

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών

ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ



NATIONAL TECHNICAL
UNIVERSITY OF ATHENS

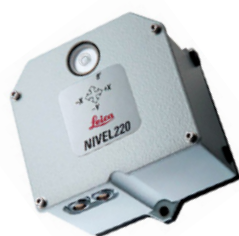
School of Rural & Surveying Engineering

GEOINFORMATICS

POST-GRADUATE PROGRAMME

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΚΛΙΣΙΜΕΤΡΩΝ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΜΕΛΕΤΗ ΔΟΜΙΚΗΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΓΕΦΥΡΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΠΙΒΟΛΗ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗΣ ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Εφαρμογή στην Καλωδιωτή Γέφυρα ΣΕΑ Παλλήνης, Αττικής Οδού



Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Πασχαλίδου Ευφροσύνη

Επιβλέπων: Γκίκας Βασίλειος,
Αναπληρωτής καθηγητής ΕΜΠ

-Αθήνα, Δεκέμβριος 2014-



**ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΚΛΙΣΙΜΕΤΡΩΝ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΜΕΛΕΤΗ
ΔΟΜΙΚΗΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΓΕΦΥΡΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΠΙΒΟΛΗ
ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗΣ ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ**

Εφαρμογή στην Καλωδιωτή Γέφυρα ΣΕΑ Παλλήνης, Αττικής Οδού

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΣΧΑΛΙΔΟΥ ΕΥΦΡΟΣΥΝΗ

Επιβλέπων : Γκίκας Βασίλειος
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή:

(Υπογραφή)

.....

Γκίκας Βασίλειος
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....

Παραδείσης Δημήτριος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....

Θανόπουλος Παύλος
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Δεκέμβριος 2014

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. Θεωρώ υποχρέωσή μου 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 Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Βασίλειο Γκίκα για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντας μου τη συγκεκριμένη εργασία, τις γνώσεις που μου προσέφερε και τις πολύτιμες συμβουλές για τη συγγραφή της εργασίας.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους υποψήφιους διδάκτορες και μέλη ΕΤΕΠ του Εργαστηρίου Γενικής Γεωδαισίας της ΣΑΤΜ, Γεώργιο Πηνιώτη, Δήμητρα Τσίνη, Δημήτριο Τσίνη, Αντώνη Σούλη, τον υποψήφιο διδάκτορα Θανάση Μπίμη και τη συνάδελφο και συμφοιτήτρια Γεωργία Πονηρέλη για την καθοριστική βοήθειά τους στις μετρήσεις πεδίου, την καθοδήγησή τους και τις ουσιαστικές συμβουλές τους κατά το στάδιο της επεξεργασίας των μετρήσεων. Ευχαριστίες εκφράζονται προς τον Δρ. Φαίδωνα Καρυδάκη, Πολ. Μηχανικό ΕΜΠ για την συνεργασία και παροχή επιλύσεων αριθμητικών μοντέλων.

Ιδιαίτερη αναφορά οφείλω στους μηχανικούς και εργαζόμενους της Αττικής Οδού Α.Ε και συγκεκριμένα στον κ. Αλέξανδρο Παναγάκη, Προϊστάμενο Τμήματος Οδικής συντήρησης, Αττικές Διαδρομές ΑΕ, τον κ. Φάνη Παπαδημητρίου, Διευθυντή Κυκλοφορίας και Συντήρησης, Αττικές Διαδρομές ΑΕ για την ουσιαστική συμβολή τους στις εργασίες πεδίου αλλά και για τις πληροφορίες που παρείχαν για την γέφυρα της Παλλήνης που ήταν το αντικείμενο μελέτης.

Ευχαριστώ από καρδιάς τους γονείς μου Ειρήνη και Πασχάλη Πασχαλίδη, την αδερφή μου Κατερίνα για την αμέριστη βοήθεια τους, 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 αξιολόγηση της τεχνολογίας των ψηφιακών κλισιμέτρων κατά την διενέργεια στατικών δοκιμαστικών φορτίσεων σε γέφυρες. Ειδικότερα, η μελέτη στοχεύει στον έλεγχο της ορθότητας της μεθόδου μέσω πειραματικών δοκιμών εφαρμόζοντας διαφορετικές μεθόδους προσαρμογής καμπυλών για τον υπολογισμό των κλίσεων και των κατακόρυφων μετατοπίσεων κατά μήκος του καταστρώματος μιας γέφυρας, χρησιμοποιώντας μετρήσεις κλίσεων σε ορισμένο αριθμό σημείων. Το πείραμα διεξάγεται στην καλωδιωτή γέφυρα ΣΕΑ Παλλήνης της Αττικής Οδού Α.Ε., με χρήση μετρήσεων πέντε ψηφιακών κλισιμέτρων (*Nivel220 Leica Geosystems*). Οι κατακόρυφες μετακινήσεις που προκύπτουν συγκρίνονται με αυτές που υπολογίζονται από μετρήσεις γεωμετρικής χωροστάθμησης και τις αντίστοιχες υπολογισμένες μετατοπίσεις βάσει των αριθμητικών μοντέλων με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (FEM).

Ο σχεδιασμός των μετρήσεων περιλαμβάνει την επιλογή των θέσεων τοποθέτησης των χωροσταθμικών σημείων και των ψηφιακών κλισιμέτρων κατά μήκος της μίας παρειάς του καταστρώματος της γέφυρας. Οι στατικές δοκιμαστικές φορτίσεις πραγματοποιούνται χρησιμοποιώντας ένα τριαξονικό φορτηγό όχημα συνολικής μάζας 30 t, το οποίο τοποθετείται σε έξι θέσεις πλησίον των σημείων απόληξης των έξι καλωδίων. Η επεξεργασία των δεδομένων πραγματοποιείται με τη συγγραφή αλγορίθμου στη γλώσσα προγραμματισμού MATLAB για τη διαχείριση των δεδομένων και τη δοκιμή διαφορετικών πολυωνυμικών συναρτήσεων που περιγράφουν την μεταβολή των κατά μήκος κλίσεων για όλα τα κλισίμετρα συναρτήσει του μήκους της γέφυρας και τη μεταβολή των κλίσεων συναρτήσει του χρόνου για κάθε κλισίμετρο.

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι το πολυώνυμο πέμπτου βαθμού περιγράφει αξιόπιστα τις μετρήσεις των κλισιμέτρων. Συγκεκριμένα, η ανάλυση δείχνει ότι η ελάχιστη βύθιση παρατηρείται για το σενάριο L0 (γέφυρα χωρίς φορτίο) ενώ οι μέγιστες (-10 mm έως -12 mm) βυθίσεις εμφανίζονται στο σενάριο L3 (φορτηγό όχημα στη θέση απόληξης του μακρύτερου καλωδίου σε απόσταση 40.83 m από την αφετηρία). Οι συγκρίσεις των κατακόρυφων μετακινήσεων που προκύπτουν από τα κλισίμετρα με τις αντίστοιχες τιμές της γεωμετρικής χωροστάθμησης οδηγούν σε μικρές διαφορές (της τάξης των 0.8 mm) υποδηλώνοντας την ορθότητα και τη δυνατότητα εφαρμογής της μεθόδου. Τέλος, οι κατακόρυφες μετακινήσεις του καταστρώματος που προκύπτουν από τις μετρήσεις πεδίου (κλισίμετρα, γεωμετρική χωροστάθμηση) είναι μικρότερες σε μέγεθος σε σχέση με εκείνες που υπολογίζονται από το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων υποδηλώνοντας την αυξημένη δυσκαμψία του καταστρώματος σε σχέση με τις εκτιμήσεις σχεδιασμού.

ABSTRACT

The aim of this postgraduate thesis is the evaluation of digital inclinometer technology for use in static load testing of bridges. More specifically the thesis aims at testing the feasibility and accuracy potential of the method via experimental testing and through implementing alternative curve fitting methods for computing a continuous inclination and vertical displacement behavior along a bridge deck using inclination measurements at a limited number of points. Experimental work is undertaken at Pallini cable-stayed bridge at Attiki Odos SA using measurements of five digital inclinometers (*Leica Geosystems Nivel220*). The results of vertical displacements are cross-compared against those calculated by the precise leveling measurements and those derived from a Finite Element Analysis (FEM).

Data acquisition includes the planning of level point and inclinometer locations distributed along one side of the bridge deck. Static load testing was taken using a tri-axial truck of a total mass 30 t, placed at six locations identified nearby the end points of each of the six cables. Data processing includes the setup of programming code in MATLAB language to manipulate the data and test alternative polynomial functions to describe the variation of along track inclination for all inclinometers with bridge length and for each inclinometer in time.

Data analysis suggests reveals that a five order polynomial function can describe reliably the inclinometer measurements. Specifically, analysis indicates that minimum vertical displacement are observed for scenario L0 (bridge without load) while the maximum (-10 mm to -12 mm) displacements occurred for scenario L3 (truck by the end point of the longest cable at 40.83 m from the start point). Cross-comparisons of vertical displacements obtained between digital inclinometer and precise leveling values result in small difference (of the order of 0.8 mm) suggesting the high accuracy potential and applicability of the method. Finally, the vertical displacements of the deck obtained using field observations (inclinometer, precise leveling) exhibit systematically lower values compared with those derived from the FE model suggesting an increased rigidity of the deck compared to its design estimates.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	i
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	ii
ABSTRACT.....	iii
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	iv
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	vii
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	x
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1 ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΔΟΜΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ.....	4
1.1 Αναγκαιότητα και Αντικείμενο της Διαδικασίας Παρακολούθησης Δομικής Κατάστασης (ΠΔΚ).....	4
1.2 Στατικές Δοκιμές Κατασκευών.....	6
1.2.1 Δοκιμές απόκρισης.....	7
1.2.2 Δοκιμές διάγνωσης.....	7
1.2.3 Δοκιμές επαλήθευσης.....	8
1.3 Μέθοδοι και Όργανα Παρακολούθησης Δομικής Κατάστασης Τεχνικών Έργων.....	9
1.3.1 Μέθοδοι πειραματικής μηχανικής.....	10
1.3.1 α Επιταχυνσιόμετρα.....	10
1.3.1 β Συστήματα οπτικών ινών.....	12
1.3.1 γ Επιμηκυνσιόμετρα.....	14
1.3.1 δ Κλισίμετρα.....	15
1.3.2 Τοπογραφικές μέθοδοι.....	16
1.3.2 α Συστήματα δορυφορικού εντοπισμού.....	16
1.3.2 β Γεωδαιτικοί σταθμοί αυτόματης αναγνώρισης και παρακολούθησης στόχου...20	
1.3.2 γ Επίγειο σύστημα <i>radar</i> μικροκυματικής συμβολομετρίας.....	22
1.3.2 δ Επίγειοι σαρωτές <i>laser</i>	29

2	ΓΕΝΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΓΕΦΥΡΩΝ	32
2.1	Ορισμός της Γέφυρας και Υλικά Κατασκευής.....	32
2.2	Κατηγοριοποίηση Γεφυρών	32
2.3	Συστήματα Παρακολούθησης Γεφυρών.....	37
2.3.1	Οπτικός έλεγχος.....	38
2.3.2	Έλεγχος με όργανα.....	38
2.3.3	Έλεγχος με «έξυπνα συστήματα παρακολούθησης».....	39
3	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΛΙΣΙΜΕΤΡΩΝ: ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ	41
3.1	Γενική Περιγραφή, Εφαρμογές και Κατηγοριοποίηση	41
3.2	Ψηφιακά Κλισίμετρα	44
3.2.1	Αρχή λειτουργίας, σφάλματα και αξιολόγηση της μεθόδου μέτρησης	45
3.3	Το Ψηφιακό Κλισίμετρο <i>Nivel220 (Leica Geosystems)</i>	46
3.3.1	Αρχές λειτουργίας.....	47
3.3.2	Τεχνικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα.....	49
3.3.3	Συνδεσμολογία.....	50
3.3.4	Λογισμικό καταγραφής <i>Nivel Tool</i>	51
4	ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΧΩΡΟΣΤΑΘΜΗΣΗ: ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ...53	
4.1	Γεωμετρική χωροστάθμηση.....	53
4.2	Αρχή Λειτουργίας Χωροβατών.....	55
4.3	Κατηγοριοποίηση Χωροβατών	55
4.4	Χωροσταθμικοί Πήγεις ή Σταδίες	57
4.5	Σφάλματα/Ακρίβειες στις Χωροσταθμήσεις.....	58
4.6	Ο Ψηφιακός Χωροβάτης <i>Leica DNA03</i>	60
4.6.1	Τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά	60
4.6.2	Αξιολόγηση του χωροβάτη <i>Leica DNA03</i>	64
5	ΚΑΛΩΔΙΩΤΗ ΓΕΦΥΡΑ ΣΕΑ ΠΑΛΛΗΝΗΣ, ΑΤΤΙΚΗΣ ΟΔΟΥ	65
5.1	Γενική Περιγραφή της Γέφυρας.....	65

5.2	Δομικά Στοιχεία.....	66
6	ΠΡΟΠΑΡΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΑΙ ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΕΔΙΟΥ....	70
6.1	Προπαρασκευαστικές Εργασίες	70
6.2	Συλλογή Δεδομένων Πεδίου	76
6.3	Μετεωρολογικά Δεδομένα.....	81
7	ΕΠΕΞΕΡΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΕΔΙΟΥ.....	84
7.1	Επεξεργασία Δεδομένων Πεδίου.....	84
7.1.1	Επεξεργασία δεδομένων ψηφιακών κλισιμέτρων.....	84
7.1.1 α	Απεικόνιση πρωτογενών μετρήσεων κλίσης κάθε κλισίμετρου.....	85
7.1.1 β	Υπολογισμός πολυωνύμου κλίσης και μετατόπισης με τη Μέθοδο Ελαχίστων Τετραγώνων.....	87
7.1.2	Επεξεργασία δεδομένων γεωμετρικής χωροστάθμησης	96
7.2	Ανάπτυξη Λογισμικού	98
8	ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΜΕΤΡΗΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	100
8.1	Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων	100
8.2	Υπολογισμός Μετακινήσεων Κλισιμέτρων και Συγκριτική Αξιολόγηση Έναντι Επίλυσης Αριθμητικού Μοντέλου.....	102
8.2.1	Διαδικασία αριθμητικής ολοκλήρωσης μετρημένων κλίσεων	103
8.2.2	Διαδικασία παραγωγής μετρημένων υψομετρικών διαφορών	115
9	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	125
9.1	Συμπεράσματα ως προς την Απόκριση της Κατασκευής	125
9.2	Συμπεράσματα ως προς τη Μέθοδο Παρακολούθησης της Γέφυρας	126
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	129
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	135

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1-1: Απεικόνιση ενός επιταχυνσιόμετρου.....	12
Σχήμα 1-2: Παρακολούθηση της δομικής κατάστασης τεχνικού έργου με τη χρήση αισθητήρων οπτικών ινών.....	13
Σχήμα 1-3: Διάφοροι τύποι επιμηκυνσιόμετρων	15
Σχήμα 1-4: Το <i>Nivel 210</i> , της <i>Leica Geosystems</i>	15
Σχήμα 1-5: Οι τροχιές των δορυφόρων του συστήματος GPS	17
Σχήμα 1-6: Σχηματική αρχή λειτουργίας του συστήματος GPS στην παρακολούθηση κατασκευών	20
Σχήμα 1-7: Απεικόνιση IBIS-S και η χρήση του στην παρακολούθηση κατασκευών	23
Σχήμα 1-8: Η τεχνική της συμβολομετρίας.....	24
Σχήμα 1-9: Ακτινική μετατόπιση και προβαλλόμενη μετατόπιση	25
Σχήμα 1-10: Διάγραμμα εκπεμπόμενου σήματος με την πάροδο του χρόνου	26
Σχήμα 1-11: Ανάλυση απόστασης και προβαλλόμενη ανάλυση απόστασης.....	27
Σχήμα 1-12: Προφίλ του φάσματος (μονοδιάστατη εικόνα).....	27
Σχήμα 1-13: Επίγειος σαρωτής <i>laser</i>	30
Σχήμα 2-1: Γέφυρα <i>Lake Pontchartrain Causeway</i> , Νότια Λουιζιάνα, Νέα Ορλεάνη	34
Σχήμα 2-2: Γέφυρα του Καρόλου, Πράγα.....	34
Σχήμα 2-3: Προσομοίωση Γέφυρας “ <i>Sheikh Rashid bin Saeed Crossing</i> ”, Ντουμπάι.....	35
Σχήμα 2-4: Γέφυρα <i>Akashi Kaikyo</i> , Ιαπωνία	35
Σχήμα 2-5: Γέφυρα Ρίου-Αντιρρίου, Πάτρα, Ελλάδα.....	36
Σχήμα 2-6: Γέφυρα <i>Gateshead Millenium</i> , Αγγλία.....	36
Σχήμα 3-1: Ηλεκτρολυτικά κλισίμετρα.....	42
Σχήμα 3-2: Κλισίμετρο τεχνολογίας απλού εκκρεμούς	43
Σχήμα 3-3: Οριζόντιο ψηφιακό κλισίμετρο.....	44
Σχήμα 3-4: Κατακόρυφο κλισίμετρο.....	44
Σχήμα 3-5: Ψηφιακό κλισίμετρο για εφαρμογές παρακολούθησης τεχνικών έργων	45
Σχήμα 3-6: Ψηφιακό κλισίμετρο <i>Nivel220</i> , <i>Leica Geosystems</i>	47
Σχήμα 3-7: Εξαρτήματα του αισθητήρα.....	47
Σχήμα 3-8: Εξαρτήματα του αισθητήρα.....	48
Σχήμα 3-9: Συνδεσμολογία μεταξύ πολλαπλών αισθητήρων <i>Nivel220</i> και H/Y	51
Σχήμα 3-10: Λογισμικό καταγραφής <i>Nivel Tool</i>	52

Σχήμα 4-1: Γεωμετρική χωροστάθμηση.....	53
Σχήμα 4-2: Ο ψηφιακός χωροβάτης <i>Leica DNA03</i> της <i>Leica Geosystems</i>	60
Σχήμα 4-3: Η οθόνη του <i>Leica DNA03</i> μετά από μια μέτρηση	61
Σχήμα 4-4: Το πληκτρολόγιο του <i>Leica DNA03</i>	62
Σχήμα 5-1: Καλωδιωτή γέφυρα ΣΕΑ Μεσογείων, Παλλήνη	65
Σχήμα 5-2: Κατά μήκος τομή	66
Σχήμα 5-3: Διαδοκίδωση καταστρώματος	68
Σχήμα 5-4: Διατομή καταστρώματος.....	68
Σχήμα 5-5: Ανάπτυγμα πυλώνα	69
Σχήμα 5-6: Διάταξη βάθρων	69
Σχήμα 6-1: Ενδεικτική θέση τοποθέτησης δύο κλισιμέτρων (κίτρινος κύκλος)	71
Σχήμα 6-2: Χωροσταθμικό σημείο	73
Σχήμα 6-3: Σχηματική αναπαράσταση χωροσταθμικών σημείων (ματζέντα κύκλοι) και θέσεων κλισιμέτρων (μπλε πολύγωνα)	73
Σχήμα 6-4: Φορητό όχημα για τη στατική καταπόνηση της γέφυρας.....	75
Σχήμα 6-5: Σχηματική αναπαράσταση των θέσεων του φορητού οχήματος επάνω στη γέφυρα	75
Σχήμα 6-6: Εγκατάσταση συστήματος κλισίμετρου στη γέφυρα.....	77
Σχήμα 6-7: Διευθύνσεις προσανατολισμού κλισιμέτρων.....	78
Σχήμα 6-8: Χωροβάτης στη θέση X1 στην παρεία προς Ελευσίνα	78
Σχήμα 6-9: Σταδία invar γεωμετρικής χωροστάθμησης.....	79
Σχήμα 6-10: Ο μετεωρολογικός σταθμός La crosse ws3600 στην Κάντζα Παλλήνης.....	81
Σχήμα 6-11: Θερμοκρασία περιβάλλοντος ($^{\circ}\text{C}$) στην περιοχή της γέφυρας.....	83
Σχήμα 7-1: Πρωτογενείς μετρήσεις κατά μήκος κλίσεων (mrad) για τα κλισίμετρα N1, ..., N5	85
Σχήμα 7-2: Ανηγμένες κατά μήκος κλίσεις (mrad) για τα κλισίμετρα N1, ..., N5	86
Σχήμα 7-3: Χρονοσειρά κατά μήκος κλίσεων για τα κλισίμετρα N1, ..., N5.....	87
Σχήμα 7-4: Ενδεικτικό αποτέλεσμα προσαρμογής πολυωνύμου (κλίσης και μετατόπισης) με διαφορετικού βαθμού πολυώνυμα στις 18-Φεβρ-2014 και ώρα 23:33:52	91
Σχήμα 7-5: Σφάλμα προσαρμογής συναρτήσεως του βαθμού πολυώνυμου.....	92
Σχήμα 7-6: Διάγραμμα χρονοσειρών κατά μήκος κλίσεων για τα κλισίμετρα N1, ..., N5.....	95

Σχήμα 7-7: Διάγραμμα χρονοσειρών κατακόρυφων μετατοπίσεων για τα κλισίμετρα N1, ..., N5	95
Σχήμα 7-8: Διάγραμμα ροής.....	99
Σχήμα 8-1: Μετρημένες (γεωμετρική χωροστάθμηση) και υπολογισμένες (κλισίμετρα) κατακόρυφες μετατοπίσεις των σημείων E9 (x=11.30 m), E6 (x= 29.362 m) και E2 (x=56.006 m) για τα σενάρια παρατήρησης L0,...,L7	104
Σχήμα 8-2: Υπολογισμένες (FEM) κατακόρυφες μετατοπίσεις κατά μήκος του καταστρώματος για τα σενάρια παρατήρησης L0, ..., L7	107
Σχήμα 8-3: Ενδεικτική αναπαράσταση απότομης ανόδου καμπύλης πολυωνύμου (κόκκινη γραμμή) μεταξύ του δεύτερου για τρίτου καλωδίου (πράσινα βέλη) για το σενάριο L1 και L4.....	108
Σχήμα 8-4: Μετρημένες από γεωμετρική χωροστάθμηση (κόκκινο), ψηφιακά κλισίμετρα (μπλε) και υπολογισμένες (πράσινο) κατακόρυφες μετατοπίσεις για όλα τα χωροσταθμικά σημεία (E2, ..., E11) και όλα τα σενάρια παρατήρησης (L1, ..., L6)	111
Σχήμα 8-5: Μετρημένες από γεωμετρική χωροστάθμηση (κόκκινο), ψηφιακά κλισίμετρα (μπλε) και υπολογισμένες (πράσινο) κατακόρυφες μετατοπίσεις για όλα τα χωροσταθμικά σημεία (E2, ..., E11) και όλα τα σενάρια παρατήρησης (L1, ..., L6)	114
Σχήμα 8-6: Ενδεικτικό αποτέλεσμα προσαρμογής πολυωνύμου (κλίσης-άνω διάγραμμα και μετατόπισης-κάτω διάγραμμα) με διαφορετικού βαθμού πολυώνυμα για το σενάριο L4.....	117
Σχήμα 8-7: Σφάλμα προσαρμογής συναρτήσεως του βαθμού πολυώνυμου.....	118
Σχήμα 8-8: Προσαρμογή πολυωνύμου μετατόπισης 9 ^{ου} βαθμού στις μετατοπίσεις της γεωμετρικής χωροστάθμησης και απεικόνιση μετατοπίσεων μοντέλου FEM για όλα τα σενάρια παρατήρησης (L1, ..L6)	121
Σχήμα 8-9: Σύγκριση μετρούμενης κλίσης από τα κλισίμετρα με την υπολογιζόμενη από τα πολυώνυμα κλίσης που προκύπτουν από τα δεδομένα της γεωμετρικής χωροστάθμησης όλα τα σενάρια παρατήρησης (L1, ..., L6)	123
Σχήμα A-1: Χρονοσειρές κατακόρυφων μετακινήσεων από χωροστάθμηση (σημεία με κόκκινο) με την υπολογιζόμενη από τα πολυώνυμα (6 ^{ου} βαθμού).....	138

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3-1: Εύρος μέτρησης αισθητήρα.....	49
Πίνακας 3-2: Ακρίβεια γωνίας κλίσης	49
Πίνακας 3-3: Ανάλυση	49
Πίνακας 3-4: Ευαισθησία θέσης ισορροπίας.....	49
Πίνακας 3-5: Σφάλμα θέσης ισορροπίας.....	50
Πίνακας 3-6: Περιβαλλοντικές συνθήκες.....	50
Πίνακας 3-7: Άλλα σφάλματα	50
Πίνακας 4-1: Τεχνικά χαρακτηριστικά και ακρίβειες του ψηφιακού χωροβάτη <i>Leica</i> DNA03	63
Πίνακας 6-1: Αποστάσεις στόχων για τις μετρήσεις με κλισίμετρα.....	71
Πίνακας 6-2: Αποστάσεις χωροσταθμικών σημείων μεταξύ τους και από την αφετηρία	74
Πίνακας 6-3: Σενάρια στατικών δοκιμαστικών φορτίσεων.....	76
Πίνακας 6-4: Ημερομηνία και ώρα έναρξης, λήξης κάθε σεναρίου παρατήρησης για τις μετρήσεις με κλισίμετρα	80
Πίνακας 6-5: Ημερομηνία και ώρα έναρξης, λήξης κάθε σεναρίου παρατήρησης για τις μετρήσεις της γεωμετρικής χωροστάθμησης.....	80
Πίνακας 6-6: Θερμοκρασία, υγρασία, ταχύτητα ανέμου για το χρονικό διάστημα του πειράματος (00:03:00-5:16:00) από το μετεωρολογικό σταθμό La crosse ws3600.....	82
Πίνακας 6-7: Μέση θερμοκρασία κάθε κλισίμετρου για το χρονικό διάστημα 23:33:46 μμ - 5:25:19 πμ	83
Πίνακας 7-1: Μέση τιμή κλίσης (mrad) των μετρήσεων κάθε κλισίμετρου για το σενάριο L0.....	86
Πίνακας 7-2: Χωροσταθμικά σημεία (E1-E12) και αντίστοιχα Réper	96
Πίνακας 7-3: Μετακινήσεις χωροσταθμικών σημείων E1-E11 (m) για όλα τα σενάρια παρατήρησης.....	98
Πίνακας 8-1: Σύγκριση μετρούμενης μετατόπισης από τα χωροσταθμικά σημεία με την υπολογιζόμενη από τα πολυώνυμα (6 ^ο βαθμού) για κάθε σενάριο παρατήρησης	112

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στη σύγχρονη εποχή, υπάρχουν διάφοροι λόγοι για τους οποίους είναι πλέον αναγκαία η συντήρηση των μεγάλων και σημαντικών έργων. Αρχικά το υψηλό κόστος κατασκευής τους, ειδικά κάτω από την παγκόσμια δυσμενή οικονομική συγκυρία, επιβάλλει τη στοιχειώδη παρακολούθηση των ήδη υφιστάμενων κατασκευών. Επιπλέον, οι σημαντικές διαφορές μεταξύ μελέτης και κατασκευής είτε λόγω των ιδιαίτερων τοπικών συνθηκών, είτε λόγω των κατασκευαστικών ατελειών, είτε λόγω των θεωρητικών και υπολογιστικών παραδοχών που υιοθετεί το εκάστοτε μοντέλο στο πρόγραμμα σχεδιασμού, δημιουργούν ένα μεγάλο ερωτηματικό όσον αφορά τις ιδιότητες και τα στατικά και δυναμικά χαρακτηριστικά της κατασκευής και άρα της μελλοντικής της απόκρισης. Όλοι οι παραπάνω λόγοι, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι πλέον η επιστήμη και η τεχνολογία έχει αναπτυχθεί αρκετά ώστε να είναι δυνατή η καταγραφή και η αντιμετώπιση 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 ετερογενών αισθητήρων για την καταγραφή της απόκρισης και την αξιολόγηση της στατικής και δυναμικής συμπεριφοράς της καλωδιωτής γέφυρας ΣΕΑ Παλλήνης, Αττικής Οδού. Ειδικότερα, δίνεται έμφαση στη στατική συμπεριφορά του καταστρώματος της γέφυρας που σχετίζεται με τον έλεγχο της δομικής ακεραιότητάς της σε σχέση με παραδοχές που γίνονται κατά το σχεδιασμό της. Οι στατικές δοκιμές αφορούν την γεωμετρία και τα υλικά της κατασκευής και τα αποτελέσματα που διεξάγονται από αυτές αναλύονται και συγκρίνονται με τις αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν από την Ανάλυση των Πεπερασμένων Στοιχείων (*Finite Element Analysis-FEM*).

Η συγκεκριμένη έρευνα έχει τρεις βασικούς στόχους. Αρχικά, να αξιολογήσει τις δυνατότητες που παρέχουν συστήματα ψηφιακών κλισιμέτρων ακριβείας στη μελέτη δομικής παρακολούθησης γεφυρών κατά την επιβολή ελεγχόμενης δοκιμαστικής φόρτισης. Επιπλέον, να μελετήσει την απόκριση της γέφυρας σε στατικά φορτία και ως εκ τούτου να παράγει ένα “πρότυπο” για την τρέχουσα συμπεριφορά της κατασκευής που θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί μελλοντικά για σύγκριση και εκτίμηση της εκάστοτε κατάστασής της σε σχέση με τη σημερινή. Ο τρίτος στόχος αφορά στη συλλογή πολλαπλών δεδομένων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την Παρακολούθηση της Δομικής Κατάστασης γεφυρών. Η ύπαρξη διαφορετικής φύσης δεδομένων που συλλέγονται δημιουργούν το κατάλληλο υπόβαθρο για έρευνα σε διάφορους τομείς, όπως της εκτίμησης των δυνατοτήτων διάφορων αισθητήρων στην Παρακολούθηση της Δομικής Κατάστασης των κατασκευών, της βέλτιστη θέση τοποθέτησής τους ώστε να δίνουν αξιόπιστα αποτελέσματα, των τεχνικών μίξης δεδομένων για την παρακολούθηση των γεφυρών και τη δημιουργία μοντέλων ανίχνευσης βλαβών. Για την υλοποίηση των παραπάνω στόχων στα πλαίσια των εργασιών πεδίου χρησιμοποιήθηκαν διάφορα ετερογενή συστήματα αισθητήρων και εφαρμόστηκαν αρκετά σενάρια παρατήρησης. Η διπλωματική εργασία αποτελείται από 9 Κεφάλαια το περιεχόμενο των οποίων παρουσιάζεται συνοπτικά στη συνέχεια.

Το Κεφάλαιο 1 αναφέρεται στην παρακολούθηση της δομικής κατάστασης των τεχνικών έργων. Αναλύεται η αναγκαιότητα και το αντικείμενο της διαδικασίας παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας των κατασκευών. Επιπλέον, δίνεται έμφαση στις στατικές δοκιμές των γεφυρών οι οποίες εξειδικεύονται σε δοκιμές απόκρισης, δοκιμές διάγνωσης και δοκιμές επαλήθευσης. Τέλος, περιγράφονται οι μέθοδοι και τα όργανα παρακολούθησης της δομικής κατάστασης των τεχνικών έργων.

Στο Κεφάλαιο 2 πραγματοποιείται μια γενική επισκόπηση περί γεφυρών. Δίνεται ο ορισμός της γέφυρας, τα υλικά κατασκευής τους και κατηγοριοποιούνται οι γέφυρες βάσει ορισμένων κριτηρίων. Επιπλέον, αναλύονται οι διαδικασίες και τα συστήματα παρακολούθησης των γεφυρών τα οποία περιλαμβάνουν οπτικό έλεγχο, έλεγχο βάσει αισθητήρων και έλεγχο με «έξυπνα συστήματα παρακολούθησης».

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται διερεύνηση των δυνατοτήτων κλισιμέτρων στην παρακολούθηση των κατασκευών. Δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στα ψηφιακά κλισίμετρα, τις αρχές λειτουργίας τους, τα σφάλματα στις μετρήσεις και αναφέρονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους. Τέλος, γίνεται αναφορά στο ψηφιακό κλισίμετρο *Nivel220* που χρησιμοποιείται για τις μετρήσεις στην παρούσα εργασία.

Στο Κεφάλαιο 4 πραγματοποιείται διερεύνηση της μεθόδου γεωμετρικής χωροστάθμησης. Επεξηγείται η αρχή λειτουργίας των χωροβατών, γίνεται κατηγοριοποίησή τους, περιγράφονται οι χωροσταθμικοί πήγεις καθώς και τα σφάλματα/ακρίβειες στις χωροσταθμίσεις. Τέλος, περιγράφονται τα τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του ψηφιακού χωροβάτη *Leica DNA03* και γίνεται αξιολόγησή του.

Το Κεφάλαιο 5 παρέχει βασικές πληροφορίες για την καλωδιωτή γέφυρα ΣΕΑ Παλλήνης Αττικής Οδού, που αποτελεί βασικό αντικείμενο της εργασίας. Περιγράφεται η γέφυρα και τα δομικά της στοιχεία.

Στο Κεφάλαιο 6 περιγράφονται οι προπαρασκευαστικές εργασίες και οι εργασίες πεδίου. Αναλύεται η πειραματική διάταξη για την εκτέλεση των μετρήσεων, οι θέσεις τοποθέτησης των κλισιμέτρων και των χωροσταθμικών σημείων, οι θέσεις φόρτισης, τα σενάρια παρατήρησης, ο τρόπος που λαμβάνονται οι μετρήσεις. Τέλος, αναφέρονται τα μετεωρολογικά δεδομένα την ημέρα εκτέλεσης των μετρήσεων.

Στο Κεφάλαιο 7 επεξηγείται η διαδικασία επεξεργασίας των μετρήσεων. Αναλύεται η μεθοδολογία επεξεργασίας των δεδομένων πεδίου τόσο από τα κλισίμετρα όσο και από τη γεωμετρική χωροστάθμηση. Επιπλέον, περιγράφεται η ανάπτυξη λογισμικού για την επεξεργασία των δεδομένων.

Στο Κεφάλαιο 8 γίνεται ανάλυση και συγκριτική αξιολόγηση της απόκρισης του καταστρώματος, από τα μετρητικά δεδομένα (κλισίμετρα, γεωμετρική χωροστάθμηση) και από τα στοιχεία αριθμητικής ανάλυσης.

Στο Κεφάλαιο 9 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από το σύνολο της εργασίας.

1 ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΔΟΜΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

Στο παρόν Κεφάλαιο γίνεται αναφορά ως προς την αναγκαιότητα και το αντικείμενο της διαδικασίας παρακολούθησης της δομικής κατάστασης των τεχνικών έργων. Συγκεκριμένα, περιγράφονται οι στατικές δοκιμές των κατασκευών οι οποίες υποδιαιρούνται σε δοκιμές απόκρισης, δοκιμές διάγνωσης και δοκιμές επαλήθευσης. Επιπλέον, περιγράφονται 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.

1.1 Αναγκαιότητα και Αντικείμενο της Διαδικασίας Παρακολούθησης Δομικής Κατάστασης (ΠΔΚ)

Τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας σε όλους τους τομείς. Αποτέλεσμα αυτής της προόδου είναι η κατασκευή μεγάλων τεχνικών έργων με υψηλές απαιτήσεις σε ακρίβεια σχεδιασμού και υλοποίησης. Μεγάλα σε μέγεθος και έκταση τεχνικά έργα υπόκεινται σε στατικές ή δυναμικές φορτίσεις. Συγκεκριμένα, το ίδιο βάρος του έργου αποτελεί στατικό φορτίο ενώ η σεισμική δράση, ο άνεμος και οι μεταβολές της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος αποτελούν δυναμικά φορτία. Αποτέλεσμα του συνόλου των φορτίσεων σε μια κατασκευή είναι η γένεση μετακινήσεων και παραμορφώσεων.

Η ανάγκη μέτρησης αυτών των μετακινήσεων και άλλων στατικών και δυναμικών χαρακτηριστικών των κατασκευών οφείλεται σε διάφορους λόγους. Είναι φανερό ότι οι πραγματικές δυναμικές παράμετροι μιας κατασκευής (όπως ιδιοσυχνότητες, εύρος ταλάντωσης κ.α.) διαφέρουν από αυτά της μελέτης λόγω αποκλίσεων της κατασκευής από την μελέτη, λόγω κόπωσης ή μεταβολών στη δυναμική συμπεριφορά της κατασκευής λόγω ακραίων φορτίσεων (π.χ. σεισμική διέγερση) και άλλους λόγους.

Γενικά, κανένα τεχνικό έργο δεν είναι σταθερό και αμετακίνητο. Αντίθετα, οι φορτίσεις που επιδρούν σε αυτό μπορούν να προκαλέσουν τάσεις και κατ' επέκταση μετακινήσεις που σε ακραίες περιπτώσεις μπορούν να οδηγήσουν σε ολική ή μερική κατάρρευση του έργου αν δεν εντοπιστούν έγκαιρα ή δεν ληφθούν τα αναγκαία μέτρα προστασίας. Ωστόσο, η καταστροφή ενός τεχνικού έργου μπορεί να έχει τεράστιο κοινωνικό και οικονομικό κόστος. Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να υπάρξουν θύματα, διατάραξη του περιβάλλοντος και ουσιαστικές οικονομικές επιπτώσεις που ενδεχομένως επηρεάσουν την οικονομία της ευρύτερης περιοχής για μεγάλο χρονικό διάστημα. Επιπρόσθετα, η μελέτη της πραγματικής δυναμικής συμπεριφοράς ενός τεχνικού έργου μπορεί να δώσει χρήσιμες πληροφορίες που δέον να ληφθούν υπόψη κατά τον σχεδιασμό νέων τεχνικών έργων.

Σε αυτήν την κατεύθυνση έχει στραφεί ένα επιστημονικό πεδίο γνωστό ως Παρακολούθηση της Δομικής Κατάστασης (ΠΑΚ) ή Παρακολούθηση της «Υγείας» των Κατασκευών, *Structural Health Monitoring* (SHM). Αντικείμενο της ΠΑΚ αποτελεί η καταγραφή της πραγματικής συμπεριφοράς μιας κατασκευής με ακρίβεια με στόχο την εκτίμηση της επιτελεστικότητάς της σε διάφορα φορτία να ανιχνεύσει πιθανές βλάβες και να προσδιορίσει την κατάσταση ή τις παθήσεις της κατασκευής. Ένα σύστημα ΠΑΚ πρέπει να παρέχει αξιόπιστες πληροφορίες σχετικά με την ασφάλεια και την δομική ακεραιότητα της κατασκευής και οι πληροφορίες αυτές θα πρέπει να χρησιμοποιούνται στην εφαρμογή συντήρησης και διαχείρισης των έργων.

Το αντικείμενο της ΠΑΚ είναι να καταγράψει επί τόπου της συμπεριφορά μιας κατασκευής με ακρίβεια, να εκτιμήσει την επιτελεστικότητά της σε διάφορα φορτία λειτουργίας, να ανιχνεύσει πιθανές βλάβες και να προσδιορίσει την κατάσταση ή τις παθήσεις της κατασκευής. Ένα σύστημα ΠΑΚ πρέπει να παρέχει αξιόπιστες πληροφορίες σχετικά με την ασφάλεια και την ακεραιότητα της κατασκευής και οι πληροφορίες αυτές θα πρέπει να χρησιμοποιούνται στις στρατηγικές συντήρησης και διαχείρισης των έργων.

Η αμεσότητα και η ευαισθησία της ΠΑΚ πρέπει να είναι τέτοια ώστε να επιτρέπει την πιστοποίηση καινοτόμων μεθόδων σχεδιασμού σε σύντομο χρόνο, την έγκαιρη ανίχνευση προβλημάτων, την αποφυγή καταστροφικών αστοχιών, την κατά το

δυνατόν συντομότερη διακοπή λειτουργίας και το μειωμένο κόστος συντήρησης. Ένα σύστημα για την ΠΔΚ συντίθεται από διάφορα μετρητικά όργανα και διατάξεις όπως:

- Σύστημα αισθητήρων
- Σύστημα καταγραφής δεδομένων
- Σύστημα επεξεργασίας δεδομένων
- Σύστημα επικοινωνίας
- Σύστημα ανίχνευσης βλαβών

1.2 Στατικές Δοκιμές Κατασκευών

Ένα σύστημα ΠΔΚ υποδιαιρείται στα τέσσερα εξής υποσυστήματα:

- Στατικές δοκιμές της κατασκευής
- Δυναμικές δοκιμές της κατασκευής
- Περιοδική παρακολούθηση
- Συνεχή παρακολούθηση

Η κύρια διαφορά μεταξύ των θεωρούμενων συστημάτων ΠΔΚ με άλλα συστήματα δομικής παρακολούθησης, έγκειται στο γεγονός ότι με τα συστήματα ΠΔΚ εκτός από την ανίχνευση βλαβών σε μια κατασκευή είναι δυνατός και ο καθορισμός της αντοχής της κατασκευής και η ανίχνευση πιθανής εμφάνισης βλάβης.

Όπως προαναφέρεται, η παρούσα διπλωματική εργασία μελετά τη στατική απόκριση της γέφυρας ΣΕΑ Παλλήνης Αττικής Οδού έναντι ελεγχόμενης στατικής φόρτισης. Επομένως, σε αυτή την Ενότητα δίνονται τα βασικά στοιχεία που αφορούν σε σχετικές μελέτες. Επιπλέον, ουσιαστικό μέρος των τεχνικών έργων που αποτελούν αντικείμενο παρακολούθησης είναι έργα γεφυροποιίας τα οποία αποτελούν και τα κρίσιμα στοιχεία ενός σύγχρονου συστήματος αυτοκινητόδρομων. Γι αυτό το λόγο γίνεται συνεχώς αναφορά σε γέφυρες αλλά οι ίδιες αρχές ισχύουν και σε άλλα σημαντικά τεχνικά έργα.

Οι στατικές δοκιμές μιας κατασκευής αποτελούν ένα χρήσιμο εργαλείο για την αποτίμηση της δομικής κατάστασής της. Σε περιπτώσεις δοκιμής γεφυρών, οι φορτίσεις θεωρούνται στατικές όταν αυτές επιβάλλονται στην κατασκευή πολύ αργά έτσι ώστε κατά το δυνατόν να μην προκαλούν δυναμικά φαινόμενα στη γέφυρα. Στην

περίπτωση της δοκιμής με οχήματα, τα φορτία θεωρούνται στατικά όταν τα οχήματα τοποθετούνται σε συγκεκριμένα σημεία ελέγχου του φορέα. Οι στατικές δοκιμές γεφυρών υποδιαιρούνται σε δοκιμές απόκρισης, διαγνωστικές δοκιμές και δοκιμές επαλήθευσης όπως αναλύονται παρακάτω.

1.2.1 Δοκιμές απόκρισης

Οι δοκιμές απόκρισης εκτελούνται είτε για τη διερεύνηση της μηχανικής απόκρισης γεφυρών είτε για επαλήθευση της διαδικασίας, ακρίβειας και κυρίως των υποθέσεων που υιοθετούνται στη φάση αναλυτικού υπολογισμού με αριθμητικά μοντέλα μιας κατασκευής. Η σχετική διαδικασία μπορεί να αποσκοπεί στην αναθεώρηση του αριθμητικού μοντέλου μιας κατασκευής (*model updating*) με στόχο την εκτίμηση μιας “αρχικής κατάστασης” της κατασκευής βάσει της οποίας μπορεί να μελετηθούν μεταβολές των δυναμικών παραμέτρων της με επανάληψη της διαδικασίας στο μέλλον. Επίσης, μπορεί να αποσκοπεί στην εξαγωγή συμπερασμάτων χρήσιμων για τον σχεδιασμό νέων έργων. Κατά τη διάρκεια αυτών των δοκιμών, τα εφαρμοζόμενα φορτία, συνήθως διατηρούνται μικρότερα ή ίσα από το επίπεδο των μέγιστων φορτίων λειτουργίας. Μια δοκιμή απόκρισης παρέχει πληροφορίες σχετικά με το πώς κατανέμεται η φόρτιση μεταξύ των διάφορων δομικών στοιχείων της γέφυρας.

1.2.2 Δοκιμές διάγνωσης

Η απόκριση ενός δομικού στοιχείου μιας γέφυρας, συνήθως επηρεάζεται από την αλληλεπίδρασή του με τα άλλα δομικά στοιχεία της γέφυρας. Η ύπαρξη αυτής της αλληλεπίδρασης σε ορισμένους τύπους γεφυρών μπορεί να προσομοιωθεί με ακρίβεια. Όμως, υπάρχουν ορισμένες συνθήκες που μια ρεαλιστική εκτίμηση αυτής της αλληλεπίδρασης αποτελεί αντικείμενο διάφορων εικασιών. Το αποτέλεσμα της επίδρασης μπορεί να είναι επιβλαβές ή ευεργετικό στην απόκριση του θεωρούμενου στοιχείου. Στην περίπτωση που είναι επιβλαβές, ενδεχομένως να υπάρχουν ενδείξεις ορατής καταπόνησης στο στοιχείο ενώ στην περίπτωση που η αλληλεπίδραση είναι ευεργετική, υπάρχει περίπτωση αυτό να μην αξιοποιηθεί ποτέ. Μια διαγνωστική δοκιμή είναι η πιο σίγουρη διαδικασία για τον καθορισμό της αιτίας της καταπόνησης ή του βαθμού αναβάθμισης της ικανότητας μεταφοράς φορτίου ενός στοιχείου μιας γέφυρας.

Ουσιαστικά δεν υπάρχει ακριβής διαφορά μεταξύ των δοκιμών απόκρισης και διάγνωσης αλλά η πρώτη περίπτωση χρησιμοποιείται για την εκπόνηση δοκιμής αποτίμησης μιας μεθόδου ανάλυσης ενώ η δεύτερη για τη διάγνωση της επιρροής της αλληλεπίδρασης μεταξύ των στοιχείων της γέφυρας. Κατόπιν πολλών δοκιμών, επιβεβαιώθηκε ότι οι δοκιμές διάγνωσης μπορούν να εφαρμοστούν καλύτερα για τον προσδιορισμό των αιτιών της καταπόνησης που ενδεχομένως υπάρχει σε κάποια γέφυρα λόγω της αλληλεπίδρασης μεταξύ των δομικών στοιχείων. Το αίτιο της καταπόνησης υπάρχει περίπτωση να εξαιρεθεί μέσω απλών διορθωτικών μέτρων.

1.2.3 Δοκιμές επαλήθευσης

Η δοκιμή επαλήθευσης πραγματοποιείται για να καθορίσει την ικανότητα της γέφυρας να αναλαμβάνει φορτία. Κατά τη δοκιμή αυτή, η κατασκευή υπόκειται σε εξαιρετικά υψηλά στατικά φορτία τα οποία προκαλούν μεγαλύτερες παραμορφώσεις και ένταση στη γέφυρα από αυτά που αναπτύσσονται μέσω της στατικής επιβολής των μέγιστων φορτίων λειτουργίας. Αξίζει ωστόσο να σημειωθεί ότι η υποβολή μιας γέφυρας σε ένα επαρκώς υψηλό φορτίο επαλήθευσης δεν αποτελεί πάντοτε επιβεβαίωση της φέρουσας ικανότητάς της. Είναι απαραίτητη η εκπόνηση αναλύσεων οι οποίες θα πρέπει να βασίζονται σε έγκυρη αιτιολόγηση των αιτιών για τις οποίες η γέφυρα έφερε τα φορτία που της επιβλήθηκαν και να καθορίζουν υπό ποιες συνθήκες πρέπει να θεωρείται αυτή η φέρουσα ικανότητα εξασφαλισμένη και για μελλοντικές καταπονήσεις.

Εξαιτίας των υψηλών φορτίων που επιβάλλονται σε μια γέφυρα κατά τις δοκιμές επαλήθευσης, υπάρχει πιθανότητα να προκληθούν μόνιμες βλάβες στη γέφυρα κατά τη δοκιμή. Ωστόσο, αν η δοκιμή εκτελείται προσεκτικά και μεθοδολογικά, η πιθανότητα πρόκλησης βλαβών είναι εξαιρετικά μικρή. Μια καλά σχεδιασμένη δοκιμή επαλήθευσης εκτελείται με σταδιακά αυξανόμενα φορτία, εξασφαλίζοντας με αυτό τον τρόπο ότι τα φορτία δεν θα λάβουν τέτοιες τιμές ώστε να ξεπεραστεί η γραμμική ελαστική συμπεριφορά του φορέα.

1.3 Μέθοδοι και Όργανα Παρακολούθησης Δομικής Κατάστασης Τεχνικών Έργων

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. Οι τοπογραφικές/γεωδαιτικές μέθοδοι περιλαμβάνουν συμβατικές-επίγειες, φωτογραμμετρικές και δορυφορικές μεθόδους. Μερικά από τα όργανα που χρησιμοποιούνται είναι τα συστήματα δορυφορικού εντοπισμού GNSS, οι γεωδαιτικοί σταθμοί αυτόματης αναγνώρισης και παρακολούθησης στόχου (*robotic total stations*), τα επίγεια συστήματα *radar* μικροκυματικής συμβολομετρίας, οι επίγειοι σαρωτές *laser* και τα συστήματα βιντεομετρίας.

