



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ & ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΔΠΜΣ «ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ»

**"Μελέτη Απόκρισης Καταστρώματος Καλωδιωτής Γέφυρας  
Έναντι Στατικών Δοκιμαστικών Φορτίσεων με Μεθόδους  
Γεωμετρικής Χωροστάθμισης και Επίγειας  
Μικροκυματικής Συμβολομετρίας"**

-Πεδίο Εφαρμογής Γέφυρα ΣΕΑ Παλλήνης, Αττικής Οδού-

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

**ΠΟΝΗΡΕΛΛΗ ΓΕΩΡΓΙΑΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΓΚΙΚΑΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ**

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

*Αθήνα, 2015*



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS  
SCHOOL OF RURAL AND SURVEYING ENGINEERING  
**POST-GRADUATE PROGRAMME «GEOINFORMATICS»**

**“ Testing on load cable bridge by Static Test Methods  
Using Precise leveling Methods and Microwave  
Interferometry”**

- Scope on SEA Pallini, Attiki Avenue -

DIPLOMA THESIS

of

**PONIRELLI GEORGIA**

**SUPERVISOR: GIKAS VASILIOS**

Associate Professor N.T.U.A.

*Athens, 2015*



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ & ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΔΠΜΣ «ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

**ΠΟΝΗΡΕΛΛΗ ΓΕΩΡΓΙΑΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΓΚΙΚΑΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ**

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 11η Μαΐου 2015.

(Υπογραφή)

.....

Γκίκας Βασίλειος

Αναπλ. Καθηγητής ΕΜ.Π.

(Υπογραφή)

.....

Παραδείσης Δ.

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....

Σταθάς Δ.

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

*Αθήνα, 2015*

Copyright © - All rights reserved Βασιλείου Β. Θεοδώρα.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσεως, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται στο παρόν έγγραφο εκφράζουν την συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

(Υπογραφή)

.....

**ΠΟΝΗΡΕΛΛΗ ΓΕΩΡΓΙΑ**

Κάτοχος Διεπιστημονικού – Διατμηματικού Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης Στην  
Επιστημονική Περιοχή: «Γεωπληροφορική»

© 2015 - All rights reserved

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η συνοπτική έρευνα της βιβλιογραφίας για τις δημοφιλέστερες μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση των γεφυρών καθώς και η αξιολόγηση της σύγχρονης μεθόδου της επίγειας συμβολομετρίας μικροκυματικής ακτινοβολίας και της γεωμετρικής χωροστάθμησης μέσω πειραματικών μετρήσεων για τον προσδιορισμό των μετατοπίσεων στη καλωδιωτή γέφυρα ΣΕΑ Παλλήνης κάτω από διάφορα σενάρια φόρτισης.

Η πειραματική διαδικασία περιλαμβάνει οκτώ σενάρια φόρτισης της γέφυρας εκ των οποίων στο πρώτο (L0) και το τελευταίο (L7) μελετάται η απόκριση της γέφυρας σε περιβαλλοντικές συνθήκες ενώ τα υπόλοιπα έξι σενάρια (L1 – L6) σε στατικές φορτίσεις οι οποίες υλοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας ένα φορτηγό της Αττικής οδού. Οι μετρήσεις συμπεριλαμβάνουν τις μετρήσεις κατά μήκος της γέφυρας από την πλευρά του Μαρκόπολου με το σύστημα μικροκυματικής συμβολομετρίας IBIS-S. Για λόγους σύγκρισης χρησιμοποιήθηκε και η μέθοδος της γεωμετρικής χωροστάθμησης σε τέσσερα χωροσταθμικά σημεία με τον ψηφιακό χωροβάτη Leica DNA03.

Η διαδικασία γεωμετρικής χωροστάθμησης αν και σχετικά απλή είναι χρονοβόρα και απαιτεί εξειδικευμένο προσωπικό στο πεδίο μετρήσεων. Επίσης ο φωτισμός και οι καιρικές συνθήκες είναι σημαντικές για την αξιοπιστία των μετρήσεων. Σε αντιδιαστολή, η πειραματική εγκατάσταση του συστήματος IBIS-S ήταν σχετικά εύκολη αν και απαιτείται παροχή ρεύματος. Τα δεδομένα αποθηκεύονται αυτόματα στον υπολογιστή ενώ για την ανάλυση τους προσφέρεται ειδικό λογισμικό.

Από την σύγκριση των αποτελεσμάτων παρατηρούμε ότι οι μετρήσεις του radar βρίσκονται σε σχετικά καλή συμφωνία με τις μετρήσεις της γεωμετρικής χωροστάθμησης στα σημεία προς το κέντρο της γέφυρας ενώ διαφέρουν σημαντικά προς τα άκρα της γέφυρας. Οι μέγιστες βυθίσεις παρατηρήθηκαν και με τις δύο μεθόδους στα ίδια σενάρια, ενώ για τα σημεία κοντά στο κέντρο της γέφυρας οι μέγιστες βυθίσεις παρουσιάστηκαν για τα σενάρια φόρτισης στα οποία η θέση του στατικού φορτίου είναι κοντά στα σημεία μέτρησης. Οι ελάχιστες βυθίσεις εμφανίστηκαν στα σενάρια L0 και L7 στα οποία δεν εφαρμόζεται στατικό φορτίο. Η γενική μορφή των μετατοπίσεων κατά μήκος της γέφυρας όπως υπολογίστηκαν με τις δύο μεθόδους βρίσκεται σε αντιστοιχία για όλα τα σενάρια πλην του σεναρίου L7 στο οποίο όμως οι μετατοπίσεις είναι σχεδόν μηδενικές.

## ABSTRACT

*The aim of this postgraduate thesis is to summarize the research on the most popular methods used for load testing of bridges and the accuracy of modern method of Ground-based microwave radar interferometry system and precise leveling measurements through experimental measurements to determine the displacements in Pallini cable-stayed bridge at Attiki Odos under various load scenarios.*

*The experimental procedure includes eight bridge charging scenarios of which the first (L0) and the last (L7) studied the response of the bridge to environmental conditions while the other six scenarios (L1 - L6) static loadings are implemented using a truck of Attica Avenue. The measurements of Ground-based microwave radar interferometry system (GBMI) are included along Makropoulo's side of the bridge. The planning of precise leveling includes four level points using Leica DNA03 measurement system.*

*The precise leveling is relatively simple, but consuming enough time and requires specialized personnel to the measuring field. Also the lighting and weather conditions are important for the reliability of the measurements. In contrast, the IBIS-S system is relatively easy in use, although it requires power supply. The data is automatically stored in your computer and for the analysis is offered special software.*

*Comparing the results, it is observed that the measurements of radar are in relatively good agreement with the measurements of precise leveling toward the center of the bridge and significantly different to the ends of the bridge. Maximum dips observed with both methods in the same scenarios, while for the locations near the center of the bridge, the maximum draft presented for the scenarios in which the position of the static load is closed to measuring points. Minimum dips are appeared in L0 and L7 scenarios, where no static load is applied. The general form of offsets along the bridge, calculated by the two methods, are in correspondence for all scenarios, except L7, where the displacements are nearly zero.*

## ***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 Ευφροσύνη Πασχαλίδου 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 Κίμων και Ναυσικά Πασχαλίδη, την αδερφή μου Μαρία 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.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	1
1. ΕΙΔΗ ΓΕΦΥΡΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ «ΥΓΕΙΑΣ» ΤΟΥΣ.....	4
1.1 Τύποι παρακολούθησης .....	4
1.1.1 Χρονικός Ορίζοντας.....	4
1.1.2 Κλίμακα.....	5
1.2 Μετρήσεις .....	5
1.2.1 Γενικές μετρήσεις.....	5
1.2.2 Μετρήσεις για γέφυρες σκυροδέματος.....	7
1.2.3 Μετρήσεις για σιδηρογέφυρες .....	8
1.3 Παραμορφώσεις Κατασκευών .....	9
1.4 Είδη Γεφυρών.....	10
1.5 Συστήματα Παρακολούθησης Δομικής Κατάστασης Τεχνικών Έργων.....	13
1.5.1 Μέθοδοι πειραματικής μηχανικής.....	14
1.5.2 Τοπογραφικές Μέθοδοι.....	16
2. ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΓΕΙΑΣ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑΣ ΜΙΚΡΟΚΥΜΑΤΙΚΗΣ	
ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ .....	20
2.1 Η Τεχνική Βηματικής Συχνότητας – Συνεχούς κύματος .....	20
2.2 Συμβολομετρία.....	25
2.3 Μετρούμενη και Υπολογιζόμενη Μετατόπιση .....	28
2.4 Σύστημα IBIS-S .....	28
2.5 Σύγκριση με άλλα συστήματα.....	30
3. ΜΕΘΟΔΟΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗΣ ΧΩΡΟΣΤΑΘΜΗΣΗΣ.....	34
3.1 Περιγραφή της μεθόδου .....	35
3.2 Εξοπλισμός.....	37
3.3 Ο Ψηφιακός Χωροβάτης Leica DNA03 .....	40



3.4 Διαδικασία διεξαγωγής των μετρήσεων .....	42
4. ΓΕΦΥΡΑΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ .....	48
4.1 Καλωδιωτή Γέφυρα ΣΕΑ Παλλήνης .....	48
4.2 Συλλογή Δεδομένων Πεδίου .....	50
5. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΕΔΙΟΥ .....	62
5.1 Γεωμετρική Χωροστάθμιση.....	62
5.2 Μετρήσεις GBMI.....	67
5.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων .....	73
5.3.1 Ανάλυση για κάθε θέση.....	74
5.3.2 Ανάλυση για κάθε σενάριο.....	80
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	85
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	88
Ξενόγλωσση.....	88
Ελληνική .....	91
Φωτογραφίες - Διαδίκτυο .....	91
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....	92

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. Ημερολόγιο μετρήσεων στο πεδίο _____	57
Πίνακας 2. Σενάρια φόρτισης _____	58
Πίνακας 3. Παράμετροι μετρήσεων με το σύστημα μικροκυματικής συμβολομετρίας IBIS-S	60
Πίνακας 4. Αποστάσεις χωροσταθμικών σημείων από την αρχή της γέφυρας (γραμμή που ορίζεται από τις δύο αντηρίδες της γέφυρας στην πλευρά του Holiday Inn) _____	60
Πίνακας 5. Υψόμετρο των σημείων αναφοράς (Repers) _____	61
Πίνακας 6. Μετρήσεις χωροσταθμικών σημείων και σημείων αναφοράς. Σενάριο L0 & L1 __	63
Πίνακας 7. Μετρήσεις χωροσταθμικών σημείων και σημείων αναφοράς. Σενάριο L2 & L3 __	63
Πίνακας 8. Μετρήσεις χωροσταθμικών σημείων και σημείων αναφοράς. Σενάριο L4 & L5 __	64
Πίνακας 9. Μετρήσεις χωροσταθμικών σημείων και σημείων αναφοράς. Σενάριο L6 & L7 __	65
Πίνακας 10. Αντιστοιχία χωροσταθμικών σημείων και σημείων αναφοράς (Repers) _____	65
Πίνακας 11. Υψόμετρο σε (m) για κάθε σημείο χωροστάθμησης και κάθε σενάριο _____	66
Πίνακας 12. Βύθιση σε (mm) για κάθε σημείο χωροστάθμησης και κάθε σενάριο _____	67
Πίνακας 13. Επιλεγμένα σημεία μεθόδου μικροκυματικής συμβολομετρίας _____	70
Πίνακας 14. Μετρήσεις στις αντίστοιχες θέσεις και ώρα. Χωροσταθμικό σημείο M4 - Απόσταση : 40.827 m. Σημείο GBMI Rbin414 - Απόσταση : 38.1m. _____	79
Πίνακας 15. Μετρήσεις στις αντίστοιχες θέσεις και ώρα. Χωροσταθμικό σημείο M7 - Απόσταση : 23.628 μέτρα. Σημείο GBMI Rbin250 - Απόσταση : 22.3 μέτρα. _____	79
Πίνακας 16. Μετρήσεις στις αντίστοιχες θέσεις και ώρα. Χωροσταθμικό σημείο M9 - Απόσταση : 11.3 μέτρα. Σημείο GBMI Rbin140 – Απόσταση 11.1 μέτρα _____	80

