece

(Πηγή: wikipedia.org)

2.3 Μεθοδολογίες Παρακολούθησης Γεφυρών

Οι γέφυρες, όπως κάθε τεχνικό έργο με την πάροδο του χρόνου επιδέχεται φθορών με αποτέλεσμα ο χρόνος ζωής του όσο και το επίπεδο εξυπηρέτησής του να μειώνεται συνεχώς. Η συστηματική παρακολούθηση της δομικής κατάστασης τέτοιων κατασκευών μπορεί να αποτρέψει ή και να αποκαταστήσει φθορές που οφείλονται στη γήρανση των υλικών κατασκευής, επιδράσεις περιβαλλοντικών συνθηκών (πχ διάβρωση), επίδραση λειτουργικών φορτίων καθώς και ατέλειες στην αρχική μελέτη και κακοτεχνίες κατά την διάρκεια της κατασκευής, [Ζυγούρης, 2006].

Υπάρχουν διάφορες τεχνικές παρακολούθησης της κατάστασης των γεφυρών. Στο Κεφάλαιο 1 αναφέρονται διεξοδικά οι μέθοδοι και τα όργανα για την Παρακολούθηση Δομικής Κατάστασης (ΠΔΚ). Ωστόσο, στο Κεφάλαιο αυτό θα διεξαχθεί εκτενέστερη ανάλυση αναφορικά με τα συστήματα παρακολούθησης αυτών.

Βασική αρχή στις τεχνικές παρακολούθησης αποτελεί ο οπτικός έλεγχος μέσω επιφανειακής επιθεώρησης των διαφόρων στοιχείων της κατασκευής και συμπλήρωσης κατάλληλων ερωτηματολογίων τα οποία μέσω βαθμολογίας συμβάλλουν στην αποτίμηση της δομικής κατάστασης της κατασκευής. Μια άλλη τεχνική είναι ο ενόργανος οπτικός έλεγχος, με τον οποίο η κατάσταση της κατασκευής τεκμηριώνεται μέσα από πειραματικά στοιχεία. Τέλος, ο τρίτος τρόπος παρακολούθησης γεφυρών ο οποίος στηρίζεται σε σύγχρονα τεχνολογικά μέσα, με κατάλληλη επεξεργασία των μετρητικών δεδομένων σε συνεργεία με αριθμητικά προσομοιώματα.

Τα στοιχεία που προκύπτουν από τους παραπάνω ελέγχους συγκεντρώνονται σε βάσεις δεδομένων, οι οποίες μετά από κατάλληλη επεξεργασία καταλήγουν στην τελική εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας της κατασκευής. Όλα τα δεδομένα αποθηκεύονται σε βάσεις δεδομένων.

2.3.1 Οπτικός Έλεγχος

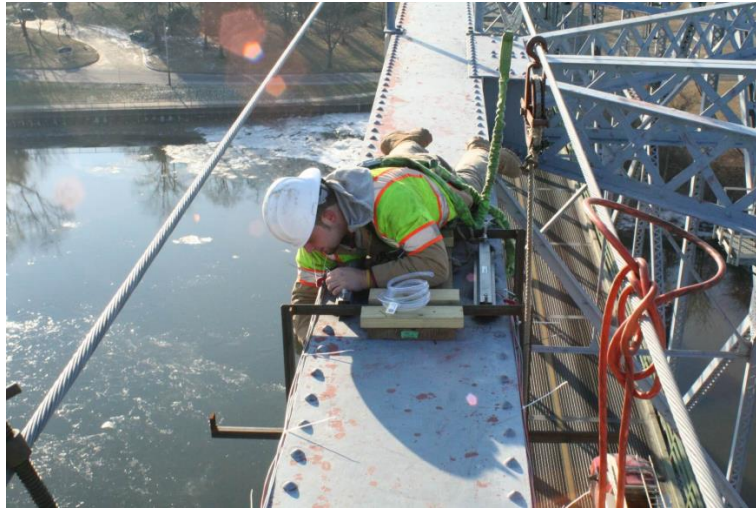
Ο οπτικός έλεγχος των γεφυρών περιλαμβάνει την επιφανειακή επιθεώρηση των διάφορων τμημάτων της γέφυρας προκειμένου να εντοπιστούν ενδείξεις πιθανών βλαβών ή φθορών της κατασκευής.

Στην συνέχεια, εφόσον βαθμολογηθούν τα υπό-εξεταζόμενα τμήματα της γέφυρας ανάλογα με την κατάστασή τους γίνεται αρχική αποτίμηση της κατάστασης της και αποφασίζονται οι εργασίες συντήρησης ή επισκευής της κατασκευής.

2.3.2 Έλεγχος με όργανα

Σε συνέχεια εξειδικευμένης μελέτης, συνεργείο με καταρτισμένο προσωπικό και εφοδιασμένο με τα απαραίτητα εργαλεία ορίζει τα σημεία ελέγχου. Επομένως προκύπτουν πειραματικά δεδομένα και η αποτίμηση των διαφόρων στοιχείων της γέφυρας τεκμηριώνεται εργαστηριακά. Ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι η σημαντική διασπορά τιμών που εμφανίζουν τα αποτελέσματα από τους ελέγχους, τα οποία όμως ελέγχονται στατιστικά και γι' αυτό τον λόγο απαιτείται πληθώρα μετρήσεων και σε διαφορετικά τμήματα της κατασκευής.

Όπως και κατά τις διαδικασίες οπτικού ελέγχου και σε αυτήν την μέθοδο χρησιμοποιούνται ερωτηματολόγια και συμπληρώνονται πίνακες με αποτέλεσμα τα εξαγόμενα στοιχεία να είναι τυποποιημένα και άμεσα συγκρίσιμα με παρόμοιους ελέγχους που διεξάγονται σε άλλες γέφυρες. Γίνεται, λοιπόν, χρήση διάφορων συσκευών όπως συστήματα υπερήχων, κρουσίμετρο, συσκευές ανίχνευσης θέσεως σπλισμού, συσκευές ανίχνευσης βαθμού διάβρωσης σπλισμού, σκληρόμετρα, διατάξεις τύπου “pull off ” κ.α., τα οποία συνεισφέρουν με μετρήσεις προκειμένου να διεξαχθεί μια εικόνα για την κατασκευή και να συγκριθεί με τα αποτελέσματα οπτικού ελέγχου, τα κατασκευαστικά σχέδια και τις προδιαγραφές του σχεδιασμού της.



Σχήμα 2. 8: Εγκατάσταση οπτικών ινών στον φορέα της γέφυρας.

Figure 2.8: Installation of fiber optic sensor on the deck of the bridge.
(Πηγή: www.iisengineering.com)

2.3.3 Συστήματα Ενόργανης Παρακολούθησης Γεφυρών

Ο έλεγχος με συστήματα Ενόργανης Παρακολούθησης Γεφυρών (Bridge Health Monitoring Systems ή Health Monitoring of Structures ή Structural Health Monitoring), αποτελεί τον πιο ακριβή έλεγχο που μπορεί να πραγματοποιηθεί σε μια γέφυρα.

Αρχικά, λοιπόν, μέσω των διάφορων ενόργανων συστημάτων διεξάγεται η λήψη μετρήσεων για το συγκεκριμένο έργο. Η λήψη τέτοιων μετρήσεων μπορεί να γίνει με ενεργοποίηση των συστημάτων που χρησιμοποιούνται μέσω κάποιας διέγερσης, όπως, η εξαναγκασμένη ταλάντωση του έργου μέσα από αυξημένη κυκλοφορία φορτηγών κατά τη διάρκεια λειτουργίας της γέφυρας ή κατά τη διάρκεια συνεχούς οδικής κυκλοφορίας. Ωστόσο, ως δεύτερη και επικρατέστερη μεθοδολογία, αποτελεί η εκτίμηση της απόκρισης (μετατοπίσεις, επιταχύνσεις κ.α.) της κατασκευής έναντι λειτουργικών φορτίων (άνεμος, οδική κυκλοφορία, θερμοκρασιακές μεταβολές) και η εξαγωγή συμπερασμάτων για την δομική κατάσταση μέσω της ανάλυσης με στατιστικές μεθόδους ή ακόμη και μεθόδους τεχνητής νοημοσύνης τέτοιων δεδομένων.

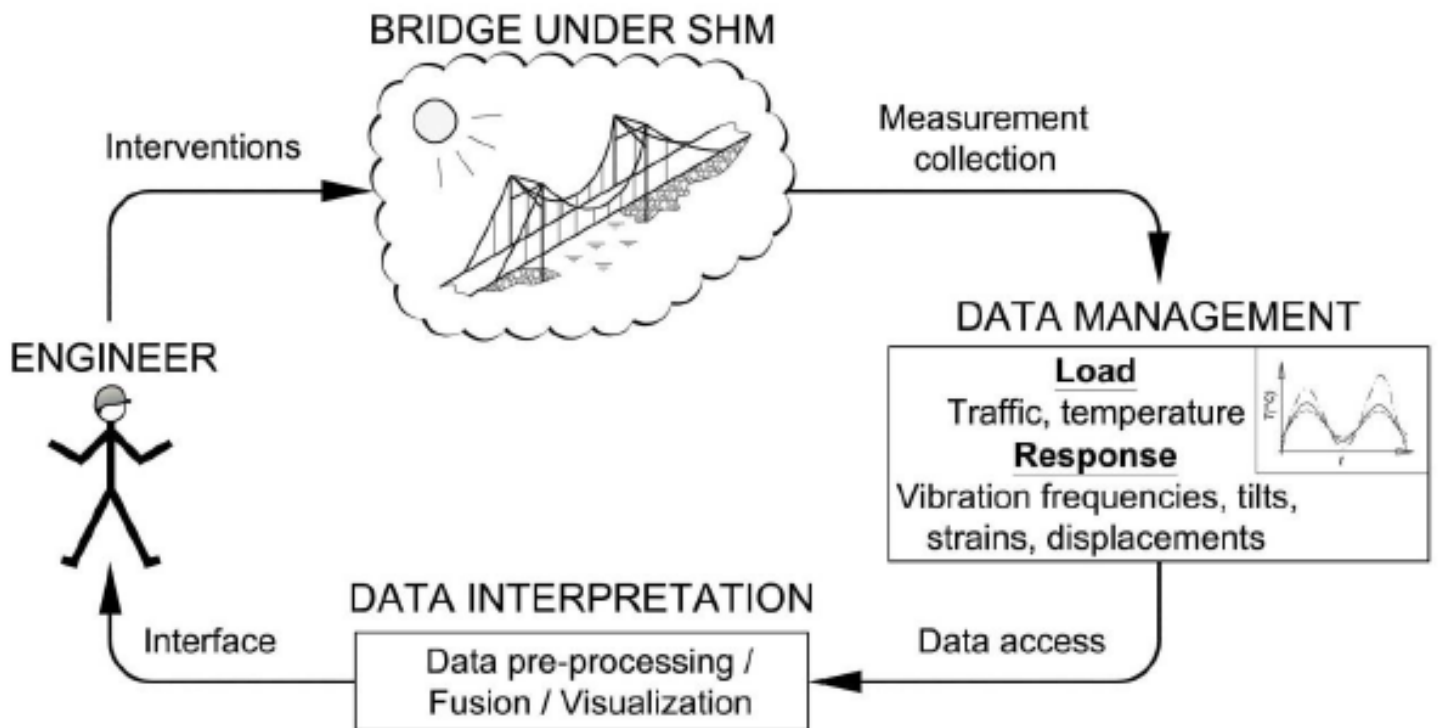
Η λήψη μετρήσεων γίνεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο, γίνεται η λήψη ενδεικτικού αριθμού μετρήσεων. Μετέπειτα, οι μετρήσεις αυτές επεξεργάζονται κατάλληλα με την μέθοδο “βαθμονόμηση μεθοδολογίας λήψης των μετρήσεων” ώστε να επιτευχθεί ο έλεγχος όλων των μετρήσεων αλλά και να γίνει απαλοιφή τυχόν σφαλμάτων που προέκυψαν από την

διαδικασία καταγραφής τους. Στο δεύτερο στάδιο, συνεχίζονται οι μετρήσεις και κατόπιν διορθώνονται μέσα από τη βαθμονόμηση που είχε επιτευχθεί στο προηγούμενο στάδιο. Στο τέλος συγκεντρώνονται όλα τα μετρητικά δεδομένα που προέκυψαν κατά τη διάρκεια της φάσης καταγραφής των μετρήσεων των οργάνων, ώστε να επεξεργαστούν κατάλληλα στη συνέχεια [Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας και ΙΤΣΑΚ, 2003].

Με την λήψη των μετρήσεων ακολουθεί η επεξεργασία τους με υπολογιστικές τεχνικές αναγνώρισης των μετρητικών δεδομένων. Με αυτές τις τεχνικές γίνεται ο προσδιορισμός της δυναμικής απόκρισης της γέφυρας λόγω τυχαίων διεγέρσεων. Έπειτα, γίνεται ο υπολογισμός των ιδιοσυχνοτήτων και ιδιομορφών της κατασκευής με την διαδικασία υπολογισμού “Ιδιομορφική Αναγνώριση” (Model Identification) στην οποία γίνεται χρήση αριθμητικών μεθόδων και πολύπλοκοι μαθηματικοί τύποι για την εξαγωγή των σημαντικών στατιστικών στοιχείων ώστε να εντοπισθεί η «συμπεριφορά» της γέφυρας, [Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας και ΙΤΣΑΚ, 2003].

Ως τελικό στάδιο αποτελεί η αναθεώρηση και επικαιροποίηση του αρχικού μοντέλου (Model Updating), μέσω του οποίου αναζητείται η διαδικασία της διάγνωσης των βλαβών και της δομικής κατάστασης της κατασκευής. Χρησιμοποιείται, λοιπόν, ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων της γέφυρας στο οποίο προσδιορίζονται όλες οι αρχικές παράμετροι δυσκαμψίας. Στη συνέχεια το αρχικό μοντέλο τροποποιείται για να προκύψουν οι τελικοί παράμετροι δυσκαμψίας της κατασκευής, έτσι ώστε να υπάρχει όσο το δυνατό ταύτιση των μετρούμενων ιδιομορφών και ιδιοτιμών με τα αποτελέσματα του μοντέλου τα οποία θα υποδείξουν το βαθμό ανεπάρκειας της κατασκευής, [Woodward, 2000].

Στο Σχήμα 2.9 παρουσιάζεται η ροή εργασιών για την διεκπεραίωση ενός «Εξυπνου συστήματος παρακολούθησης».



Σχήμα 2. 9: Απεικόνιση των διαφόρων σταδίων του συστήματος Ενόργανης Παρακολούθησης Δομικής κατάστασης γέφυρας
 Figure 2.9: Presentation of the several stages of a Bridge Health Monitoring system
 (Πηγή: Kromanis, 2015)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Ψηφιακά κλισίμετρα: Βασικές αρχές λειτουργίας και τεχνικές εφαρμογής τους

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1, μια άλλη τεχνική μέτρησης η οποία εφαρμόζεται στην Παρακολούθηση Δομικής Κατάστασης (ΠΔΚ) των κατασκευών στηρίζεται στην μέτρηση των αποκλίσεων της κατακόρυφου σε κατάλληλα επιλεγμένα τμήματα της κατασκευής. Τα κλισίμετρα είναι αισθητήρες που μετρούν αυτήν την παράμετρο.

Στο παρόν Κεφάλαιο, εξετάζονται τα χαρακτηριστικά και η δυνατότητα εφαρμογής ψηφιακών κλισιμέτρων σε διάφορες εφαρμογές. Συγκεκριμένα, γίνεται αναφορά στους διάφορους τύπους κλισιμέτρων καθώς και στα πεδία εφαρμογής τους. Επίσης, ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στα ψηφιακά κλισίμετρα υψηλής ευαισθησίας Nivel220 της εταιρίας Leica Geosystems τα οποία αποτελούν το κύριο όργανο μέτρησης της διπλωματικής αυτής.

3.1 Γενικές αρχές κλισιμέτρων

Κλισίμετρο καλείται οποιαδήποτε διάταξη μέτρησης είτε απευθείας της γωνίας μεταξύ μιας διεύθυνσης και της διεύθυνσης της κατακόρυφου ή στοιχείων που οδηγούν σε αυτή. Διαχωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες: i) *Κλισίμετρα* τα οποία χρησιμοποιούν κάποια μάζα για τον υπολογισμό της κατακόρυφου, όπως το νήμα της στάθμης, ii) *Κλισίμετρα* που χρησιμοποιούν κάποιο υγρό μέσο σε θέση ισορροπίας για να οριστεί το οριζόντιο επίπεδο.

Κατά την προμήθεια κλισιμέτρων, μεταξύ άλλων θα πρέπει να ληφθούν υπόψη οι εξής παράγοντες, το εύρος και η ευαισθησία της γωνίας μέτρησης και ο αριθμός των αξόνων (μονοαξονικά ή διαξονικά κλισίμετρα). Σε τεχνικές εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων όπως είναι η μελέτη της απόκρισης κατασκευών σε δυναμικά φορτία χρησιμοποιούνται ευρέως τα ψηφιακά κλισίμετρα.



Σχήμα 3. 1: Ηλεκτρολυτικά κλισίμετρα

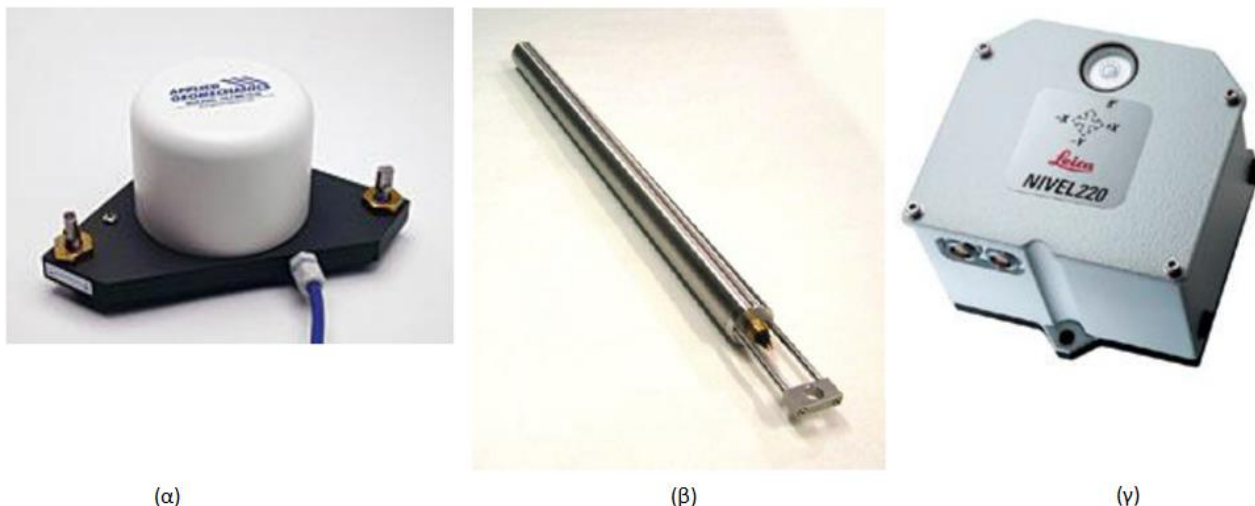
Figure 3.1: Electrolytic tilt sensors

(Πηγή: <http://www.bestech.com.au/>)

3.2 Ψηφιακά κλισίμετρα

Τα σύγχρονα κλισίμετρα έχουν ως χαρακτηριστικό τους ότι το σήμα και τα δεδομένα τους είναι σε ψηφιακή μορφή. Η χρήση τους βασίζεται στην αξιοποίηση των ιδιοτήτων των αγώγιμων υγρών και έχουν την ιδιότητα να ανιχνεύουν αλλαγές στην ηλεκτρική αγωγιμότητα του υγρού κατά την μεταβολή της κλίσης. Ο προσδιορισμός της κλίσης στηρίζεται στην μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης μεταξύ ηλεκτροδίων στην ελεύθερη επιφάνεια αγώγιμου υγρού το οποίο ισορροπεί σε ειδική μικροκάψουλα στο εσωτερικό περίβλημα του οργάνου, [Gikas et al., 2008].

Λόγω του μικρού μεγέθους τους είναι εύκολα στη χρήση και εγκατάστασή τους. Τα υλικά κατασκευής τους έχουν μεγάλη αντοχή και επομένως χρησιμοποιούνται ακόμα και σε δύσκολες συνθήκες και παρέχουν μετρήσεις ακριβείας και υψηλής ανάλυσης (καλύτερες του 0.001 mrad).



Σχήμα 3. 2: (α) Κλισίμετρο υψηλής ακρίβειας Model A701-2A/B, (β)Οριζόντιο κλισίμετρο, Applied Geomechanics (γ) Ψηφιακό κλισίμετρο υψηλής ευαισθησίας Nivel220

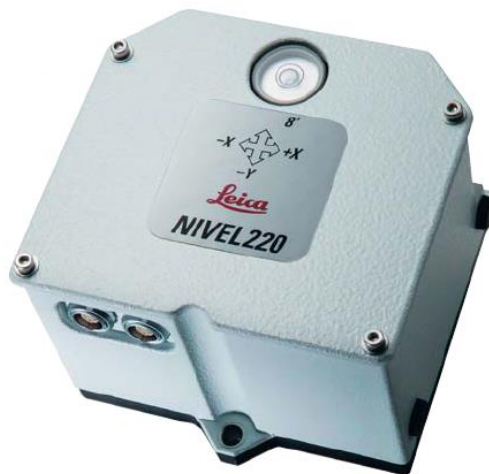
Figure 3.2: (a) Inclinometer high accuracy Model A701-2A/B, (b) Horizontal inclinometer, (c) Digital inclinometer high sensitivity Nivel220

Βέβαια υπάρχουν και κάποιες δυσκολίες και μειονεκτήματα στην χρήση τους κάποια από αυτά αναφέρονται συνοπτικά παρακάτω:

- Έχουν μεγάλη ευαισθησία στις θερμοκρασιακές μεταβολές
- Μικρό εύρος μετρήσεων άρα αδυναμία λήψης αξιόπιστων αποτελεσμάτων σε υψηλής δυναμικής φαινόμενα (>1 Hz) λόγω της αδράνειας του υγρού και της μικρής συχνότητας δειγματοληψίας. Αντίθετα, όσον αφορά τις στατικές δοκιμές, παρέχουν ιδιαίτερα αξιόπιστα αποτελέσματα.

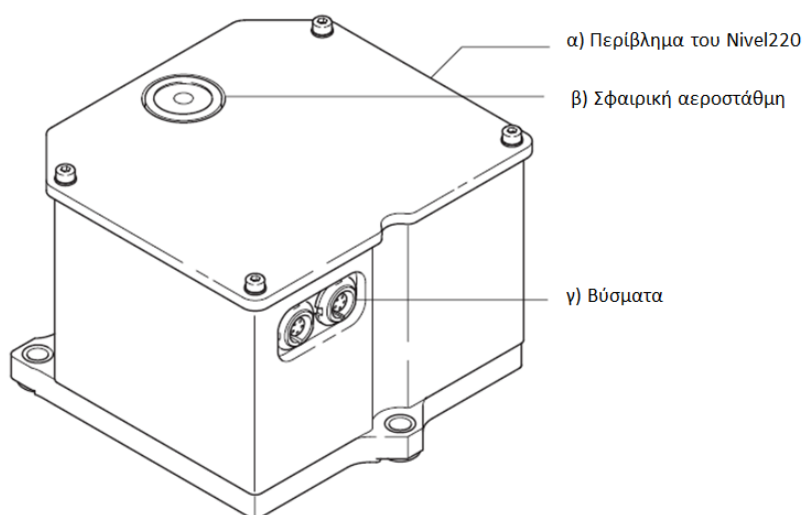
3.2.1 Nivel 220 Leica

Κύριο όργανο μέτρησης στην παρούσα μελέτη είναι το ψηφιακό κλισίμετρο της εταιρείας Leica Geosystems, το Nivel 220 το οποίο αποτελεί μέρος της σειράς Nivel200. Είναι ένας διαζωνικός, υψηλής ακριβείας αισθητήρας που χρησιμοποιείται για ταυτόχρονες μετρήσεις κλίσεων σε δύο διευθύνσεις και θερμοκρασίας με βάση τις αρχές της οπτοηλεκτρονικής. Η ακρίβεια που παρέχει είναι της τάξης των ± 0.0047 mrad και παρέχει δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, σε συνεχή βάση και μπορεί να συνδεθεί με το λογισμικό παρακολούθησης Leica GeoMos για την επεξεργασία των δεδομένων αλλά και με το Spider QC.



Σχήμα 3. 3 Ψηφιακό κλισίμετρο υψηλής ευαισθησίας Nivel220, Leica Geosystems

Figure 3.3: Digital inclinometer high sensitivity Nivel220, Leica Geosystems
(Πηγή: Manual of Nivel200, Leica Geosystems)

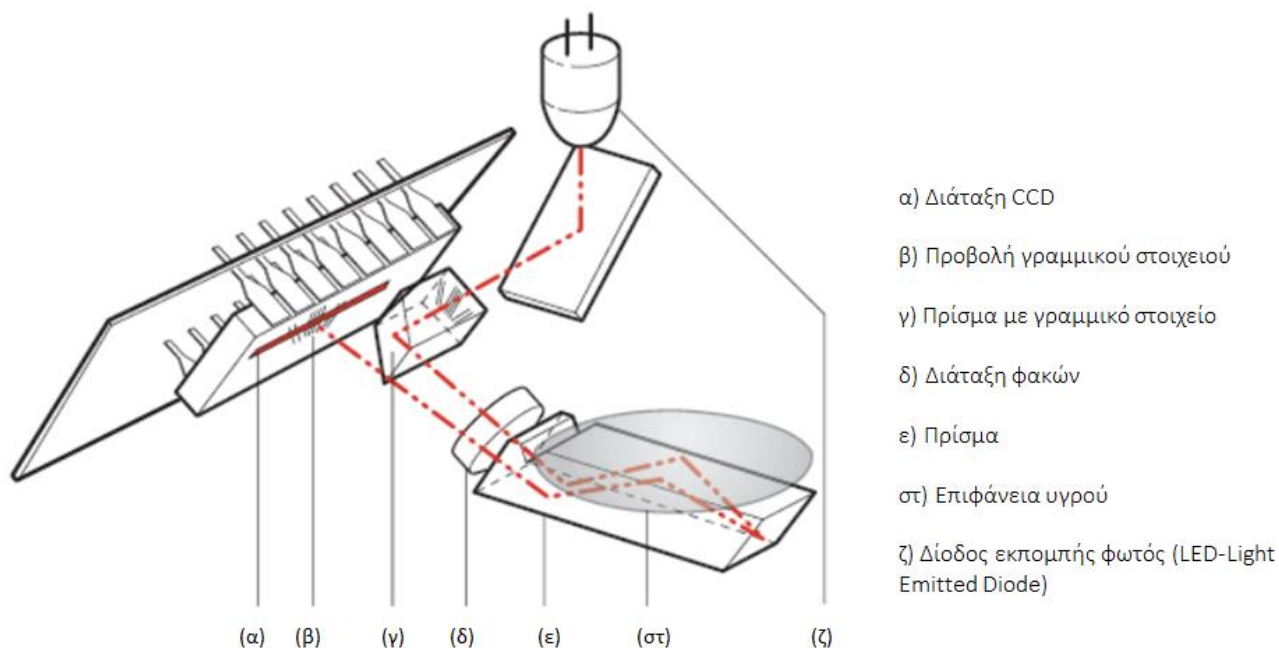


Σχήμα 3. 4: Εξαρτήματα του αισθητήρα
Figure 3.4: Sensor components

(Πηγή: Manual of Nivel200, Leica Geosystems)

3.2.1.α Βασικές αρχές

Η βασική αρχή λειτουργίας του αισθητήρα - Nivel 220 στηρίζεται στην οπτοηλεκτρονική. Το οριζόντιο επίπεδο ορίζεται από τη θέση ισορροπίας ενός υγρού και η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ αυτού του επιπέδου και του αισθητήρα μεταβάλλεται ανάλογα με την κλίση του προς μέτρηση αντικειμένου πάνω στο οποίο έχει εγκατασταθεί ο αισθητήρας. Η διεύθυνση αυτή καταγράφεται από μια οπτοηλεκτρονική διάταξη και στη συνέχεια μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα. Στο παρακάτω Σχήμα παρουσιάζεται η συνδεσμολογία του κλισίμετρου.



Σχήμα 3. 5: Εξαρτήματα του αισθητήρα

Figure 3.5: Sensor components

(Πηγή: Nivel200, User Manual)

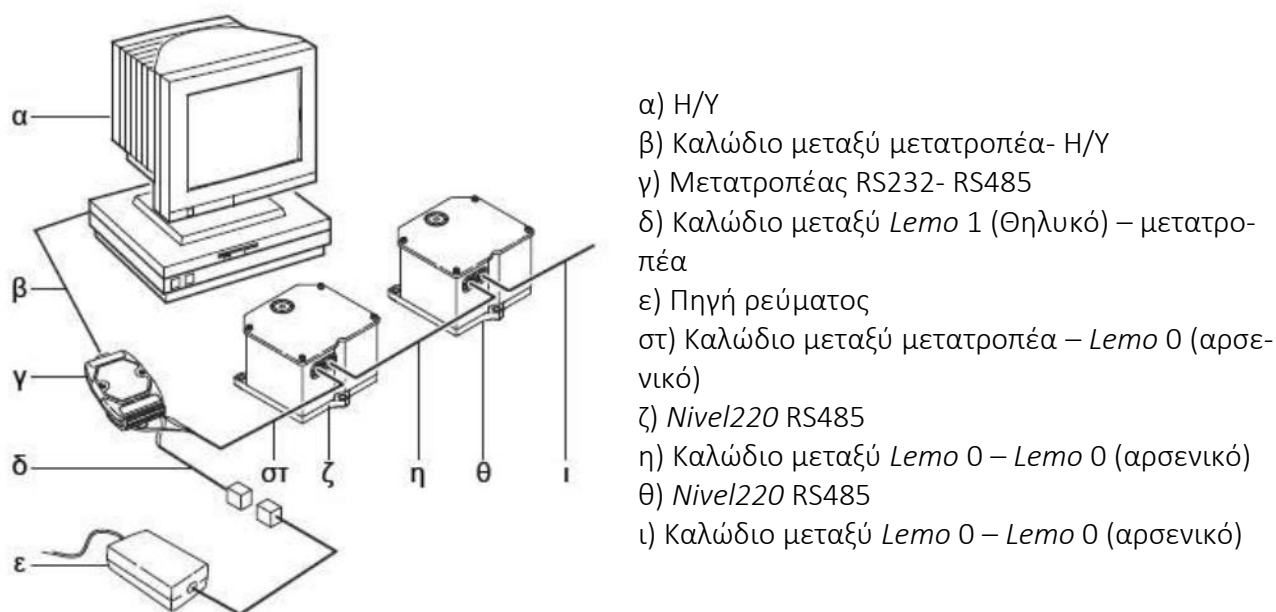
Το γραμμικό στοιχείο (γ) είναι ενσωματωμένο σε ένα πρίσμα και φωτίζεται με διάταξη LED, το γραμμικό στοιχείο μέσω ενός πρίσματος (ε), καθώς και η επιφάνεια του υγρού (στ) προβάλλονται πάνω στη διάταξη CCD (α) μέσω της διάταξης των φακών (δ), η επιφάνεια του υγρού (στ) παραμένει οριζόντια, ανεξάρτητα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

Όπως προαναφέρθηκε το κλισίμετρο Nivel220 είναι εξοπλισμένο με μια RS485 διασύνδεση (interface) για εφαρμογές παρακολούθησης και έχει την δυνατότητα να συνδεθεί με πολλαπλούς αισθητήρες. Για μεγάλης κλίμακας εφαρμογές, όπως η ενόργανη παρακολούθηση τεχνικών έργων αποτελεί κατάλληλη επιλογή.