Πρέπει να αναφερθεί, ότι στις μεθόδους πειραματικής μηχανικής τα όργανα που χρησιμοποιούνται εγκαθίστανται συνήθως μόνιμα στην κατασκευή και δίνουν συνεχώς μετρήσεις. Επιπλέον, μπορούν να προσδιορίσουν ικανοποιητικά τις συνιστώσες της δυναμικής συμπεριφοράς (συχνότητες ταλάντωσης) της κίνησης που παρουσιάζει μια κατασκευή, αλλά ορισμένα από αυτά (π.χ. επιταχυνσιόμετρα) μειονεκτούν στον προσδιορισμό του εύρους της ταλάντωσης και της μετατόπισης που προκύπτει από τη συνεχή φόρτιση της κατασκευής από διάφορους παράγοντες (π.χ. επίδραση του ανέμου, μεταβολές της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος).

Επιπλέον, με τις γεωδαιτικές μεθόδους και τα όργανα μέτρησης είναι δυνατόν να ελεγχθεί ένα τεχνικό έργο σχεδόν σε όλο το σύνολό του. Ως εκ τούτου, δίνουν μια σφαιρική εικόνα της υπό παρακολούθηση κατασκευής. Αντίθετα, οι μέθοδοι πειραματικής μηχανικής δίνουν συνεχόμενη πληροφορία (μετρήσεις) αλλά για συγκεκριμένη μικρή περιοχή παρακολούθησης. Επιπρόσθετα, οι τοπογραφικές μέθοδοι παρέχουν άμεσα το ζεύγος χρόνος-θέση σε συγκεκριμένο σύστημα αναφοράς για τα σημεία ελέγχου. Επομένως, η μετατόπιση, η ταχύτητα και η επιτάχυνση εξάγονται άμεσα χωρίς τη χρήση πολύπλοκων μαθηματικών υπολογισμών.

Συμπερασματικά, στις μετρήσεις που πραγματοποιούνται για την παρακολούθηση της συμπεριφοράς των τεχνικών έργων, πολλές φορές γίνεται προσπάθεια συνδυασμού

και των δύο μεθόδων μέτρησης, ώστε να επωφελείται κανείς των πλεονεκτημάτων και των δυνατοτήτων που προσφέρει η καθεμία.

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

- Η ταχύτητα συλλογής και επεξεργασίας των δεδομένων δεδομένου ότι όσο πιο γρήγορα πραγματοποιηθεί αυτή τόσο νωρίτερα θα διεξαχθούν τα αποτελέσματα της έρευνας και θα ληφθεί η απόφαση.
- Η πληρότητα των δεδομένων. Για το σχεδιασμό πολύπλοκων κατασκευών, η λήψη μη επαρκών μετρήσεων δημιουργεί κίνδυνο για εσφαλμένα συμπεράσματα.
- Η ποιότητα (ακρίβεια, αξιοπιστία) των δεδομένων. Ανάλογα, το αντικείμενο παρακολούθησης ορίζεται οι σχετικοί δείκτες.
- Η δυνατότητα παρακολούθησης μη προσβάσιμων περιοχών.
- Η ασφάλεια της μεθόδου. Κάθε μέθοδος πρέπει να είναι ασφαλής για τα συνεργεία που εκτελούν τις μετρήσεις, για τα συνεργεία συντήρησης και λειτουργίας της κατασκευής αλλά και για το κοινό το οποίο αυτή εξυπηρετεί.
- Δυνατότητα εκτέλεσης μετρήσεων οποιαδήποτε στιγμή και σε όλες τις επιθυμητές καιρικές συνθήκες.
- Το κόστος της μεθόδου καθώς λαμβάνονται υπόψη τα έξοδα που απαιτεί κάθε μέθοδος σε συνδυασμό με το πόσο αξιόλογα αποτελέσματα δίνει.

1.3.1 Μέθοδοι πειραματικής μηχανικής

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

1.3.1 α Επιταχυνσιόμετρα

Τα επιταχυνσιόμετρα (*accelerometers*) αποτελούν την πιο καθιερωμένη μέθοδο για την καταγραφή των κινήσεων μιας κατασκευής (Σχήμα 1-1). Είναι αισθητήρες και όργανα για τη μέτρηση, την απεικόνιση και την ανάλυση της επιτάχυνσης. Οι επιταχυνσιογράφοι διαχωρίζονται ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής τους αλλά η αρχή

λειτουργίας τους είναι κοινή: μια μάζα διεγείρεται από μια δύναμη και καταγράφεται η επιτάχυνσή της. Διαφέρουν, όμως, ως προς τον τρόπο με τον οποίο γίνεται η καταγραφή των επιταχύνσεων. Το στοιχείο αυτό επηρεάζει τα όρια λειτουργίας και το πεδίο εφαρμογής τους. Μερικά από τα είδη των επιταχυνσιογράφων είναι τα εξής:

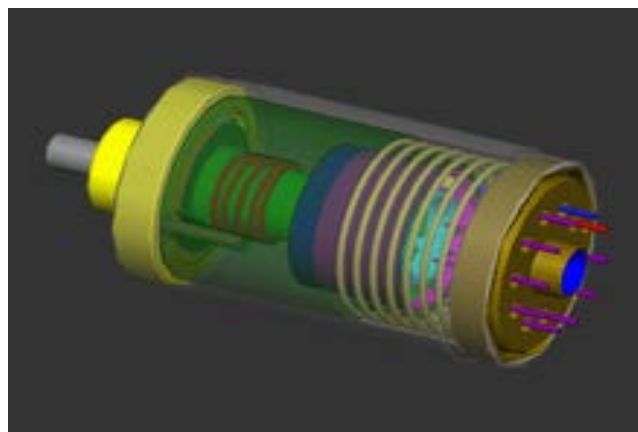
- ο πιεζοηλεκτρικός επιταχυνσιογράφος (*piezoelectric accelerometer*), ο οποίος λειτουργεί με βάση ένα κρύσταλλο ο οποίος όταν διεγείρεται από την ταλαντούμενη μάζα, πιέζεται και παράγει ηλεκτρικό ρεύμα τάσης ανάλογο της επιτάχυνσης διέγερσης.
- ο πιεζοωμικός επιταχυνσιογράφος (*piezoresistive accelerometer*),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

Λόγω της λειτουργίας του ο πιεζοηλεκτρικός επιταχυνσιογράφος μπορεί να καταγράψει επιταχύνσεις σχετικά υψηλών συχνοτήτων (έως 5000 Hz) και για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται για την μέτρηση των κυμάτων της διάδοσης του ήχου, στην αεροναυπηγική, στις δοκιμές μηχανών αλλά και ως σύστημα ελέγχου των κατασκευών. Αντίθετα, ο πιεζοωμικός μπορεί να καταγράψει και μικρότερες συχνότητες (της τάξης του 0.5 Hz) και γι αυτό χρησιμοποιείται και σε κρουστικές δοκιμές (π.χ. *crash test* αυτοκινήτων).

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

Η χρήση του επιταχυνσιόμετρου στην παρακολούθηση της δομικής κατάστασης των κατασκευών παρουσιάζει τα εξής μειονεκτήματα:

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



Σχήμα 1-1: Απεικόνιση ενός επιταχυνσιόμετρου
Figure 1-1: Presentation of an accelerometer
 (Πηγή: www.wikipedia.org)

1.3.1 β Συστήματα οπτικών ινών

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

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

Οι αισθητήρες οπτικών ινών χρησιμοποιούνται ευρέως στην παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας των τεχνικών έργων αλλά και σε μνημεία ιστορικής και πολιτιστικής κληρονομιάς γιατί μπορούν να τοποθετηθούν σε σημεία δύσκολης πρόσβασης, οποιουδήποτε δομήματος και σε οποιαδήποτε μετρητική διάταξη (Σχήμα 1-2). Βασικό χαρακτηριστικό είναι η αντοχή της οπτικής ίνας σε μηχανικές καταπονήσεις, καθώς και ότι είναι αδρανής σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία και στο νερό. Αυτό είναι το κύριο στοιχείο διαφοροποίησής της από τα συμβατικά όργανα δομικής παρακολούθησης.



Σχήμα 1-2: Παρακολούθηση της δομικής κατάστασης τεχνικού έργου με τη χρήση αισθητήρων οπτικών ινών
Figure 1-2: Structural health monitoring of engineering work with the use of fiber-optics sensors
(Πηγή: Εισαγωγή στην οπτοηλεκτρονική-αισθητήρες οπτικών ινών, Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Κρήτης)

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

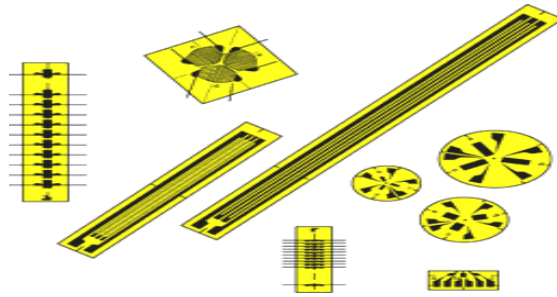
- Μεγάλη ακρίβεια προσδιορισμού της μετακίνησης ενός αντικειμένου της τάξης των μερικών χιλιοστών.

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

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

1.3.1 γ Επιμηκυνσιόμετρα

Τα επιμηκυνσιόμετρα (*strain gauges*) (Σχήμα 1-3) χρησιμοποιούνται για την μέτρηση των μετατοπίσεων σε συγκεκριμένα σημεία εύκαμπτων κατασκευών και γεφυρών, υπό την επίδραση διαφόρων φορτίσεων. Τα πιο γνωστά είναι εκείνα που είναι κατασκευασμένα από φύλλα αλουμινίου (*etched foil gauges*). Τα επιμηκυνσιόμετρα έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να τοποθετούνται «κολλημένα» πάνω στο σημείο ελέγχου της κατασκευής και όταν αυτό παραμορφώνεται-επιμηκύνεται, προκαλείται παραμόρφωση και του οργάνου, με αποτέλεσμα αυτό να μακραίνει και να λεπταίνει και έτσι να αυξάνεται και η ηλεκτρική του αντίσταση. Σε αντίθετη περίπτωση (συμπίεσης) η αντίστασή του μικραίνει. Αυτή η αλλαγή στην αντίσταση του οργάνου είναι ανάλογη με την παραμόρφωση στην επιφάνεια του σημείου ενδιαφέροντος στην κατασκευή, με αναλογία συνήθως 2:1.



Σχήμα 1-3: Διάφοροι τύποι επιμηκυνσιόμετρων
Figure 1-3: Different types of strain-gauges
 (Πηγή: <http://www.personal.dundee.ac.uk>)

1.3.1 δ Κλισίμετρα

Τα κλισίμετρα (*inclinometers*) (Σχήμα 1-4) είναι απλές διατάξεις ή όργανα που μετρούν γωνίες κλίσης. Μετρούν θετικές και αρνητικές κλίσεις. Κλισίμετρα που διαθέτουν εξαιρετικά ευαίσθητους αισθητήρες, έχουν ανάλυση της τάξης των 0.0001 deg. Η τελική ακρίβεια βέβαια που επιτυγχάνεται, εξαρτάται τόσο από το είδος του οργάνου όσο και από το εύρος της μετρούμενης γωνίας και ανάλογα με την περίπτωση μπορεί να περιοριστεί στις 0.01 deg.

Τα σύγχρονα κλισίμετρα υψηλής ακριβείας χρησιμοποιούνται για ταυτόχρονες μετρήσεις κλίσης, διεύθυνσης μετακίνησης και θερμοκρασίας βασιζόμενης σε οπτοηλεκτρονική μέθοδο. Χρησιμοποιούνται για μεγάλες κατασκευές και εφαρμογές παρακολούθησης κατασκευών όπως φράγματα, γέφυρες και ψηλά κτίρια και όπου απαιτούνται υψηλής ακριβείας πληροφορίες για την κλίση και την διεύθυνση των μετατοπίσεων. Τα χαρακτηριστικά των κλισιμέτρων αναλύονται διεξοδικά στο Κεφάλαιο 3.



Σχήμα 1-4: Το Nivel 210, της Leica Geosystems
Figure 1-4: The Nivel 210 by Leica Geosystems
 (Πηγή: www.leica-geosystems.com)

1.3.2 Τοπογραφικές μέθοδοι

Στην Ενότητα 1.3.1 αναφέρονται μέθοδοι πειραματικής μηχανικής που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της συμπεριφοράς των κατασκευών. Ωστόσο, έχουν αναπτυχθεί νέες μέθοδοι παρακολούθησης που βασίζονται στη χρήση γεωδαιτικών οργάνων. Τα πιο διαδεδομένα είναι τα συστήματα δορυφορικού εντοπισμού GNSS, οι γεωδαιτικοί σταθμοί αυτόματης αναγνώρισης και παρακολούθησης στόχου, το επίγειο σύστημα *radar* μικροκυματικής συμβολομετρίας και οι επίγειοι σαρωτές *laser*. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται επιγραμματικά οι αρχές λειτουργίας τους, οι ακρίβειες με τις οποίες λαμβάνουν μετρήσεις, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους όσον αφορά την παρακολούθηση δομικών κατασκευών.

1.3.2 α Συστήματα δορυφορικού εντοπισμού

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

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

Η Ευρωπαϊκή Ένωση αναπτύσσει το πρώτο δορυφορικό σύστημα εντοπισμού θέσης και πλοήγησης που σχεδιάστηκε για πολιτική χρήση, το οποίο εμπεριέχει το ήδη σε λειτουργία σύστημα EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*) και το σύστημα GALILEO που στα επόμενα λίγα χρόνια με την πλήρη λειτουργία

του θα παρέχει ποικίλες νέες υπηρεσίες εντοπισμού θέσης, πλοήγησης και χρονισμού ακριβείας. Παράλληλα, η Λαϊκή Δημοκρατία της Κίνας προχωράει από το 2010 στην επέκταση του τοπικού συστήματος BEIDOU, με την προοπτική να εξελιχθεί στο παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού COMPASS.

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

▪ Το Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσης

Το Παγκόσμιο Σύστημα Προσδιορισμού θέσης ευρύτερα γνωστό με τα αρχικά GPS (*Global Positioning System*) είναι ένα σύστημα πλοήγησης που στηρίζεται στη μετάδοση πληροφοριών από το δορυφόρο προς του επίγειους δέκτες. Υπάρχουν τεχνητοί δορυφόροι που τροφοδοτούνται με ηλιακή ενέργεια και κινούνται γύρω από τη γη σε σχεδόν κυκλική τροχιά σε ύψος περίπου 20000 km (Σχήμα 1-5). Οι πληροφορίες που μεταδίδονται περιλαμβάνουν και τη χρονική στιγμή μετάδοσης του σήματος που φτάνει στο δέκτη από τη θέση του δορυφόρου κάθε στιγμή. Το ρολόι του δέκτη συγχρονισμένο με το χρονόμετρο του δορυφόρου, προσδιορίζει την απόσταση (ψευδο-απόσταση) δέκτη-δορυφόρου. Εξαιτίας της αδυναμίας συγχρονισμού του χρονομέτρου του δέκτη με αυτά των δορυφόρων, η απόσταση που προσδιορίζεται δεν φέρει την απαιτούμενη ακρίβεια. Για την αντιμετώπιση αυτής της αδυναμίας απαιτούνται τουλάχιστον 4 δορυφόροι και ταυτόχρονη μέτρησή τους από το δέκτη προκειμένου να υπολογιστεί η θέση X, Y, Z ή φ, λ, h του δέκτη με ακρίβεια ως η τομή 4 σφαιρών, υπολογίζοντας και το εκάστοτε σφάλμα στο χρονόμετρο του δέκτη.



Σχήμα 1-5: Οι τροχιές των δορυφόρων του συστήματος GPS
Figure 1-5: GPS satellites constellation
(Πηγή: www.space.com/images)

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

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

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

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

Τα τελευταία χρόνια έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές μελέτες με χρήση του GPS στην παρακολούθηση κατασκευών που προκαλούνται από δυναμικά φορτία (π.χ. σεισμός, άνεμος κ.α.) αλλά και ημιστατικά φαινόμενα (π.χ. θερμοκρασιακές μεταβολές). Η λειτουργία του GPS στηρίζεται σε μετρήσεις της φάσης του φέροντος σήματος, το οποίο λαμβάνουν δυο επίγειοι δέκτες από τους ίδιους δορυφόρους του συστήματος. Ο ένας δέκτης (σταθμός αναφοράς) τοποθετείται σε σταθερό σημείο εκτός της

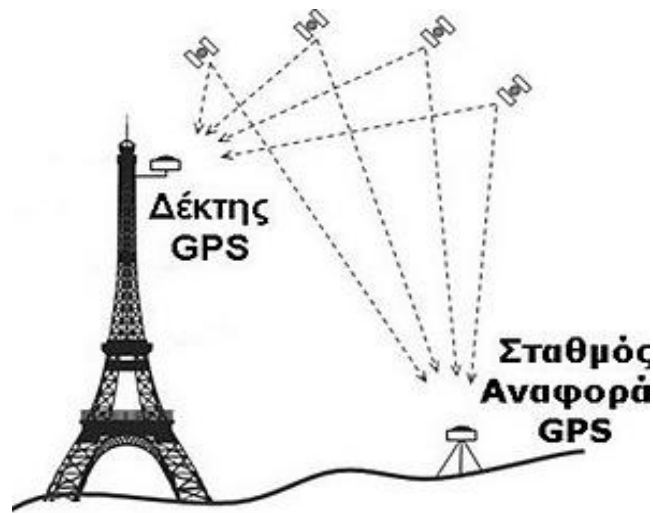
κατασκευής και ο δεύτερος (κινούμενος) σε σημείο ελέγχου της κατασκευής, χωρίς ωστόσο να απαιτείται οπτική επαφή μεταξύ τους (Σχήμα 1-6).

Τα βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι τα εξής:

- Υψηλή (20 Hz και σε ερευνητικό επίπεδο έως 100 Hz) συχνότητα καταγραφής έτσι ώστε να μπορεί να καλύψει και τις ιδιοσυχνότητες των κατασκευών.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάτω από οποιεσδήποτε καιρικές συνθήκες.
- Η διαδικασία των μετρήσεων είναι αρκετά απλή και δεν απαιτείται πολύς χρόνος προετοιμασίας.
- Μπορεί να συνεργαστεί με άλλα συστήματα προσδιορισμού θέσης (π.χ. αδρανειακά συστήματα) και με άλλες σύγχρονες εφαρμογές και συστήματα.
- Για τον προσδιορισμό θέσης δεν απαιτεί αμοιβαία ορατότητα μεταξύ του σταθερού σταθμού και του κινούμενου. Απαιτείται μόνο ορατότητα προς ικανοποιητικό αριθμό δορυφόρων (ανοικτός ορίζοντας).
- Παρέχει τη δυνατότητα καταγραφής δεδομένων καθ' όλη τη διάρκεια της μέρας και της νύχτας.
- Παρέχει καλή ακρίβεια εντοπισμού οριζοντιογραφικά.

Τα κυριότερα μειονεκτήματα της μεθόδου συνοψίζονται στα εξής:

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



Σχήμα 1-6: Σχηματική αρχή λειτουργίας του συστήματος GPS στην παρακολούθηση κατασκευών
Figure 1-6: Schematic operating principle of the GPS system for structural monitoring
 (Πηγή: Γκίκας-Δασκαλάκης, 2008)

1.3.2 β Γεωδαιτικοί σταθμοί αυτόματης αναγνώρισης και παρακολούθησης στόχου

▪ Αρχές λειτουργίας

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

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

Πιο συγκεκριμένα, η λειτουργία του RTS στηρίζεται στο σερβοκινητήρα και σε ένα μικρο-επεξεργαστή που διαθέτει και του επιτρέπουν να πραγματοποιεί είτε προγραμματισμένες σκοπεύσεις, είτε παρακολούθηση και μέτρηση των συντεταγμένων του κινητού στόχου. Το όργανο εκπέμπει μια ακτίνα *laser*, αυτή

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

▪ Πηγές σφαλμάτων

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

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

▪ Αξιολόγηση της μεθόδου μέτρησης με ρομποτικούς γεωδαιτικούς σταθμούς

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

- Το RTS είναι κατάλληλο για την ακριβή παρακολούθηση ταλαντώσεων και δυναμικών κινήσεων, δεδομένου ότι μπορεί να καταγράψει με ακρίβεια το εύρος ταλάντωσης ακόμα και για μικρές ταλαντώσεις.
- Μπορεί να προσδιορίσει με ακρίβεια την συχνότητα διέγερσης για χαμηλόσυχνες ταλαντώσεις. Για πιο υψηλόσυχνες κινήσεις το RTS απαιτεί κατάλληλο λογισμικό και άλλη διάταξη.

- Υπάρχει δυνατότητα βελτίωσης των καταγραφών με την τοποθέτηση του RTS σε κατάλληλη απόσταση έτσι ώστε η κίνηση του σημείου παρακολούθησης να είναι ακριβής ακόμα και όταν η ταχύτητα και το εύρος της ταλάντωσης είναι μεγάλα.

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

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

1.3.2 γ Επίγειο σύστημα *radar* μικροκυματικής συμβολομετρίας

Το επίγειο σύστημα *radar* συμβολομετρίας (*Ground-based microwave radar interferometry system*) δημιουργήθηκε από την εταιρία *Ingegneria Dei Sistemi* ή IDS και επιτρέπει την εξ αποστάσεως παρακολούθηση των μετακινήσεων των τμημάτων του εδάφους (κατολισθήσεις, κλίσεις, τα ηφαιίστεια, οι παγετώνες κ.α.) και των κατασκευών (φράγματα, γέφυρες, πύργοι, κτίρια κ.α.) με υψηλή ακρίβεια.

Η τεχνολογία *Image By Interferometric Survey* ή IBIS 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. Όσον αφορά τη στατική παρακολούθηση πραγματοποιεί ελέγχους των φορτίων στις κατασκευές και ελέγχει για τυχόν κίνδυνο αστοχίας. Κατά τη δυναμική παρακολούθηση προσδιορίζει τη συμπεριφορά των κατασκευών σε πραγματικό χρόνο, μετράει το φάσμα συχνοτήτων ταλάντωσης, την επιτάχυνση και τη μετατόπιση σημείων της κατασκευής. Να σημειωθεί πως μετράει από απόσταση έως 500 m, με συχνότητα δειγματοληψίας έως 200 Hz, ημέρα και νύχτα και σε οποιοδήποτε καιρικές συνθήκες (Σχήμα 1-7).



Σχήμα 1-7: Απεικόνιση IBIS-S και η χρήση του στην παρακολούθηση κατασκευών
Figure 1-7: View of IBIS-S and its use in structural monitoring
(Πηγή: www.idscompany.it)

▪ **Τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά**

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

- Μέγιστη ανάλυση απόστασης: 0.50 m
- Ελάχιστη ανάλυση απόστασης: 0.75 m
- Μέγιστη συχνότητα δειγματοληψίας: 200 Hz
- Μέγιστη απόσταση λειτουργίας: εξαρτάται από τη συχνότητα δειγματοληψίας και την ανάλυση απόστασης. Φτάνει έως 500 m για δυναμική κατάσταση λειτουργίας.
- Τυπική ακρίβεια μέτρησης μετατοπίσεων στην κατεύθυνση προβολής: 0.1 mm

▪ **Αρχές λειτουργίας του IBIS-S**

Η λειτουργία του IBIS-S στηρίζεται στις ακόλουθες τεχνικές:

i. Συμβολομετρία (*interferometry*)

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

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

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

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

$$d = \frac{\lambda}{4\pi} \Delta\varphi \quad (1.1)$$

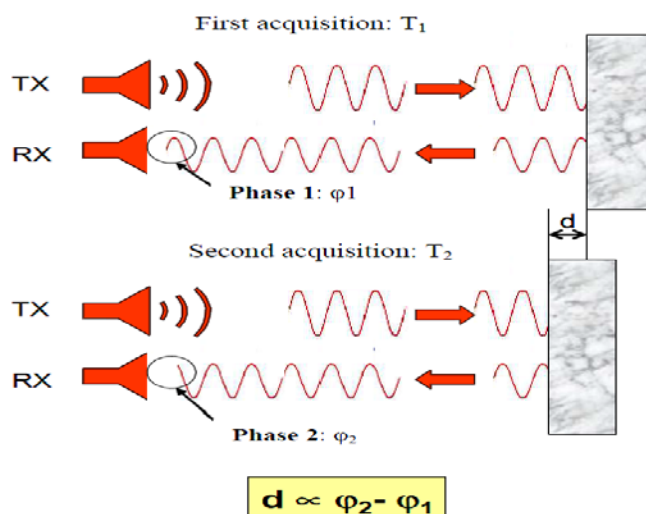
όπου:

d : ακτινική μετατόπιση

λ : μήκος κύματος

$\Delta\varphi$: διαφορά φάσης

Το Σχήμα 1-8 εξηγεί την αρχή λειτουργίας της τεχνικής της συμβολομετρίας.



Σχήμα 1-8: Η τεχνική της συμβολομετρίας
Figure 1-8: The interferometric technique
 (Πηγή: IBIS-S controller user manual, IDS Company, 2009)

Το IBIS-S χρησιμοποιεί τη συμβολομετρία για να μετρήσει μετακινήσεις κατασκευών στις οποίες προσπίπτει η ηλεκτρομαγνητική δέσμη που εκπέμπει η κεραία: το IBIS-S εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικά κύματα καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων ανά τακτά διαστήματα και επεξεργάζεται τις πληροφορίες φάσης για να εντοπίσει τυχόν μετατοπίσεις που συμβαίνουν μεταξύ μιας εκπομπής και της επόμενης.

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

$$dp = d \sin(\alpha) \quad (1.2)$$

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

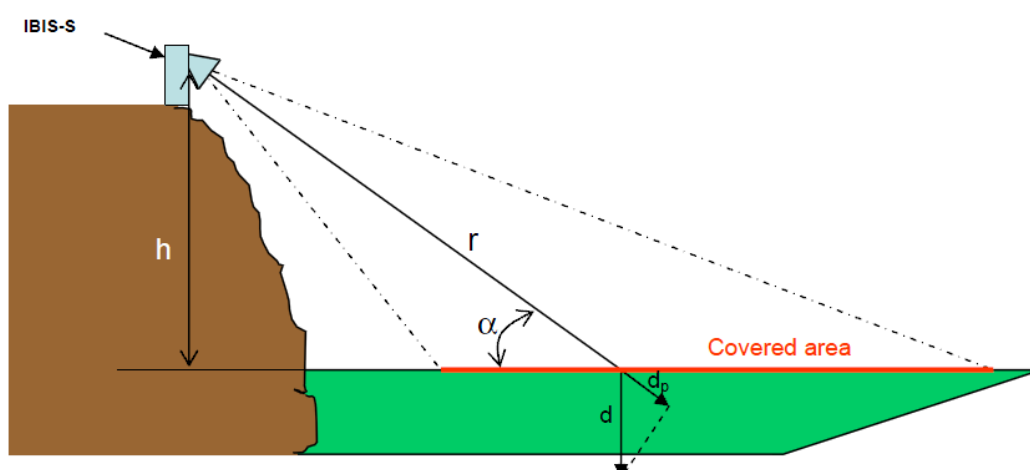
$$d = dp \frac{r}{h} \quad (1.3)$$

d : προβαλλόμενη μετατόπιση

dp : ακτινική μετατόπιση

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

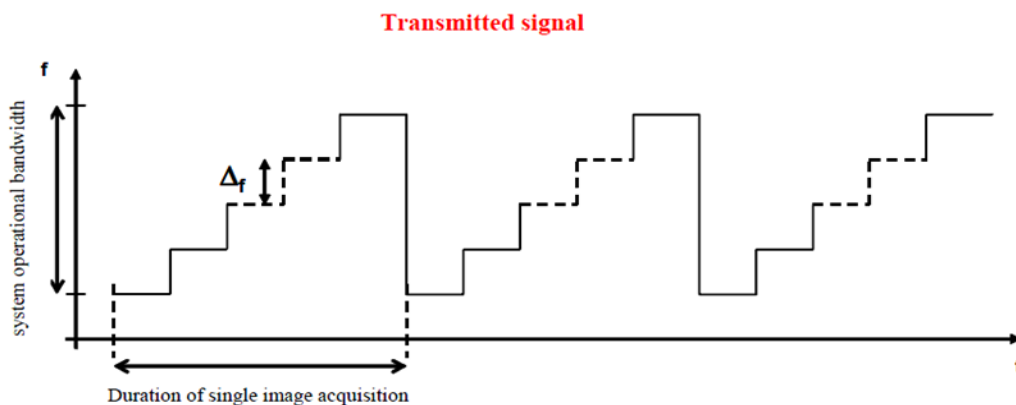
h : κάθετη απόσταση του οργάνου από το αντικείμενο μέτρησης



Σχήμα 1-9: Ακτινική μετατόπιση και προβαλλόμενη μετατόπιση
Figure 1-9: Radial displacement and projected displacement
 (Πηγή: IBIS-S controller user manual, IDS Company, 2009)

ii. SF-CW (Stepped Frequency-Continuous Wave)- βαθμωτή συχνότητα-συνεχές κύμα

Το πιο σημαντικό εξάρτημα του IBIS-S είναι ο ηλεκτρομαγνητικός αισθητήρας που διαθέτει του οποίου η λειτουργία στηρίζεται στην τεχνική SF-CW. Με βάση την τεχνική αυτή εντοπίζεται η θέση διαφορετικών στόχων κατά μήκος της διεύθυνσης σκόπευσης του *radar*. Η συγκεκριμένη τεχνική επιτρέπει στο IBIS-S να λάβει μονοδιάστατη εικόνα του αντικειμένου ενδιαφέροντος με μεγάλη ανάλυση απόστασης (δηλαδή, την ελάχιστη απόσταση που μπορεί να ανιχνευτεί κατά μήκος της γραμμής σκόπευσης του *radar*) χάρη στη μετάδοση μιας σειράς μεγάλης διάρκειας ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (*Continuous Wave*) σε διαφορετικές συχνότητες (*Stepped Frequency*). Συγκεκριμένα, το *radar* εκπέμπει μεγάλο αριθμό ηλεκτρομαγνητικών παλμών, των οποίων η συχνότητα αυξάνεται από παλμό σε παλμό με μια σταθερή αύξηση Δf (Σχήμα 1-10).



Σχήμα 1-10: Διάγραμμα εκπεμπόμενου σήματος με την πάροδο του χρόνου
Figure 1-10: Diagram of the signal transmitted over time
 (Πηγή: IBIS-S controller user manual, IDS Company, 2009)

Με τη συγκεκριμένη τεχνική το IBIS-S μπορεί να φτάσει την ανάλυση απόστασης των 0.75 m ανεξάρτητα από τη μέγιστη μετρήσιμη απόσταση. Η ανάλυση εικόνας στη διεύθυνση της υπό μελέτη κατασκευής εξαρτάται από την οπτική γωνία της κατασκευής και ακολουθεί την απλή γεωμετρική προβολή (Σχήμα 1-11):

$$\Delta x = \frac{\Delta r}{\cos(a)} = \frac{\Delta r R}{X} \quad (1.4)$$

όπου, $\Delta r = \frac{c}{2B} \quad (1.5)$

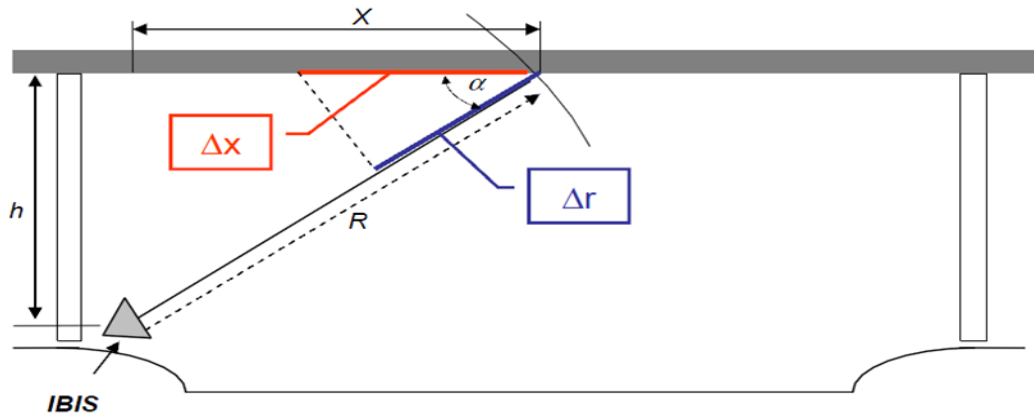
c : ταχύτητα του φωτός

B : εύρος ζώνης

Δr : ανάλυση απόστασης

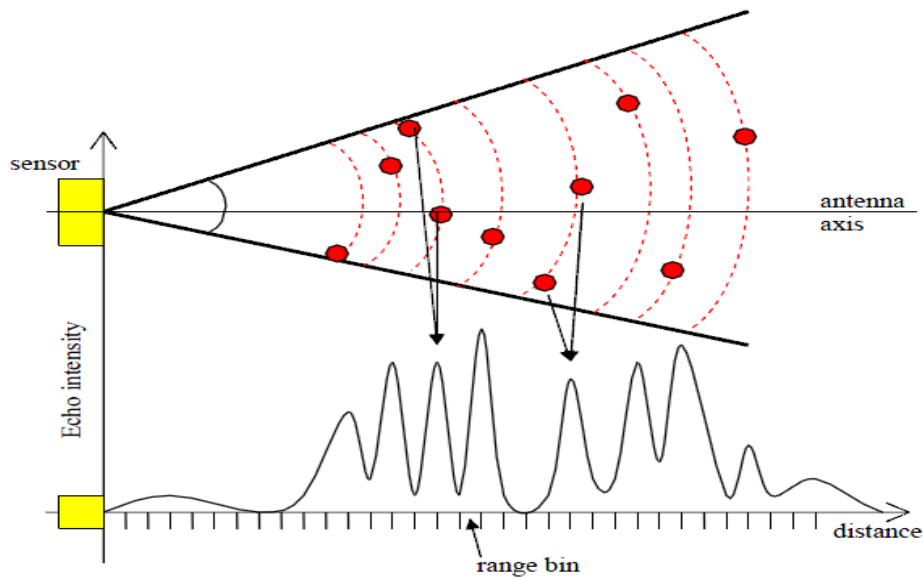
R : ακτινική απόσταση από την κεραία του οργάνου έως το παρατηρούμενο σημείο

Δx : προβαλλόμενη μετατόπιση



Σχήμα 1-11: Ανάλυση απόστασης και προβαλλόμενη ανάλυση απόστασης
Figure 1-11: Range resolution vs ground range resolution
(Πηγή: IBIS-S controller user manual, IDS Company, 2009)

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



Σχήμα 1-12: Προφίλ του φάσματος (μονοδιάστατη εικόνα)
Figure 1-12: An in-range profile (one dimensional image)
(Πηγή: IBIS-S controller user manual, IDS Company, 2009)

Στην λειτουργία S, η τεχνική SF-CW επιτρέπει στο σύστημα να λάβει μονοδιάστατη εικόνα των σημείων του αντικειμένου, όπως στο Σχήμα 1-12 . Η απόκριση που προκύπτει από το IBIS-S για κάθε *range bin* περιέχει τις εξής πληροφορίες:

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

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

▪ **Αξιολόγηση της μεθόδου μέτρησης με το επίγειο σύστημα *radar* μικροκυματικής συμβολομετρίας**

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

- Παρακολουθεί την ταλάντωση μιας κατασκευής εξ' αποστάσεως χωρίς να απαιτείται πρόσβαση σε αυτή.
- Ευρεία περιοχή παρακολούθησης. Ενώ άλλοι αισθητήρες μετρούν τη μετατόπιση ενός επιλεγμένου σημείου κάθε φορά, το IBIS-S μετρά τις μετατοπίσεις πολλών σημείων ταυτόχρονα σε πραγματικό χρόνο.
- Ανάλυση που αγγίζει τα 0.75 m και η οποία επιτρέπει στο IBIS-S να ανιχνεύσει τη μετατόπιση μεγάλου αριθμού σημείων μιας κατασκευής με μια απλή στόχευση.
- Συχνότητα δειγματοληψίας έως 200 Hz.
- Απ' ευθείας μέτρηση μετακινήσεων σε πραγματικό χρόνο. Το IBIS-S μπορεί να επεξεργαστεί δεδομένα και να εμφανίσει τη μετακίνηση ενός σημείου της κατασκευής που θα επιλεχτεί σε πραγματικό χρόνο. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιείται και στην παρακολούθηση κατασκευών υπό διακινδύνευση δεδομένου ότι παράγει σήματα κινδύνου σε περίπτωση ανίχνευσης μετατοπίσεων εκτός προδιαγεγραμμένων ορίων.
- Παρουσιάζει ακρίβεια μετακινήσεων έως 1/10 mm.
- Η εγκατάσταση του απαιτεί περιορισμένο χρόνο.

- Μπορεί να λάβει μετρήσεις όλη τη διάρκεια της μέρας και κάτω από οποιεσδήποτε καιρικές συνθήκες.
- Προσφέρει τη δυνατότητα μέτρησης σε μη προσβάσιμες ή ψηλές κατασκευές στις οποίες δεν είναι εφικτό να γίνουν μετρήσεις που απαιτούν πρόσβαση.

Τα βασικά μειονεκτήματα του είναι:

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

1.3.2 δ Επίγειοι σαρωτές *laser*

▪ Αρχές λειτουργίας

Οι τρισδιάστατοι σαρωτές *laser* (*Terrestrial Laser Scanner*) (Σχήμα 1-13) είναι ένα είδος οργάνων για την παρακολούθηση διάφορων τεχνικών έργων. Ουσιαστικά, προσδιορίζουν τις θέσεις σημείων σε τρεις διαστάσεις ως προς ένα τοπικό σύστημα αναφοράς, μετρώντας την απόσταση, την κατακόρυφη και την οριζόντια γωνία προς αυτά. Όλα τα όργανα αυτής της κατηγορίας, εκτός από τις πολικές συντεταγμένες, μετρούν και την ανακλαστικότητα του κάθε σημείου, ενώ έχουν τη δυνατότητα και της λήψης ψηφιακών φωτογραφιών της περιοχής ή του αντικειμένου που αποτυπώνεται. Τα δεδομένα συλλέγονται ως ομοιόμορφα κατανεμημένα 3D έγχρωμα (RGB) ή *gray-scaled* (ανάλογα με την ένταση του ανακλώμενου σήματος) σημεία με την επιθυμητή πυκνότητα (ανάλυση), το σύνολο των οποίων αποτελεί ένα νέφος σημείων (*point cloud*). Το πλήθος των σημείων που λαμβάνονται σε μία σάρωση εξαρτάται από τη γωνιακή ανάλυση του οργάνου, η οποία είναι συνάρτηση του γωνιακού βήματος των κινητήρων που περιστρέφουν τη μετρητική κεφαλή γύρω από τον οριζόντιο και τον κατακόρυφο άξονα, καθώς και από την ανάλυση του δίσκου κώδικα *Gray* που έχει τοποθετηθεί στον κάθε άξονα. Ο αριθμός των σημείων που μπορεί να μετρήσει ένας σύγχρονος σαρωτής ξεκινά από μερικές εκατοντάδες χιλιάδες και φτάνει έως μερικά εκατομμύρια σημεία ανά στάση σάρωσης.

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



Σχήμα 1-13: Επίγειος σαρωτής *laser*
Figure 1-13: Terrestrial laser scanner
(Πηγή: <http://www.totalsurveys.co.uk/>)

▪ Κατηγορίες επίγειων σαρωτών *laser*

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

1. *Phased-based laser scanner:*

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

2. *Time of flight laser scanner:*

Η βασική αρχή της μεθόδου είναι η μέτρηση της διαφοράς χρόνου μεταξύ του εκπεμπόμενου και του λαμβανόμενου σήματος και βάσει της ταχύτητας φωτός, ο υπολογισμός της απόστασης. Ο υπολογισμός της διαφοράς χρόνου μεταξύ του εκπεμπόμενου και λαμβανόμενου σήματος γίνεται με διάφορες τεχνικές, με τις σημαντικότερες να είναι η μετάδοση του παλμού και η διαμόρφωση του φέροντος

κύματος. Οι σαρωτές που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία χρησιμοποιούνται συνήθως για τη γεωμετρική τεκμηρίωση των κατασκευών.

▪ **Ακρίβεια**

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

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

2 ΓΕΝΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΓΕΦΥΡΩΝ

Στο Κεφάλαιο 2, πραγματοποιείται μια γενική επισκόπηση των γεφυρών. Δίνεται ο ορισμός της γέφυρας και τα υλικά κατασκευής της, πραγματοποιείται κατηγοριοποίηση των γεφυρών με βάση ορισμένα κριτήρια και δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στα συστήματα που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητάς τους. Τα συστήματα αυτά περιλαμβάνουν τον απλό οπτικό έλεγχο, τον έλεγχο με όργανα και τον έλεγχο με έξυπνα συστήματα παρακολούθησης.

2.1 Ορισμός της Γέφυρας και Υλικά Κατασκευής

Με τον όρο γέφυρα νοείται κάθε τεχνικό έργο που εκτείνεται σε όλο το πλάτος μιας οδού, όταν διακόπτεται για ένα διάστημα η συνέχεια του αναχώματος, είτε εξαιτίας των εμποδίων που δεν είναι δυνατόν να εξαλειφθούν, όπως π.χ. υδάτινα ρεύματα ή χαράδρες ή οδοί που ήδη υπάρχουν και πρέπει να μείνουν ανοιχτοί, είτε εξαιτίας της μεγάλης διαφοράς στάθμης μεταξύ τους επιπέδου της οδού που θα κατασκευαστεί και του εδάφους, οπότε προκύπτει πολύ μεγάλο ύψος επιχώματος. Επομένως, αντικαθίσταται το επίχωμα της οδού με τεχνικά έργα υπερύψωσης, που παίρνουν συγκεκριμένες ονομασίες ανάλογα είτε με τον προορισμό είτε με το μέγεθός τους. Όλα αυτά τα τεχνικά έργα μπορούν να αναχθούν σε ένα μοναδικό τύπο τη γέφυρα και η οποία μπορεί να φέρει ένα ή περισσότερα ανοίγματα.

Τα υλικά που μπορεί να χρησιμοποιηθούν τις κατατάσσουν σε γέφυρες από ξύλο, από τοιχοποιία, από σίδηρο, από οπλισμένο σκυρόδεμα ή σύμμικτες κατασκευές. Σήμερα, οι ξύλινες κατασκευές δε χρησιμοποιούνται, παρά για προσωρινά έργα μικρού ανοίγματος ή σε περιοχές με πολλά δάση. Είναι κατασκευή οικονομική, εύκολη, αλλά χρειάζεται συνεχή συντήρηση και είναι εύφλεκτη.

2.2 Κατηγοριοποίηση Γεφυρών

Οι γέφυρες διακρίνονται σε κατηγορίες ανάλογα με ορισμένα κριτήρια, όπως:

- Ανάλογα με τη χρήση του φορέα, σε "οδικές", "σιδηροδρομικές", "πεζών" και "πεζών και ποδηλάτων", "υδατογέφυρες" κ.α

- Αναφορικά με το είδος του φορέα σε "γέφυρες μορφής δοκού", "δικτυωτές γέφυρες", "ορθοτροπικές γέφυρες", "πλαισιωτές γέφυρες", "τοξοτές γέφυρες", "κρεμαστές γέφυρες", "καλωδιωτές γέφυρες"
- Από το υλικό κατασκευής, σε "ξύλινες" (οι αρχαιότερες), "πέτρινες" (αμυδωτές ή τοξωτές), "σχοινένιες", "μεταλλικές", "αλουμιένιες" "οπλισμένου ή προεντεταμένου σκυροδέματος" ή και "σύμμικτες" (δηλαδή, που συνδυάζουν υλικά όπως μέταλλο, σκυρόδεμα, ξύλο ή τοιχοποιία σε οποιονδήποτε συνδυασμό μεταξύ τους)
- Από τον τρόπο έδρασής τους, που είναι και ο σημαντικότερος λόγος κατάταξης, σε "κινητές" και σε "σταθερές" ή "σταθερώς εδραζόμενες"
- Ανάλογα με το ελεύθερο άνοιγμά τους σε "μικρών ανοιγμάτων", "μεσαίων ανοιγμάτων", "μεγάλων ανοιγμάτων"

Κρίνεται σκόπιμο να αναλυθούν μερικά από τα παραπάνω είδη γεφυρών με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά.

▪ **Γέφυρα σε ευθείες δοκούς**

Σε αυτού του είδους τις γέφυρες το βάρος τους κατευθύνεται προς τα βάθρα.. Δύο βάθρα και μια δοκός αποτελούν την απλούστερη μορφή γέφυρας. Ο τύπος αυτός είναι ο πιο συνηθής για το λόγο ότι η κατασκευή είναι σχετικά απλή. 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 μέτρα. Η μεγαλύτερη γέφυρα σε δοκούς του κόσμου είναι η *Lake Pontchartrain Causeway* στη νότια Λουιζιάνα στις Ηνωμένες Πολιτείες, μήκους 38.35 χιλιόμετρα, με επιμέρους ανοίγματα 17 μέτρων (Σχήμα 2-1). Αυτός ο τύπος γεφυρών είναι πολύ διαδεδομένος στο σιδηροδρομικό δίκτυο της Ελλάδας.



Σχήμα 2-1: Γέφυρα *Lake Pontchartrain Causeway*, Νότια Λουιζιάνα, Νέα Ορλεάνη
Figure 2-1: Lake Pontchartrain Causeway, South Louisiana, New Orleans
(Πηγή: <http://www.volkert.com/>)

▪ Θολωτές γέφυρες

Οι θολωτές γέφυρες αποτελούνται από ένα ή περισσότερα τόξα, όπου το βάρος τους διευθύνεται λοξά προς τα έξω. Τα τόξα που καταλήγουν στις όχθες λέγονται ακραία, ενώ αυτά που είναι στη μέση λέγονται κεντρικά. Η απόσταση μεταξύ των στηρίξεων του τόξου λέγεται άνοιγμα. Τα βάθρα στηρίζονται σε θεμέλια που αποτελούνται από μεγάλους τσιμεντόλιθους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα θολωτής γέφυρας αποτελεί η γέφυρα του Καρόλου που βρίσκεται στον ποταμό Μολδάβα στην Πράγα. Κύριο υλικό κατασκευής της είναι η αμμόπετρα Βοημίας και έχει συνολικό μήκος 515.8 m (Σχήμα 2-2).



Σχήμα 2-2: Γέφυρα του Καρόλου, Πράγα
Figure 2-2: Charles bridge, Prague
(Πηγή: <http://www.northwestladybug.com/>)

▪ Τοξωτές γέφυρες

Οι τοξωτές γέφυρες έχουν στηρίγματα σε κάθε άκρο. Το βάρος της γέφυρας μεταφέρεται και ωθεί τα βάθρα σε κάθε πλευρά. Στα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα και συγκεκριμένα στο Ντουμπάι αναμένεται να ολοκληρωθεί η κατασκευή της *Sheikh Rashid bin Saeed*

Crossing, η οποία είναι η μεγαλύτερη τοξωτή γέφυρα του κόσμου, με κύριο άνοιγμα 667 m (Σχήμα 2-3).



Σχήμα 2-3: Προσομοίωση Γέφυρας “*Sheikh Rashid bin Saeed Crossing*”, Ντουμπάι
Figure 2-3: Simulation of bridge “*Sheikh Rashid bin Saeed Crossing*”, Dubai
(Πηγή: <http://tourmet.com/>)

▪ Κρεμαστές γέφυρες

Στις κρεμαστές γέφυρες το βάρος του διευθύνεται λοξά προς τα μέσα. Ο τύπος αυτός χρησιμοποιείται για τα μεγαλύτερα ανοίγματα. Σε αυτόν τον τύπο γέφυρας τα καλώδια σηκώνουν το βάρος του καταστρώματος κάθετα ως προς το κατάστρωμα. Οι πρώτες γέφυρες έγιναν από σχοινιά ή κλαδιά από μπαμπού. Στις σύγχρονες γέφυρες, τα καλώδια κρέμονται από τους πύργους που είναι συνημμένα σε κιβώτια ή φρεάτια. Τα κιβώτια ή φρεάτια τοποθετούνται βαθιά στο πάτωμα μιας λίμνης ή του ποταμού. Η μεγαλύτερη κρεμαστή γέφυρα του κόσμου που ενώνει την πόλη *Kobe* της Ιαπωνίας με το νησί *Awaji* είναι η γέφυρα *Akashi Kaikyo* (Σχήμα 2-4).



Σχήμα 2-4: Γέφυρα *Akashi Kaikyo*, Ιαπωνία
Figure 2-4: Akashi Kaikyo bridge, Japan
(Πηγή: <http://wallcapturehd.com/>)

▪ Καλωδιωτές γέφυρες

Στις καλωδιωτές γέφυρες η ισορροπία της κατασκευής τους βασίζεται σε κάθε πυλώνα χωριστά. Οι καλωδιωτές γέφυρες μπορούν κάλλιστα να έχουν έναν, δύο ή περισσότερους πυλώνες. Ο τύπος αυτός αποτελείται από αλυσίδες και συρματόσχοινα

τα οποία κρέμονται από την κορυφή υψηλών πυλώνων και συνδέονται από το αντίθετο άκρο με ισχυρά συστήματα αγκύρωσης. Αυτές οι γέφυρες αποδείχτηκαν ιδανικές για μεγαλύτερες αποστάσεις, τόσο τεχνικά όσο και οικονομικά. Σε μια καλωδιωτή γέφυρα, απαιτείται λιγότερο καλώδιο και οι πύργοι που κατέχουν τα καλώδια είναι αναλογικά μικρότεροι. Μια από τις πιο γνωστές γέφυρες αυτού του τύπου είναι η γέφυρα Ρίου-Αντιρρίου στην Πάτρα που έχει 4 πυλώνες, η απόσταση μεταξύ των πυλώνων είναι 560 m και είναι μια από τις μεγαλύτερες καλωδιωτές γέφυρες στον κόσμο (Σχήμα 2-5).