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

<b>Σχήμα 1.</b> Γέφυρες δοκοί. Γέφυρα Pontchatrain Causeway Southbound (Wikipedia 1) (αριστερά). Γέφυρα Rio Bridge (Wikipedia 2) (δεξιά).	11
<b>Σχήμα 2.</b> Σκαρίφημα καλωδιωτής γέφυρας και φορτία (Παπανικόλας 2008)	16
<b>Σχήμα 3.</b> Καλωδιωτές Γέφυρες. Γέφυρα Russky (Wikipedia 4) (πάνω). Γέφυρα Ρίου Αντιρρίου (Wikipedia 5) (κάτω)	17
<b>Σχήμα 4.</b> Τοξωτή γέφυρα (Wikipedia 6) (πάνω). Δικτυωτή γέφυρα (Zanneioa) (κάτω)	18
<b>Σχήμα 5.</b> Σκαρίφημα κρεμαστής γέφυρας και φορτία (Παπανικόλας 2008)	13
<b>Σχήμα 6.</b> Κρεμαστή γέφυρα Akashi Kaikyō στην Ιαπωνία (Wikipedia 3)	13
<b>Σχήμα 7.</b> Αρχές λειτουργίας επιταχυνσιόμετρων (a) πιεζοηλεκτρικό (b) μεταβολή της αντίστασης (c) μεταβολής χωρητικότητας πυκνωτή( <a href="https://www.pcb.com/Accelerometers/Sensing_Technologies.aspx">https://www.pcb.com/Accelerometers/Sensing_Technologies.aspx</a> )	15
<b>Σχήμα 8.</b> Αρχή λειτουργίας επιμηκυνσιόμετρων	16
<b>Σχήμα 9.</b> α) Μέτρηση γέφυρας χρησιμοποιώντας b) ολικά και c) τοπικά συστήματα DIC (Malesa 2010)	17
<b>Σχήμα 10.</b> α) Σύστημα laser 3-Δ σάρωσης ( <a href="http://www.trimble.com/">http://www.trimble.com/</a> ). b) Γέφυρα και σύννεφο σημείων από την σάρωση (Werner 2010)	18
<b>Σχήμα 11.</b> Αναπαράσταση της SF-CW κυματομορφής : (a) πεδίο συχνότητας (β) πεδίο χρόνου (Gentile 2009)	21
<b>Σχήμα 12.</b> Αύξηση συχνότητας (IDS 2009)	22
<b>Σχήμα 13.</b> Υπολογισμός Το προφίλ του πλάτους της απόστασης όπως υπολογίζεται από την SF-CW κυματομορφή (Gentile 2009)	23
<b>Σχήμα 14.</b> . Ιδανικό προφίλ πλάτους απόστασης (Gentile 2009)	24
<b>Σχήμα 15.</b> Βασική αρχή της συμβολομετρικής τεχνικής (IDS 2010)	25
<b>Σχήμα 16.</b> Ακτινική και κατακόρυφη μετατόπιση (Gentile 2009)	28
<b>Σχήμα 17.</b> Σύστημα IBIS – S μικροκυματικής συμβολομετρίας (Gentile 2009)	29
<b>Σχήμα 18.</b> Συχνότητα δειγματοληψίας σε σχέση με την μέγιστη μετρούμενη απόσταση (Gentile 2009)	30
<b>Σχήμα 19.</b> Μέγιστη ακρίβεια σε χιλιοστά (mm) συναρτήσσει του σηματοθορυβικού λόγου (IDS 2010)	33
<b>Σχήμα 20.</b> Γεωμετρική χωροστάθμιση	35
<b>Σχήμα 21.</b> Ηλεκτρονικός χωροβάτης (Sprinder 50) ( <a href="http://www.conmet.gr/psifiakoi-xorobates/sprinter">http://www.conmet.gr/psifiakoi-xorobates/sprinter</a> )	37
<b>Σχήμα 22.</b> Σύστημα ισοστάθμισης αυτόματου χωροβάτη ( <a href="http://www.levelling.uhi.ac.uk/index.html">http://www.levelling.uhi.ac.uk/index.html</a> )	38
<b>Σχήμα 23.</b> Πτυσσόμενες σταδίες αλουμινίου	39

**0Σχήμα 24.** Εστίαση μηχανισμού παρατήρησης. Μη εστιασμένος μηχανισμός (αριστερά). Ορθά εστιασμένος μηχανισμός παρατήρησης (δεξιά). ([http://www.levelling.uhi.ac.uk/tutorial1\\_8.html](http://www.levelling.uhi.ac.uk/tutorial1_8.html) )

39

**Σχήμα 25.** Εστίαση τηλεσκοπίου στη σταδία. Μη εστιασμένο τηλεσκόπιο στη σταδία (αριστερά). Ορθά εστιασμένο τηλεσκόπιο στη σταδία (δεξιά). ([http://www.levelling.uhi.ac.uk/tutorial1\\_8.html](http://www.levelling.uhi.ac.uk/tutorial1_8.html))

40

**Σχήμα 26.** Ψηφιακός χωροβάτης (Leica DNA03), τρίποδο και σταδίες (αναλογική και ψηφιακή) ([www.nokaut.pl](http://www.nokaut.pl))

41

**Σχήμα 27.** Λήψη και επεξεργασία εικόνας με ψηφιακούς χωροβάτες

41

**Σχήμα 28.** Σφάλμα οπτικού άξονα χωροβάτη (Collimation error) (Charles – Spencer 1998)

44

**Σχήμα 29.** Σφάλμα λόγω καμπυλότητας της γης (Charles – Spencer 1998)

45

**Σχήμα 30.** Σφάλμα λόγω διάθλασης (Charles – Spencer 1998)

46

**Σχήμα 31.** Καλωδιωτή γέφυρα ΣΕΑ Παλλήνης

48

**Σχήμα 32.** Κατά μήκος τομή της γέφυρας ΣΕΑ Παλλήνης (Σταθόπουλος 2003)

49

**Σχήμα 33.** Διαδοκίδωση καταστρώματος της γέφυρας ΣΕΑ Παλλήνης (Σταθόπουλος 2003)

50

**Σχήμα 34.** Ανάπτυγμα και διατομές πυλώνα της γέφυρας ΣΕΑ Παλλήνης (Σταθόπουλος 2003)

50

**Σχήμα 35.** Σχηματική αναπαράσταση χωροσταθμικών σημείων (κόκκινοι κύκλοι)

50

**Σχήμα 36.** Χωροβάτης Leica DNA03 στη θέση X1 στην παρειά προς Ελευσίνα

52

**Σχήμα 37.** Φωτισμός της σταδίας κατά τη διαδικασία της χωροστάθμησης

53

**Σχήμα 38.** Τριγωνικά πρίσματα τοποθετημένα στο κατάστρωμα της γέφυρας ΣΕΑ Παλλήνης

54

**Σχήμα 39.** Επίγειο radar μικροκυματικής συμβολομετρίας συνδεδεμένο με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή.

54

**Σχήμα 40.** Το φορτηγό της Αττικής Οδού που χρησιμοποιήθηκε για τις στατικές μετρήσεις

56

**Σχήμα 41.** . Κάτοψη γέφυρας με τις θέσεις των χωροσταθμικών σημείων, του συστήματος IBIS-S και του φορτηγού για κάθε σενάριο. Τα σημεία A1, M1, E1, εκτείνονται εκτός του ανοίγματος της γέφυρας και δεν παρουσιάζονται στο παραπάνω σχήμα

56

**Σχήμα 42.** Σχέδιο γέφυρας και σκαρίφημα θέσης συστήματος GBMI

59

**Σχήμα 43.** Απεικόνιση χωροσταθμικών σημείων, σημείων Reper, χωροβάτη X1, X2 και θέσεις φορτηγού

62

**Σχήμα 44.** Γωνία στόχευσης

68

**Σχήμα 45.** Καθορισμός project και αρχείο μετρήσεων

68

**Σχήμα 46.** Focusing Settings. Ορισμός βαθμού παρεμβολής

69

**Σχήμα 47.** Καθορισμός γεωμετρίας της γέφυρας και κεραίας

69

**Σχήμα 48.** Rangebin Selection. Επιλογή σημείων μετρήσεων

71

**Σχήμα 49.** SNR συναρτήση της απόστασης από την αφετηρία

75

<b>Σχήμα 50.</b> Rangebin Dynamic Analysis. Υπολογισμός χρονοσειρών μετατοπίσεων των επιλεγμένων σημείων. _____	72
<b>Σχήμα 51.</b> Χρονοσειρές μετατοπίσεων σημείων με σηματοθορυβικό λόγο κάτω από το κατώφλι _____	73
<b>Σχήμα 52.</b> Μετρήσεις με τη μέθοδο της μικροκυματικής συμβολομετρίας στα επιλεγμένα σημεία _____	73
<b>Σχήμα 53.</b> Χρονοσειρές μετατοπίσεων με ανακλαστικότητα κάτω από το κατώφλι _____	79
<b>Σχήμα 54.</b> Σχηματική Αναπαράσταση χωροσταθμικών σημείων(κόκκινοι κύκλοι) και θέσεων πρισμάτων(Rbin, τρίγωνα ματζέντα) _____	74
<b>Σχήμα 55.</b> Διάγραμμα χρονοσειράς μετατοπίσεων GBMI στη θέση Rbin414 (D:38.1m) και μετρήσεις γεωμετρικής χωροστάθμησης στο σημείο M4 (D:40.83m) για κάθε σενάριο φόρτισης _____	75
<b>Σχήμα 56.</b> Μετατόπιση Rbin414 και χωροσταθμικού σημείου M4 για το σενάριο L6 _____	76
<b>Σχήμα 57.</b> Διάγραμμα χρονοσειράς μετατοπίσεων GBMI στη θέση Rbin250 (D:22.3m) και μετρήσεις γεωμετρικής χωροστάθμησης στο σημείο M7 (D:23.63m) για κάθε σενάριο φόρτισης _____	76
<b>Σχήμα 58.</b> Μετατόπιση Rbin250 και χωροσταθμικού σημείου M7 για το σενάριο L2 _____	77
<b>Σχήμα 59.</b> Διάγραμμα χρονοσειράς μετατοπίσεων GBMI στη θέση Rbin140 (D:11.1m) και μετρήσεις γεωμετρικής χωροστάθμησης στο σημείο M9 (D:11.3m) για κάθε σενάριο φόρτισης _____	78
<b>Σχήμα 60.</b> Μετατοπίσεις κατά μήκος της γέφυρας με την μέθοδο της γεωμετρικής χωροστάθμησης και της μικροκυματικής συμβολομετρίας (GBMI). Σενάριο φόρτισης L1. _____	81
<b>Σχήμα 61.</b> Μετατοπίσεις κατά μήκος της γέφυρας με την μέθοδο της γεωμετρικής χωροστάθμησης και της μικροκυματικής συμβολομετρίας (GBMI). Σενάριο φόρτισης L2. _____	81
<b>Σχήμα 62.</b> Μετατοπίσεις κατά μήκος της γέφυρας με την μέθοδο της γεωμετρικής χωροστάθμησης και της μικροκυματικής συμβολομετρίας (GBMI). Σενάριο φόρτισης L3. _____	82
<b>Σχήμα 63.</b> Μετατοπίσεις κατά μήκος της γέφυρας με την μέθοδο της γεωμετρικής χωροστάθμησης και της μικροκυματικής συμβολομετρίας (GBMI). Σενάριο φόρτισης L4. _____	82
<b>Σχήμα 64.</b> Μετατοπίσεις κατά μήκος της γέφυρας με την μέθοδο της γεωμετρικής χωροστάθμησης και της μικροκυματικής συμβολομετρίας (GBMI). Σενάριο φόρτισης L5. _____	83
<b>Σχήμα 65.</b> Μετατοπίσεις κατά μήκος της γέφυρας με την μέθοδο της γεωμετρικής χωροστάθμησης και της μικροκυματικής συμβολομετρίας (GBMI). Σενάριο φόρτισης L6. _____	83
<b>Σχήμα 66.</b> Μετατοπίσεις κατά μήκος της γέφυρας με την μέθοδο της γεωμετρικής χωροστάθμησης και της μικροκυματικής συμβολομετρίας (GBMI). Σενάριο φόρτισης L7. _____	84

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι γέφυρες είναι κατασκευές στις οποίες φθορές ή τυχόν βλάβες επισείουν ουσιαστικά ζητήματα ασφάλειας για την εύρυθμη λειτουργία τους με υψηλό οικονομικό αντίκτυπο για την συντήρηση και ορθή λειτουργία τους. Η αύξηση του κυκλοφοριακού φόρτου καθώς και οι περιβαλλοντικές συνθήκες έχουν ως αποτέλεσμα την μείωση της αντοχής τους. Επιπλέον για γέφυρες με ηλικία λειτουργίας μεγαλύτερη των 30 – 40 ετών, ανάλογα με το είδος και μέγεθος της κατασκευής και τις συνθήκες, οι διαδικασίες συντήρησης είναι επιβεβλημένες. Επιπρόσθετα, κυρίως στην Ευρώπη και Βόρεια Αμερική νέοι αντισεισμικοί κανονισμοί απαιτούν την παρακολούθηση και εξέταση της δομικής ακεραιότητας των γεφυρών με στόχο την διάγνωση φθορών και εκτίμηση του υπολοίπου χρόνου λειτουργίας μεταξύ άλλων υπό την επίδραση σεισμικών φορτίων.