3.2.1.β Συνδεσμολογία

Όπως προαναφέρθηκε και στις προηγούμενες ενότητες, ο αισθητήρας Nivel220 είναι κατάλληλος για εφαρμογές παρακολούθησης οι οποίες απαιτούν την χρήση πολλαπλών αισθητήρων. Έχει, λοιπόν, την δυνατότητα της διασύνδεσης πολλών αισθητήρων μεταξύ τους που χρησιμοποιούνται σε μια κατασκευή χρησιμοποιώντας μια RS485 διασύνδεση (interface).

Στο Σχήμα 3.6 παρουσιάζεται η συνδεσμολογία μεταξύ του αισθητήρα και του ηλεκτρονικού υπολογιστή.



Σχήμα 3. 6: Συνδεσμολογία του Nivel220 με πολλαπλούς αισθητήρες και Η/Υ

Figure 3.6: Connection among multiple Nivel220 sensors and PC

(Πηγή: Nivel200, User Manual)

Κάθε καλώδιο χαρακτηρίζεται από ένα μοναδικό κωδικό έτσι ώστε να είναι πιο εύκολη η συνδεσμολογία με βάση το εγχειρίδιο χρήσης. Η συνδεσμολογία ολοκληρώνεται με την τοποθέτηση στο τέλος της σειράς μιας τερματικής αντίστασης (terminator resistor).

Στην συνέχεια παρατίθενται συγκεντρωτικός Πίνακας με τα κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα Nivel220.

Εύρος μέτρησης	From [mrad]	[cc]	To [mrad]	[cc]	Standard Deviation [cc]	Ακρίβεια γωνίας κλίσης (mrad)
A	-1.51	-960	+1.51	+960	+/-3	+/- 0.0047
B	-2.51	-1600	-1.51	-960	+/-9	+/- 0.0141
	+1.51	+960	+2.51	+1600	+/-9	
C	-3.00	-1900	-2.51	-1600	+/-30	+/- 0.0471
	+2.51	+1600	+3.00	+1900	+/-30	
Ανάλυση (Resolution)	(mrad) 0.001	(cc) 0.6				
Ευαισθησία θέσης ισορροπίας (Zero point stability)	(mrad/oC) <0.00471	(cc/oC) <3				
Σφάλμα θέσης ισορροπίας (Equipoise error) για θερμοκρασία <15oC	(mrad) 0.00204	(cc) 1.3				
Περιβαλλοντικές συνθήκες (Environmental specifications)	Είδος	Περιγραφή				
Θερμοκρασία	Θερμοκρασία λειτουργίας	-20 έως +50 °C				
Προστασία	Έναντι σκόνης, νερού, άμμου	(IEC 60529) IP50				
Υγρασία	Έως 95%	Χωρίς τάση υγροποίησης. Τα αποτελέσματα της υγροποίησης πρέπει να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικά με συνεχές καθάρισμα-στέγνωμα του οργάνου				
Άλλα σφάλματα	Σφάλμα	Τιμή				
	Σφάλμα μηδενικού σημείου	15cc				
	Σφάλμα διεύθυνσης	< +/- 1o				
	Σφάλμα κλίμακας	0.5%				
Τάση τροφοδοσίας	Ονομαστική τάση 12 VDC, εύρος τάσης 9 -15 VDC					
Μέση κατανάλωση ρεύματος	0.6 W, 50 mA			Χρόνος οριζοντίωσης		<10 s
Διαστάσεις	~ 95 x 91 x 68 mm (ΜxΠxΥ)			Βάρος		0.74 kg

Πίνακας 3.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά του ψηφιακού κλισίμετρου Nivel220

Table 3.1: Technical information of the digital inclinometer Nivel220

(Πηγή: Nivel200, User Manual)

3.3 Αναγκαιότητα κλισίμετρων στη παρακολούθηση δομικής κατάστασης γεφυρών

Τα συστήματα παρακολούθησης της δυναμικής απόκρισης τεχνικών έργων όπως οι γέφυρες - BMS (Bridge Monitoring System) έχουν στόχο την αξιολόγηση και εύρεση αστοχιών που μπορούν να επέλθουν κατά την ζωή της γέφυρας από διάφορους παράγοντες (περιβαλλοντικές μεταβολές, φορτίσεις, σεισμικές δονήσεις, εδαφική παραμόρφωση) και μια μορφή πρόληψης είναι η εντατική παρακολούθηση με την χρήση τέτοιων εφαρμογών.



Σχήμα 3. 7 : Σύστημα αισθητήρων που εγκαθίσταται στην γέφυρα

Figure 3.7: Sensor system installed on the bridge

(Πηγή: Hadi T. Al-Khateeb et. al, 2019)

Οι αισθητήρες LVDT χρησιμοποιούνται ευρέως και συνήθως για μέτρηση άμεσης παραμόρφωσης κατά τη διάρκεια των δοκιμών φορτίου και επιτυγχάνεται πολύ υψηλή ακρίβεια, ωστόσο, είναι ευαίσθητα στις θερμοκρασιακές μεταβολές και το εύρος μέτρησης είναι περιορισμένο. Επίσης, τα συστήματα δορυφορικού εντοπισμού θέσης (GNSS) αποτελούν από τα πιο συνήθη όργανα παρακολούθησης μετατόπισης σε πραγματικό χρόνο. Πολυάριθμες είναι οι δομές είναι εξοπλισμένες με GPS, όπως τα ψηλά κτίρια [Ni et al.2009, Su et al. 2013], αλλά, η ακρίβεια μετρήσεων είναι της τάξης του εκατοστού. Ως εναλλακτική λύση, τα κλισίμετρα έχουν προσελκύσει όλο και μεγαλύτερη προσοχή τα τελευταία χρόνια. Παρόλο που οι μετρούμενες κλίσεις πρέπει να μεταφερθούν σε μετατόπιση, αυτές οι συσκευές έχουν αρκετά πλεονεκτήματα: είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα, πολύ αξιόπιστα στις συνθήκες του χώρου, και φθηνή εγκατάσταση και λειτουργία.

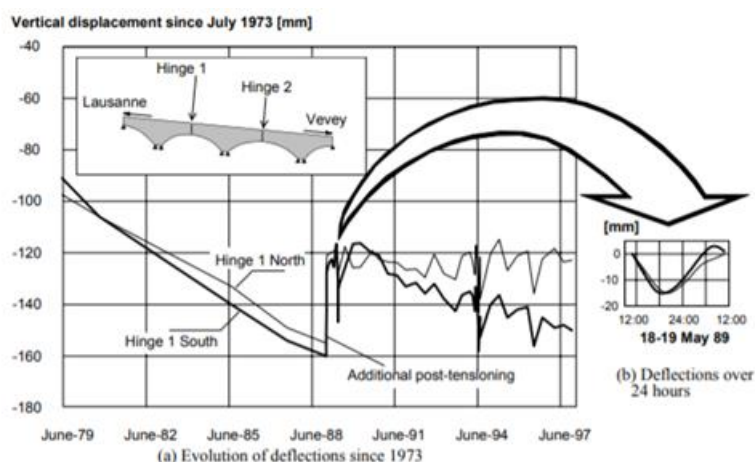
Τα συστήματα ψηφιακών κλισίμετρων αποτελούν μια επαρκή λύση για ενόργανη παρακολούθηση της ημι-στατικής δυναμικής απόκρισης τεχνικών κατασκευών για πολλαπλούς λόγους.

Αρχικά η μέτρηση είναι απόλυτη, η διασύνδεση τους πραγματοποιείται με ευκολία με άλλα όργανα συλλογής δεδομένων και παρέχουν υψηλή ακρίβεια στις τελικές μετρήσεις λόγω της ευαισθησίας τους. Επίσης, είναι κατάλληλα για κάθε είδους διατομές αφού η εγκατάστασή τους είναι σχετικά εύκολη. Τέλος, το κόστος τους σε σχέση με άλλα συγκρίσιμα συστήματα είναι σχετικά χαμηλό.

Στην επόμενη ενότητα πραγματοποιείται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τα συστήματα SHM -Structural Health Monitoring εφαρμοζόμενα σε γέφυρες με την χρήση ψηφιακών αισθητήρων κλίσης.

3.3.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Ο Burdet (1998), αξιολόγησε την δυναμική απόκριση της γέφυρας Mentue με συνεχή παρακολούθηση της κατασκευής για το χρονικό διάστημα Ιούλιο του 1973 έως Αύγουστο του 1997 με την χρήση παρατηρήσεων κλισίμετρων υψηλής ακρίβειας σε έντονες κυκλοφοριακές συνθήκες λαμβάνοντας υπόψη και τις θερμοκρασιακές μεταβολές οι οποίες παίζουν καθοριστικό ρόλο στις παραμορφώσεις της κατασκευής. Στο Σχήμα 3.8 παρουσιάζονται οι αλλαγές στην κατασκευή για όλο το χρονικό διάστημα της παρακολούθησης έναντι παρατηρήσεων που συλλέχθηκαν σε διάστημα 24-ώρου.



Σχήμα 3. 8 Αποτελέσματα μακροχρόνιας παρακολούθησης της γέφυρας σε σχέση με ημερήσια παρακολούθηση.
Figure 3.8: Long-term deflections of the Lutrive bridges, compared to deflections measured in a 24-hour period

(Πηγή: Burdet, 1998)

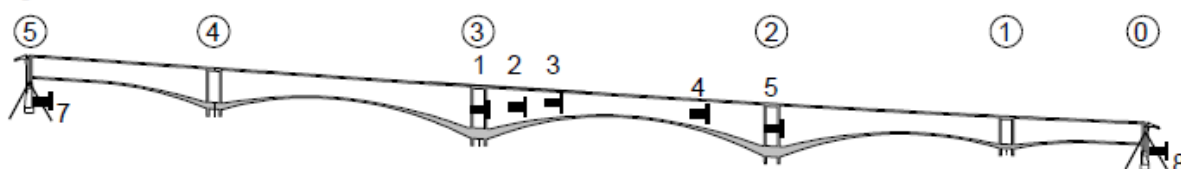


Figure 3.9: Presentation of the locations on the bridge
Σχήμα 3. 9: Απεικόνιση των θέσεων των κλισίμετρων στην γέφυρα
(Πηγή: Burdet & Zanella, 2000)

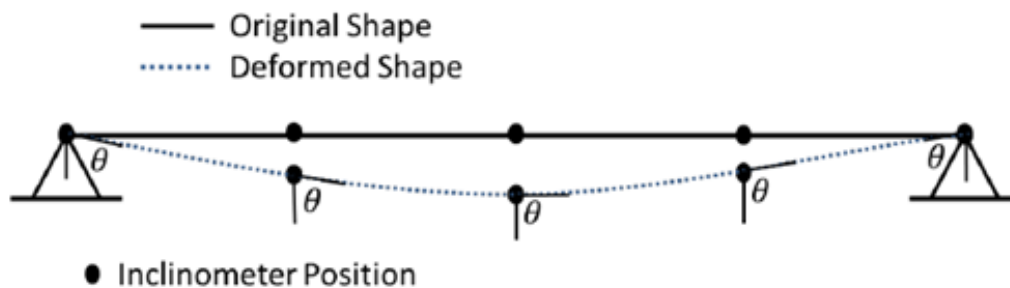
Στην έρευνα του Sani et al. (2000) παρουσιάστηκαν δύο μέθοδοι για τον υπολογισμό των κάθετων μετατοπίσεων μιας γέφυρας με την βοήθεια των κλισίμετρων και οι δύο μέθοδοι βασίζονται σε τεχνικές πεπερασμένων διαφορών και κυμβική παρεμβολή spline.

Οι Hou et al. (2005) καθόρισε μια μέθοδο για τον υπολογισμό της κατακόρυφης μετατόπισης με την τοποθέτηση κλισιμέτρων κατά μήκος του ανοίγματος της γέφυρας και υπολόγισε τη γωνία κλίση με την πάροδο του χρόνου. Ουσιαστικά, υπολόγισαν τις μετατοπίσεις διαχωρίζοντας τις γωνιακές τιμές και εξήγαγαν την καμπύλη παραμόρφωσης. Ο ελάχιστος αριθμός κλισίμετρων που απαιτούνται για τη λειτουργία της μεθόδου είναι πέντε. Η ακρίβεια της μεθόδου αυξάνεται όταν χρησιμοποιούνται περισσότεροι αισθητήρες. Το Σχήμα 3.10 απεικονίζει τη θέση των αισθητήρων κλίσης στον φορέα της γέφυρας.



Σχήμα 3. 10: Θέσεις των κλισίμετρων στον φορέα της γέφυρας
 Figure 3.10: Locations of the inclinometers on the bridge
 (Πηγή: Hou et. al., 2005)

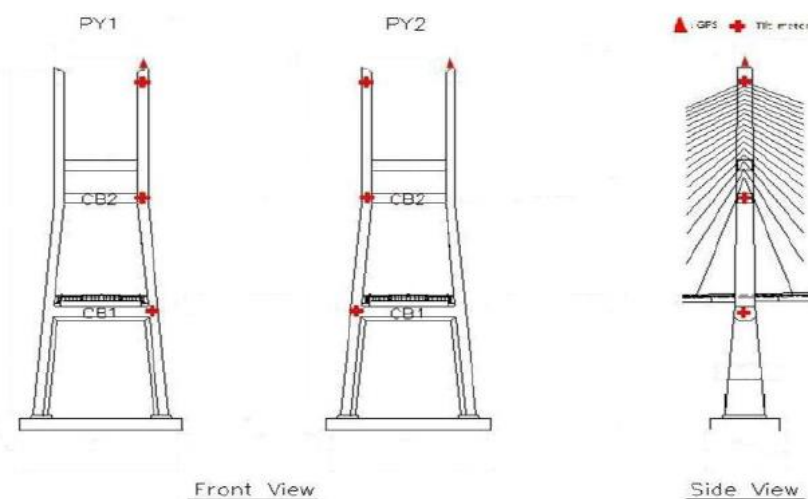
Στην έρευνα του Hou et al. (2010), με την χρήση 3 κλισίμετρων πραγματοποιήθηκε ενόργανη παρακολούθηση της γέφυρας Ferriby στην Αγγλία. Τα κλισίμετρα εγκαταστάθηκαν στα πλαϊνά μέρη των εφεδράνων για την μέτρηση των κλίσεων, ενώ, οι transducers χρησιμοποιήθηκαν για να μετρηθεί το πλάτος ρωγμών του σκελετού στη γέφυρα. Με βάση τις παρατηρήσεις των δεδομένων των που συλλέχθηκαν για διάρκεια 5 μηνών, εξάχθηκε το συμπέρασμα ότι οι αισθητήρες είναι αρκετά σταθεροί για μακροχρόνια παρακολούθηση τεχνικών δομών υψηλής δυναμικής όπως οι γέφυρες.



Σχήμα 3. 11: Θέσεις των κλισίμετρων στον φορέα της γέφυρας

Figure 3.11: Locations of inclinometers on the bridge
(Πηγή: Hou et. al., 2010)

Στην έρευνα των J.K Lee et.al (2011), αξιολογήθηκε η απόκριση των μετρήσεων των κλισιμέτρων μετρώντας την κλίση του καταστρώματος της γέφυρας σε σχέση με τον χρόνο σε σχέση με μετρήσεις GPS. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα δορυφορικά συστήματα εντοπισμού παρέχουν πιο σταθερά αποτελέσματα στην διεύθυνση του γεωγραφικού μήκους ενώ τα κλισίμετρα στου γεωγραφικού πλάτους.

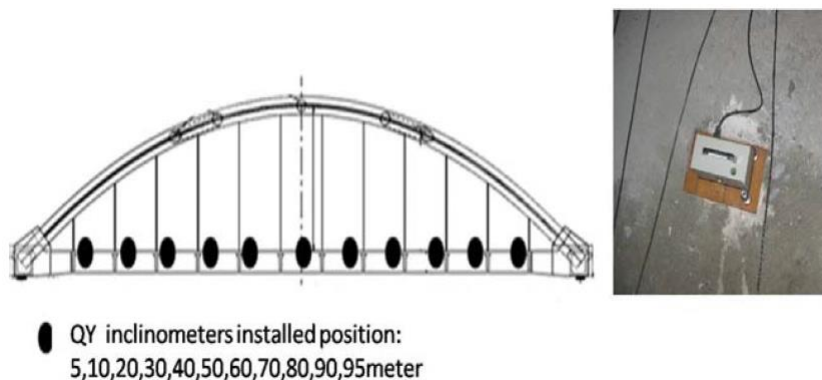


Σχήμα 3. 12: Απεικόνιση των θέσεων των κλισιμέτρων στον φορέα

Figure 3.12: Presentation of the locations inclinometers installed
(Πηγή: J.K Lee et.al, 2011)

Οι Erol et al.(2012), με την χρήση ψηφιακών κλισιμέτρων δύο αξόνων για χρονικές περιόδους 24 ωρών και 12 ωρών αντίστοιχα επεξεργάστηκαν τα δεδομένα με τον μετασχηματισμό LSSA και με συναρτήσεις συσχέτισης. Με την χρήση των αισθητήρων κλίσης κατάφεραν να εξάγει την «κρυφή» περιοδικότητα σχετικά με την συμπεριφορά της κατασκευής.

Στην έρευνα του Xianlong He et.al (2013), κατέγραψαν και ανέλυσαν μετρήσεις δυναμικών μετατοπίσεων με την χρήση υψηλής ακρίβειας κλισιμέτρων για να εξετάσουν την δυναμική απόκριση της HUANGHE τοξωτής γέφυρας στην Κίνα. Στα τελικά τους αποτελέσματα φάνηκε ότι τα κλισιμέτρα είναι επαρκή για την μελέτη δυναμικής απόκρισης σε υψηλής δυναμικής κατασκευές.



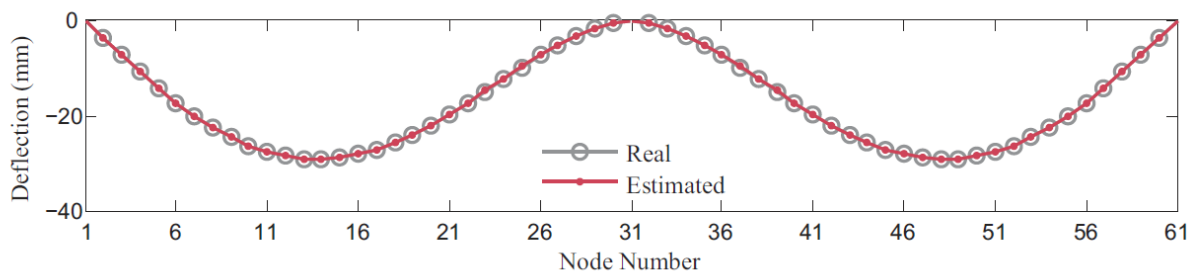
Σχήμα 3. 13: Εγκατάσταση και διασύνδεση των Κλισιμέτρων.

Figure 3.13: Installing Positions of Inclinometers

(Πηγή: Xianlong He et.al, 2013)

Οι Yu et al. (2013) με την χρήση αισθητήρων κλίσεων υπολόγισαν την μετατόπιση της γέφυρας. Ωστόσο, η μέθοδος ήταν αρκετά απλοποιημένη, εφόσον, επικεντρώθηκαν σε ένα κεντρικό σημείο ασκώντας ένα ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο, υπολογίζοντας έτσι την μετατόπιση στο μέσον της γέφυρας.

Στην έρευνα των Zhang et.al (2016), ένα νέο πλαίσιο εφαρμόστηκε για τη μέτρηση μετακινήσεων γέφυρας με την χρήση υψηλής ακρίβειας κλισιμέτρων. Συγκρίνοντας τις θεωρητικές μετατοπίσεις που προκύπτουν με την εφαρμογή Ανάλυση των Πεπερασμένων Στοιχείων (*Finite Element Analysis-FEM*) με τις πραγματικές κλίσεις που προέκυψαν από τα κλισιμέτρα και εφαρμόζοντας για τον υπολογισμό την μέθοδο PLSR- Partial Least Square η οποία λειτουργεί και ως σύνδεσμος μεταξύ του FEM μοντέλου και των πραγματικών μετρημένων δεδομένων. Έτσι, οι σαφείς σχέσεις ανάμεσα στην κλίση, την εκτροπή και το φορτίο θα μπορούσαν να απεικονιστούν σε σχέση με την κατασκευή.

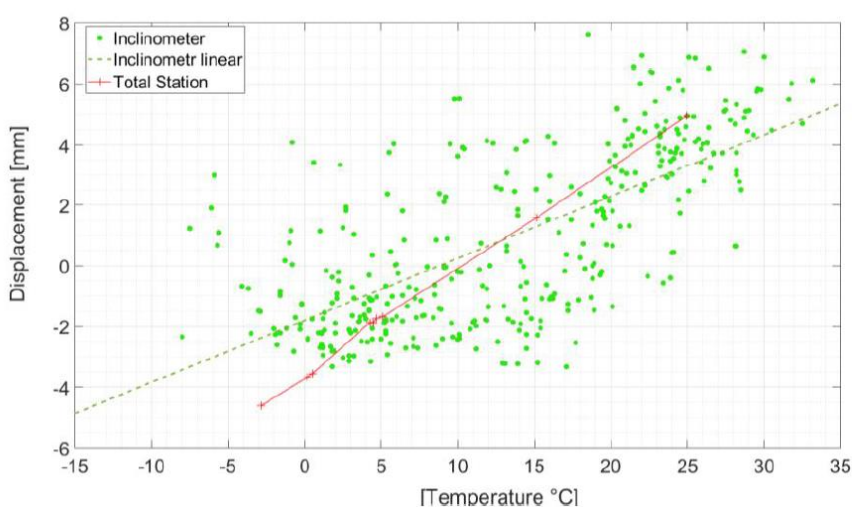


Σχήμα 3. 14: Εκτίμηση των μετακινήσεων

Figure 3.14: (Color) Estimated deflection

(Πηγή: Zhang et.al., 2013)

Στην έρευνα του Wyczałek et.al. (2019), έγινε εγκατάσταση τριών κλισιμέτρων και ενός επιταχυνσιόμετρου σε σιδηροδρομική γέφυρα με σκοπό την αξιολόγηση της ημι-στατικής συμπεριφοράς της κατασκευής. Τα αποτελέσματα αξιολογήθηκαν σε σύγκριση μετρήσεων από γεωδαιτικό σταθμό για τις στατικές συνιστώσες της δομής που προέκυψαν από τους αισθητήρες κλίσης (5 δευτερόλεπτα μέτρηση από όλους τους αισθητήρες κατά την χρονική διάρκεια διέλευσης του τρένου και η ανάλυση υπέδειξε ότι τα κλισίμετρα έχουν την δυνατότητα υπολογισμού της ημι-στατικής συμπεριφοράς της γέφυρας.



Σχήμα 3. 15 Διάγραμμα μετατόπισης για χρονική διάρκεια 1 έτους των μετακινήσεων από τα κλισίμετρα και τον γεωδαιτικό σταθμό σε σχέση με την θερμοκρασία

Figure 3.15: An example of an analysis of a one-year static displacement versus temperature with the use of inclinometer

(Πηγή: Wyczałek et.al., 2019)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Γέφυρα μελέτης και συλλογή δεδομένων ψηφιακών κλισιμέτρων

Στο Κεφάλαιο αυτό, δίνονται ορισμένα βασικά στοιχεία για την οδική γέφυρα κλάδου 5&8 στον κόμβο Μεταμόρφωσης. Πραγματοποιείται μια γενική περιγραφή της γέφυρας και αναφέρονται τα δομικά της στοιχεία. Επίσης, περιγράφονται αναλυτικά οι προπαρασκευαστικές εργασίες και οι εργασίες πεδίου. Δίνεται ο σχεδιασμός των εργασιών πεδίου, περιγράφεται η γεωμετρία παρατήρησης της γέφυρας, οι θέσεις τοποθέτησης των κλισιμέτρων. Τέλος, περιγράφονται οι διαδικασίες συλλογής των δεδομένων πεδίου ενώ γίνεται αναφορά στα μετεωρολογικά δεδομένα που επικρατούν στην περιοχή κατά την χρονική περίοδο διεξαγωγής των μετρήσεων.

4.1 Γενική περιγραφή της γέφυρας

Στο 11ο χλμ. Εθνικής Οδού Αθηνών – Λαμίας στο κόμβο Μεταμόρφωση με την Αττική οδό ΑΕ ο οποίος έχει διαμορφωθεί σε τέσσερα επίπεδα.

- 1ο επίπεδο: καταλαμβάνουν η Ε.Λ.Ε.Σ.Σ. - Ελεύθερη Λεωφόρος Ελευσίνας - Σταυρού - Σπάτων πρώην “Λεωφόρος Ελευσίνας-Σταυρού”.
- 2ο επίπεδο: η γέφυρα Α.Δ. της Εθνικής Οδού Αθηνών-Λαμίας.
- 3^ο επίπεδο: οι γέφυρες κλάδων 1 & 2.
- 4^ο επίπεδο: οι κλάδοι 5 & 8 οι οποίοι κατασκευάστηκαν πάνω από τις προϋπάρχουσες γέφυρες κλάδων 1 & 2.



Σχήμα 4. 1: Θέση γέφυρας, Μεταμόρφωση

Figure 4.1: Location of the bridge, Metamorphosi
(Πηγή: Google earth)



Σχήμα 4. 2: Γέφυρα στον κόμβο Μεταμόρφωσης

Figure 4.2: Bridge in Metamorphosis junction

Η γέφυρα κλάδου 8 έχει συνολικό μήκος 470m (μεσαία ανοίγματα 61,40m). Οι φορείς από προεντεταμένο σκυρόδεμα, εδράζονται μέσω εφεδράνων σε μονόστουλα βάθρα και η θεμελίωση με έγχυτους πασσάλους.

4.2 Προπαρασκευαστικές εργασίες και συλλογή δεδομένων πεδίου

Είναι σαφές ότι η διαδικασία συλλογής των μετρήσεων αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα σημεία μιας μελέτης, έτσι ώστε το αποτέλεσμά της να μπορεί να στηριχτεί σε πλήρη, αξιόπιστα και ακριβή δεδομένα. Με βάση αυτό το γνώμονα διαμορφώνεται η διαδικασία συλλογής των μετρήσεων πεδίου για την παρακολούθηση της γέφυρας κλάδου 8 του κόμβου Μεταμόρφωσης. Σε αυτό το πλαίσιο απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί η διενέργεια προπαρασκευαστικών εργασιών, οι οποίες περιλαμβάνουν τόσο την προετοιμασία στο εργαστήριο και το πεδίο, δηλαδή το σχεδιασμό των μετρήσεων και την προετοιμασία του εξοπλισμού, όσο και την υλοποίηση των παραπάνω. Επομένως, στα πλαίσια του σχεδιασμού στο γραφείο, οργανώνονται όλα τα επιμέρους ζητήματα που συνδέονται με τις εργασίες πεδίου.

Ο σχεδιασμός ενός συστήματος Ενόργανης Παρακολούθησης Τεχνικών έργων εμπεριέχει τα εξής υποσυστήματα: Σύστημα αισθητήρων, Σύστημα συλλογής δεδομένων, Σύστημα μεταφοράς δεδομένων, Σύστημα επεξεργασίας και ανάλυσης των μετρήσεων, Σύστημα διαχείρισης των μετρήσεων (Σχήμα 4.6).



Σχήμα 4. 3: Στοιχεία ενός συστήματος ΠΔΚ

Figure 4.3: Components of the SHM

Σε αυτό το πλαίσιο διεξήχθησαν τρία στάδια υλοποίησης για την διεκπεραίωση των μετρήσεων:

- Στο **πρώτο στάδιο** περιλαμβάνεται η επιλογή του συστήματος αισθητήρων για την καταγραφή, η μεταφορά των δεδομένων και η διαχείριση των εξαγόμενων μετρήσεων. Ο σχεδιασμός περιλαμβάνει την επιλογή των κατάλληλων οργάνων και του εξοπλισμού, τις θέσεις τοποθέτησής τους ώστε ικανοποιούνται οι απαιτήσεις ακρίβειας και αμοιβαίας ορατότητας, τα σενάρια παρατήρησης, ζητήματα συγχρονισμού των αισθητήρων, την επιλογή της κατάλληλης ημέρας και ώρας που για την πραγματοποίηση των μετρήσεων που σχετίζονται κυρίως με τις καιρικές συνθήκες.
- Εφόσον ολοκληρωθεί η τελική επιλογή των σημείων που προηγήθηκαν ακολουθεί το **δεύτερο στάδιο** στο οποίο περιλαμβάνεται η εγκατάσταση του συστήματος παρατήρησης. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιείται η τοποθέτηση, διασύνδεση και ρύθμιση του συστήματος των αισθητήρων.
- Στο **τρίτο στάδιο** περιλαμβάνεται η λήψη, η επεξεργασία και η ανάλυση των μετρήσεων συνεχούς και περιοδικής καταγραφής.

4.2.1 Επιλογή και εγκατάσταση των αισθητήρων

4.2.1.α Εγκατάσταση ψηφιακών κλισιμέτρων

Σε αυτό το στάδιο έχουν επιλεγθεί οι θέσεις στις οποίες κρίνεται σκόπιμο να εγκατασταθούν το σύστημα αισθητήρων. Στο άνω μέρος των πυλώνων M6, M7 και M8 του κλάδου Ελευσίνα προς Λαμία εγκαταστάθηκαν από ένα διαξονικό ψηφιακό κλισίμετρο (Nivel 220, Leica Geosystems, ± 0.0047 mrad) για την παρακολούθηση στατικών και ημιστατικών μετακινήσεων στην κορυφή των υψηλών πυλώνων.

Τα τρία ψηφιακά κλισίμετρα εγκαταστάθηκαν στο άνω μέρος των πυλώνων M6, M7 και M8 στη βορεινή τους πλευρά για την μη έκθεση στον ήλιο και τοποθετήθηκαν σε ειδικά κατασκευασμένους μεταλλικούς κλωβούς. Για την ακριβή οριζοντίωση τους έγινε χρήση του λογισμικού Leica Geosystems Nivel Tool. Προκειμένου να ελεγχθεί η ορθή λειτουργία των τριών κλισιμέτρων, καθώς και να

εκτιμηθεί η επίδραση περιβαλλοντικών παραμέτρων (θερμοκρασία, υγρασία) στις μετρήσεις, τοποθετήθηκε ένα επιπλέον κλισιόμετρο σε σταθερό σημείο (reference inclinometer, τοιχίο σφηνοειδούς σχήματος στην κατεύθυνση προς Μαρκόπουλο).