Σχήμα 2-5: Γέφυρα Ρίου-Αντιρρίου, Πάτρα, Ελλάδα
Figure 2-5: Rio Antirio bridge, Patra, Greece
(Πηγή: <http://www.gefyra.gr/>)

▪ Κινητές γέφυρες

Μια κινητή γέφυρα είναι μια κανονική γέφυρα για πεζούς και αυτοκίνητα που σηκώνεται ή ανοίγει για να επιτρέψει τη διέλευση (συνήθως) μικρών ή και μεγάλων πλοίων. Ένα πλεονέκτημα της κατασκευής κινητών γεφυρών είναι το χαμηλό κόστος. Το κύριο μειονέκτημα της όμως είναι ότι η κυκλοφορία στη γέφυρα πρέπει να διακόπτεται όποτε αυτή ανοίγει για να περάσει κάποιο πλοίο. Μια από τις πιο εντυπωσιακές κινητές γέφυρες είναι η *Gateshead Millenium Bridge* που είναι μια γέφυρα για πεζούς και ποδηλάτες που εκτείνεται στον ποταμό Τάιν στην Αγγλία (Σχήμα 2-6).



Σχήμα 2-6: Γέφυρα *Gateshead Millenium*, Αγγλία
Figure 2-6: Gateshead Millenium Bridge, England
(Πηγή: <http://www.mimoo.eu/>)

2.3 Συστήματα Παρακολούθησης Γεφυρών

Είναι κατανοητό ότι οι γέφυρες αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα τεχνικά έργα για κάθε χώρα. Ωστόσο, κάθε τεχνικό έργο αποκτά φθορές με την πάροδο του χρόνου και ως εκ τούτου μειώνεται σημαντικά ο χρόνος ζωής του και το επίπεδο εξυπηρέτησής του. Η φθορά με το χρόνο οφείλεται σε διάφορους παράγοντες όπως η γήρανση των υλικών κατασκευής, επιδράσεις περιβαλλοντικών συνθηκών (πχ διάβρωση), αύξηση του φόρτου κυκλοφορίας, εκτεταμένη χρήση, ανεπαρκής συντήρηση ή ακόμη και ατέλειες της αρχικής μελέτης και λάθη στη διάρκεια της κατασκευής. Προκειμένου να αντιμετωπιστούν έγκαιρα τα προαναφερθέντα και να γίνουν οι απαραίτητες διορθωτικές κινήσεις (συντήρηση, επισκευή) απαιτούνται συστήματα για την παρακολούθηση της δομικής κατάστασης των γεφυρών τα οποία είναι γνωστά και ως *Bridge Monitoring Systems* (BMS). Στο Κεφάλαιο 1 αναλύονται διάφορες μέθοδοι και όργανα για την παρακολούθηση της δομικής κατάστασης διάφορων τεχνικών έργων (ΠΔΚ). Ωστόσο, οι γέφυρες αποτελούν μια ιδιαίτερη κατηγορία και αξίζει να αναλυθούν εκτενέστερα ορισμένες μέθοδοι ελέγχου και παρακολούθησής τους.

Υπάρχουν διάφορες τεχνικές παρακολούθησης της δομικής κατάστασης των γεφυρών. Ένας είναι ο οπτικός έλεγχος μέσω επιφανειακής επιθεώρησης των διαφόρων στοιχείων του δομήματος και συμπλήρωσης κατάλληλων ερωτηματολογίων τα οποία μέσω βαθμολογίας θα οδηγούν στην αποτίμηση της κατάστασης της κατασκευής. Μια άλλη τεχνική είναι ο ενόργανος οπτικός έλεγχος, ο οποίος είναι περισσότερο λεπτομερής και ακριβής από τον απλό οπτικό έλεγχο. Η διαφορά αυτής της τεχνικής είναι ότι οι εκτιμήσεις της κατάστασης των διαφόρων μελών της κατασκευής τεκμηριώνονται μέσω πειραματικών στοιχείων. Τέλος, υπάρχει και ένας τρίτος τρόπος παρακολούθησης γεφυρών ο οποίος στηρίζεται σε σύγχρονα τεχνολογικά μέσα γνωστά ως *‘έξυπνα συστήματα παρακολούθησης’* και κατάλληλη επεξεργασία των μετρητικών δεδομένων μέσα από προσομοιώματα σε υπολογιστές.

Τα στοιχεία που προκύπτουν από τους προαναφερθέντες ελέγχους συγκεντρώνονται σε βάσεις δεδομένων, οι οποίες μετά από κατάλληλη επεξεργασία καταλήγουν στην τελική εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας του δομήματος. Οι συγκεκριμένες βάσεις

δεδομένων συγκεντρώνουν και τις πιθανές μορφές που μπορούν να παρουσιαστούν σε μια κατασκευή και τους τρόπους συντήρησης που μπορούν να εφαρμοστούν, ανάλογα με τη βλάβη που έχει προκύψει. Κρίνεται σκόπιμο να αναλυθούν εκτενέστερα οι τρεις παραπάνω μέθοδοι ελέγχου και παρακολούθησης των γεφυρών.

2.3.1 Οπτικός έλεγχος

Ο οπτικός έλεγχος εφαρμόζεται από έμπειρους μηχανικούς οι οποίοι, μέσα από επιφανειακές επιθεωρήσεις στα διάφορα τμήματα της γέφυρας, εντοπίζουν πιθανές βλάβες ή φθορές που έχει υποστεί. Για να περιορίζεται ο παράγοντας της υποκειμενικότητας και της εσφαλμένης κρίσης του ελεγκτή, η διάγνωση των βλαβών συνοδεύεται από φωτογραφίες, λήψη *video* και ειδικά σχεδιασμένα έντυπα/ερωτηματολόγια τα οποία κατατάσσουν το κτίριο σε συγκεκριμένη κατηγορία ανάλογα με τις βλάβες που παρουσιάστηκαν. Κατόπιν βαθμολόγησης των τμημάτων που εξετάστηκαν γίνεται μια αποτίμηση της κατάστασης της γέφυρας και μια εκτίμηση του κατά πόσον απαιτούνται εργασίες συντήρησης ή και επισκευής των τμημάτων που έχουν υποστεί βλάβη. Ο συγκεκριμένος έλεγχος στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό στην εμπειρία και την κρίση του μηχανικού και αυτό συχνά μπορεί να έχει ως συνέπεια την ανεπαρκή διάγνωση ορισμένων μη επιφανειακών φθορών οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν σημαντική βλάβη στην κατασκευή.

2.3.2 Έλεγχος με όργανα

Λόγω των μειονεκτημάτων και του υποκειμενικού χαρακτήρα του απλού οπτικού ελέγχου, πολλές φορές αντί αυτού χρησιμοποιείται ο ενόργανος οπτικός έλεγχος. Το συγκεκριμένο είδος ελέγχου απαιτεί λεπτομερή σχεδιασμό από έμπειρους μηχανικούς καθώς και ένα συνεργείο με εξειδικευμένο προσωπικό που διαθέτει τα κατάλληλα εργαλεία για τον έλεγχο συγκεκριμένων σημείων. Επομένως, προκύπτουν πειραματικά δεδομένα τα οποία υφίστανται κατάλληλη επεξεργασία στο εργαστήριο και αξιολογούνται από αρμόδιους μηχανικούς. Το σημαντικότερο μειονέκτημα των ενόργανων ελέγχων είναι η σημαντική διασπορά τιμών που εμφανίζουν τα αποτελέσματα από τους ελέγχους, τα οποία όμως ελέγχονται στατιστικά και γι' αυτό τον λόγο (ανάλογα με τους ιδιαίτερους στόχους της μελέτης) απαιτείται πληθώρα μετρήσεων και σε διαφορετικά τμήματα της κατασκευής, πριν εξέλθουν συμπεράσματα για την κατάσταση της γέφυρας.

Στη συγκεκριμένη μέθοδο ελέγχου, χρησιμοποιούνται συσκευές που πραγματοποιούν μετρήσεις προκειμένου να διεξήχθη μια εικόνα για την κατασκευή και να συγκριθεί με τα σχέδια και τις προδιαγραφές σχεδιασμού της. Για αυτό το λόγο είναι σημαντικό κάθε έργο κατά την παράδοση του να υφίσταται ένα λεπτομερή ενόργανο έλεγχο ώστε να εντοπίζονται τυχόν παραλείψεις, λάθος θεωρήσεις ή ατέλειες που έλαβαν χώρα κατά τη διάρκεια της κατασκευής του έργου.

2.3.3 Έλεγχος με «έξυπνα συστήματα παρακολούθησης»

Ο έλεγχος με «έξυπνα συστήματα παρακολούθησης» ή αλλιώς *Bridge Health Monitoring Systems* είναι ο πληρέστερος και πιο ακριβής έλεγχος που μπορεί να πραγματοποιηθεί σε μια γέφυρα. Όπως είναι κατανοητό, είναι περισσότερο σύνθετος σε σχέση με τους δύο προηγούμενους ελέγχους και απαιτεί ιδιαίτερη οργάνωση. Βασίζεται σε ιδιαίτερα σύγχρονα τεχνολογικά μέσα. Ωστόσο, προκειμένου να είναι δυνατή η αξιοποίηση των δεδομένων που δίνουν πρέπει να επεξεργαστούν κατάλληλα μέσα από μαθηματικά προσομοιώματα.

Τέτοιου είδους συστήματα παρακολούθησης γεφυρών αναλύονται εκτενέστερα στο Κεφάλαιο 1. Στην συγκεκριμένη Ενότητα περιγράφεται περισσότερο η γενική φιλοσοφία των ελέγχων τέτοιου επιπέδου. Αρχικά, λοιπόν, γίνεται η λήψη μετρήσεων με διάφορα ενόργανα συστήματα παρακολούθησης. Απαραίτητο στάδιο, για να είναι δυνατή η λήψη μετρήσεων, είναι η ενεργοποίηση των συστημάτων που χρησιμοποιούνται με κάποιου είδους διέγερση. Ένας τεχνητός τρόπος διέγερσης, είναι η εξαναγκασμένη ταλάντωση του έργου μέσα από αυξημένη κυκλοφορία φορτηγών κατά τη διάρκεια λειτουργίας της γέφυρας ή κατά τη διάρκεια συνεχούς οδικής κυκλοφορίας. Επίσης μια άλλη πηγή διέγερσης είναι και ο άνεμος, ο οποίος όμως προϋποθέτει μια πιο συστηματική λήψη μετρήσεων καθώς θεωρείται τυχαία διέγερση.

Μετά τη λήψη των δεδομένων ακολουθεί υπολογιστική επεξεργασία τους. Επομένως, προκύπτει η δυναμική απόκριση της γέφυρας λόγω τυχαίων διεγέρσεων. Στη συνέχεια υπολογίζονται οι ιδιοσυχνότητες και οι ιδιομορφές της κατασκευής, η οποία είναι γνωστή και ως “ιδιομορφική αναγνώριση” (*Modal Identification*). Η διαδικασία της ιδιομορφικής αναγνώρισης πραγματοποιείται με πολύπλοκους

μαθηματικούς τύπους ή με χρήση αριθμητικών μεθόδων και για τη διεκπεραίωση της απαιτείται επιστημονικά καταρτισμένο προσωπικό.

Τέλος, γίνεται αναθεώρηση του αρχικού μοντέλου (*Model Updating*), μέσα από το οποίο θα προχωρήσει η διαδικασία της διάγνωσης των βλαβών και της στατικής ανεπάρκειας της κατασκευής. Αρχικά χρησιμοποιείται ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων της γέφυρας στο οποίο προσδιορίζονται όλες οι αρχικές παράμετροι ακαμψίας. Στη συνέχεια το αρχικό μοντέλο τροποποιείται για να προκύψουν οι τελικοί παράμετροι ακαμψίας 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.

Όσον αφορά τα όργανα που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση των γεφυρών ανήκουν σε δύο κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν αυτά τα οποία συνδέονται με τις μονάδες παρακολούθησης μέσω καλωδίων ενώ στη δεύτερη και πιο σύγχρονη κατηγορία ανήκουν αυτά τα οποία συνδέονται με τις οθόνες ελέγχου με ραδιενεργά ή ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Και οι δυο κατηγορίες πάντως έχουν το μειονέκτημα του υψηλού κόστους τοποθέτησης και διατήρησης πράγμα που καθιστά το τρίτο είδος ελέγχων τελευταίο σε προτεραιότητα από όλους τους ελέγχους που γίνονται σε μια κατασκευή.

3 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΛΙΣΙΜΕΤΡΩΝ: ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

Στο Κεφάλαιο αυτό, πραγματοποιείται διερεύνηση των κλισιμέτρων. Συγκεκριμένα, γίνεται μια γενική περιγραφή των συγκεκριμένων οργάνων, αναφέρονται οι εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιούνται και αναλύονται οι διάφορες κατηγορίες κλισιμέτρων που κυκλοφορούν στο εμπόριο. Επιπλέον, ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στα ψηφιακά κλισίμετρα και ειδικότερα στις αρχές λειτουργίας τους, τα σφάλματα που εισάγουν στις μετρήσεις και περιγράφονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους. Τέλος, δεδομένου ότι στην παρούσα εργασία λαμβάνονται μετρήσεις με το ψηφιακό κλισίμετρο *Nivel220*, περιγράφεται η αρχή λειτουργίας του, τα τεχνικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα, ο τρόπος που γίνεται η συνδεσμολογία πολλών αισθητήρων *Nivel* σε σειρά αλλά και το λογισμικό καταγραφής μετρήσεων.

3.1 Γενική Περιγραφή, Εφαρμογές και Κατηγοριοποίηση

Κλισίμετρο ονομάζεται το όργανο που μετρά την κλίση ή γωνίες κλίσης μεταξύ μιας διεύθυνσης και της κατακόρυφου. Η διεύθυνση αυτή μπορεί να υλοποιεί τοπικά το έδαφος ή μέρος μίας κατασκευής. Τα κλισίμετρα διαχωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- Αυτά που για τον ορισμό της κατακόρυφου χρησιμοποιούν κάποια μάζα, όπως το νήμα της στάθμης,
- Αυτά που χρησιμοποιούν κάποιο υγρό μέσο, του οποίου η θέση ισορροπίας ορίζει το οριζόντιο επίπεδο.

Το συγκεκριμένο όργανο χρησιμοποιείται σε πολλούς επιστημονικούς κλάδους όπως η τοπογραφία, η αεροπορία, ο στρατός, η ναυσιπλοΐα, η ηφαιστειολογία, η μηχανουργία, η δασολογία, η γεωτεχνική κ.α.

Μερικές εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιούνται τα κλισίμετρα είναι οι εξής:

- Παρακολούθηση της δομικής κατάστασης κατασκευών υπό την επίδραση φορτίων, όπως έλεγχος της καμπυλότητας δοκών η πλακών
- Επιπτώσεις εκσκαφών και διάνοιξης σηράγγων

- Έργα οδοποιίας και ασφαλτοστρώσεις
- Οριζοντίωση αγωγών
- Παρακολούθηση ηφαιστειών
- Παρακολούθηση κατολισθήσεων

Οι συσκευές αυτές δίνουν πολύ ακριβή αποτελέσματα ακόμα και αν χρησιμοποιούνται σε ιδιαίτερα ανώμαλες επιφάνειες. Χρησιμοποιούνται περίπου μια δεκαετία. Δύο σημαντικές παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την επιλογή ενός κλισίμετρου για κάποια εφαρμογή, είναι το εύρος της γωνίας κλίσης και ο αριθμός των αξόνων. Στην αγορά διατίθενται τόσο μονοαξονικά όσο και διαξονικά κλισίμετρα.

Τα κλισίμετρα χρησιμοποιούν διάφορες τεχνολογίες για τη λειτουργία τους όπως το επιταχυνσιόμετρο, η ηλεκτρολυτική, ο υδράργυρος, το εκκρεμές. Ωστόσο, δεδομένης της ψηφιακής εποχής που διανύουμε τα ψηφιακά κλισίμετρα είναι ιδιαίτερα δημοφιλή και προτιμούνται από πολλούς χρήστες.

Η παρουσία του ηλεκτρολυτικού στοιχείου στα κλισίμετρα, καθιστά δυνατή την εκπόνηση μετρήσεων ακριβείας και η παραγωγή του ηλεκτρικού σήματος καθορίζει την κλίση μιας κατασκευής σε σχέση με την κατακόρυφο (δύναμη της βαρύτητας). Αυτού του είδους οι αισθητήρες, χρησιμοποιούνται συνήθως στην αυτοκινητοβιομηχανία, τα γυροσκόπια και τους δορυφόρους και θεωρούνται πιο ανθεκτικοί από άλλους αισθητήρες που είναι διαθέσιμοι (Σχήμα 3-1).



Σχήμα 3-1: Ηλεκτρολυτικά κλισίμετρα
Figure 3-1: Electrolytic tilt sensors
(Πηγή: <http://www.bestech.com.au/>)

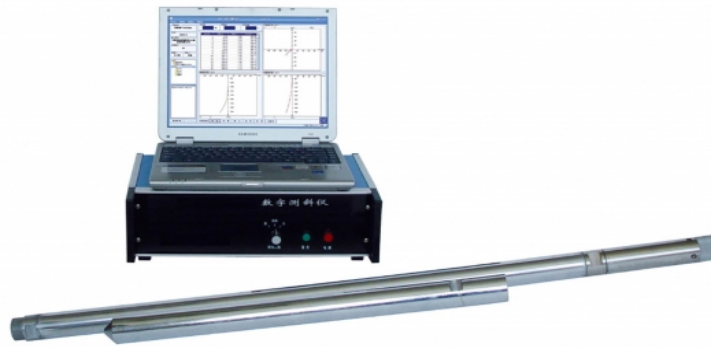
Στους αισθητήρες κλίσης με υδράργυρο, η κλίση καθορίζεται από ένα μέταλλο η γυαλί εντός του οποίου υπάρχει μια μικρή σταγόνα υδράργυρου. Οι αισθητήρες αυτοί εξασφαλίζουν αρκετά καλές μετρήσεις.

Το κλισίμετρο που χρησιμοποιεί την τεχνολογία του απλού εκκρεμούς, μπορεί να καθορίσει πόσο σταθερό είναι ένα υποβρύχιο ή ένα πλοίο. Η συσκευή αυτή χρησιμοποιείται από το ναυτικό παγκοσμίως. Ουσιαστικά, πρόκειται για ένα μεταλλικό κύλινδρο γεμάτο με υδράργυρο που μπορεί να αιωρείται. Αυτός στερεώνεται σε ένα μικρό άξονα που τείνει να τον κρατήσει κατακόρυφο. Η κίνηση του εκκρεμούς και το αντικείμενο που συνδέεται με αυτό, εκτιμάται με τη βοήθεια ενός δείκτη (Σχήμα 3-2).



Σχήμα 3-2: Κλισίμετρο τεχνολογίας απλού εκκρεμούς
Figure 3-2: Pendulum inclinometer
(Πηγή: <http://www.westsea.com>)

Στις μέρες μας χρησιμοποιούνται διάφορα είδη κλισιμέτρων. Οι χρήστες ανάλογα με τις ανάγκες τους μπορούν να επιλέξουν ανάμεσα σε οριζόντια (Σχήμα 3-3), κατακόρυφα (Σχήμα 3-4) ή ψηφιακά κλισίμετρα. Τα οριζόντια κλισίμετρα χρησιμοποιούνται συνήθως για την παρακολούθηση των παραμορφώσεων σε κατασκευές από σκυρόδεμα. Τα κατακόρυφα κλισίμετρα χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση απότομων μετακινήσεων, ιδιαίτερα σε περιοχές κατολισθήσεων, κάτω από το νερό καθώς και σε περιοχές με πολύ μεγάλες κλίσεις. Τέλος, τα ψηφιακά κλισίμετρα είναι ιδιαίτερα ακριβή και αποτελούν σημαντική ανακάλυψη της τεχνολογίας. Λόγω της χρήσης ψηφιακού κλισίμετρου στην παρούσα μελέτη, γίνεται ιδιαίτερη αναφορά σε αυτό και τα χαρακτηριστικά του στις υποενότητες 3.2 και 3.3.



Σχήμα 3-3: Οριζόντιο ψηφιακό κλισίμετρο
Figure 3-3: Horizontal digital inclinometer
(Πηγή: <http://www.tjskl.org.cn>)



Σχήμα 3-4: Κατακόρυφο κλισίμετρο
Figure 3-4: Vertical inclinometer
(Πηγή: <http://www.slopeindicator.com>)

3.2 Ψηφιακά Κλισίμετρα

Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των ψηφιακών κλισιμέτρων (Σχήμα 3-5) είναι ότι το σήμα και τα δεδομένα τους είναι ψηφιακά. Επιπλέον, λόγω του υλικού κατασκευής τους είναι σκληρά, με ιδιαίτερη αντοχή και εύκολα στη χρήση. Χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο γωνιών και κλίσεων σε διάφορες εφαρμογές του πολιτικού μηχανικού τόσο αυτόνομα όσο και σε συνδυασμό με άλλους αισθητήρες. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται στον έλεγχο γεφυρών, φραγμάτων, υψηλών κατασκευών, κατολισθήσεων, ηφαιστειακών και τεκτονικών δραστηριοτήτων, σε εφαρμογές λιμενικών και υδραυλικής κ.α. Παρέχουν πολύ ακριβή αποτελέσματα που

υπολογίζονται με αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για μονοαξονικές και διαξονικές μετρήσεις.



Σχήμα 3-5: Ψηφιακό κλισίμετρο για εφαρμογές παρακολούθησης τεχνικών έργων
Figure 3-5: Digital inclinometer for structural monitoring applications
(Πηγή: <http://www.rst instruments.com>)

Ωστόσο, αξίζει να αναφερθεί ότι υστερούν στην παρακολούθηση φαινομένων υψηλής δυναμικής, όπως για παράδειγμα την δυναμική συμπεριφορά μιας κατασκευής έναντι ανέμου λόγω της μικρής συχνότητας δειγματοληψίας (<1 Hz). Έτσι σε δυναμικά φαινόμενα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μαζί με άλλα μέσα. Αντίθετα, όσον αφορά τις στατικές δοκιμές, παρέχουν ιδιαίτερα αξιόπιστα αποτελέσματα.

3.2.1 Αρχή λειτουργίας, σφάλματα και αξιολόγηση της μεθόδου μέτρησης

Η βασική αρχή λειτουργίας των ψηφιακών στηρίζεται στις ιδιότητες των αγώγιμων υγρών. Πιο συγκεκριμένα, μεταφράζουν αλλαγές στην ηλεκτρική αγωγιμότητα του υγρού σε αλλαγές στην κλίση. Η κλίση προσδιορίζεται από τη μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης μεταξύ ηλεκτροδίων στην ελεύθερη επιφάνεια αγώγιμου υγρού το οποίο ισορροπεί σε ειδική μικρο-κάψουλα στο εσωτερικό περίβλημα του οργάνου.

Οι μετρήσεις που λαμβάνονται με τα κλισίμετρα παρέχουν συνήθως καλής ποιότητας αποτελέσματα. Παρόλα αυτά, στην εκτέλεση οποιονδήποτε μετρήσεων υπεισέρχονται πάντα τυχαία ή συστηματικά σφάλματα. Επομένως, κατά τις μετρήσεις με ψηφιακό κλισίμετρο είναι δυνατόν να προκύψουν σφάλματα από διάφορες πηγές, όπως:

- Απότομες μεταβολές της θερμοκρασίας

- Σφάλματα λόγω μη ορθής εγκατάστασης και οριζοντίωσης των κλισιμέτρου και ως εκ τούτου οι μετρημένες τιμές κλίσης θα αποκλίνουν από την κατακόρυφο.
- 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 αναγωγή των μετρήσεων.

Προκειμένου να γίνει αξιολόγηση των μεθόδων μέτρησης με ψηφιακά κλισίμετρα και να επιλεγθούν ως όργανα μέτρησης σε ορισμένες εφαρμογές κρίνεται αναγκαίο να γνωρίζει κανείς τα πλεονεκτήματά και τους περιορισμούς που παρουσιάζουν. Τα ψηφιακά κλισίμετρα παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα, όπως:

- Παρέχουν μετρήσεις ακριβείας και υψηλής ανάλυσης (καλύτερες του 0.001 mrad)
- Τοποθετούνται σχετικά εύκολα λόγω του μικρού μεγέθους και της μάζας τους
- Παρέχουν μετρήσεις σε δύο άξονες
- Το κόστος τους είναι λογικό
- Τα υλικά κατασκευής τους έχουν μεγάλη αντοχή και επομένως χρησιμοποιούνται ακόμα και σε δύσκολες συνθήκες
- Η χρήση του είναι εύκολη

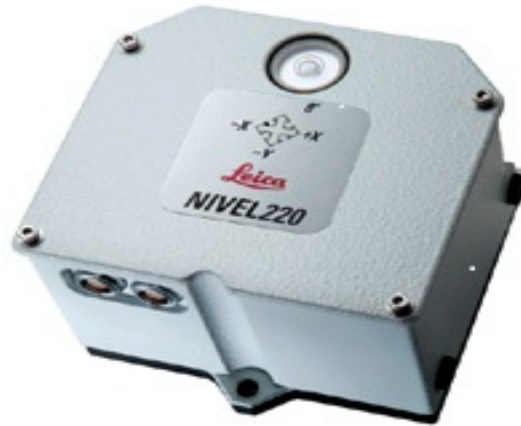
Ωστόσο, παρουσιάζουν και ορισμένους περιορισμούς, όπως:

- Είναι ευαίσθητα στις θερμοκρασιακές μεταβολές
- Το εύρος μέτρησής τους είναι σχετικά μικρό
- Παρέχουν μετακινήσεις μόνο κατά τους άξονες x και y και όχι κατά τον z
- Δεν είναι κατάλληλα για τη μελέτη ταλαντώσεων υψηλών συχνοτήτων (μεγαλύτερων των 5 Hz), λόγω της αδράνειας του υγρού.

3.3 Το Ψηφιακό Κλισίμετρο *Nivel220 (Leica Geosystems)*

Κύριο όργανο μέτρησης στην παρούσα μελέτη είναι το ψηφιακό κλισίμετρο *Nivel220* της εταιρίας *Leica Geosystems* (Σχήμα 3-6). Αποτελεί μέρος της σειράς *Nivel200* και είναι ένας διαξονικός, υψηλής ακριβείας αισθητήρας που χρησιμοποιείται για ταυτόχρονες μετρήσεις κλίσης, διεύθυνσης μετακίνησης και θερμοκρασίας με βάση

τις αρχές της οπτοηλεκτρονικής. Η ανάλυσή του είναι της τάξης των 0.001 mrad. Παρέχει δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, σε συνεχή βάση και μπορεί να συνδεθεί με το λογισμικό παρακολούθησης *Leica GeoMoS*.

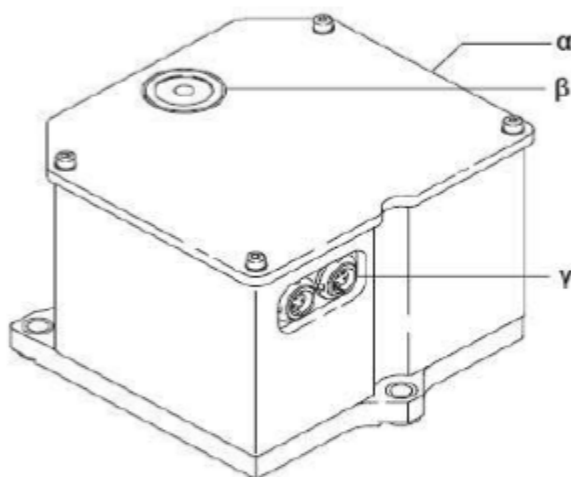


Σχήμα 3-6: Ψηφιακό κλισίμετρο *Nivel220*, *Leica Geosystems*
Figure 3-6: Digital inclinometer *Nivel220*, *Leica Geosystems*
(Πηγή: *Nivel200*, User Manual)

Χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση τεχνικών έργων όπως γέφυρες, φράγματα, ψηλά κτίρια κ.α και γενικότερα όπου απαιτούνται πολύ υψηλής ακρίβειας πληροφορίες για την κλίση και τη διεύθυνση των μετακινήσεων. Σημαντικό να αναφερθεί πως ο δέκτης *Nivel220* αποτελείται από μια RS485 διασύνδεση (*interface*) για εφαρμογές παρακολούθησης με πολλαπλούς αισθητήρες.

3.3.1 Αρχές λειτουργίας

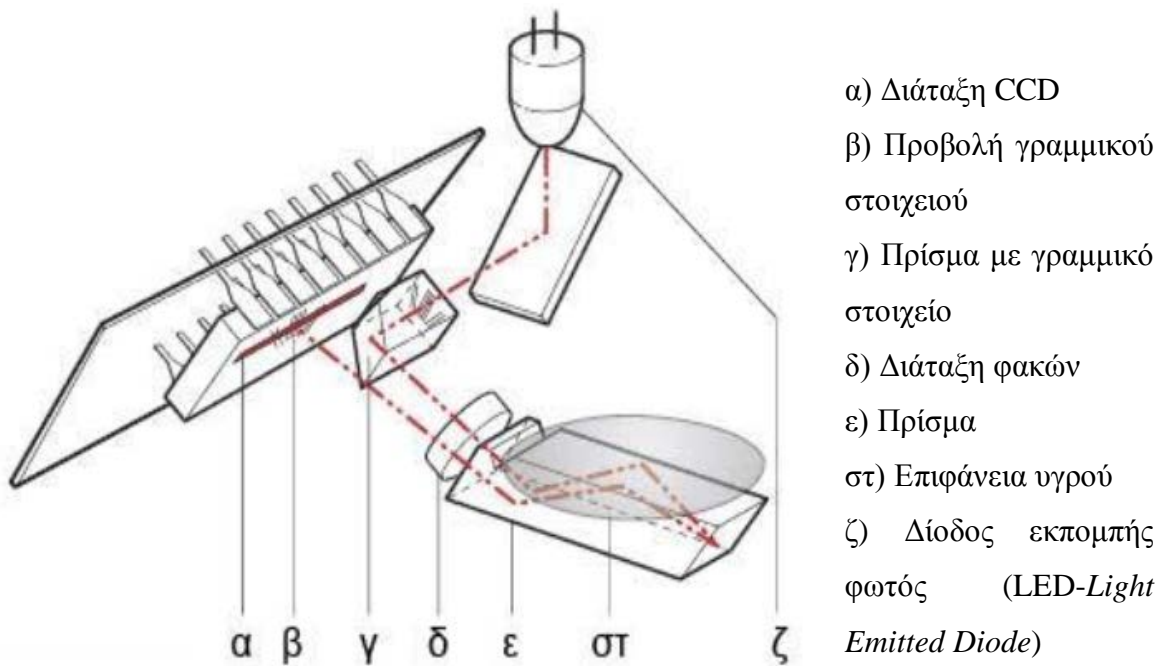
Ο αισθητήρας *Nivel220* αποτελείται από διάφορα εξαρτήματα, τα οποία απεικονίζονται στα Σχήματα 3-7 και 3-8.



- α) Περίβλημα του *Nivel220*
- β) Σφαιρική αεροστάθμη
- γ) Βύσματα

Σχήμα 3-7: Εξαρτήματα του αισθητήρα
Figure 3-7: Sensor Components
(Πηγή: *Nivel200*, User Manual)

Η βασική αρχή λειτουργίας του αισθητήρα *Nivel220* βασίζεται στις αρχές της οπτοηλεκτρονικής. 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 προσαρμοστεί ο αισθητήρας. Η γωνία αυτή καταγράφεται από μια οπτοηλεκτρονική διάταξη και στη συνέχεια μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα.



Σχήμα 3-8: Εξαρτήματα του αισθητήρα
Figure 3-8: Sensor components
 (Πηγή: Nivel200, User Manual)

Πιο συγκεκριμένα:

- Το γραμμικό στοιχείο (γ) είναι ενσωματωμένο σε ένα πρίσμα
- Το γραμμικό στοιχείο (γ) φωτίζεται με ένα 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.

3.3.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα

Στους παρακάτω Πίνακες 3-1 έως 3-7 απεικονίζονται μερικά από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του οργάνου.

■ Εύρος (Range) Μέτρησης:

Εύρος μέτρησης (range)	Από		Έως	
	(mrad)	(cc)	(mrad)	(cc)
A	-1.51	-960	+1.51	+960
B	-2.51	-1600	+2.51	+1600
Γ	-3.00	-1900	+3.00	+1900

Πίνακας 3-1: Εύρος μέτρησης αισθητήρα
Table 3-1: Sensor's measurement range

(Πηγή: Nivel200, User Manual)

■ Ακρίβεια (Accuracy) γωνίας κλίσης:

Εύρος	Τυπική απόκλιση	
	(mrad)	(cc)
A	+/- 0.0047	+/- 3
B	+/- 0.0141	+/- 9
Γ	+/- 0.0471	+/- 30

Πίνακας 3-2: Ακρίβεια γωνίας κλίσης
Table 3-2: Tilt angle accuracy

(Πηγή: Nivel200, User Manual)

■ Ανάλυση (Resolution)

(mrad)	(cc)
0.001	0.6

Πίνακας 3-3: Ανάλυση

Table 3-3: Resolution

(Πηγή: Nivel200, User Manual)

■ Ευαισθησία θέσης ισορροπίας (Zero point stability)

(mrad/°C)	(cc/°C)
<0.00471	<3

Πίνακας 3-4: Ευαισθησία θέσης ισορροπίας

Table 3-4: Zero point stability

(Πηγή: Nivel200, User Manual)

- **Σφάλμα θέσης ισορροπίας (Equipoise error) για θερμοκρασία <15°C**

(mrad)	(cc)
0.00204	1.3

Πίνακας 3-5: Σφάλμα θέσης ισορροπίας
Table 3-5: Equipoise error

(Πηγή: Nivel200, User Manual)

- **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 καθαρίσμα-στέγνωμα του οργάνου

Πίνακας 3-6: Περιβαλλοντικές συνθήκες
Table 3-6: Environmental specifications

(Πηγή: Nivel200, User Manual)

- **Άλλα σφάλματα**

Σφάλμα	Τιμή
Σφάλμα μηδενικού σημείου	15cc
Σφάλμα διεύθυνσης	< +/- 1°
Σφάλμα κλίμακας	0.5%

Πίνακας 3-7: Άλλα σφάλματα
Table 3-7: Other errors

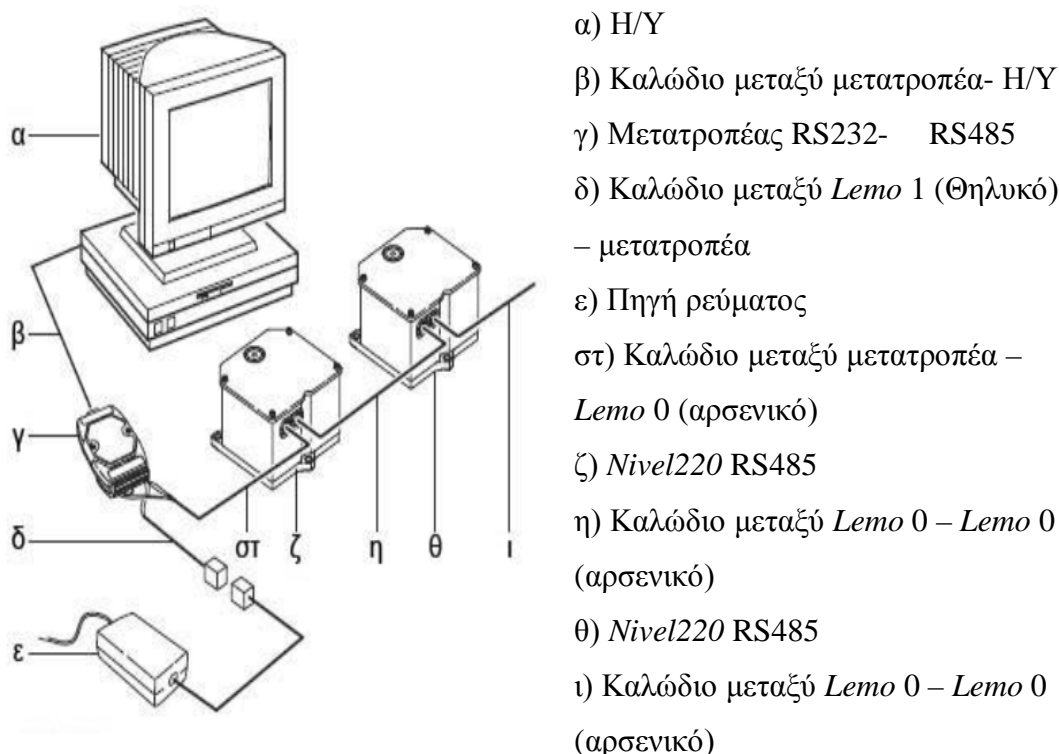
(Πηγή: Nivel200, User Manual)

- **Τάση τροφοδοσίας:** Ονομαστική τάση 12 VDC, εύρος τάσης 9 -15 VDC
- **Μέση κατανάλωση ρεύματος:** 0.6 W, 50 mA
- **Χρόνος προθέρμανσης:** <20 min
- **Χρόνος οριζοντίωσης:** <10 s
- **Διαστάσεις:** περίπου. 95 x 91 x 68 mm (ΜxΠxΥ)
- **Βάρος:** 0.74 kg

3.3.3 Συνδεσμολογία

Όπως προαναφέρεται, ο αισθητήρας *Nivel220* είναι κατάλληλος για εφαρμογές παρακολούθησης με διασύνδεση πολλών αισθητήρων σε σειρά χρησιμοποιώντας μια

RS485 διασύνδεση (*interface*). Στο Σχήμα 3-9 παρουσιάζεται η συνδεσμολογία μεταξύ του αισθητήρα και του ηλεκτρονικού υπολογιστή.



Σχήμα 3-9: Συνδεσμολογία μεταξύ πολλαπλών αισθητήρων Nivel220 και Η/Υ
Figure 3-9: 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).

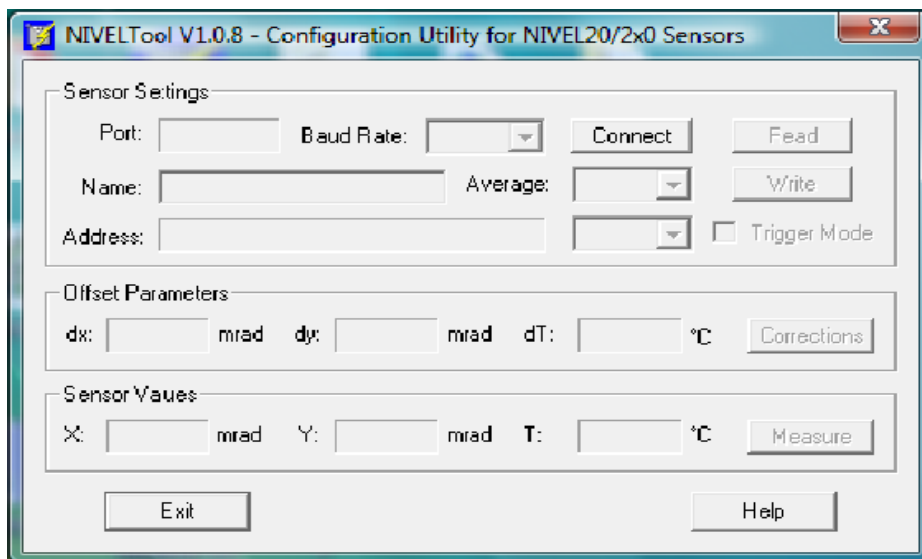
3.3.4 Λογισμικό καταγραφής Nivel Tool

Το λογισμικό καταγραφής, *Nivel Tool* του αισθητήρα Nivel220 σχεδιάστηκε προκειμένου να καθοδηγήσει το χρήστη ώστε να περατωθεί η λήψη των μετρήσεων. Παρέχει τη δυνατότητα ρύθμισης των παραμέτρων που απαιτούνται για τη λήψη μετρήσεων καθώς επίσης και τη δυνατότητα χειρισμού του οργάνου. Μερικές δυνατότητες που παρέχει το λογισμικό είναι οι εξής:

- Ηλεκτρονική αεροστάθμη
- Ρύθμιση του αισθητήρα (ονομασία, θύρα σύνδεσης κ.α)

- Ρύθμιση παραμέτρων συλλογής δεδομένων (διάρκεια κ.α)
- Έναρξη και λήξη συλλογής δεδομένων

Κατά την πραγματοποίηση μετρήσεων που χρειάζεται να συνδεθούν περισσότεροι αισθητήρες σε σειρά, απαιτείται ρύθμιση καθενός από αυτούς αυτόνομα και μετά γίνεται η διασύνδεσή τους. Παρακάτω (Σχήμα 3-10) παρουσιάζεται το παράθυρο εργασίας του συγκεκριμένου λογισμικού καταγραφής.



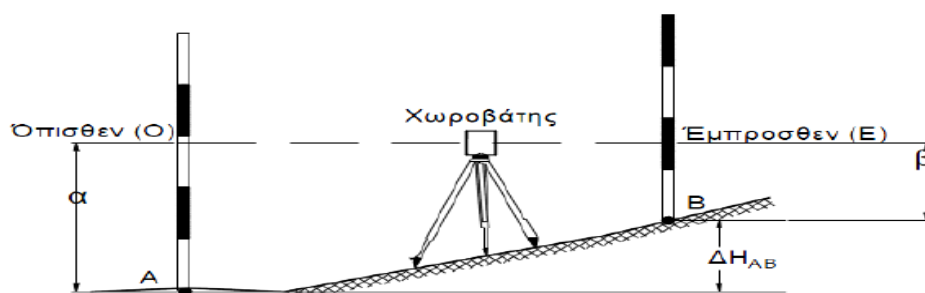
Σχήμα 3-10: Λογισμικό καταγραφής *Nivel Tool*
Figure 3-10: Record software *Nivel Tool*
 (Πηγή: Nivel200, User Manual)

4 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΧΩΡΟΣΤΑΘΜΗΣΗ: ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

Στο παρόν Κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία της γεωμετρικής χωροστάθμησης, αναλύεται η αρχή λειτουργίας των χωροβατών, γίνεται κατηγοριοποίησή τους, περιγράφονται οι χωροσταθμικοί πήγεις ή σταδίες, τα σφάλματα/ακρίβειες στις χωροσταθμίσεις. Επιπλέον, πραγματοποιείται ιδιαίτερη αναφορά στον ψηφιακό χωροβάτη *Leica DNA03*. Περιγράφονται τα τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του και γίνεται αξιολόγηση του οργάνου.

4.1 Γεωμετρική χωροστάθμηση

Η γεωμετρική χωροστάθμηση είναι μια μέθοδος άμεσου προσδιορισμού των υψομετρικών διαφορών μεταξύ σημείων της φυσικής γήινης επιφάνειας. Για την εκτέλεση της γεωμετρικής χωροστάθμησης χρησιμοποιείται ένα όργανο που μπορεί να οριζοντιώσει εύκολα μια σκοπευτική γραμμή και να σκοπεύσει με αυτήν την οριζόντια και δύο τουλάχιστον αριθμημένοι πήγεις τοποθετημένοι κατακόρυφα στα σημεία που χρειάζεται να υπολογιστεί η υψομετρική τους διαφορά. Τα βασικά όργανα που χρησιμοποιούνται λέγονται χωροβάτες και μπορεί να είναι είτε οπτικοί, είτε ψηφιακοί. Τα βοηθητικά όργανα ονομάζονται αριθμητικοί πήγεις ή σταδίες. Συγκεκριμένα, για τους ψηφιακούς χωροβάτες χρησιμοποιούνται ειδικά κωδικοποιημένες σταδίες όπου η κλασσική υποδιαίρεση της σταδίας με χιλιοστά έχει αντικατασταθεί με το σύστημα barcode. Η διαδικασία μιας απλής χωροστάθμησης φαίνεται στο Σχήμα 4-1.



Σχήμα 4-1: Γεωμετρική χωροστάθμηση

Figure 4-1: Precise leveling

(Πηγή: Υψομετρία, Μπαλοδήμος Δ., Αραμπατζή Ο., Εκδόσεις ΕΜΠ)

Στην απλή γεωμετρική χωροστάθμιση, ο χωροβάτης τοποθετείται περίπου σε κάποιο σημείο της μεσοκαθέτου της απόστασης AB (Σχήμα 4-1). Στα σημεία A και B τοποθετούνται κατακόρυφα οι κατάλληλες σταδίες, το όργανο οριζοντιώνεται και γίνονται οι αναγνώσεις πάνω στις σταδίες. Η διαφορά των δύο αναγνώσεων δίνει την προσημασμένη υψομετρική διαφορά μεταξύ των σημείων A και B. Αν O είναι η ανάγνωση πάνω στη σταδία στο σημείο A και E η αντίστοιχη ανάγνωση στο σημείο B, τότε η υψομετρική διαφορά μεταξύ των A και B θα είναι:

$$\Delta H_{AB} = H_B - H_A = O - E \quad (4.1)$$

όπου:

ΔH_{AB} : η υψομετρική διαφορά μεταξύ των σημείων A και B

H_B : το υψόμετρο της χωροσταθμικής επιφάνειας που περνάει από το A

H_A : το υψόμετρο της χωροσταθμικής επιφάνειας που περνάει από το B

O: η όπισθεν σκόπευση

E: η έμπροσθεν σκόπευση

Στην περίπτωση που ζητείται να υπολογιστεί η υψομετρική διαφορά μεταξύ σημείων που απέχουν αρκετά, και υψομετρικά και οριζοντιογραφικά, εφαρμόζεται διαδοχικά η διαδικασία της απλής γεωμετρικής χωροστάθμισης και αυτή η διαδοχική εφαρμογή της ονομάζεται χωροσταθμική όδευση.

Ιδιαίτερα διαδεδομένη είναι η γεωμετρική χωροστάθμιση ακριβείας όπου προσδιορίζονται οι υψομετρικές διαφορές ενός δικτύου κατακόρυφου ελέγχου ή μιας όδευσης, σε μετάβαση και επιστροφή με τη χρήση ψηφιακού χωροβάτη και των αντίστοιχων κωδικοποιημένων σταδίων και παρελκόμενων. Στη συνέχεια, υπολογίζονται τα ορθομετρικά υψόμετρα των κορυφών αυτών, αν αρχικά είναι γνωστό το υψόμετρο ενός σημείου που θα χρησιμοποιηθεί ως αφετηρία. Τα σημεία με γνωστό υψόμετρο ονομάζονται χωροσταθμικές αφετηρίες ή *Réper*.

Η γεωμετρική χωροστάθμιση είναι μέθοδος υψηλής ακρίβειας υπολογισμού των υψομετρικών διαφορών με ακρίβεια που μπορεί να φτάσει με την εφαρμογή ειδικών τεχνικών έως 0.2-0.5 mm/km.

4.2 Αρχή Λειτουργίας Χωροβατών

Όπως αναφέρεται, το βασικό όργανο που χρησιμοποιείται για την υλοποίηση της γεωμετρικής χωροστάθμησης, τη μέτρηση των υψομετρικών διαφορών και ως εκ τούτου, τον υπολογισμό του υψομέτρου σημείων της Φυσικής Γήινης Επιφάνειας (Φ.Γ.Ε), είναι ο χωροβάτης. Η ορθή λειτουργία ενός χωροβάτη στηρίζεται σε τρεις βασικές συνθήκες:

- Ο σκοπευτικός άξονας $\Sigma\Sigma'$ ή αλλιώς η σκοπευτική γραμμή, πρέπει να είναι παράλληλη με την κανονική ευθεία $ΚΚ'$ της αεροστάθμης [$\Sigma\Sigma' // ΚΚ'$] (κύρια συνθήκη)
- Η κανονική ευθεία $ΚΚ'$ της αεροστάθμης πρέπει να είναι κάθετη στον πρωτεύοντα άξονα $\Pi\Pi'$ [$ΚΚ' \perp \Pi\Pi'$] (βοηθητική συνθήκη)

Ο σκοπευτικός άξονας ορίζεται με τη βοήθεια του τηλεσκοπίου και μπορεί να οριζοντιώνεται με μεγάλη ακρίβεια. Ο συγκεκριμένος άξονας υλοποιείται από το κέντρο του σταυρονήματος, που είναι χαραγμένο στο τηλεσκόπιο του οργάνου και το οπτικό κέντρο του αντικειμενικού φακού του τηλεσκοπίου. Η οριζοντίωση του $\Sigma\Sigma'$ υλοποιείται με τη σωληνωτή αεροστάθμη στους οπτικομηχανικούς χωροβάτες. Στους ψηφιακούς χωροβάτες η οριζοντίωση πραγματοποιείται με τη βοήθεια ισοσταθμητή. Όταν επιτυγχάνεται η οριζοντίωση, τότε ο σκοπευτικός άξονας $\Sigma\Sigma'$, είναι παράλληλος στο οριζόντιο επίπεδο που ορίζει ο μηχανισμός της οριζοντίωσης. Επιπλέον όταν ο χωροβάτης περιστρέφεται γύρω από τον πρωτεύοντα άξονα $\Pi\Pi'$, τότε η σκοπευτική γραμμή $\Sigma\Sigma'$ διαγράφει ένα οριζόντιο επίπεδο που είναι κάθετο στην κατακόρυφο του τόπου στο σημείο που τοποθετείται ο χωροβάτης.