Ένα από τα σημαντικότερα πεδία της ευρύτερης επιστήμης της δομικής μηχανικής είναι η ανάπτυξη ολοκληρωμένων μεθόδων παρακολούθησης της υγείας/δομικής ακεραιότητας κατασκευών ικανά να πληροφορήσουν σε πραγματικό χρόνο για την κατάσταση της «υγείας» των γεφυρών. Ο κλασικός τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος εν πολλοίς στηρίζεται σε μεθόδους οπτικής επιθεώρησης. Ωστόσο, οι οπτικές επιθεωρήσεις παρουσιάζουν σημαντικά μειονεκτήματα και αντιμετωπίζουν μερικά το πρόβλημα. Κοστίζουν σημαντικά, ενδεχομένως δεν καταλήγουν σε αντικειμενικά συμπεράσματα και δεν μπορούν να αναγνωρίσουν αστοχίες που δεν είναι ορατές οπτικά.

Μια από τις ευρέως διαδεδομένες τεχνικές είναι η παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας των γεφυρών μέσω ανάλυσης των ταλαντώσεων τους χρησιμοποιώντας συνήθως πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα τα οποία είναι πολύ ακριβή και έχουν σχετικά μικρό κόστος. Αν και τα επιταχυνσιόμετρα χρησιμοποιούνται ευρέως σήμερα για την μελέτη της δομικής ακεραιότητας γεφυρών και γενικότερα κατασκευών έχουν κάποια σημαντικά μειονεκτήματα : (1) οι αισθητήρες πρέπει να τοποθετηθούν σε επιλεγμένα σημεία τα οποία να είναι αντιπροσωπευτικά για την κίνηση της κατασκευής, ενώ η τοποθέτηση τους μπορεί να είναι δύσκολη και κοστοβόρα, (2) η εγκατάσταση και η καλωδίωση τους είναι πολύ χρονοβόρες διαδικασίες, (3) η χρήση τους σε μόνιμα συστήματα παρακολούθησης είναι ευάλωτη σε σφάλματα τα οποία εμφανίζουν συνήθως συστήματα με καλωδιώσεις και

ηλεκτρικά κυκλώματα, και (4) ο προσδιορισμός μετατοπίσεων στηρίζεται σε μετρήσεις επιταχύνσεων, όπου λόγω της διαδικασίας ολοκλήρωσης επιβαρύνεται η ποιότητα τους .

Σύμφωνα με τα παραπάνω τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί πολλά καινοτόμα εξ' αποστάσεως συστήματα, όπως Laser συστήματα (Cunha & Caetano 1999, Kaito et al. 2005), συστήματα που βασίζονται στο Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού (Global Positioning Systems – GPS) (Nickitopoulou et al. 2006, Meng et al. 2007) ή οπτικά συστήματα ανάλυσης εικόνας (Lee et al. 2006, Silva et al. 2007).

Οι τελευταίες εξελίξεις στις τεχνικές και τα συστήματα radar, είχαν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη ενός συστήματος επίγειας συμβολομετρίας μικροκυματικής ακτινοβολίας (Ground Based Microwave Interferometry ) το οποίο είναι εν δυνάμει κατάλληλο για εξ' αποστάσεως παρακολούθηση των ταλαντώσεων μεγάλων κατασκευών (Pieraccini et al. 2004, Bernardini et al. 2007, Gentile & Bernardini 2008, Gentile 2009, Gikas 2011). Το βασικό χαρακτηριστικό αυτού του συστήματος - το οποίο σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε εξολοκλήρου από Ιταλούς ερευνητές - είναι η δυνατότητα να μετράει τις στατικές και δυναμικές μετατοπίσεις σε πολλαπλά σημεία σε μια κατασκευή με ακρίβεια χιλιοστού. Οποιαδήποτε ασυνέχεια στην κατασκευή όπως ασυνέχειες στις θέσεις διαδοκίδων στο κατάστρωμα των γεφυρών, είναι πιθανά σημεία ανάκλασης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων τα οποία εκπέμπονται από το radar. Σε αυτές τις περιπτώσεις δημιουργούνται ικανές ανακλάσεις του προσπίπτοντος σήματος με αποτέλεσμα την επιστροφή του στην πηγή - σύστημα radar. Εκτός των πλεονεκτημάτων της εξ' αποστάσεως παρακολούθησης και της ακρίβειας ο εν λόγω αισθητήρας είναι φορητός, τοποθετείται γρήγορα, και δίνει αποκρίσεις με μεγάλο εύρος συχνότητας.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι χρήση της μεθόδου της επίγειας συμβολομετρίας μικροκυματικής ακτινοβολίας (Ground Based Microwave Interferometry) για τον προσδιορισμό των μετατοπίσεων στη καλωδιωτή γέφυρα ΣΕΑ Παλλήνης στο πλαίσιο ελέγχου της δομικής ακεραιότητας της, όπως επίσης και της γεωμετρικής χωροστάθμησης (Precise Leveling). Τα αποτελέσματα των μετατοπίσεων, αναλύονται σε διαγράμματα συνδιαστικά και για τις δύο μεθόδους.

Η υπόλοιπη εργασία οργανώνεται ως εξής:

- Το Κεφάλαιο 1 περιλαμβάνει μια σύντομη παρουσίαση των μεθόδων και τεχνικών παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας των γεφυρών, τις παραμορφώσεις που επιδέχονται οι κατασκευές καθώς και τα διάφορα είδη των γεφυρών.
- Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται μια αναλυτική περιγραφή της μεθόδου της επίγειας συμβολομετρίας μικροκυματικής ακτινοβολίας.
- Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφεται η μέθοδος της γεωμετρικής χωροστάθμησης, ο εξοπλισμός και η διαδικασία διεξαγωγής των μετρήσεων.
- Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται η παρουσίαση της γέφυρας ελέγχου και η συλλογή δεδομένων.
- Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται η επεξεργασία των δεδομένων της γεωμετρικής χωροστάθμησης και της μεθόδου επίγειας συμβολομετρίας μικροκυματικής ακτινοβολίας.
- Τέλος στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα από τον έλεγχο των παρατηρήσεων που έγιναν στην γέφυρα ΣΕΑ Παλλήνης Αττικής Οδού.



# 1. ΕΙΔΗ ΓΕΦΥΡΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ «ΥΓΕΙΑΣ» ΤΟΥΣ

Οι διαδικασίες παρακολούθησης της υγείας των κατασκευών (*Structural Health Monitoring*) έχουν ως σκοπό την αξιολόγηση της δομικής κατάστασης της υπό εξέταση και υπό παρακολούθηση κατασκευής. Σκοπός των συστημάτων αυτών είναι η έγκαιρη διάγνωση πιθανών προβλημάτων της δομικής ακεραιότητας των κατασκευών με σκοπό την έγκαιρη διόρθωση και αποκατάσταση των βλαβών καθώς και την αποτροπή μεγαλύτερων αστοχιών ή ακόμα και την κατάρρευση της κατασκευής. Στη παρούσα ενότητα θα γίνει μια σύντομη αναφορά στα συστήματα παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας των γεφυρών. Συγκεκριμένα αρχικά θα διαχωριστούν τα συστήματα αναλόγως με τον χρονικό ορίζοντα και την κλίμακα, θα γίνει αναφορά στις μετρήσεις που πρέπει να συλλέγονται για την εκτίμηση της δομικής ακεραιότητας των γεφυρών, στη συνέχεια περιγράφονται είδη γεφυρών και τέλος θα αναφερθούν οι πιο γνωστές τεχνολογίες και συστήματα που χρησιμοποιούνται στη πράξη.

## 1.1 Τύποι παρακολούθησης

### 1.1.1 Χρονικός Ορίζοντας

*Βραχυχρόνια* – παρακολούθηση προκειμένου να ληφθεί πληροφορία σχετικά με την απόκριση της γέφυρας για μικρής διάρκειας στόχους. Μεταξύ των παραδειγμάτων είναι η κατάταξη των φορτίων, ο έλεγχος βραχυχρόνιας ανάπτυξης ρωγμών, η επέκταση της ζωής της γέφυρας για μικρά χρονικά διαστήματα (λιγότερο από ένα έτος), η παρακολούθηση της απόκρισης της γέφυρας για την έγκριση διέλευσης συγκεκριμένων οχημάτων.

*Μακροχρόνια* – παρακολούθηση της απόκρισης νέων, ανακατασκευασμένων ή δομικά ελαττωματικές γέφυρες, για εκτεταμένες περιόδους, συνήθως πάνω από ένα έτος.

*Περιοδική* – παρακολούθηση για τον έλεγχο της κατάστασης της γέφυρας σε τακτά χρονικά διαστήματα (π.χ. μία ή δύο φορές το χρόνο)

*Προειδοποιητική*– παρακολούθηση η οποία παρέχει αυτόματα συστήματα για την έγκαιρη ειδοποίηση όταν συγκεκριμένες παράμετροι ξεπεράσουν κάποιες προκαθορισμένες τιμές

Παρακολούθηση *κατάρρευσης* – η οποία θα κλείσει την γέφυρα και θα ειδοποίηση τους οδηγούς σε περίπτωση κατάρρευσης της γέφυρας

### 1.1.2 Κλίμακα

*Τοπική* – παρακολούθηση η οποία εστιάζει σε ένα συγκεκριμένη θέση της γέφυρας. Για παράδειγμα παρακολούθηση της εξέλιξης μιας γνωστής ρωγμής, τοπικός λυγισμός, διάβρωση σε συγκεκριμένες θέσεις.

*Παρακολούθηση στοιχείων* – η οποία εστιάζει σε ένα συγκεκριμένο μέλος της γέφυρας ή περιοχή μεγέθους μέλους και εξετάζει μεγέθη όπως η κατανομή τάσεων και παραμορφώσεων του συγκεκριμένου μέλους.

*Ολική παρακολούθηση*– η οποία εστιάζει στην μελέτη δομικής ακεραιότητας του συνόλου της γέφυρας, όπου εξετάζονται μεγέθη όπως οι φυσικές συχνότητες και ιδιομορφές, οι κατανομές των παραμορφώσεων και των θερμοκρασιών, οι ακουστικές εκπομπές και η απόκριση σε περιβαλλοντικά φορτία (ανέμους).