Επίσης, οι άξονες κάθε κλισιόμετρου προσανατολίστηκαν έτσι ώστε ο άξονας x να είναι παράλληλος με τον άξονα του υπό παρακολούθηση κλάδου (διεύθυνση +x προς Ελευσίνα) και ο άξονας y κάθετος σε αυτόν. Το είδος μέτρησης που παρέχουν τα κλισιόμετρα είναι οι μεταβολές της στατικής-ημιστατικής γωνιακής απόκλισης στην κορυφή του πυλώνα ως προς την κατακόρυφο.

Η συνδεσμολογία των τεσσάρων κλισιόμετρων επιτεύχθηκε με τον υποδοχέα πρωτοκόλλου RS485, ο οποίος συνδέθηκε στο δίκτυο μεταφοράς των δεδομένων, εντός του κλωβού του ψηφιακού κλισιόμετρου αναφοράς. Στο άλλο άκρο της «αλυσίδας» κλισιόμετρων η συνδεσμολογία ολοκληρώθηκε με την τοποθέτηση μιας τερματικής αντίστασης στο κλισιόμετρο του πυλώνα M8. Σε αυτό το σημείο να αναφερθεί ότι στον πυλώνα M8 εγκαταστάθηκε και επιταχυνσιόμετρο του οποίου οι μετρήσεις δεν θα αναλυθούν σε αυτήν την διπλωματική.



Σχήμα 4. 4 :Θέσεις των κλισιόμετρων στη στέψη των υψηλών βάθρων M6, M7, M8 και στο έδαφος.

Figure 4.4: The inclinometer locations at the cap of the piers M6, M7, M8 and at stable ground.



Σχήμα 4. 5 : Εγκαταστημένο κλισίμετρο στη στέψη του πυλώνα M8.

Figure 4.5: Inclinometer installed at the cap of the pier M8.

4.2.1.β Περιγραφή, Εγκατάσταση και Διασύνδεση Μετεωρολογικών

Η καταγραφή των μετεωρολογικών δεδομένων επιτεύχθηκε με την εγκατάσταση ενός συστήματος αισθητήρων θερμοκρασίας / πίεσης (DTM, STS) και ενός συστήματος αισθητήρων θερμοκρασίας/ υγρασίας (HMP 110, Vaisala), Σχήμα 4.9. Η καταγραφή των μετεωρολογικών δεδομένων ήταν συνεχής για όλο το χρονικό διάστημα της παρακολούθησης της κατασκευής.



(α)



(β)

Σχήμα 4. 6: (α) Αισθητήρας θερμοκρασίας υγρασίας HMP 110, Vaisala, (β) Αισθητήρας θερμοκρασίας / πίεσης

DTM, STS

Figure 4.6: (a) Meteorological sensor HMP 110, Vaisala, (b) Atmospheric and temperature Sensor DTS, STS

Οι αισθητήρες θερμοκρασίας και πίεσης (DTM, STS) τοποθετήθηκαν στην βάση του πυλώνα M7. Ο συγκεκριμένος αισθητήρας είναι ψηφιακός και έχει την δυνατότητα να ελεγχθεί και να παραμετροποιηθεί με το λογισμικό GeoMos της Leica Geosystems, δεδομένου ότι συνδέεται στο δίκτυο δεδομένων του έργου. Η συχνότητα καταγραφής της θερμοκρασίας και πίεσης του περιβάλλοντος διεξάγεται κάθε 10 λεπτά (1 measurement/10 minute).

Για την καταγραφή των συνθηκών λειτουργίας στον πυλώνα M8, εφόσον, στην προηγούμενη ενότητα αναφέρθηκε και η τοποθέτηση επιταχυνσιόμετρου υψηλής ευαισθησίας στο υψηλό βάθρο M8 τοποθετήθηκε το 2^ο σύστημα αισθητήρων καταγραφής παρατηρήσεων θερμοκρασίας και υγρασίας HMP 110, Vaisala εντός ειδικού περιβλήματος στην κορυφή του εν λόγω πυλώνα. Ο αισθητήρας έχει εύρος μέτρησης υγρασίας 0 έως 100% RH και θερμοκρασίας -40 έως + 80 ° C. Το HMP110 έχει μεταλλική θήκη με διαβαθμίσεις IP65. Ο συγκεκριμένος αισθητήρας είναι αναλογικός και η ψηφιοποίηση του σήματός πραγματοποιείται από τον ψηφιοποιητή που εφαρμόζεται στα επιταχυνσιόμετρα – συνεπώς, η συχνότητα δειγματοληψίας που παρέχει είναι 200 cycles/second (Hz). Στο Σχήμα 4.10 παρουσιάζονται οι θέσεις εγκατάστασης των μετεωρολογικών αισθητήρων.



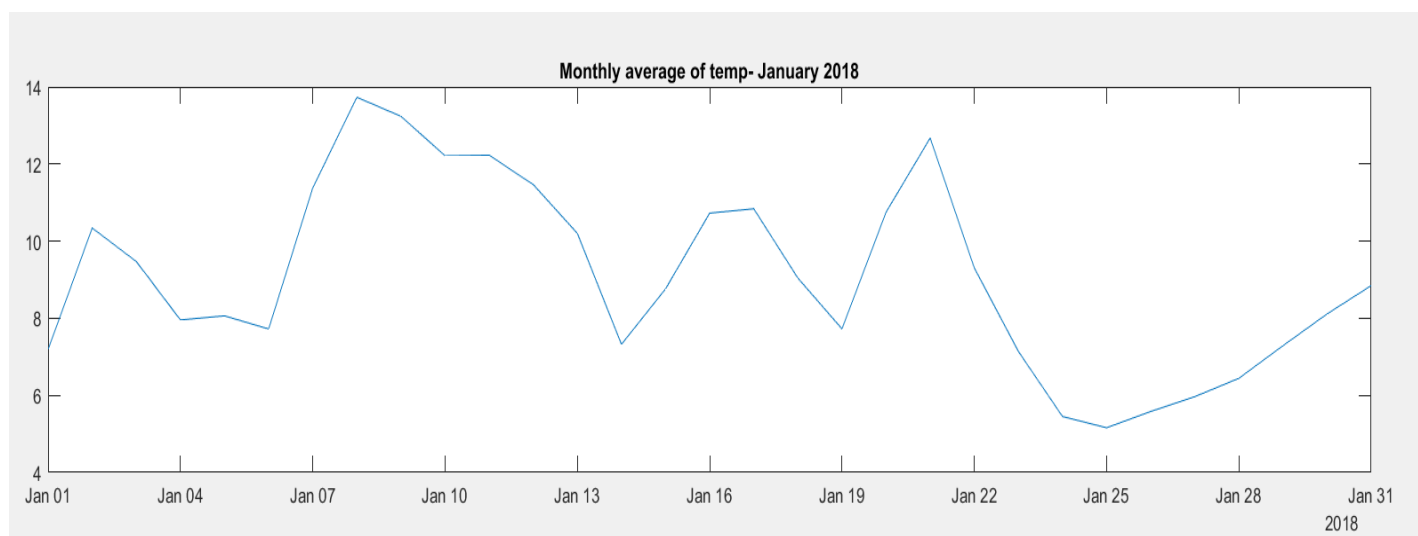
Σχήμα 4. 7: Θέσεις εγκατάστασης των αισθητήρων καταγραφής μετεωρολογικών δεδομένων

Figure 4.7: Locations installed the meteorological sensor

Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές θερμοκρασίας όπως προκύπτουν από τις μετρήσεις των αισθητήρων θερμοκρασίας για το χρονικό διάστημα Ιανουάριος 2018, ενώ, στο Σχήμα 4.8 απεικονίζεται το διάγραμμα της μέσης θερμοκρασίας για κάθε χρονική στιγμή. Με βάση τα δεδομένα η μέση θερμοκρασία κατά την διάρκεια όλου του μήνα κυμαίνεται από 1.8° C έως 16.4° C.

Θερμοκρασία [°C]	
Μέση τιμή	9.11
Μέγιστη τιμή	16.40
Ελάχιστη τιμή	1.80
Τυπική απόκλιση	3.39
Εύρος	14.6
Διακύμανση	11.52

Πίνακας 4.1: Στατιστικά στοιχεία θερμοκρασίας
Table 4.1: Statistics of the temperature



Σχήμα 4. 8: Μέση θερμοκρασία για τον Ιανουάριο 2018

Figure 4.8: Mean temperature for January 2018

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Ανάλυση δεδομένων

Σε αυτό το Κεφάλαιο, γίνεται αναφορά στις τεχνικές ανάλυσης και επεξεργασίας που χρησιμοποιήθηκαν για τα δεδομένα κλίσεων. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται αναφορά στους τύπους 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 και των συχνοτήτων.

5.1 Γενικά

Στην παρούσα εργασία τα δεδομένα αναφέρονται στις χρονο-ιστορίες κλίσεων σε δύο κάθετους άξονες μεταξύ τους (x,y) . Στόχος της ανάλυσης χρονοσειρών (time series analysis) είναι η διερεύνηση με στατιστικούς όρους της διαχρονικής συμπεριφοράς των τιμών της χρονοσειράς. Η ανάλυση των χρονοσειρών έχει ως στόχο την εκτίμηση της δυναμικής συμπεριφοράς της γέφυρας.

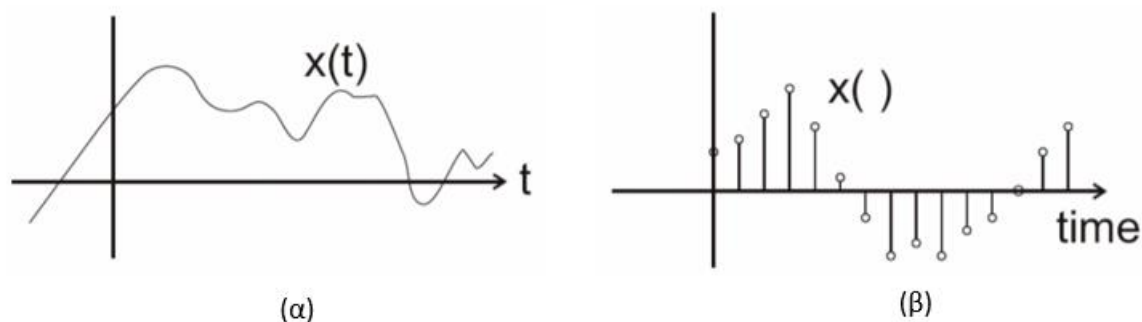
Η ανάλυση τους δύναται να πραγματοποιηθεί με χρήση κάποιας από τις παρακάτω κατηγορίες μεθόδων:

- Μέθοδοι Εξομάλυνσης
- Επεξεργασία χρονοσειρών με στατιστικές τεχνικές

5.2 Τύποι σημάτων

Σήμα αποτελεί μια ποσοτική περιγραφή ενός φαινομένου, η οποία εμπεριέχει πληροφορία ενώ υπάρχουν πολλοί τύποι σημάτων ανάλογα με το μέσο και τον τρόπο μετάδοσης. Με μαθηματικούς όρους αυτό εκφράζεται ως συνάρτηση ή ακολουθία μιας ή περισσότερων ανεξάρτητων μεταβλητών. Τα σήματα περιέχουν πληροφορία σχετικά με τη συμπεριφορά ή τη φύση ενός φαινομένου και διαχωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με τον τύπο και το πλήθος των μεταβλητών.

Συνεπώς, αν η ανεξάρτητη μεταβλητή είναι συνεχής ή διακριτή, έχουμε σήματα συνεχούς ή διακριτού χρόνου. Ανάλογα με το πλήθος των ανεξάρτητων μεταβλητών έχουμε σήματα μίας μεταβλητής ή διάστασης (μονοδιάστατα, 1-D), δύο μεταβλητών ή δύο διαστάσεων (δισδιάστατα, 2-D) και πολλών μεταβλητών ή πολλών διαστάσεων (Σκόδρας et.al, 2002).



Σχήμα 5. 1: Τύποι σημάτων: (α) Συνεχούς χρόνου, (β) Διακριτού χρόνου

Figure 5.1: Types of signals: (a) Continuous time, (b) Discrete time

Κατηγορίες σημάτων:

- **Συνεχούς χρόνου** – Continuous time (και συνεχούς πλάτους) ή αναλογικά στα οποία η ανεξάρτητη μεταβλητή είναι συνεχής.
- **Διακριτού χρόνου** – Discrete time όπου η ανεξάρτητη μεταβλητή λαμβάνει τιμές σε διακριτά χρονικά διαστήματα και κατηγοριοποιείται σε συνεχούς πλάτους ή διακριτού πλάτους.

5.3 Ανάλυση χρονοσειρών

Όσον αφορά την παρακολούθηση κατασκευών για την ανάλυση των παραμορφώσεων η ανάλυση χρονοσειρών είναι απαραίτητη. Οι μέθοδοι για την ανάλυση των χρονολογικών σειρών μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: μέθοδοι στο πεδίο των συχνοτήτων και στο πεδίο του χρόνου. Οι πρώτες περιλαμβάνουν τη φασματική ανάλυση του σήματος ενώ οι δεύτερες περιλαμβάνουν ανάλυση αυτοσυσχέτισης και ετεροσυσχέτισης των δεδομένων.

Επιπλέον, οι τεχνικές ανάλυσης χρονοσειρών μπορούν να χωριστούν σε παραμετρικές και μη παραμετρικές μεθόδους. Οι παραμετρικές προσεγγίσεις υποθέτουν ότι η υποκείμενη στατική στοχαστική διαδικασία έχει μια συγκεκριμένη δομή η οποία μπορεί να περιγραφεί με τη χρήση ενός μικρού

πλήθους παραμέτρων (για παράδειγμα, χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο αυτόματης αντιστροφής ή κινούμενου μέσου όρου). Σε αυτές τις προσεγγίσεις, στόχος είναι να εκτιμηθούν οι παράμετροι του μοντέλου που περιγράφει τη στοχαστική διαδικασία. Αντίθετα, οι μη παραμετρικές προσεγγίσεις εκτιμούν ρητά τη συνδιακύμανση ή το φάσμα της διαδικασίας χωρίς να υποθέσουμε ότι η διαδικασία έχει κάποια συγκεκριμένη δομή. Οι μέθοδοι της ανάλυσης χρονολογικών σειρών μπορούν επίσης να χωριστούν σε γραμμικές και μη γραμμικές, και σε μονομερείς και πολυπαραγοντικές.

5.3.1 Είδη σφαλμάτων

- **Χονδροειδή** τα οποία οφείλονται συνήθως στον παρατηρητή (απροσεξία παρατηρητή), αλλά και σε ξαφνική μεταβολή των συνθηκών μέτρησης. Για την εξάλειψη τους είναι απαραίτητο να επαναληφθούν οι σειρές μετρήσεων ώστε να εντοπιστούν καθώς παρατηρείται μεγάλη απόκλιση από την μέση τιμή του συνόλου των παρατηρήσεων.
- Τα **συστηματικά** σφάλματα είναι σταθερά και περιοδικά σε μέγεθος και πρόσημο και δύναται να μοντελοποιηθούν και να εκφραστούν με μαθηματικές σχέσεις. Οφείλονται σε ατέλειες οργάνων, ατμοσφαιρικές συνθήκες κ.τ.λ. Το μεγαλύτερο ποσοστό των παραπάνω σφαλμάτων αντιμετωπίζεται με συναρτησιακά μοντέλα. Το υπόλοιπο ποσοστό κατατάσσεται σε τυχαία σφάλματα και μπορεί να αντιμετωπισθεί με στατιστικές μεθόδους.
- **Τυχαία** σφάλματα όπως ο θόρυβος ο οποίος συνοδεύει το μετρούμενο σήμα και προέρχεται από εξωτερικές συνθήκες. Ο τυχαίος θόρυβος (ή λευκός θόρυβος – white noise), με σταθερή φασματική πυκνότητα, δηλαδή με την ίδια ένταση σε κάθε συχνότητα θεωρείται ιδανικός. Στην πραγματικότητα, όμως, οι παρατηρήσεις εμπεριέχουν μη-λευκό θόρυβο και χρειάζονται διάφοροι μέθοδοι (φιλτράρισμα, συσχέτιση παρατηρήσεων) για να ελαχιστοποιηθεί και να εξαχθεί καθαρή εικόνα του φαινομένου. Ένας δείκτης που μπορεί να υποδείξει την ποσότητα σήματος σε σχέση με τον θόρυβο είναι ο δείκτης SNR – Signal to Noise Ratio.

5.3.2 Βασικά στατιστικά μεγέθη

- **Μέση τιμή** – Average value

Αν x_1, x_2, \dots, x_n είναι οι τιμές των ισοβαρών παρατηρήσεων ενός δείγματος μιας μεταβλητής x , η μέση (αριθμητική) τιμή μ ορίζεται από την σχέση 5.1:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{Σχ. 5.1})$$

- **Διακύμανση** - Variance

Ο όρος $|x_i - \mu|$ περιγράφει πόσο απέχει το δείγμα i από την μέση τιμή. Κύρια μέτρα της διασποράς των δεδομένων είναι η μεταβλητότητα σ^2 όπου εκφράζει την διακύμανση των παρατηρήσεων γύρω από την μέση τιμή και η τυπική απόκλιση σ . Η μεταβλητότητα ορίζεται ως:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 \quad (\text{Σχ. 5.2})$$

Αντί της μεταβλητότητας, συνήθως, γίνεται χρήση της τυπικής απόκλισης σ η οποία εκφράζει την πιθανότητα 68% μια τιμή του δείγματος να απέχει από την μέση τιμή.

- **Συντελεστής διακύμανσης** – Coefficient of Variation

Ο συντελεστής διακύμανσης αποτελεί ένα μέτρο **σχετικής διασποράς** των τιμών και όχι της απόλυτης διασποράς. Εκφράζει, δηλαδή, τη μεταβλητότητα των δεδομένων απαλλαγμένη από την επίδραση της μέσης τιμής και ορίζεται από την σχέση:

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} 100\% \quad (\text{Σχ. 5.3})$$

- **Λόγος σήματος προς θόρυβο** – Signal to Noise Ratio

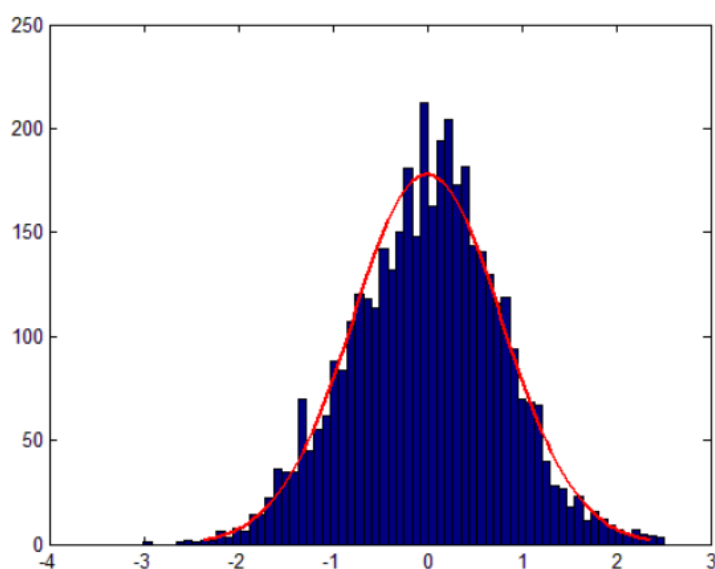
Για να υπολογισθεί η ισχύς του σήματος σε σχέση με τον θόρυβο που το συνοδεύει αρκεί να υπολογισθεί ο δείκτης SNR ή S/N. Μετριέται σε decibels (db) και ορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$SNR = \frac{\mu}{\sigma} \quad (\text{Σχ. 5.4})$$

Ουσιαστικά γίνεται σύγκριση της έντασης του ανακλώμενου σήματος με την ένταση του θορύβου, όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του δείκτη SNR τόσο καλύτερη είναι η ποιότητα του σήματος.

- **Κανονική Κατανομή**

Τα σήματα που προκύπτουν τυχαία ακολουθούν το σχήμα της κανονικής κατανομής, με μορφή «καμπάνας». Το κύριο χαρακτηριστικό της κανονικής κατανομής ή κατανομή Gauss είναι ότι είναι συμμετρική και ο μέσος είναι ίσος με τη διάμεσο και την επικρατούσα τιμή.

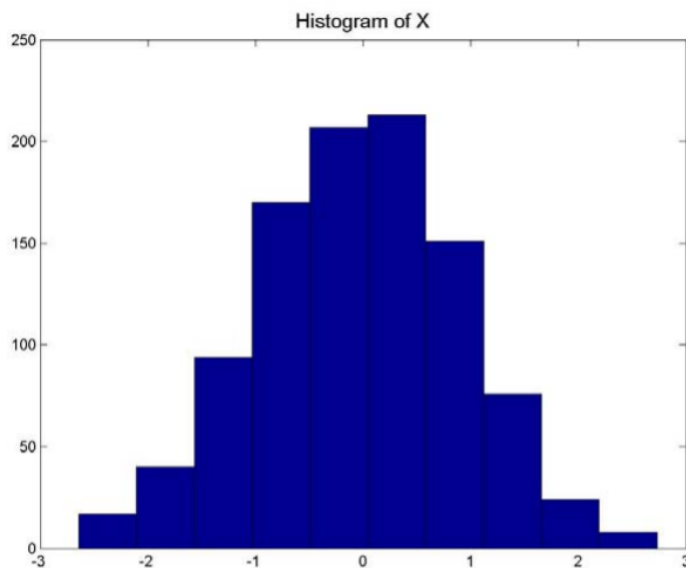


Σχήμα 5. 2: Κανονική κατανομή

Figure 5.2: Normal distribution

- **Ιστόγραμμα**

Το ιστόγραμμα αποτυπώνει τον πλήθος των δειγμάτων που λαμβάνουν μια συγκεκριμένη τιμή του δείγματος και εφαρμόζεται σε σήματα διακριτού χρόνου και τα ομαδοποιεί σε κλάσεις. Ο αριθμός των κλάσεων εξαρτάται από το μέγεθος του δείγματος και την επιθυμητή ανάλυση. Στον άξονα χ είναι το εύρος της κλάσης και στον άξονα γ είναι η συχνότητα εμφάνισης των τιμών στο δεδομένο εύρος.



Σχήμα 5. 3: Ιστόγραμμα συχνοτήτων

Figure 5.3: Histogram

5.4 Επεξεργασία ψηφιακών σημάτων – Ψηφιακά Φίλτρα

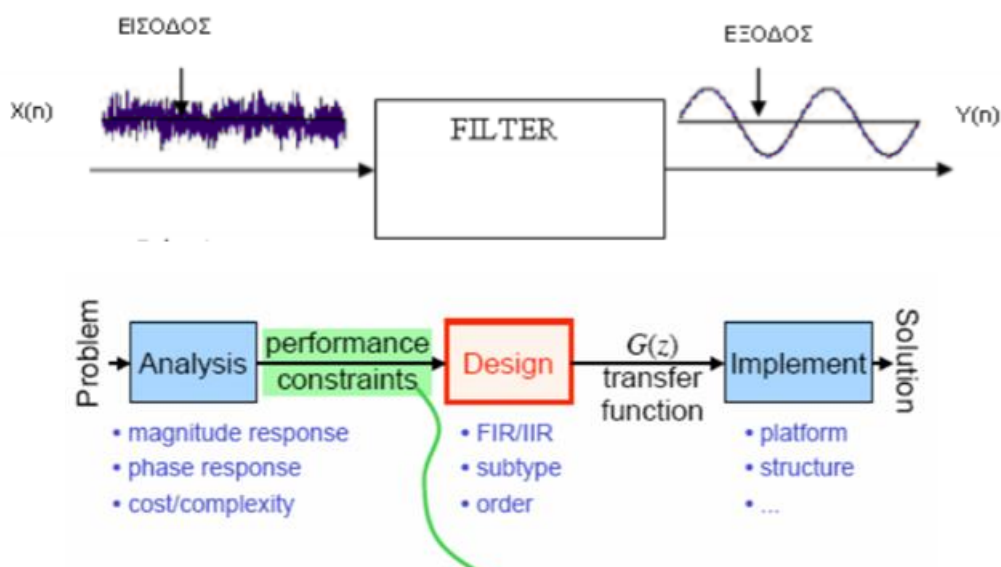
Ένα ψηφιακό φίλτρο ορίζεται ως η υπολογιστική διαδικασία με τη βοήθεια της οποίας ένα διακριτό σήμα, δηλαδή μια ακολουθία ψηφίων, μετασχηματίζεται σε μια δεύτερη ακολουθία ψηφίων που εκφράζουν το σήμα εξόδου. Στην επεξεργασία σήματος, φίλτρο που απομακρύνει τα ανεπιθύμητα μέρη μιας χρονο-ιστορίας όπως τυχαίο θόρυβο, ή εξαγάγει χρήσιμες πληροφορίες, όπως οι συνιστώσες που βρίσκονται σε μια συγκεκριμένη περιοχή συχνοτήτων. Ένα φίλτρο (filter) ορίζεται ένα γραμμικό σύστημα το οποίο είτε αποκόπτει ορισμένες συχνότητες του σήματος εισόδου ή τις διαμορφώνει. Τα πρώτα είναι γνωστά ως φίλτρα επιλογής συχνοτήτων (frequency selective filter) ενώ τα δεύτερα ως φίλτρα διαμόρφωσης συχνοτήτων (frequency shaping filter) (Oppenheim et al 1997).

Τα φίλτρα κατηγοριοποιούνται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

1. **Χαμηλοπερατά ή χαμηλής διέλευσης φίλτρα** (LPF – Low Pass Filter), που επιτρέπει τη διέλευση των χαμηλών συχνοτήτων ενώ απορρίπτει τις υψηλές. Επιτρέπει τη διέλευση όλων των συχνοτήτων από μηδέν μέχρι τη συχνότητα αποκοπής και απορρίπτει όσες είναι πάνω από αυτή. Η περιοχή από μηδέν μέχρι τη συχνότητα αποκοπής ονομάζεται ζώνη διέλευσης συχνοτήτων. Οι συχνότητες πάνω από τη συχνότητα αποκοπής ονομάζεται ζώνη αποκοπής / απόρριψης.

2. **Υψηλοπερατά φίλτρα** (HPF – High Pass Filter), που επιτρέπει τη διέλευση των υψηλών συχνοτήτων απορρίπτοντας τις χαμηλές. Ένα υψηλοπερατό φίλτρο παρεμποδίζει όλες τις συχνότητες από μηδέν μέχρι τη συχνότητα αποκοπής και επιτρέπει τη διέλευση όλων των συχνοτήτων πάνω από τη συχνότητα αποκοπής. Οι συχνότητες μεταξύ μηδέν και συχνότητας αποκοπής αποτελούν τη ζώνη αποκοπής / απόρριψης ενώ όλες οι συχνότητες πάνω από τη συχνότητα αποκοπής αποτελούν τη ζώνη διέλευσης των συχνοτήτων

3. **Ζωνοπερατά φίλτρα** (BPF - Band Pass Filter), που επιτρέπει τη διέλευση συχνοτήτων μέσα σε μία συγκεκριμένη περιοχή η οποία ορίζεται από δύο συχνότητες αποκοπής, μία χαμηλή ή κάτω συχνότητα αποκοπής f_{CL} (Low) και μία υψηλή ή πάνω συχνότητα αποκοπής f_{CH} (High). Ένα ζωνοπερατό φίλτρο απορρίπτει όλες τις συχνότητες από μηδέν μέχρι τη χαμηλή συχνότητα αποκοπής. Έπειτα επιτρέπει τη διέλευση όλων των συχνοτήτων μεταξύ της χαμηλής και υψηλής συχνότητας αποκοπής και τέλος απορρίπτει όλες τις συχνότητες που είναι πάνω από την υψηλή συχνότητα αποκοπής. Επομένως η περιοχή μεταξύ των δύο συχνοτήτων αποκοπής αποτελεί τη ζώνη διέλευσης ενώ οι συχνότητες κάτω και πάνω απ' αυτές αποτελούν τη ζώνη αποκοπής / απόρριψης. Το εύρος ζώνης BW (Bandwidth) του φίλτρου είναι η διαφορά μεταξύ της ανώτερης και κατώτερης συχνότητας αποκοπής: Η συχνότητα η οποία αποτελεί το όριο διέλευσης για κάθε φίλτρο, λέγεται συχνότητα αποκοπής. Είναι προφανές με βάση την παραπάνω διάκριση ότι το χαμηλοπερατό και το υψηλοπερατό φίλτρο έχουν μια συχνότητα αποκοπής, ενώ το ζωνοπερατό έχει δύο.



Σχήμα 5. 4: Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας του φιλτραρίσματος

Figure 5.4: Presentation of the filtering procedure

(Πηγή: Γεωργιάκης, 2014)

Τα φίλτρα για την εξομάλυνση του θορύβου του σήματος εισόδου χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τα Φίλτρα Πεπερασμένης Κρουστικής Απόκρισης (FIR-Finite impulse response filters) και τα Φίλτρα «άπειρης» κρουστικής απόκρισης (IIR- Infinite impulse response filters). Τα πρώτα υπολογίζονται είτε με τη μέθοδο των παραθύρων, είτε με τη μέθοδο των βέλτιστων ισοκυματικών φίλτρων. Με τη μέθοδο των παραθύρων χρησιμοποιούνται τα τέσσερα παράθυρα που έχουν αναλυθεί, το τετραγωνικό παράθυρο (boxcar), το τριγωνικό παράθυρο (triangular), το παράθυρο Hanning και τέλος το παράθυρο Hamming. Τα φίλτρα IIR υπολογίζονται με το φίλτρο Butterworth, τα φίλτρα Chebyshev τύπου I και II καθώς και το ελλειπτικό φίλτρο.

Η επιλογή του καταλληλότερου φίλτρου ή φίλτρων για την επεξεργασία ενός σήματος προκύπτει με σύγκριση των τιμών των στατιστικών μεγεθών που προκύπτουν από την επεξεργασία του σήματος με τα διαφορετικά φίλτρα. Να σημειωθεί ότι από τα παραπάνω στατιστικά μεγέθη, η ακρίβεια των χρησιμοποιούμενων φίλτρων δίνεται από τις τιμές της τυπικής απόκλισης καθώς και του μέσου τετραγωνικού σφάλματος. Συνεπώς κυρίως αυτές οι δύο τιμές λαμβάνονται υπόψη για την αξιολόγηση των φίλτρων.

Παρακάτω θα γίνει αναφορά στα χαμηλοπερατά φίλτρα Moving average, Moving median, Savitzky Golay τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην συγκεκριμένη εργασία.