4.3 Κατηγοριοποίηση Χωροβατών

Οι χωροβάτες διακρίνονται σε οπτικομηχανικούς και ψηφιακούς. Με τους οπτικομηχανικούς χωροβάτες οι μετρήσεις λαμβάνονται με απ' ευθείας ανάγνωση πάνω στις σταδίες από τον παρατηρητή με τη βοήθεια ενός κλασσικού τηλεσκοπίου. Όπως προαναφέρεται, παλαιότερα κατασκευάζονταν οπτικομηχανικοί χωροβάτες όπου η οριζοντίωση του σκοπευτικού άξονα $\Sigma\Sigma'$ γινόταν με τη βοήθεια σωληνωτής αεροστάθμης. Σήμερα, κατασκευάζονται μόνο χωροβάτες αυτόματης οριζοντίωσης

όπου η οριζοντίωση του ΣΣ' γίνεται με τη βοήθεια ισοσταθμητή. Η απόσταση μεταξύ σταδίας και χωροβάτη μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 25 m ενώ η καταγραφή των μετρήσεων γίνεται χειροκίνητα πάνω σε ειδικά έντυπα γεωμετρικής χωροστάθμησης. Το κόστος τέτοιων χωροβατών είναι γενικά χαμηλό. Οι σταδίες που χρησιμοποιούνται με αυτό τον τύπο χωροβατών είναι αναλογικές.

Σήμερα, χρησιμοποιούνται περισσότερο οι ψηφιακοί χωροβάτες οι οποίοι αποτελούν εξέλιξη των οπτικομηχανικών. Η εξέλιξή τους, αφορά κυρίως τη διαδικασία μέτρησης, η οποία γίνεται ψηφιακά με τη χρήση ειδικά κωδικοποιημένων σταδίων. Κατόπιν οριζοντίωσης του οργάνου, με τη βοήθεια μιας σφαιρικής αεροστάθμης, γίνεται σκόπευση στη σταδία και με το πάτημα ενός πλήκτρου μέτρησης, εμφανίζεται στην οθόνη του οργάνου το αποτέλεσμα της μέτρησης μετά από μερικά δευτερόλεπτα (3-5 sec). Το όργανο έχει προσαρμοσμένη στο τηλεσκόπιό του μια CCD κάμερα, με την οποία παράγει μια «εικόνα» από την ειδική σταδία και ύστερα από επεξεργασία, δίνει το αποτέλεσμα της μέτρησης.

Η χρήση ψηφιακών χωροβατών παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα. Μειώνει το χρόνο παραμονής στο ύπαιθρο, εξαλείφει το χονδροειδές σφάλμα ανάγνωσης του παρατηρητή και της καταγραφής των μετρήσεων, δεδομένου ότι αυτή γίνεται αυτόματα σε ειδική ενσωματωμένη καταγραφική μονάδα στο χωροβάτη. Οι χωροβάτες αυτοί έχουν δυνατότητα αυτοελέγχου και αυτορρυθμίσεων, ενώ ο μικροϋπολογιστής που έχουν ενσωματωμένο, διαθέτει μια σειρά προγραμμάτων όπου ο παρατηρητής μπορεί να χρησιμοποιήσει κατά της διάρκεια των μετρήσεων. Με τη χρήση ψηφιακών σταδίων INVAR, είναι δυνατός ο προσδιορισμός των υψομετρικών διαφορών με ακρίβειες που φτάνουν τα ± 0.3 mm/km. Η απόσταση μεταξύ χωροβάτη και σταδίας κατά τη μέτρηση μπορεί υπό προϋποθέσεις να φτάσει τα 100 m. Βελτιώνεται κατά πολύ η ταχύτητα ενός συνεργείου που εκτελεί μετρήσεις γεωμετρικής χωροστάθμησης για τον προσδιορισμό υψομετρικών διαφορών υψηλής ακρίβειας (2.5-3 φορές συντομότερα σε σχέση με την κλασσική μέθοδο).

Οι σύγχρονοι ψηφιακοί χωροβάτες είναι αυτόματοι και έχουν τη δυνατότητα ηλεκτρονικού ελέγχου της κατάστασης λειτουργίας του ισοσταθμητή που διαθέτουν. Επιπλέον, έχουν τη δυνατότητα, μέσω ειδικού λογισμικού, ελέγχου της ορθής θέσης του σκοπευτικού τους άξονα (έλεγχος μέσου-άκρου), αποθήκευσης της τιμής της

απόκλισης από την ορθή θέση και απ' ευθείας διόρθωση των μετρήσεων που παρέχουν, λόγω αυτού του σφάλματος.

Όσον αφορά στα μειονεκτήματα αυτών των χωροβατών καταγράφονται κυρίως:

- Η αδυναμία μέτρησης σε περιβάλλον με περιορισμένο ή ανομοιόμορφο φωτισμό
- Απαραίτητη ύπαρξη τροφοδοσίας της μπαταρίας
- Το υψηλό κόστος αγοράς τους σε σχέση με τους οπτικομηχανικούς.

4.4 Χωροσταθμικοί Πήχεις ή Σταδίες

Για την πραγματοποίηση της γεωμετρικής χωροστάθμησης, μαζί με τον χωροβάτη πρέπει να χρησιμοποιούνται και οι κατάλληλες σταδίες. Ανάλογα με τις απαιτήσεις ακρίβειας κάθε μέτρησης, χρησιμοποιούνται διάφορων ειδών χωροσταθμικοί πήχεις. Οι σταδίες, φέρουν χαραγμένη σε όλο το μήκος τους αναλογική ή ψηφιακή κλίμακα. Χρησιμοποιούνται για τη λήψη ανάγνωσης από τον παρατηρητή ή από τον χωροβάτη.

Αν πρόκειται για απλές χωροσταθμίσεις, με οπτικομηχανικούς χωροβάτες, χρησιμοποιούνται αναλογικές σταδίες. Έχουν μήκος 3-4 m και είναι διηρημένες κατά 10 mm ή 5 mm ή 1 mm. Παλαιότερα κατασκευάζονταν από ξύλο ενώ σήμερα είναι από αλουμίνιο για ευκολία μεταφοράς και αναδιπλώνονται σε δύο ή τρία μέρη. Συνήθως έχουν ενσωματωμένη μια σφαιρική αεροστάθμη, για την τοποθέτησή τους από το στοχοφόρο σε κατακόρυφη θέση κατά τη διάρκεια της μέτρησης.

Αντίθετα, για χωροσταθμίσεις με τη βοήθεια ψηφιακών χωροβατών χρησιμοποιούνται οι ψηφιακές σταδίες. Αυτές είναι ειδικά κωδικοποιημένες σταδίες και έχουν χαραγμένο ψηφιακό ραβδοκώδικα (*barcode*). Είναι κατασκευασμένες από συνθετικό υλικό *fiber-glass* με πολύ μικρό συντελεστή γραμμικής διαστολής (μικρότερο από 10^{-5}) ή από αλουμίνιο. Η κλασσική διαίρεση της σταδίας σε εκατοστά ή χιλιοστά, αντικαθίσταται πλέον από *barcode*. Η κωδικοποίηση αυτή, διαμορφώνει ανάλογα το φως που ανακλάται από τη σταδία στο χωροβάτη, ανάλογα με το χρώμα και το εύρος των διαστημάτων της σταδίας. Επιπλέον, οι σταδίες αυτές φέρουν στο πίσω μέρος τους και αναλογική κλίμακα με υποδιαίρεση 1 mm έτσι ώστε να μπορούν

να χρησιμοποιηθούν και ως αναλογικές. Τέλος, διατίθενται και απλές κωδικοποιημένες σταδίες αλλά και κωδικοποιημένες σταδίες από INVAR για μεγαλύτερες ακρίβειες.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί, ότι οι σταδίες όλων των κατηγοριών διαθέτουν σφαιρική αεροστάθμη για την τοποθέτησή τους σε κατακόρυφη θέση, δεδομένου ότι κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, πρέπει η σταδία να είναι παράλληλη με τη διεύθυνση της κατακορύφου στο σημείο τοποθέτησής της.

4.5 Σφάλματα/Ακρίβειες στις Χωροσταθμίσεις

Στις χωροσταθμίσεις, όπως άλλωστε και σε όλες τις μετρήσεις, γίνονται σφάλματα που θα ήταν δυνατόν να μην συμβούν καθόλου ή να περιοριστούν στο ελάχιστο. Τα σφάλματα αυτά μπορεί να οφείλονται στο χωροβάτη, τις σταδίες, στις συνθήκες του περιβάλλοντος ή σε μη συντονισμένες ενέργειες και απροσεξίες του παρατηρητή.

Συνοψίζοντας, αναφέρονται παρακάτω τα αίτια που θα προκαλούσαν τέτοιου είδους σφάλματα:

- i. Σφάλματα που οφείλονται στο όργανο:
 - Μη πλήρωση των συνθηκών ορθής λειτουργίας του
 - Αλλαγή του οριζόντιου επιπέδου σκόπευσης μεταξύ O και E σκόπευσης
 - Μη τοποθέτηση της φυσαλίδας της αεροστάθμης στο κανονικό της σημείο
 - Λάθος σκόπευση στη σταδία
- ii. Σφάλματα που οφείλονται στη σταδία:
 - Ανώμαλες διαιρέσεις
 - Μεταβολή του μήκους
 - Σφάλμα στην αρχή (διαφορά στη μηδενική υποδιαίρεση μεταξύ των σταδίων στη θέση O και E)
 - Μη κατακόρυφη τοποθέτηση της σταδίας
- iii. Σφάλματα που οφείλονται στη αλλαγή της θέσης της χωροσταθμικής βάσης μεταξύ της O και E σκόπευσης στο ίδιο σημείο
- iv. Σφάλματα που οφείλονται στη διάθλαση
- v. Σφάλματα που οφείλονται στην καμπυλότητα της γης

vi. Σφάλματα που οφείλονται στον παρατηρητή

Τα σφάλματα που προέρχονται από κατασκευαστικές ανωμαλίες των σταδίων μπορούν να εξαλειφθούν με έλεγχο και βαθμονόμηση των οργάνων αυτών. Το σφάλμα στην αρχή της σταδίας εξαλείφεται αν η χωροσταθμική όδευση έχει άρτιο αριθμό στάσεων, έτσι ώστε κάθε μια σταδία να σκοπεύεται με ίδιο αριθμό σκοπεύσεων O και E.

Τα σφάλματα κατακορυφότητας της σταδίας και πιθανής μετακίνησης της χωροσταθμικής βάσης εξαλείφονται με ιδιαίτερη προσοχή κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων.

Τα σφάλματα που οφείλονται στη διάθλαση και την καμπυλότητα της γης μπορούν να περιοριστούν με μικρές σχετικά αποστάσεις μεταξύ χωροβάτη και σταδίας καθώς και με κατά το δυνατόν ίσες αποστάσεις μεταξύ χωροβάτη και σταδίων O και E.

Τέλος, σφάλματα που οφείλονται στον παρατηρητή εξαλείφονται με απόκτηση μεγάλης εμπειρίας του παρατηρητή καθώς και με επίδειξη μεγαλύτερης προσοχής και λεπτών χειρισμών κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.

Η χρήση τα τελευταία χρόνια των ψηφιακών χωροβατών έχει περιορίσει σε μεγάλο βαθμό τα σφάλματα τύπου I, ii και iv.

Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων σε μια γεωμετρική χωροστάθμιση μεγάλου μήκους έχει βρεθεί πειραματικά ότι είναι συνάρτηση της τετραγωνικής ρίζας του μήκους της χωροσταθμικής όδευσης (σε km), καθώς και της απόλυτης υψομετρικής διαφοράς μεταξύ του αρχικού και του τελικού σημείου της όδευσης. Επομένως, η αβεβαιότητα ή το τυπικό σφάλμα μιας χωροστάθμισης μπορεί να εκφραστεί από τη σχέση:

$$\sigma = k_0 + k_1\sqrt{S} + k_2 \sum |DH| \quad (4.2)$$

όπου:

S: το μήκος της χωροσταθμικής όδευσης σε km

|DH|: η απόλυτη τιμή της υψομετρικής διαφοράς σε m

k_0, k_1, k_2 : συντελεστές σε διάφορες εργασίες

Να σημειωθεί ότι σε μικρές εργασίες, οι συντελεστές k_0 και k_2 δεν έχουν νόημα.

4.6 Ο Ψηφιακός Χωροβάτης *Leica DNA03*

Για τις ανάγκες της συγκεκριμένης εργασίας χρησιμοποιείται ο ψηφιακός χωροβάτης *Leica DNA03* της *Leica Geosystems AG* (Σχήμα 4-2). Το συγκεκριμένο όργανο είναι εξοπλισμένο με ένα σύστημα αισθητήρων, το οποίο επεξεργάζεται στο σήμα που δέχεται από τη μέτρηση σε barcode, βασισμένο στις αποδεδειγμένες μεθόδους συσχετισμού.



Σχήμα 4-2: Ο ψηφιακός χωροβάτης *Leica DNA03* της *Leica Geosystems*
Figure 4-2: The digital level *Leica DNA03* of *Leica Geosystems*
(Πηγή: www.leica-geosystems.com)

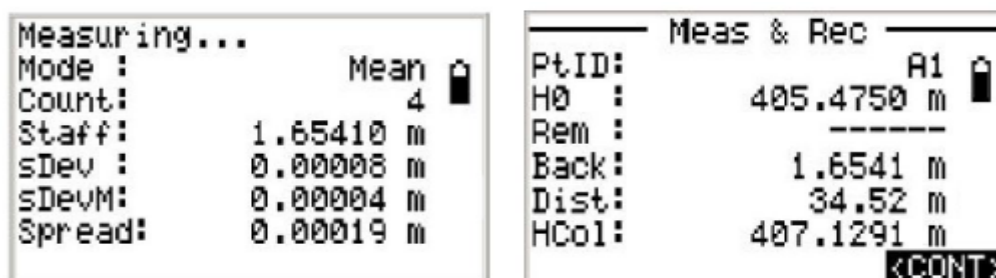
4.6.1 Τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά

Οι οριζόντιες κινήσεις στον *Leica DNA03* γίνονται από κοχλία μικρομετακίνησης που βρίσκεται στο πλάι του οργάνου, στη δεξιά πλευρά. Η θέση του κουμπιού μέτρησης, βρίσκεται στη δεξιά πλευρά του οργάνου και σε σχέση με παλαιότερα όργανα μεταφέρθηκε προς το κέντρο του οργάνου για να ελαχιστοποιηθεί ο αντίκτυπος στο όργανο κατά την συμπίεση του κουμπιού. Επιπλέον, διαθέτει σφαιρική αεροστάθμη τόσο στο μέτωπό του όσο και από πάνω για την οριζοντίωση του η οποία συντελείται εντελώς με τη βοήθεια ειδικού ισοσταθμητή. Η μέτρηση πάνω στη σταδία με την ειδική κωδικοποίηση barcode γίνεται με τη βοήθεια μιας

κάμερας CCD, υψηλής ακρίβειας και ευκρίνειας, η οποία είναι ευαίσθητη στο ορατό φως του φάσματος.

Η αποθήκευση των στοιχείων και των αποτελεσμάτων των μετρήσεων στο συγκεκριμένο χωροβάτη είναι βασισμένη στο σύστημα TPS700. Οι μετρήσεις αποθηκεύονται αυτόματα σε δυαδικό σύστημα σε μια εσωτερική μνήμη με δυνατότητα αποθήκευσης 6000 μετρήσεων ή 1650 στάσεων χωροβάτη. Επιπλέον, τα στοιχεία αυτά μπορούν να αποθηκευτούν και στην κάρτα PCMCIA η οποία τοποθετείται σε συγκεκριμένη υποδοχή και ως εκ τούτου οι μετρήσεις μπορούν να μεταφερθούν πολύ εύκολα στον υπολογιστή. Τα στοιχεία που αναγράφονται στη κάρτα μετατρέπονται σε αναγνώσιμη μορφή, όπως σε ένα αρχείο XML ή ASCII. Η άμεση αποθήκευση των μετρήσεων στην κάρτα δεν είναι εφικτή. Η κάρτα είναι πολύ χρήσιμη τόσο για την μεταφορά των δεδομένων στο γραφείο όσο και για τις συντεταγμένες των σταθερών σημείων και των κωδικών τους. Το περιεχόμενο τέτοιων αρχείων μπορεί να μεταφορτωθεί στο όργανο όποτε απαιτείται.

Επιπρόσθετα, ο χωροβάτης *Leica DNA03* διαθέτει LCD οθόνη υψηλής ανάλυσης. Είναι 8 γραμμές σε 24 χαρακτήρες. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-3, στη οθόνη μετά από μία μέτρηση εμφανίζεται όλη η σχετική πληροφορία όπως η αρίθμηση των μετρήσεων, η πραγματική ανάγνωση υψομέτρου πάνω στη σταδία, η σταθερή απόκλιση της μέτρησης καθώς επίσης και του μέσου όρου, συμπεριλαμβανόμενης της διάδοσης όλων των επαναλαμβανόμενων μετρήσεων. Επιπλέον, εμφανίζει αν επιλεγεί το υψόμετρο του σημείου, τη διόρθωσή του, τη σκόπευση στη σταδία και την απόσταση από αυτή. Εμφανίζονται μηνύματα σφάλματος εάν υπάρχει ανεπαρκής ή ανομοιόμορφος φωτισμός ή όταν ο χωροβάτης και η σκοπευτική γραμμή δεν είναι στην κανονική της θέση, δεν είναι οριζοντιωμένη.



Σχήμα 4-3: Η οθόνη του *Leica DNA03* μετά από μια μέτρηση
Figure 4-3: The screen of *Leica DNA03* after a measurement

Το πληκτρολόγιο του οργάνου (Σχήμα 4-4) έχει αλφανουμερικές ικανότητες. Τα βασικά κουμπιά είναι αυτά της εισόδου στο όργανο και της πλοήγησης σε αυτό. Τα πλήκτρα λειτουργίας και εντολών βρίσκονται στην αριστερή πλευρά του πληκτρολογίου ενώ αυτά που αφορούν αριθμούς και χαρακτήρες βρίσκονται στη δεξιά πλευρά.



Σχήμα 4-4: Το πληκτρολόγιο του *Leica DNA03*
Figure 4-4: The *Leica DNA03* keyboard
(Πηγή: *Leica DNA03 digital levels*, brochure, *Leica Geosystems*)

Οι κυριότερες μετρήσεις που μπορούν να γίνουν με τον *Leica DNA03* είναι οι εξής:

- Λαμβάνει μια απλή ανάγνωση πάνω στη σταδία την οποία εμφανίζει στην οθόνη
- Λαμβάνει η επαναλαμβανόμενες αναγνώσεις πάνω στη σταδία και στην οθόνη του οργάνου εμφανίζεται ο μέσος όρος ή και η διάμεσος, η τυπική απόκλιση και ο αριθμός η των αναγνώσεων
- Λαμβάνει αναγνώσεις μέχρι να επιτευχθεί η επιθυμητή αβεβαιότητα για την εργασία που εκτελείται, όπως αυτή έχει καθοριστεί από το χρήστη εκ των προτέρων
- Λαμβάνει πολλαπλές αναγνώσεις με προκαθορισμένη σειρά

Όσον αφορά τις συνθήκες φωτισμού, ο *Leica DNA03* μπορεί να μετρά τέλεια και χωρίς δυσκολίες κάτω από κανονικό και φυσικό φως. Αν οι συνθήκες φυσικού φωτισμού δυσκολέψουν (π.χ. σκιά, ομίχλη), τότε παρατείνεται ο χρόνος μέτρησης. Όταν δεν είναι δυνατή η λήψη μέτρησης λόγω ανεπαρκούς φωτισμού, εμφανίζεται μήνυμα λάθους στην οθόνη. Δεδομένης της υψηλής ευαισθησίας του αισθητήρα, μπορούν να πραγματοποιηθούν σταθερές μετρήσεις ακόμα και με δυσμενείς συνθήκες φωτισμού (π.χ. σούρουπο). Στον Πίνακα 4-1 παρουσιάζονται συνοπτικά τα τεχνικά χαρακτηριστικά και οι ακρίβειες του ψηφιακού χωροβάτη *Leica DNA03*, σύμφωνα με τον κατασκευαστή.

ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΑΚΡΙΒΕΙΕΣ	
Δυνατότητες χρήσης	γρήγορες μετρήσεις υψομέτρων, μετρήσεις υψομετρικών διαφορών, μετρήσεις Α' και Β' τάξης δικτύων, χαράξεις, μετρήσεις ακριβείας κ.α
Ακρίβεια	τυπική απόκλιση μέτρησης ύψους ανά 1km μετάβαση-επιστροφή (ISO 17123-2)
Ηλεκτρονική μέτρηση υψομέτρου:	
Σταδίες Invar	0.3 mm
Απλές σταδίες	1.0 mm
Οπτική μέτρηση υψομέτρου	2.0 mm
Ηλεκτρονική μέτρηση απόστασης	1cm/20m ή 5 mm/10 m (500ppm)
Εύρος απόστασης μέτρησης	
Ηλεκτρονική μέτρηση:	
Μήκος σταδίας ≥ 3 m (απλές σταδίες)	1.8 m – 110 m
Μήκος σταδίας = 3 m (σταδίες Invar)	1.8 m έως 60 m (προτείνεται από την εταιρία)
Μήκος σταδίας = 2.70 m (απλές σταδίες)	1.8 m έως 100 m
Μήκος σταδίας=1.82 m/2m (απλές σταδίες)	1.8 m έως 60 m
Οπτική μέτρηση	Από 0.60 m και πάνω
Χρόνος μέτρησης	περίπου 3 sec
Τύπος μετρήσεων και αποτελέσματα	ενιαία μέτρηση, μέση τιμή, διάμεσος, τυπική απόκλιση, επαναλαμβανόμενες μετρήσεις, απλή μέτρηση, μετρήσεις έως ότου επιτευχθεί συγκεκριμένη ακρίβεια κ.α
Προγράμματα μετρήσεων	μέτρηση και καταγραφή, υψόμετρο και απόσταση, μετάβαση και επιστροφή διαφορών ειδών, γρήγορο κλείσιμο, χαράξεις
Κωδικοποίηση σημείων	ένα μόνο σημείο, συνεχόμενη κωδικοποίηση
Αποθήκευση δεδομένων	
Εσωτερική μνήμη	6000 μετρήσεις ή 1650 στάσεις χωροβάτη
Αντίγραφα ασφαλείας	δυνατότητα κάρτας εισαγωγής PCMCIA (ATA-Flash/SRAM/CF)
Λειτουργίες απευθείας σύνδεσης	αποθήκευση αμέσως σε υπολογιστή σε μορφή GSI μέσω RS232
Ανταλλαγή δεδομένων στην εσωτερική μνήμη	GSI8/GSI16/XML
Τηλεσκόπιο	
Μεγέθυνση	24x
Γωνία ανοίγματος	2 ⁰
Οπτικό πεδίο	3.5 m σε απόσταση 100 m
Ισοσταθμητής	
Τύπος	εκκρεμές με μαγνητική απόσβεση
Εύρος κλίσης	$\pm 10'$
Ακρίβεια ρύθμισης ισοσταθμητή (τυπική απόκλιση)	0.3''
Οθόνη	LCD, 8 γραμμές με 24 χαρακτήρες
Μπαταρία	
GEB111	12ωρη λειτουργία
GEB121	24ωρη λειτουργία
Αντάπτορας μπαταρίας GAD39	αλκαλική μπαταρία, 6x LR6/AA/AM3, 1.5V
Βάρος	2.8 kg (συμπεριλαμβανομένης της μπαταρίας GEB111)
Συνθήκες λειτουργίας	
Θερμοκρασία μέτρησης	-20°C to +50°C
Θερμοκρασία αποθήκευσης	-40°C to +70°C
Σκόνη/νερό (IEC60529)	IP53
Υγρασία	95%, χωρίς υγροποίηση

Πίνακας 4-1: Τεχνικά χαρακτηριστικά και ακρίβειες του ψηφιακού χωροβάτη *Leica DNA03*

Table 4-1: Specifications and accuracies of *Leica DNA03* digital level

(Πηγή: www.metrica.gr)

4.6.2 Αξιολόγηση του χωροβάτη *Leica DNA03*

Ο εν λόγω χωροβάτης, παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα που σχετίζονται τόσο με τη διαδικασία μέτρησης όσο και με τα τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του, όπως:

- Αυτόματη μέτρηση και αποθήκευση υψομετρικής διαφοράς και απόστασης με το πάτημα ενός κουμπιού
- Εκμηδένιση σφάλματος ανάγνωσης και καταγραφής
- Διευκόλυνση καθημερινής εργασίας και μείωση του χρόνου παραμονής στο πεδίο
- Σύγκριση αποτελεσμάτων απευθείας στο πεδίο
- Εργονομικός σχεδιασμός
- Μεγάλη LCD οθόνη υψηλής ανάλυσης
- Αυτόματη καταγραφή και αποθήκευση των δεδομένων σε εσωτερική μνήμη 6000 μετρήσεων
- Συνεργασία με το λογισμικό LGO με δυνατότητες συνόρθωσης – *Design and Adjustment* 1D δικτύου και επίλυσης χωροσταθμικού δικτύου-*Level Data processing and analysis*
- Σύγκριση “κλεισίματος” χωροσταθμικής όδευσης μέσω της λειτουργίας “*Quick-closure*” και χρήση του *Line Adjustment* για τη συνόρθωση χωροσταθμικής όδευσης
- “*Point to Point*” λειτουργία για την εύρεση υψομέτρων ενδιάμεσων σημείων
- Δυνατότητα ταυτόχρονης μέτρησης “*aller-retour*” (Γερμανική μέθοδος)
- Διόρθωση λόγω καμπυλότητας της γης
- Διόρθωση του σφάλματος οριζοντίωσης
- Επιλογή μεταξύ μεθόδων μέτρησης: *single, average, median, repeated single measurements*
- Ευελιξία παρουσίασης των δεδομένων

Ωστόσο, εκτός από τα πλεονεκτήματα σημαντικό είναι να αναφερθούν και τα μειονεκτήματα που σχετίζονται με το χωροβάτη:

- Αρκετά υψηλό κόστος αγοράς σε σχέση με άλλους χωροβάτες
- Σε κακές συνθήκες φωτισμού, είναι δυνατή η μέτρηση με επιβαλλόμενο φωτισμό στο σημείο που σκοπεύει το όργανο αλλά με πολύ λιγότερη ικανότητα.

5 ΚΑΛΩΔΙΩΤΗ ΓΕΦΥΡΑ ΣΕΑ ΠΑΛΛΗΝΗΣ, ΑΤΤΙΚΗΣ ΟΔΟΥ

Στο Κεφάλαιο αυτό, δίνονται ορισμένα βασικά στοιχεία για την καλωδιωτή γέφυρα του Σταθμού Εξυπηρέτησης Αυτοκινήτων Παλλήνης, Αττικής Οδού ΑΕ. Πραγματοποιείται μια γενική περιγραφή της γέφυρας και αναφέρονται τα δομικά της στοιχεία.

5.1 Γενική Περιγραφή της Γέφυρας

Στη χιλιομετρική θέση 40,2 km της Αττικής οδού στη θέση της Παιανίας έχει κατασκευαστεί ο Σταθμός Εξυπηρέτησης Αυτοκινήτων Μεσογείων με όνομα *Motorolis*, ο οποίος καταλαμβάνει έκταση 68 στρεμμάτων σε δύο τμήματα, εκατέρωθεν της Αττικής Οδού, τα οποία ενώνονται με μία κρεμαστή γέφυρα για οχήματα και πεζούς (Σχήμα 5-1). Η υπέργεια δόμηση ανέρχεται περίπου σε 33.700 m². ενώ οι υπόγειοι χώροι έχουν εμβαδόν περίπου 12.000 m². και περιλαμβάνουν υποδομές εξυπηρέτησης αυτοκινητιστών όπως γραφεία εξυπηρέτησης πελατών της Αττικής Οδού, πρατήρια υγρών καυσίμων, πλυντήριο αυτοκινήτων, λιπαντήριο, συνεργείο ελαστικών, καθώς και εμπορικές αναπτύξεις όπως ταχυεστιατόρια και κτίρια γραφείων.



Σχήμα 5-1: Καλωδιωτή γέφυρα ΣΕΑ Μεσογείων, Παλλήνη
Figure 5-1: Cable bridge at SEA Mesogeion, Pallini

Η πλάκα καταστρώματος σκυροδετείται επί τραπεζοειδούς λαμαρίνας πάχους 1.25 mm. Η διατομή της είναι αμφικλινής, ωφέλιμου πλάτους 7.50 m με πεζοδρόμια πλάτους 2.15 m. Οι εγκάρσιες επικλίσεις, ίσες προς 2.50%, υλοποιούνται με κατάλληλη μόρφωση των διαδοκίδων (Σχήμα 5-4).

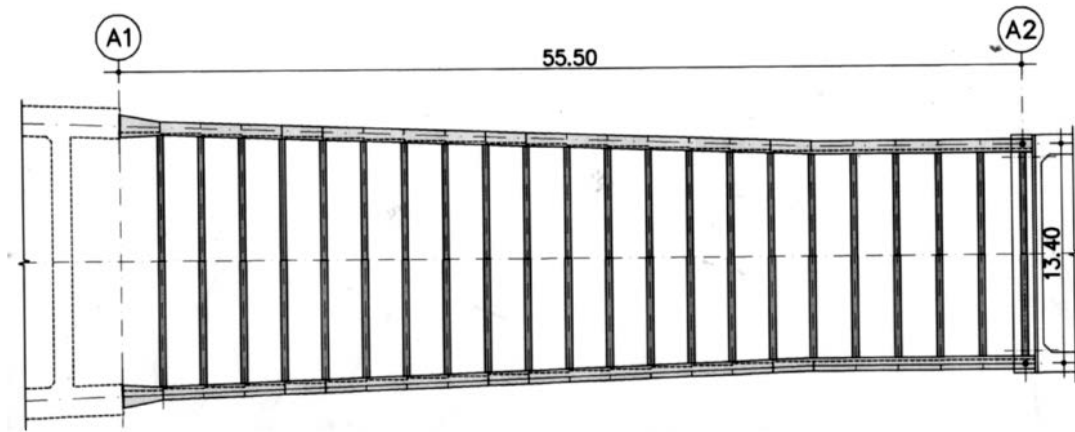
Οι κύριες δοκοί του φορέα καταστρώματος αναρτώνται από δίδυμο πυλώνα, σχήματος "Λ", εδραζόμενο στο ακρόβαθρο A1. Το σύστημα ανάρτησης αποτελείται από τρία ζεύγη αναρτήρων:

- No 1 19TSR15, FGUTS = 5035 kN
- No 2 42TSR15, FGUTS = 11,130 kN
- No 3 42TSR15, FGUTS = 11,130 kN

Οι κύριες δοκοί πακτώνονται στο ακρόβαθρο A1 συρραπτόμενες με τένοντες προεντάσεως και εδράζονται επί ελαστομεταλλικών εφεδράνων $300 \times 400 \times 88$ (148) στο ακρόβαθρο A2. Ο πυλώνας συντίθεται από τους προεντεταμένους ελκυστήρες και τις χαλύβδινες αντηρίδες S355. Στους ελκυστήρες εφαρμόζεται κεντρική προένταση με 12 τένοντες διατομής $19 \times 0.6''$ κατηγορίας 1570/1770 (Σχήμα 5-4).

Η κεφαλή του πυλώνα, όπου φιλοξενούνται οι κεφαλές αγκύρωσης των αναρτήρων, συνιστά στοιχείο βαρύνουσας σημασίας για το έργο. Η γεωμετρία της είναι περίπλοκη και καθορίζεται τόσο από το μέγεθος της αναπτυσσόμενης έντασης όσο και από τη γεωμετρική χάραξη των αναρτήρων και των αντηρίδων του πυλώνα. Η κεφαλή προβλέπεται από σκυρόδεμα B55 (Σχήμα 5-5).

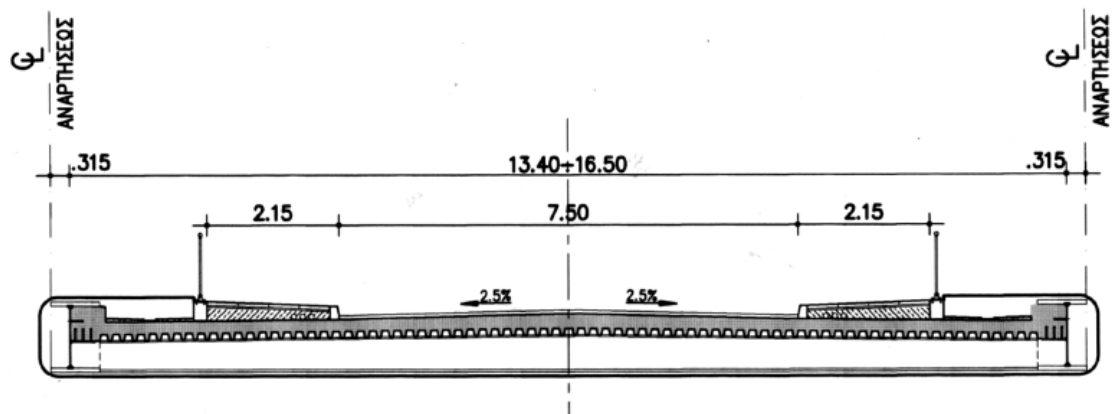
Το ακρόβαθρο A1, στο οποίο θεμελιώνεται ο πυλώνας της γέφυρας, είναι σύνθετη κατασκευή. Εσωτερικά μορφώνεται θάλαμος, ο οποίος πληρώνεται κατά το ήμισυ με σκυρόδεμα B5 (αντίβαρο). Θεμελιώνεται επί πασσάλων $2 \times 7 \text{ } \varnothing 120$, $L = 30.00$ m. Πρόσθετοι πάσσαλοι $7 \varnothing 120$, $L = 16.00$ m, ενεργοποιούμενοι μόνο υπό τις σεισμικές δράσεις σχεδιασμού, παραλαμβάνουν τις σεισμικές ανωστικές δυνάμεις (εξόλκευσης). Το ακρόβαθρο A2 είναι κλασικό, θεμελιούμενο επί πασσάλων $2 \times 4 \text{ } \varnothing 120$, $L = 28.00$ m (Σχήμα 5-6).



Σχήμα 5-3: Διαδοκίδωση καταστρώματος

Figure 5-3: Trabeclulation of the deck

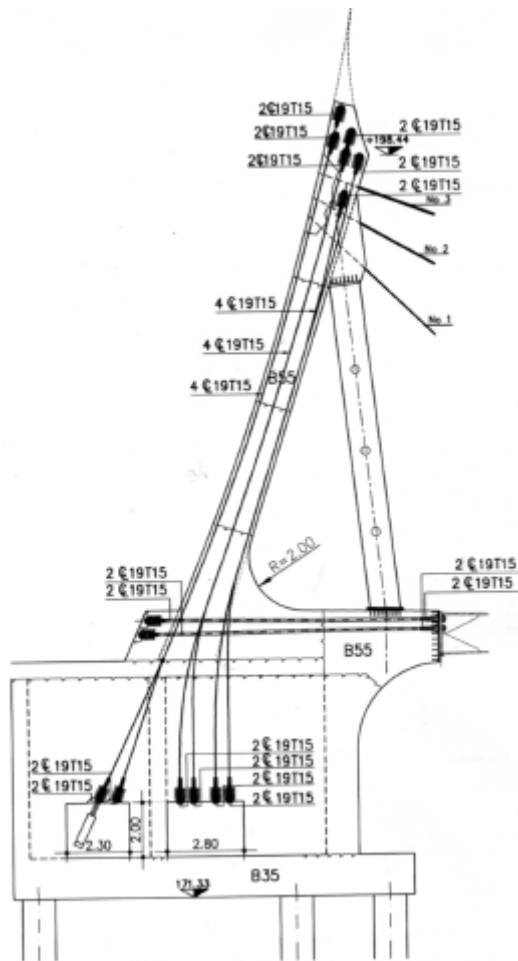
(Πηγή: Καλωδιωτή γέφυρα ΣΕΑ Παλλήνης, Σ. Σταθόπουλος, Π. Κοτσανόπουλος, Ε. Σταθόπουλος., Κ. Σταθόπουλος, Βιβλιοθήκη ΤΕΕ)



Σχήμα 5-4: Διατομή καταστρώματος

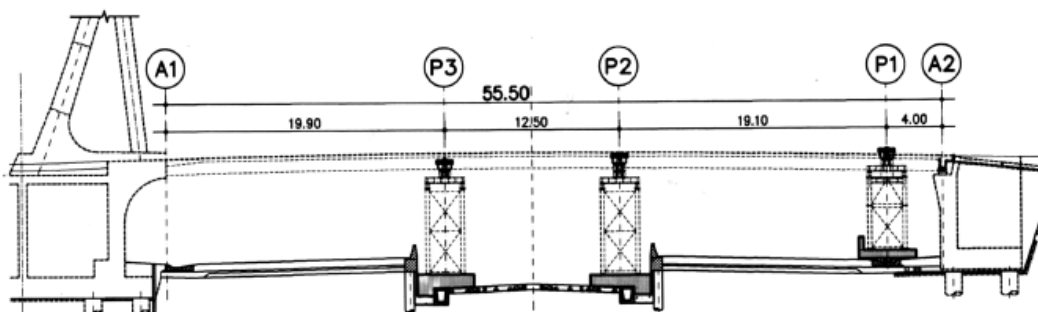
Figure 5-4: Cross section of the deck

(Πηγή: Καλωδιωτή γέφυρα ΣΕΑ Παλλήνης, Σ. Σταθόπουλος, Π. Κοτσανόπουλος, Ε. Σταθόπουλος., Κ. Σταθόπουλος, Βιβλιοθήκη ΤΕΕ)



Σχήμα 5-5: Ανάπτυγμα πυλώνα
Figure 5-5: Presentation of the pillar

(Πηγή: Καλωδιωτή γέφυρα ΣΕΑ Παλλήνης, Σ. Σταθόπουλος, Π. Κοτσανόπουλος, Ε. Σταθόπουλος., Κ. Σταθόπουλος, Βιβλιοθήκη ΤΕΕ)



Σχήμα 5-6: Διάταξη βάθρων
Figure 5-6: Order of pedestals

(Πηγή: Καλωδιωτή γέφυρα ΣΕΑ Παλλήνης, Σ. Σταθόπουλος, Π. Κοτσανόπουλος, Ε. Σταθόπουλος., Κ. Σταθόπουλος, Βιβλιοθήκη ΤΕΕ)

6 ΠΡΟΠΑΡΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΑΙ ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΕΔΙΟΥ

Στο Κεφάλαιο 6 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 και των σημείων χωροστάθμησης. Επιπλέον, αναφέρονται τα σενάρια παρατήρησης της γέφυρας που σχετίζονται με τις θέσεις τοποθέτησης του φορτίου (φορτηγού οχήματος). Στη συνέχεια, περιγράφονται οι διαδικασίες συλλογής των δεδομένων πεδίου. Τέλος, γίνεται αναφορά στα μετεωρολογικά δεδομένα που επικρατούν στην περιοχή την ημέρα διεξαγωγής των μετρήσεων.

6.1 Προπαρασκευαστικές Εργασίες

Είναι σαφές ότι η διαδικασία συλλογής των μετρήσεων αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα σημεία μιας μελέτης, έτσι ώστε το αποτέλεσμα 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 ΣΕΑ Παλλήνης, Αττικής Οδού. Για την εκτέλεση αξιόπιστων μετρήσεων απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί η εκτέλεση 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.

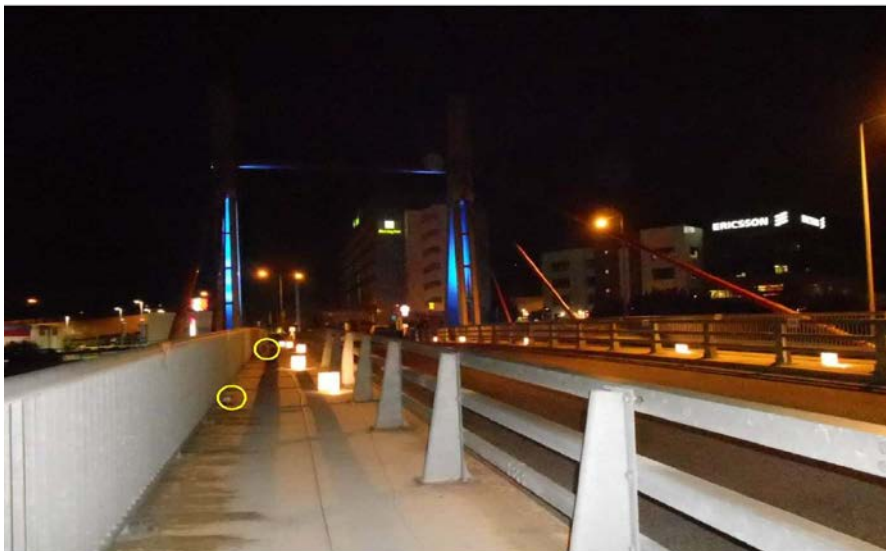
Ο σχεδιασμός περιλαμβάνει την επιλογή των κατάλληλων οργάνων και του εξοπλισμού, τις θέσεις τοποθέτησής τους ώστε ικανοποιούνται οι απαιτήσεις ακρίβειας και αμοιβαίας ορατότητας, τα σενάρια παρατήρησης, ζητήματα συγχρονισμού των αισθητήρων, την επιλογή της κατάλληλης ημέρας και ώρας που για την πραγματοποίηση των μετρήσεων που σχετίζονται κυρίως με τις καιρικές συνθήκες.

Με βάση την ανάλυση επιλύσεων πεπερασμένων στοιχείων που πραγματοποιείται από την ομάδα έργου, επιλέγονται οι θέσεις στις οποίες κρίνεται σκόπιμο να εγκατασταθούν τα κλισίμετρα *Nivel220*. Συγκεκριμένα, οι αισθητήρες αυτοί τοποθετούνται στα σημεία της μέγιστης αναμενόμενης μεταβολής της καμπυλότητας του καταστρώματος της γέφυρας κατά την επιβολή του φορτίου. Αποφασίζεται να τοποθετηθούν πέντε κλισίμετρα στη μια παρειά της γέφυρας (στην επιφάνεια του πεζοδρομίου) και συγκεκριμένα στην παρειά που βρίσκεται προς την Ελευσίνα. Οι αποστάσεις των στόχων για τη χωροθέτηση των κλισιμέτρων με αφετηρία τον αρμό της γέφυρας (μπλε γραμμή Σχήμα 6-3) παρουσιάζονται στον Πίνακα 6-1.

<i>Inclinometer</i>	<i>Απόσταση από αφετηρία</i>
<i>Nivel 5 (N5)</i>	9.00m
<i>Nivel 4 (N4)</i>	15.00m
<i>Nivel 3 (N3)</i>	28.00m
<i>Nivel 2 (N2)</i>	42.50m
<i>Nivel 1 (N1)</i>	53.20m

Πίνακας 6-1: Αποστάσεις στόχων για τις μετρήσεις με κλισίμετρα
Table 6-1: Targets' distances for inclinometers' measurements

Στο Σχήμα 6-1 παρουσιάζεται ενδεικτικά η θέση των δύο από τα πέντε κλισίμετρα (κίτρινος κύκλος).



Σχήμα 6-1: Ενδεικτική θέση τοποθέτησης δύο κλισιμέτρων (κίτρινος κύκλος)
Figure 6-1: Indicative installation position of two inclinometers (yellow circle)

Ωστόσο, για την αξιολόγηση των δυνατοτήτων των ψηφιακών κλισιμέτρων στη μελέτη της δομικής ακεραιότητας της γέφυρας ΣΕΑ Παλλήνης Αττικής Οδού, αποφασίζεται να υπολογιστούν αρχικά οι κατακόρυφες μετατοπίσεις αυτής μέσω μετρήσεων γεωμετρικής χωροστάθμησης. Στη συνέχεια, θα είναι δυνατή η σύγκριση των βυθίσεων που προκύπτουν από την επεξεργασία των δεδομένων της γεωμετρικής χωροστάθμησης με αυτές που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων των κλισιμέτρων. Πιο συγκεκριμένα, οι μετατοπίσεις της γεωμετρικής χωροστάθμησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πρότυπο για την αξιολόγηση των μετατοπίσεων των κλισιμέτρων.

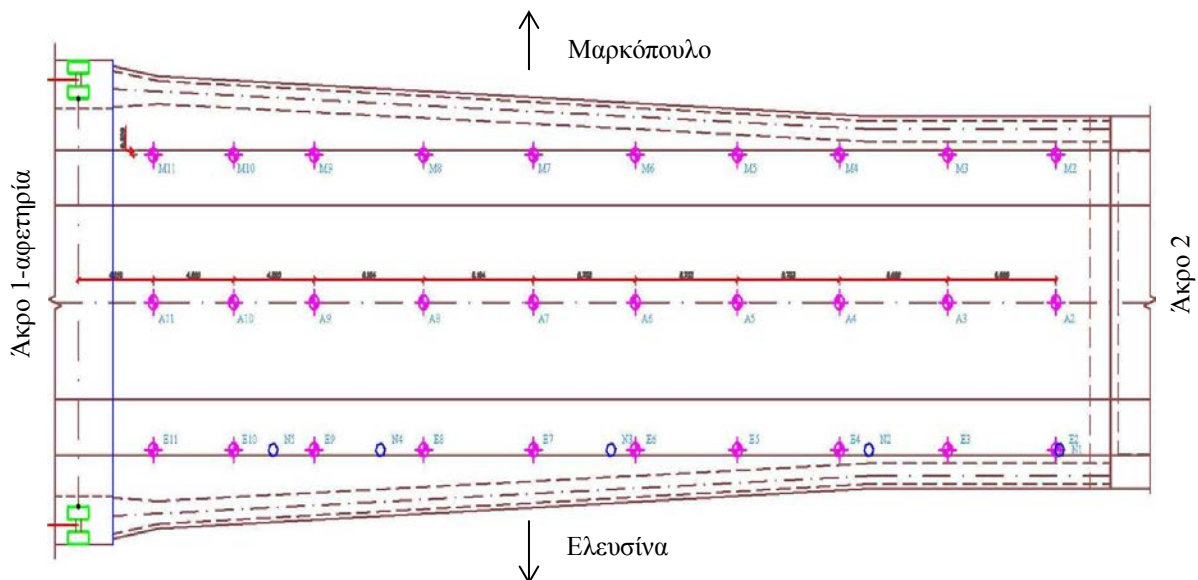
Για την εκτέλεση της γεωμετρικής χωροστάθμησης δημιουργούνται χωροσταθμικές οδούσεις κατά μήκος τριών παράλληλων αξόνων επί της γέφυρας. Συγκεκριμένα, ο ένας άξονας ορίζεται κατά μήκος της παρειάς της γέφυρας προς την Ελευσίνα (επί του πεζοδρόμιου), ο άλλος στην άλλη παρειά της γέφυρας προς Μαρκόπουλο (επί του πεζοδρόμιου) και ο τρίτος είναι ο ίδιος ο κύριος άξονας της γέφυρας (Σχήμα 6-3).

Τα χωροσταθμικά σημεία τοποθετούνται σε ισαπέχουσες αποστάσεις και διατρέχουν το κατάστρωμα στο σύνολό τους. Επομένως, ορίζονται δώδεκα χωροσταθμικά σημεία ανά άξονα (Ελευσίνα, Μαρκόπουλο, κύριος άξονας γέφυρας). Οι υψομετρικές διαφορές αυτών θα υπολογιστούν με τη βοήθεια σημείων γνωστών υψομέτρων (Réper). Για να οριστούν τα σημεία αυτά επί της γέφυρας χρησιμοποιούνται κατάλληλα σχεδιασμένοι ήλοι που πακτώνονται επάνω στην επιφάνεια της γέφυρας (Σχήμα 6-2). Για τη συγκεκριμένη μελέτη, δεδομένου ότι τα κλισίμετρα έχουν εγκατασταθεί στην παρειά της Ελευσίνας, θα χρησιμοποιηθούν για ανάλυση και συγκρίσεις μόνο τα χωροσταθμικά σημεία που βρίσκονται στην παρειά της Ελευσίνας (E1-E12). Τα υπόλοιπα (A1-A12 και M1-M12) θα χρησιμοποιηθούν για συγκρίσεις σε μελλοντικές έρευνες και με άλλα όργανα παρακολούθησης.



Σχήμα 6-2: Χωροσταθμικό σημείο
Figure 6-2: Leveling point

Στο Σχήμα 6-3 παρουσιάζεται ένα σχέδιο της γέφυρας όπου απεικονίζονται τα σημεία των χωροσταθμικών οδεύσεων (ματζέντα κύκλοι) και οι θέσεις στις οποίες έχουν τοποθετηθεί τα κλισίμετρα (μπλε πολύγωνα). Επιπλέον, οι αποστάσεις των χωροσταθμικών σημείων από την αφετηρία, δηλαδή τον αρμό (μπλε γραμμή Σχήμα 6-3), καθώς επίσης και οι αποστάσεις μεταξύ των χωροσταθμικών σημείων παρουσιάζονται στον Πίνακα 6-2.