## **1.2 Μετρήσεις**

Για την εκτίμηση της δομικής κατάστασης και της λειτουργικής ικανότητας μιας γέφυρας απαιτείται η παρακολούθηση μιας σειράς παραμέτρων μέσω της συλλογής και επεξεργασίας κατάλληλων μετρήσεων. Ανάλογα με το τύπο και τα χαρακτηριστικά μιας γέφυρας παρακολουθούνται διαφορετικές παράμετροι μέσω διαφορετικού τύπου μετρήσεων. Μερικές μετρήσεις είναι εν γένει κοινές για όλες τις γέφυρες ενώ άλλες είναι ειδικές για γέφυρες από σκυρόδεμα ή σιδηρογέφυρες.

### 1.2.1 Γενικές μετρήσεις για όλες τις γέφυρες

*Επιτάχυνση.* Η στιγμιαία μεταβολή της ταχύτητας των σημείων της υπό ταλάντωσης γέφυρας στο χρόνο. Η επιτάχυνση είναι η πιο συνηθισμένη μέτρηση που χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό των ταλαντώσεων. Χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις των επιταχύνσεων είναι δυνατό να εκτιμηθούν οι συχνότητες και ιδιομορφές των μορφικών χαρακτηριστικών της ταλάντωσης. Συγκρίνοντας τις εκτιμώμενες συχνότητες και ιδιομορφές με εκτιμήσεις από

προηγούμενες μετρήσεις είναι δυνατόν να καθοριστεί αν η υγεία της γέφυρας έχει επιδεινωθεί ή αν υπάρχει κάποιου είδους αστοχία.

*Μετεωρολογικές συνθήκες* – οι περιβαλλοντικές συνθήκες στην περιοχή που είναι κατασκευασμένη η γέφυρα μπορεί να συσχετίζονται με την απόδοση της λειτουργίας της γέφυρας. Μεγέθη τα οποία μετρούνται είναι μεταξύ άλλων: η θερμοκρασία του αέρα, η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου, η σχετική υγρασία και η ηλιακή ακτινοβολία.

*Καμπυλότητα* – ο ρυθμός μεταβολής της κλίσης κατά μήκος του εύκαμπτου στοιχείου που δημιουργείται λόγω καμπτικών φορτίων (π.χ. με διεύθυνση κάθετη στον διαμήκη άξονα). Σύμφωνα με την θεωρία της δομικής μηχανικής η καμπυλότητα είναι ευθέως ανάλογη με την καμπτική ροπή στο υπό εξέταση στοιχείο.

*Μετατοπίσεις* – Η γραμμική μετατόπιση της γέφυρας είτε σε σχέση με την αρχική της θέση είτε ως απόλυτη θέση. Η μετατόπιση μπορεί να μετρηθεί σε μια, δύο ή τρεις ανεξάρτητες (κάθετες) διευθύνσεις.

*Φορτίο* – Το συνολικό φορτίο των οχημάτων που διασχίζουν την γέφυρα. Αυτή η μέτρηση είναι σημαντική για την επιβολή ανώτατων όριων βάρους καθώς και για τον καθορισμό του εύρους των φορτίων κατά την τυπική λειτουργία.

*Κλίση/γωνία*. Η γωνιακή μετατόπιση των στοιχείων της γέφυρας. Η μέτρηση της γωνιακής μετατόπισης είναι χρήσιμη για τον καθορισμό παραμορφώσεων της γεωμετρίας της γέφυρας. Η κλίση είναι ο ρυθμός μεταβολής της παραμόρφωσης εύκαμπτων στοιχείων σε σχέση με το μήκος. Οι μεταβολές στις γωνίες σε σχέση με το κατακόρυφο επίπεδο είναι σημαντικές για τον προσδιορισμό στοιχείων που έχουν απόκλιση από την κατακόρυφη διεύθυνση. Επίσης με αριθμητικές τεχνικές (ολοκλήρωση) μπορούν να προκύψουν οι αντίστοιχες μετατοπίσεις.

*Αποκόλληση* – η αποκόλληση του εδάφους γύρω από τις στηρίξεις της γέφυρας λόγω γρήγορα κινούμενων νερών κατά την διάρκεια πλημμυρών. Η αποκόλληση του εδάφους μπορεί να οδηγήσει σε αστάθεια των στηρίξεων.

### 1.2.2 Μετρήσεις για γέφυρες σκυροδέματος

*Διάβρωση* – Είναι δυνατόν να καθοριστεί αν ο οπλισμός του σκυροδέματος έχει υποστεί διάβρωση. Υπάρχουν τεχνικές οι οποίες προσδιορίζουν την πιθανότητα να έχει υποστεί ο οπλισμός διάβρωση και άλλες οι οποίες υπολογίζουν τον ρυθμό της διάβρωσης. Διαφορετικοί αισθητήρες και διαδικασίες χρειάζονται ανάλογα με το αν οπλισμός είναι επικαλυμμένος ή όχι με συνθετικό υλικό (epoxy)

*Ρωγμές* - η αποκόλληση των επιφανειών του σκυροδέματος χαρακτηρίζεται από το πλάτος το μήκος και τον αριθμό των ρωγμών. Μικρής κλίμακας αποκολλήσεις (λίγες, μικρού μήκους στενές ρωγμές) αναμένονται να εμφανιστούν στο σκυρόδεμα. Ωστόσο, πλατιές, μεγάλου μήκους και πολυπληθής ρωγμές δεν είναι αναμενόμενες. Οι ρωγμές είναι δυνατόν να εντοπιστούν χρησιμοποιώντας αισθητήρες ακουστικής εκπομπής. Επίσης είναι εφικτός ο εντοπισμός των ρωγμών χρησιμοποιώντας επιμηκυνσιμόμετρα (strain gauges) τα οποία είναι τοποθετημένα στην περιοχή ενδιαφέροντος

*Θέση του οπλισμού του σκυροδέματος (σιδερόβεργες)* – Η θέση των βεργών του οπλισμού μπορούν να καθοριστούν με διάφορες τεχνικές μη καταστροφικού ελέγχου. Με τις ίδιες τεχνικές μπορεί να καθοριστεί αν υπάρχει αποκόλληση του σκυροδέματος πάνω και κάτω από τις βέργες

*Παραμόρφωση* – Η σχετική επιμήκυνση ή σμίκρυνση κρίσιμων σημείων της γέφυρας. Στα επίπεδα των φορτίων λειτουργίας η γέφυρα συμπεριφέρεται γραμμικά και επομένως είναι δυνατή η εκτίμηση των τάσεων σε διάφορα κρίσιμα σημεία.

*Αντοχή* – η αντοχή του σκυροδέματος καθορίζεται από διάφορα τεστ κυλινδρικών ή κυβικών δοκιμίων τα οποία κατασκευάζονται την ίδια χρονική στιγμή και από το ίδιο μείγμα με το υπό εξέταση στοιχείο της γέφυρας. Για τον προσδιορισμό της αρχικής αντοχής του σκυροδέματος στη κατασκευή, λαμβάνονται μετρήσεις της θερμοκρασίας του σκυροδέματος και συγκρίνονται με προηγούμενα αντίστοιχα διαγράμματα θερμοκρασίας – αντοχής για το συγκεκριμένο μείγμα σκυροδέματος. Η παραπάνω διαδικασία είναι σημαντική για τον έλεγχο της ποιότητας του σκυροδέματος κατά την κατασκευή

*Τάνυση*– Σε συστήματα με προένταση, η τάνυση στα καλώδια είναι σημαντική για την συνολική αντοχή του υπό εξέταση στοιχείου σκυροδέματος. Επιπλέον αν γίνει αποκόλληση

του ενισχυμένου σκυροδέματος, το σκυρόδεμα δεν μπορεί να μεταφέρει τις δυνάμεις στις σιδερόβεργες με αποτέλεσμα να μειώνεται η τάση. Επομένως οι μετρήσεις της έντασης των καλωδίων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποτίμηση της συνολικής κατάστασης της κατασκευής.

### 1.2.3 Μετρήσεις για σιδηρογέφυρες

*Διάβρωση* – η χημική αντίδραση κατά την οποία ο σίδηρος (κάποιο μέταλλο γενικότερα) χάνει ηλεκτρόνια τα οποία δεσμεύονται συνήθως από κάποιο οξειδωτικό υλικό όπως το οξυγόνο του περιβάλλοντος και το νερό. Η παρακολούθηση είναι χρήσιμη για τον καθορισμό εκτεταμένης διάβρωσης ή του ρυθμού αύξησης της διάβρωσης στην κατασκευή.

*Ρωγμές* – ο αριθμός, το πλάτος και το μήκος των ρωγμών σε στοιχεία γεφυρών από χάλυβα σε σημεία συγκέντρωσης τάσεων ή σημεία φόρτωσης λόγω κόπωσης. Αυτή η πληροφορία είναι χρήσιμη για την εκτίμηση της διάρκειας ζωής της γέφυρας ή για την αποφυγή ξαφνικής αστοχίας.

Η ποσοτικοποίηση των ρωγμών είναι σημαντική γιατί η εμφάνιση πολλαπλών ρωγμών σε κρίσιμα σημεία ή στοιχεία χαλύβδινων γεφυρών έχει ως αποτέλεσμα μεγάλες μεταβολές στις τάσεις σε άλλα σημεία της γέφυρας

*Παραμόρφωση* – Η σχετική επιμήκυνση ή σμίκρυνση κρίσιμων σημείων της γέφυρας. Στα επίπεδα των φορτίων λειτουργίας η γέφυρα συμπεριφέρεται γραμμικά και επομένως είναι δυνατή η εκτίμηση των τάσεων σε διάφορα κρίσιμα σημεία.

*Τάνυση (Tension in cables)*– Τα καλώδια στις «κρεμαστές» γέφυρες σχεδιάζονται ώστε να λαμβάνουν εφελκυστικές δυνάμεις. Η παρακολούθηση αυτών των δυνάμεων είναι σημαντική, ειδικά σε περιπτώσεις φόρτωσης της γέφυρας πέρα από τα όρια για τα οποία είχε σχεδιαστεί ή σε περιπτώσεις που υπάρχει υποψία ή γνώση για πτώση της λειτουργίας των καλωδίων.

### 1.3 Παραμορφώσεις Κατασκευών

Κάθε κατασκευή υπόκειται στην επίδραση εξωτερικών παραγόντων φόρτισης που οφείλονται στον άνεμο, στις περιβαλλοντικές αλλαγές της θερμοκρασίας και τη σεισμική δράση. Τα φορτία αυτά, έχουν ως αποτέλεσμα τη γένεση παραμορφώσεων ανάλογα με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, τον τρόπο δράσης του και τα υλικά της κατασκευής, οι οποίες είναι συνδυασμός μόνιμων, ημι-μόνιμων και δυναμικών παραμορφώσεων.

- Μόνιμες παραμορφώσεις

Οι μόνιμες παραμορφώσεις μπορεί να προκληθούν σε μία κατασκευή απότομα (π.χ. λόγω σεισμικής δράσης) ή προοδευτικά και ενδέχεται να έχουν ουσιαστική επίδραση στην στατική της επάρκεια

- Ημι-μόνιμες παραμορφώσεις

Προκαλούνται από μικρο-μεταβολές της γεωμετρίας της κατασκευής, οι οποίες συνίστανται σε παροδική στατική μετατόπιση τμήματος της κατασκευής συνήθως προς μία κατεύθυνση και ταλάντωση γύρω από μια μέση θέση. Οι παραμορφώσεις αυτές, εφόσον βρίσκονται εντός των ορίων μελέτης, είναι αναμενόμενες και επιθυμητές και είναι το αποτέλεσμα της απορρόφησης της ενέργειας των μεταβαλλόμενων εξωτερικών φορτίσεων (π.χ. της δράσης του ανέμου).