5.4.1 Φίλτρο εξομάλυνσης Κινητού μέσου

Το φίλτρο κινητού μέσου όρου (moving average filter) είναι ένα χαμηλοπερατό FIR (Finite Impulse Response) φίλτρο το οποίο το μέσο όρο των παρατηρήσεων στο σήμα εισόδου για την παραγωγή κάθε σημείου στο σήμα εξόδου και εκφράζεται με την σχέση:

$$y[i] = \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} x[i + j] \quad (\text{Σχ. 5.5})$$

όπου,

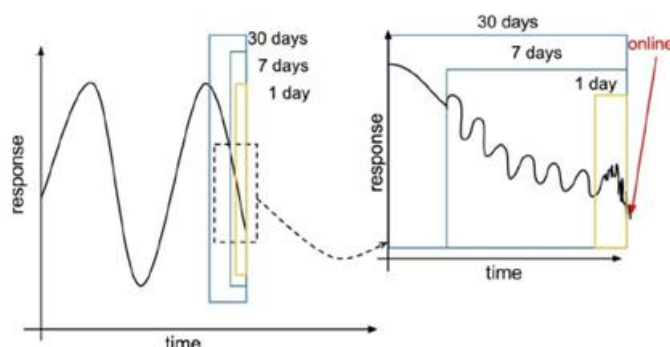
x: το σήμα εισόδου

y: το σήμα εξόδου

M: ο αριθμός των δεδομένων που χρησιμοποιούνται στο φίλτρο

Σημαντικός παράγοντας που πρέπει να ορισθεί είναι το μέγεθος του παραθύρου (window size) στο οποίο υπολογίζει τον μέσο όρο τους.

Εναλλακτικά μπορεί να γίνει χρήση του moving median φίλτρου στο οποίο υπολογίζεται η διάμεσος των σημείων του σήματος εισόδου.



Σχήμα 5.5: Εφαρμογή φίλτρου στα σήμα εισόδου με διαφορετικά μεγέθη παραθύρου

Figure 5.5: Filter applied to the input signal with different window sizes

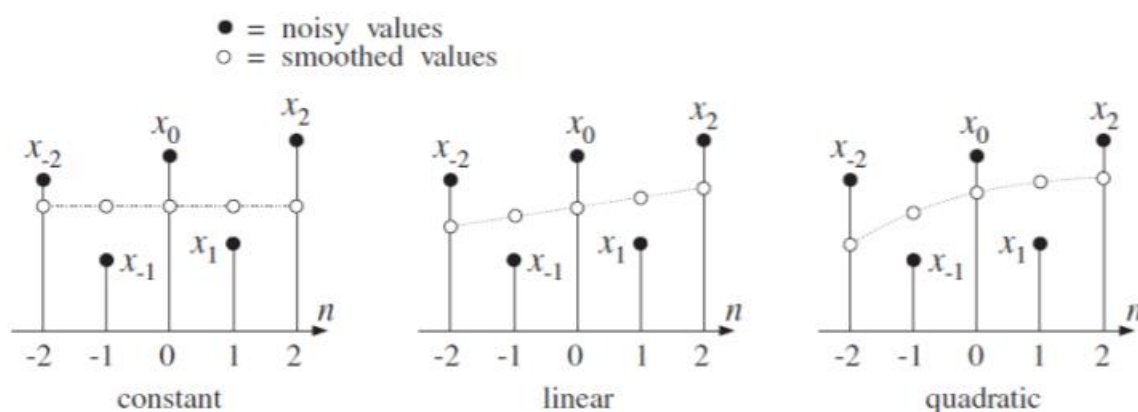
5.4.2 Φίλτρο εξομάλυνσης Savitzky-Golay

Το φίλτρο Savitzky-Golay είναι ένα ψηφιακό φίλτρο που εφαρμόζεται ευρέως σε τεχνικές επεξεργασίας σήματος [Orfanidis, 2010]. Μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα σύνολο σημείων ενός σήματος και περιγράφει μια ακολουθία τιμών ή μετρήσεων, με σκοπό την εξομάλυνση των δεδομένων, δηλαδή, να αυξηθεί ο λόγος σήματος προς το θόρυβο (signal to noise ratio, S/N) χωρίς να υπάρξει στρέβλωση του σήματος. Αυτό επιτυγχάνεται με μια διαδικασία γνωστή ως συνέλιξη, δηλαδή την προσαρμογή διαδοχικών συνόλων γειτονικών σημείων με ένα πολυώνυμο χαμηλού βαθμού χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων.

Η μέθοδος βασίζεται σε καθιερωμένες μαθηματικές διαδικασίες και έγινε γνωστή από τους Abraham Savitzky και Marcel J.E Golay, οι οποίοι δημοσίευσαν πίνακες των συντελεστών συνέλιξης για διάφορα πολυώνυμα και μεγέθη υποσυνόλων (Savitzky & Golay, 1964). Οι ερευνητές έδειξαν πως η πολυωνυμική προσαρμογή μπορεί να εφαρμοστεί όπως ένα φίλτρο κυλιόμενων μέσων όρων με βάρη, καθώς οι συντελεστές τις διαδικασίες εξομάλυνσης είναι ίδιοι για όλες τις τιμές της εξομαλυμένης σειράς. Έτσι, η εξομάλυνση με τη χρήση φίλτρων Savitzky-Golay είναι απλή σχετικά διαδικασία. Επίσης ο ίδιος αλγόριθμος μπορεί να εφαρμοστεί για την εξομάλυνση της πρώτης και της δεύτερης παραγώγου της σειράς του σήματος. Τα φίλτρα Savitzky-Golay πλεονεκτούν έναντι άλλων φίλτρων εξομάλυνσης, καθώς, διατηρούν το περιεχόμενο υψηλής συχνότητας. Η μέθοδος έχει επεκταθεί και για εφαρμογή σε δεδομένα δύο και τριών διαστάσεων.

Οι εξομαλυμένες τιμές λαμβάνονται από τη προσαρμογή θέση προς θέση σε κάθε σημείο του δείγματος μιας n -οστού βαθμού πολυωνυμικής συνάρτησης σε n γειτονικά σημεία εκατέρωθεν του σημείου αναφοράς (σύνολο $2n + 1$ σημεία). Η προσαρμογή γίνεται με μια υπόθεση ελαχίστων τετραγώνων μεταξύ του μητρώου των σημείων x , του διανύσματος εξομαλυμένων σημείων y και του πίνακα συντελεστών b :

Οι Savitzky and Golay (1964) εφάρμοσαν το φίλτρο τους και για διάφορους βαθμούς συναρτήσεων n και για διαφορετικά μήκη l , οπότε στη γενική περίπτωση το μήκος l που εφαρμόζεται η εξομάλυνση δεν είναι απαραίτητα ίσο με $2n + 1$, αρκεί όμως να είναι μεγαλύτερο. Έτσι, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.12, το μέγεθος n επηρεάζει τη ποιότητα της εξομάλυνσης, ενώ το μήκος l είναι το μήκος επιρροής της εξομάλυνσης. Αξίζει να σημειωθεί πως για $n = 0$ το φίλτρο Savitzky-Golay μεταπίπτει σε φίλτρο κινητού μέσου όρου. Στο Σχήμα 5.6 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα εξομάλυνσης σήματος με το φίλτρο Savitzky-Golay.



Σχήμα 5. 6: Εξομάλυνση μεταξύ πέντε σημείων για διαφορετικούς βαθμούς πολυωνυμικής συνάρτησης $n = 0, 1$ και 2

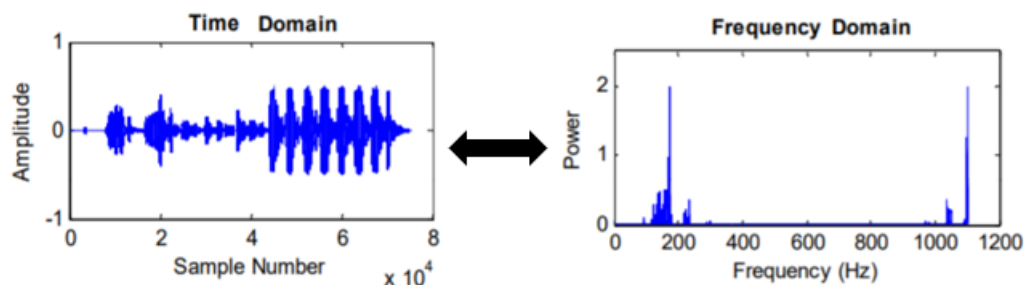
Figure 5.6: Smoothing within 5 point for different for polynomial order $n=0,1,2$

(Πηγή: Orphanides, 2010)

5.5 Ανάλυση δεδομένων στο επίπεδο συχνοτήτων

Η επεξεργασία σήματος πραγματοποιείται στο πεδίο του χρόνου (time domain) όπως προαναφέρθηκε στις προηγούμενες ενότητες και στο πεδίο των συχνοτήτων (frequency domain). Η ανάλυση χρονοσειρών στο πεδίο των συχνοτήτων είναι συμπληρωματική της ανάλυσης στο πεδίο του χρόνου, αλλά μπορεί να διερευνήσει χαρακτηριστικά που δεν εντοπίζονται εύκολα με την ανάλυση στο πεδίο του χρόνου. Αυτά τα χαρακτηριστικά έχουν κυρίως σχέση με περιοδικότητες που συνυπάρχουν στη χρονοσειρά. Ουσιαστικά, οι χρονοσειρές δεν είναι συνήθως απλά διακριτά περιοδικά ή συνεχή ημιτονοειδή σήματα και η ανάλυση στο πεδίο των συχνοτήτων προσπαθεί να εντοπίσει συχνότητες που

έχουν μεγαλύτερη σημασία (δηλαδή ισχύ) από άλλες διότι μπορούμε να εντοπίσουμε αλλαγές στην προς μελέτη αντικείμενο. Σε συνεχείς παρατηρήσεις και μεγάλου όγκου γίνεται χρήση συνήθως ο ταχύς μετασχηματισμός Fourier.



Σχήμα 5. 7 Σχηματική αναπαράσταση του μετασχηματισμού από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο των συχνοτήτων

Figure 5.7: Presentation of the transformation of a signal

(Πηγή: www.utdallas.edu)

5.5.1 Η έννοια της συχνότητας

Η συχνότητα σχετίζεται με την αρμονική ταλάντωση που περιγράφεται από ημιτονοειδής συναρτήσεις και σχετίζεται άμεσα με την έννοια του χρόνου, αφού η διάσταση της είναι το αντίστροφο του χρόνου. Μια απλή αρμονική ταλάντωση ορίζεται μαθηματικά από το ημιτονοειδές σήμα συνεχούς χρόνου ή διακριτού χρόνου:

$$x(t) = A \cos(\Omega t + \theta), \text{ συνεχούς χρόνου} \quad (\text{Σχ. 5.6})$$

$$x(n) = A \cos(\omega n + \theta), \text{ διακριτού χρόνου} \quad (\text{Σχ. 5.7})$$

A: το πλάτος (amplitude) του ημιτονοειδούς

θ : η αρχική φάση σε rad

Ω, ω : η γωνιακή συχνότητα σε rad/sec

F: η συχνότητα σε κύκλους/sec (cycles/sec – Hz)

f: η συχνότητα σε κύκλους ανά δείγμα

Ένα ημιτονοειδές σήμα διακριτού χρόνου παρουσιάζει τις ακόλουθες ιδιότητες:

- Τα σήματα των οποίων οι συχνότητες διαφέρουν κατά ακέραιο πολλαπλάσιο του 2π , ταυτίζονται.

- Ο μέγιστος αριθμός ταλάντωσης επιτυγχάνεται για $\omega=\pi$ ή ισοδύναμα $f = \frac{1}{2}$.

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 την συχνότητα δειγματοληψίας ενός αναλογικού 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.

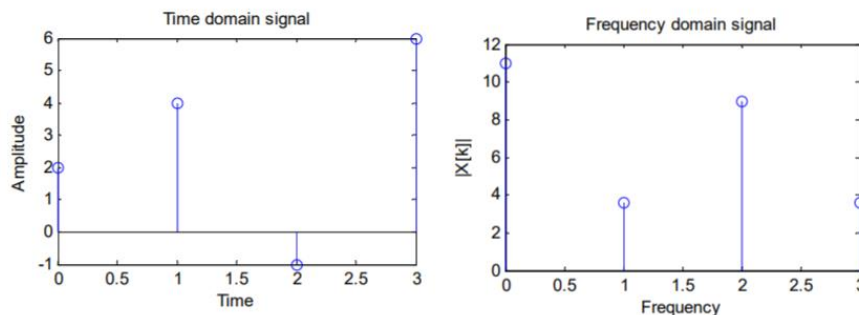
Η συχνότητα F_s με την οποία λαμβάνονται τα δείγματα ενός σήματος πρέπει να είναι τουλάχιστον διπλάσια από την υψηλότερη συχνότητα που περιέχεται στο σήμα.

5.5.2 Μετασχηματισμός Fourier διακριτού χρόνου

Ο μετασχηματισμός Fourier διακριτού χρόνου (DFT, Discrete Fourier Transformation) εφαρμόζεται σε σήματα διακριτού χρόνου $x(n)$ και αναπαριστά τα εξαγόμενα σήματα ως ένα συνδυασμό μιγαδικών εκθετικών συναρτήσεων της μορφής $e^{-j\omega n}$, όπου ω η κυκλική συχνότητα που εκφράζεται σε rad/sec και n το πλήθος των παρατηρήσεων.

Ας σημειωθεί ότι, αφού η $X(e^{j\omega})$ είναι περιοδική με περίοδο 2π , μόνο τα δείγματα της βασικής περιοχής συχνοτήτων είναι απαραίτητα. Επειδή τα δείγματα αυτά προκύπτουν από τον υπολογισμό του μετασχηματισμός Fourier $X(e^{j\omega})$ σε N ισαπέχουσες διακριτές συχνότητες ο μετασχηματισμός ονομάζεται διακριτός μετασχηματισμός Fourier (Discrete Fourier Transform, DFT) της $x(n)$.

Για την εφαρμογή του μετασχηματισμού DFT τα σήματα πρέπει να είναι περιοδικά και διακριτού χρόνου και να είναι ισαπέχοντα. Επίσης, οι συνηθέστεροι αλγόριθμοι υπολογισμού του DFT προϋποθέτουν ο αριθμός του δείγματος N να είναι Δύναμη του 2 $N=2^k$. Αν υπάρχουν περιττά δεδομένα ο αλγόριθμος τα απορρίπτει από τον υπολογισμό. Αν υπάρχει πλεόνασμα δεδομένων υπολογίζονται με παρεμβολή ή θεωρούνται μηδενικά και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 5. 8: Παράδειγμα του μετασχηματισμού DFT

Figure 5.8: Example of DFT transform

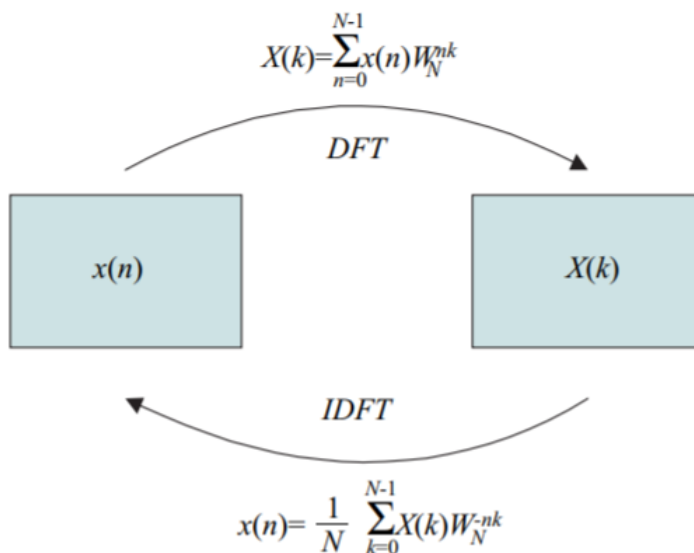
Ο μετασχηματισμός Fourier διακριτού χρόνου του σήματος $x(n)$ εκφράζεται μαθηματικά από την παρακάτω σχέση:

$$X(e^{j\omega}) = F\{x(n)\} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n) e^{j\omega n} \quad (\Sigma\chi. 5.8)$$

Ο αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier διακριτού χρόνου (IDFT – Inverse Discrete Time Frequency transformation) ορίζεται ως η σύνθεση του σήματος στο πεδίο του χρόνου από τις τιμές στο πεδίο των συχνοτήτων και η ακολουθία $x(n)$ μπορεί να ανακατασκευαστεί από τα δείγματα $X(k)$ στη συχνότητα με βάση την σχέση:

$$x(n) = F^{-1}\{X(e^{j\omega})\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} X(e^{j\omega}) e^{j\omega n} d\omega \quad (\Sigma\chi. 5.9)$$

Στην συνέχεια παρουσιάζεται η Σχηματική αναπαράσταση των δύο μετασχηματισμών DFT, IDFT.



Σχήμα 5. 9: Απεικόνιση μετασχηματισμού IDFT

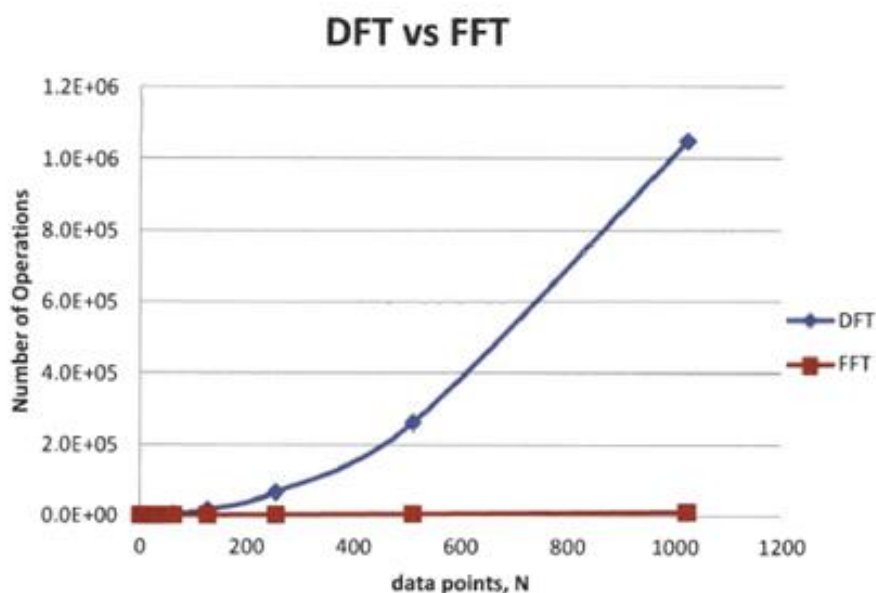
Figure 5.9: Presentation of the IDFT transform

(Πηγή: Σκόδρας & Αναστασόπουλος, 2003)

5.5.3 Ταχύς Μετασχηματισμός Fourier, FFT

Ο FFT (Fast Fourier Transform) είναι μετασχηματισμός ο οποίος χρησιμοποιείται για την επεξεργασία σήματος, αναλύοντας τις χρονοσειρές σε ημιτονοειδής συναρτήσεις. Ουσιαστικά αναλύει τις χρονοσειρές σε συνιστώσες συχνότητας. Ουσιαστικά, κατακερματίζει έναν μετασχηματισμό DFT N σημείων σε N μετασχηματισμούς DFT του ενός σημείου.

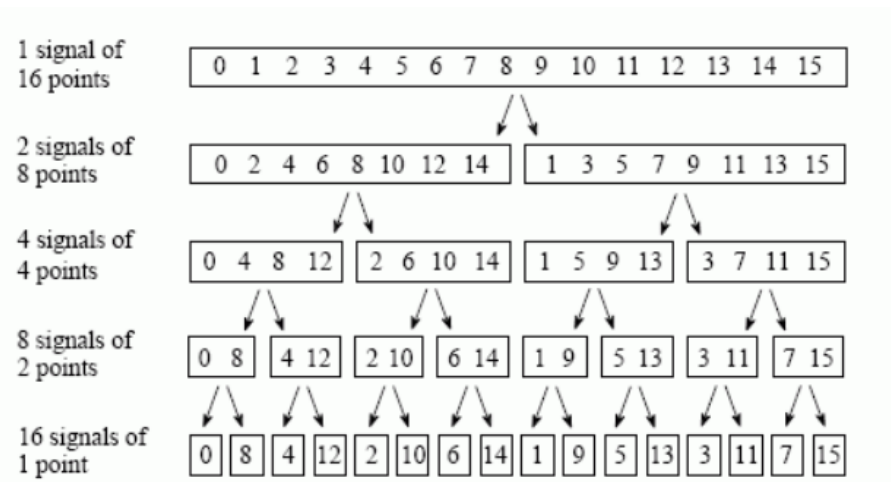
Συγκριτικά με τον μετασχηματισμό DFT υπερέρχει στον χρόνο υπολογισμού λόγω της μικρής υπολογιστικής πολυπλοκότητας. Ενδεικτικά, ο αριθμός των διεργασιών με τον μετασχηματισμό FFT μειώνεται σε $N \log 2N$.



Σχήμα 5. 10: Αριθμός διεργασιών με τον μετασχηματισμό DFT σε σχέση με την FFT

Figure 5.10: Number of operations required with the transform DFT in comparison with FFT

Ο Ταχύς Μετασχηματισμός Fourier $X(k)$ 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 είναι το χρονικό διάστημα μεταξύ των τιμών της χρονοσειράς. Το μέγεθος της κάθε συχνότητας εκφράζει την σημαντικότητα με την οποία συμμετέχει η αντίστοιχη συχνότητα στην χρονοσειρά. Συνεπώς, όταν το μέγεθος $X(k)$ λαμβάνει υψηλές τιμές συνεπάγεται μεγάλη συμμετοχή της αντίστοιχης συχνότητας στη χρονοσειρά. Άρα, αν μια χρονοσειρά παρουσιάζει μια περιοδικότητα τότε η αντίστοιχη συχνότητα θα παρουσιάζει μεγάλη τιμή μεγέθους.



Σχήμα 5. 11: Σχηματική αναπαράσταση του κατακερματισμού FFT σε N σχηματισμούς DFT

Figure 5.11: Presentation of the FFT segmentations to N formations DFT

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Ανάλυση δεδομένων ψηφιακών κλισιμέτρων

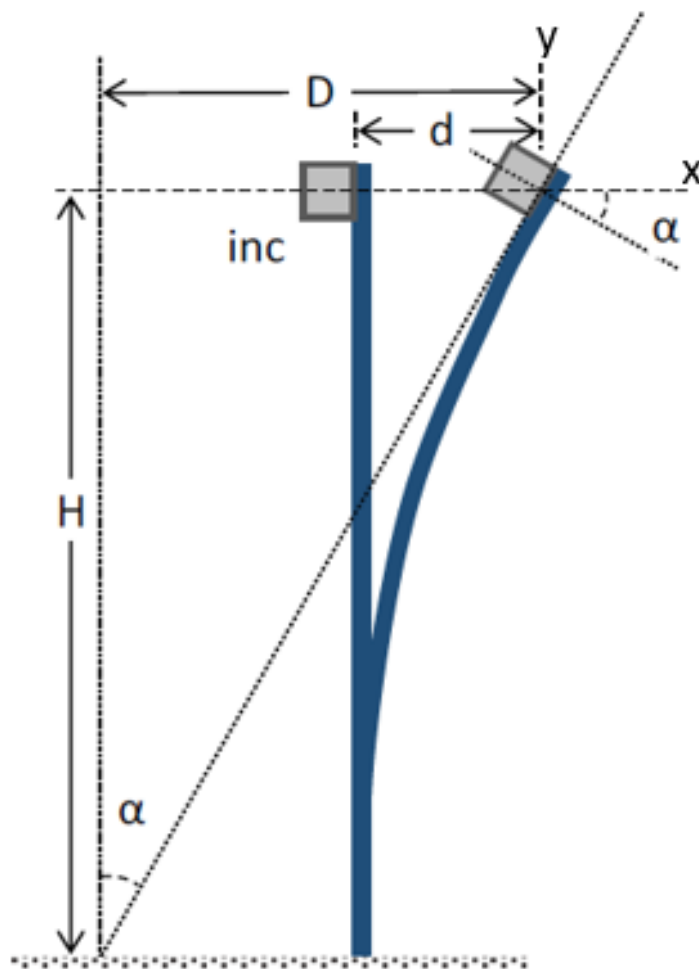
6.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα στάδια της ανάλυσης των μετρήσεων ψηφιακών κλισιμέτρων για τα διαθέσιμα δεδομένα παρατήρησης. Για την εισαγωγή, απεικόνιση και ανάλυση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό MATLAB R2017a. Το Κεφάλαιο αυτό χωρίζεται σε τρία μέρη: στο πρώτο μέρος γίνεται απεικόνιση των διαθέσιμων πρωτογενών μετρήσεων κλίσης και αναλύονται οι στατιστικές παράμετροι των παρατηρήσεων. Στο δεύτερο μέρος ακολουθεί η επεξεργασία των δεδομένων που προέκυψαν από τα κλισίμετρα για ένα μήνα παρατηρήσεων και η συσχέτιση τους με τα μετεωρολογικά δεδομένα. Στο τρίτο μέρος παρουσιάζεται η εποχικότητα που παρουσιάζουν τα δεδομένα στην διάρκεια ενός έτους.

6.2 Στατιστική ανάλυση δεδομένων κλίσεων πυλώνων

Τα δεδομένα κλίσεων από τα τέσσερα ψηφιακά κλισίμετρα που συζητήθηκαν στην Ενότητα 3.2.1 πραγματοποιήθηκαν με συνεχή καταγραφή από τον Ιανουάριο 2018 έως Ιανουάριο 2019. Στην παρούσα εργασία θα μελετηθούν τα δεδομένα κλίσεων και μετεωρολογικών για τον μήνα Ιανουάριο 2018 των ψηφιακών κλισιμέτρων τα οποία εγκαταστάθηκαν υψηλά βάθρα του κλάδου ΚΛ8 (Μ6, Μ7, Μ8). Ακολούθως, θα γίνει περαιτέρω ανάλυση για τα δεδομένα κλίσεων που προέκυψαν από το κλισίμετρο στο βάθρο Μ8 για τους μήνες Ιανουάριο 2018, Ιούνιο 2018 και Ιανουάριο 2019.

Σύμφωνα με την Ενότητα 3.3, οι πρωτογενείς μετρήσεις κάθε κλισίμετρου εκφράζουν τη γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του κατακόρυφου επιπέδου και του επιπέδου που υλοποιεί ο αισθητήρας, η οποία μεταβάλλεται ανάλογα με την κλίση του πυλώνα της γέφυρας όπου έχει προσαρμοστεί ο αισθητήρας. Κάθε κλισίμετρο μετράει την γωνία κλίσης του πυλώνα της γέφυρας σε δύο κάθετες διευθύνσεις x και y οι οποίες σύμφωνα με τον τρόπο τοποθέτησης / προσανατολισμού τους (Σχήμα 6.1) αντιστοιχούν σε μετρημένες γωνίες κλίσεων κατά πλάτος και κατά μήκος του διατομής του πυλώνα αντίστοιχα.



Σχήμα 6. 20: Διατμητική επίδραση που παρατηρούνται στα δεδομένα κλί-

Figure 6.1: Shear effect on inclinometer observations
(Πηγή: Gikas et.al, 2019)

Όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3 όπου παρουσιάστηκαν τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ψηφιακού κλισιμέτρου NIVEL 220, ο αισθητήρας έχει εύρος μέτρησης ± 1.51 mrad, κρίθηκε λοιπόν σκόπιμο να ληφθούν οι τιμές μέχρι ± 1.5 mrad (± 960 cc).

Οι σειρές μετρήσεων που προέκυψαν για τα συνολικά χρονικά διαστήματα παρατήρησης είναι:

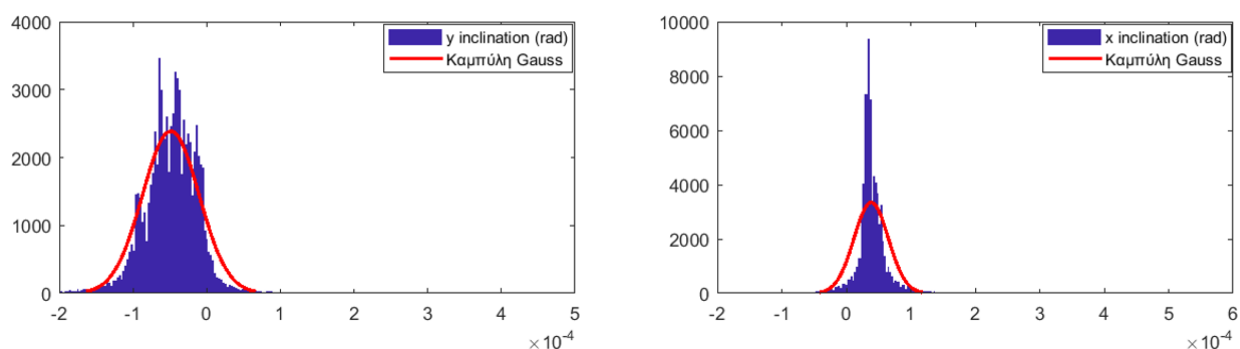
- 4 ψηφιακά κλισίμετρα στα υψηλά βάθρα M6 (44.447 παρατηρήσεις), M7 (44.446 παρατηρήσεις), M8 (81.500 παρατηρήσεις) για τον μήνα Ιανουάριο.
- 1 μετεωρολογικός σταθμός στην στέψη του υψηλού βάθρου M8 για τον μήνα Ιανουάριο από τον οποίο εξάγονται τα θερμοκρασιακά δεδομένα (44.465 παρατηρήσεις)

Στον παρακάτω Πίνακα 6.1 παρουσιάζεται η σύνοψη των στατιστικών δεικτών των δεδομένων των κλίσεων που προέκυψαν από τα κλισίμετρα M8, M7, M6.

	M6 [mrad]		M7 [mrad]		M8 [mrad]	
	x	y	x	y	x	y
Μέση τιμή	-0.0908	0.1578	0.0542	0.0072	0.0386	-0.0487
Μέγιστη τιμή	0.1430	-0.1250	0.1200	0.2830	0.5040	0.2330
Ελάχιστη τιμή	-0.2620	0.4660	-0.2720	-0.3150	-0.2780	-0.5740
Τυπική απόκλιση	0.0186	0.0410	0.0243	0.0437	0.0266	0.0384
Εύρος	0.4050	0.5910	0.3920	0.5980	0.7820	0.8070
Διακύμανση	3.4500e-7	1.6827e-6	5.9116e-7	1.9121e-6	7.0705e-7	1.4771e-6

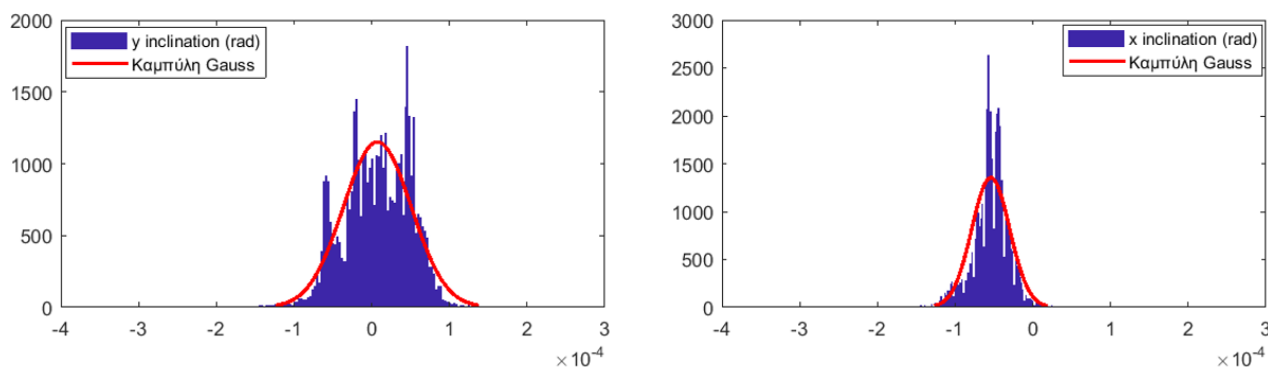
Πίνακας 6.1: Στατιστικά στοιχεία μετρήσεων κλίσεων στην στέψη των πυλώνων M6, M7, M8
 Table 6.1: Statistics of the inclinations measurement t the cap of each of the piers M6, M7, M8

Στα Σχήματα 6.1, 6.2, 6.3 παρουσιάζονται τα διαγράμματα συχνότητας εμφάνισης (ιστογράμματα) για τις μετρήσεις κλίσεων από τα ψηφιακά κλισίμετρα NIVEL M8, M7, M6.