Σχήμα 6-3: Σχηματική αναπαράσταση χωροσταθμικών σημείων (ματζέντα κύκλοι) και θέσεων κλισιμέτρων (μπλε πολύγωνα)
Figure 6-3: Schematic representation of leveling points (magenta circles) and positions of inclinometers (blue polygons)

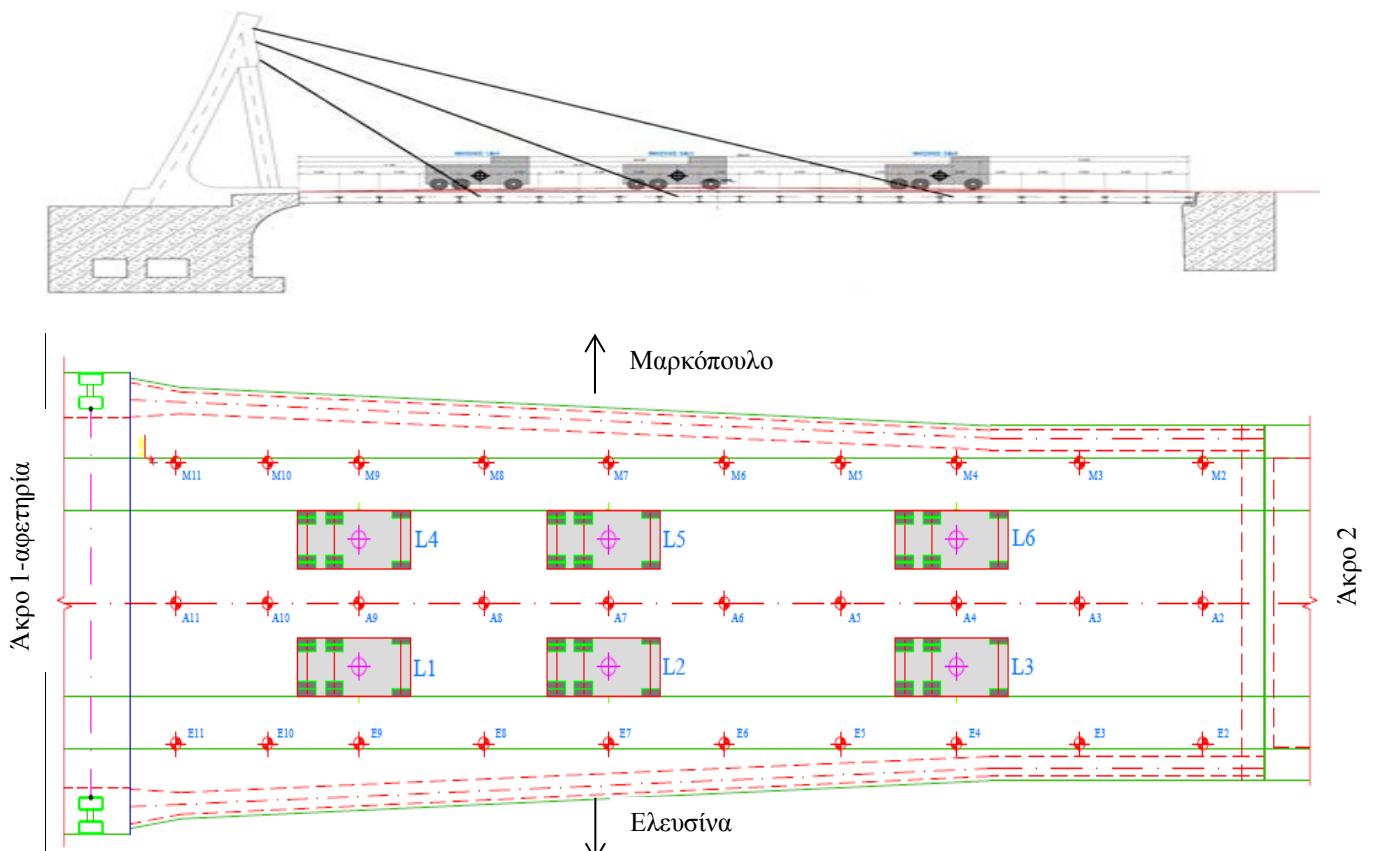
Χωροσταθμικό σημείο	Απόσταση από αφετηρία (m)	Αποστάσεις μεταξύ (m)	
E1, M1	76.006	E1-E2, M1-M2	23.000
A1	65.790	A1-A2	12.784
E2, A2, M2	53.006	E2-E3, A2-A3, M2-M3	6.088
E3, A3, M3	46.917	E3-E4, A3-A4, M3-M4	6.088
E4, A4, M4	40.829	E4-E5, A4-A5, M4-M5	5.733
E5, A5, M5	35.096	E5-E6, A5-A6, M5-M6	5.733
E6, A6, M6	29.362	E6-E7, A6-A7, M6-M7	5.733
E7, A7, M7	23.629	E7-E8, A7-A8, M7-M8	6.164
E8, A8, M8	17.464	E8-E9, A8-A9, M8-M9	6.164
E9, A9, M9	11.300	E9-E10, A9-A10, M9-M10	4.520
E10, A10, M10	6.780	E10-E11, A10-A11, M10-M11	4.520
E11, A11, M11	2.260		

Πίνακας 6-2: Αποστάσεις χωροσταθμικών σημείων μεταξύ τους και από την αφετηρία
Table 6-2: Distances among the leveling points and the starting point

Για τη διενέργεια των στατικών δοκιμαστικών φορτίσεων χρησιμοποιήθηκε τριαξονικό φορτηγό όχημα της Αττικής Οδού ΑΕ συνολικής μάζας 30 ton (Σχήμα 6-4). Το όχημα τοποθετήθηκε συνολικά σε έξι θέσεις του καταστρώματος όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-5. Ειδικότερα, προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση του φορτίου στα καλώδια, το όχημα τοποθετήθηκε πλησίον των θέσεων απόληξης των καλωδίων σε κάθε παρειά του καταστρώματος.



Σχήμα 6-4: Φορτηγό όχημα για τη στατική καταπόνηση της γέφυρας
Figure 6-4: Truck for the static load test of the bridge



Σχήμα 6-5: Σχηματική αναπαράσταση των θέσεων του φορτηγού οχήματος επάνω στη γέφυρα
Figure 6-5: Schematic representation of the positions of the truck on the bridge
(Πηγή: Καλωδιωτή γέφυρα στο ΣΕΑ Παλλήνης της Αττικής Οδού, Καρυδάκης Φ. Σ, 2014)

Σύμφωνα με τα προαναφερθέντα, για κάθε θέση τοποθέτησης του φορτηγού οχήματος δημιουργείται ένα σενάριο παρατήρησης. Ωστόσο, προκειμένου να υπολογιστεί η βύθιση της γέφυρας απαιτείται η λήψη μετρήσεων χωρίς την επιβολή φορτίου. Επομένως, συνολικά υλοποιούνται οκτώ διαφορετικά σενάρια παρατήρησης, κάθε ένα από τα οποία επεξηγείται στον Πίνακα 6-3.

κωδικός σεναρίου παρατήρησης	περιγραφή σεναρίου
L0	Χωρίς φορτηγό όχημα
L1	Φορτηγό όχημα στη θέση 1
L2	Φορτηγό όχημα στη θέση 2
L3	Φορτηγό όχημα στη θέση 3
L4	Φορτηγό όχημα στη θέση 4
L5	Φορτηγό όχημα στη θέση 5
L6	Φορτηγό όχημα στη θέση 6
L7	Χωρίς φορτηγό όχημα

Πίνακας 6-3: Σενάρια στατικών δοκιμαστικών φορτίσεων
Table 6-3: Static load testing scenarios

6.2 Συλλογή Δεδομένων Πεδίου

Στην γέφυρα ΣΕΑ Παλλήνης, Αττικής Οδού πραγματοποιήθηκαν πολλές επισκέψεις αναγνωριστικού χαρακτήρα καθώς λήψης προκαταρκτικών μετρήσεων προκειμένου να γίνει η κατάλληλη προετοιμασία για την οριστική διεξαγωγή των μετρήσεων. Πιο συγκεκριμένα, υλοποιήθηκαν οι θέσεις χωροσταθμικών σημείων και σημάνθηκαν κατάλληλα οι θέσεις τοποθέτησης των κλισιμέτρων. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν δοκιμαστικές μετρήσεις αρκετές φορές προκειμένου να εντοπιστούν και να διορθωθούν τυχόν ατέλειες του σχεδιασμού του πειράματος αλλά και να ελεγχθεί η ορθή λειτουργία των οργάνων.

Η ημέρα διεξαγωγής των τελικών μετρήσεων οριστικοποιήθηκε σε συνεννόηση με την Αττική Οδό. Συγκεκριμένα, τη συγκεκριμένη ημέρα έπρεπε οι καιρικές συνθήκες να είναι κατάλληλες και να μην υπάρχουν τοπικές θερμοκρασιακές μικρο-διαφορές. Συγκεκριμένα, να μην υπάρχει βροχόπτωση η οποία δυσκολεύει τις εργασίες πεδίου ή δυνατοί άνεμοι που να επηρεάζουν τη συμπεριφορά της κατασκευής. Επιπλέον,

επειδή η Αττική Οδός έπρεπε να τεθεί εκτός λειτουργίας τις ώρες συλλογής των δεδομένων, οι μετρήσεις έγιναν αργά το βράδυ.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, η μέρα που επιλέχθηκε για τη διεξαγωγή των μετρήσεων ήταν το βράδυ της Τρίτης 18 Φεβρουαρίου 2014 ξημερώνοντας προς Τετάρτη 19 Φεβρουαρίου 2014. Οι άνεμοι που επικρατούσαν στην περιοχή από τις 23:00 έως τις 6:00 κυμάνθηκαν στα 0.08 Beaufort και η μέση θερμοκρασία ήταν 9.1 °C.

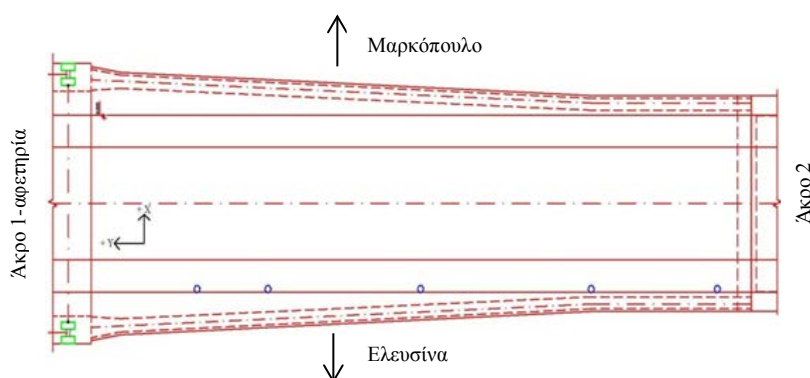
Ο απαραίτητος εξοπλισμός για τη διεξαγωγή των μετρήσεων μεταφέρθηκε με τη βοήθεια οχήματος της Αττικής Οδού. Τα κλισίμετρα τοποθετήθηκαν στις θέσεις που είχαν προαποφασιστεί. Οι πέντε αισθητήρες συνδέθηκαν σε σειρά χρησιμοποιώντας μια RS485 διασύνδεση όπως περιγράφεται στην Ενότητα 3.3.3. Η διασύνδεση έγινε μέσω καλωδίων και στη συνέχεια συνδέθηκαν με το μετατροπέα και τον ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Πιο συγκεκριμένα, κάθε αισθητήρας *Nivel* προσαρτήθηκε πάνω σε τρικόχλιο με δέστρες (*tire-up*) και το όλο σύστημα (κλισίμετρο-τρικόχλιο) τοποθετήθηκε σε ειδική, μεταλλική, τετράγωνη βάση που προσκολλήθηκε με ειδική κόλλα (ρητίνη) στην παρειά της γέφυρας προκειμένου να είναι σε συνεχή επαφή με αυτή και πραγματοποιήθηκε οριζοντίωσή τους με τη βοήθεια της σφαιρικής αεροστάθμης που διαθέτουν (Σχήμα 6-6).



Σχήμα 6-6: Εγκατάσταση συστήματος κλισίμετρου στη γέφυρα
Figure 6-6: Installation of inclinometer system in the bridge

Επιπλέον, ιδιαίτερη σημασία έχει ο προσανατολισμός των κλισιμέτρων. Αυτά τοποθετήθηκαν έτσι ώστε ο άξονας $x'x$ να είναι παράλληλος με τη διεύθυνση Ελευσίνα-Μαρκόπουλο (+X: προς Μαρκόπουλο, -X: προς Ελευσίνα) και ο άξονας $y'y$ να είναι παράλληλος με το μήκος της γέφυρας (+Y: Άκρο 1-αφετηρία, -Y: Άκρο 2). Στο Σχήμα 6-7 απεικονίζεται το σκαρίφημα και γέφυρας με τις αντίστοιχες διευθύνσεις προσανατολισμού των κλισιμέτρων.



Σχήμα 6-7: Διευθύνσεις προσανατολισμού κλισιμέτρων
Figure 6-7: Orientation directions of inclinometers

Όσον αφορά στη γεωμετρική χωροστάθμηση, ο χωροβάτης *Leica DNA03* με την τρίποδά του τοποθετήθηκε σε δύο διαφορετικές θέσεις που βρίσκονται στο Άκρο 2 της γέφυρας. Η μία θέση είναι στην παρειά προς Ελευσίνα (Σχήμα 6-8) και η άλλη στην παρειά προς Μαρκόπουλο. Αυτό γίνεται για λόγους ορατότητας της σταδίας όταν αλλάζει θέσεις το φορτηγό όχημα.



Σχήμα 6-8: Χωροβάτης στη θέση X1 στην παρειά προς Ελευσίνα
Figure 6-8: Level in position X1 at the side to Elefsina

Για την πραγματοποίηση της γεωμετρικής χωροστάθμησης χρησιμοποιούνται τρεις σταδίες Invar, από συνθετικό υλικό (*fiberglass*), με πολύ μικρό συντελεστή θερμικής διαστολής. Στις συγκεκριμένες σταδίες, η αρίθμηση έχει αντικατασταθεί από κώδικα *barcode* (Σχήμα 6-9). Αξίζει να αναφερθεί ότι για την εκτέλεση της χωροστάθμησης, λόγω της ώρας των μετρήσεων (23.30 – 05.30) και ως εκ τούτου έλλειψης επαρκούς φωτισμού, χρησιμοποιείται φακός ή προβολέας (σε ορισμένα σημεία) ώστε να φωτιστεί η σταδία και να διευκολυνθεί η σκόπευση σε αυτή αλλά και η ηλεκτρονική ανάγνωση (λήψη «εικόνας») από τον ψηφιακό χωροβάτη.



Σχήμα 6-9: Σταδία invar γεωμετρικής χωροστάθμησης
Figure 6-9: Invar stave used for precise leveling operations

Επιπρόσθετα, κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, ένα άτομο από το συνεργείο ανέλαβε την καταγραφή του χρόνου όλων των ενεργειών, συνθηκών και συμβάντων που συνέβησαν κατά τη διάρκεια των εργασιών πεδίου. Πιο συγκεκριμένα, καταγράφηκε ο χρόνος έναρξης λήψης μετρήσεων κάθε οργάνου (κλισίμετρα, χωροβάτης). Η καταγραφή του χρόνου πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια δέκτη GPS χειρός.

Κατόπιν τοποθέτησης και σύνδεσης των κλισιμέτρων μεταξύ τους και με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή, ρύθμισης των κατάλληλων παραμέτρων στον υπολογιστή, προετοιμασίας της χωροστάθμησης (τοποθέτηση ψηφιακού χωροβάτη στον τρίποδα, οριζοντίωση) και έλεγχου λήψης μετρήσεων στη σταδία, ξεκίνησε η λήψη μετρήσεων για το πρώτο σενάριο παρατήρησης L0 (χωρίς φορτηγό όχημα).

Στη συνέχεια, ακολούθησε η λήψη μετρήσεων για τα υπόλοιπα σενάρια (L1, L2, L3, L4, L5, L6) όπου το φορτηγό όχημα τοποθετήθηκε αντίστοιχα σε μία από τις έξι θέσεις που περιγράφονται στην Ενότητα 6.1. Ειδικότερα, για κάθε μία από τις θέσεις στις οποίες βρίσκεται το φορτηγό όχημα, πραγματοποιήθηκε γεωμετρική

χωροστάθμιση για των υπολογισμό των υψομέτρων των χωροσταθμικών σημείων που έχουν οριστεί (E1 έως E12, A1 έως A12, M1 έως M12). Η θέση του χωροβάτη από την οποία έγιναν αναγνώσεις στη σταδία σε κάθε διατομή, για κάθε σενάριο παρατήρησης (Θέση X1: παρειά Ελευσίνας, Θέση X2: παρειά Μαρκόπουλου) εξαρτάται από τη θέση στην οποία τοποθετείται το φορητό όχημα. Αυτό συμβαίνει για να εξασφαλίζεται ορατότητα μεταξύ χωροβάτη και σταδίας. Τέλος, η διαδικασία ολοκληρώθηκε με το σενάριο παρατήρησης L7 όπου λαμβάνονται ξανά μετρήσεις χωρίς την επιβολή φορτίου. Οι Πίνακες 6-4 και 6-5 απεικονίζουν την ημερομηνία των μετρήσεων, την ώρα έναρξης, λήξης κάθε σεναρίου παρατήρησης για τις μετρήσεις των κλισιμέτρων και της γεωμετρικής χωροστάθμισης, αντίστοιχα.

Σενάριο παρατήρησης	Ημερομηνία	Έναρξη μέτρησης (hh:mm:ss)	Λήξη μέτρησης (hh:mm:ss)
L0	18-19/02/2014	23:33:43	02:24:11
L1	19/02/2014	02:31:01	02:53:39
L2	19/02/2014	02:54:11	03:18:16
L3	19/02/2014	03:18:50	03:35:14
L4	19/02/2014	03:36:54	04:00:04
L5	19/02/2014	04:00:41	04:23:00
L6	19/02/2014	04:24:05	04:41:28
L7	19/02/2014	04:51:44	05:25:19

Πίνακας 6-4: Ημερομηνία και ώρα έναρξης, λήξης κάθε σεναρίου παρατήρησης για τις μετρήσεις με κλισίμετρα
Table 6-4: Date, starting time and ending time of each monitoring scenario for the inclinometer measurements

Σενάριο παρατήρησης	Ημερομηνία	Έναρξη μέτρησης (hh:mm:ss)	Λήξη μέτρησης (hh:mm:ss)
L0	19/02/2014	01:04:17	02:18:12
L1	19/02/2014	02:32:07	02:52:44
L2	19/02/2014	02:57:55	03:17:35
L3	19/02/2014	03:20:00	03:34:00
L4	19/02/2014	03:38:59	03:59:48
L5	19/02/2014	04:02:13	04:22:28
L6	19/02/2014	04:24:40	04:40:19
L7	19/02/2014	04:52:15	05:13:07

Πίνακας 6-5: Ημερομηνία και ώρα έναρξης, λήξης κάθε σεναρίου παρατήρησης για τις μετρήσεις της γεωμετρικής χωροστάθμισης
Table 6-5: Date, starting time and ending time of each monitoring scenario for the precise leveling measurements

6.3 Μετεωρολογικά Δεδομένα

Ο σχεδιασμός της διαδικασίας δοκιμαστικών φορτίσεων προβλέπει τη λήψη μετρήσεων σε συνθήκες πολύ μικρής έντασης του ανέμου. Το γεγονός της μειωμένης έντασης του ανέμου επιδιώκεται προκειμένου να εξαχθούν όσο τον δυνατόν πολυτιμότερα συμπεράσματα για τη στατική συμπεριφορά της κατασκευής, χωρίς την επίδραση του ανέμου. Τα μετεωρολογικά δεδομένα για το διάστημα των δοκιμών, λαμβάνονται τόσο από τον ιδιωτικό μετεωρολογικό σταθμό του κυρίου Γεώργιου Μαναϊλόγλου που βρίσκεται στην περιοχή Κάντζα Παλλήνης, όσο και από τα κλισίμετρα *Nivel220* τα οποία παρέχουν πληροφορίες μόνο για τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Όσον αφορά τον μετεωρολογικό σταθμό της Κάντζας Παλλήνης βρίσκεται σε υψόμετρο 180 m. Ο τύπος του σταθμού είναι ο La crosse ws3600 και οι αισθητήρες του βρίσκονται στα 11 m από το έδαφος. Ο La crosse ws3600 αποτελείται από την κεντρική μονάδα όπου συνδέεται με τον υπολογιστή μέσω σειριακής θύρας (COM port), από ένα ενσύρματο βροχόμετρο και ένα ανεμόμετρο όπου συνδέονται με το θερμο-υγρο-βαρόμετρο όπου αυτό ενσύρματα (δυνατότητα και ασύρματης μετάδοσης) συνδέεται με την κεντρική μονάδα του σταθμού (Σχήμα 6-10).



Σχήμα 6-10: Ο μετεωρολογικός σταθμός La crosse ws3600 στην Κάντζα Παλλήνης

Figure 6-10: The weather station La crosse ws3600 at Kantza Pallini

(Πηγή: <http://www.meteorama.gr/>)

Στον Πίνακα 6-6 παρουσιάζονται αναλυτικά για τις ημερομηνίες των μετρήσεων και για τη χρονική διάρκεια της εκτέλεσης του πειράματος, η θερμοκρασία, η υγρασία και η ταχύτητα του ανέμου. Τα δεδομένα αυτά λαμβάνονται με συχνότητα 5-6 sec. Σύμφωνα με τον Πίνακα 6-6, το χρονικό διάστημα της λήψης μετρήσεων και

συγκεκριμένα από 00:03:00 πμ έως 05:16:00 πμ η μέση θερμοκρασία στην περιοχή της Κάντζας κυμαίνεται στους 10.6 °C, η μέση ταχύτητα του ανέμου είναι 0.067 km/h και η υγρασία αγγίζει το 79%.

Ημερομηνία	Ωρα	Θερμοκρασία	Υγρασία	Ταχύτητα ανέμου
19/2/2014	0:03:00	11.6 0C	80%	0 kph
19/2/2014	0:08:00	11.5 0C	79%	0 kph
19/2/2014	0:13:00	11.5 0C	79%	0 kph
19/2/2014	0:19:00	11.4 0C	79%	0 kph
19/2/2014	0:24:00	11.3 0C	79%	0 kph
19/2/2014	0:29:00	11.5 0C	79%	0 kph
19/2/2014	0:34:00	11.5 0C	79%	0 kph
19/2/2014	0:39:00	11.6 0C	79%	2.4 kph
19/2/2014	0:44:00	11.5 0C	79%	0 kph
19/2/2014	0:49:00	11.7 0C	79%	0 kph
19/2/2014	0:54:00	11.8 0C	79%	0 kph
19/2/2014	0:59:00	12.0 0C	78%	0 kph
19/2/2014	1:04:00	12.1 0C	77%	0 kph
19/2/2014	1:09:00	12.1 0C	77%	0 kph
19/2/2014	1:14:00	12.1 0C	76%	3.2 kph
19/2/2014	1:19:00	12.1 0C	76%	0 kph
19/2/2014	1:24:00	12.1 0C	76%	0 kph
19/2/2014	1:29:00	12.1 0C	76%	0 kph
19/2/2014	1:34:00	12.0 0C	75%	0 kph
19/2/2014	1:39:00	11.8 0C	75%	0 kph
19/2/2014	1:44:00	11.6 0C	75%	0 kph
19/2/2014	1:49:00	11.5 0C	75%	0 kph
19/2/2014	1:54:00	11.4 0C	75%	0 kph
19/2/2014	1:59:00	11.3 0C	76%	0 kph
19/2/2014	2:05:00	11.3 0C	76%	0 kph
19/2/2014	2:10:00	11.1 0C	77%	0 kph
19/2/2014	2:15:00	11.1 0C	77%	0 kph
19/2/2014	2:20:00	10.9 0C	77%	0 kph
19/2/2014	2:25:00	10.9 0C	78%	0 kph
19/2/2014	2:30:00	10.9 0C	78%	0 kph
19/2/2014	2:35:00	10.8 0C	78%	0 kph
19/2/2014	2:40:00	10.8 0C	78%	0 kph
19/2/2014	2:45:00	10.7 0C	78%	0 kph
19/2/2014	2:50:00	10.6 0C	78%	0 kph
19/2/2014	2:55:00	10.6 0C	78%	0 kph
19/2/2014	3:00:00	10.5 0C	78%	0 kph
19/2/2014	3:05:00	10.5 0C	78%	0 kph
19/2/2014	3:10:00	10.3 0C	78%	0 kph
19/2/2014	3:15:00	10.1 0C	78%	0 kph
19/2/2014	3:20:00	10.0 0C	78%	0 kph
19/2/2014	3:25:00	9.8 0C	78%	0 kph
19/2/2014	3:30:00	9.7 0C	79%	0 kph
19/2/2014	3:35:00	9.6 0C	79%	0 kph
19/2/2014	3:40:00	9.6 0C	79%	0 kph
19/2/2014	3:45:00	9.6 0C	79%	0 kph
19/2/2014	3:51:00	9.6 0C	80%	0 kph
19/2/2014	3:56:00	9.6 0C	81%	0 kph
19/2/2014	4:01:00	9.6 0C	81%	0 kph
19/2/2014	4:06:00	9.6 0C	81%	0 kph
19/2/2014	4:11:00	9.6 0C	81%	0 kph
19/2/2014	4:16:00	9.6 0C	81%	0 kph
19/2/2014	4:21:00	9.7 0C	81%	0 kph
19/2/2014	4:26:00	9.6 0C	81%	0 kph
19/2/2014	4:31:00	9.5 0C	81%	0 kph
19/2/2014	4:36:00	9.5 0C	81%	0 kph
19/2/2014	4:41:00	9.5 0C	81%	0 kph
19/2/2014	4:46:00	9.6 0C	81%	0 kph
19/2/2014	4:51:00	9.6 0C	81%	0 kph
19/2/2014	4:56:00	9.6 0C	81%	0 kph
19/2/2014	5:01:00	9.5 0C	80%	0 kph
19/2/2014	5:06:00	9.5 0C	80%	0 kph
19/2/2014	5:11:00	9.3 0C	80%	0 kph
19/2/2014	5:16:00	9.1 0C	80%	0 kph

Πίνακας 6-6: Θερμοκρασία, υγρασία, ταχύτητα ανέμου για το χρονικό διάστημα του πειράματος (00:03:00-5:16:00) από το μετεωρολογικό σταθμό La crosse ws3600

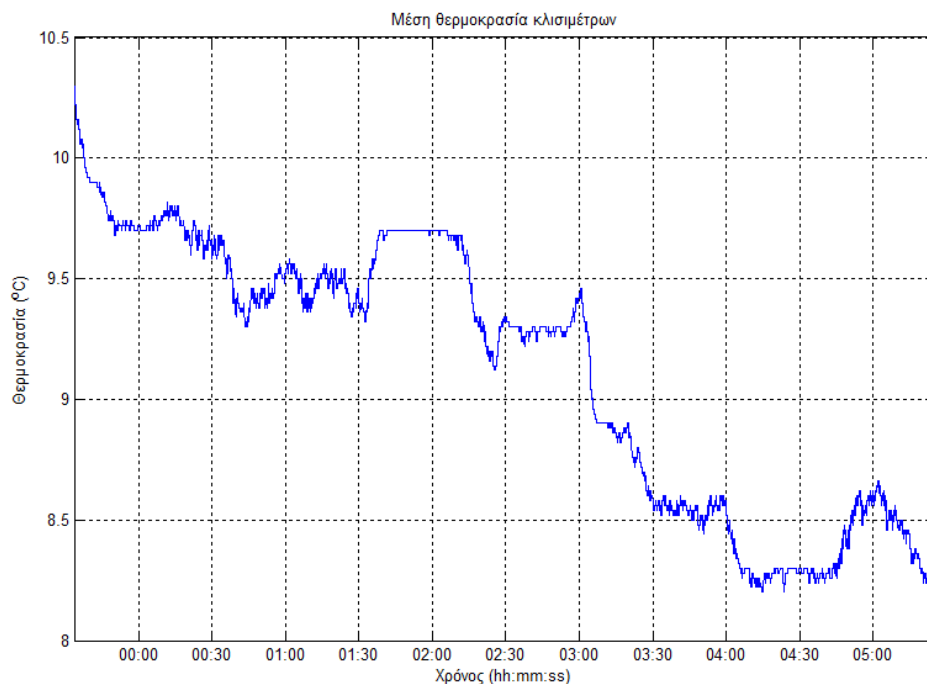
Table 6-6: Temperature, humidity, wind speed for the period of the experiment (00:03:00-5:16:00) from the weather station La crosse ws3600

(Πηγή: Προσωπικό αρχείο κυρίου Γεώργιου Μαναϊλόγλου)

Όπως προαναφέρεται, δεδομένα σχετικά με τη θερμοκρασία που επικρατεί στην περιοχή εκτέλεσης του πειράματος έχουν ληφθεί και από το σύστημα διαχείρισης των κλισιμέτρων. Στον Πίνακα 6-7 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές θερμοκρασίας όπως προκύπτουν από τις μετρήσεις κάθε κλισιμέτρου για το χρονικό διάστημα από 23:33:46 μμ έως 05:25:19 πμ, ενώ στο Σχήμα 6-10 απεικονίζεται το διάγραμμα της μέσης θερμοκρασίας από όλα τα κλισίμετρα για κάθε χρονική στιγμή. Με βάση τα δεδομένα από τα κλισίμετρα, η μέση θερμοκρασία στην περιοχή των μετρήσεων κυμαίνεται στους 9.1 °C.

Κλισίμετρο Nivel 220	Μέση θερμοκρασία
N1	9.4 °C
N2	9.1 °C
N3	8.9 °C
N4	8.8 °C
N5	9.3 °C

Πίνακας 6-7: Μέση θερμοκρασία κάθε κλισιμέτρου για το χρονικό διάστημα 23:33:46 μμ - 5:25:19 πμ
Table 6-7: Average temperature of each inclinometer from 23:33:46 pm to 5:25:19 am



Σχήμα 6-11: Θερμοκρασία περιβάλλοντος (°C) στην περιοχή της γέφυρας
Figure 6-11: Ambient temperature (°C) in test site

7 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΕΔΙΟΥ

Στο παρόν Κεφάλαιο παρουσιάζονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την επεξεργασία και ανάλυση των μετρήσεων που συλλέγονται στο πεδίο. Συγκεκριμένα, περιγράφεται ο τρόπος της ανάλυσης των δεδομένων γεωμετρικής χωροστάθμησης και των κλισιμέτρων.

7.1 Επεξεργασία Δεδομένων Πεδίου

Η επεξεργασία των δεδομένων πεδίου αφορά σε επεξεργασία μετρήσεων διαφορετικής φύσης και από διαφορετικά όργανα – συγκεκριμένα υψομετρικές διαφορές (γεωμετρική χωροστάθμηση) και γωνίες κλίσης (κλισίμετρα). Για την εισαγωγή, απεικόνιση και ανάλυση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό MATLAB R2013a. Αρχικά, πραγματοποιείται η επεξεργασία των μετρήσεων των ψηφιακών κλισιμέτρων. Αυτή υλοποιείται σε διαδοχικά στάδια ως εξής. Αρχικά, γίνεται απεικόνιση των πρωτογενών μετρήσεων κλίσης για κάθε κλισίμετρο και εφόσον υποστούν την κατάλληλη επεξεργασία υπολογίζεται το πολυώνυμο κλίσης και μετατόπισης με τη Μέθοδο Ελαχίστων Τετραγώνων. Επομένως, προκύπτουν οι χρονοσειρές κατακόρυφων μετατοπίσεων για κάθε θέση κλισιμέτρου για όλη την διάρκεια των δοκιμών.

Στη συνέχεια, πραγματοποιείται επεξεργασία των μετρήσεων της γεωμετρικής χωροστάθμησης. Υπολογίζονται τα υψόμετρα των χωροσταθμικών σημείων χωρίς την επιβολή φορτίου (L0) και για κάθε θέση του φορτηγού (L1-L6) βάσει των οποίων υπολογίζεται η βύθιση της γέφυρας ως προς την αρχική κατάσταση (L0).

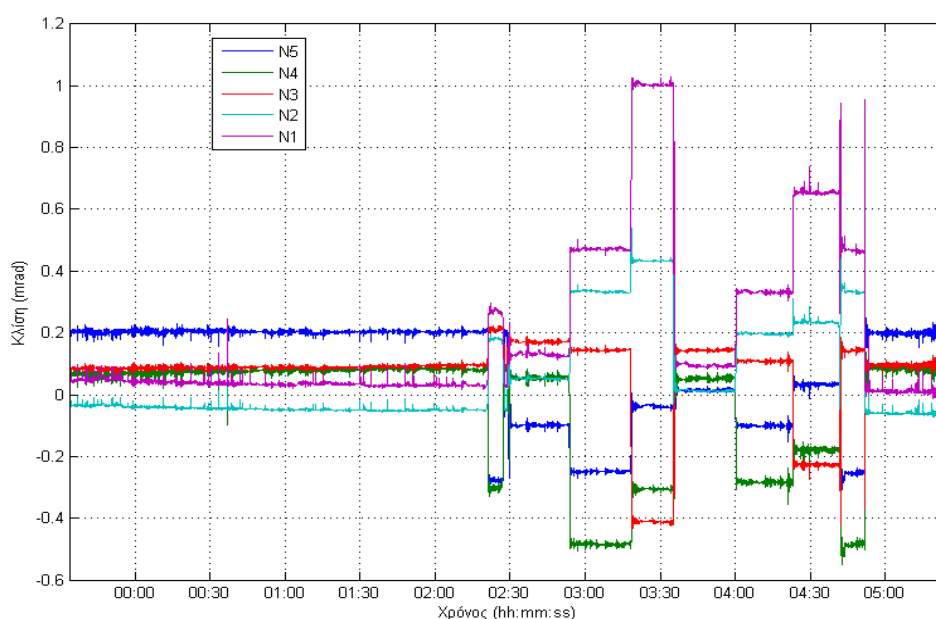
7.1.1 Επεξεργασία δεδομένων ψηφιακών κλισιμέτρων

Σύμφωνα με την Ενότητα 3.3, οι πρωτογενείς μετρήσεις κάθε κλισίμετρου εκφράζουν τη γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του οριζόντιου επιπέδου και του επιπέδου που υλοποιεί ο αισθητήρας, η οποία μεταβάλλεται ανάλογα με την κλίση της γέφυρας στην οποία έχει προσαρμοστεί ο αισθητήρας. Ωστόσο, προκειμένου να καταστούν συγκρίσιμα τα δεδομένα κλισιμέτρων με αυτά της γεωμετρικής χωροστάθμησης είναι απαραίτητη η μετατροπή των μετρημένων γωνιών κλίσης σε κατακόρυφη

μετατόπιση. Για την υλοποίηση της συγκεκριμένης διαδικασίας ακολουθείται μια σειρά διαδοχικών βημάτων επεξεργασίας των μετρήσεων των κλισιμέτρων έτσι ώστε να είναι εφικτός ο υπολογισμός της βύθισης της γέφυρας σε κάθε σημείο. Παρακάτω γίνεται αναλυτική επεξήγηση της διαδικασίας που ακολουθείται.

7.1.1 α Απεικόνιση πρωτογενών μετρήσεων κλίσης κάθε κλισίμετρου

Σε πρώτο στάδιο απεικονίζονται οι μετρήσεις γωνιών κλίσης για κάθε ένα από τα πέντε κλισίμετρα. Κάθε κλισίμετρο μετράει την γωνία κλίσης του καταστρώματος της γέφυρας σε δύο κάθετες διευθύνσεις X και Y οι οποίες σύμφωνα με τον τρόπο τοποθέτησης / προσανατολισμού τους (Σχήμα 7-1) αντιστοιχούν σε μετρημένες γωνίες κλίσεων κατά πλάτος και κατά μήκος του φορέα αντίστοιχα. Για τις ανάγκες της συγκεκριμένης εργασίας, μελετάται μόνο η κατά μήκος κλίση του καταστρώματος της γέφυρας, δηλαδή η κλίση Y. Στο Σχήμα 7-1 παρουσιάζονται οι μετρούμενες κατά μήκος κλίσεις (mrad) για κάθε ένα από τα πέντε κλισίμετρα (N1, N2, N3, N4, N5).



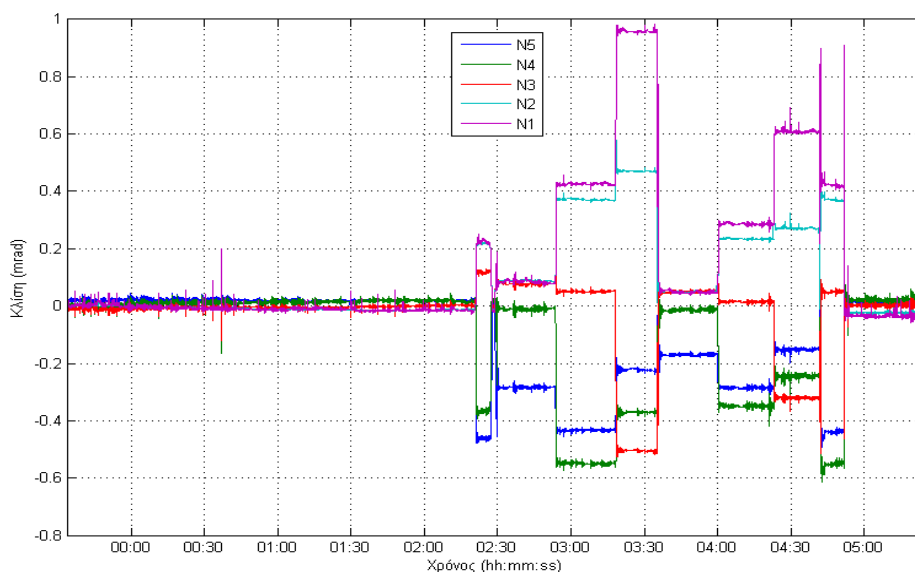
Σχήμα 7-1: Πρωτογενείς μετρήσεις κατά μήκος κλίσεων (mrad) για τα κλισίμετρα N1, ..., N5
Figure 7-1: Raw along-track inclinations (mrad) obtained for inclinometers N1, ..., N5

Από το Σχήμα 7-1 είναι εμφανές ότι για το σενάριο παρατήρησης L0 (αφόρτιστος φορέας) οι κατά μήκος γωνίες κλίσης των κλισιμέτρων εμφανίζουν αποκλίσεις από την τιμή του μηδενός που αναμένεται να έχουν δεδομένου ότι δεν υπάρχει

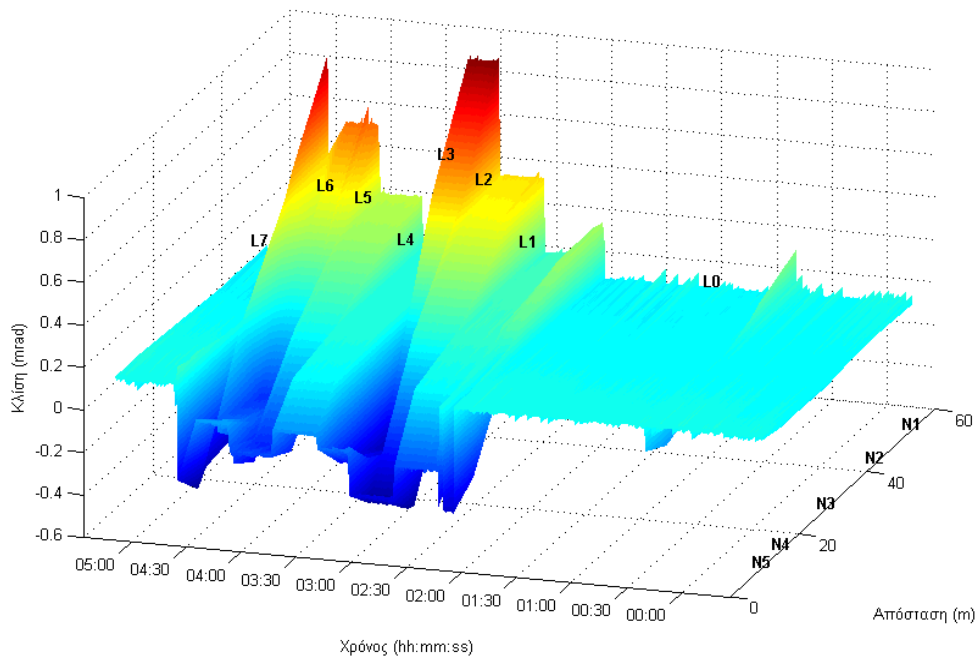
καταπόνηση στη γέφυρα. Το γεγονός αυτό πιθανόν οφείλεται σε σφάλματα αρχικών συνθηκών των κλισιμέτρων που εν μέρει σχετίζονται με τις συνθήκες οριζοντίωσης των αισθητήρων. Επομένως, για κάθε κλισίμετρο υπολογίζεται η μέση τιμή των μετρήσεων κλίσης για το σενάριο L0 και αφαιρείται από τις μετρήσεις κλίσης για όλη τη χρονοσειρά μετρήσεων του εκάστου κλισιμέτρου. Συγκεκριμένα εντοπίζονται τα δεδομένα από 18/02/2014 23:33:43 έως 19/02/2014 02:31:00 που αντιστοιχούν στο σενάριο L0 για κάθε κλισίμετρο, υπολογίζεται η μέση τιμή αυτών και στην συνέχεια αφαιρείται από τις αρχικές κλίσεις ώστε να προκύψουν οι ανηγμένες τιμές κλίσεων. Στον Πίνακα 7-1 απεικονίζεται η μέση τιμή κλίσης των μετρήσεων κάθε κλισιμέτρου για το σενάριο L0, στο Σχήμα 7-2 παρουσιάζεται το διάγραμμα των ανηγμένων κλίσεων (mrad) για κάθε κλισίμετρο και στο Σχήμα 7-3 ανηγμένες κατά μήκος κλίσεις από τα κλισίμετρα συναρτήσει του χρόνου και της θέσης των κλισιμέτρων.

Κλισίμετρο	Μέση τιμή κλίσης (mrad) για το σενάριο L0
N5	0.18
N4	0.06
N3	0.09
N2	-0.04
N1	0.05

Πίνακας 7-1: Μέση τιμή κλίσης (mrad) των μετρήσεων κάθε κλισιμέτρου για το σενάριο L0
Table 7-1: Mean value of inclination (mrad) measurements of each inclinometer for scenario L0



Σχήμα 7-2: Ανηγμένες κατά μήκος κλίσεις (mrad) για τα κλισίμετρα N1, ..., N5
Figure 7-2: Reduced along-track inclinations (mrad) for inclinometers N1, ..., N5



Σχήμα 7-3: Χρονοσειρά κατά μήκος κλίσεων για τα κλισίμετρα N1, ..., N5
Figure 7-3: Time series of reduced along-track inclinations observed for inclinometers N1, ..., N5.

7.1.1 β Υπολογισμός πολυωνύμου κλίσης και μετατόπισης με τη Μέθοδο Ελαχίστων Τετραγώνων

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζεται η μεθοδολογία προσαρμογής πολυωνύμων στις πειραματικές μετρήσεις γωνιών κλίσης των κλισιμέτρων. Συγκεκριμένα επιχειρείται προσαρμογή των ανηγμένων κλίσεων σε πολυώνυμο κλίσης αυξανόμενου βαθμού. Στη συνέχεια επιβάλλεται αριθμητική ολοκλήρωση στις συναρτήσεις πολυωνύμων προκειμένου να προκύψουν οι κατακόρυφες μετατοπίσεις σε κάθε σημείο της γέφυρας. Προκειμένου να προκύψουν οι μονάδες μετατοπίσεων (ως οφείλουν) σε γραμμικό μέγεθος οι κλίσεις εκφράζονται βάσει της εφαπτομένης της αντίστοιχης γωνίας ώστε η ολοκλήρωση των πολυωνύμων να δίνει απευθείας την μετατόπιση. Επομένως, η κλίση μετατρέπεται από mrad σε rad και στην συνέχεια σε εφαπτομένη.

$$\theta(x) = \frac{du(x)}{dx} \quad (7.1)$$

Έστω ότι το πολυώνυμο βαθμού n (εξ. 7.2) περιγράφει τοπικά την κατά μήκος κλίση του φορέα συναρτήσει της απόστασης από την αφετηρία (βλ. Σχήμα 6-3)

$$\theta(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x + a_0 = \sum_{k=0}^n a_k x^k \quad (7.2)$$

όπου:

$\theta(x)$: η κατά μήκος κλίση του φορέα για δεδομένη χρονική στιγμή

a_n, \dots, a_1, a_0 : οι συντελεστές του πολυωνύμου

x : η απόσταση (m) από την αφετηρία της γέφυρας (βλ. Σχήμα 6-3)

Οι μονάδες των συντελεστών είναι $a_n \rightarrow \left(\frac{1}{m}\right)^n$

Τότε το πολυώνυμο που περιγράφει την κατακόρυφη μετατόπιση δίνεται από την Εξίσωση 7.3:

$$u(x) = \int_0^x \theta(x) dx = \frac{a_n}{n+1} x^{n+1} + \frac{a_{n-1}}{n} x^n + \dots + \frac{a_1}{2} x^2 + a_0 x + c = \sum_{k=0}^n \frac{a_k}{k+1} x^{k+1} + c \quad (7.3)$$

Ο υπολογισμός των συντελεστών του πολυωνύμου, γίνεται με τη Μέθοδο Ελαχίστων Τετραγώνων και συγκεκριμένα με τη μέθοδο των εμμέσων παρατηρήσεων με δεσμεύσεις. Ελέγχθηκαν δύο διαφορετικές καταστάσεις δεσμεύσεων (συνοριακών συνθηκών). Αρχικά θεωρήθηκε ότι οι μετατοπίσεις στα άκρα της γέφυρας είναι μηδενικές, ενώ στη δεύτερη κατάσταση εκτός από τις μετατοπίσεις θεωρήθηκε ότι και η κλίση στην θέση $x = 0$ είναι μηδενική. Από την σύγκριση με τις μετρήσεις της γεωμετρικής χωροστάθμησης προέκυψε ότι η βέλτιστη κατάσταση συνοριακών συνθηκών είναι η δεύτερη. Το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο καθώς η συγκεκριμένη κατάσταση είναι η θεωρητικά σωστή.

Επομένως, οι δεσμεύσεις που επιβάλλονται περιγράφονται αναλυτικά ως εξής:

- α. Στην αρχή ($x=0$ m) της γέφυρας (βλ. Σχήμα 6-3), θεωρείται μηδενική κατακόρυφη μετατόπιση (δέσμευση) και μηδενική στροφή (δέσμευση).
- β. Στο τέλος ($x=55.50$ m) της γέφυρας θεωρείται μηδενική κατακόρυφη μετατόπιση (δέσμευση).