- Δυναμικές παραμορφώσεις

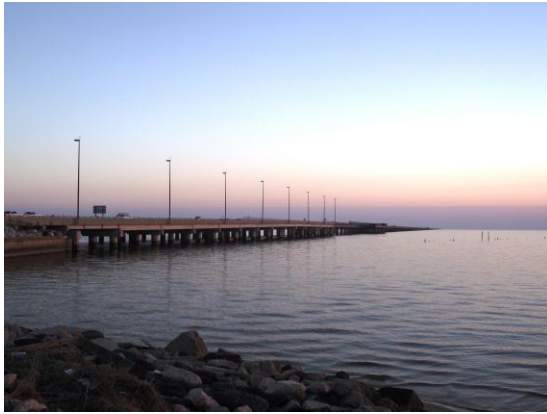
Οι δυναμικές παραμορφώσεις αναφέρονται στις αποκρίσεις της κατασκευής με τη μορφή ταλαντώσεων και συχνότητες κόντα στην ιδιοσυχνότητά της κατασκευής και μπορεί να διακριθεί περαιτέρω σε επικρατούσες και δευτερεύουσες συνιστώσες. Οι επικρατούσες συνιστώσες σχετίζονται με την απόκριση της κατασκευής κοντά στην ιδιοσυχνότητα ταλάντωσης, ενώ οι δευτερεύουσες εκφράζουν ένα πλήθος συχνοτήτων απορρόφησης και λαμβάνουν εν γένει μικρότερες τιμές από την τιμή της ιδιοσυχνότητας.

## 1.4 Είδη γεφυρών

Η γέφυρα είναι μια τεχνική κατασκευή μέσω της οποίας επιτυγχάνεται πρόσβαση πάνω από φυσικά ή τεχνητά εμπόδια, όπως ποταμοί, δρόμοι και κοιλάδες. Υπάρχουν διάφορα ήδη σχεδιασμού των γεφυρών τα οποία εξυπηρετούν διαφορετικούς σκοπούς και καταστάσεις. Ο σχεδιασμός των γεφυρών εξαρτάται σημαντικά από την λειτουργία της γέφυρας, το έδαφος, το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί και το κόστος. Μία σημαντική κατάταξη των γεφυρών είναι σε σχέση με τα φορτία που φέρουν και συγκεκριμένα πώς κατανέμονται σε εφελκυστικά, θλιπτικά, καμπτικά, στρεπτικά και διατμητικά φορτία σύμφωνα με την δομή τους. Οι γέφυρες μεταφέρουν τα φορτία από το κατάστρωμα μέσω των στηρίξεων στην θεμελίωση αυτών. Στις περισσότερες γέφυρες εμφανίζονται όλες οι παραπάνω βασικοί τύποι φορτίων. Ωστόσο κάποια από αυτά αφορούν στο σύνολο της δομής της γέφυρας είτε σε επιμέρους δομικά στοιχεία.

- Γέφυρα με δοκούς

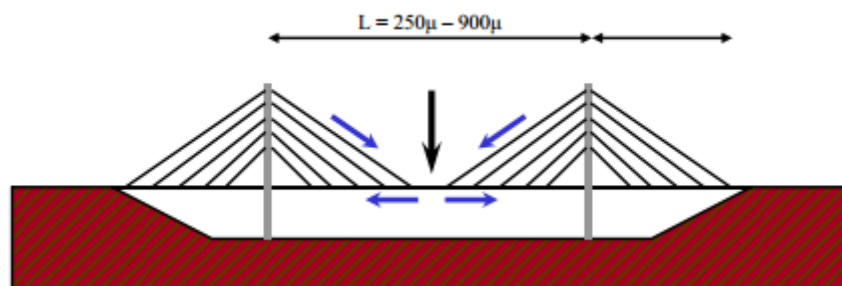
Οι γέφυρες δοκοί είναι σήμερα οι πλέον διαδεδομένες γέφυρες. Γέφυρες αυτού του τύπου αποτελούνται είτε από μια αμφιέρεστη δοκό όταν έχει μόνο ένα άνοιγμα, από περισσότερες όταν έχει περισσότερα του ενός ανοίγματα. Οι ακραίες στηρίξεις ονομάζονται ακρόβαθρα, ενώ οι ενδιάμεσες όταν υπάρχουν μεσόβαθρα. Μπορεί να είναι απλές μικρές ξύλινες γέφυρες μέχρι μεγάλες χαλύβδινες. Οι κατακόρυφες δυνάμεις στη γέφυρα μεταφέρονται ως διατμητικά και καμπτικά φορτία κατά μήκος της δοκού και από εκεί στις στηρίξεις ως κατακόρυφα φορτία. Η πιο μεγάλη γέφυρα δοκός σήμερα είναι η γέφυρα πάνω από την λίμνη Pontchatrain Causeway Southbound στη Νότια Λουϊζιάνα των Η.Π.Α. με μήκος 38,35 km και άνοιγμα 17 m, ενώ η γέφυρα Rio-Niteroi Bridge στο Ρίο ντε Τζανέιρο της Βραζιλίας έχει ανοίγματα 300 m.



**Σχήμα 1.** Γέφυρες δοκοί. Γέφυρα Pontchatrain Causeway Southbound (Wikipedia 1) (αριστερά).  
Γέφυρα Rio Bridge (Wikipedia 2) (δεξιά).

- Καλωδιωτές Γέφυρες

Οι καλωδιωτές γέφυρες καλύπτουν τα ανοίγματα από 250m έως και 900m . Είναι όπως και οι κρεμαστές αναρτώμενες γέφυρες μόνο που σε αυτή τη περίπτωση ο φορέας αναρτάται με κεκλιμένα καλώδια. Σε αντίθεση με τις κρεμαστές απαιτούνται λιγότερα καλώδια, οι απαιτήσεις αγκύρωσης των πλευρικών καλωδίων είναι σχετικά εύκολη (με άκαμπτο πυλώνα το σύστημα μπορεί να είναι αυτό-ισορροπούμενο), ενώ οι πυλώνες είναι σχετικά ψηλότεροι. Σε αυτή τη περίπτωση τα εφελκυστικά φορτία από τα καλώδια μεταφέρονται στο έδαφος μέσω των πυλώνων, ενώ εμφανίζονται και οριζόντιες θλιπτικές τάσεις στο κατάστρωμα (λόγω της κλίσης των καλωδίων). Η καλωδιωτή γέφυρα *Russky* στη Ρωσία είναι η γέφυρα με το μεγαλύτερο άνοιγμα, ενώ η δεύτερη σε συνολικό μήκος ( $L = 2.258 \text{ m}$ ) και η μεγαλύτερη τύπου πλήρους ανάρτησης είναι γέφυρα Ρίου Αντιρρίου στη χώρας μας.



**Σχήμα 2.** Σκαρίφημα καλωδιωτής γέφυρας και φορτία (Παπανικόλας 2008)





*Σχήμα 3. Καλωδιωτές Γέφυρες. Γέφυρα Russky (Wikipedia 4) (πάνω). Γέφυρα Ρίου Αντιρρίου (Wikipedia 5) (κάτω).*

- Τοξωτές Γέφυρες

Άλλοι τύποι γεφυρών είναι τοξωτές γέφυρες και οι γέφυρες τριγωνικών δικτυωμάτων (truss), ενώ υπάρχουν και ένα σύνολο υποκατηγοριών των παραπάνω τύπων γεφυρών. Μια σύνοψη αυτών των κατηγοριών παρουσιάζεται στην ιστοσελίδα <http://pghbridges.com/basics.htm>

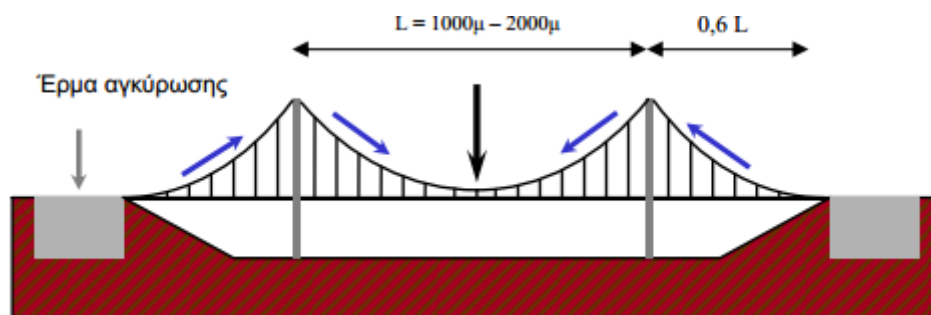


*Σχήμα 4. Τοξωτή γέφυρα (Wikipedia 6) (πάνω). Δικτυωτή γέφυρα (Zanneioa) (κάτω).*

- Κρεμαστές Γέφυρες

Οι κρεμαστές είναι γέφυρες ενός μεγάλου κεντρικού ανοίγματος και για αυτό προτιμώνται όταν απαιτούνται μεγάλα ανοίγματα ναυσιπλοΐας. Οι κρεμαστές γέφυρες αναρτώνται από

καλώδια. Στις μοντέρνες κατασκευές τα κεντρικά καλώδια αναρτώνται σε πυλώνες οι στηρίξεις των οποίων τοποθετούνται βαθιά στο πυθμένα της λίμνης ή του ποταμού. Τα καλώδια που σηκώνουν το βάρος του καταστρώματος αναρτώνται κάθετα ως προς το κατάστρωμα από τα κεντρικά καλώδια. Ιδιαίτερα δύσκολη είναι η αγκύρωση των κεντρικών καλωδίων που απαιτούν μεγάλες ποσότητες έρματος σκυροδέματος. Τα φορτία είναι εφελκυστικά στα καλώδια και κατακόρυφα στους πυλώνες. Η μακρύτερη κρεμαστή γέφυρα είναι η γέφυρα Akashi Kaikyō στην Ιαπωνία με μήκος 3909 m.



Σχήμα 5. Σκαρίφημα κρεμαστής γέφυρας και φορτία (Παπανικόλας 2008)



Σχήμα 6. Κρεμαστή γέφυρα Akashi Kaikyō στην Ιαπωνία (Wikipedia 3)

## 1.5 Συστήματα Παρακολούθησης Δομικής Κατάστασης Τεχνικών Έργων

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι και συστήματα διαθέσιμα για την παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας των γεφυρών. Τα συστήματα αυτά βασίζονται σε ένα πλήθος φυσικών και χημικών διαδικασιών τα οποία χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση συγκεκριμένων χαρακτηριστικών των γεφυρών. Για την παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας

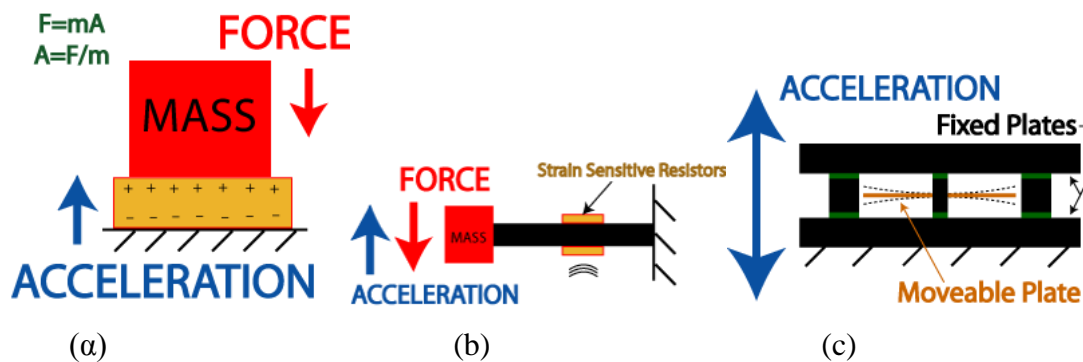
διάφορων τεχνικών έργων, χρησιμοποιούνται είτε μη γεωδαιτικές μέθοδοι είτε τοπογραφικές μέθοδοι. Οι μη γεωδαιτικές μέθοδοι στηρίζονται στη λήψη μετρήσεων από αισθητήρες όπως επιταχυνσιόμετρα, συστήματα ακουστικής εκπομπής, επιμηκυνσιόμετρα, κλισίμετρα, κ.α. Οι τοπογραφικές/γεωδαιτικές μέθοδοι περιλαμβάνουν συμβατικές-επίγειες, φωτογραμμετρικές και δορυφορικές μεθόδους. Μερικά από τα όργανα που χρησιμοποιούνται είναι τα συστήματα δορυφορικού εντοπισμού GNSS, τα συστήματα συσχέτισης ψηφιακής εικόνας (DIC), τα επίγεια συστήματα *radar* μικροκυματικής συμβολομετρίας και οι επίγειοι σαρωτές *laser*.