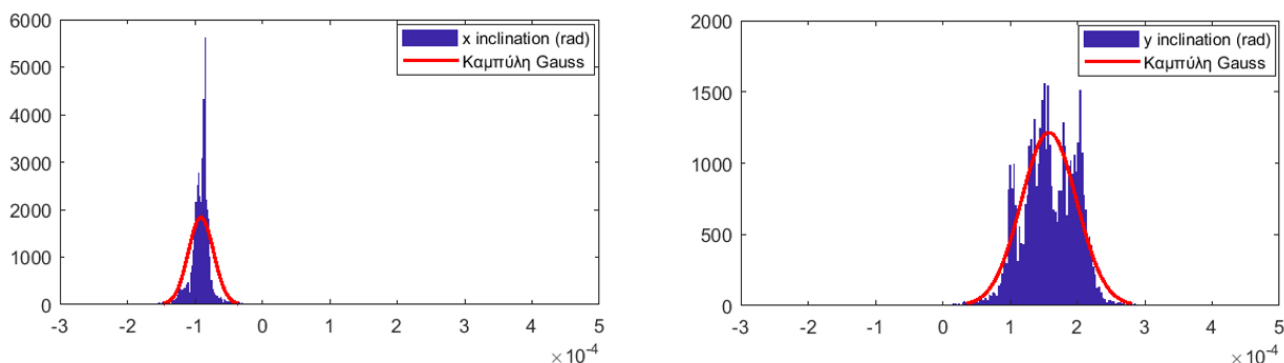
Σχήμα 6. 21: Διαγράμματα πλήθους εμφανίσεων κλίσεων στη στέψη του M8 (ΚΛ8)

Figure 6.2: Histograms of the inclination data at the cap of the pier M8 (SC8)



Σχήμα 6. 22: Διαγράμματα πλήθους εμφανίσεων κλίσεων στη στέψη του M7 (ΚΛ8)

Figure 6.3: Histograms of the inclination data at the cap of the pier M7 (SC8)

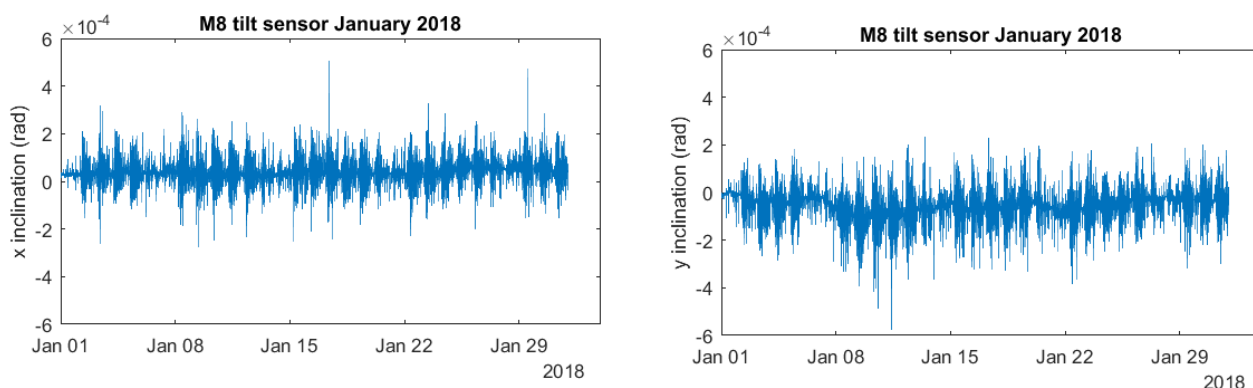


Σχήμα 6. 23: Διαγράμματα πλήθους εμφανίσεων κλίσεων στη στέψη του M6

Figure 6.4: Histograms of the inclination data at the cap of the pier M6 (SC8)

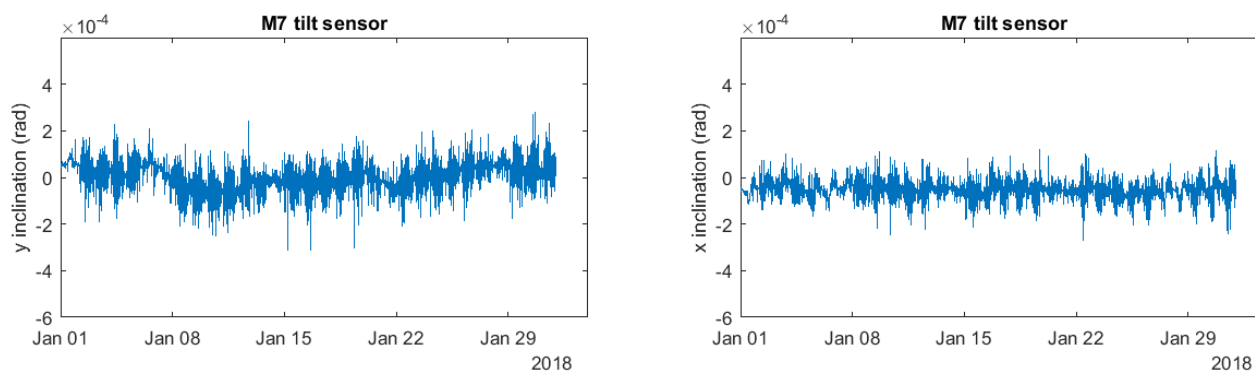
Όπως παρατηρείται από τα ιστογράμματα 6.2 έως 6.4, οι παρατηρήσεις ακολουθούν ομοιόμορφη κατανομή γύρω από την μέση τιμή. Επίσης, και στα τρία κλισίμετρα τα οποία έχουν εγκατασταθεί στη στέψη των πυλώνων της γέφυρας η απόκλιση από την κατακόρυφο του πυλώνα κατά την διεύθυνση x είναι πολύ μικρότερη σε όλο το πλήθος των παρατηρήσεων σε σχέση με την κλίση που παρουσιάζεται κατά την διεύθυνση y .

Στα σχήματα 6.5, 6.6, 6.7 παρουσιάζονται τα διαγράμματα των χρονοσειρών των πρωτογενών μετρήσεων για το χρονικό διάστημα Ιανουάριος 2018 που προέκυψαν από τα ψηφιακά κλισίμετρα M8, M7, M6 κατά τις διευθύνσεις x και y . Τα δεδομένα παρουσιάζουν αρκετό θόρυβο ο οποίος με διάφορες μεθόδους επεξεργασίας σήματος θα εξομαλυνθεί για να αφαιρεθούν οι ακραίες τιμές και να φανεί η καθαρή περιοδικότητα των δεδομένων.



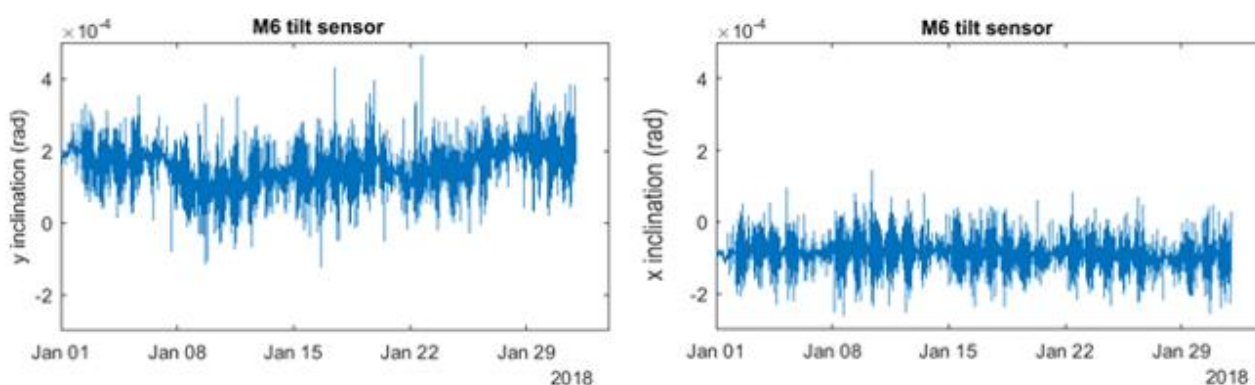
Σχήμα 6. 24: Χρονοσειρές πρωτογενών κλίσεων στη στέψη του πυλώνα M8

Figure 6.5: Timeseries inclinations raw data at the cap of the pier M8 (SC8)



Σχήμα 6. 25 :Χρονοσειρές πρωτογενών κλίσεων στη στέψη του πυλώνα M7

Figure 6.6: Timeseries inclinations raw data at the cap of the pier M7 (SC8)

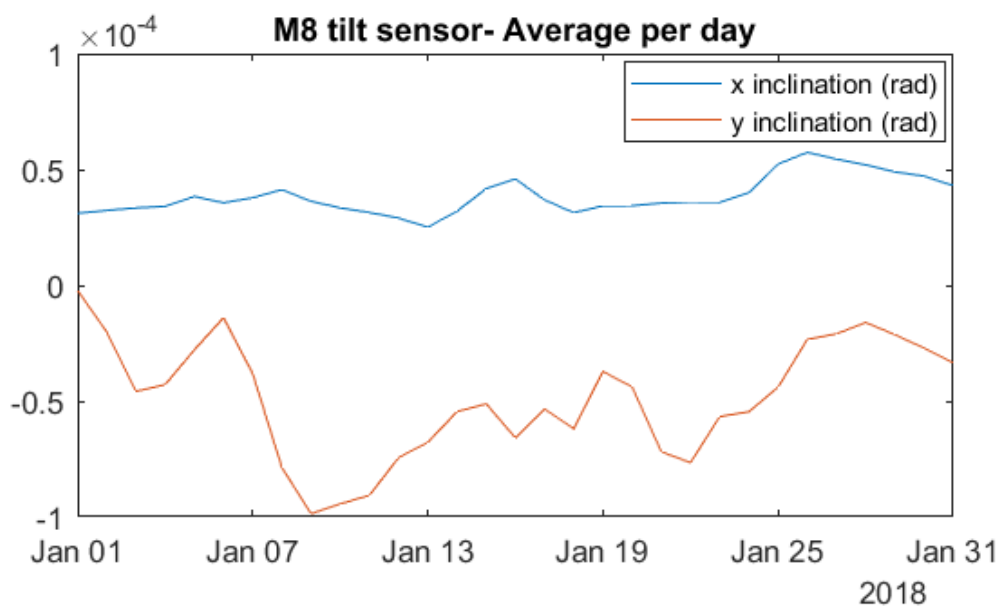


Σχήμα 6. 26: Χρονοσειρές πρωτογενών κλίσεων στη στέψη του πυλώνα M6

Figure 6.7: Timeseries inclinations raw data at the cap of the pier M6 (SC8)

Από τα διαγράμματα των Σχημάτων 6.5 έως 6.7 προκύπτει ότι η απόκλιση από την κατακόρυφο που ορίζεται από την θέση του κλισιμέτρου στη στέψη του πυλώνα κατά την διεύθυνση y οι μετακινήσεις έχουν μεγαλύτερο εύρος. Συγκεκριμένα, για το υψηλό βάθρο M8 το εύρος για την κλίση στην y διεύθυνση είναι 0.8070 mrad συγκριτικά με την κλίση στην x διεύθυνση 0.7820 mrad, για το υψηλό βάθρο M7 το εύρος για την κλίση στην διεύθυνση y είναι 0.5980 mrad συγκριτικά με την κλίση στην x διεύθυνση 0.3920 mrad και στο βάθρο M6 εύρος 0.5910 mrad και 0.4050 mrad αντίστοιχα.

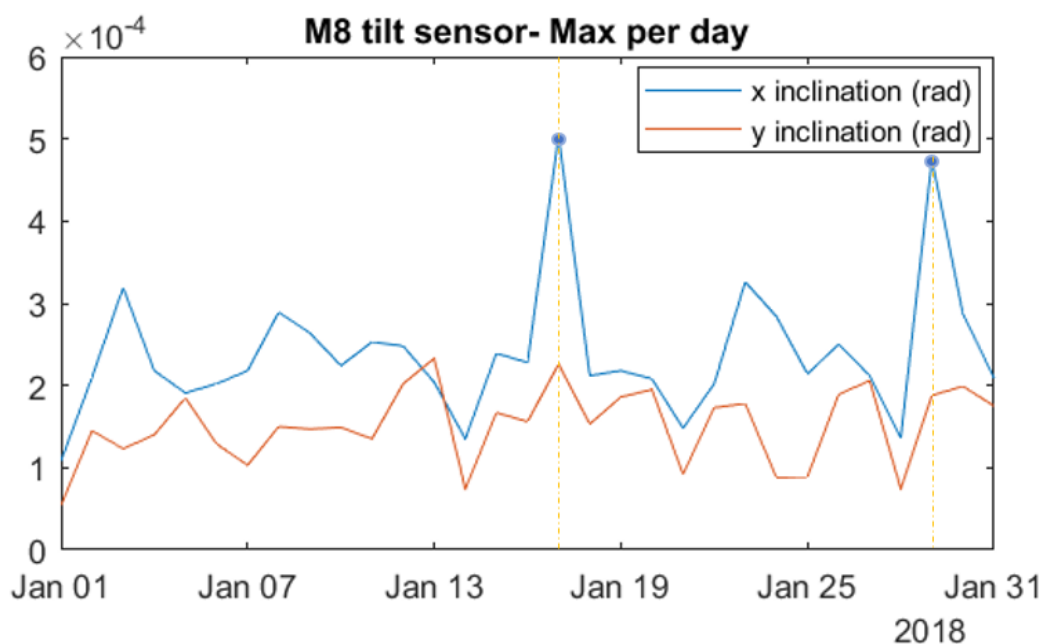
Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα που απεικονίζουν τις μέσες τιμές ανά ημέρα και τις μέγιστες/ ημέρα για να απομακρυνθούν οι διακυμάνσεις για τον μήνα Ιανουάριο για κάθε κλισίμετρο για τις κλίσεις x, y .



Σχήμα 6. 27: Μέσες ημερήσιες τιμές κλίσεων στη στέψη του πυλώνα M8 (ΚΛ8)

Figure 6.8: Mean daily values of inclinations at the cap of the pier M8

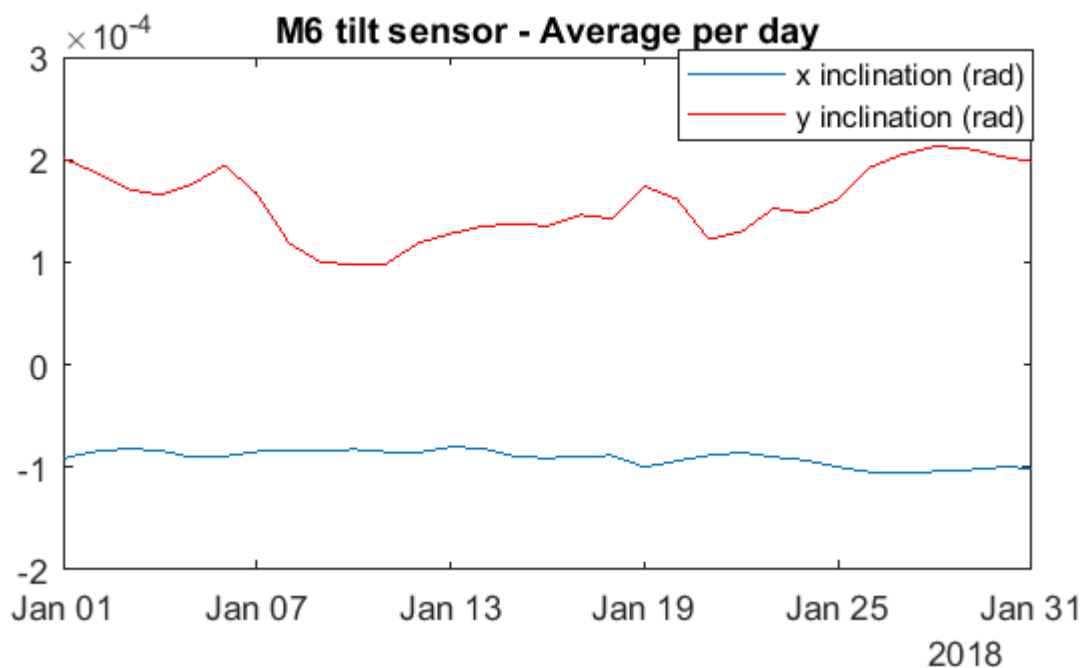
Από το σχήμα 6.7 φαίνεται ότι οι μεγαλύτερες μετακινήσεις σημειώθηκαν στις 6 και 27 Ιανουαρίου 2018.



Σχήμα 6. 28: Μέγιστες ημερήσιες τιμές κλίσεων στη στέψη του πυλώνα M8 (ΚΛ8)

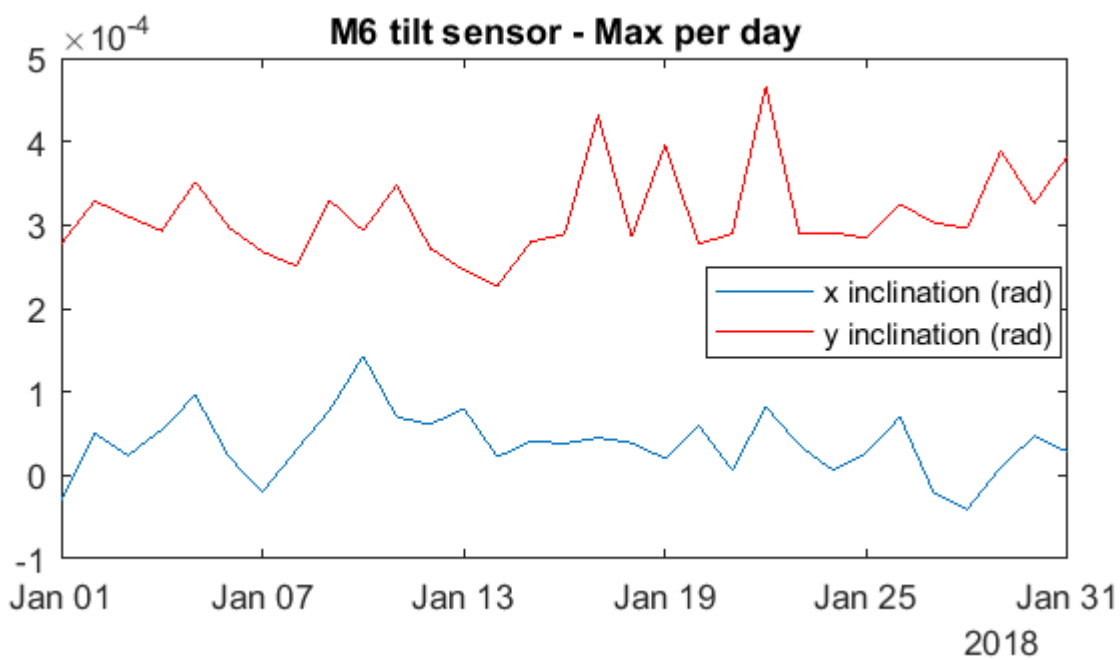
Figure 6.9: Max daily values of inclinations at the cap of the pier M8

Οι μέγιστες τιμές των κλίσεων σημειώθηκαν στις 17 και 30 Ιανουαρίου 2018, αν και στις κλίσεις στην διεύθυνση x εφόσον οι τιμές απέχουν αρκετά από την μέση τιμή 0.0386 rad μπορεί να είναι θόρυβος.



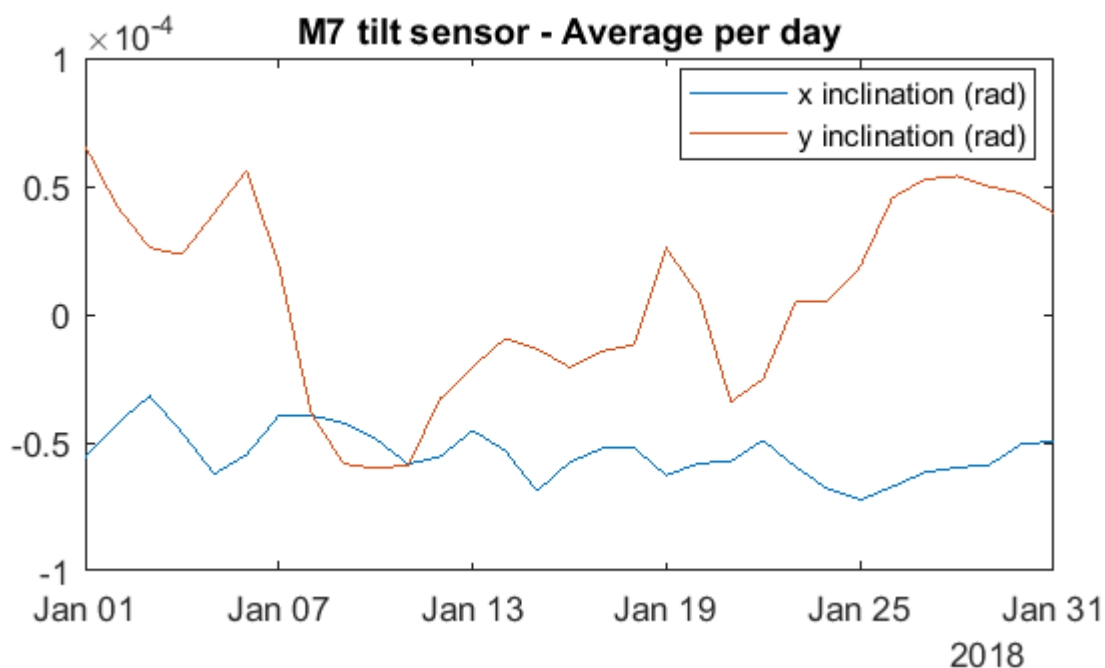
Σχήμα 6. 29: Μέσες ημερήσιες τιμές κλίσεων στη στέψη του πυλώνα M6 (ΚΛ8)

Figure 6.10: Mean daily values of inclinations at the cap of the pier M6



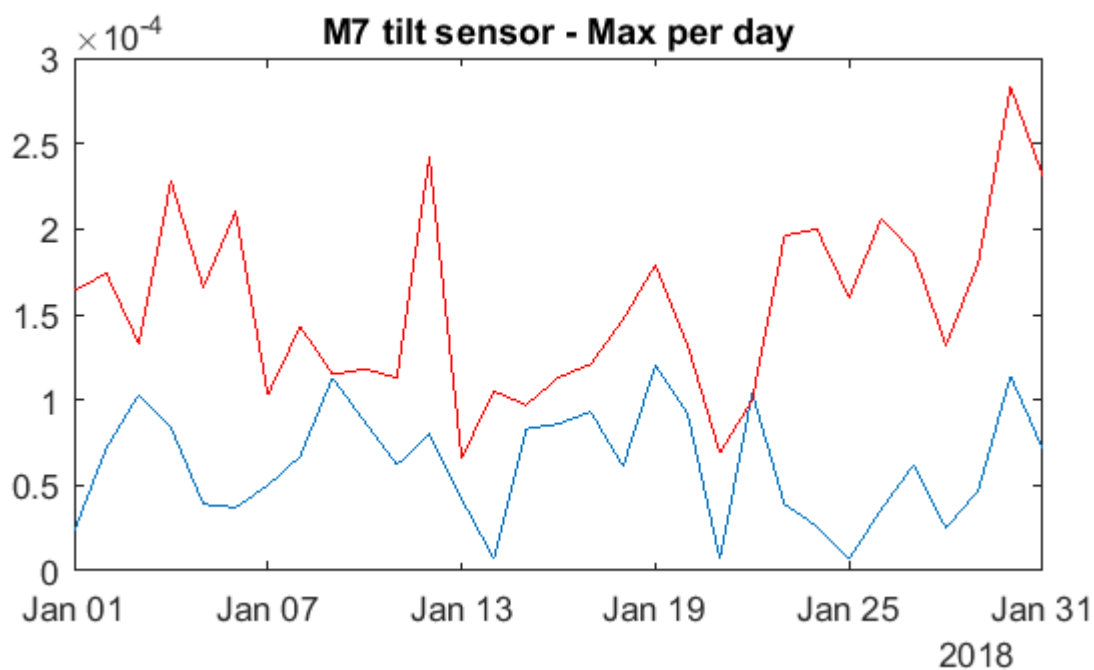
Σχήμα 6. 30: Μέγιστες ημερήσιες τιμές κλίσεων στη στέψη του πυλώνα M6 (ΚΛ8)

Figure 6.11: Max daily values of inclinations at the cap of the pier M6



Σχήμα 6. 31 :Μέσες ημερήσιες τιμές κλίσεων στη στέψη του πυλώνα M7 (ΚΛ8)

Figure 6.12: Mean daily values of inclinations at the cap of the pier M7

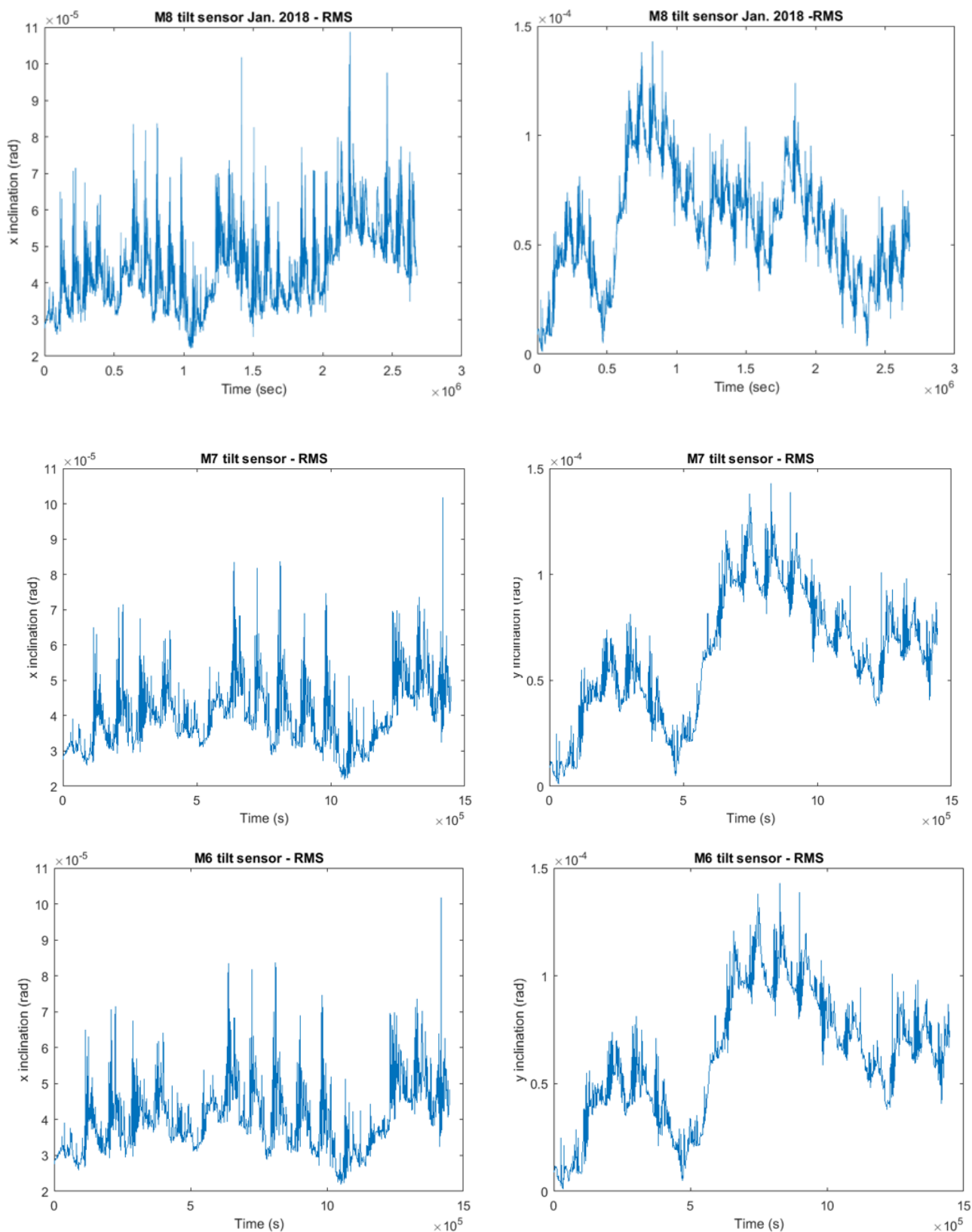


Σχήμα 6. 32: Μέγιστες ημερήσιες τιμές κλίσεων στη στέψη του πυλώνα M7

Figure 6.13: Max daily values of inclinations at the cap of the pier M7

Τα διαγράμματα που απεικονίζουν τις μέγιστες τιμές ανά ημέρα είναι πιθανόν να περιέχουν εσφαλμένη πληροφορία λόγω θορύβου όποτε οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές που λαμβάνουν τα δεδομένα κλίσης θα πρέπει να εξεταστούν μετά την αφαίρεση των ακραίων τιμών και εξομάλυνσης της χρονοσειράς του σήματος εισόδου. Οι μέγιστες τιμές που λαμβάνουν οι μέσες τιμές των κλίσεων λαμβάνονται τις ίδιες μέρες (6 και 27 Ιανουαρίου 2018).