Σύμφωνα με τα δεδομένα, οι δεσμεύσεις εκφράζονται μαθηματικά ως εξής:

$$\begin{aligned} u(0) &= 0 \\ u(L) &= 0 \\ \theta(0) &= 0 \end{aligned} \quad (7.4)$$

Εφαρμόζοντας τις σχέσεις 7.4 στις Εξισώσεις 7.2 και 7.3 με $k = 1, \dots, n$ προκύπτει:

$$\theta(0) = \sum_{k=0}^n a_k x^k \Big|_{x=0} = \sum_{k=1}^n a_k x^k \Big|_{x=0} + a_0 = 0 \Rightarrow a_0 = 0 \quad (7.5)$$

$$u(0) = \sum_{k=0}^n \frac{a_k}{k+1} x^{k+1} \Big|_{x=0} + c = 0 \Rightarrow c = 0 \quad (7.6)$$

$$u(L) = \sum_{k=0}^n \frac{a_k}{k+1} x^{k+1} \Big|_{x=L} + c = \sum_{k=2}^n \frac{a_k}{k+1} L^{k+1} + \frac{a_1}{2} L^2 + a_0 L + c = 0 \quad (7.7)$$

και σύμφωνα με τις Εξισώσεις 7.5 και 7.6:

$$\sum_{k=2}^n \frac{a_k}{k+1} L^{k+1} + \frac{a_1}{2} L^2 = 0 \Rightarrow a_1 = -2 \sum_{k=2}^n \frac{a_k}{k+1} L^{k-1} \quad (7.8)$$

Βάσει των Εξισώσεων 7.5-7.8 οι αρχικές Εξισώσεις 7.2 και 7.3 των πολυωνύμων γίνονται:

$$\begin{aligned} \theta(x) &= \sum_{k=2}^n a_k x^k - \left(2 \sum_{k=2}^n \frac{a_k}{k+1} L^{k-1} \right) x = \sum_{k=2}^n a_k x^k - 2x \frac{a_k}{k+1} L^{k-1} \\ \theta(x) &= \sum_{k=2}^n a_k x \left(x^{k-1} - \frac{2}{k+1} L^{k-1} \right) \end{aligned} \quad (7.9)$$

$$u(x) = \sum_{k=2}^n \frac{a_k}{k+1} x^{k+1} - \frac{\left(2 \sum_{k=2}^n \frac{a_k}{k+1} L^{k-1} \right)}{2} x^2$$

$$u(x) = \sum_{k=2}^n \frac{a_k}{k+1} x^{k+1} - \sum_{k=2}^n \frac{a_k}{k+1} L^{k-1} x^2 = \sum_{k=2}^n \frac{a_k}{k+1} x^{k+1} - \frac{a_k}{k+1} L^{k-1} x^2$$

$$u(x) = \sum_{k=2}^n \frac{a_k}{k+1} x^2 (x^{k-1} - L^{k-1}) \quad (7.10)$$

Για την εκτίμηση των συντελεστών της Εξίσωσης 7.9 θα χρησιμοποιηθεί η Μέθοδος των Ελαχίστων Τετραγώνων. Συγκεκριμένα η Εξίσωση γράφεται σε διανυσματική μορφή ως προς τους προς εκτίμηση συντελεστές ως εξής:

$$\theta(x) = \sum_{k=2}^n a_k \left(x^k - \frac{2x}{k+1} L^{k-1} \right) = \left[x^2 - x \frac{2}{3} L \quad \dots \quad x^n - x \frac{2}{n+1} L^{n-1} \right] \cdot \begin{bmatrix} a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} \quad (7.11)$$

Αν θ_k είναι η εφαπτομένη των ανηγμένων μετρήσεων των κλισιμέτρων στις θέσεις x_k δηλαδή x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 που αντιστοιχούν στις αποστάσεις των κλισιμέτρων N1, N2, N3, N4, N5 από την αφετηρία μέτρησης τότε εφαρμόζοντας την Εξίσωση 7.11 για κάθε κλισίμετρο k παίρνουμε το ακόλουθο γραμμικό σύστημα:

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \\ \theta_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta(x_1) \\ \theta(x_2) \\ \theta(x_3) \\ \theta(x_4) \\ \theta(x_5) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \\ e_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^2 - x_1 2L/3 & \dots & x_1^n - x_1 2L^{n-1}/(n+1) \\ x_2^2 - x_2 2L/3 & \dots & x_2^n - x_2 2L^{n-1}/(n+1) \\ x_3^2 - x_3 2L/3 & \dots & x_3^n - x_3 2L^{n-1}/(n+1) \\ x_4^2 - x_4 2L/3 & \dots & x_4^n - x_4 2L^{n-1}/(n+1) \\ x_5^2 - x_5 2L/3 & \dots & x_5^n - x_5 2L^{n-1}/(n+1) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} + e \quad (7.12)$$

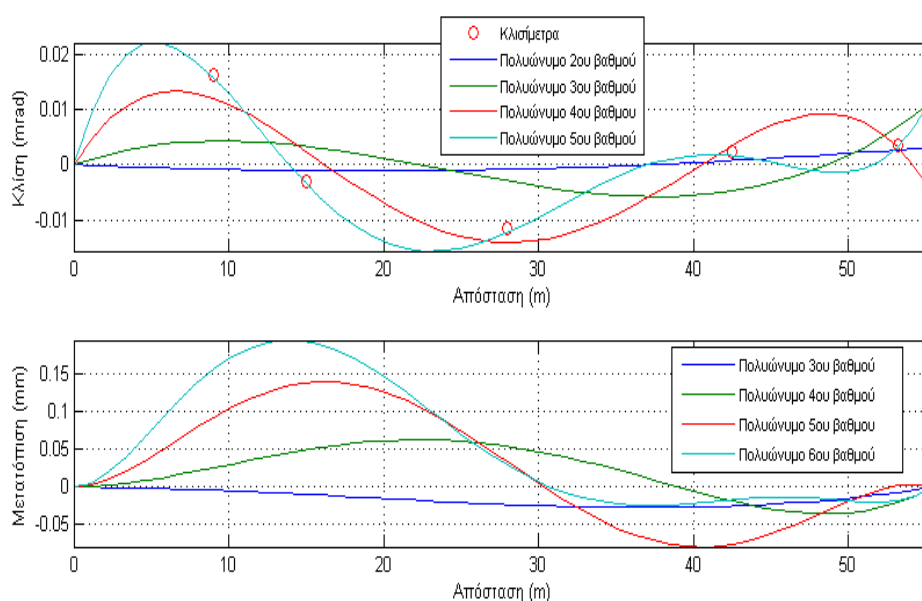
όπου e είναι το σφάλμα της προσαρμογής. Για την εκτίμηση των συντελεστών a_2, \dots, a_n το παραπάνω σύστημα επιλύεται με την Μέθοδο των Ελαχίστων Τετραγώνων χρησιμοποιώντας την συνάρτηση του MATLAB *mldivide*. Το παραπάνω σύστημα επιλύεται για κάθε χρονική στιγμή.

Η παραπάνω διαδικασία περιγράφει τον υπολογισμό των συντελεστών για διαφορετικούς βαθμούς πολυωνύμων. Για την επιλογή του βαθμού του πολυωνύμου δοκιμάζονται επαναληπτικά διαφορετικών βαθμών πολυώνυμα ($2^{ου} - 5^{ου}$) και υπολογίζεται το σφάλμα προσαρμογής για όλες τις χρονικές στιγμές (Εξίσωση 7.13) ως εξής:

$$Error = \sum_{t=1}^N \sum_{k=1}^5 (\theta_k^t - \theta^t(x_k))^2 \quad (7.13)$$

όπου t η χρονική στιγμή, N το σύνολο των μετρήσεων, θ_k^t η εφαιπτομένη της ανηγμένης κλίσης για το k κλισίμετρο την t χρονική στιγμή, και $\theta^t(x_k)$ το εκτιμώμενο πολυώνυμο των κλίσεων την t χρονική στιγμή.

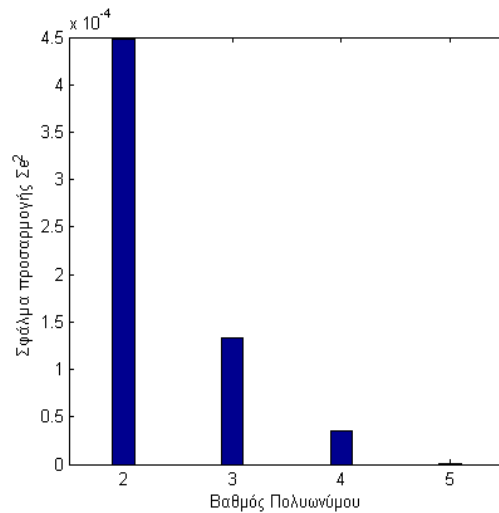
Το Σχήμα 7-4 αποτελεί ένα ενδεικτικό αποτέλεσμα προσαρμογής των πολυωνύμων κλίσης και μετατόπισης με διαφορετικού βαθμού πολυώνυμα για μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή στις 18-Φεβ-2014, 23:33:52.



Σχήμα 7-4: Ενδεικτικό αποτέλεσμα προσαρμογής πολυωνύμων (κλίσης και μετατόπισης) με διαφορετικού βαθμού πολυώνυμα στις 18-Φεβ-2014 και ώρα 23:33:52

Figure 7-4: Indicative results of polynomial fitting (inclination and displacement) with different polynomial order on 18-Feb-2014 at 23:33:52

Επιπρόσθετα, το Σχήμα 7-5 απεικονίζει το σφάλμα προσαρμογής για διαφορετικού βαθμού πολυώνυμα. Σύμφωνα με την ανάλυση που προηγήθηκε αλλά και το Σχήμα 7-5 για τη συγκεκριμένη μελέτη επιλέγεται 5^ο βαθμού πολυώνυμο καθώς παρουσιάζει το μικρότερο σφάλμα προσαρμογής. Συγκεκριμένα το σφάλμα προσαρμογής του συγκεκριμένου πολυωνύμου στο σύνολο των μετρήσεων είναι 1.0150×10^{-6} . Επομένως, το σύστημα έχει ένα βαθμό ελευθερίας ($r=n-(m-s)=5-(7-3)=1$).



Σχήμα 7-5: Σφάλμα προσαρμογής συναρτήσεων του βαθμού πολυώνυμου
Figure 7-5: Fitting error for different polynomial orders

Λαμβάνοντας υπόψη και την προηγούμενη ανάλυση, το πολυώνυμο κλίσης 5^{ου} βαθμού είναι της μορφής:

$$\theta(x) = ax^5 + bx^4 + cx^3 + dx^2 + ex + f \quad (7.14)$$

Το πολυώνυμο μετατόπισης προκύπτει χρησιμοποιώντας το απλό ολοκλήρωμα της παραπάνω εξίσωσης:

$$u(x) = \int \theta(x) dx = \frac{a}{6}x^6 + \frac{b}{5}x^5 + \frac{c}{4}x^4 + \frac{d}{3}x^3 + \frac{e}{2}x^2 + fx + g \quad (7.15)$$

Ισχύουν οι δεσμεύσεις:

$$\begin{aligned} u(0) &= 0 \\ u(L) &= 0 \\ \theta(0) &= 0 \end{aligned} \quad (7.16)$$

Εφαρμόζοντας τις δεσμεύσεις αυτές στις Εξισώσεις 7.14 και 7.15 προκύπτει:

$$u(0) = 0 \Rightarrow g = 0 \quad (7.17)$$

$$\theta(0) = 0 \Rightarrow f = 0 \quad (7.18)$$

$$u(L) = 0 \Rightarrow \frac{a}{6}L^6 + \frac{b}{5}L^5 + \frac{c}{4}L^4 + \frac{d}{3}L^3 + \frac{e}{2}L^2 = 0$$

$$e = -\frac{1}{3}aL^4 - \frac{2}{5}bL^3 - \frac{1}{2}cL^2 - \frac{2}{3}dL \quad (7.19)$$

Με αντικατάσταση των σχέσεων 7.17-7.19 στις Εξισώσεις 7.14 και 7.15 προκύπτει:

$$\theta(x) = ax^5 + bx^4 + cx^3 + dx^2 + \left(-\frac{1}{3}aL^4 - \frac{2}{5}bL^3 - \frac{1}{2}cL^2 - \frac{2}{3}dL\right)x \quad (7.20)$$

$$u(x) = \frac{a}{6}x^6 + \frac{b}{5}x^5 + \frac{c}{4}x^4 + \frac{d}{3}x^3 + \left(-\frac{1}{6}aL^4 - \frac{1}{5}bL^3 - \frac{1}{4}cL^2 - \frac{1}{3}dL\right)x^2 \quad (7.21)$$

Η Εξίσωση 7.20 γράφεται ως προς τους προς εκτίμηση συντελεστές, ώστε να προκύψει η βασική μορφή των εξισώσεων παρατήρησης:

$$\theta(x) = a\left(x^5 - \frac{1}{3}L^4x\right) + b\left(x^4 - \frac{2}{5}L^3x\right) + c\left(x^3 - \frac{1}{2}L^2x\right) + d\left(x^2 - \frac{2}{3}Lx\right) \quad (7.22)$$

Οι πέντε μετρήσεις κλίσης από τα κλισιόμετρα, δίνουν πέντε εξισώσεις παρατήρησης της μορφής:

$$\begin{aligned} N5: \theta(x_5) &= a\left(x_5^5 - \frac{1}{3}L^4x_5\right) + b\left(x_5^4 - \frac{2}{5}L^3x_5\right) + c\left(x_5^3 - \frac{1}{2}L^2x_5\right) + d\left(x_5^2 - \frac{2}{3}Lx_5\right) \\ N4: \theta(x_4) &= a\left(x_4^5 - \frac{1}{3}L^4x_4\right) + b\left(x_4^4 - \frac{2}{5}L^3x_4\right) + c\left(x_4^3 - \frac{1}{2}L^2x_4\right) + d\left(x_4^2 - \frac{2}{3}Lx_4\right) \\ N3: \theta(x_3) &= a\left(x_3^5 - \frac{1}{3}L^4x_3\right) + b\left(x_3^4 - \frac{2}{5}L^3x_3\right) + c\left(x_3^3 - \frac{1}{2}L^2x_3\right) + d\left(x_3^2 - \frac{2}{3}Lx_3\right) \\ N2: \theta(x_2) &= a\left(x_2^5 - \frac{1}{3}L^4x_2\right) + b\left(x_2^4 - \frac{2}{5}L^3x_2\right) + c\left(x_2^3 - \frac{1}{2}L^2x_2\right) + d\left(x_2^2 - \frac{2}{3}Lx_2\right) \\ N1: \theta(x_1) &= a\left(x_1^5 - \frac{1}{3}L^4x_1\right) + b\left(x_1^4 - \frac{2}{5}L^3x_1\right) + c\left(x_1^3 - \frac{1}{2}L^2x_1\right) + d\left(x_1^2 - \frac{2}{3}Lx_1\right) \end{aligned} \quad (7.23)$$

όπου x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 είναι οι αποστάσεις των κλισιόμετρων N1, N2, N3, N4, N5 από την αφετηρία μέτρησης.

Προκύπτουν οι πίνακες:

$$\text{Πίνακας σχεδιασμού: } A = \begin{bmatrix} x_5^5 - \frac{1}{3}L^4x_5 & \cdots & x_5^2 - \frac{2}{3}Lx_5 \\ x_4^5 - \frac{1}{3}L^4x_4 & \cdots & x_4^2 - \frac{2}{3}Lx_4 \\ x_3^5 - \frac{1}{3}L^4x_3 & \cdots & x_3^2 - \frac{2}{3}Lx_3 \\ x_2^5 - \frac{1}{3}L^4x_2 & \cdots & x_2^2 - \frac{2}{3}Lx_2 \\ x_1^5 - \frac{1}{3}L^4x_1 & \cdots & x_1^2 - \frac{2}{3}Lx_1 \end{bmatrix}$$

Πίνακας των αγνώστων: $\hat{x} = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix}$

Πίνακας των μετρήσεων: $l = \begin{bmatrix} \theta(x_5) \\ \theta(x_4) \\ \theta(x_3) \\ \theta(x_2) \\ \theta(x_1) \end{bmatrix}$

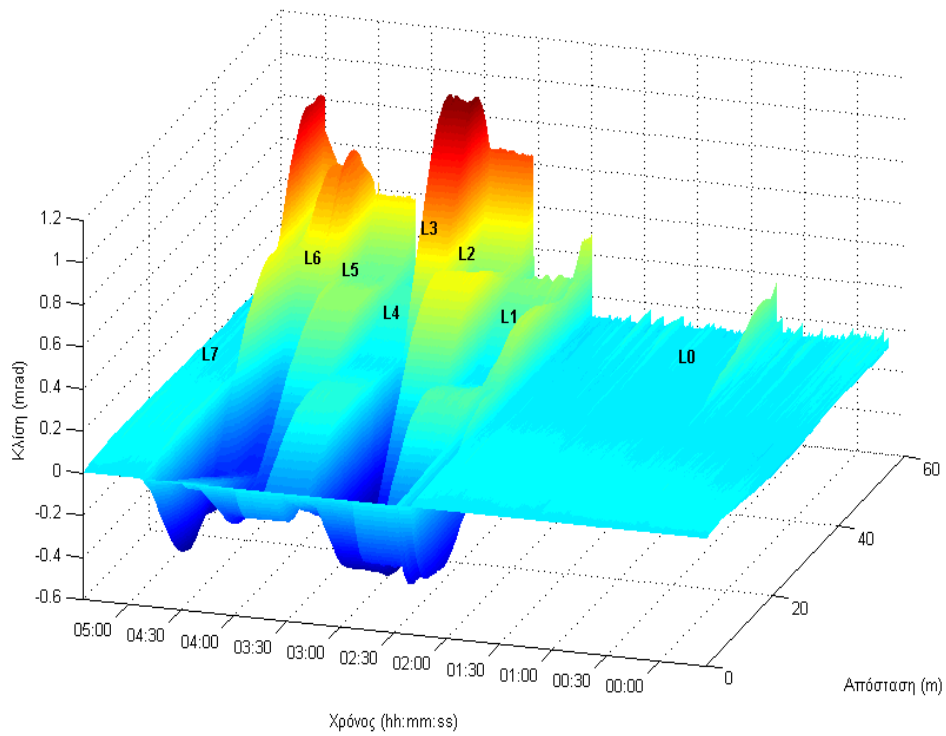
Για να ικανοποιείται η Μέθοδος των Ελαχίστων Τετραγώνων πρέπει:

$$A^T A \hat{x} = A^T l \quad (7.24)$$

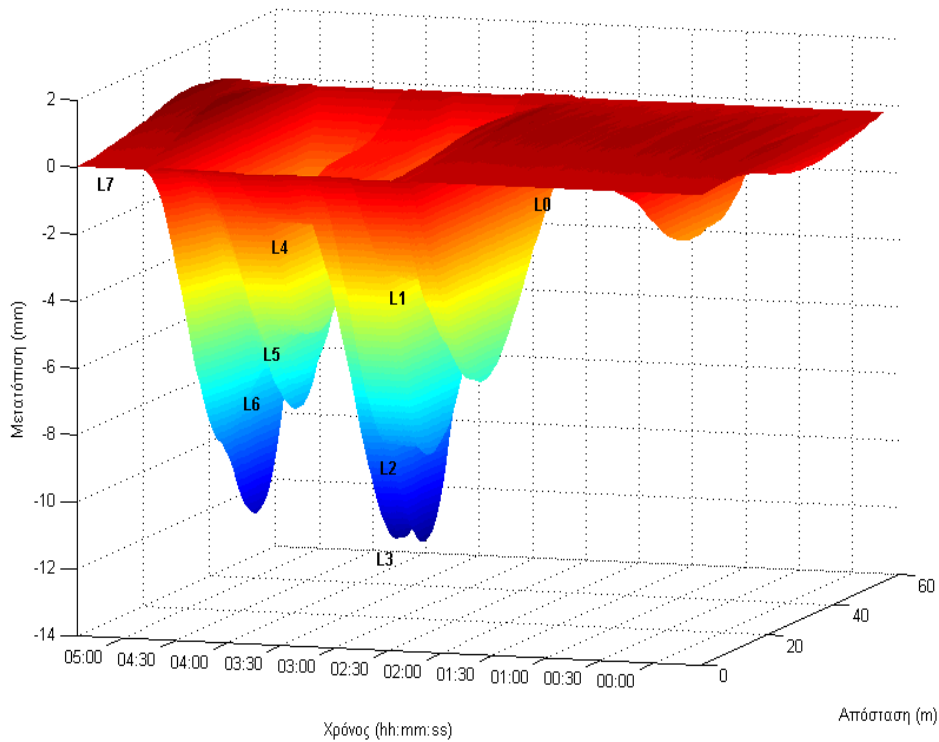
και με επίλυση ως προς τον πίνακα των αγνώστων προκύπτουν οι ζητούμενοι συντελεστές ως εξής:

$$\hat{x} = (A^T A)^{-1} A^T l \quad (7.25)$$

Κατόπιν υπολογισμού των πολυωνύμων κλίσης και στη συνέχεια μετατόπισης για κάθε χρονική στιγμή μετρήσεων από τα κλισίμετρα προκύπτουν τα διάγραμμα χρονοσειρών κατά μήκος κλίσεων και κατακόρυφων μετατοπίσεων για τα κλισίμετρα N1, ..., N5 τα οποία απεικονίζονται στα Σχήματα 7-6 και 7-7. Να σημειωθεί πως αφαιρούνται από το σύνολο των δεδομένων οι κλίσεις που μετρήθηκαν από τα κλισίμετρα εκτός των χρονικών ορίων των σεναρίων.



Σχήμα 7-6: Διάγραμμα χρονοσειρών κατά μήκος κλίσεων για τα κλισίμετρα N1, ..., N5
Figure 7-6: Time series of along-track inclinations for inclinometer sensors N1, ..., N5



Σχήμα 7-7: Διάγραμμα χρονοσειρών κατακόρυφων μετατοπίσεων για τα κλισίμετρα N1, ..., N5
Figure 7-7: Time series of along-track settlements for inclinometer sensors N1, ..., N5

7.1.2 Επεξεργασία δεδομένων γεωμετρικής χωροστάθμησης

Προκειμένου να υπολογιστεί η βύθιση τις γέφυρας στα χωροσταθμικά σημεία που βρίσκονται στην πλευρά της Ελευσίνας (E1-E12), μέσω των μετρήσεων γεωμετρικής χωροστάθμησης υπολογίζονται τα υψόμετρα των χωροσταθμικών σημείων με αφόρτιστο φορέα (L0) και στη συνέχεια τα υψόμετρα των σημείων κατά τη διάρκεια των υπόλοιπων σεναρίων L1, ..., L6 .

Για την υλοποίηση της συγκεκριμένης διαδικασίας, αρχικά υπολογίζονται οι υψομετρικές διαφορές μεταξύ των τεσσάρων Réper (σημεία γνωστών υψομέτρων) και των αντίστοιχων χωροσταθμικών σημείων. Ο Πίνακας 7-2 απεικονίζει τα χωροσταθμικά σημεία E1-E12 και τα αντίστοιχα Réper με βάση τα οποία θα υπολογιστεί το υψόμετρό τους.

a/a Χωροστ. σημείου	Réper
E1	R1
E2	
E3	
E4	R2
E5	
E6	
E7	R3
E8	
E9	
E10	R4
E11	
E12	

Πίνακας 7-2: Χωροσταθμικά σημεία (E1-E12) και αντίστοιχα Réper
Table 7-2: Leveling points (E1-E12) with their corresponding Réper

Συγκεκριμένα, αν Ο (όπισθεν) είναι η ανάγνωση πάνω στη σταδία σε κάποιο reper R_k ($k: 1, 2, 3, 4$) και Ε (έμπροσθεν) η ανάγνωση στο αντίστοιχο χωροσταθμικό σημείο E_i ($i = 1, 2, 3, \dots, 12$) , τότε η υψομετρική διαφορά $\Delta H_{E_i R_k}$, για κάθε σενάριο παρατήρησης είναι:

$$\Delta H_{E_i R_k} = O - E \quad (7.26)$$

Για κάθε σενάριο και για κάθε χωροσταθμικό σημείο υπολογίζεται το υψόμετρο του σύμφωνα με τη σχέση:

$$H_{E_i L_j} = H_{R_k} + \Delta H_{E_i R_k} \quad (7.27)$$

όπου:

$H_{E_i L_j}$: Το υψόμετρο του εκάστοτε χωροσταθμικού σημείου ($i=1, 2, \dots, 12$) για το αντίστοιχο σενάριο ($j: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6$)

H_{R_k} : Το υψόμετρο του αντίστοιχου Réper ($k: 1, 2, 3, 4$)

$\Delta H_{E_i R_k}$: Η υψομετρική διαφορά μεταξύ χωροσταθμικού σημείου και Réper για το αντίστοιχο σενάριο

Τέλος, προκειμένου να υπολογιστεί η βύθιση της γέφυρας κατά την επιβολή φορτίου γίνεται χρήση της παρακάτω εξίσωσης:

$$\Delta Disp_{E_i L_j} = H_{E_i L_j} - H_{E_i L_0} \quad (7.28)$$

όπου:

$\Delta Disp_{E_i L_j}$: Η βύθιση του εκάστοτε χωροσταθμικού σημείου ($i=1, 2, \dots, 12$) για το αντίστοιχο σενάριο ($j: 1, 2, 3, 4, 5, 6$)

$H_{E_i L_j}$: Το υψόμετρο του εκάστοτε χωροσταθμικού σημείου ($i=1, 2, \dots, 12$) για το αντίστοιχο σενάριο ($j: 1, 2, 3, 4, 5, 6$)

$H_{E_i L_0}$: Το υψόμετρο του εκάστοτε χωροσταθμικού σημείου ($i=1, 2, \dots, 12$) για το σενάριο L0

Με βάση την παραπάνω διαδικασία υπολογίζονται οι μετακινήσεις (βυθίσεις) κάθε χωροσταθμικού σημείου για κάθε σενάριο παρατήρησης οι οποίες απεικονίζονται στον Πίνακα 7-3.

			Σενάρια Παρατήρησης						
	α/α	Απόσταση από αφετηρία (m)	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7
Μετακινήσεις παρειά προς Ελευσίνα (m)	E11	2,26	0,00086	-0,00054	-0,00051	0,0009	0,00055	-0,00034	0,00013
	E10	6,78	-0,00135	-0,00164	-0,00033	-0,00053	0,00015	-0,00047	0,00017
	E9	11,3	-0,00215	-0,00379	-0,00169	-0,00169	-0,00138	-0,0007	0,00044
	E8	17,46	-0,00287	-0,00692	-0,00394	-0,00189	-0,00427	-0,00241	0,0005
	E7	23,63	-0,00264	-0,00908	-0,00695	-0,00161	-0,00597	-0,00453	0,00059
	E6	29,36	-0,00241	-0,00902	-0,00961	-0,00122	-0,00571	-0,00584	0,00058
	E5	35,1	-0,00194	-0,00766	-0,01175	-0,00101	-0,00486	-0,00689	0,00047
	E4	40,83	-0,00153	-0,00598	-0,01137	-0,00055	-0,00385	-0,00697	0,00016
	E3	46,92	-0,00067	-0,0038	-0,00804	-0,00043	-0,00259	-0,00499	0,00021
	E2	53,01	-0,00025	-0,00113	-0,00269	-0,00014	-0,00079	-0,0014	9E-05
	E1	76,61	0,00018	0,00033	0,00037	0,00024	0,00033	0,000511	0,00036

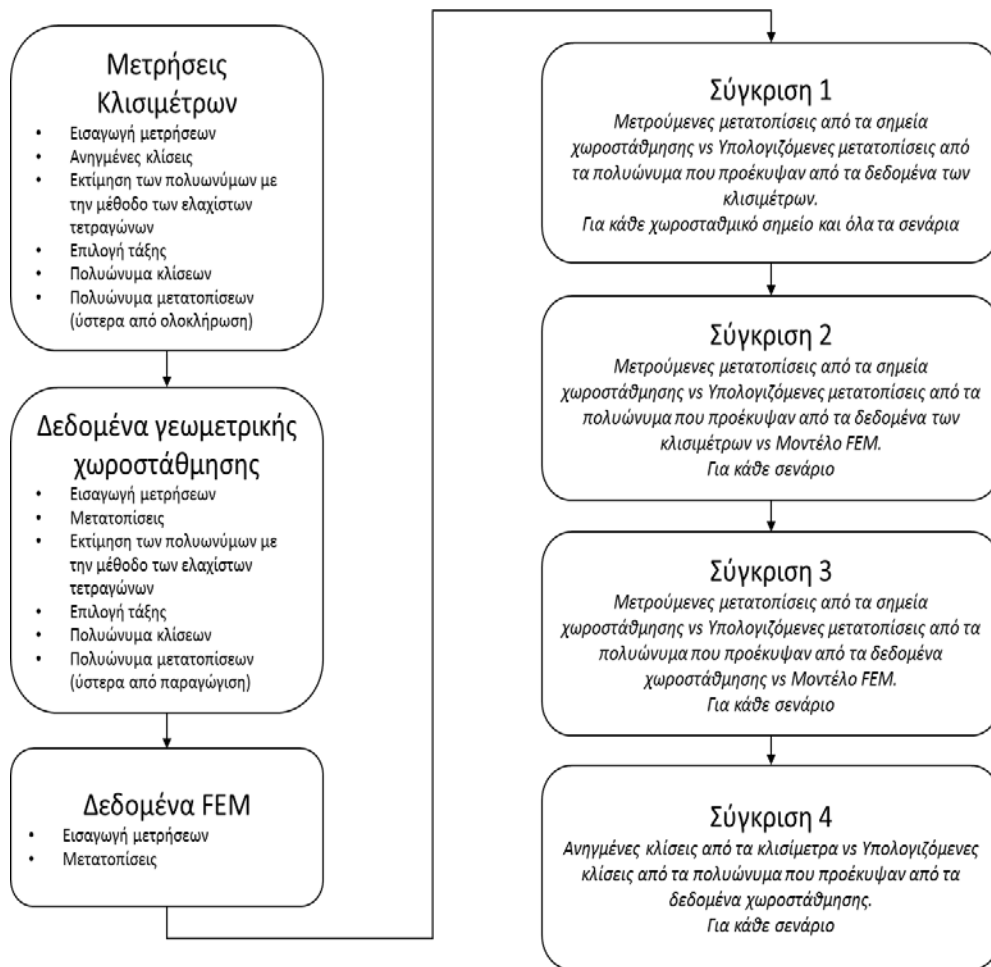
Πίνακας 7-3: Μετακινήσεις χωροσταθμικών σημείων E1-E11 (m) για όλα τα σενάρια παρατήρησης
 Table 7-3: Displacements of leveling points E1-E11 (m) for all observation scenarios

7.2 Ανάπτυξη Λογισμικού

Η επεξεργασία των δεδομένων πεδίου πραγματοποιείται στο πρόγραμμα MATLAB R2013a. Το MATLAB είναι μια υψηλού επιπέδου γλώσσα τεχνικού προγραμματισμού και ένα αλληλεπιδραστικό περιβάλλον για την ανάλυση στοιχείων και την ανάπτυξη αλγορίθμων και εφαρμογών. Για τη συγκεκριμένη εργασία δημιουργείται αλγόριθμος για την εξαγωγή των κατάλληλων γραφημάτων και πινάκων που απαιτούνται για τη μελέτη δομικής ακεραιότητας της γέφυρας ΣΕΑ Παλλήνης, Αττικής Οδού.

Δεδομένα εισόδου αποτελούν οι πρωτογενείς μετρήσεις κλίσης των κλισιμέτρων, οι υπολογισμένες μετατοπίσεις των χωροσταθμικών σημείων που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων της γεωμετρικής χωροστάθμησης καθώς και οι υπολογισμένες μετακινήσεις του καταστρώματος της γέφυρας από τις επιλύσεις του αριθμητικού μοντέλου. Στη συνέχεια, με τη συγγραφή κατάλληλου αλγορίθμου για την εξαγωγή αποτελεσμάτων (διαγραμμάτων, πινάκων) γίνεται συγκριτική αξιολόγηση της απόκρισης του καταστρώματος τόσο από τα μετρητικά δεδομένα (κλισίμετρα, γεωμετρική χωροστάθμηση) όσο και από τα στοιχεία αριθμητικής ανάλυσης. Στο Σχήμα 7-8 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής που περιγράφει τις

διαδικασίες που ακολουθούνται για την επεξεργασία των μετρήσεων και την εξαγωγή αποτελεσμάτων στο πρόγραμμα MATLAB.



Σχήμα 7-8: Διάγραμμα ροής
Figure 7-8: Flowchart

8 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΜΕΤΡΗΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Στο παρόν Κεφάλαιο, προκειμένου να γίνει αξιολόγηση των ψηφιακών κλισιμέτρων ακριβείας στην μελέτη της δομικής ακεραιότητας της γέφυρας της Παλλήνης, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων των κλισιμέτρων με τις μετατοπίσεις που έχουν προκύψει από τις μετρήσεις γεωμετρικής χωροστάθμησης της γέφυρας αλλά και τις θεωρητικές μετατοπίσεις που προκύπτουν από την Ανάλυση των Πεπερασμένων Στοιχείων (*Finite Element Analysis-FEM*).

Σε αυτή τη διαδικασία η σύγκριση αποτελεσμάτων που προέρχονται από μετρήσεις γεωμετρικής χωροστάθμησης και κλισιμέτρων αποσκοπεί στην αξιολόγηση της διαδικασίας υπολογισμού μετατοπίσεων από κλισίμετρα σε ανάλογες εφαρμογές. Αντίστοιχα, η σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ μετρητικών δεδομένων και υπολογισμένων μετατοπίσεων από μαθηματικά μοντέλα FEM αποβλέπει στον έλεγχο των υποθέσεων του μαθηματικού μοντέλου και της διαδικασίας υπολογισμού του.

8.1 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων

Η Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων (*Finite Element Analysis-FEM*), αποτελεί πλέον ένα ισχυρό εργαλείο για την αριθμητική επίλυση ενός μεγάλου φάσματος προβλημάτων του μηχανικού. Οι εφαρμογές εκτείνονται από την παραμόρφωση και ανάλυση τάσεων σε αυτοκίνητα, αεροπλάνα, κτίρια και γέφυρες, μέχρι την ανάλυση πεδίων ροής θερμότητας, ροής υγρών, μαγνητικής ροής, υπόγειας ροής και άλλων προβλημάτων ροής. Με τις εξελίξεις στην τεχνολογία των Η/Υ και των συστημάτων CAD σύνθετα προβλήματα μπορούν να μοντελοποιηθούν πολύ εύκολα. Σε αυτή τη μέθοδο ανάλυσης, μία περίπλοκη περιοχή, η οποία ορίζει ένα συνεχές, διακριτοποιείται σε απλά γεωμετρικά σχήματα, τα οποία ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία (*finite elements*). Το είδος, οι ιδιότητες των υλικών, η παλαιότητα της κατασκευής υπολογίζονται πάνω σε αυτά τα στοιχεία και εκφράζονται σε όρους των άγνωστων τιμών στις γωνίες των στοιχείων. Από τη συγκεκριμένη διαδικασία, λαμβάνοντας υπόψη τα φορτία και τους περιορισμούς, προκύπτει ένα σύνολο

εξισώσεων. Η λύση αυτών των εξισώσεων δίνει την κατά προσέγγιση συμπεριφορά του συνεχούς.

Για να εφαρμοστεί η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων απαιτούνται τα εξής στάδια:

- α. Εισάγεται η γεωμετρία της κατασκευής σε ένα πρόγραμμα CAD και δημιουργείται το τρισδιάστατο μοντέλο
- β. Χωρίζεται το μοντέλο σε πεπερασμένα στοιχεία και εφόσον ετοιμαστεί το πλέγμα επιλέγεται το είδος της επίλυσης και εισάγονται τα επιπλέον δεδομένα που απαιτούνται. Τα δεδομένα αυτά αφορούν (1) το είδος / τύπος των υλικών, (2) τις ιδιότητες των υλικών (3) συνοριακές συνθήκες (4) τα ασκούμενα φορτία (π.χ. ίδιο βάρος, επιβολή επιπρόσθετης φόρτισης κ.α), (5) ανεμοπίεση (6) σεισμικά φορτία κ.α. Παραδείγματος χάριν, αν επιλεγεί να λυθεί το μοντέλο σε στατική καταπόνηση θα πρέπει να δοθούν τα δεδομένα για τις δυνάμεις και τις στηρίξεις. Αυτή η διαδικασία γίνεται με προγράμματα που αποκαλούνται *pre processor* (προεπεξεργαστές).
- γ. Όταν ετοιμαστούν τα δεδομένα για επίλυση, εισάγονται σε ένα πρόγραμμα το οποίο θα κάνει την επίλυση του προβλήματος. Τέτοιου είδους προγράμματα που επιλύουν λέγονται *solver* και χρησιμοποιούν για τις επιλύσεις αριθμητικές μεθόδους.
- δ. Όταν τελειώσει η επίλυση θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα πρόγραμμα, που αποκαλείται *post processor* (μετεπεξεργαστής), για να μπορέσει ο μελετητής να δει τα αποτελέσματα.

Για τη γέφυρα ΣΕΑ Παλλήνης Αττικής Οδού, υπολογίστηκαν οι κατακόρυφες μετατοπίσεις της γέφυρας βάσει των αριθμητικών μοντέλων με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Αρχικά, πραγματοποιήθηκαν προκαταρκτικές αναλύσεις της γέφυρας, προκειμένου να γίνει μια αρχική εκτίμηση της δομικής ακεραιότητάς της και του βαθμού κρισιμότητας κάθε στοιχείου. Το προσομοίωμα ανάλυσης περιελάμβανε, το σύστημα των πυλώνων, τους τένοντες ανάρτησης, τις κύριες δοκούς, τον ελκυστήρα και θλιπτήρα και τα τοιχώματα του κιβωτίου έδρασης.

Κατόπιν ολοκλήρωσης της προκαταρκτικής ανάλυσης της γέφυρας, πραγματοποιήθηκε η τελική διερεύνηση που έγιναν αναλυτικά χωρικά

προσομοιώματα με χρήση γραμμικών και επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων. Η γεωμετρία του φορέα αποδόθηκε με μεγάλη ακρίβεια και έγιναν αναλύσεις ευαισθησίας των αποτελεσμάτων σε διάφορες αριθμητικές παραδοχές, που σχετίζονται με τις παραμέτρους των ελαστικών σταθερών. Να σημειωθεί πως οι συγκεκριμένες αναλύσεις έγιναν από το Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ.

8.2 Υπολογισμός Μετακινήσεων Κλισιμέτρων και Συγκριτική Αξιολόγηση Έναντι Επίλυσης Αριθμητικού Μοντέλου

Για τη σύγκριση των μετρήσεων από τα ψηφιακά κλισίμετρα με τις μετρήσεις της γεωμετρικής χωροστάθμησης, ακολουθούνται δύο διαδικασίες:

- α. Υπολογίζονται οι συντελεστές του επιλεγμένου πολωνύμου κλίσης (5ου βαθμού), με βάση τις μετρημένες κατά μήκος κλίσεις από τα κλισίμετρα. Με βάση τις υπολογισμένες τιμές, γίνεται αριθμητική ολοκλήρωση του πολωνύμου και υπολογίζονται οι τιμές των συντελεστών του πολωνύμου μετατόπισης που εκφράζει τις μετατοπίσεις κατά μήκος της γέφυρας. Τέλος, για τις χρονικές στιγμές που είναι διαθέσιμη η χωροστάθμηση γίνονται οι ανάλογες συγκρίσεις των μετατοπίσεων στις θέσεις που υπάρχουν χωροσταθμικά σημεία.
- β. Υπολογίζονται οι συντελεστές του πολωνύμου μετατόπισης με βάση τις μετρημένες μετατοπίσεις από τη χωροστάθμηση. Γίνεται παραγωγή του πολωνύμου και προκύπτει το πολωνύμο κλίσης από τις μετρήσεις χωροστάθμησης. Τέλος, για τις χρονικές στιγμές που είναι διαθέσιμη η χωροστάθμηση συγκρίνονται οι υπολογισμένες τιμές κλίσης (από χωροστάθμηση) με τις μετρημένες (κλισίμετρα).

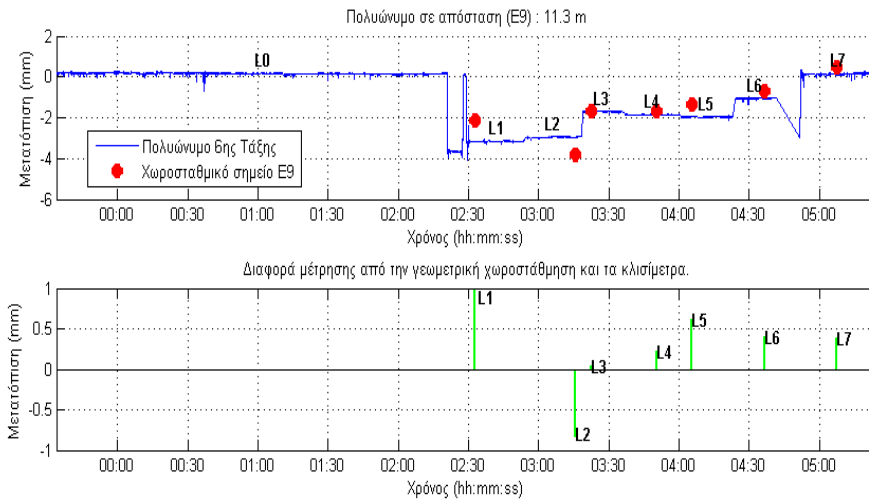
Στις Ενότητες 8.2.1 και 8.2.2 γίνεται αναλυτική επεξήγηση των δύο μεθόδων και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από κάθε μία από αυτές καθώς επίσης και από την Ανάλυση των Πεπερασμένων Στοιχείων.

8.2.1 Διαδικασία αριθμητικής ολοκλήρωσης μετρημένων κλίσεων

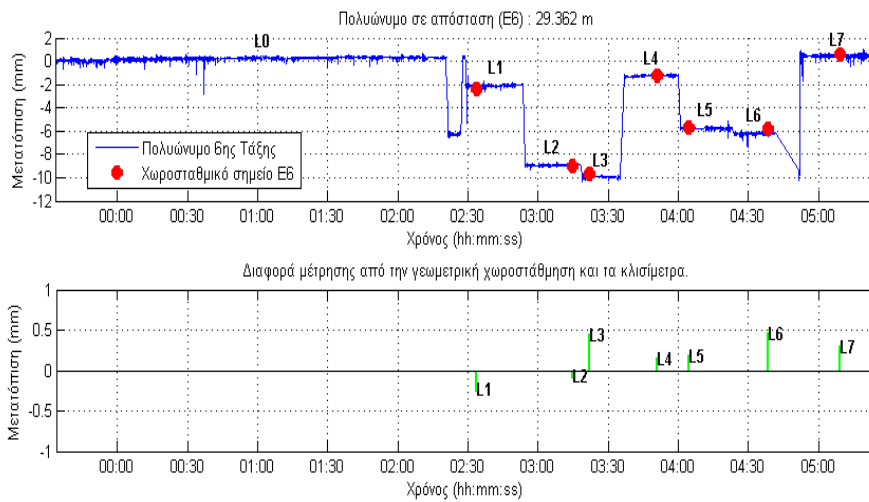
Όπως αναλύεται στην Ενότητα 7.1.1, από τις μετρημένες κατά μήκος κλίσεις των κλισιμέτρων, προκύπτει για κάθε χρονική στιγμή ένα πολυώνυμο κλίσης (5^ο βαθμού) και στην συνέχεια γίνεται αριθμητική ολοκλήρωση του πολυωνύμου αυτού και προκύπτει το πολυώνυμο μετατόπισης 6^ο βαθμού για κάθε χρονική στιγμή. Προκειμένου να γίνει σύγκριση της μετρούμενης μετατόπισης των χωροσταθμικών σημείων με την υπολογιζόμενη μετατόπιση από τα πολυώνυμα (6^ο βαθμού) που προκύπτει από τα δεδομένα των κλισιμέτρων ακολουθείται η εξής διαδικασία.

Για κάθε ένα από τα χωροσταθμικά σημεία που βρίσκεται στην παρειά της Ελευσίνας (E1-E11) δημιουργείται το γράφημα της μετατόπισης του σημείου σε συνάρτηση με το χρόνο (Σχήμα 8-1). Να σημειωθεί πως για τη συγκεκριμένη ανάλυση χρησιμοποιούνται μόνο τα χωροσταθμικά σημεία που βρίσκονται στην παρειά της Ελευσίνας γιατί και τα κλισίμετρα έχουν εγκατασταθεί στην παρειά αυτή.

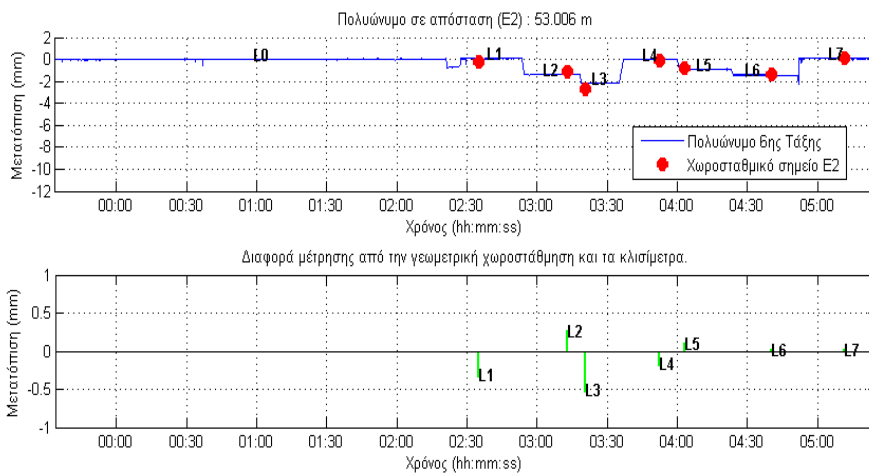
Στη συνέχεια, για κάθε χωροσταθμικό σημείο, τις χρονικές στιγμές κατά τις οποίες έχουν ληφθεί μετρήσεις κατά τη διαδικασία της γεωμετρικής χωροστάθμησης σε κάθε σενάριο παρατήρησης προκύπτει μια τιμή βύθισης από τη γεωμετρική χωροστάθμηση και μια τιμή βύθισης από το πολυώνυμο μετατόπισης που έχει προκύψει από τις μετρήσεις των κλισιμέτρων. Η διαφορά αυτών των δύο μετατοπίσεων απεικονίζεται σε αντίστοιχο γράφημα. Στο Σχήμα 8-1 παρουσιάζονται τα διαγράμματα της σύγκρισης της μετρούμενης μετατόπισης από της γεωμετρική χωροστάθμηση με την υπολογιζόμενη από τα πολυώνυμα για τα χωροσταθμικά σημεία E9, E6 και E2 για τα σενάρια παρατήρησης L0, ..., L7. Να σημειωθεί, πως παρουσιάζονται ενδεικτικά αυτά τα τρία χωροσταθμικά σημεία που βρίσκονται στην αρχή, στη μέση και στο τέλος της γέφυρας αντίστοιχα, ενώ η ανάλυση για όλα τα χωροσταθμικά σημεία βρίσκεται στο Παράρτημα Α (Σχήμα Α-1).



α.



β.



γ.

Σχήμα 8-1: Μετρημένες (γεωμετρική χωροστάθμηση) και υπολογισμένες (κλισίμετρα) κατακόρυφες μετατοπίσεις των σημείων E9 ($x=11.30$ m), E6 ($x=29.362$ m) και E2 ($x=56.006$ m) για τα σενάρια παρατήρησης L0, ..., L7

Figure 8-1: Measured (precise leveling) and computed (inclinometers) vertical displacements at points E9 ($x=11.30$ m), E6 ($x=29.362$ m) και E2 ($x=56.006$ m) for observation scenarios L0, ..., L7

Σύμφωνα με τα διαγράμματα στο Σχήμα 8-1 παρατηρείται ότι για το χωροσταθμικό σημείο E9 που βρίσκεται σε απόσταση 11.30 m από τη αφετηρία (θέση απόληξης πρώτου καλωδίου) η μεγαλύτερη τιμή βύθισης από το πολυώνυμο παρουσιάζεται στο σενάριο L1 και κυμαίνεται στα -3.2 mm και η μικρότερη τιμή βύθισης στο σενάριο L6 που κυμαίνεται στα -1.1 mm. Το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο δεδομένου ότι το σημείο E9 που βρίσκεται πλησίον του Άκρου 1 της γέφυρας, η καταπόνηση είναι μεγαλύτερη όταν το φορτηγό όχημα βρίσκεται στη θέση 1 που είναι πλησιέστερα στην αρχή στη γέφυρας και μικρότερη όταν το φορτηγό όχημα βρίσκεται στη θέση 6 που βρίσκεται στο τέλος της γέφυρας, πλησίον του Άκρου 2. Όσον αφορά τις διαφορές μέτρησης από τη γεωμετρική χωροστάθμιση και τα κλισίμετρα κυμαίνονται από 0.03 mm για το σενάριο L3 έως 1.04 mm για το σενάριο L1.

Για το χωροσταθμικό σημείο E6 σε απόσταση 29.362 m από την αφετηρία, δηλαδή στη μέση περίπου της γέφυρας και συγκεκριμένα μεταξύ του δεύτερου και του τρίτου καλωδίου, η μεγαλύτερη τιμή βύθισης παρατηρείται στο σενάριο L3 που το φορτηγό όχημα βρίσκεται προς το τέλος της γέφυρας και κυμαίνεται στα -10 mm ενώ η μικρότερη στο σενάριο L4, δηλαδή όταν το φορτηγό όχημα είναι στην αρχή της γέφυρας και κυμαίνεται στα -1.2 mm. Για τις διαφορές μέτρησης από τη γεωμετρική χωροστάθμιση και τα κλισίμετρα κυμαίνονται από -0.07 mm για το σενάριο L2 έως 0.45 mm για το σενάριο L6. Οι διαφορές από τις δύο μεθόδους είναι μικρές.

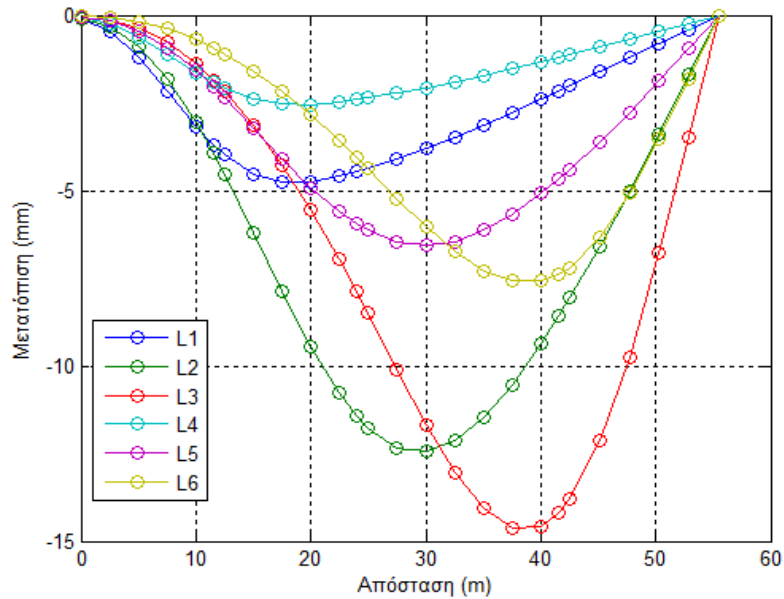
Για το χωροσταθμικό σημείο E2 σε απόσταση 53.006 m από την αφετηρία (δηλαδή στο τέλος της γέφυρας), η βύθιση είναι σχεδόν μηδενική (της τάξης των 0.05 mm) για τα σενάρια L1 και L4 όπου το φορτηγό όχημα βρίσκεται στην αρχή τη γέφυρας ενώ γίνεται μέγιστη όταν το φορτηγό όχημα βρίσκεται στη θέση 3 (στο τέλος της γέφυρας) και κυμαίνεται στα -2.1 mm. Οι διαφορές μέτρησης μεταξύ κλισιμέτρων και πολυωνύμου κυμαίνονται στα 0.01 mm για το L6 και -0.52 mm για το L3.