### 1.5.1 Μέθοδοι πειραματικής μηχανικής

#### Επιταχυνσιόμετρα

Τα επιταχυνσιόμετρα έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως για την μέτρηση δυναμικών φαινομένων. Είναι αισθητήρες και όργανα για τη μέτρηση, την απεικόνιση και την ανάλυση της επιτάχυνσης. Μετρούν χρονο-ιστορίες επιταχύνσεων με υψηλή συχνότητα δειγματοληψίας, δίνοντας υψηλής ανάλυσης χρονικά σήματα της επιτάχυνσης. Η επιτάχυνση έχει ως αποτέλεσμα μια γνωστή προκαθορισμένη μάζα να ασκήσει δύναμη σε ένα αισθητήρα δημιουργώντας ένα μικρής έντασης ηλεκτρικό ρεύμα ή μια μικρή αλλαγή της έντασης του. Εφόσον η δύναμη και η μάζα είναι γνωστές, η επιτάχυνση μπορεί να υπολογιστεί ύστερα από κατάλληλη βαθμονόμηση (calibration) του επιταχυνσιόμετρου. Στα εμπορικά συστήματα η μετατροπή της μηχανικής κίνησης σε ηλεκτρικό σήμα γίνεται χρησιμοποιώντας διάφορες αρχές λειτουργίας όπως το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, η αλλαγή στην χωρητικότητα ενός πυκνωτή, η χρήση των ιδιοτήτων του φωτός και πολλές άλλες. Από τις μετρήσεις της επιτάχυνσης συναρτήσεως του χρόνου, μπορούν να προκύψουν με αριθμητική ολοκλήρωση η ταχύτητα και η μετατόπιση. Αν και τα παραπάνω συστήματα χρησιμοποιούνται για πολλά χρόνια υπάρχουν ακόμα προβλήματα όπως η διάδοση του σφάλματος κατά την διάρκεια της αριθμητικής ολοκλήρωσης (Park 2007). Τελευταία έχουν αναπτυχθεί νέοι αλγόριθμοι για την βελτίωση των παραπάνω υπολογισμών, ωστόσο χρειάζεται περαιτέρω βελτίωση (Vacca 2006). Επίσης τα παραπάνω συστήματα παράγουν μεγάλο όγκο δεδομένων και επομένως απαιτείται αρκετά μεγάλη υπολογιστική ισχύς για την επεξεργασία τους. Συμπερασματικά, τα επιταχυνσιόμετρα παρέχουν χρήσιμες μετρήσεις, ωστόσο, λόγω πιθανών σφαλμάτων στη χρήση τους απαιτεί την συνεργία με κάποιο άλλου είδους σύστημα όπως τα συστήματα

δορυφορικού εντοπισμού GPS (Roberts 2004) για την αντιστάθμιση των σφαλμάτων που μπορεί να εμφανίζουν και τα δύο συστήματα.



**Σχήμα 7.** Αρχές λειτουργίας επιταχυνσιομέτρων (a) πιεζοηλεκτρικό (b) μεταβολή της αντίστασης (c) μεταβολής χωρητικότητας πυκνωτή

([https://www.pcb.com/Accelerometers/Sensing\\_Technologies.aspx](https://www.pcb.com/Accelerometers/Sensing_Technologies.aspx))

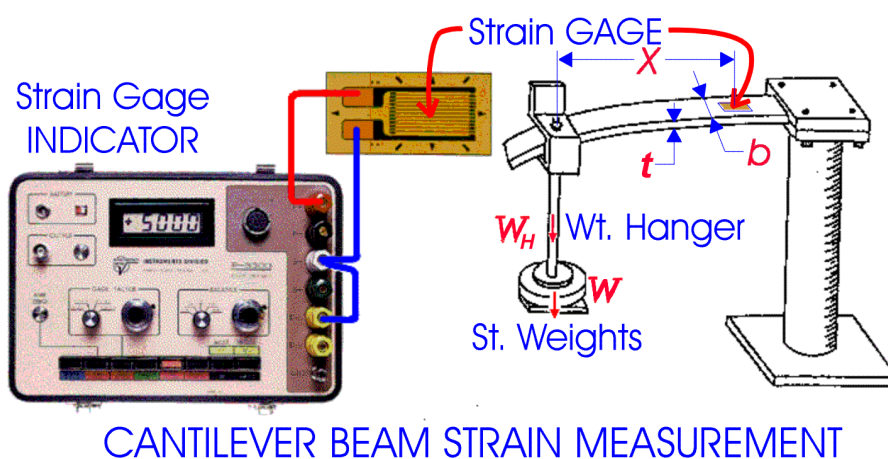
### Κλισίμετρα

Τα κλισίμετρα μετρούν την γωνία κλίσης ενός αντικειμένου. Γενικά αυτές οι συσκευές χρησιμοποιούνται για να παρακολουθήσουν την συμπεριφορά των στηρίξεων σε θερμοκρασιακές αλλαγές και σε διάφορες φορτίσεις. Η λειτουργία των κλισιμέτρων βασίζεται σε μια δέσμη φωτός, ένα shield και ένα αισθητήρα. Ανάλογα με την γωνία της κλίσης η ποσότητα του φωτός που περνάει από το shield μεταβάλλεται, προκαλώντας αλλαγή στην ένταση. Μετρώντας αυτής την αλλαγή είναι δυνατή η μέτρηση της γωνίας της κλίσης. Η ακρίβεια αυτών των συστημάτων είναι περίπου 0.005 deg (Kulchin 2004). Άλλες τεχνολογίες κλισιμέτρων είναι αυτές που βασίζονται σε αισθητήρες ταλαντούμενων συρμάτων, Μικρο-Ηλεκτρομηχανικούς (Micro-Electro Mechanical Sensors - MEMS) αισθητήρες, αισθητήρες ηλεκτρολυτικών κελιών και αισθητήρες βασισμένους σε εκκρεμές. Τα κλισίμετρα μετρούν την κλίση σε συγκεκριμένα σημεία πάνω στη γέφυρα. Η μετατόπιση μπορεί να υπολογιστεί ολοκληρώνοντας τις μετρήσεις των κλίσεων κατά μήκος της γέφυρας. Επομένως η μέτρηση σε ένα μόνο σημείο δεν μπορεί να προσφέρει μια γενική εικόνα για την κατάσταση της γέφυρας. Για την παρακολούθηση της συμπεριφοράς των στηρίξεων είναι

απαραίτητη η τοποθέτηση κλισιμέτρων σε διάφορες θέσεις, και ίσως και η χρήση κάποιου συμπληρωματικού συστήματος.

### Επιμηκυνσιόμετρα

Τα επιμηκυνσιόμετρα (strain gauges) (Σχήμα 8) 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.



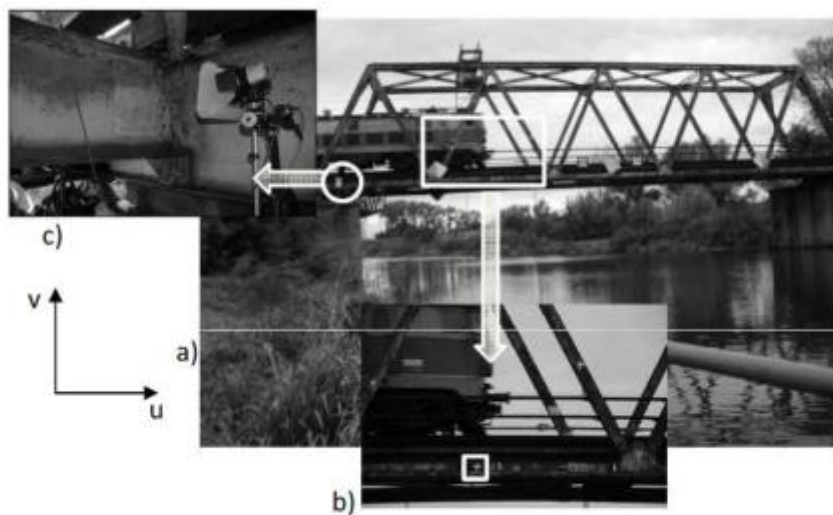
Σχήμα 8. Αρχή λειτουργίας επιμηκυνσιομέτρων

### 1.5.2 Τοπογραφικές Μέθοδοι

#### Συστήματα Συσχέτισης Ψηφιακής Εικόνας

Τα συστήματα συσχέτισης ψηφιακής εικόνας - Digital Image Correlation (DIC) - μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να καθορίσουν τις πρωτογενώς μετατοπίσεις μιας κατασκευής. Κατά την εφαρμογή της μεθόδου μια ή περισσότερες ψηφιακές κάμερες υψηλής ανάλυσης χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση της κατασκευής. Αρχικά λαμβάνεται μια

φωτογραφία της αρχικής κατάστασης της κατασκευής και συσχετίζεται μια συγκεκριμένη απόσταση με ένα καθορισμένο αριθμό φατνίων (pixel). Συγκρίνοντας την αρχική φωτογραφία με μεταγενέστερες μπορεί να καθοριστεί η απόκριση της κατασκευής. Για να είναι πιο ακριβής η διαδικασία ένας στόχος κατάλληλης εναλλαγής των τόνων του γκρι (συνήθως ομόκεντροι κύκλοι σε σκληρό χαρτί ή άλλο υλικό) τοποθετείται στις θέσεις ενδιαφέροντος της κατασκευής. Αντι στόχων, ανάλογα με τις ιδιαίτερες συνθήκες μπορεί να χρησιμοποιηθούν σημεία που ξεχωρίζουν στην κατασκευή, όπως βίδες με ομοιόμορφα χρωματικό υπόβαθρο. Στα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι η κάμερα(ες) πρέπει να είναι σταθερή στο ίδιο σημείο ώστε να μπορούν να συγκριθούν οι ληφθήσες φωτογραφίες. Επίσης για να μπορεί να παρακολουθηθεί με ακρίβεια όλη η γέφυρα χρειάζονται πολλαπλές κάμερες. Σημειώνεται ότι η ακρίβεια εξαρτάται από τον αριθμό των φατνία ανά μονάδα μήκους. Επίσης ο φωτισμός και οι καιρικές συνθήκες μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την διαδικασία των μέτρησεων.



**Σχήμα 9.** α) Μέτρηση γέφυρας χρησιμοποιώντας β) ολικά και c) τοπικά συστήματα DIC (Malesa 2010)

### Συστήματα laser 3-Δ σάρωσης

Τα συστήματα laser τρισδιάστατης (3-Δ) σάρωσης έχουν μια ή περισσότερες πηγές laser τοποθετημένες σε τρίποδα. Ο σαρωτής έχει μια πηγή laser και αναλόγως τον τύπο του χρησιμοποιεί είτε τον χρόνο που χρειάζεται η δέσμη του laser να ανακλαστεί πίσω στον σαρωτή είτε την διαφορά φάσης του μέγιστου πλάτους της δέσμης. Το laser μπορεί να περιστρέφεται ώστε να σαρώνει μεγάλες κατασκευές. Σε κάθε περίπτωση για την λεπτομερή παρακολούθηση γεφυρών χρειάζονται περισσότεροι σαρωτές. Τα συστήματα 3-Δ σάρωσης έχουν αρκετά καλή ακρίβεια η οποία κυμαίνεται από 10mm έως 1mm (Park 2007) υπό συνθήκες και μετά από επεξεργασία. Στα πλεονεκτήματα των συστημάτων σάρωσης είναι η



δυνατότητα παρακολούθησης της γέφυρας χωρίς να χρειάζεται η πρόσβαση πάνω σε αυτή καθώς και η συνολική απεικόνιση της κατάστασης της σε αντιδιαστολή με τις διακριτές μετρήσεις σε συγκεκριμένες θέσεις που λαμβάνουμε με αισθητήρες όπως τα επιταχυνσιόμετρα ή τα κλισίμετρα. Ωστόσο, η ακρίβεια των μετρήσεων με το laser είναι ευαίσθητη όταν στην ίδια γέφυρα συνυπάρχουν επιφάνειες με διαφορετικά υλικά (Mina 2007). Επομένως οι μετρήσεις σε γέφυρες με διαφορετικά υλικά μπορεί να εμφανίζουν περισσότερα σφάλματα από ότι σε γέφυρας οι οποίες έχουν επιφάνειες εξ' ολοκλήρου από σκυρόδεμα ή χάλυβα. Σχετικά με τις καιρικές συνθήκες (ομίχλη, βροχή) υπάρχουν αναφορές ότι οι καιρικές συνθήκες επηρεάζουν την ακρίβεια των μετρήσεων αυξάνοντας τον θόρυβο. Ο θόρυβος αυτός προκύπτει από πρόωρες ανακλάσεις των δεσμών του laser λόγω των καιρικών συνθηκών (Mina 2007). Ωστόσο υπάρχουν και αναφορές ότι οι καιρικές συνθήκες δεν επηρεάζουν την ακρίβεια των μετρήσεων των συστημάτων laser (Park 2007).