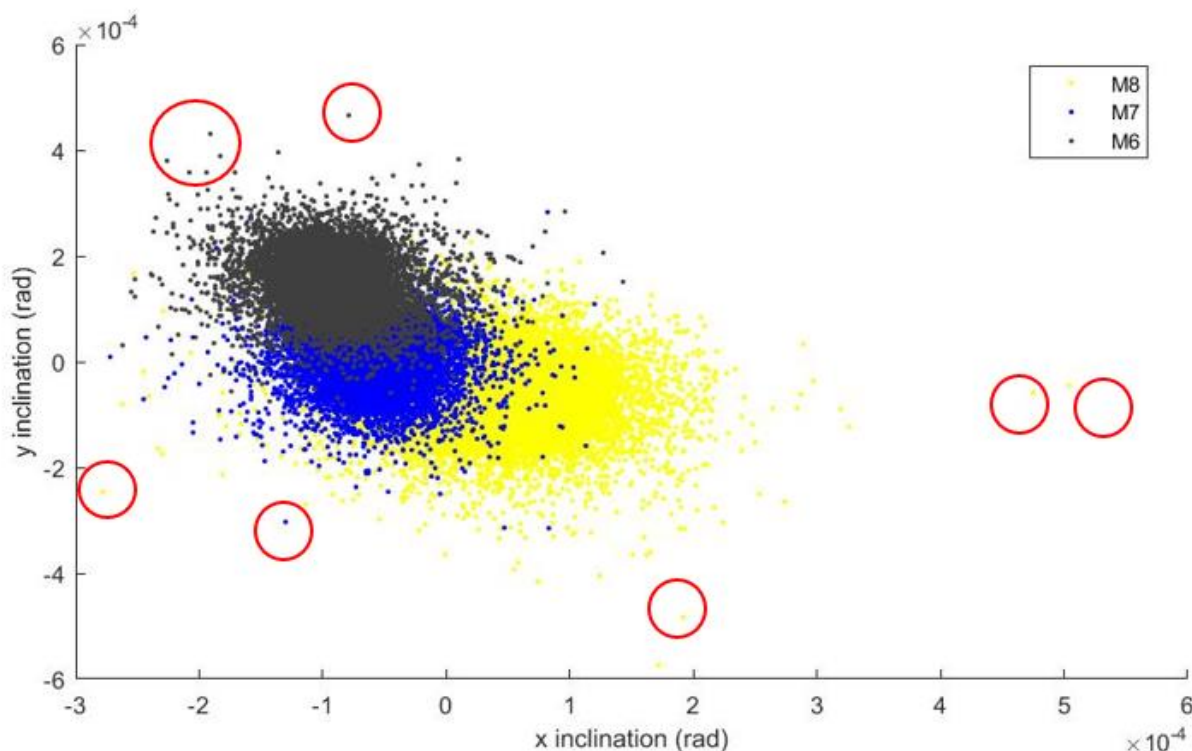
Στο Σχήμα 6.14 παρουσιάζεται ο στατιστικός δείκτης RMS -Root to Mean Square (ρίζα της μέσης τετραγωνικής απόκλισης) για κάθε κλισίμετρο στην διάρκεια του μήνα Ιανουάριου για το έτος 2018. Έχει υπολογιστεί για κάθε παρατήρηση των δεδομένων.



Σχήμα 6. 33 :Γράφημα που απεικονίζει το στατιστικό δείκτη RMS των κλίσεων στη στέψη των πυλώνων M6, M7, M8
 Figure 6.14: Plot of the RMS of the inclinations at the cap of the piers M6, M7, M8

Τα μέσα τετραγωνικά σφάλματα που προέκυψαν είναι μεγαλύτερα για τις κλίσεις y ενώ για τα δεδομένα των κλισιμέτρων M7, M6 οι τιμές είναι ίσες.

Στο Σχήμα 6.15 παρατίθενται τα γραφήματα των δεδομένων κλίσεων κατά τις διευθύνσεις x , y που σημειώθηκαν τον μήνα Ιανουάριο 2018.



Σχήμα 6. 34 : Πρωτογενείς παρατηρήσεις κλίσεων στις διευθύνσεις x , y στις στέψεις των πυλώνων M6, M7, M8 (ΚΛ8)
Figure 6.15: Raw data observations of inclinations axis x , y at the cap of the piers M6, M7, M8

Παρατηρείται ότι τα δεδομένα τείνουν να σχηματίζουν ένα ελλειψοειδές σχήμα και είναι ξεκάθαρο η διαφορετική συμπεριφορά στον κάθε πυλώνα. Με κόκκινο κύκλο σημειώνονται οι ακραίες τιμές οι οποίες έχουν προκύψει από θόρυβο.

6.3 Επεξεργασία δεδομένων κλίσεων

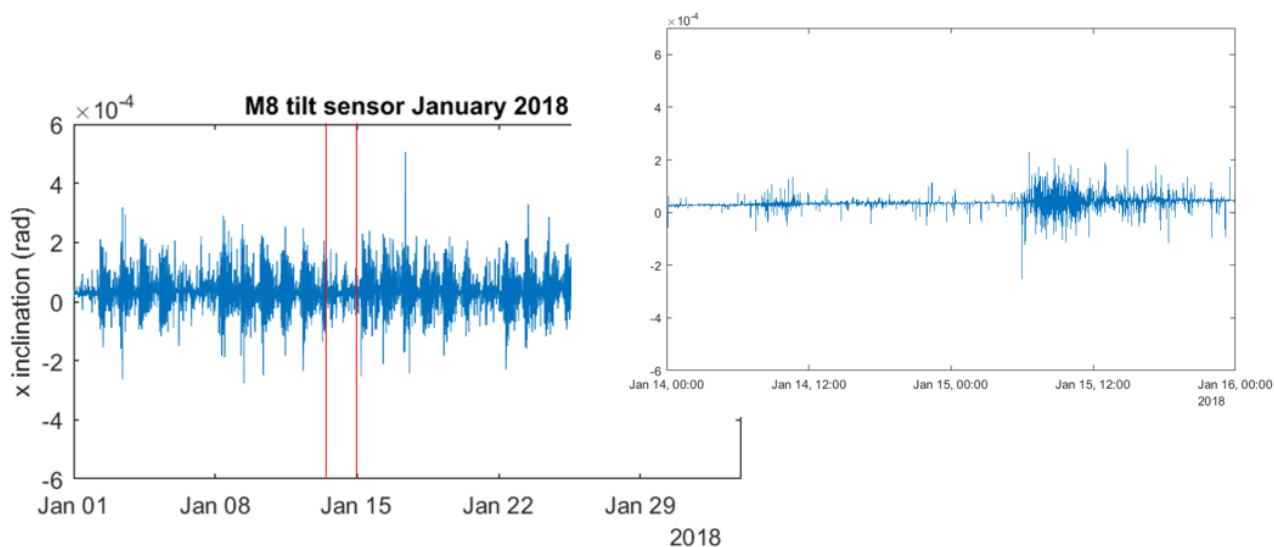
6.3.1 Ανάλυση των δεδομένων κλίσεων στο πεδίο του χρόνου

Για να προσδιορισθούν τα κύρια χαρακτηριστικά της χρονοσειράς των δεδομένων κλίσεων και να εξαχθεί μια διάγνωση για την δυναμική συμπεριφορά της θα πρέπει το σήμα εισόδου να υποστεί επεξεργασία. Από τις σύγχρονες μεθοδολογίες που έχουν αναπτυχθεί είναι δυνατό να προσδιορισθούν τα δυναμικά χαρακτηριστικά μιας γέφυρας από διέγερση οποιουδήποτε εξωτερικού αίτιου. Εξωτερικό αίτιο μπορεί να θεωρηθεί ένας σεισμός, άνεμος, διερχόμενα οχήματα, θερμοκρασιακές μεταβολές ή επιβαλλόμενες διεγέρσεις.

Στην συγκεκριμένη εργασία θα μελετηθεί η απόκριση της γέφυρας σε σχέση με την θερμοκρασία και τα διερχόμενα οχήματα. Να σημειωθεί ότι τα ψηφιακά κλισίμετρα υψηλής ακρίβειας χαρακτηρίζονται από υψηλή ευαισθησία και επηρεάζονται άμεσα από θερμοκρασιακές μεταβολές.

Αρχικά απεικονίζονται οι παρατηρήσεις για δύο διαδοχικές μέρες μετρήσεων όπου τα δεδομένα λόγω του μικρότερου όγκου είναι πιο ξεκάθαρα. Επιλέχθηκαν οι μέρες Κυριακή και Δευτέρα για να φανεί η διαφορά στις μετακινήσεις της κατασκευής όταν επιβάλλεται σε αυτήν βαρύ φορτίο (π.χ. φορτηγά) και πως συμπεριφέρεται ο φορέας της γέφυρας στο διαφορετικό φορτίο.

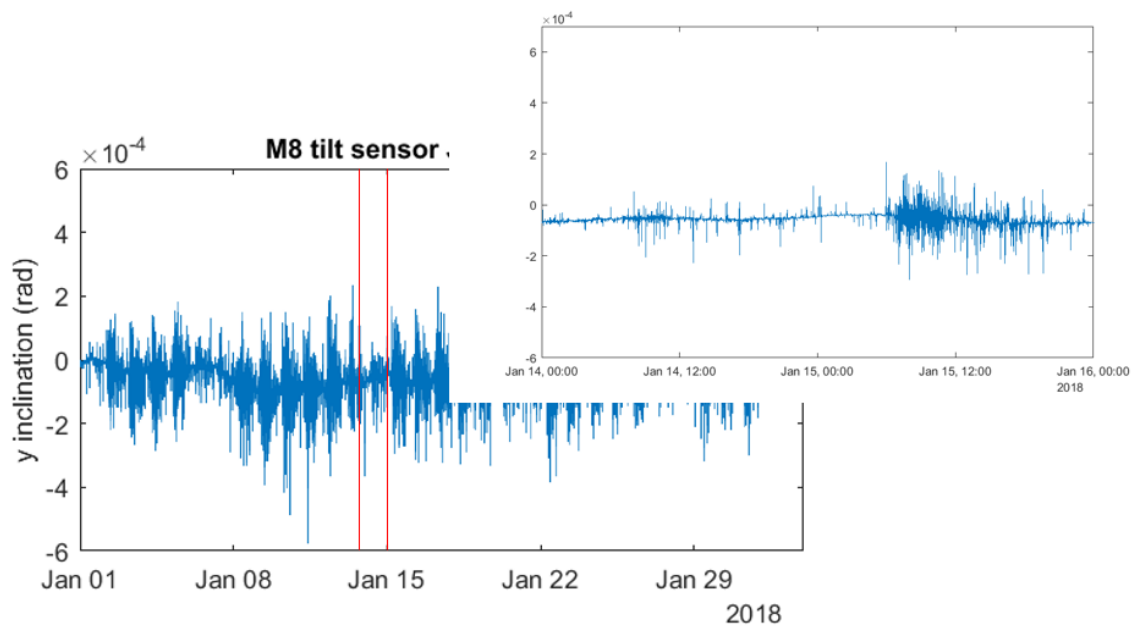
Από τα διαγράμματα των Σχημάτων απορρέει ότι την Δευτέρα όπου τα διερχόμενα οχήματα είναι περισσότερα σε πλήθος η απόκλιση του πυλώνα από την κατακόρυφο είναι σημαντικότερη. Στην συνέχεια παρατίθενται τα συμπεράσματα της ανάλυσης για κάθε πυλώνα ξεχωριστά.



Σχήμα 6. 35 :Χρονοσειρά πρωτογενών μετρήσεων κλίσεων κατά την διεύθυνση x στον πυλώνα M8 (ΚΛ8) για ένα μήνα και για δύο διαδοχικές ημέρες παρατηρήσεων

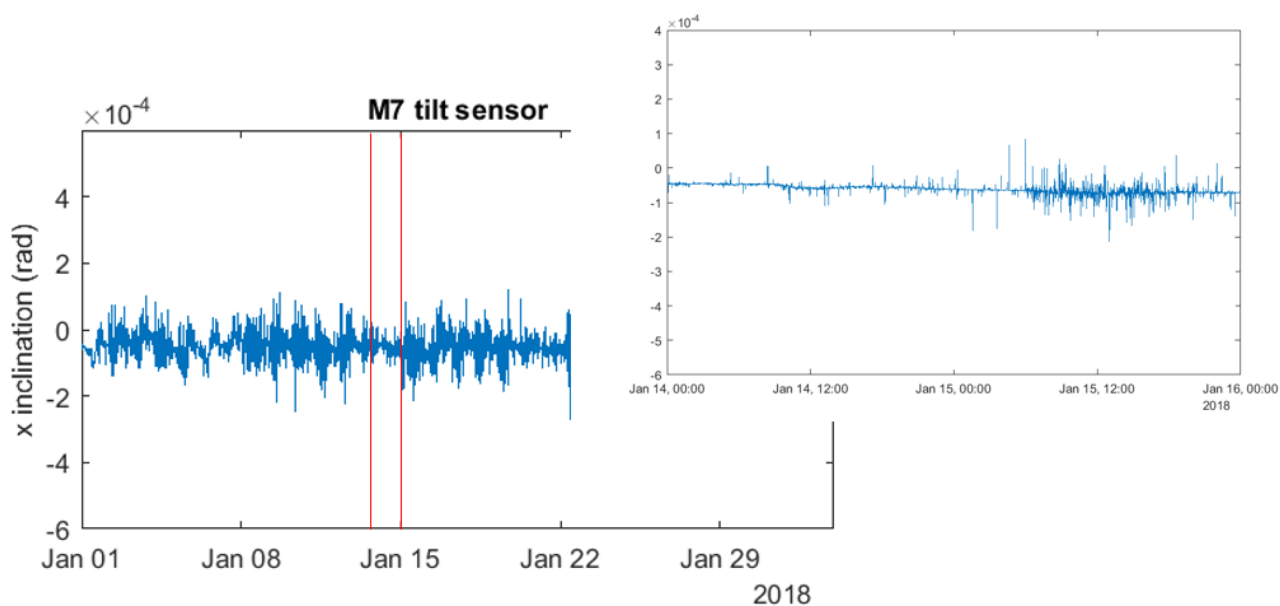
Figure 6.16: Timeseries raw observations of inclinations (x-axis) on the pier M8 (SC8) for a month and two consecutive days

Το Σχήμα 6.16 παρουσιάζει το διάγραμμα για τις παρατηρήσεις κλίσεων κατά την διεύθυνση x για δύο διαδοχικές ημέρες, ξεκινώντας από την Κυριακή 14 Ιανουαρίου 00:00 π.μ. έως Δευτέρα 15 Ιανουαρίου 23:59 μ.μ. για τον πυλώνα M8 (ΚΛ8) σε σύγκριση με τις παρατηρήσεις κλίσεων για το χρονικό διάστημα ενός μήνα. Είναι φανερό ότι τις πρωινές ώρες οι παρατηρήσεις των κλίσεων είναι πιο έντονες και εμπεριέχουν περισσότερο θόρυβο λόγω των διερχόμενων οχημάτων. Στο Σχήμα 6.17 παρουσιάζεται η κλίση κατά την διεύθυνση y για το ίδιο χρονικό διάστημα παρατήρησης.



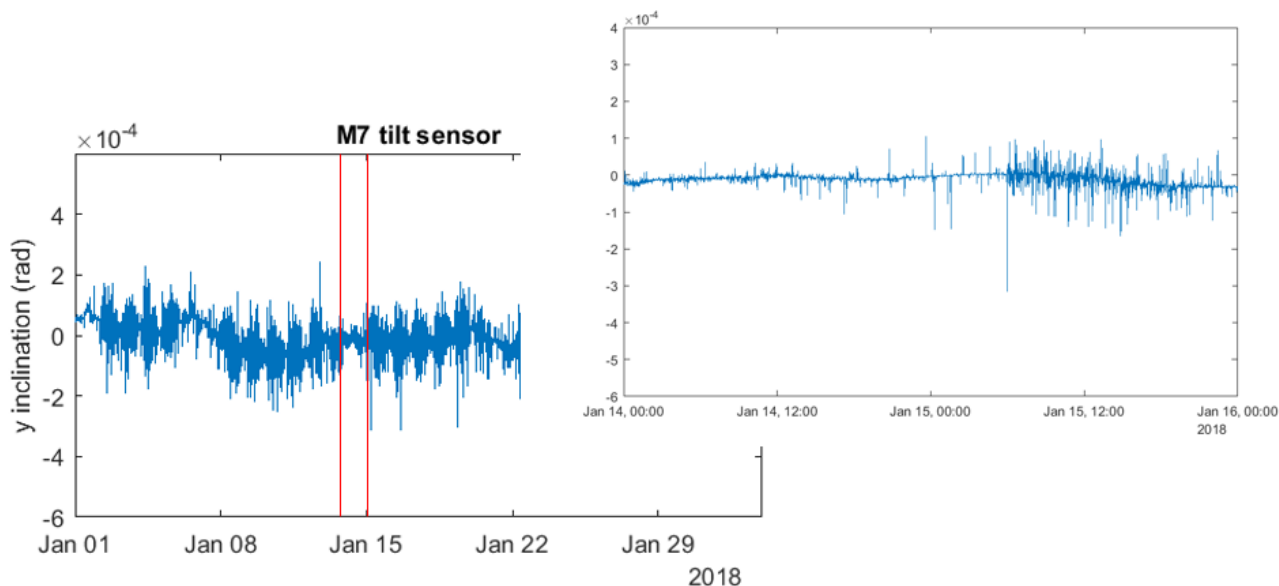
Σχήμα 6. 36: Χρονοσειρά πρωτογενών μετρήσεων κλίσεων κατά την διεύθυνση γ στον πυλώνα M8 (ΚΛ8) για ένα μήνα και για δύο διαδοχικές ημέρες παρατηρήσεων

Figure 6.17: Timeseries raw observations of inclinations (y-axis) on the pier M8 (SC8) for a month and two consecutive days



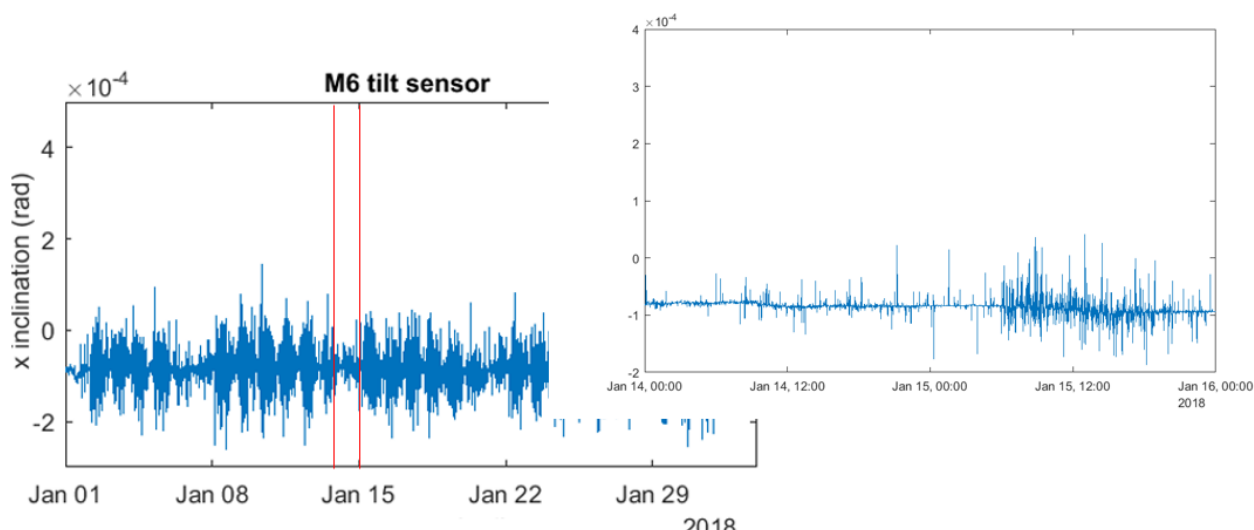
Σχήμα 6. 37:Χρονοσειρά πρωτογενών μετρήσεων κλίσεων κατά την διεύθυνση x στον πυλώνα M7 (ΚΛ8) για ένα μήνα και για δύο διαδοχικές ημέρες παρατηρήσεων

Figure 6.18: Timeseries raw observations of inclinations (x-axis) on the pier M7 (SC8) for a month and two consecutive days



Σχήμα 6. 19: Χρονοσειρά πρωτογενών μετρήσεων κλίσεων κατά την διεύθυνση γ στον πυλώνα M7 (ΚΛ8) για ένα μήνα και για δύο διαδοχικές ημέρες παρατηρήσεων

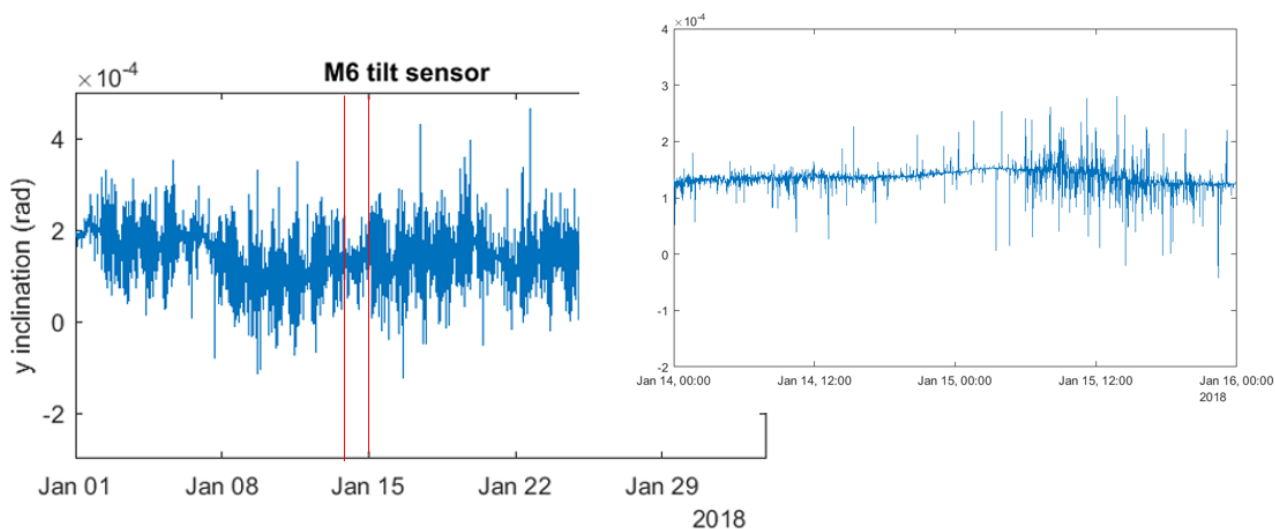
Figure 6.19: Timeseries raw observations of inclinations (y-axis) on the pier M7 (SC8) for a month and two consecutive days



Σχήμα 6. 20: Χρονοσειρά πρωτογενών μετρήσεων κλίσεων κατά την διεύθυνση x στον πυλώνα M6 (ΚΛ8) για ένα μήνα και για δύο διαδοχικές ημέρες παρατηρήσεων

Figure 6.20: Timeseries raw observations of inclinations (x-axis) on the pier M6 (SC8) for a month and two consecutive days

Από τα Σχήματα 6.17 έως 6.21 παρατηρείται ότι στον πυλώνα M8 οι μετακινήσεις είναι πιο έντονες κατά την διάρκεια της ημέρας. Ειδικότερα, στον πυλώνα M7 παρουσιάζονται πιο έντονες κλίσεις στην διεύθυνση γ, ενώ, στον πυλώνα M6 οι κλίσεις κατά τις διευθύνσεις x, γ έχουν ακραίες τιμές οι οποίες λογικά έχουν προέλθει λόγω θορύβου.



Σχήμα 6. 21: Χρονοσειρά πρωτογενών μετρήσεων κλίσεων κατά την διεύθυνση γ στον πυλώνα Μ6 (ΚΛ8) για ένα μήνα και για δύο διαδοχικές ημέρες παρατηρήσεων

Figure 6.21: Timeseries raw observations of inclinations (y-axis) on the pier M6 (SC8) for a month and two consecutive days

6.3.2 Επεξεργασία δεδομένων κλίσεων

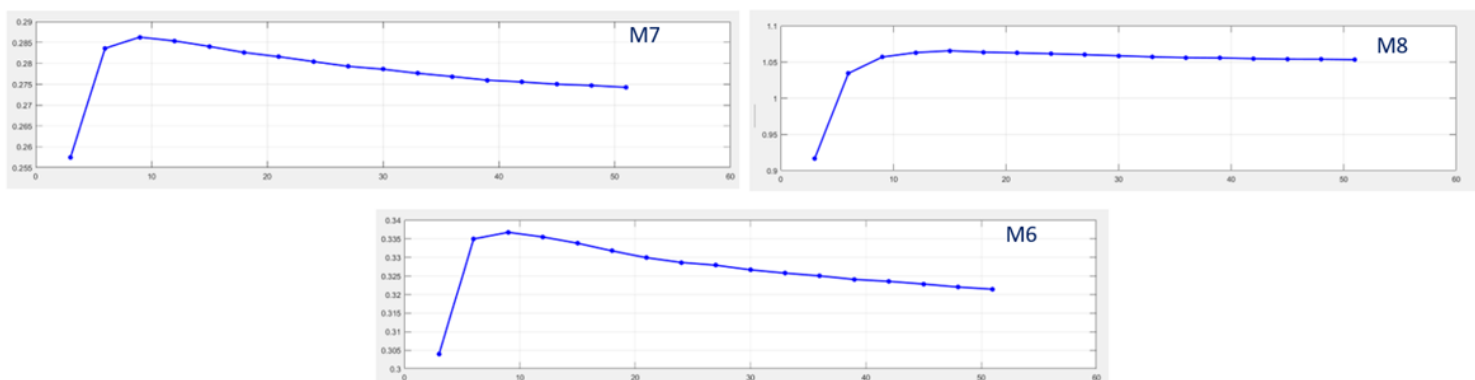
Τα δεδομένα από τους αισθητήρες περιλαμβάνουν θόρυβο από εξωτερικούς παράγοντες, όπως, θερμοκρασιακές μεταβολές. Για να είναι επεξεργάσιμα θα πρέπει να “καθαρίσει” το σήμα εισόδου από ακραίες τιμές. Αρχικά λοιπόν μπορούν να εφαρμοσθούν μέθοδοι για την εξομάλυνση ή μείωση του θορύβου ο οποίος είναι τυχαίος και όχι καθαρός θόρυβος (white noise). Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο Κεφάλαιο, επιλέχθηκαν δύο φίλτρα χαμηλής διέλευσης (χαμηλοπερατά) Moving median και Savitzky Golay.

Η διαδικασία επεξεργασίας πραγματοποιήθηκε σε διάφορα στάδια. Αρχικά, αφού η συχνότητα καταγραφής του κλισιμέτρου τοποθετημένο στη στέψη του πυλώνα Μ8 ήταν διαφορετική κατά την διάρκεια της ημέρας παρατήρησης (07:00 – 10:00 π.μ. συχνότητα καταγραφής 0.1 Hz και για τις υπόλοιπες ώρες της ημέρας η συχνότητα καταγραφής ήταν 0.016 Hz) πραγματοποιήθηκε αναδειγματοληψία των δεδομένων των κλισιμέτρων με κοινή συχνότητα καταγραφής 0.016 Hz (1 καταγραφή ανά 1 λεπτό) μόνο για τα δεδομένα που προέκυψαν από το κλισίμετρο στο υψηλό βάθρο Μ8.

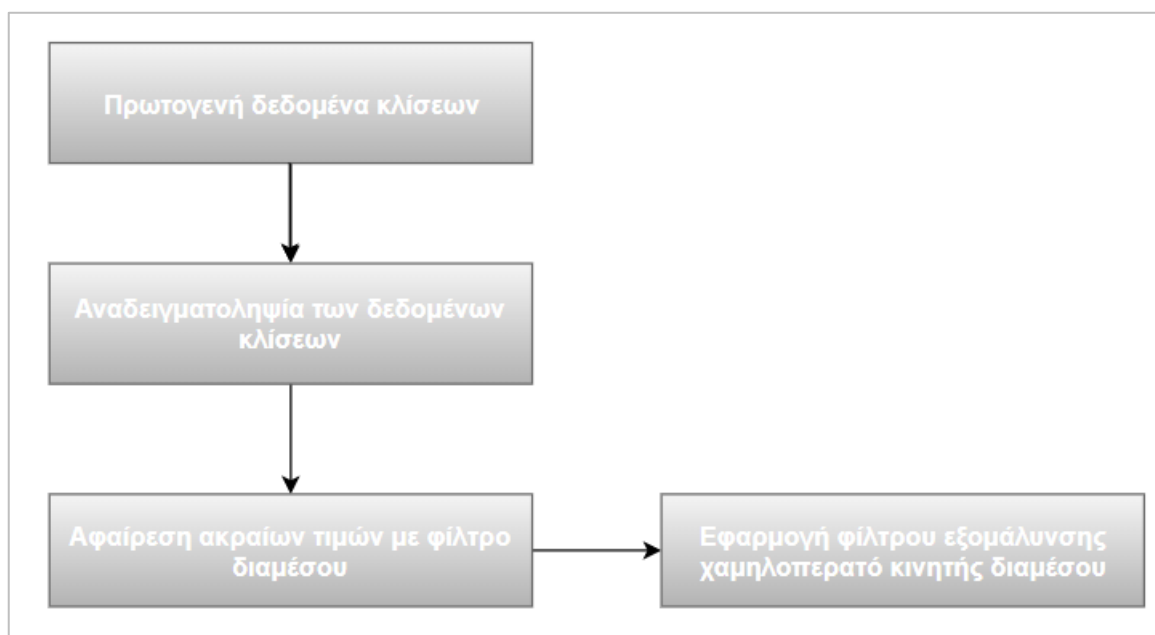
Έπειτα, εφαρμόστηκε το φίλτρο διάμεσου για την εξάλειψη των ακραίων τιμών. Πιο συγκεκριμένα από το ιστόγραμμα συχνοτήτων των δεδομένων των κλίσεων επιλέχθηκαν οι ακραίες τιμές που εμφανίστηκαν (μικρότερη συχνότητα εμφάνισης) να αντικατασταθούν με την διάμεσο των αντίστοιχων

σημάτων. Στην συνέχεια εφαρμόστηκε το φίλτρο κινητού διάμεσου (moving median) για το οποίο έπρεπε να γίνει η επιλογή του μεγέθους του παραθύρου (window size) για την εξομάλυνση των τιμών και το φίλτρο Savitzky Golay για την εξομάλυνση του θορύβου στο σήμα.

Συνεπώς υπολογίστηκαν οι τιμές με το φίλτρο moving median για μεγέθη παραθύρου 3 – 51 (σημεία τα οποία θα εξομαλυνθούν) και στην συνέχεια αφαιρώντας τις τιμές που προέκυψαν από τα πρωτογενή δεδομένα προέκυψαν τα παρακάτω διαγράμματα των απόλυτων διαφορών σε σχέση με τα μεγέθη παραθύρου για κάθε κλισίμετρο ξεχωριστά. Η τιμή για τελικού μεγέθους παραθύρου επιλέχθηκε σύμφωνα όπου η καμπύλη αρχίζει να σταθεροποιείται. Συνεπώς όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.22 και για τις τρεις σειρές δεδομένων επιλέχθηκε window size =10.