Σύμφωνα με τις παραπάνω παρατηρήσεις, εξάγεται το συμπέρασμα ότι υπάρχει μεγάλη συσχέτιση στις μετατοπίσεις μεταξύ των μετρήσεων της γεωμετρικής χωροστάθμισης και των πολυωνύμων μετατόπισης που προκύπτουν από τις μετρήσεις των κλισιμέτρων καθώς οι διαφορές τους είναι πολύ κοντά στο μηδέν. Λαμβάνοντας υπόψη και τα αντίστοιχα διαγράμματα που απεικονίζονται στο

Παράρτημα Α (Σχήμα Α-1), διαπιστώνεται ότι οι μεγαλύτερες διαφορές εντοπίζονται στα χωροσταθμικά σημεία που βρίσκονται στα άκρα της γέφυρας. Ιδιαίτερα για το χωροσταθμικό σημείο E11 οι διαφορές είναι της τάξης του 1mm όταν οι μέγιστες μετατοπίσεις είναι μικρότερες από 1mm. Αντίθετα όσο πλησιάζουμε στο κέντρο της γέφυρας οι τιμές συμπίπτουν και μάλιστα όσο κεντρικότερο είναι το σημείο τόσο καλύτερα τα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα για το χωροσταθμικό σημείο E7 οι διαφορές είναι της τάξης των 0.3 mm ενώ οι μετατοπίσεις φθάνουν ακόμα και τα 10 mm.

Τέλος, η μεγαλύτερη κατακόρυφη μετατόπιση της γέφυρας μεταξύ των σημείων E9, E6 και E2 παρατηρείται για το χωροσταθμικό σημείο E6 (μέση γέφυρας) και για το σενάριο L3 και αντιστοιχεί στα -10 mm. Παράλληλα, οι ελάχιστες τιμές μετακινήσεων παρουσιάζονται στο σενάριο L0 (η γέφυρα χωρίς φορτίο). Γενικά, σε κάθε σενάριο οι τιμές των βυθίσεων είναι μεγαλύτερες για εκείνα τα χωροσταθμικά σημεία που βρίσκονται πλησίον της θέσης επιβολής φορτίου για κάθε σενάριο. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη και τα αντίστοιχα διαγράμματα για όλα τα χωροσταθμικά σημεία που απεικονίζονται στο Παράρτημα Α (Σχήμα Α-1), η μεγαλύτερη βύθιση της γέφυρας παρατηρείται στο σενάριο L3 και για τα χωροσταθμικά σημεία E5 (35.096 m από την αφετηρία) και E4 (40.829 m από την αφετηρία) και κυμαίνεται στα -12 mm.

Εξίσου σημαντική είναι η σύγκριση των κατακόρυφων μετατοπίσεων που προκύπτουν από τη γεωμετρική χωροστάθμιση και τα ψηφιακά κλισίμετρα με τις θεωρητικές τιμές των μετατοπίσεων από την Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM). Συγκεκριμένα, έχουν υπολογιστεί οι τιμές των μετακινήσεων σε είκοσι πέντε κόμβους κατά μήκος της γέφυρας οι οποίοι βρίσκονται στην παρειά της Ελευσίνας, για κάθε μία από τις θέσεις του φορτηγού οχήματος. Οι θεωρητικές μετατοπίσεις έχουν υπολογιστεί από το εργαστήριο μεταλλικών κατασκευών της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ. Το Σχήμα 8-2 απεικονίζει τη μετατόπιση για διάφορα σημεία στη γέφυρα για κάθε σενάριο με βάση το θεωρητικό μοντέλο FEM.



Σχήμα 8-2: Υπολογισμένες (FEM) κατακόρυφες μετατοπίσεις κατά μήκος του καταστρώματος για τα σενάρια παρατήρησης L0, ..., L7

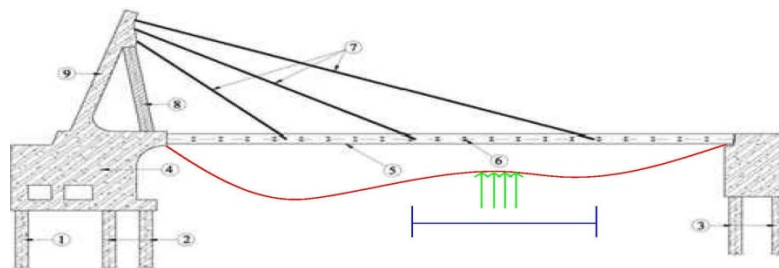
Figure 8-2: Calculated (FEM) vertical displacements along the deck for observation scenarios L0, ..., L7

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί αυτή η σύγκριση, δημιουργείται για κάθε σενάριο (L1-L6) και για κάθε χωροσταθμικό σημείο (E2-E11), το διάγραμμα της μετατόπισης σε συνάρτηση με το μήκος της γέφυρας, όπου για τις χρονικές στιγμές που έχει ληφθεί ανάγνωση στη σταδία σε κάθε χωροσταθμικό σημείο, απεικονίζονται το πολυώνυμο μετατόπισης που προκύπτει από τις μετρήσεις των κλισιμέτρων, η τιμή της μετατόπισης από τη χωροστάθμηση και οι θεωρητικές μετατοπίσεις από τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (Σχήμα 8-4).

Με βάση το Σχήμα 8-4 προκύπτει ότι υπάρχει παρόμοια τάση βύθισης της γέφυρας στα σενάρια L1 και L4, L2 και L5, L3 και L6 όπου το φορτηγό όχημα βρίσκεται στην ίδια απόσταση από την αφετηρία αλλά σε διαφορετική παρεία της γέφυρας. Συγκεκριμένα, για τα σενάρια L1, L2, L3 στην παρεία της Ελευσίνας, ενώ για τα σενάρια L4, L5, L6 στην παρεία προς Μαρκόπουλο. Επιπρόσθετα, παρατηρούνται μεγαλύτερες βυθίσεις της γέφυρας όταν το φορτηγό όχημα βρίσκεται στην παρεία προς Ελευσίνα με τις αντίστοιχες θέσεις όταν βρίσκεται στην παρεία προς Μαρκόπουλο. Το αποτέλεσμα αυτό είναι εν γένει αναμενόμενο καθώς τόσο τα κλισίμετρα όσο και τα χωροσταθμικά σημεία που ελέγχονται βρίσκονται στην παρεία της Ελευσίνας.

Επιπλέον, παρατηρείται ότι σε όλα τα σενάρια παρατήρησης η μορφή της καμπύλης του πολυωνύμου 6^{ου} βαθμού, ακολουθεί τις τιμές των θεωρητικών μετατοπίσεων που έχουν προκύψει από την ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων (FEM). Ωστόσο, οι θεωρητικές μετατοπίσεις του μοντέλου FEM κυρίως πλησίον των θέσεων επιβολής φορτίου όπου οι μετατοπίσεις είναι μέγιστες, εμφανίζονται μεγαλύτερες κατά απόλυτη τιμή από αυτές που προκύπτουν τόσο από τη χωροστάθμηση όσο και από το πολυώνυμο. Συγκεκριμένα, το σημείο της μέγιστης μετατόπισης είναι μετατοπισμένο από 2 έως 5 mm, σε σχέση με αυτό του πολυωνύμου και της γεωμετρικής χωροστάθμησης. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι κατασκευή είναι πιο δύσκαμπτη στην πραγματικότητα σε σχέση με την αναμενόμενη απόκριση βάσει του αριθμητικού μοντέλου.

Επιπλέον, σύμφωνα με το Σχήμα 8-4 (α, δ) παρατηρείται ότι για τα σενάρια L1 και L4 όπου το φορτηγό όχημα τοποθετείται στην αρχή της γέφυρας (Άκρο 1) στην παρειά προς Ελευσίνα και στην παρειά προς Μαρκόπουλο αντίστοιχα, παρατηρείται μια άνοδο της καμπύλης του πολυωνύμου σε απόσταση περίπου 20-40 m από την αφετηρία και κυρίως στα 30 m, κάτι που δεν παρατηρείται στο μοντέλο FEM. Το γεγονός αυτό πιθανόν οφείλεται στο δεύτερο και στο τρίτο καλώδιο της γέφυρας που βρίσκονται σε απόσταση 23.63 m 40.80 m και όταν τοποθετείται το φορτηγό όχημα στις θέσεις 1 και 4 (πλησίον Άκρου 1 γέφυρας) οπότε καταπονείται έντονα η περιοχή περίπου στα 11 m τότε τα καλώδια έχουν την τάση να “τραβούν” τη γέφυρα προς τα πάνω. Ως εκ τούτου, δημιουργείται αυτή η απότομη άνοδος του πολυωνύμου στην απόσταση των 20-40 m με κορύφωση στα 30 m που βρίσκεται ανάμεσα στο δεύτερο και τρίτο καλώδιο. Το Σχήμα 8-3 απεικονίζει την απότομη μεταβολή της καμπύλης μεταξύ του δεύτερου και τρίτου καλωδίου, ενώ τα πράσινα βέλη αναπαριστούν την κορύφωση της μεταβολής στην περιοχή των 30 m.

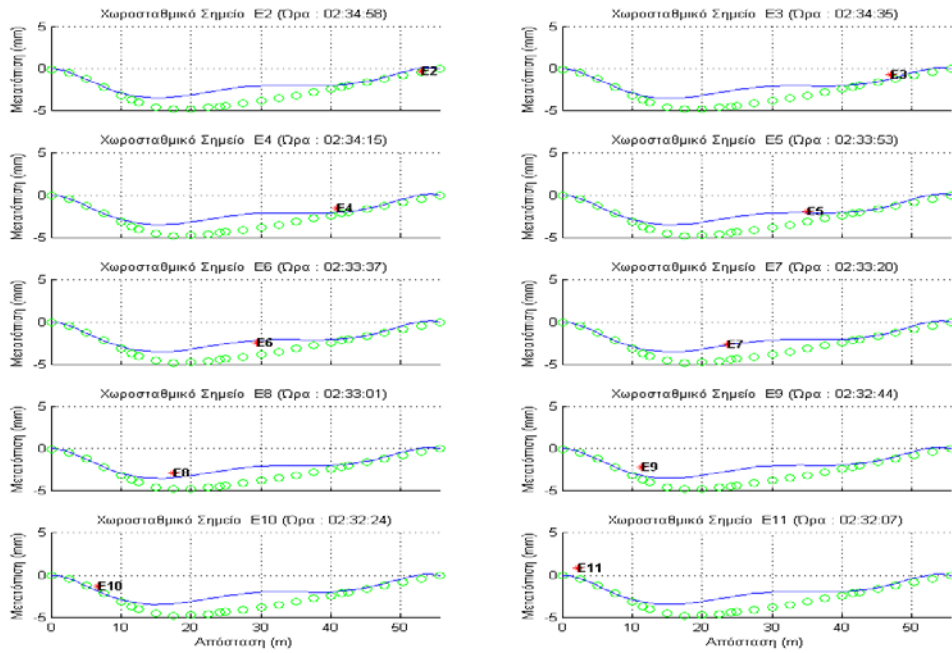


Σχήμα 8-3: Ενδεικτική αναπαράσταση απότομης ανόδου καμπύλης πολυωνύμου (κόκκινη γραμμή) μεταξύ του δεύτερου για τρίτου καλωδίου (πράσινα βέλη) για το σενάριο L1 και L4

Figure 8-3: Indicative representation sharp curve polynomial anode (red line) between the second to the third cable (green arrows) for scenario L1 and L4

Σενάριο :L1 (02:32:07-02:34:58)

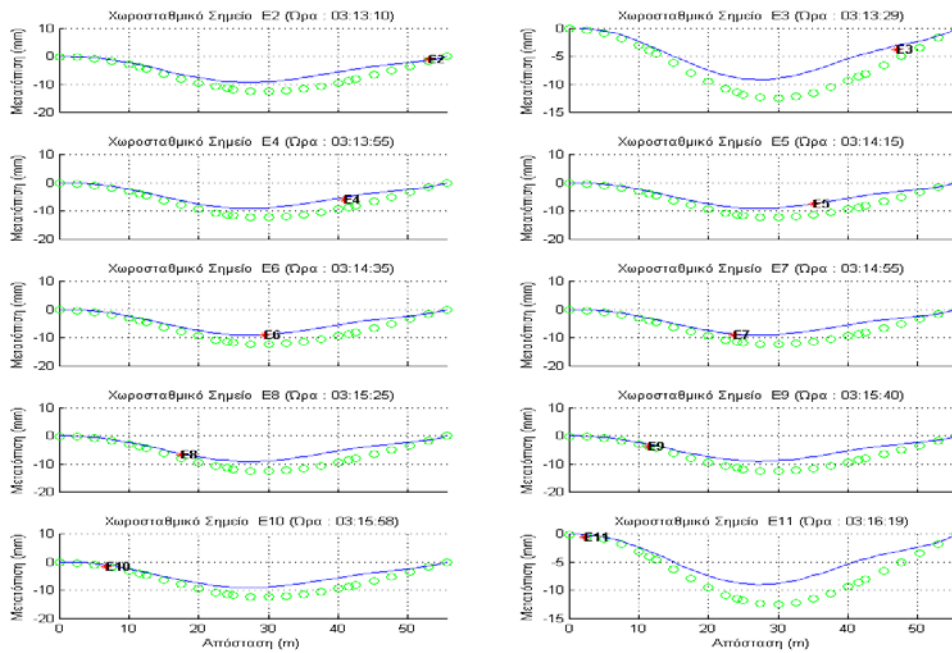
○ FEM — Πολυώνυμο 8ης Τάξης * Γεωμετρική Χωροστάθμιση



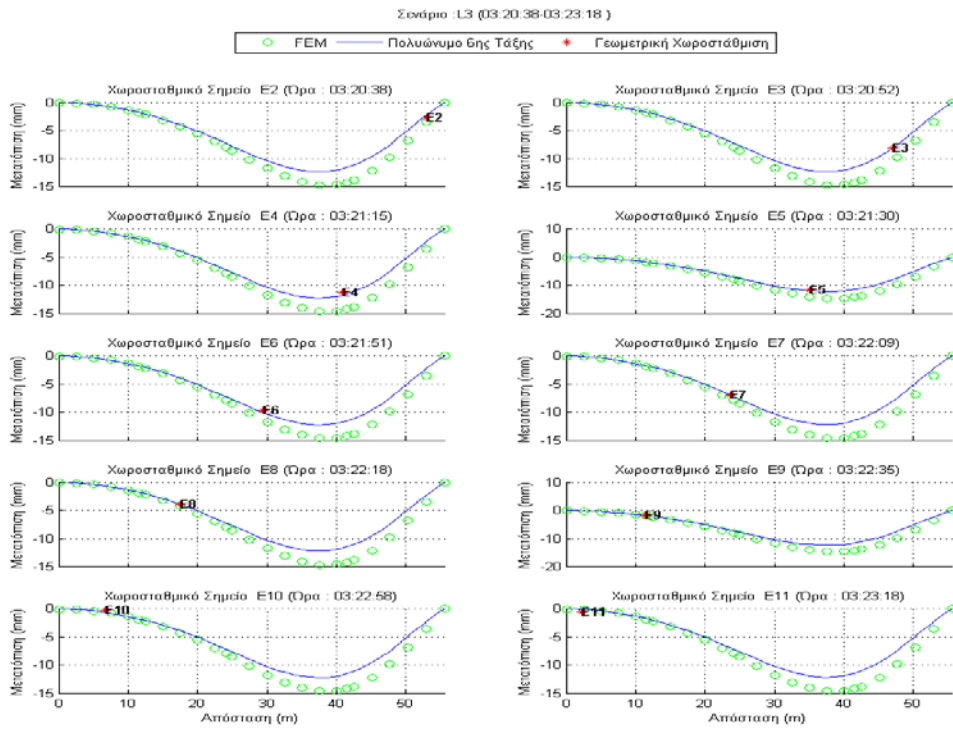
α.

Σενάριο :L2 (03:13:10-03:16:19)

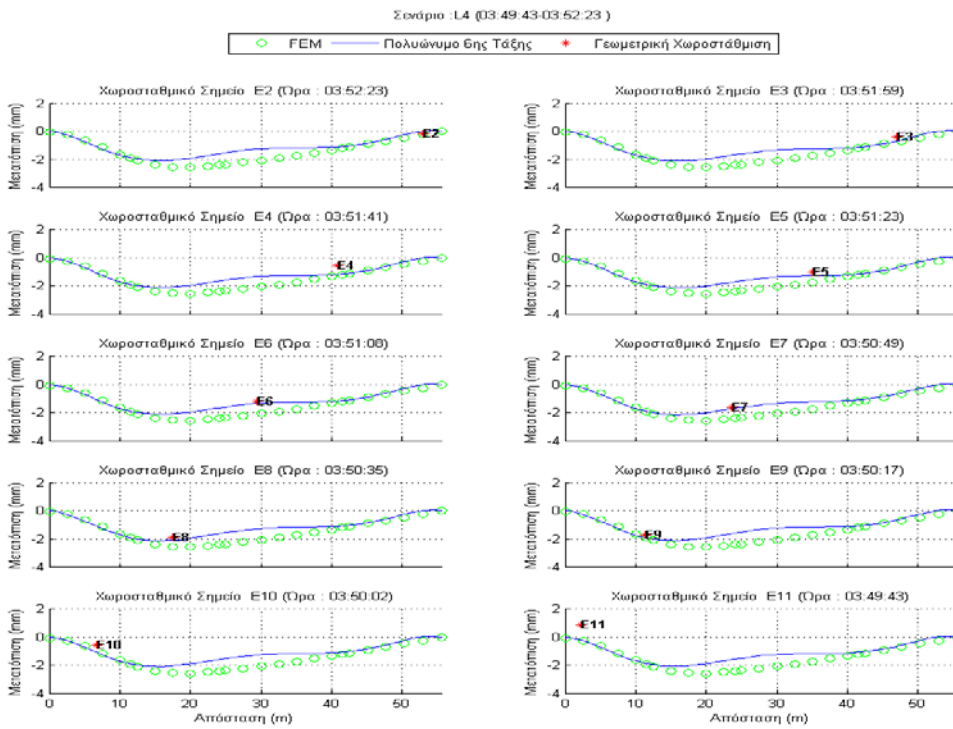
○ FEM — Πολυώνυμο 8ης Τάξης * Γεωμετρική Χωροστάθμιση



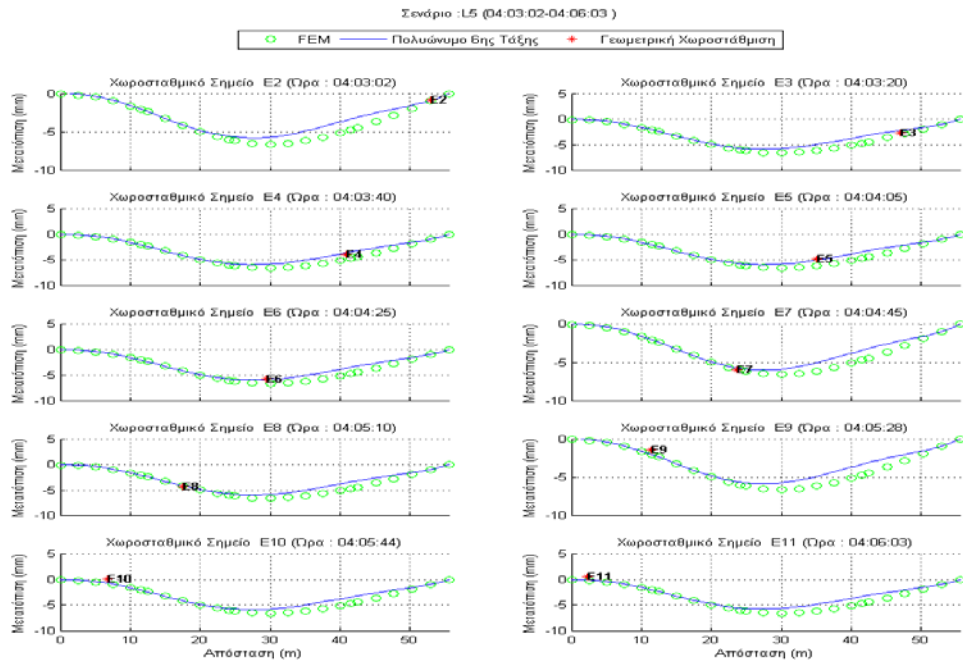
β.



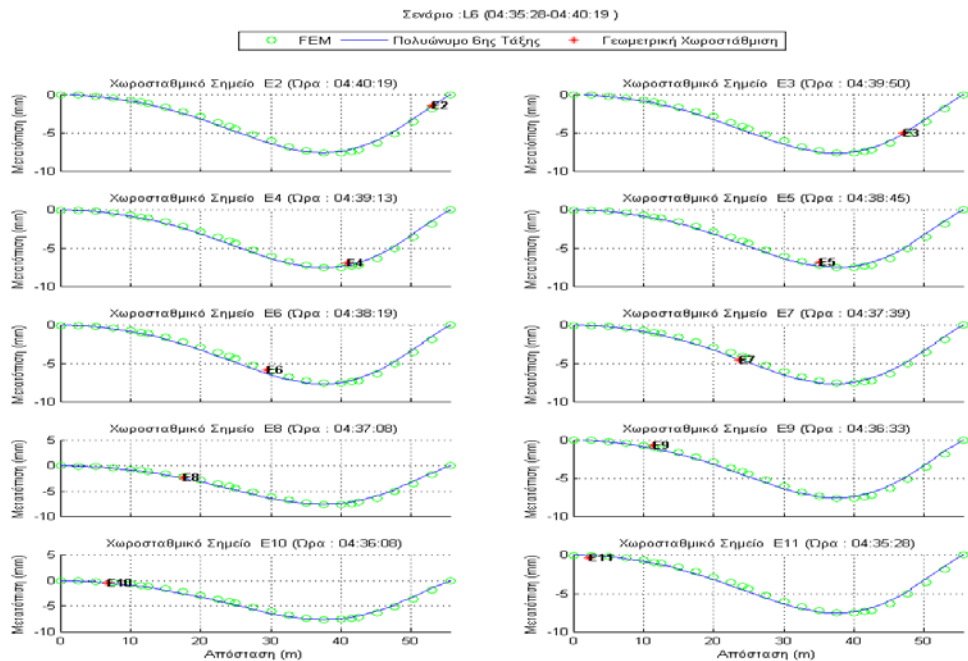
γ.



δ.



ε.



στ.

Σχήμα 8-4: Μετρημένες από γεωμετρική χωροστάθμιση (κόκκινο), ψηφιακά κλισίμετρα (μπλε) και υπολογισμένες (πράσινο) κατακόρυφες μετατοπίσεις για όλα τα χωροσταθμικά σημεία (E2, ..., E11) και όλα τα σενάρια παρατήρησης (L1, ..., L6)

Figure 8-4: Measured vertical displacements of precise leveling (red), digital inclinometers (blue) and calculated settlements (green) for all the leveling points (E2, ..., E11) and all observation scenarios (L1, ..., L6)

Ως προς τη σύγκριση μετρούμενης μετατόπισης από τα σημεία χωροστάθμησης με την υπολογιζόμενη από το πολυώνυμο, όπως παρατηρείται από τα παραπάνω διαγράμματα αλλά και από τον Πίνακα 8-1 υπάρχει μεγάλη συσχέτιση μεταξύ των μετατοπίσεων από τις δύο μεθόδους μέτρησης. Συγκεκριμένα, οι διαφορές τους είναι το πολύ έως 0.8 mm.

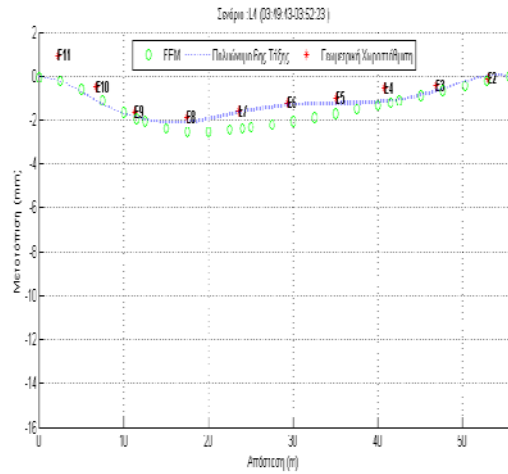
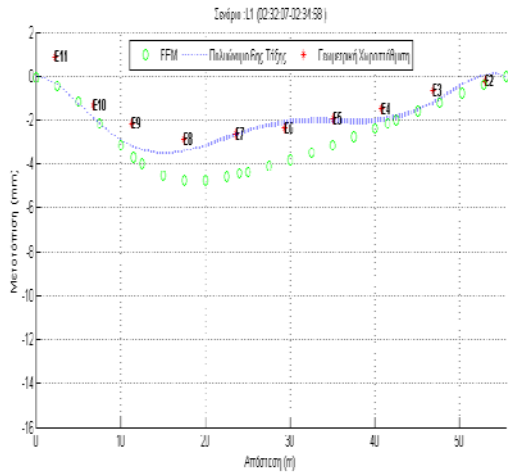
Σενάριο	Χωροστ. Σημείο	Γεωμετρική Χωροστάθμηση	Ώρα	Πολυώνυμο 6ης τάξης	Ώρα	Σενάριο	Χωροστ. Σημείο	Γεωμετρική Χωροστάθμηση	Ώρα	Πολυώνυμο 6ης τάξης	Ώρα
Σενάριο 1	E2	-0,0002	02:34:58	0,0001	02:34:59	Σενάριο 4	E2	-0,0001	03:52:23	0,0000	03:52:24
	E3	-0,0007	02:34:35	-0,0012	02:34:35		E3	-0,0004	03:51:59	-0,0007	03:52:01
	E4	-0,0015	02:34:15	-0,0021	02:34:16		E4	-0,0006	03:51:41	-0,0012	03:51:41
	E5	-0,0019	02:33:53	-0,0021	02:33:54		E5	-0,0010	03:51:23	-0,0013	03:51:24
	E6	-0,0024	02:33:37	-0,0022	02:33:37		E6	-0,0012	03:51:08	-0,0014	03:51:09
	E7	-0,0026	02:33:20	-0,0027	02:33:20		E7	-0,0016	03:50:49	-0,0017	03:50:50
	E8	-0,0029	02:33:01	-0,0035	02:33:01		E8	-0,0019	03:50:35	-0,0021	03:50:35
	E9	-0,0022	02:32:44	-0,0032	02:32:44		E9	-0,0017	03:50:17	-0,0019	03:50:18
	E10	-0,0014	02:32:24	-0,0019	02:32:25		E10	-0,0005	03:50:02	-0,0011	03:50:03
	E11	0,0009	2:32:07	-0,0003	02:32:08		E11	0,0009	3:49:43	-0,0002	03:49:44
Σενάριο 2	E2	-0,0011	03:13:10	-0,0014	03:13:11	Σενάριο 5	E2	-0,0008	04:03:02	-0,0009	04:03:03
	E3	-0,0038	03:13:29	-0,0031	03:13:31		E3	-0,0026	04:03:20	-0,0022	04:03:20
	E4	-0,0060	03:13:55	-0,0052	03:13:56		E4	-0,0039	04:03:40	-0,0036	04:03:42
	E5	-0,0077	03:14:15	-0,0075	03:14:15		E5	-0,0049	04:04:05	-0,0050	04:04:05
	E6	-0,0090	03:14:35	-0,0089	03:14:35		E6	-0,0057	04:04:25	-0,0059	04:04:27
	E7	-0,0091	03:14:55	-0,0087	03:14:56		E7	-0,0060	04:04:45	-0,0057	04:04:46
	E8	-0,0069	03:15:25	-0,0063	03:15:26		E8	-0,0043	04:05:10	-0,0041	04:05:11
	E9	-0,0038	03:15:40	-0,0030	03:15:41		E9	-0,0014	04:05:28	-0,0020	04:05:28
	E10	-0,0016	03:15:58	-0,0010	03:15:58		E10	0,0001	4:05:44	-0,0007	04:05:46
	E11	-0,0005	03:16:19	-0,0001	03:16:19		E11	0,0006	4:06:03	-0,0001	04:06:03
Σενάριο 3	E2	-0,0027	03:20:38	-0,0022	03:20:38	Σενάριο 6	E2	-0,0014	04:40:19	-0,0014	04:40:20
	E3	-0,0080	03:20:52	-0,0082	03:20:53		E3	-0,0050	04:39:50	-0,0051	04:39:50
	E4	-0,0114	03:21:15	-0,0118	03:21:16		E4	-0,0070	04:39:13	-0,0073	04:39:14
	E5	-0,0118	03:21:30	-0,0120	03:21:31		E5	-0,0069	04:38:45	-0,0074	04:38:46
	E6	-0,0096	03:21:51	-0,0100	03:21:53		E6	-0,0058	04:38:19	-0,0063	04:38:20
	E7	-0,0069	03:22:09	-0,0070	03:22:10		E7	-0,0045	04:37:39	-0,0045	04:37:40
	E8	-0,0039	03:22:18	-0,0039	03:22:18		E8	-0,0024	04:37:08	-0,0025	04:37:08
	E9	-0,0017	03:22:35	-0,0017	03:22:35		E9	-0,0007	04:36:33	-0,0011	04:36:33
	E10	-0,0003	03:22:58	-0,0007	03:22:59		E10	-0,0005	04:36:08	-0,0004	04:36:08
	E11	-0,0005	03:23:18	-0,0001	03:23:18		E11	-0,0003	04:35:28	-0,0001	04:35:29

Πίνακας 8-1: Σύγκριση μετρούμενης μετατόπισης από τα χωροσταθμικά σημεία με την υπολογιζόμενη από τα πολυώνυμα (6^{ου} βαθμού) για κάθε σενάριο παρατήρησης

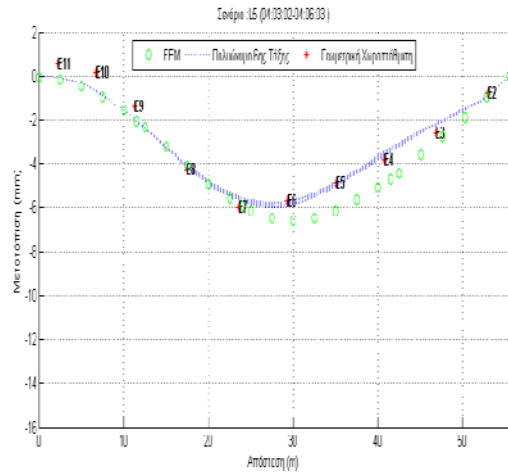
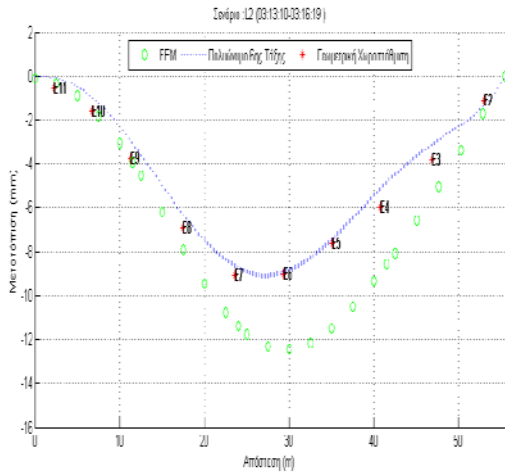
Table 8-1: The measured displacements of leveling points compared to the calculated of polynomials (6th order) for each observation scenario

Μια καλύτερη εικόνα των βυθίσεων κατά μήκος της γέφυρας από τις τρεις μεθόδους (πολυώνυμο κλισιμέτρων, γεωμετρική χωροστάθμηση, μοντέλο FEM) για κάθε σενάριο παρατήρησης, απεικονίζεται στα διαγράμματα που ακολουθούν (Σχήμα 8-5). Μάλιστα, σε κάθε γραμμή απεικονίζονται τα αντίστοιχα σενάρια όταν το φορτηγό όχημα βρίσκεται στην ίδια απόσταση από την αφετηρία αλλά σε διαφορετική παρειά της γέφυρας για να είναι εμφανής η παρόμοια μορφή μεταβολής των βυθίσεων. Δηλαδή, αριστερά βρίσκονται τα σενάρια L1, L2, L3 και δεξιά τα σενάρια L4, L5, L6 αντίστοιχα. Όσον αφορά τα πολυώνυμα μετατόπισης πρόκειται για παραπάνω από ένα πολυώνυμα, ένα για κάθε χρονική στιγμή που είναι διαθέσιμη από τη χωροστάθμηση στα σημεία (E2-E11).

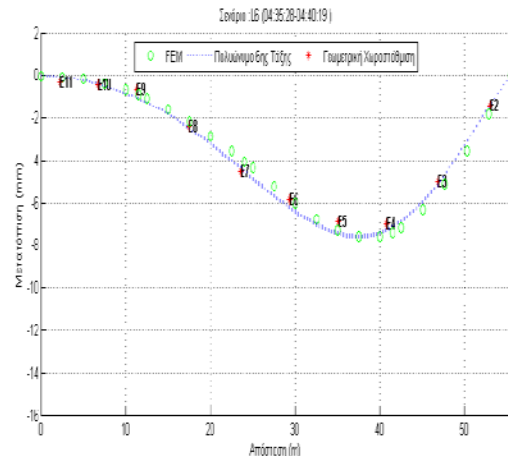
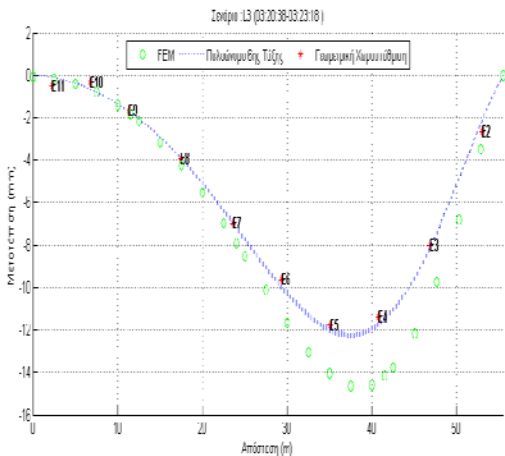
Όπως αναφέρεται προηγούμενα, και σε αυτά τα διαγράμματα είναι εμφανής η παρόμοια τάση μεταβολής των μετατοπίσεων κατά μήκος της γέφυρας και στις τρεις μεθόδους (πολυώνυμο κλισιμέτρων, γεωμετρική χωροστάθμηση, μοντέλο FEM). Αυτό σημαίνει, ότι οι μετρήσεις είναι ορθές και περιγράφουν την πραγματική λειτουργική κατάσταση του φορέα. Επιπλέον, η δυσμενέστερη περίπτωση καταπόνησης της γέφυρας είναι όταν το φορτηγό όχημα βρίσκεται στη θέση 3 (σενάριο L3) όπου οι μέγιστες βυθίσεις από το πολυώνυμο και τη γεωμετρική χωροστάθμηση, είναι της τάξης των 12 mm. Γενικά, κατά τη μετακίνηση από την αφετηρία και κατά μήκος της γέφυρας έως το σημείο τοποθέτησης τους φορτηγού οχήματος κάθε φορά, οι κατακόρυφες μετατοπίσεις αυξάνονται τόσο στην παρειά της Ελευσίνας όσο και στην παρειά προς Μαρκόπουλο και κορυφώνονται στα σημεία που βρίσκονται πλησιέστερα στη θέση του φορτηγού οχήματος, στη συνέχεια οι μετακινήσεις μικραίνουν και γίνονται ελάχιστες στα σημεία που είναι κοντά στα άκρα της γέφυρας.



α



β



γ.

Σχήμα 8-5: Μετρημένες από γεωμετρική χωροστάθμηση (κόκκινο), ψηφιακά κλισίμετρα (μπλε) και υπολογισμένες (πράσινο) κατακόρυφες μετατοπίσεις για όλα τα χωροσταθμικά σημεία (E2, ..., E11) και όλα τα σενάρια παρατήρησης (L1, ..., L6)
Figure 8-5: Measured vertical displacements of precise leveling (red), digital inclinometers (blue) and calculated settlements (green) for all the leveling points (E2, ..., E11) and all observation scenarios (L1, ..., L6)

8.2.2 Διαδικασία παραγωγίσιων μετρημένων υψομετρικών διαφορών

Όπως αναφέρεται στην Ενότητα 8.2, για τη σύγκριση των μετρήσεων των κλισιμέτρων με τις μετρήσεις της γεωμετρικής χωροστάθμησης ακολουθείται και η διαδικασία της παραγωγίσιων που είναι η αντίστροφη διαδικασία σε σχέση με την διαδικασία της ολοκλήρωσης. Συγκεκριμένα, υπολογίζεται το πολυώνυμο μετατόπισης με βάση τις μετρημένες μετατοπίσεις από τη χωροστάθμηση. Ακολουθεί η παραγωγή του πολυωνύμου και προκύπτει το πολυώνυμο κλίσης από τις μετρήσεις χωροστάθμησης. Τέλος, για τις χρονικές στιγμές που είναι διαθέσιμη η χωροστάθμηση συγκρίνονται οι υπολογισμένες τιμές κλίσης (από χωροστάθμηση) με τις μετρημένες (κλισίμετρα).

Ο υπολογισμός των πολυωνύμων πραγματοποιείται με τη Μέθοδο Ελαχίστων τετραγώνων. Ωστόσο, επειδή ο αριθμός των δεδομένων της γεωμετρικής χωροστάθμησης συναρτήσει και των περιορισμών μας δίνει τη δυνατότητα να εκτιμήσουμε με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων πολυώνυμο μέχρι 11^{ου} βαθμού για αριθμητικούς λόγους γίνεται κανονικοποίηση της απόστασης x με το μήκος της γέφυρας L . Επομένως έστω ότι το πολυώνυμο που περιγράφει τη μετατόπιση συναρτήσει της απόστασης είναι $n -$ βαθμού και δίνεται από την Εξίσωση :

$$u(\tilde{x}) = a_n \tilde{x}^n + a_{n-1} \tilde{x}^{n-1} + \dots + a_1 \tilde{x} + a_0 = \sum_{k=0}^n a_k \tilde{x}^k \quad (8.1)$$

Όπου $\tilde{x} = \frac{x}{L}$ η κανονικοποιημένη απόσταση και οι μονάδες των συντελεστών είναι $a_n \rightarrow 1$

Τότε το πολυώνυμο που περιγράφει την κλίση θα δίνεται από την Εξίσωση:

$$\theta(\tilde{x}) = \frac{du(\tilde{x})}{dx} = \frac{du(\tilde{x})}{d\tilde{x}} \frac{d\tilde{x}}{dx} = \frac{(na_n \tilde{x}^{n-1} + (n-1)a_{n-1} \tilde{x}^{n-2} + \dots + a_1)}{L} = \frac{1}{L} \sum_{k=1}^n ka_k \tilde{x}^{k-1} \quad (8.2)$$

Πριν εφαρμοσθεί η Μέθοδος των Ελαχίστων Τετραγώνων για την εκτίμηση των συντελεστών του πολυωνύμου κλίσης από τις αντίστοιχες μετρήσεις των κλισιμέτρων εφαρμόζονται οι συνοριακές συνθήκες (Εξίσωση 7.4) στα παραπάνω πολυώνυμο (Εξισώσεις 8.1 και 8.2) και προκύπτει:

$$\theta(0) = \frac{1}{L} \sum_{k=1}^n k a_k \tilde{x}^{k-1} \Big|_{\tilde{x}=0} = \sum_{k=2}^n k a_k \tilde{x}^{k-1} \Big|_{\tilde{x}=0} + a_1 = 0 \Rightarrow a_1 = 0 \quad (8.3)$$

$$u(0) = \sum_{k=0}^n a_k \tilde{x}^k \Big|_{\tilde{x}=0} = \sum_{k=1}^n a_k \tilde{x}^k \Big|_{\tilde{x}=0} + a_0 = 0 \Rightarrow a_0 = 0 \quad (8.4)$$

$$u(1) = \sum_{k=0}^n a_k \tilde{x}^k \Big|_{\tilde{x}=1} = \sum_{k=0}^n a_k = \sum_{k=3}^n a_k + a_2 + a_1 + a_0 = 0 \xrightarrow{7.33, 7.34} a_2 = - \sum_{k=3}^n a_k \quad (8.5)$$

Βάσει των Εξισώσεων 8.3, 8.4, 8.5 οι αρχικές Εξισώσεις 8.1 και 8.2 των πολυωνύμων γίνονται:

$$u(\tilde{x}) = a_n \tilde{x}^n + a_{n-1} \tilde{x}^{n-1} + \dots + a_3 \tilde{x}^3 + \left(- \sum_{k=3}^n a_k \right) \tilde{x}^2 = \sum_{k=3}^n a_k \tilde{x}^k - \left(\sum_{k=3}^n a_k \right) \tilde{x}^2 \quad (8.6)$$

$$\theta(\tilde{x}) = \frac{1}{L} \sum_{k=3}^n k a_k \tilde{x}^{k-1} - \frac{2}{L} \left(\sum_{k=3}^n a_k \right) \tilde{x} = \frac{1}{L} \sum_{k=3}^n a_k (k \tilde{x}^{k-1} - 2 \tilde{x}) \quad (8.7)$$

Για την εκτίμηση των παραμέτρων της Εξίσωσης 8.6 θα χρησιμοποιηθεί η Μέθοδος των Ελαχίστων Τετραγώνων. Συγκεκριμένα η εξίσωση γράφεται σε διανυσματική μορφή ως προς του συντελεστές:

$$u(\tilde{x}) = \sum_{k=3}^n a_k \tilde{x}^k - \left(\sum_{k=3}^n a_k \right) \tilde{x}^2 = \sum_{k=3}^n a_k \tilde{x}^k - \sum_{k=3}^n a_k \tilde{x}^2 = \sum_{k=3}^n a_k (\tilde{x}^k - \tilde{x}^2)$$

$$u(\tilde{x}) = [\tilde{x}^3 - \tilde{x}^2 \quad \dots \quad \tilde{x}^n - \tilde{x}^2] \cdot \begin{bmatrix} a_3 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} \quad (8.8)$$

Αν u_k είναι η μετατόπιση όπως προκύπτει από την γεωμετρική χωροστάθμηση στα χωροσταθμικά σημεία E2-E11 (το E1 βρίσκεται εκτός της γέφυρας) στις κανονικοποιημένες θέσεις $\tilde{x}_k = x_k/L$ τότε εφαρμόζοντας την Εξίσωση 8.8 για κάθε χωροσταθμικό σημείο παίρνουμε το ακόλουθο γραμμικό σύστημα:

$$\begin{bmatrix} u_2 \\ u_3 \\ \vdots \\ u_{10} \\ u_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u(\tilde{x}_2) \\ u(\tilde{x}_3) \\ \vdots \\ u(\tilde{x}_{10}) \\ u(\tilde{x}_{11}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_2 \\ e_3 \\ \vdots \\ e_{10} \\ e_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{x}_2^3 - \tilde{x}_2^2 & \dots & \tilde{x}_2^n - \tilde{x}_2^2 \\ \tilde{x}_3^3 - \tilde{x}_3^2 & \dots & \tilde{x}_3^n - \tilde{x}_3^2 \\ \vdots & \dots & \vdots \\ \tilde{x}_{10}^3 - \tilde{x}_{10}^2 & \dots & \tilde{x}_{10}^n - \tilde{x}_{10}^2 \\ \tilde{x}_{11}^3 - \tilde{x}_{11}^2 & \dots & \tilde{x}_{11}^n - \tilde{x}_{11}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_3 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} + \mathbf{e} \quad (8.9)$$

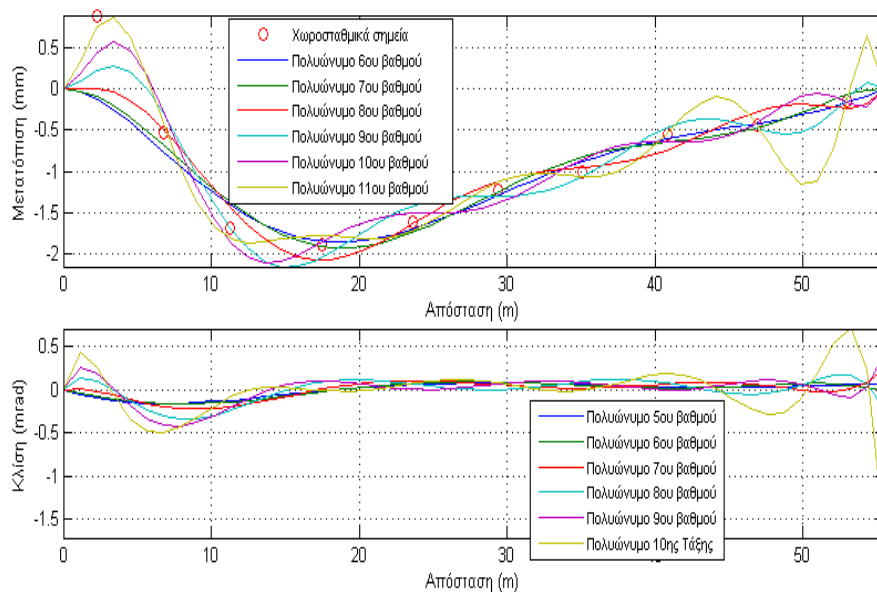
Όπου e είναι το σφάλμα της προσαρμογής. Για την εκτίμηση των συντελεστών a_3, \dots, a_n το παραπάνω σύστημα επιλύεται με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων χρησιμοποιώντας την συνάρτηση του MATLAB *mldivide*. Το παραπάνω σύστημα επιλύεται για κάθε σενάριο παρατήρησης.

Ωστόσο, πρέπει να επιλεγεί ο βέλτιστος βαθμός του πολυωνύμου. Για την επιλογή βαθμού πολυωνύμου δοκιμάζονται επαναληπτικά πολυώνυμα διαφορετικών βαθμών υπολογίζεται το σφάλμα προσαρμογής.

$$Error = \sum_{s=1}^{Ns} \sum_{k=2}^{11} (u_k^s - u^s(\tilde{x}_k))^2 \quad (8.10)$$

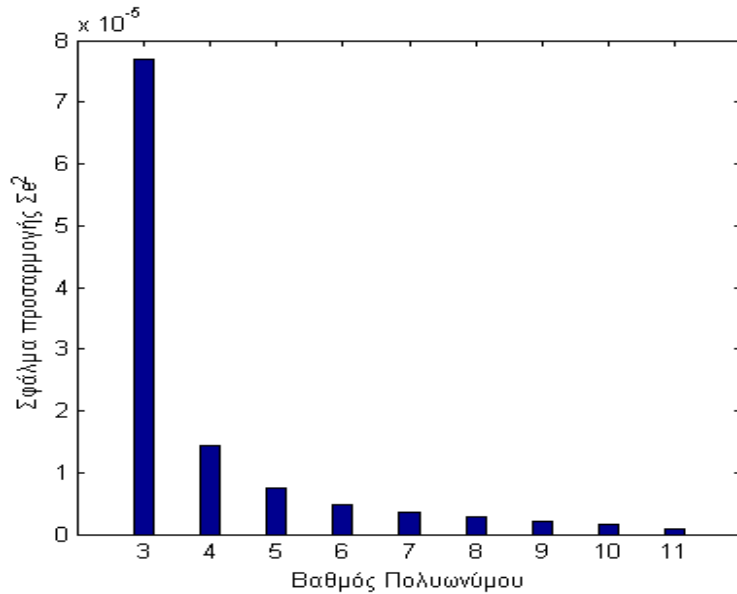
Όπου s το σενάριο, Ns το σύνολο των σεναρίων, u_k^s η μετατόπιση μέσω γεωμετρικής χωροστάθμησης στο k χωροσταθμικό σημείο για το σενάριο s , και $u^s(\tilde{x}_k)$ το εκτιμώμενο πολυώνυμο των μετατοπίσεων για το σενάριο s .

Το Σχήμα 8-6 αποτελεί ένα ενδεικτικό αποτέλεσμα προσαρμογής των πολυωνύμων μετατόπισης και κλίσης με διαφορετικού βαθμού πολυώνυμα για το σενάριο L4.



Σχήμα 8-6: Ενδεικτικό αποτέλεσμα προσαρμογής πολυωνύμου (κλίσης-άνω διάγραμμα και μετατόπισης-κάτω διάγραμμα) με διαφορετικού βαθμού πολυώνυμα για το σενάριο L4
Figure 8-6: Indicative results of polynomial fitting (inclination-upper diagram and displacement-down diagram) using different polynomial order for scenario L4

Επιπρόσθετα, το Σχήμα 8-7 απεικονίζει το σφάλμα προσαρμογής για διαφορετικού βαθμού πολυώνυμα. Είναι εμφανές ότι το σφάλμα προσαρμογής δεν μειώνεται σημαντικά όταν ο βαθμός είναι μεγαλύτερος από 8, 9 ενώ η μορφή της καμπύλης προσαρμογής παραμένει αμετάβλητη για πολυώνυμο βαθμού μεγαλύτερου από 9. Επομένως, επιλέγεται 9^ο βαθμού πολυώνυμο.