(α)



(b)

**Σχήμα 10.** α) Σύστημα laser 3-Δ σάρωσης (<http://www.trimble.com/>). b) Γέφυρα και σύννεφο σημείων από την σάρωση (Werner 2010)

### Δορυφορικές Μέθοδοι Εντοπισμού

Το παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού θέσης - Global Positioning System (GPS) - χρησιμοποιήθηκε σε εφαρμογές παρακολούθησης κατασκευών. Το σύστημα GPS των Η.Π.Α. περιλαμβάνει τους τεχνητούς δορυφόρους που περιστρέφονται γύρω από την γη, τους σταθμούς ελέγχου και του δέκτες των GPS.

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.

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.

#### Επίγειο σύστημα *radar* μικροκυματικής συμβολομετρίας

Το επίγειο σύστημα *radar* μικροκυματικής 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 ηφαίστεια, οι παγετώνες κ.α.) και των κατασκευών (φράγματα, γέφυρες, πύργοι, κτίρια κ.α.) με υψηλή ακρίβεια.

Ένα νέο υποσχόμενο σύστημα για την παρακολούθηση γεφυρών είναι το σύστημα IBIS το οποίο χρησιμοποιεί την μέθοδο της επίγειας συμβολομετρίας μικροκυματικής ακτινοβολίας για τον προσδιορισμό των μετατοπίσεων σε γέφυρες. Η παραπάνω μεθοδολογία αποτελεί και το κύριο αντικείμενο της παρούσας εργασίας και θα αναπτυχθεί αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο.



## 2. ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΓΕΙΑΣ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑΣ ΜΙΚΡΟΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Η μέθοδος της επίγειας συμβολομετρίας χρησιμοποιήθηκε αρχικά σε εφαρμογές μέτρησης της μετακίνησης μεγάλων επιφανειών του εδάφους. Η ίδια τεχνική μπορεί τώρα να χρησιμοποιηθεί χρησιμοποιώντας επίγεια συστήματα τα οποία επιτρέπουν την μέτρηση των μετατοπίσεων συγκεκριμένων περιοχών με μεγάλη ανάλυση, καλύτερη του 1 m.

Η επίγεια συμβολομετρία μικροκυματικής ακτινοβολίας βασίζεται σε επίγεια συστήματα radar. Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό των κοινών radar είναι η ικανότητα τους να μετρούν το εύρος (π.χ. απόσταση) μετρώντας τον χρόνο που χρειάζεται το σήμα του radar να μεταδοθεί στο στόχο, να ανακλαστεί και τέλος να ληφθεί πίσω από τον αισθητήρα. Δύο η περισσότεροι στόχοι στο εύρος του radar μπορούν να εντοπιστούν αν οι ανακλάσεις που λαμβάνει το radar είναι διαφορετικές. Η ανάλυση (range) είναι ένα μέτρο της ελάχιστης απόστασης μεταξύ δύο στόχων ώστε αυτοί να είναι αναγνωρίσιμοι. Αντίστοιχα η ακτινική ανάλυση (range resolution) είναι η ελάχιστη ακτινική απόσταση στο οπτικό πεδίο του radar.

Τα σύγχρονα επίγεια συστήματα συμβολομετρίας μικροκυματικής ακτινοβολίας έχουν την δυνατότητα να καθορίσουν την θέση και την μετατόπιση διαφορετικών στόχων τοποθετημένων σε διαφορετικές θέσεις χρησιμοποιώντας δύο γνωστές τεχνικές radar.

- Η τεχνική Βηματικής Συχνότητας – Συνεχούς κύματος (Stepped Frequency – Continuous Wave SF-CW) η οποία χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό της θέσης διάφορων στόχων τοποθετημένων στο οπτικό πεδίο του radar (Taylor 2001)
- Η συμβολομετρική τεχνική (interferometric technique) η οποία καθορίζει την μετατόπιση των στόχων χρησιμοποιώντας τη φάση της ανακλώμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (Henderson & Lewis 1998).

### 2.1 Η Τεχνική Βηματικής Συχνότητας – Συνεχούς κύματος

Η βασική κυματομορφή που χρησιμοποιείται από το radar για τον καθορισμό της απόστασης είναι παλμός μικρής διάρκειας. Όσο μικρότερη είναι η διάρκεια του παλμού τόσο μεγαλύτερη είναι η ακρίβεια της μέτρησης της απόστασης δεδομένου ότι η ανάλυση της απόστασης  $\Delta r$  συνδέεται με το πλάτος του παλμού σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση

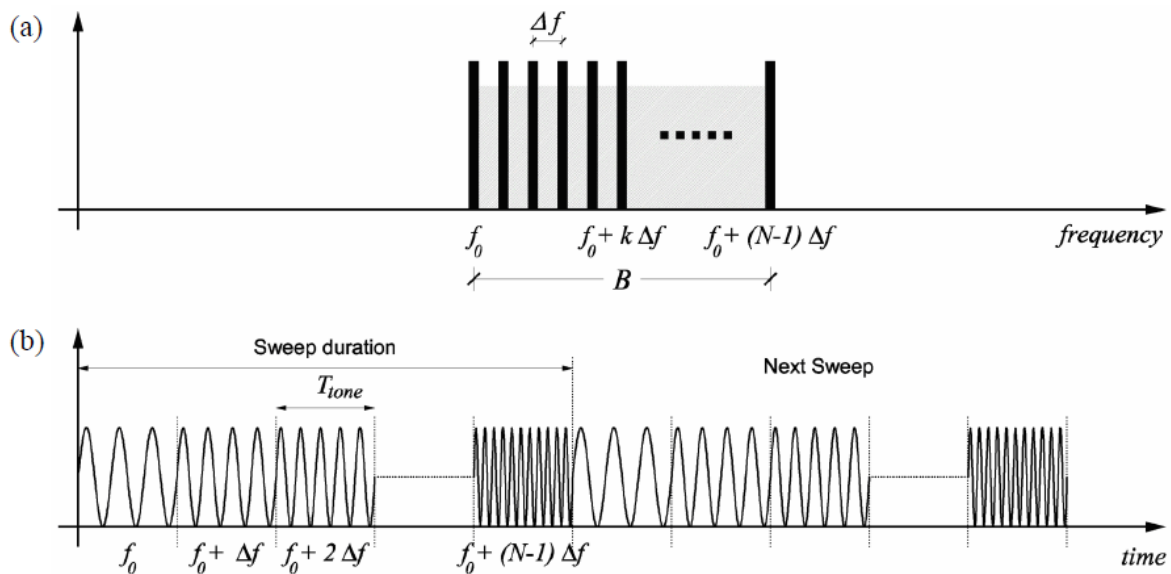
$$\Delta r = \frac{c \times \tau}{2} \quad (1)$$

Όπου  $c$  είναι η ταχύτητα του φωτός στο κενό. Για ένα σήμα διάρκειας  $\tau$  μπορεί να αποδειχθεί ότι το γινόμενο χρόνου – εύρους ζώνης (bandwidth) ικανοποιεί την σχέση  $\tau \times B = 1$  όπου  $B$  είναι το εύρος ζώνης σε Hz. Επομένως η ευκρίνεια της απόστασης μπορεί να γραφεί ως

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

Οι εξισώσεις (1) και (2) δείχνουν ότι για να πετύχουμε καλύτερη ευκρίνεια στη μέτρηση της απόστασης (μικρότερες τιμές του  $\Delta r$ ) πρέπει είτε να μειώσουμε την διάρκεια του παλμού  $\tau$  είτε να αυξήσουμε το εύρος ζώνης  $B$ .

Αντί να χρησιμοποιηθούν παλμοί μικρού πλάτους, η τεχνική SF-CW αυξάνει το εύρος ζώνης αυξάνοντας γραμμικά την συχνότητα συνεχόμενων παλμών σε διακριτά βήματα όπως φαίνεται και στο Σχήμα 11.

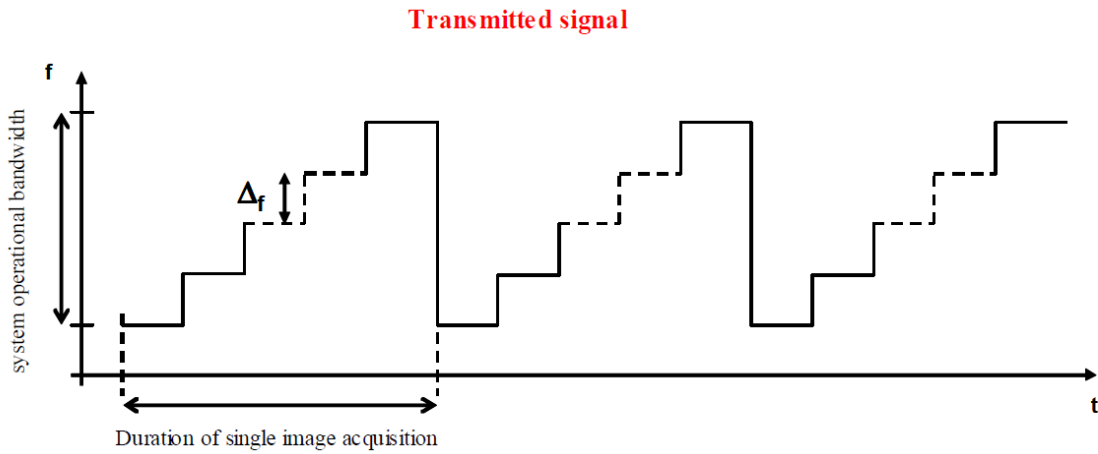


**Σχήμα 11.** Αναπαράσταση της SF-CW κυματομορφής : (α) πεδίο συχνότητας (β) πεδίο χρόνου (Gentile 2009)

Με αυτή τη τεχνική το SF-CW radar παρουσιάζει στενό στιγμιαίο εύρος ζώνης (το οποίο αντιστοιχεί σε κάθε παλμό) και μεγάλο ενεργό εύρος ζώνης

$$B = (N - 1)\Delta f \quad (3)$$

Με ριπές  $N$  ηλεκτρομαγνητικών παλμών, οι οποίοι γενικά ονομάζονται και τόνοι, των οποίων η συχνότητα αυξάνεται από τόνο σε τόνο με μια σταθερή αύξηση  $\Delta f$  (Σχήμα )