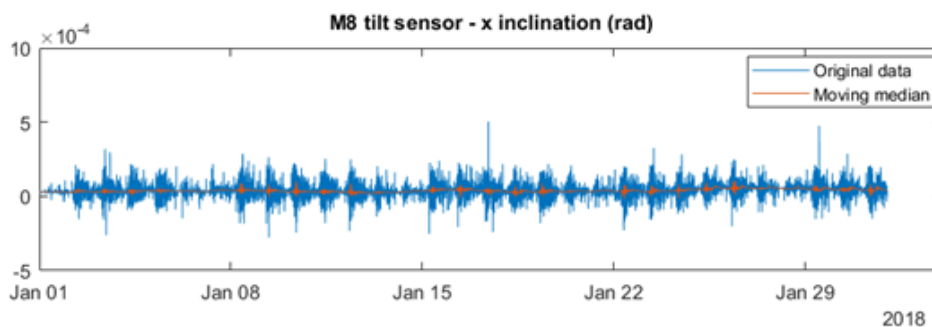
Σχήμα 6. 22: Διάγραμμα για την επιλογή του παραθύρου για το φίλτρο κινητού διαμέσου
Figure 6.22: Plot for the selection for window Size for moving median filter



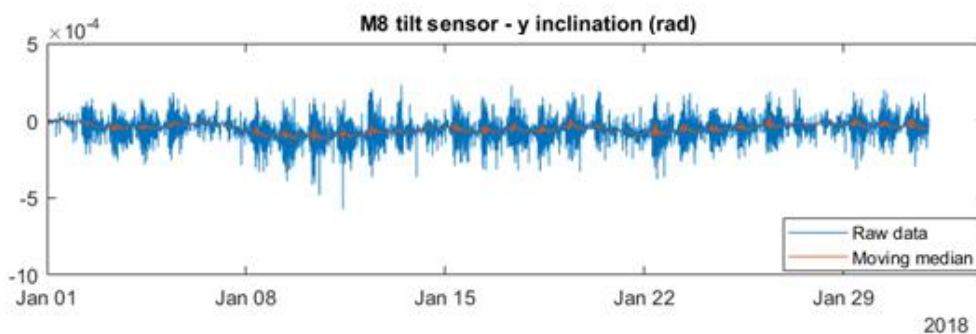
Σχήμα 6. 23: Διάγραμμα ροής των μεθόδων για την επεξεργασία των σημάτων εισόδου

Figure 6.23: Flow chart of the signal processing methods applied on the input signal

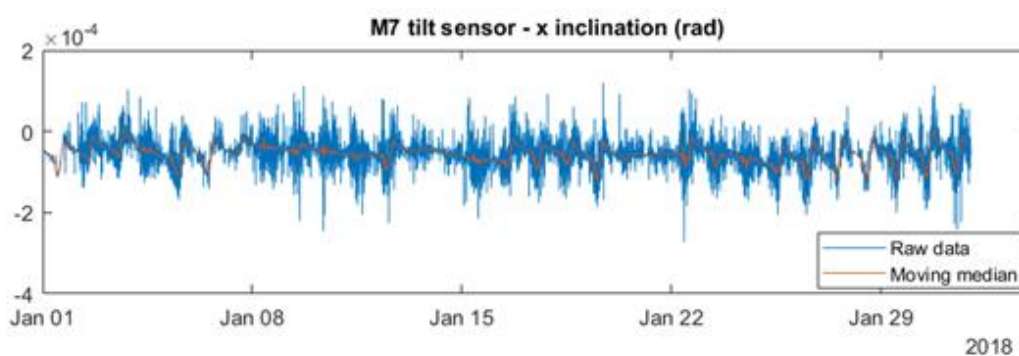
Στα Σχήματα 6.24 έως 6.29 παρουσιάζονται τα γραφήματα που προέκυψαν από το φίλτρο κινητού διαμέσου για τα δεδομένα κλίσεων στη στέψη των πυλώνων M8, M7, M6 (ΚΛ8).



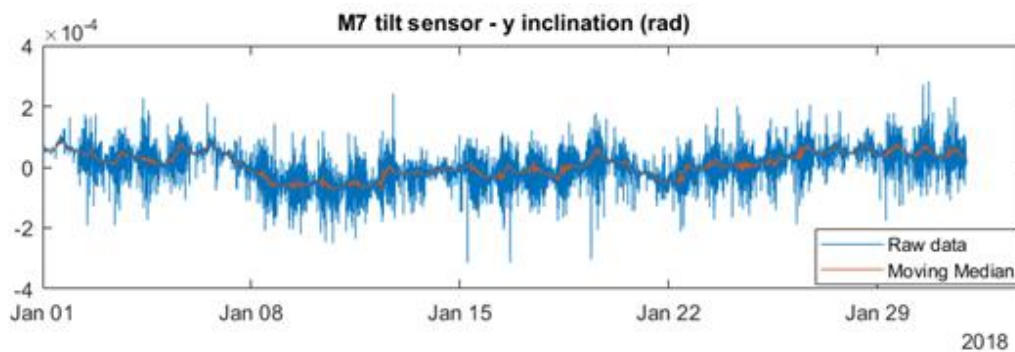
Σχήμα 6. 24: Πρωτογενή και φιλτραρισμένα δεδομένα κλίσεων (x διεύθυνση) στη στέψη του πυλώνα M8 (ΚΛ8)
Figure 6.24: Raw and filtered data (x-axis) at the cap of pier M8



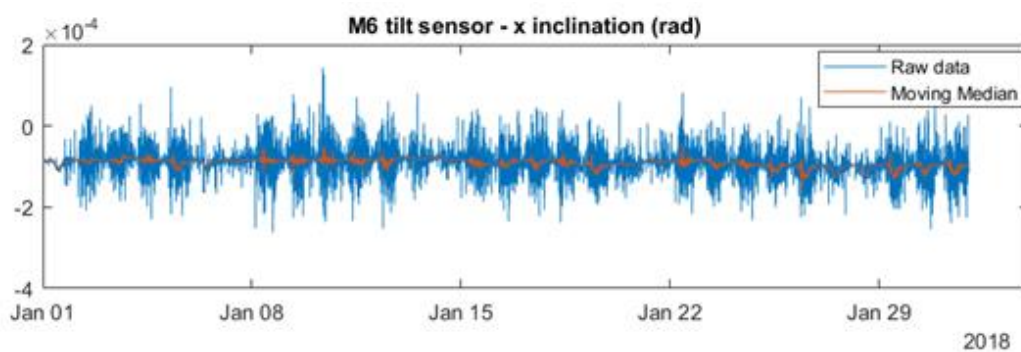
Σχήμα 6. 25: Πρωτογενή και φιλτραρισμένα δεδομένα κλίσεων (y διεύθυνση) στη στέψη του πυλώνα M8 (ΚΛ8)
Figure 6.25: Raw and filtered data (y-axis) at the cap of pier M8



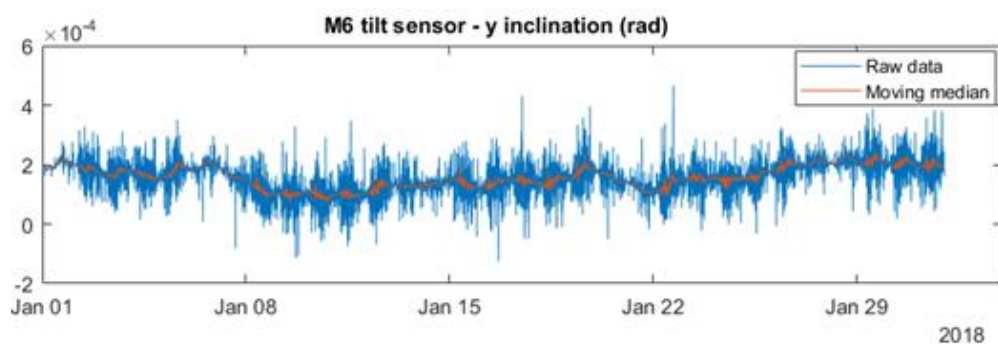
Σχήμα 6. 26: Πρωτογενή και φιλτραρισμένα δεδομένα κλίσεων (x διεύθυνση) στη στέψη του πυλώνα M7(ΚΛ8)
Figure 6.26: Raw and filtered data (x-axis) at the cap of pier M7



Σχήμα 6. 27: Πρωτογενή και φιλτραρισμένα δεδομένα κλίσεων (y διεύθυνση) στη στέψη του πυλώνα M7 (ΚΛ8)
Figure 6.27: Raw and filtered data (y-axis) at the cap of pier M7



Σχήμα 6. 28: Πρωτογενή και φιλτραρισμένα δεδομένα κλίσεων (x διεύθυνση) στη στέψη του πυλώνα M6 (ΚΛ8)
Figure 6.28: Raw and filtered data (x-axis) at the cap of pier M6



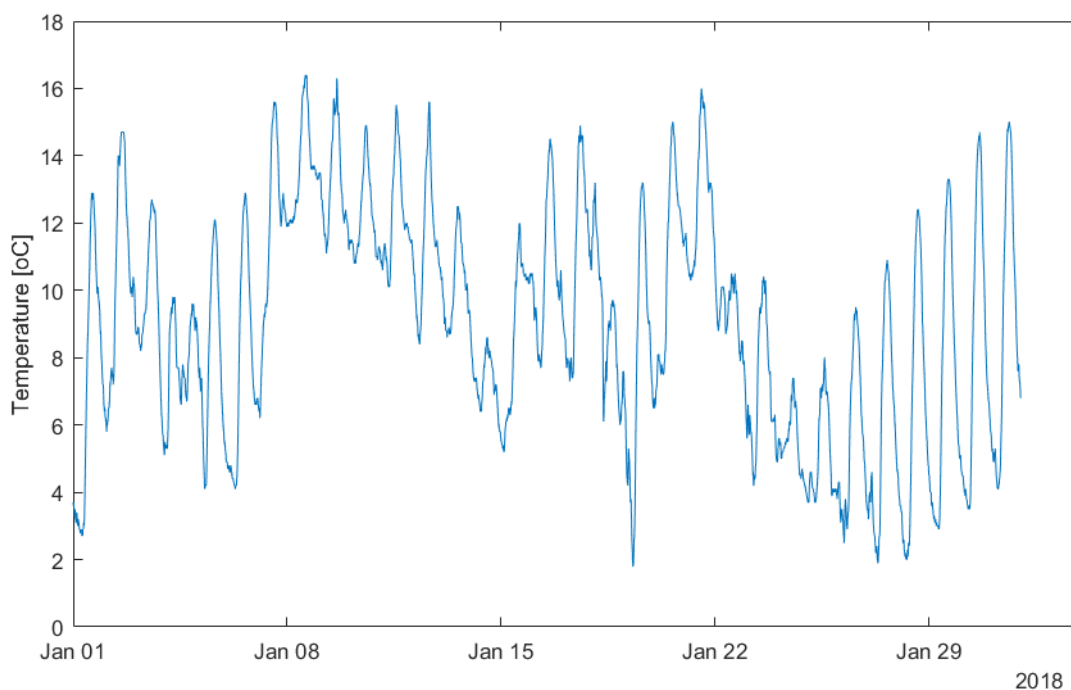
Σχήμα 6. 29: Πρωτογενή και φιλτραρισμένα δεδομένα κλίσεων (y διεύθυνση) στη στέψη του πυλώνα M6 (ΚΛ8)
Figure 6.29: Raw and filtered data (y-axis) at the cap of pier M6

6.3.3 Συσχέτιση με θερμοκρασιακές μεταβολές

Η επίδραση της θερμοκρασίας σε μια τεχνική κατασκευή εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως η γεωγραφική θέση, το σχήμα και ο προσανατολισμός της κατασκευής, αλλά, και το περιβάλλον που την περιβάλλει.

Για την καταγραφή των περιβαλλοντικών δεδομένων (θερμοκρασία, σχετική υγρασία και ατμοσφαιρική πίεση) επιτεύχθηκε με την εγκατάσταση σύστημα αισθητήρων θερμοκρασίας / πίεσης (DTM, STS) και ένα σύστημα αισθητήρων θερμοκρασίας / υγρασίας (HMP 110, Vaisala). Η καταγραφή μετεωρολογικών δεδομένων αξιοποιείται στην εξαγωγή επιδράσεων του περιβάλλοντος στα μετρούμενα μεγέθη και την επιβολή κατάλληλων αναγωγών.

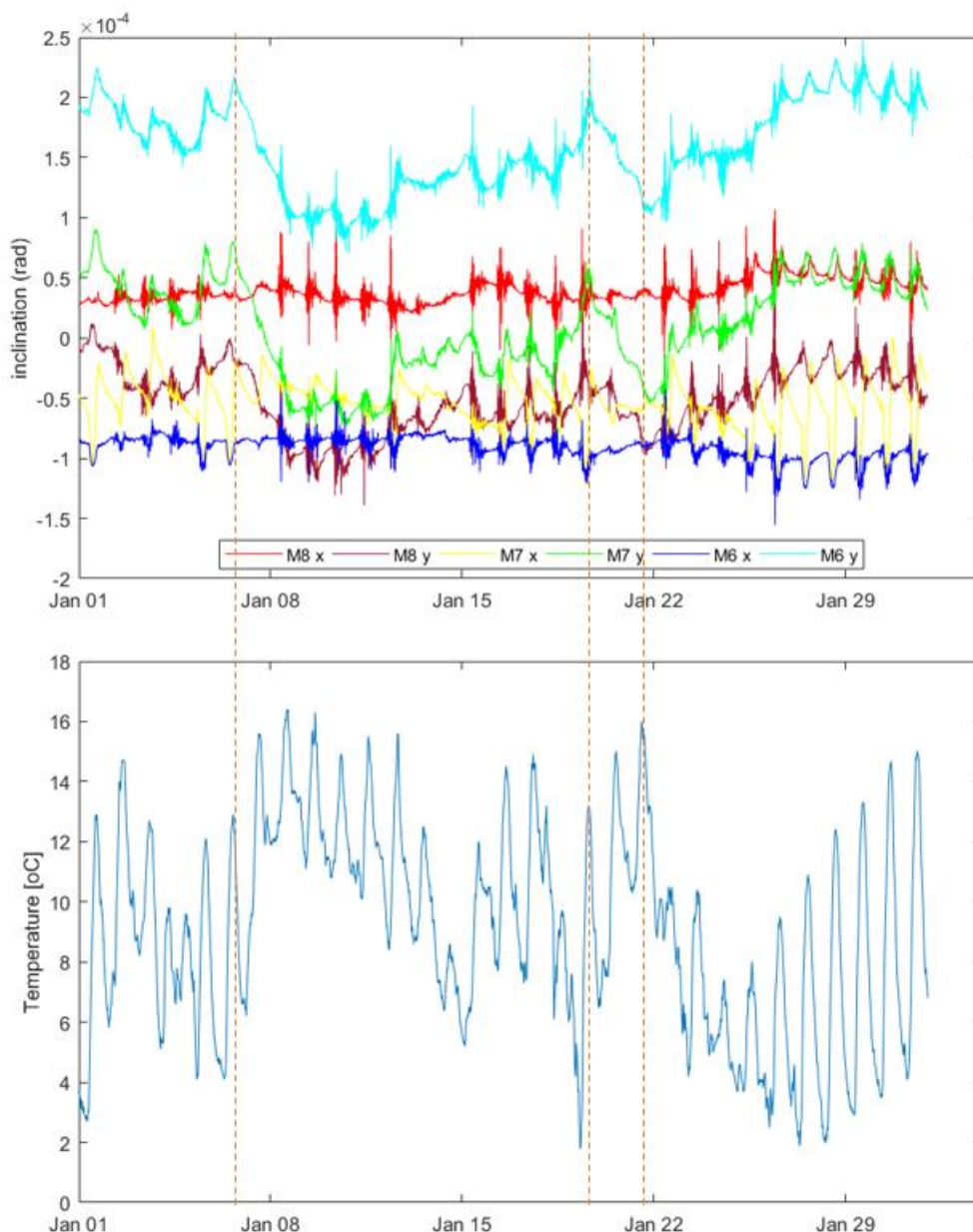
Στο Σχήμα 6.30 παρουσιάζεται το διάγραμμα με τις θερμοκρασιακές μεταβολές για το χρονικό διάστημα του μήνα Ιανουάριος 2018.



Σχήμα 6.30: Πρωτογενείς μετρήσεις θερμοκρασίας στην στέψη του πυλώνα M8 (ΚΛ8) για τον μήνα Ιανουάριος 2018

Figure 6.30: Raw temperature data at the cap of the pier M8 (SC) for January 2018

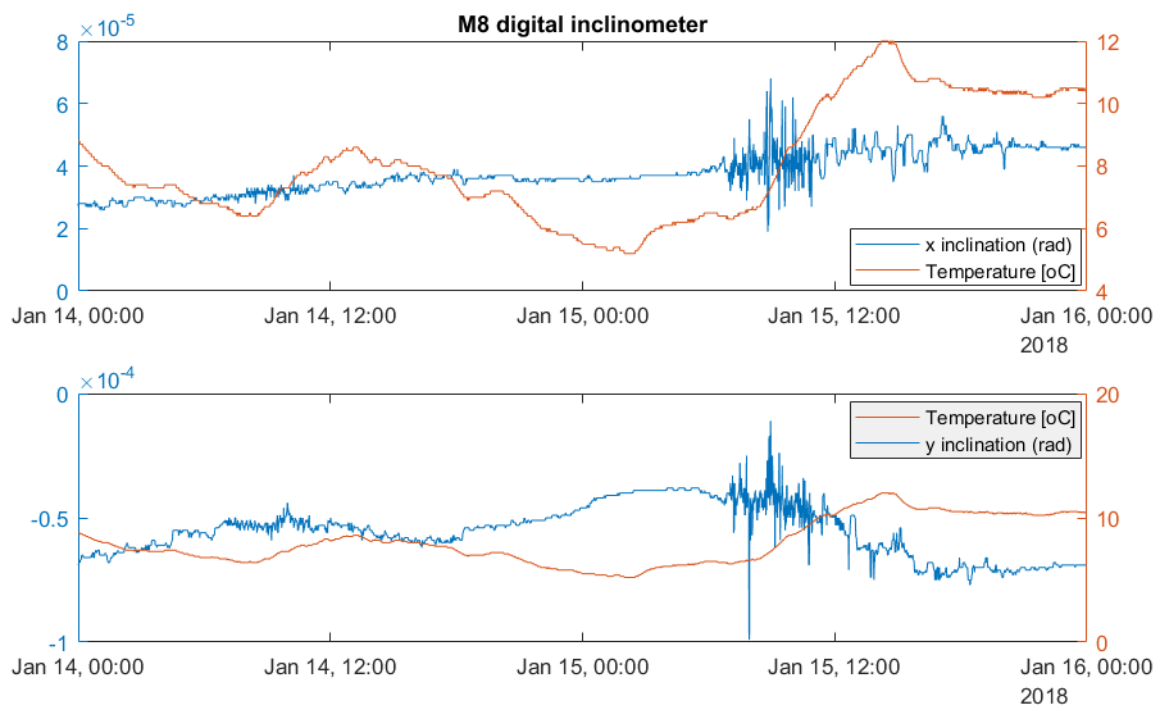
Οι θερμοκρασίες για τον μήνα Ιανουάριο κινούνται στο εύρος $1.8^{\circ}\text{C} - 16.4^{\circ}\text{C}$, με την μέγιστη θερμοκρασία να παρατηρείται στις 8 Ιανουαρίου και στις 21 Ιανουαρίου 2018. Στο Σχήμα 6.31 δίνονται τα διαγράμματα φιλτραρισμένων δεδομένων κλίσεων στις θέσεις των πυλώνων M6, M7, M8 και οι τιμές της θερμοκρασίας.



Σχήμα 6.31: Χρονοσειρές φιλτραρισμένων κλίσεων για τα ψηφιακά κλισίμετρα και τιμή θερμοκρασίας για το διάστημα Ιανουάριος 2018.

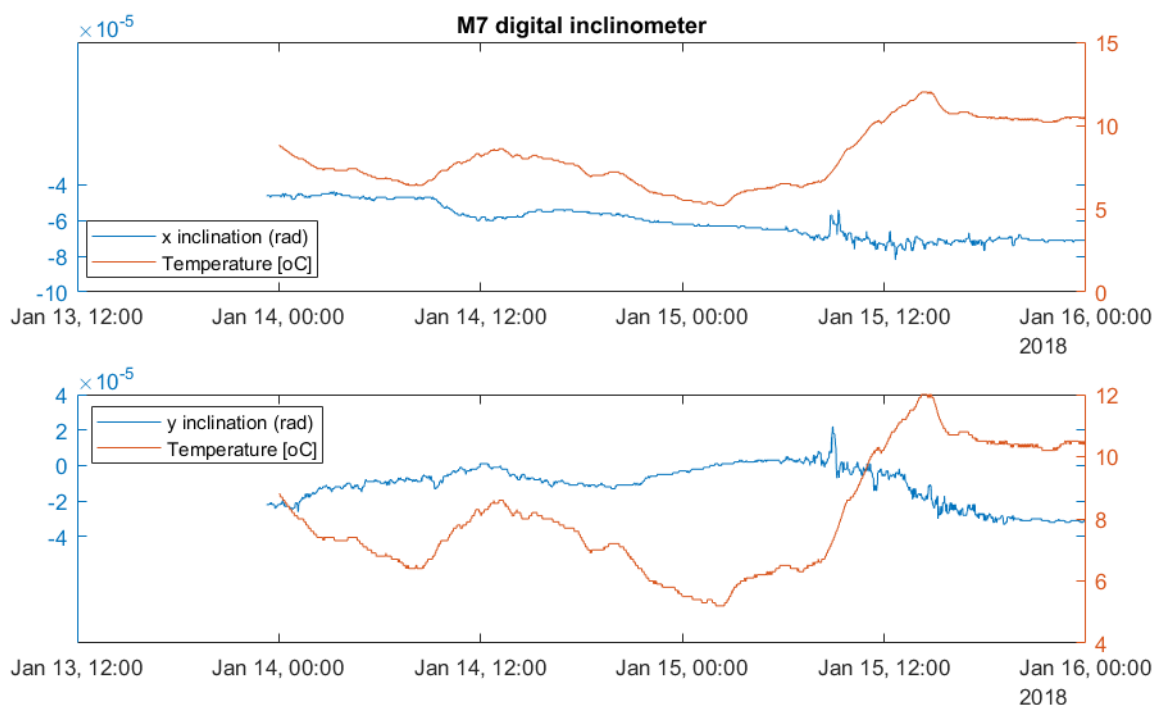
Figure 6.31: Timeseries of filtered data for the digital inclinometers and temperature data for the time period January 2018.

Από τα διαγράμματα του Σχήματος 6.31 φαίνεται άμεση συσχέτιση θερμοκρασίας και συμπεριφοράς της γέφυρας. Για να είναι πιο ξεκάθαρη η επίδραση θα οπτικοποιηθούν τα δεδομένα που προέκυψαν από τα τρία ψηφιακά κλισίμετρα NIVEL220 για δύο διαδοχικές μέρες στη στέψη των πυλώνων M6, M7, M8. Συγκεκριμένα επιλέχθηκαν οι μέρες 14 Ιανουαρίου 2018 και 15 Ιανουαρίου 2018.



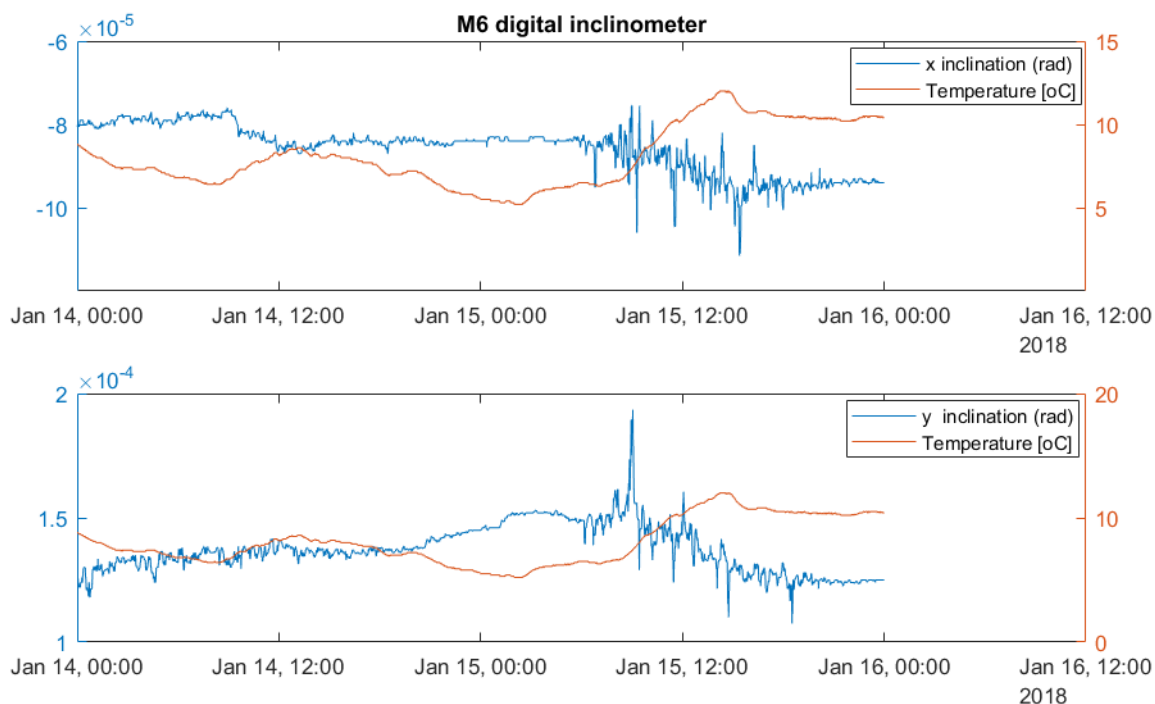
Σχήμα 6.32: Φιλτραρισμένα δεδομένα κλίσεων κατά x, γ στη στέψη του πυλώνα M8 και οι τιμές θερμοκρασίας για το χρονικό διάστημα 14-01-18 00:00 – 16-01-18 00:00.

Figure 6.32: Filtered inclination data (x, γ- axis) at the cap of pier M8 and temperature values for the time period 14-01-18 00:00 – 16-01-18 00:00.



Σχήμα 6.33: Φιλτραρισμένα δεδομένα κλίσεων κατά x, γ στη στέψη του πυλώνα M7 και οι τιμές θερμοκρασίας για το χρονικό διάστημα 14-01-18 00:00 – 16-01-18 00:00.

Figure 6.33: Filtered inclination data (x, γ- axis) at the cap of pier M7 and temperature values for the time period 14-01-18 00:00 – 16-01-18 00:00.



Σχήμα 6.34: Φιλτραρισμένα δεδομένα κλίσεων κατά x, y στη στέψη του πυλώνα M6 και οι τιμές θερμοκρασίας για το χρονικό διάστημα 14-01-18 00:00 – 16-01-18 00:00.

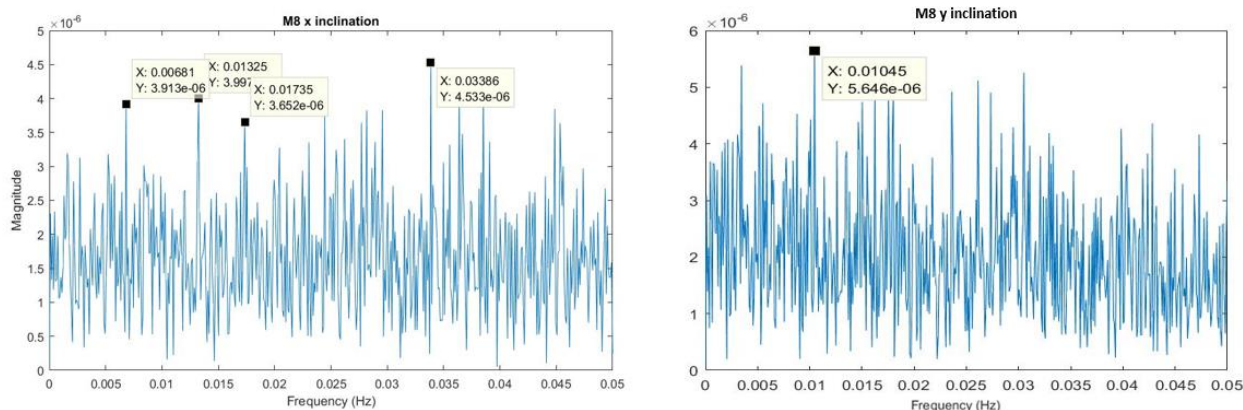
Figure 6.34: Filtered inclination data (x, y- axis) at the cap of pier M6 and temperature values for the time period 14-01-18 00:00 – 16-01-18 00:00.

Από τα Σχήματα 6.32, 6.33, 6.34 προκύπτει σαφώς ότι τα παρατηρούμενα δεδομένα κλίσεων κατά τις διευθύνσεις x, y είναι πιο έντονα κατά τη διάρκεια της ημέρας καθώς η θερμοκρασία περιβάλλοντος αυξάνεται με την ανατολή του ηλίου και στη συνέχεια μειώνεται αργότερα το πέρας της ημέρας. Επιπλέον, ανάλυση των δεδομένων από την προς μελέτη περίοδο αυτή έδειξε ότι η γέφυρα υπέστη την αναμενόμενη θερμοκρασία που προκλήθηκε επέκταση και συστολή με τους θερμικούς κύκλους.

Οι αισθητήρες M7 και M6 δείχνουν τις ημιτονοειδείς τάσεις που υποδηλώνουν τόσο τις ημερήσιες όσο και τις μηνιαίες μεταβολές της θερμοκρασίας.

6.3.4 Ανάλυση δεδομένων στο πεδίο των συχνοτήτων

Για την εφαρμογή του μετασχηματισμού FFT πρέπει τα δεδομένα να έχουν κοινή συχνότητα καταγραφής (sampling frequency), συνεπώς, έγινε εφαρμογή μόνο στο διάστημα 07:00 – 10:00 π.μ. όπου η συχνότητα καταγραφής είναι 0.1 Hz για τα δεδομένα που προέκυψαν από το ψηφιακό κλισίμετρο στον πυλώνα M8. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα που απεικονίζουν τα αποτελέσματα του μετασχηματισμού.



Σχήμα 6.35: Υπολογισμένα φάσματα συχνότητων για τα δεδομένα κλίσης στη στέψη του πυλώνα M8 στις διευθύνσεις x, y

Figure 6.35: Calculated frequency spectrum for the inclination data at the cap of the pier M8 (x, y-axis)

Το φάσμα FFT των δεδομένων μετατόπισης που προέρχεται από τα κλισίμετρα φαίνεται να είναι πολύ καθαρό στο χαμηλότερο άκρο της συχνότητας (0.001-0.05 Hz). Αυτό δείχνει ότι δεν υπάρχει στατική κίνηση της γέφυρας που να έχει καταγραφεί από τους αισθητήρες κλίσης. Αλλά παρατηρείται μια κύρια συχνότητα 0.01 Hz στην διεύθυνση y και 0.03 Hz στην διεύθυνση x.

6.4 Ανάλυση εποχικότητας δεδομένων

Στην ενότητα αυτή θα μελετηθούν τα δεδομένα που προέκυψαν από το κλισίμετρο το οποίο είναι τοποθετημένο στη στέψη του πυλώνα M8 που αποτελεί το υψηλότερο βάθρο της γέφυρας. Οι μετρήσεις που θα αναλυθούν αναφέρονται στους μήνες: Ιανουάριος 2018, Ιούνιος 2018 και Ιανουάριος 2019.