Σχήμα 8-7: Σφάλμα προσαρμογής συναρτήσει του βαθμού πολυωνύμου
Figure 8-7: Fitting error for different polynomial orders

Σύμφωνα με την ανάλυση που προηγείται, η μετατόπιση του καταστρώματος της γέφυρας μπορεί να εκφραστεί με τη βοήθεια ενός πολυωνύμου 9^ο βαθμού ως εξής:

$$u(x) = a\left(\frac{x}{L}\right)^9 + b\left(\frac{x}{L}\right)^8 + c\left(\frac{x}{L}\right)^7 + d\left(\frac{x}{L}\right)^6 + e\left(\frac{x}{L}\right)^5 + f\left(\frac{x}{L}\right)^4 + g\left(\frac{x}{L}\right)^3 + h\left(\frac{x}{L}\right)^2 + i\left(\frac{x}{L}\right) + j \quad (8.11)$$

όπου:

$u(x)$: Η μετατόπιση της γέφυρας σε κάθε χρονική στιγμή

$a, b, c, d, e, f, g, h, i, j$: Οι συντελεστές του πολυωνύμου

x : η απόσταση (m) από την αφετηρία της γέφυρας

Το πολυώνυμο κλίσης μπορεί να υπολογιστεί παραγωγίζοντας την Εξίσωση 8.11:

$$\theta(x) = 9\frac{a}{L^9}x^8 + 8\frac{b}{L^8}x^7 + 7\frac{c}{L^7}x^6 + 6\frac{d}{L^6}x^5 + 5\frac{e}{L^5}x^4 + 4\frac{f}{L^4}x^3 + 3\frac{g}{L^3}x^2 + 2\frac{h}{L^2}x + \frac{i}{L} \quad (8.12)$$

Σύμφωνα με όσα έχουν αναφερθεί, οι δεσμεύσεις εκφράζονται μαθηματικά ως εξής:

$$\begin{aligned} u(0) &= 0 \\ u(L) &= 0 \\ \theta(0) &= 0 \end{aligned} \tag{8.13}$$

Εφαρμόζοντας τις δεσμεύσεις αυτές στις Εξισώσεις 8.11, 8.12 προκύπτουν τα παρακάτω:

$$u(0) = 0 \Rightarrow j = 0 \tag{8.14}$$

$$\theta(0) = 0 \Rightarrow i = 0 \tag{8.15}$$

$$u(L) = 0 \Rightarrow h = -(a + b + c + d + e + f + g) \tag{8.16}$$

Με αντικατάσταση των σχέσεων 8.14, 8.15, 8.16 στις Εξισώσεις 8.11, 8.12 προκύπτει:

$$\begin{aligned} u(x) &= a \left(\frac{x}{L}\right)^9 + b \left(\frac{x}{L}\right)^8 + c \left(\frac{x}{L}\right)^7 + d \left(\frac{x}{L}\right)^6 + e \left(\frac{x}{L}\right)^5 + f \left(\frac{x}{L}\right)^4 + g \left(\frac{x}{L}\right)^3 \\ &\quad - (a + b + c + d + e + f + g) \left(\frac{x}{L}\right)^2 \end{aligned} \tag{8.17}$$

$$\begin{aligned} \theta(x) &= \frac{a}{L^9} x^8 + 8 \frac{b}{L^8} x^7 + 7 \frac{c}{L^7} x^6 + 6 \frac{d}{L^6} x^5 + 5 \frac{e}{L^5} x^4 + 4 \frac{f}{L^4} x^3 + 3 \frac{g}{L^3} x^2 \\ &\quad - 2 \frac{(a + b + c + d + e + f + g)}{L^2} x \end{aligned} \tag{8.18}$$

Για την εκτίμηση του πολυωνύμου μετατόπισης από τα πειραματικά δεδομένα, πρέπει να γραφεί το πολυώνυμο μετατόπισης ως προς τους προς εκτίμηση συντελεστές, ώστε να προκύψει η βασική μορφή των εξισώσεων παρατήρησης:

$$\begin{aligned} u(x) &= a \left(\frac{x^9}{L^9} - \frac{x^2}{L^2}\right) + b \left(\frac{x^8}{L^8} - \frac{x^2}{L^2}\right) + c \left(\frac{x^7}{L^7} - \frac{x^2}{L^2}\right) + \\ &\quad d \left(\frac{x^6}{L^6} - \frac{x^2}{L^2}\right) + e \left(\frac{x^5}{L^5} - \frac{x^2}{L^2}\right) + f \left(\frac{x^4}{L^4} - \frac{x^2}{L^2}\right) + g \left(\frac{x^3}{L^3} - \frac{x^2}{L^2}\right) \end{aligned} \tag{8.19}$$

Επομένως πρόκειται για n=10 μετρήσεις μετατόπισης των E2-E11, για τον προσδιορισμό m=10 ανεξάρτητων καθοριστικών παραμέτρων που είναι οι συντελεστές των πολυωνύμων (a, b, c, d, e, f, g, h, i, j) οι οποίες πρέπει να ικανοποιούν s=3 δεσμεύσεις. Συνεπώς, ο βαθμός ελευθερίας r του συστήματος είναι:

$$r = n - (m - s) = 10 - (10 - 3) = 3 \quad (8.20)$$

Στη συνέχεια, γίνεται εφαρμογή στην Εξίσωση 8.19 των 10 διαθέσιμων μετρήσεων μετατόπισης για να σχηματιστούν οι 10 εξισώσεις παρατήρησης. Ουσιαστικά, στην Εξίσωση 8.19 αντικαθίστανται οι τιμές μετατόπισης των χωροσταθμικών σημείων E2-E11 και οι τιμές των x_2, x_3, \dots, x_{11} που αντιστοιχούν στις αποστάσεις των E2-E11 από την αφετηρία. Κατά συνέπεια, προκύπτει ο πίνακας σχεδιασμού $A_{10 \times 7}$ που περιέχει τους συντελεστές των αγνώστων παραμέτρων των εξισώσεων παρατήρησης, ο πίνακας των μετρήσεων μετατόπισης $l_{10 \times 1}$ και ζητείται ο πίνακας των αγνώστων συντελεστών του πολυωνύμου $\hat{x}_{7 \times 1}$.

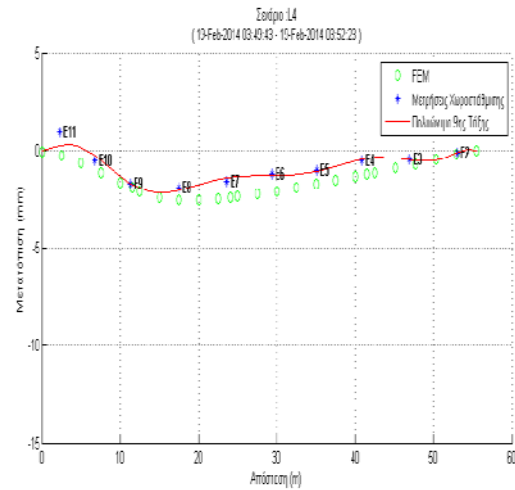
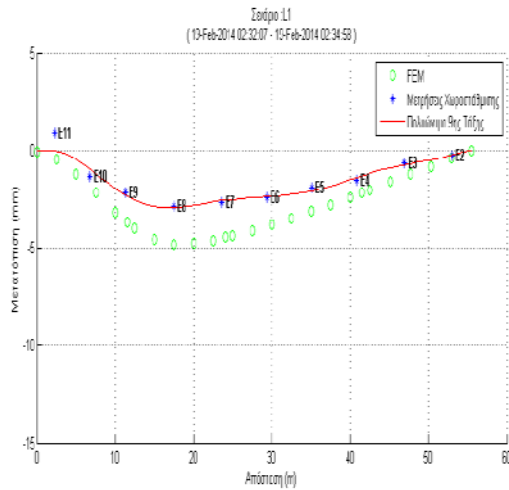
Για να ικανοποιείται η Μέθοδος των Ελαχίστων Τετραγώνων πρέπει:

$$A^T A \hat{x} = A^T l \quad (8.21)$$

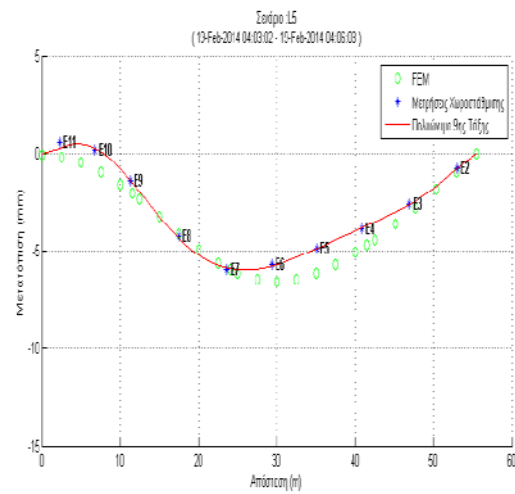
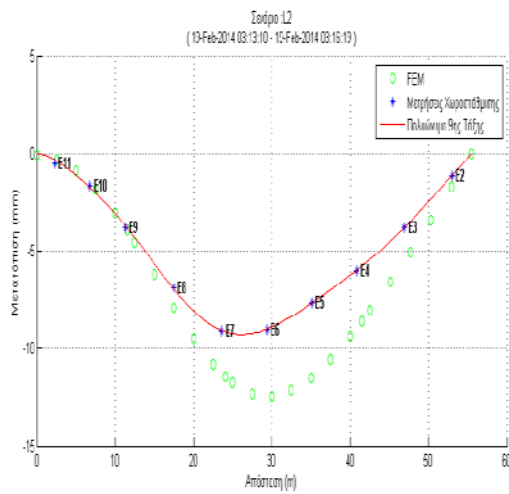
και με επίλυση ως προς τον πίνακα των αγνώστων προκύπτουν οι ζητούμενοι συντελεστές ως εξής:

$$\hat{x} = (A^T A)^{-1} A^T l \quad (8.22)$$

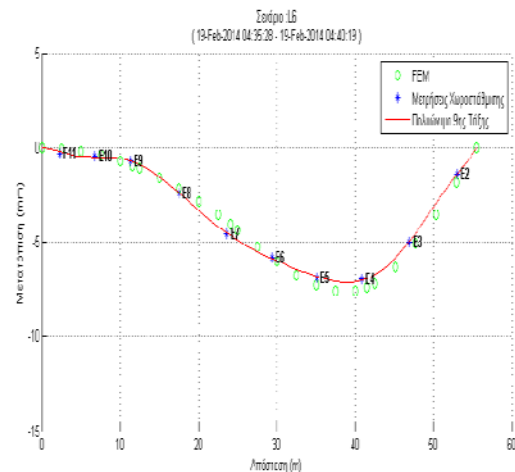
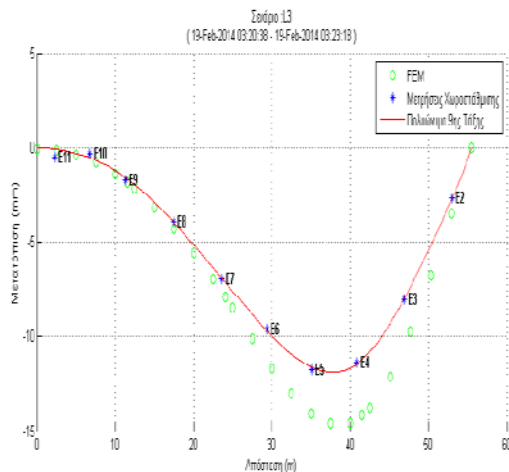
Στο Σχήμα 8-8 απεικονίζεται η προσαρμογή των πολυωνύμων μετατόπισης στις μετρημένες μετατοπίσεις της χωροστάθμησης και οι θεωρητικές τιμές των μετατοπίσεων του μοντέλου FEM για κάθε σενάριο. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η πολυωνυμική προσαρμογή έχει στις περισσότερες περιπτώσεις την ίδια γενική μορφή με την καμπύλη του θεωρητικού μοντέλου FEM. Σε όλες τις περιπτώσεις το μοντέλο FEM προβλέπει μεγαλύτερες κατά απόλυτη τιμή μέγιστες μετατοπίσεις ενώ και το σημείο της μέγιστης μετατόπισης είναι μετατοπισμένο από 2 έως 5 mm, σε σχέση με αυτό του πολυωνύμου. Τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων είναι πολύ κοντά για το σενάριο L6, ενώ παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες αποκλίσεις για το σενάριο L1.



α.



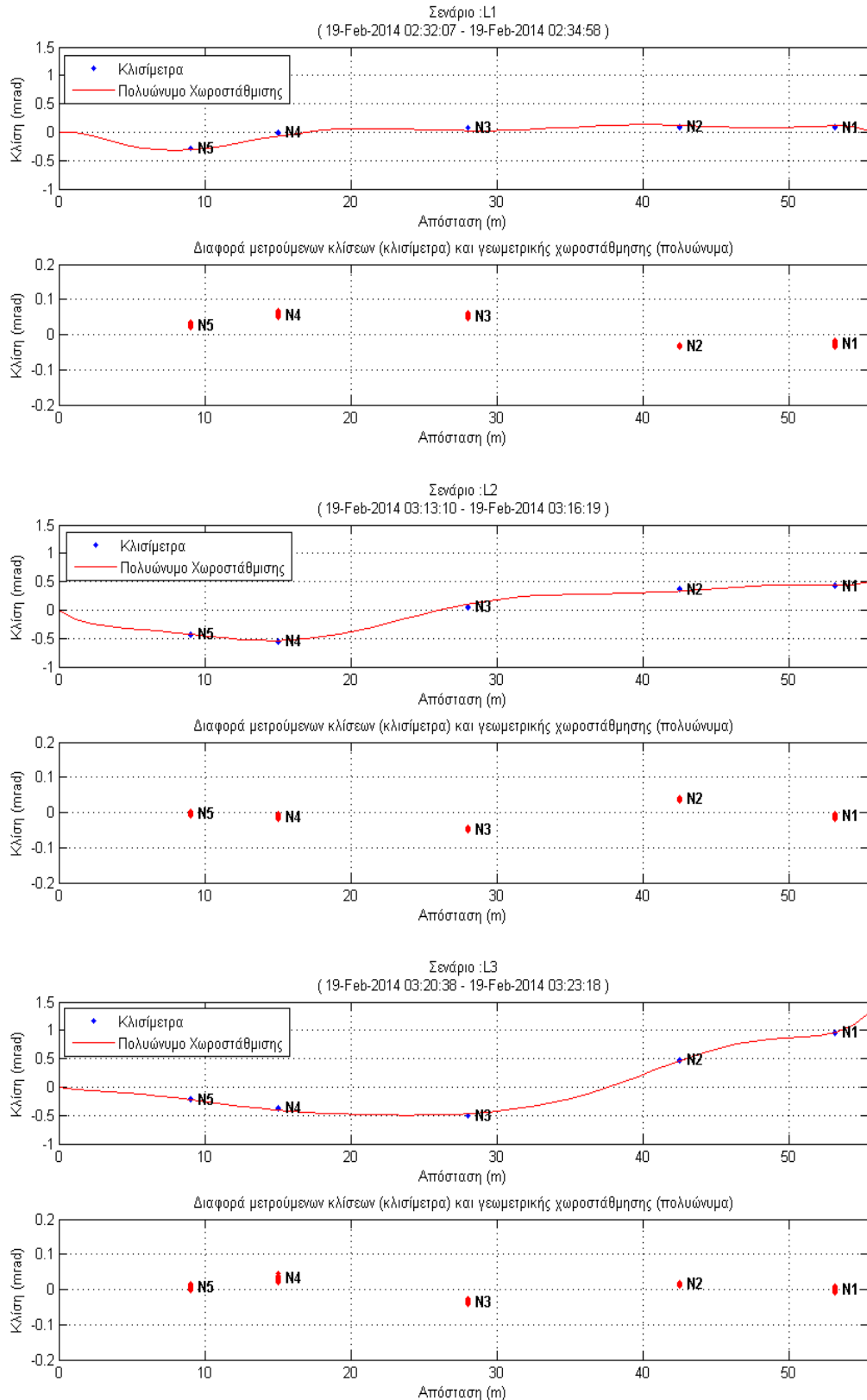
β.

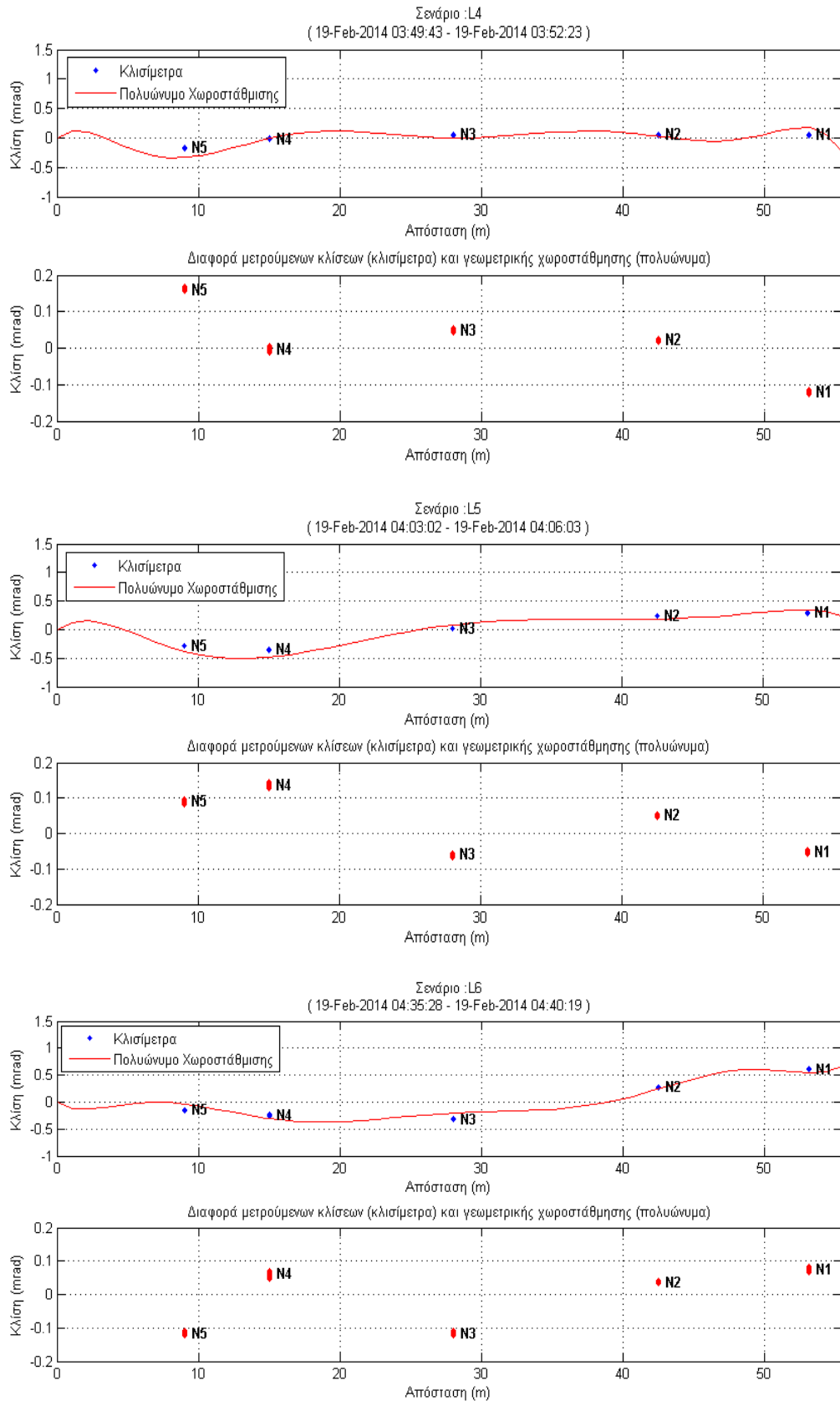


γ.

Σχήμα 8-8: Προσαρμογή πολυωνόμου μετατόπισης 9^{ου} βαθμού στις μετατοπίσεις της γεωμετρικής χωροστάθμησης και απεικόνιση μετατοπίσεων μοντέλου FEM για όλα τα σενάρια παρατήρησης (L1, ..L6)
Figure 8-8: Fitting of polynomial's (order 9) displacement in settlements of precise leveling and visualization of FEM model's displacements for all observation scenarios (L1, ..L6)

Επιπρόσθετα, στα διαγράμματα που ακολουθούν (Σχήμα 8-9), γίνεται σύγκριση μετρούμενης κλίσης (mrad) από τα πέντε κλισίμετρα με την υπολογιζόμενη από τα πολυώνυμα κλίσης 8^{ου} βαθμού (παραγωγή πολυωνύμου μετατόπισης 9^{ου} βαθμού) που προέκυψαν από τα δεδομένα της γεωμετρικής χωροστάθμησης.





Σχήμα 8-9: Σύγκριση μετρούμενης κλίσης από τα κλισίμετρα με την υπολογιζόμενη από τα πολυώνυμα κλίσης που προκύπτουν από τα δεδομένα της γεωμετρικής χωροστάθμισης όλα τα σενάρια παρατήρησης (L1, ..., L6)

Figure 8-9: Comparison of the measured slope of inclinometers with the estimated of slope polynomials resulting from precise leveling's data for all observation scenarios (L1, ..., L6)

Για την υλοποίηση της διαδικασίας υπολογισμού του πολυωνύμου κλίσης με παραγωγή του πολυωνύμου μετατόπισης, τα δεδομένα (οι τιμές των μετατοπίσεων της γεωμετρικής χωροστάθμησης) δεν αναφέρονται σε μια χρονική στιγμή αλλά σε μια περίοδο (χρονική διάρκεια κάθε σεναρίου παρατήρησης). Επομένως, στα Σχήματα 8-9 απεικονίζεται το πολυώνυμο κλίσης που προκύπτει από τη γεωμετρική χωροστάθμηση, με όλες τις μετρημένες κλίσεις (ανηγμένες) από όλα τα κλισίμετρα για όλες τις χρονικές στιγμές στη χρονική διάρκεια κάθε σεναρίου. Κατά συνέπεια, υπάρχουν πολλές μετρήσεις κλίσης του ίδιου κλισίμετρου σε διαφορετικές χρονικές στιγμές μέσα στην περίοδο του σεναρίου.

Είναι εμφανές ότι οι διαφορές των μετρημένων κλίσεων (κλισίμετρα) με τις υπολογισμένες από τα πολυώνυμα κλίσης που προκύπτουν από τα δεδομένα της γεωμετρικής χωροστάθμησης, είναι μικρές. Η μέγιστη διαφορά είναι της τάξης των 0.17 mrad. Δηλαδή, οι μετρήσεις και τα πολυώνυμα βρίσκονται σε σχετική συμφωνία. Ιδιαίτερα για τα σενάρια L2 και L3, το σφάλμα είναι τουλάχιστον μια τάξη μικρότερο για όλα τα κλισίμετρα. Για τα άλλα σενάρια η γενική μορφή είναι κοινή, ωστόσο το σφάλμα μεταξύ κλισιμέτρων και πολυωνύμου, για κάποια κλισίμετρα και σενάρια είναι μεγαλύτερο. Κατά συνέπεια, και αυτή η διαδικασία αποδεικνύει ότι την αξιοπιστία των ψηφιακών κλισιμέτρων ακριβείας στην μελέτη της δομικής ακεραιότητας της γέφυρας ΣΕΑ Παλλήνης Αττικής Οδού κατά την επιβολή ελεγχόμενης δοκιμαστικής φόρτισης.

9 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτό το Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν από την πειραματική διερεύνηση των δυνατοτήτων ψηφιακών κλισιμέτρων ακριβείας κατά την διενέργεια στατικών δοκιμαστικών φορτίσεων σε γέφυρες. Η εφαρμογή της μεθόδου έγινε στο πλαίσιο μελέτης της δομικής συμπεριφοράς της καλωδιωτής γέφυρας ΣΕΑ Παλλήνης, Αττικής Οδού ΑΕ. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- εκείνα που αφορούν τη δομική ακεραιότητα της κατασκευής
- εκείνα που αφορούν τη μέθοδο παρακολούθησης της γέφυρας

9.1 Συμπεράσματα ως προς την Απόκριση της Κατασκευής

Ένας από τους βασικούς στόχους της συγκεκριμένης μελέτης είναι η εξαγωγή συμπερασμάτων για τη στατική συμπεριφορά της γέφυρας ΣΕΑ Παλλήνης, Αττικής Οδού τα οποία συνοψίζονται ως εξής:

- Το βασικότερο ίσως συμπέρασμα ως προς την συμπεριφορά της γέφυρας έναντι των φορτίσεων έγκειται στο γεγονός ότι οι εκτιμώμενες από μετρήσεις κατακόρυφες μετακινήσεις της γέφυρας είναι μικρότερες σε μέγεθος από τις αντίστοιχες υπολογισμένες βάσει των μοντέλων αριθμητικής προσομοίωσης. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι κατασκευή είναι πιο δύσκαμπτη στην πραγματικότητα σε σχέση με την αναμενόμενη απόκριση βάσει του αριθμητικού μοντέλου.
- Η απόκριση της γέφυρας κατά μήκος του καταστρώματος είναι όμοια για τους τρεις τρόπους εκτίμησης (μετρήσεις γεωμετρικής χωροστάθμησης, κλισιμέτρων και υπολογισμένων τιμών αριθμητικού μοντέλου). Επιπρόσθετα, όπως αναμένεται, παρατηρείται αυξανόμενη μετατόπιση στις εκάστοτε θέσεις πλησίον της θέσης επιβολής του φορτίου για κάθε σενάριο παρατήρησης.
- Όπως αναμένεται, η ελάχιστη (~0 mm) βύθιση της γέφυρας παρατηρείται στο σενάριο L0 (γέφυρα χωρίς φορτίο), ενώ η μέγιστη τιμή βύθισης εμφανίζεται στο σενάριο L3 (φορτηγό σε απόσταση 40.83 m από την αφετηρία) και στα σημεία E4, E5, E6 μεταξύ του δεύτερου και το τρίτου καλωδίου (απόσταση

23.63 m - 40.80 m) και κυμαίνονται από -10 mm έως -12 mm σύμφωνα με τα αποτελέσματα των δεδομένων των κλισιμέτρων.

- Παρατηρείται, παρόμοια τάση βύθισης της γέφυρας μεταξύ των σεναρίων L1 και L4, L2 και L5, L3 και L6 δεδομένου ότι το φορτηγό βρίσκεται στην ίδια απόσταση από την αφετηρία αλλά σε διαφορετική παρειά της γέφυρας κάθε φορά. Επιπλέον, όπως αναμένεται εμφανίζονται μεγαλύτερες μετακινήσεις στην παρειά της Ελευσίνας και μικρότερες στην παρειά προς Μαρκόπουλο στα αντίστοιχα σενάρια δεδομένου ότι τα χωροσταθμικά σημεία αλλά και τα κλισίμετρα βρίσκονται στην παρειά της Ελευσίνας.

9.2 Συμπεράσματα ως προς τη Μέθοδο Παρακολούθησης της Γέφυρας

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:

- Η μελέτη απόκρισης του καταστρώματος γέφυρας έναντι στατικά επιβαλλόμενου φορτίου με χρήση κλισιμέτρων προϋποθέτει την διερεύνηση και αποδοχή ενός μαθηματικού μοντέλου υπολογισμού της κλίσης κατά μήκος του φορέα βάσει του οποίου υπολογίζονται στη συνέχεια κατακόρυφες μετακινήσεις. Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας (ένα άνοιγμα, πέντε κλισίμετρα) συνάγεται ότι πολυώνυμα πέμπτου και έκτου βαθμού αντίστοιχα μπορεί να περιγράψουν ικανοποιητικά την μορφή του φορέα (καμπυλότητας και κατακόρυφες μετακινήσεις αντίστοιχα) πετυχαίνοντας μικρότερο σφάλμα προσαρμογής.
- Από την ανάλυση προκύπτει υψηλή συσχέτιση μεταξύ των μετατοπίσεων του καταστρώματος που υπολογίζονται από μετρήσεις ψηφιακών κλισιμέτρων και την χρήση πολυωνύμων και τις αντίστοιχες τιμές που υπολογίζονται από μετρήσεις γεωμετρικής χωροστάθμησης. Συγκεκριμένα, οι διαφορές του δεν ξεπερνούν τα 0.8 mm, γεγονός που αποδεικνύει τόσο την ορθότητα των

πρωτογενών μετρήσεων κλισιμέτρων όσο και την αποτελεσματικότητα του μαθηματικού μοντέλου περιγραφής τους (πολύωνυμα).

- Οι μεγαλύτερες διαφορές που παρατηρούνται στις κατακόρυφες μετακινήσεις του φορέα μεταξύ της μεθόδου γεωμετρικής χωροστάθμησης και των υπολογισμένων τιμών από μετρήσεις κατά μήκος κλίσεων εντοπίζονται στα χωροσταθμικά σημεία πλησίον των άκρων της γέφυρας. Ιδιαίτερα για το χωροσταθμικό σημείο E11 οι διαφορές είναι της τάξης του 1 mm όταν οι μέγιστες μετατοπίσεις είναι μικρότερες από 1 mm. Όσο πλησιάζουμε στο κέντρο της γέφυρας οι τιμές συμπίπτουν και μάλιστα όσο κεντρικότερο είναι το σημείο τόσο καλύτερα τα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα για το χωροσταθμικό σημείο E7 οι διαφορές είναι της τάξης των 0.3 mm ενώ οι μετατοπίσεις αγγίζουν 10 mm.
- Από την συνδυαστική ανάλυση μετρήσεων ψηφιακών κλισιμέτρων, γεωμετρικής χωροστάθμησης και υπολογισμένων τιμών βάσει αριθμητικών μοντέλων παρατηρείται παρόμοια τάση μεταβολής των κατακόρυφων μετακινήσεων του καταστρώματος κατά μήκος του. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει την αξιοπιστία της προτεινόμενης μεθόδου σε ανάλογα έργα.
- Η επεξεργασία μετρημένων κατακόρυφων μετακινήσεων από μετρήσεις γεωμετρικής χωροστάθμησης για τον υπολογισμό κατά μήκος κλίσεων οδηγεί σε μικρές (<0.17 mrad) διαφορές υπολογισμένων (από γεωμετρική χωροστάθμηση) κατά μήκος κλίσεων σε σχέση με τις πρωτογενώς μετρημένες.
- 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 ιδιαιτερότητες 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 τόσο κατά μήκος όσο εγκάρσια της γέφυρας ή κάποιας άλλης κατασκευής.
- Βασικό κίνητρο και πλεονέκτημα της προτεινόμενης μεθόδου εκτίμησης της απόκρισης του καταστρώματος αποτελεί το γεγονός ότι η εφαρμογή της είναι

ανεξάρτητη του μήκους των ανοιγμάτων μιας γέφυρας. Σε αντίθεση, η μέθοδος γεωμετρικής χωροστάθμησης επιτρέπει μετρήσεις σε αποστάσεις έως 50m – 60m (η γέφυρα ελέγχου αποτελεί περίπτωση εφαρμογής της μεθόδου χωροστάθμησης).

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 κλισιμέτρων 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 αναγωγή των μετρήσεων.
- Δεν είναι κατάλληλα για τη μελέτη φαινομένων υψηλής δυναμικής λόγω της αδράνειας του υγρού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξενογλώσση

1. Lee J.K., Park J.S., Roberts G.W., Oluropo 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, 2-4 November
2. Li X., Rizos C., Tamura Y., Ge L., Yoshida 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, 12-14 July
3. Li X., Yoshida A., Tamura Y., Rizos C., Ge L., Imai R., 2008. How Hybrid GPS-Based Surveying Techniques Can Further Assist with Structural Design and Construction, *Int. Symp. on GPS/GNNS*, 553-562, Yokohama, Japan, 25-28 November
4. Yigit C. O., Inal C., Yetkin M., 2008. Monitoring of tall building's dynamic behavior using precision inclination sensors, *13th FIG Symposium on Deformation Measurement Analysis, 4th IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering*, Lneq, Lisbon, 12-14 May
5. Yigit C.O., Li X., Inal C., Ge L., Yetkin M., Arslan M. H., 2010. Analysis of Wind-induced Response of Tall Reinforced Concrete Building Based on Data Collected by GPS and Precise Inclination Sensor, *FIG Congress Facing the Challenges-Building the Capacity*, Sydney, Australia, 11-16 April
6. Cranenbroeck J., 2007. Continuous Beam Deflection Monitoring using Precise Inclinometers, *FIG Working Week*, Hong Kong SAR, China, 13-17 May

7. Sousa H., Cavadas F., Henriquesa A., Bento J., Figueirasa J., 2013. Bridge deflection evaluation using strain and rotation measurements, *Smart Structures & Systems International Journal*, Volume 11, pages 365–386, April
8. Zhao J., Liu T., Wang Y., 2011. Static test analysis of a bridge structure in civil engineering, *International Conference on Risk and Engineering Management*
9. Burdet O., Zanella J.L., 2000. Automatic monitoring of bridges using electronic inclinometers, *16th Congress of IABSE*, Lucerne, Switzerland
10. Karoumi, R., Andersson, A., and Sundquist, H., 2006. Static and Dynamic Load Testing of the New Svinesund Arch Bridge, *In proceedings of The International Conference on Bridge Engineering – Challenges in the 21st Century*, Hong Kong, China
11. Meng X., Roberts G.W., Cosser E., Dodson A.H., 2003. Real-time bridge deflection and vibration monitoring using an integrated gps/accelerometer/pseudolite system, *11th FIG Symposium on Deformation Measurements*, Santorini, Greece
12. Fowler M., Meynink P.S., 2013. Inclinometers-the good, the bad and the future, Australian Centre for Geomechanics, Crawley, Australia
13. Kopáček A., Kyrinovic P., Lipták I., Erdély J., 2011. Automated Monitoring of the Danube Bridge Apollo in Bratislava, *FIG Working Week*, Marrakech, Morocco, 18-22 May
14. 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
15. Caglayan B.O., Ozakgul K., Tezer O., 2011. Assessment of a concrete arch bridge using static and dynamic load tests, *Journal of Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 41, No. 1, p. 83-94

16. Bui L.H., 2005. Static versus dynamic structural response of bridge piers to barge collision loads, Master Thesis, University of Florida, Florida, America
17. Leica Geosystems A.G., 2006. Nivel200, User Manual, Heerbrugg, Switzerland
18. Leica Geosystems A.G., 2006. Leica DNA digital levels-Advantages that move you ahead, Heerbrugg, Switzerland
19. Leica Geosystems A.G., 2006. Leica DNA digital levels-Equipment List, Heerbrugg, Switzerland

Ελληνική

1. Πασχαλίδου Ε., 2012. Μελέτη κραδασμών παρακαμπτήριου καπνοδόχου σε οριακές συνθήκες φόρτισης του αεροστροβίλου με τη μέθοδο της μικροκυματικής συμβολομετρίας, Διπλωματική Εργασία, ΣΑΤΜ, Τομέας Τοπογραφίας, ΕΜΠ, Αθήνα, Ελλάδα
2. Κοκκίνου Ε., 2007. Καταγραφή ταλαντώσεων σιδηροδρομικής γέφυρας Γοργοποτάμου με ρομποτικό θεοδόλιχο (RTS), Διατριβή μεταπτυχιακού, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πάτρας, Πάτρα, Ελλάδα
3. Σαραφιάν Κ., Πειραματική διερεύνηση ψηφιακών κλισιμέτρων ακριβείας στη μελέτη ταλαντώσεων υψηλών κατασκευών έναντι του ανέμου, Μεταπτυχιακή Εργασία, ΣΑΤΜ, ΔΠΜΣ: “Γεωπληροφορική”, ΕΜΠ, Αθήνα, Ελλάδα
4. Λεκίδης Β., Καρακώστας Χ., Πανέτσος Π., Διαμαντουλάκη Ι., Διαμαντουλάκη Ι., 2009. Ενόργανη παρακολούθηση δομικής κατάστασης σημαντικών έργων με σκοπό την πληρέστερη συντήρησή τους, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος, Τμήμα Κεντρικής Μακεδονίας, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα
5. Ζυγούρης Κ., Συστήματα παρακολούθησης και στρατηγικές διαχείρισης γεφυρών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πάτρας, Πάτρα, Ελλάδα
6. Πανέτσος Π., Ρεντζεπέρης Ι., Λιώλιος Κ., 2009. Σύστημα ενόργανης παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας των γεφυρών από σκυρόδεμα της Εγνατίας Οδού, 16^ο Συνέδριο Σκυροδέματος ΤΕΕ-ΕΤΕΚ, Πάφος, Κύπρος, 21-23 Οκτωβρίου
7. Ψύλλου Ε., 2011. Βελτιστοποίηση διαχείρισης γεφυρών με χρήση ευφών συστημάτων παρακολούθησης, Πτυχιακή Εργασία, Σχολή Μηχανικής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Γεωπληροφορικής, Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου, Λεμεσός, Κύπρος

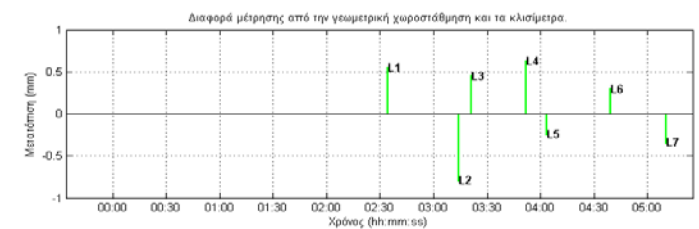
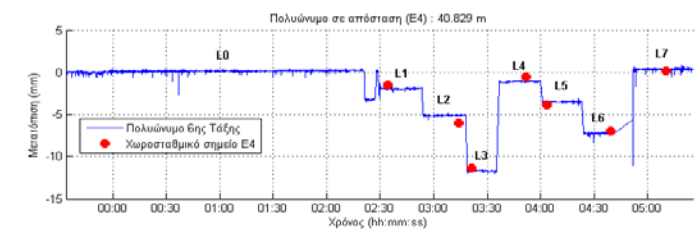
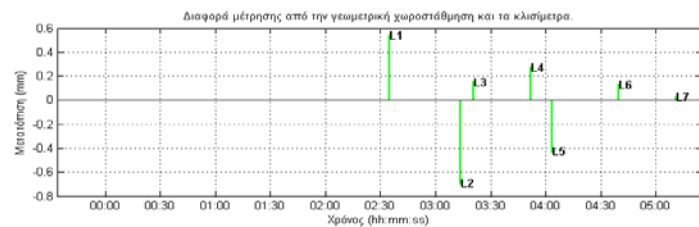
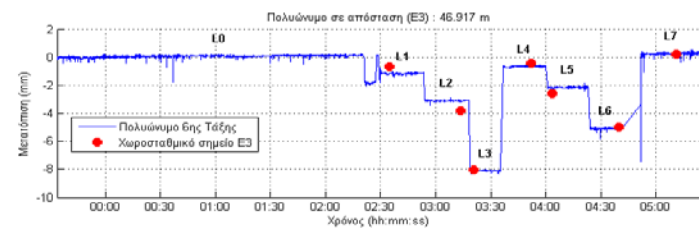
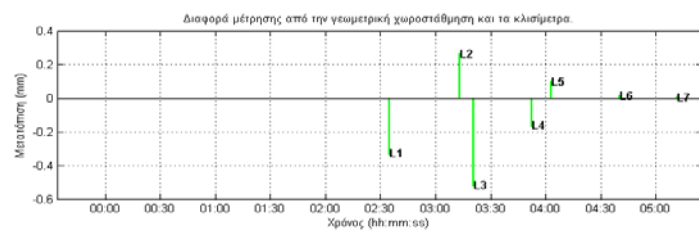
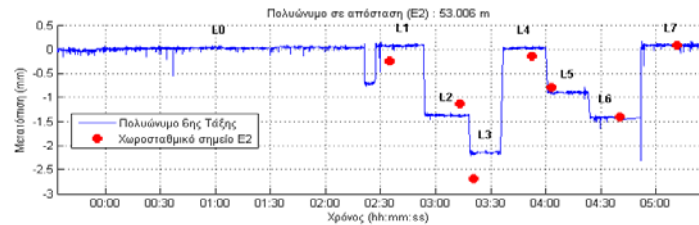
8. Ραχμάνη Α., 2012. Μελέτη σύμμικτης συνεχούς γέφυρας κιβωτοειδούς διατομής, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, ΕΜΠ, Αθήνα, Ελλάδα
9. Σταθόπουλος Σ., Κοτσανόπουλος Π., Σταθόπουλος Ε., Σταθόπουλος Κ., 2003. Καλωδιωτή γέφυρα ΣΕΑ Παλλήνης, 14^ο Συνέδριο σκυροδέματος, Κως, Ελλάδα, 15-17 Οκτωβρίου
10. Σαλονικιός Θ., 2009. Παρακολούθηση Δομικής Κατάστασης Γεφυρών – Αξιοποίηση Μετρήσεων από Ενοργάνωση Γέφυρας, 16ο Συνέδριο Σκυροδέματος ΤΕΕ-ΕΤΕΚ, Πάφος, Κύπρος, 21-23 Οκτωβρίου
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. Αποδουλιανάκης Λ., 2011. Διερεύνηση της μεταβολής της μέτρησης (επαναληψιμότητα) των ψηφιακών χωροβατών σε διαφορετικές συνθήκες, Διπλωματική Εργασία, ΣΑΤΜ, Τομέας Τοπογραφίας, ΕΜΠ, Αθήνα, Ελλάδα
13. 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
14. Αγατζά-Μπαλοδήμου Α.Μ., 2009. Θεωρία Σφαλμάτων και Συνορθώσεις Ι, Πανεπιστημιακές σημειώσεις, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ., Αθήνα, Ελλάδα
15. Αγατζά-Μπαλοδήμου Α.Μ., 2009. Θεωρία Σφαλμάτων και Συνορθώσεις ΙΙ, Πανεπιστημιακές σημειώσεις, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ., Αθήνα, Ελλάδα
16. Μπαλοδήμος Δ., Αραπατζή Ο., 2004. Υψομετρία, Πανεπιστημιακές σημειώσεις, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ., Αθήνα, Ελλάδα

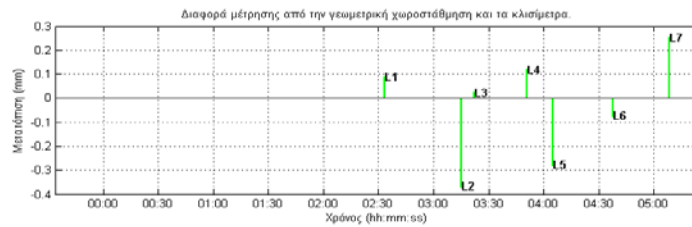
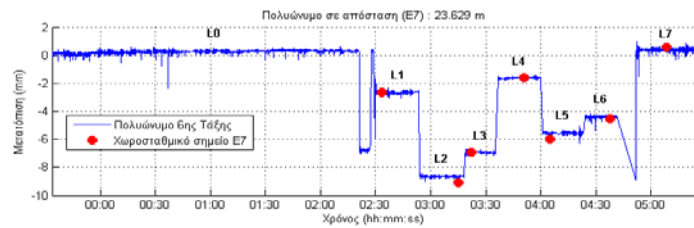
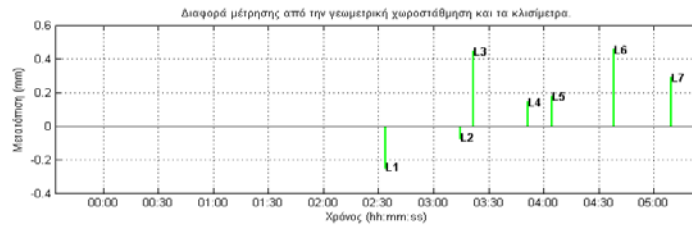
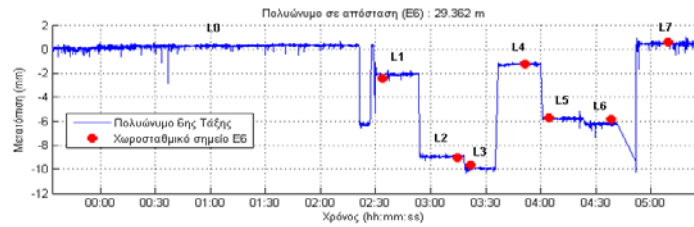
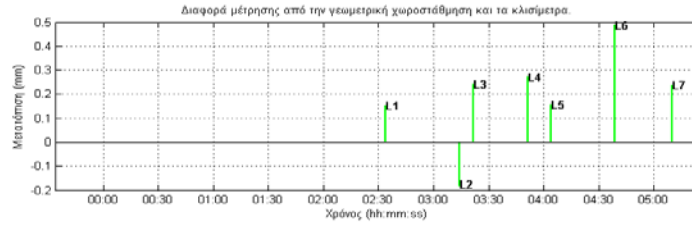
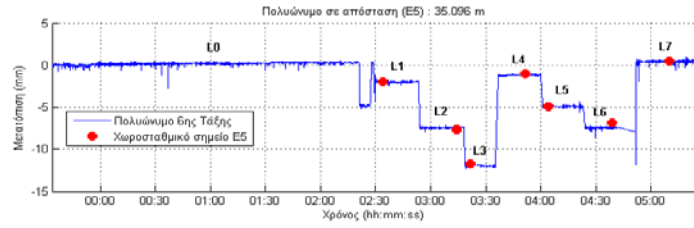
Διαδίκτυο

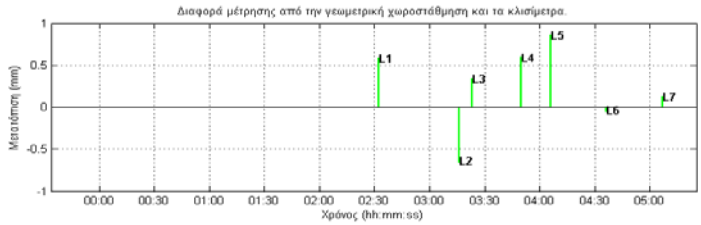
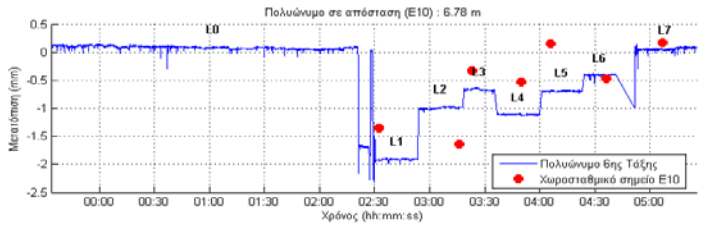
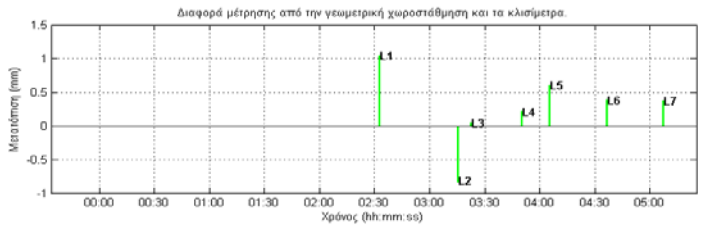
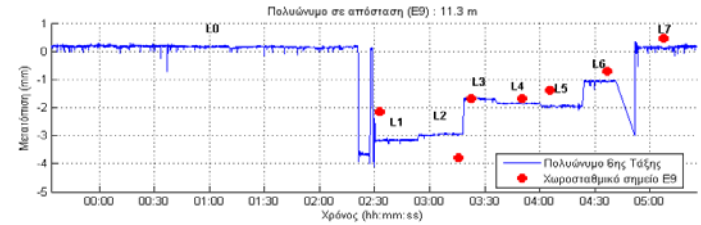
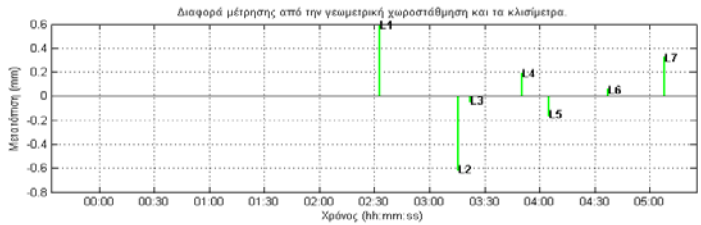
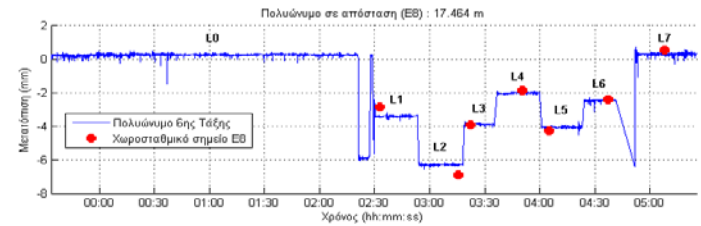
1. www.wikipedia.org/
2. <http://www.leica-geosystems.com/>
3. <http://www.metrica.gr/>
4. <http://www.mathworks.com/>
5. <http://www.sciencedirect.com/>
6. <http://www.domi-ae.gr/>
7. <http://www.jpdevelopment.gr/>
8. <http://www.omegacentre.bartlett.ucl.ac.uk/>
9. <http://www.smartec.ch/>
10. <http://www.bridgeloadtest.com/>
11. <http://www.rstinstruments.com/>
12. <http://www.wisegeek.com/>
13. <http://www.selfgrowth.com/>

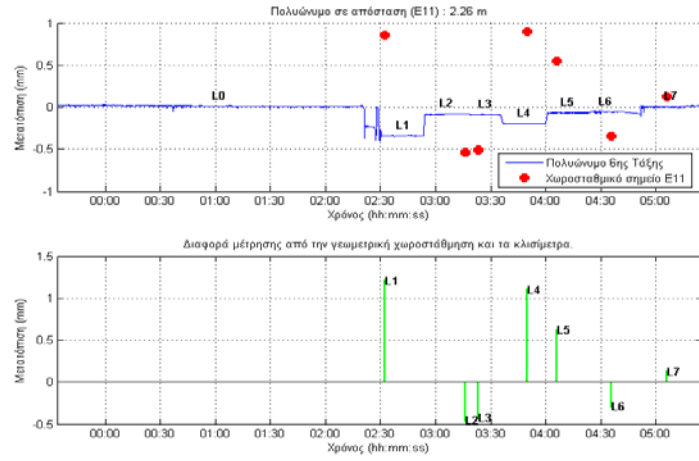
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Α. Χρονοσειρές κατακόρυφων μετακινήσεων χωροστάθμησης με την υπολογιζόμενη από τα πολυώνυμα









Σχήμα A-1: Χρονοσειρές κατακόρυφων μετακινήσεων από χωροστάθμηση (σημεία με κόκκινο) με την υπολογιζόμενη από τα πολυώνυμα (6^{ου} βαθμού)

Figure A-1: Time series of vertical movements by precise leveling (points in red) with the estimated by polynomials (6th grade)