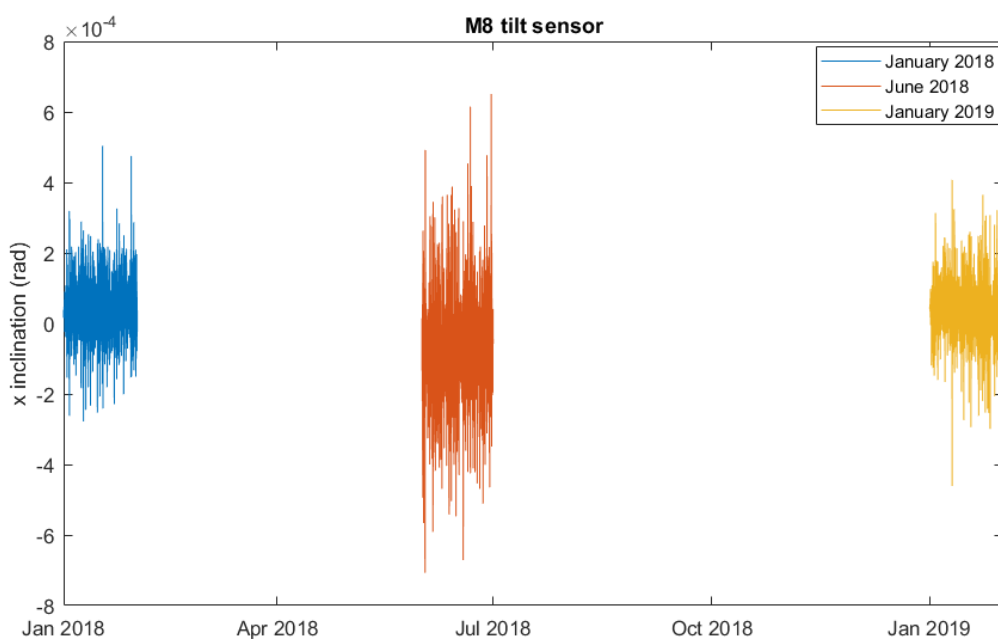
Στον Πίνακα 6.2 παρουσιάζονται τα στατιστικά στοιχεία των δεδομένων των κλίσεων για τους διαφορετικούς μήνες παρατήρησης στη στέψη του πυλώνα M8 (ΚΛ8).

M8 [mrad]	Ιανουάριος 2018		Ιούνιος 2018		Ιανουάριος 2019	
	x	y	x	y	x	y
Μέση τιμή	3.8633e-05	-4.8684e-05	-7.2798e-05	-0.00030903	3.6499e-05	-0.00011567
Μέγιστη τιμή	0.000504	0.000574	0.000707	0.000912	0.000461	0.000506
Ελάχιστη τιμή	-0.000278	-0.000574	-0.000707	-0.000912	-0.000461	-0.000506
Τυπική απόκλιση	2.6592e-05	3.843e-05	4.6573e-05	6.3865e-05	3.0212e-05	4.5237e-05
Διακύμανση	3.5357e-10	7.3843e-10	1.0845e-09	2.0394e-09	4.5639e-10	1.0232e-09

Πίνακας 6.2: Στατιστικά στοιχεία δεδομένων κλίσεων στη στέψη του πυλώνα M8

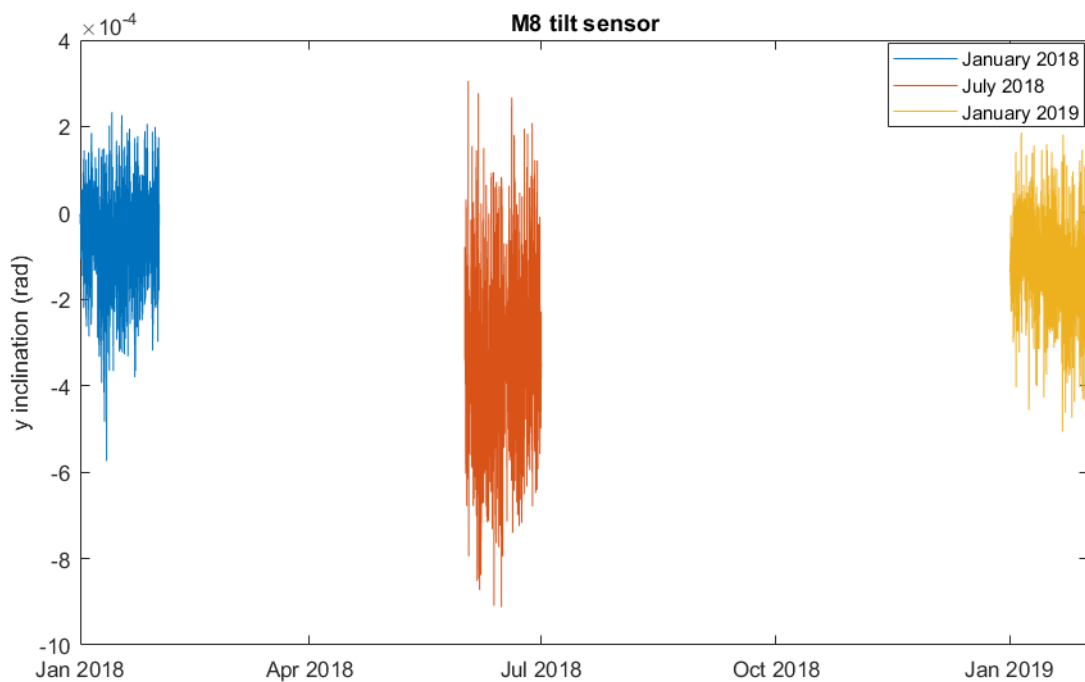
Table 6.2: Statistics data of inclination data at the cap of the pier M8

Στα Σχήματα 6.36, 6.37 παρουσιάζονται τα διαγράμματα των πρωτογενών δεδομένων κλίσεων στη στέψη του πυλώνα M8 για τους παραπάνω μήνες παρατήρησης. Τα διαστήματα που εμφανίζονται χωρίς τιμές είναι τα διαστήματα που μεσολαβούν μεταξύ των περιόδων συλλογής δεδομένων. Όπως παρατηρείται κατά τις διευθύνσεις x,y τον μήνα Ιούνιο είναι μεγαλύτερες. Εάν δεν ληφθούν υπόψιν οι ακραίες τιμές εφόσον είναι δείγμα θορύβου τον Ιούνιο παρατηρείται μεγαλύτερο εύρος κίνησης.



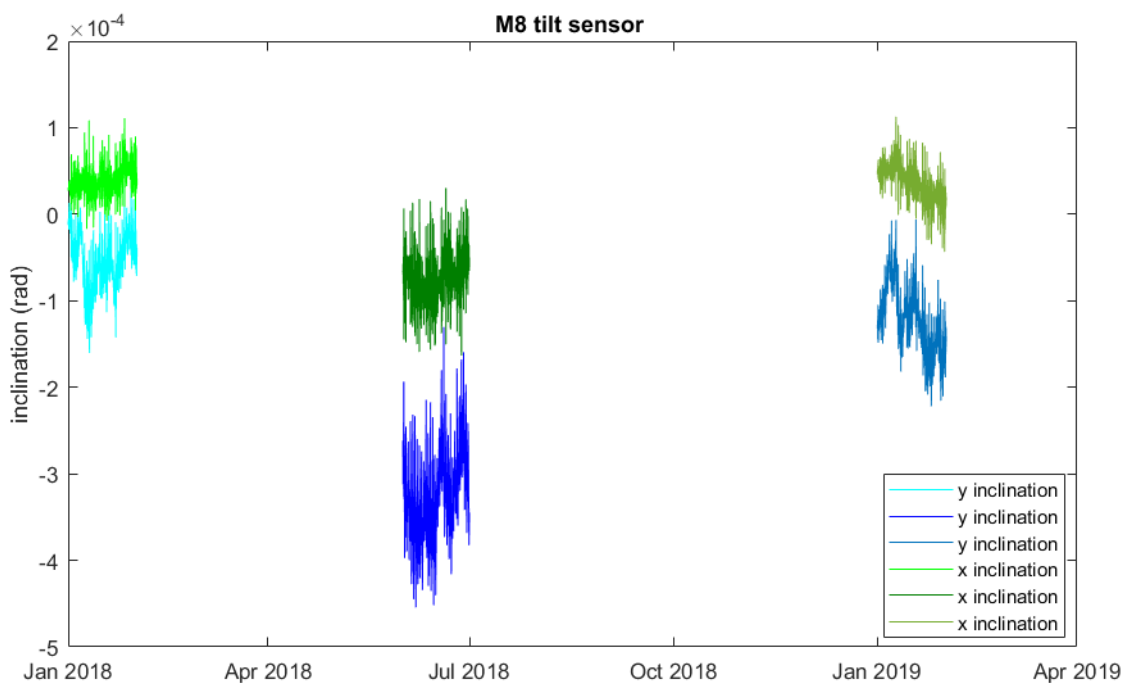
Σχήμα 6.36: Διάγραμμα δεδομένων κλίσεων κατά την x διεύθυνση για το βάθρο M8 ως προς τον χρόνο

Figure 6.36: Plot of the inclination data (x-axis) on the M8 pier through the time



Σχήμα 6.37: Διάγραμμα δεδομένων κλίσεων κατά την y διεύθυνση για το βάθρο M8 ως προς τον χρόνο

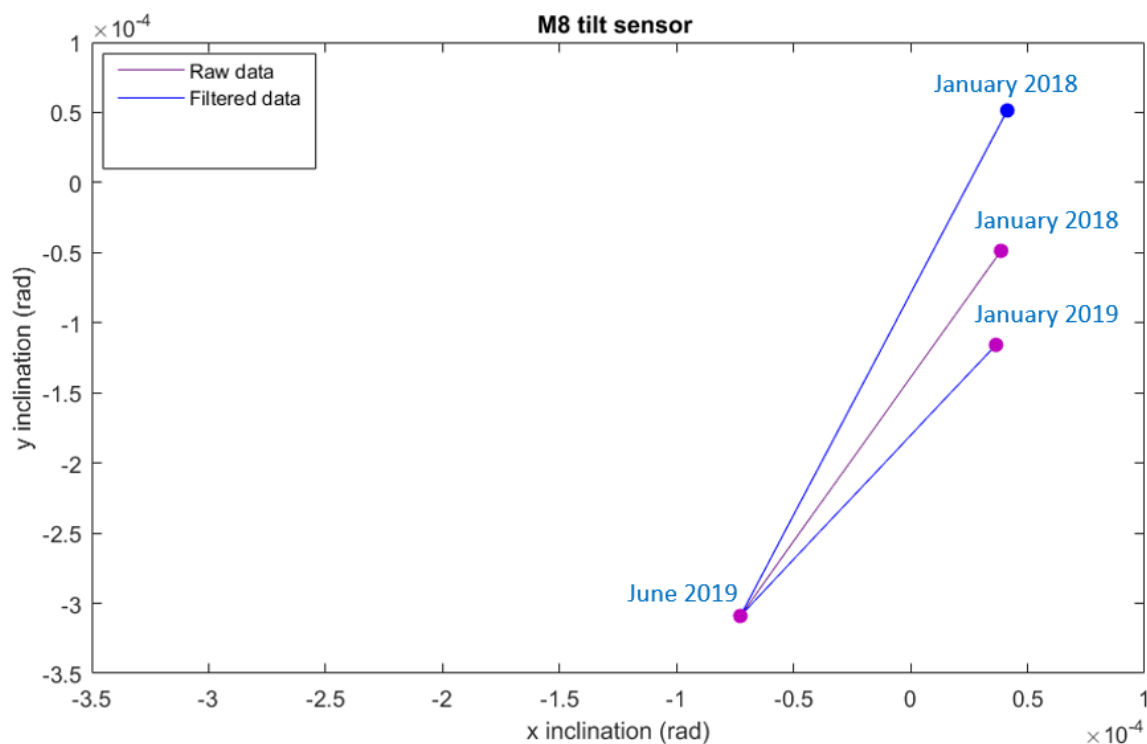
Figure 6.37: Plot of the inclination data (y -axis) on the M8 pier through the time



Σχήμα 6.38: Φιλτραρισμένα δεδομένα κλίσεων κατά τις x, y διευθύνσεις για το βάθρο M8 ως προς τον χρόνο

Figure 6.38: Plot of the filtered inclination data (x, y -axis) on the M8 pier through the time

Παρατηρείται ότι στην κλίση κατά την x διεύθυνση παρουσιάζεται ίδια συμπεριφορά σχετικά με τις μετακινήσεις για τον μήνα Ιανουάριο, ενώ τον μήνα Ιούνιο που εντοπίζονται πιο έντονες θερμοκρασίες είναι μεγαλύτερες.



Σχήμα 6.39: Δεδομένα κλίσεων κατά την διεύθυνση x ως προς την y διεύθυνση στη στέψη του πυλώνα M8

Figure 6.39: Inclination data x-axis vs y-axis at the cap of the pier M8

Είναι φανερό ότι στο βάθρο υπάρχει μια επανάληψιμότητα ειδικότερα στην διεύθυνση x ως προς την κλίση από τον πυλώνα, αλλά στην διεύθυνση y 1.67×10^{-4} rad εντοπίζεται διαφορά στα πρωτογενή δεδομένα και στα δεδομένα στα οποία εφαρμόστηκε μέθοδος εξομάλυνσης θορύβου είναι -1.08×10^{-4} rad.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Συμπεράσματα

Σε αυτό το Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα σχετικά με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την διαδικασία των μετρήσεων, καθώς και από την επεξεργασία και ανάλυση τους. Τα συμπεράσματα αφορούν αφενός τις μεθόδους καταγραφής και αφετέρου τη συμπεριφορά της κατασκευής. Η εφαρμογή της μεθόδου έγινε στο πλαίσιο μελέτης της δομικής συμπεριφοράς της γέφυρας σε δοκούς πολλαπλών ανοιγμάτων του κλάδου 8 στο κόμβο Μεταμόρφωσης με την Αττική Οδό ΑΕ.

Όπως απορρέει από την συλλογή, επεξεργασία, ανάλυση των μετρήσεων πεδίου καθώς και από τις συγκρίσεις που προέκυψαν μεταξύ αποτελεσμάτων από ανεξάρτητες μεθόδους στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα ως προς τις δυνατότητες (ακρίβεια, αξιοπιστία, αποτελεσματικότητα, λειτουργικότητα) της τεχνολογίας ψηφιακών κλισιμέτρων στην μελέτη της δομικής συμπεριφοράς γεφυρών:

- Το κλισίμετρο Nivel220 είναι εν γένει εύχρηστο κυρίως για την παρακολούθηση φαινομένων χαμηλής δυναμικής, δεδομένου ότι παρέχει μετρήσεις ακριβείας και υψηλής ανάλυσης (καλύτερες του 0.001 mrad), λόγω του μικρής μάζας τοποθετείται εύκολα. Ωστόσο, η φύση των μετρήσεων και οι ιδιαιτερότητές που απορρέουν από την επεξεργασία των μετρήσεων προϋποθέτουν εκτεταμένη εκπαίδευση τόσο στις εργασίες πεδίου όσο και γραφείου.
- Τα ψηφιακά κλισίμετρα παρέχουν μετρήσεις σε δύο άξονες και ως εκ τούτου μπορεί να υπολογίσουν μετακινήσεις σχετικά με την απόκλιση κατακορύφου που ορίζεται από την κατακόρυφη θέση του οργάνου σε δύο διεθύνσεις.
- Παρατηρήθηκε άμεση συσχέτιση της ημι-στατικής απόκρισης της γέφυρας με τις θερμοκρασιακές μεταβολές. Αυτό έγινε φανερό από την σύγκριση των δεδομένων σε διαφορετικές χρονικές περιόδους παρατήρησης, ειδικότερα τις πιο χρονικές περιόδους με αυξημένο δείκτη θερμοκρασίας οι μετακινήσεις ήταν εντονότερες (Ιούνιος 2018).
- Οι καταγραφές δεδομένων κλίσης παρουσίασαν κυκλική ημερήσια συμπεριφορά σχετικά με τις θερμοκρασιακές μεταβολές.

- Παρατηρήθηκε ότι οι αποκλίσεις των πυλώνων ήταν μεγαλύτερες κατά την διάρκεια της ημέρας λόγω του πλήθους των διερχόμενων οχημάτων.
- Τα δεδομένα κλίσεων παρουσίασαν κυκλική συμπεριφορά κατά την διάρκεια του χρόνου.

Πέρα από τα θετικά στοιχεία πρέπει να αναφερθούν και ορισμένοι περιορισμοί που εμφανίζονται κατά τη χρήση των κλισιμέτρων Nivel220 στην παρακολούθηση της στατικής συμπεριφοράς των κατασκευών:

- Ενδέχεται να παρουσιαστούν σφάλματα λόγω μη ορθής εγκατάστασης και οριζοντίωσης των κλισιμέτρου και ως εκ τούτου οι μετρημένες τιμές κλίσης θα αποκλίνουν από την κατακόρυφο.
- Σε ορισμένες περιπτώσεις πιθανόν να προκύψουν σφάλματα αποκλίσεων που σχετίζονται με την απόκλιση της επιφάνειας του υγρού που βρίσκεται στο εσωτερικό του κλισιμέτρου από την οριζόντια θέση. Ωστόσο, το συγκεκριμένο σφάλμα μπορεί να απαλειφθεί με την αγωγή των μετρήσεων.
- Δεν είναι κατάλληλα για τη μελέτη φαινομένων υψηλής δυναμικής λόγω της αδράνειας του υγρού.

Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση

1. Burdet O., Zanella J.L., 2000. Automatic monitoring of bridges using electronic inclinometers, *16th Congress of IABSE*, Lucerne, Switzerland.
2. Çelik, R. (1999) *Real-Time Precise Structure Monitoring Using Nivel20*. Third Turkish-German Joint Geodetic Days. 1-4 June. Istanbul, Turkey.
3. Chee Kian Teng (2012), *Structural Health Monitoring of a Bridge Structure Using Wireless Sensor Network*, Western Michigan University.
4. Cranenbroeck J., 2007. Continuous Beam Deflection Monitoring using Precise Inclinometers, *FIG Working Week*, Hong Kong SAR, China.
5. Czesław Machelski & Maciej Hildebrand (2015), *Efficiency of monitoring system of a cable-stayed bridge for investigation of live loads and pier settlements*, *J Civil Struct Health Monit* 5:1-9.
6. E. J. Cross, K. Y. Koo, J. M. W. Brownjohn, and K. Worden, *Long-term monitoring and data analysis of the Tamar Bridge*, *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 35, no. 1-2, pp. 16-34, 2013.
7. Fazlul H. C., G M Sadiqul I., Muhammad T. R. (2015), *Application of different structural health monitoring system on bridges An overview*, IABSE-JSCE Joint Conference on Advances in Bridge Engineering-III, Dhaka, Bangladesh.
8. Filipe José Moreira Guerra (2016), *Structural Health Monitoring of bridges: Physics-based assessment and data driven damage identification*, Faculty of Engineering of the University of Porto
9. Fowler M., Meynink P.S. (2013), *Inclinometers-the good, the bad and the future*, Australian Centre for Geomechanics, Crawley, Australia.
10. G. Kulwanoski, J. Schnellinger (2004), *The Principles of Piezoelectric Accelerometers*, Sensors Magazine.
11. Gethin Wyn Roberts, X. Meng, Alan Dodson (2003), *Measuring the dynamic deformation of bridges using a total station*, *Proceedings*, 11th FIG Symposium on Deformation Measurements, Santorini, Greece
12. Giovanni Nico et.al (2017), *Bridge monitoring strategies by Ground-based SAR*, Istituto per le Applicazioni del Calcolo (IAC), Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) Via Amendola 122/O, Bari, 70126 Italy.
13. Gikas V., Mpimis T., Piniotis G., Perakis H., Papadimitriou F., Drimeris K., *Long-term monitoring of the Tall Piers of a Multi-span Beam Bridge Using a Network of Digital Inclinometres: First Results and Perspectives*, 4th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM).
14. Gikas V., Karydakis P., Mpimis A., Piniotis G., H. Perakis (2016), *Structural Integrity Verification of a Cable-stayed Footbridge Based on FEM Analyses and Geodetic Surveying Techniques*. Survey Review, Vol. 48 No. 346.
15. G M Sadiqul Islam, Muhammad Tanveer Raihan (2015), *Application of different structural health monitoring system on bridges*, *Conference*, IABSE-JSCE Joint Conference on Advances in Bridge Engineering-III, Dhaka, Bangladesh.

16. Guan, H., Karbhari, V. M. and Sikorski, C. S. (2005), *Time-domain output only modal parameter extraction and its application*, Proceedings of the 1st IOMAC Conference, Copenhagen, Denmark.
17. Fowler M., Meynink P.S., 2013. *Inclinometers-the good, the bad and the future*, Australian Centre for Geomechanics, Crawley, Australia.
18. H. Shenton, M. Fernandez¹, N. Ramanna¹, M. Chajes¹, G. Wenczel¹, and H. Al-Khateeb¹ (2015), *Structural Health Monitoring of a Cable-Stayed Bridge: Using Tiltmeter Data to Determine Edge Girder Deflections*, Torino.
19. Hadi T. A., Harry W. Shenton, Michael J. C. (2018), *Computing continuous load rating factors for bridges using structural health monitoring data*, Journal of Civil Structural Health Monitoring (2018) 8:721–735.
20. Hou, X., X. Yang and Q. Huang (2005), *Using Inclinometers to Measure Bridge Deflection*, Journal Bridge Eng. Vol. 10(5), pp. 564-569.
21. Hurlebaus S. et.al (2013), *Summary Review of GPS Technology for Structural Health Monitoring*, Article in Journal of Structural Engineering.
22. Hyoseong Lee, Dongyeob Han (2018), *Deformation Measurement of a Railroad Bridge Using a Photogrammetric Board without Control Point Survey*, Hindawi Journal of Sensors.
23. J.K Lee, J.S. Park b, G.W. Roberts a, O. Oloropo a, D.J. Moon (2011), *Study on Issues of Tilt-meters and Utilization of GPS in Bridge Monitoring System (BMS)*, Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JIS-DM), Hong Kong.
24. Kaplan E. and Hegarty C. (2006), *Understanding GPS: Principles and Applications*, pages 1-5.
25. L. Bisby and M. B. Briglio (2006), “An Introduction to Structural Health Monitoring,” ISIS Canada.
26. Lee J.K., Park J.S., Roberts G.W., Oloropo O., Moon D.J., 2011. Study on Issues of Tilt-meters and Utilization of GPS in Bridge Monitoring System (BMS), *International Symposium on Deformation Monitoring*, Hong Kong, China.
27. Leica Geosystems (2007), Manual for Nivel200, AG. Switzerland.
28. Leick A. (2203), *GPS Satellite Surveying*, John Wiley and Sons, New York, 2nd edition.
29. Li X., Rizos C., Tamura Y., Ge L., Yoshiba A., Cranenbroeck J., (2010). *Fundamental Bending Mode and Vibration Monitoring with Inclinometer and Accelerometer on High-rise Buildings Subject to Wind Loads*, 5th World Conference on Structural Control and Monitoring, Shinjuku, Tokyo.
30. M. L. Wang, J. P. Lynch, and H. Sohn, Eds.(2014), *Sensor Technologies for Civil Infrastructures*, vol. 2. Cambridge: Woodhead Publishing.
31. M. Shinozuka & B ManSouri (2009), *Synthetic aperture radar and remote sensing technologies for structural health monitoring of civil infrastructure systems*, university of California, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, Pages 113-151.
32. Mosbeh R. Kaloop & Hui Li (2009), *Monitoring of Bridge Deformation Using GPS Technique*, KSCE Journal of Civil Engineering.

33. Mosbeh R. Kaloop, Emad Elbeltagi, Jong Wan Hu, Ahmed El Refai (2017), *Recent Advances of Structures Monitoring and Evaluation Using GPS-Time Series Monitoring Systems: A Review*, ISPRS International Journal of Geo-Information.
34. O.Monserrat & M.CrosettoG.Luzi (2014), *A review of ground-based SAR interferometry for deformation measurement*, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing.
35. Orfanidis, S. J. (2010), *Introduction to Signal Processing*, Rutgers University.
36. P. Psimoulis, S. Stirosa (2011), *Using Robotic Theodolites (RTS) in Structural Health Monitoring of Short-span Railway Bridges*, GIM International.
37. Psimoulis P.A. and S.C. Stiros (2013). *Measuring deflections of a short-span railway bridge using a Robotic Total Station*, Journal of Bridge Engineering, Vol. 18(2), pp. 182-185.
38. Rödelsperger Sabine (2011), *Real-time Processing of Ground Based Synthetic Aperture Radar (GB-SAR) Measurements*, Darmstadt.
39. Rolands Kromanis (2015), *Structural Performance Evaluation of Bridges: Characterizing and Integrating Thermal Response*, thesis University of Exeter
40. Rudolf Urban, Martin Štroner (2013), *Measurement of deflection line on bridges*, Reports on Geodesy and Geoinformatics vol. 95 /2013; pages 64-75 2013-0013.
41. Sanli, A.K., Uzgider, E.A., Caglayan, O.B., Ozakgul, K., Bien, J., (2000), *Testing bridges by using tiltmeter measurements*, Journal of Transportation Research Board., No 1696, p. 111-117
42. Savitzky, A. (1964), *Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures*. *Analytical Chemistry*, pages. 1627-1639.
43. Shen-en Chen (2012), *Laser Scanning Technology for Bridge Monitoring*, University of North Carolina at Charlotte.
44. W. Zhang & Shouwang Sun (2016), *Bridge-Deflection Estimation through Inclinometer Data Considering Structural Damages*, Article in Journal of Bridge Engineering.
45. Xianlong He, Xueshan Yang, Lizhen Zhao (2014), *Application of Inclinometer in Arch Bridge Dynamic Deflection Measurement*, TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering.
46. Wyczałek I., Wyczałek M., Wyczałek E. (2019), *Diagnostic surveys of displacements of a rotating pedestrian bridge during its movement* , 4th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM).
47. Wyczałek I., Olaszek P., Sala D., Kokot, M.(2019), *Monitoring of the static and dynamic displacements of railway bridges with the use of the total station and set of the electronic devices*, 4th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM).
48. Yongtao Dong & Ruiqiang Song (2010), *Bridges Structural Health Monitoring and Deterioration Detection- Synthesis of Knowledge and Technology*, Alaska University Transportation Center.
49. Y.-L. Xu and Y. Xia (2012), *Structural Health Monitoring of Long-span Suspension Bridges*, New York: Spon Press.

Ελληνική

1. Αποδουλιανάκης Λ., 2011, *Διερεύνηση της μεταβολής της μέτρησης (επαναληψιμότητα) των ψηφιακών χωροβατών σε διαφορετικές συνθήκες*, Διπλωματική Εργασία, ΣΑΤΜ, Τομέας Τοπογραφίας, ΕΜΠ, Αθήνα, Ελλάδα.
2. Ανδρουλάκη Αγγελική (2011), *Τεχνολογία επίγειου radar συνθετικού ανοίγματος εφαρμογή στη μέτρηση ταλαντώσεων υψηλών κατασκευών*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ελλάδα.
3. Ευάγγελος Αστροειδής (2010), *Ενόργανη Παρακολούθηση δομικών κατασκευών με χρήση αισθητήρων οπτικών ινών*, Σκυρόδεμα και Χάλυβας.
4. Γκίκας Β. (2016), *Σημειώσεις μαθήματος Προχωρημένες Μέθοδοι Τεχνικής & Βιομηχανικής Γεωδαισίας*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ελλάδα.
5. Εμμανουήλ Β., (2011), *Ανίχνευση κατακόρυφων μετακινήσεων στο κτίριο Λαμπαδαρίου – προεκτίμηση διαφορικών καθιζήσεων στα φέροντα στοιχεία λόγω διάνοιξης αβαθούς σήραγγας*, Διπλωματική Εργασία, ΣΑΤΜ, Τομέας Τοπογραφίας, ΕΜΠ, Αθήνα, Ελλάδα.
6. Ζυγούρης Κ., *Συστήματα παρακολούθησης και στρατηγικές διαχείρισης γεφυρών*, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πάτρας, Πάτρα, Ελλάδα.
7. Κοκκίνου Ε., 2007, *Καταγραφή ταλαντώσεων σιδηροδρομικής γέφυρας Γοργοποτάμου με ρομποτικό θεοδόλιχο (RTS)*, Διατριβή μεταπτυχιακού, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πάτρας, Πάτρα, Ελλάδα.
8. Πανέτσος Π., Ρεντζεπέρης Ι., Λιώλιος Κ., 2009. *Σύστημα ενόργανης παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας των γεφυρών από σκυρόδεμα της Εγνατίας Οδού*, 16ο Συνέδριο Σκυροδέματος ΤΕΕ-ΕΤΕΚ, Πάφος, Κύπρος.
9. Παππάς Σπύρος (2015), *Διερεύνηση συνδυαστικής χρήσης γεωδαιτικών σταθμών και μηχανών μέτρησης συντεταγμένων αρθρωτού βραχίονα για εφαρμογές βιομηχανικής γεωδαισίας*, Διπλωματική Εργασία, ΣΑΤΜ, Τομέας Τοπογραφίας, ΕΜΠ, Αθήνα, Ελλάδα.
10. Πασχαλίδου Ευφροσύνη (2014), *Αξιολόγηση ψηφιακών κλισιμέτρων ακριβείας στην μελέτη δομικής παρακολούθησης γεφυρών κατά την επιβολή ελεγχόμενης δοκιμαστικής φόρτισης*, Διπλωματική Εργασία, ΣΑΤΜ, Τομέας Τοπογραφίας, ΕΜΠ, Αθήνα, Ελλάδα.
11. Ρούσσου Δ., (2007), *Μεθοδολογία παρακολούθησης μικρομετακινήσεων με τη χρήση γεωτεχνικών οργάνων σε σήραγγες*, Διατριβή Ειδίκευσης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, ΠΜΣ: “Γεωτεχνολογία και Περιβάλλον”, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, Ελλάδα.
12. Σαλονικιός Θ., (2009), *Παρακολούθηση Δομικής Κατάστασης Γεφυρών – Αξιοποίηση Μετρήσεων από Ενοργάνωση Γέφυρας*, 16ο Συνέδριο Σκυροδέματος ΤΕΕ-ΕΤΕΚ, Πάφος, Κύπρος.
13. Σαραφιάν Κ., *Πειραματική διερεύνηση ψηφιακών κλισιμέτρων ακριβείας στη μελέτη ταλαντώσεων υψηλών κατασκευών έναντι του ανέμου*, Μεταπτυχιακή Εργασία, ΣΑΤΜ, ΔΠΜΣ: “Γεωπληροφορική”, ΕΜΠ, Αθήνα, Ελλάδα.
14. Ψύλλου Ε., 2011. *Βελτιστοποίηση διαχείρισης γεφυρών με χρήση ευφώνων συστημάτων παρακολούθησης*, Πτυχιακή Εργασία, Σχολή Μηχανικής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Γεωπληροφορικής, Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου, Λεμεσός, Κύπρος.

Διαδίκτυο

1. www.wikipedia.org/
2. <http://www.leica-geosystems.com/>
3. <http://www.metrica.gr/>
4. <http://www.mathworks.com/>
5. <http://www.sciencedirect.com/>
6. <http://www.domi-ae.gr/>
7. <http://www.jpdevelopment.gr/>
8. <http://www.omegacentre.bartlett.ucl.ac.uk/>
9. <http://www.smartec.ch/>
10. <http://www.tkmations.tee.gr/>
11. <http://www.rstinstruments.com/>
12. <http://www.wisegeek.com/>
13. <http://www.selfgrowth.com/>
14. <http://www.elektron.pol.lublin.pl/>
15. <http://www.fbg.co.kr/>
16. <http://www.gps.gov/>
17. <http://www.russianspaceweb.com/>
18. <http://en.beidou.gov.cn/>
19. <http://www.idsgeoradar.com/>
20. <http://www.faro.com/>
21. <http://eclass.pat.teiwest.gr/>
22. <http://www.gefyra.com/>