*Σχήμα 12. Αύξηση συχνότητας (IDS 2009)*

Στην τεχνική διαμόρφωσης SF-CW η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία διατηρεί σταθερή κάθε τιμή συχνότητας για κάποιο διάστημα ώστε να προλάβουν οι ανακλάσεις τους να ληφθούν από τον παραλήπτη. Επομένως η διάρκεια κάθε τόνου του σήματος  $T_{tone}$  εξαρτάται από την μέγιστη απόσταση  $R_{max}$  που θέλουμε να παρατηρήσουμε σε κάθε σενάριο

$$T_{tone} = \frac{2R_{max}}{c} \quad (4)$$

Ο αριθμός των τόνων που συνθέτουν κάθε ριπή μπορεί να υπολογιστεί ως

$$N = \frac{2R_{max}}{\Delta r} \quad (5)$$

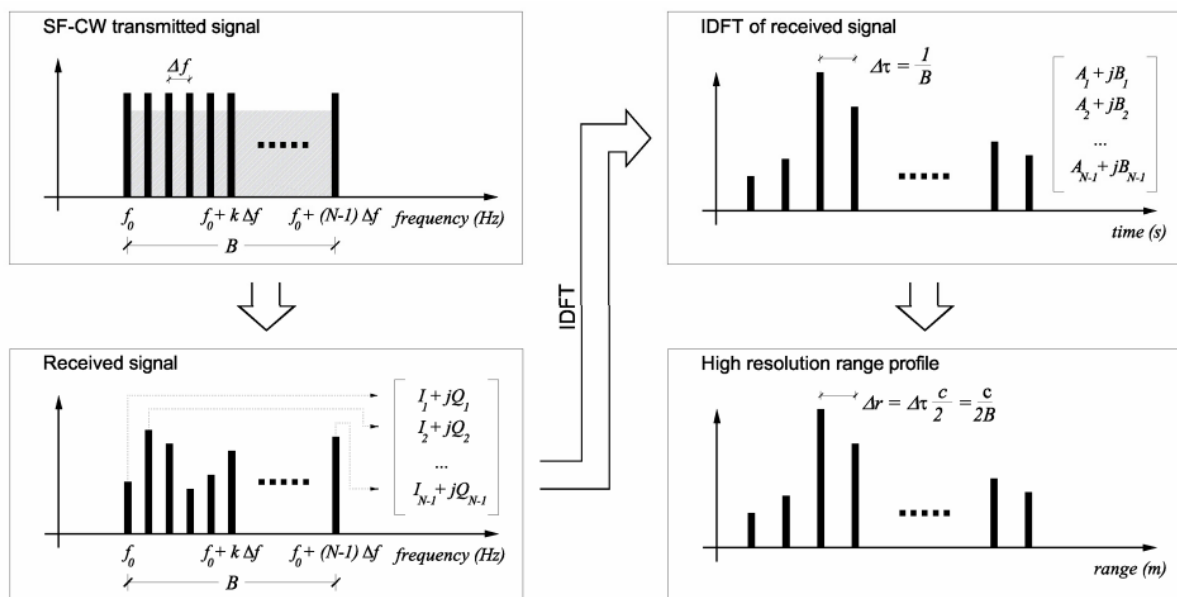
Ο προγραμματισμός της μετάδοσης κάθε τόνου σύμφωνα με την σχέση (4), επιτρέπει στο SF-CW , να λάβει την απόκριση από τον πιο μακρινό στόχο πριν ξεκινήσει την μετάδοση του επόμενου τόνου. Από τις σχέσεις (4) και (5) είναι φανερό ότι η μέγιστη συχνότητα δειγματοληψίας  $F_{max}$  κάθε σεναρίου εξαρτάται από την μέγιστη απόσταση  $R_{max}$  και την ανάλυση της απόστασης  $\Delta r$ . Συγκεκριμένα χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (4) και (5) η μέγιστη συχνότητα δειγματοληψίας μπορεί να γραφεί ως

$$F_{max} \cong \frac{1}{N \times T_{tone}} = \frac{c}{2N \times R_{max}} = \frac{c \times \Delta r}{4NR_{max}^2} \quad (6)$$

Από την παραπάνω εξίσωση είναι φανερό ότι

- η μέγιστη συχνότητα δειγματοληψίας μειώνεται όσο αυξάνεται η μέγιστη μετρούμενη απόσταση (το σύστημα πρέπει να περιμένει περισσότερο μέχρι να λάβει τις ανακλάσεις από τον μακρύτερο στόχο)
- η μέγιστη συχνότητα δειγματοληψίας αυξάνεται όσο αυξάνεται η απαιτούμενη ευκρίνεια

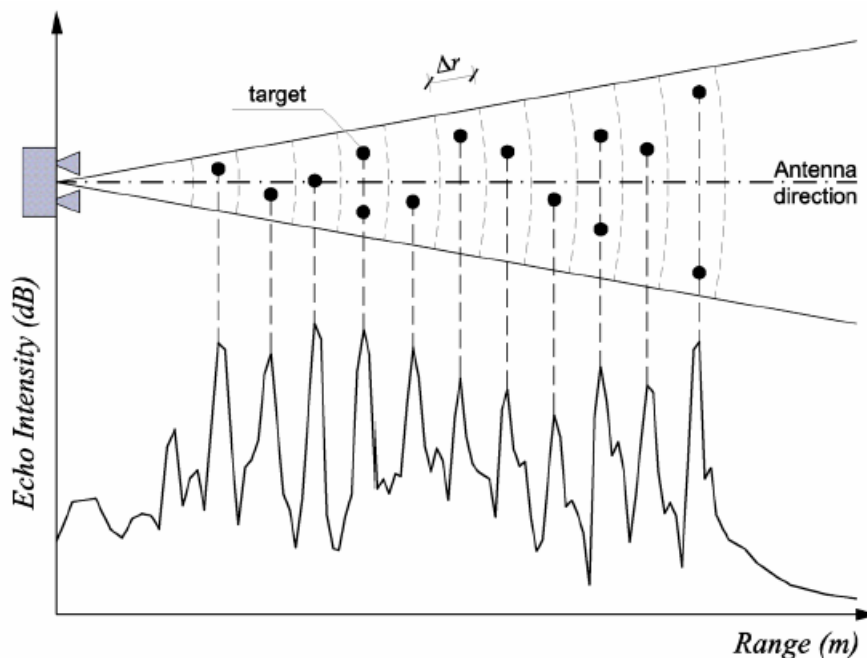
Η εκπομπή της SF-CW κυματομορφής παράγει ένα συνθετικό προφίλ των αντικειμένων στα οποία ανακλάται σύμφωνα με την διαδικασία η οποία συνοψίζεται στο Σχήμα . Σε κάθε χρονική στιγμή, η σε φάση (I – in phase) και η εκτός φάσης (Q - quadrature) συνιστώσα των λαμβανόμενων σημάτων συλλέγονται ώστε να δημιουργηθεί μία ομάδα δεδομένων αποτελούμενο από  $N$  μιγαδικούς αριθμούς, το οποίο αναπαριστά την απόκριση συχνότητας σε  $N$  διακριτές συχνότητες. Λαμβάνοντας τον αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier, η απόκριση ανακατασκευάζεται στο πεδίο του χρόνου του radar : κάθε μιγαδικό δείγμα σε αυτό το πεδίο αναπαριστά την ανάκλαση από ένα διάστημα απόστασης μήκους  $c/2B$ . Το προφίλ του πλάτους της απόστασης των ανακλάσεων που λαμβάνει το radar, υπολογίζεται υπολογίζοντας το μέτρο του Inverse Discrete Fourier Transform (IDFT) των διανυσματικών δειγμάτων που συλλέχθηκαν.



**Σχήμα 13.** Υπολογισμός του πλάτους της απόστασης όπως υπολογίζεται από την SF-CW κυματομορφή (Gentile 2009)

Το προφίλ του πλάτους της απόστασης παράγει μια μονοδιάστατη απεικόνιση των αντικειμένων στα οποία ανακλάται η κυματομορφή στο χώρο εκπομπής της κεραίας ως συνάρτηση της απόστασης τους από τον αισθητήρα.

Η μορφή του πλάτους της απόστασης παρουσιάζεται στο Σχήμα , όπου φαίνεται ένα ιδανικό προφίλ πλάτους, όπως προκύπτει όταν στον χώρο εκπομπής του radar βρίσκονται ένα σύνολο από στόχοι σε διαφορετικές αποστάσεις και γωνίες σε σχέση με τον άξονα του συστήματος. Οι κορυφές στο Σχήμα 14 αντιστοιχούν σε σημεία με «καλές» επιστροφές μετρήσεων (σημεία με καλή ηλεκτρομαγνητική ανακλαστικότητα) . Ο αισθητήρας μπορεί να εντοπίσει την μετατόπιση ή την μεταβατική απόκριση αυτών των σημείων συγχρόνως. Επιπλέον από το σχήμα φαίνεται ότι ο αισθητήρας έχει δυνατότητα απεικόνισης των αποτελεσμάτων μόνο σε μία διάσταση. Για παράδειγμα διαφορετικοί στόχοι μπορούν να ανιχνευθούν ανεξάρτητα όταν απέχουν διαφορετικές αποστάσεις από το radar. Επομένως, σφάλματα μπορεί να προκύπτουν όταν υπάρχουν πολλαπλές συνεισφορές στην ίδια διαμέριση της απόστασης, από διαφορετικούς στόχους που βρίσκονται σε διαφορετική γωνία αλλά στην ίδια απόσταση (Gentile et. Al. 2008).



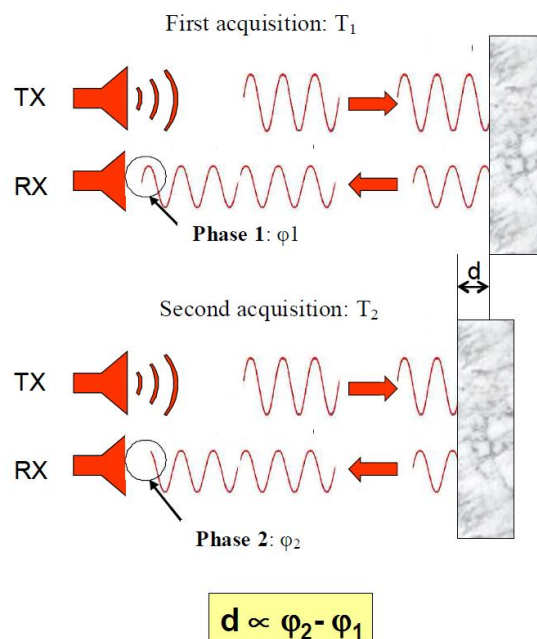
Σχήμα 14. Ιδανικό προφίλ πλάτους απόστασης (Gentile 2009)

## 2.2 Συμβολομετρία

Αφού εκτιμηθεί το προφίλ της απόστασης σε ομοιόμορφα διαστήματα  $\Delta t = 1/f_{sample}$ , η απόκριση της μετατόπισης για κάθε διαμέριση της απόστασης υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την συμβολομετρική τεχνική φάσης (Henderson and Lewis 1998) . Η συμβολομετρική τεχνική χρησιμοποιήθηκε αρχικά σε εφαρμογές μέτρησης της μετακίνησης μεγάλων επιφανειών του εδάφους χρησιμοποιώντας δορυφόρους. Η ίδια τεχνική μπορεί τώρα να χρησιμοποιηθεί χρησιμοποιώντας επίγεια συστήματα τα οποία επιτρέπουν την μέτρηση των μετατοπίσεων συγκεκριμένων περιοχών με μεγάλη ανάλυση η οποία φθάνει κάτω από ένα μέτρο.

Σύμφωνα με την συμβολομετρική τεχνική η μετατόπιση ενός αντικείμενου υπολογίζεται συγκρίνοντας την φάση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων τα οποία ανακλώνται από το αντικείμενο σε διαφορετικές χρονικές στιγμές.

Τα ανακλώμενα από το αντικείμενο ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαφέρουν τουλάχιστον ως προς την φάση ανάλογα και με την θέση του αντικείμενου σε σχέση με την πηγή εκπομπής και τον αισθητήρα λήψης του κύματος. Η μέτρηση της μετατόπισης του υπό εξέταση αντικείμενου προκύπτει από την αλλαγή της φάσης μετρούμενη από τον αισθητήρα του radar σε διαφορετικές χρονικές στιγμές της λήψης. Η βασική αρχή της συμβολομετρικής τεχνικής παρουσιάζεται στο Σχήμα 15 .



Σχήμα 15. Βασική αρχή της συμβολομετρικής τεχνικής (IDS 2010)

Ωστόσο η μετρούμενη διαφορά της φάσης δεν οφείλεται μόνο στην μετατόπιση του υπό εξέταση στόχου αλλά εξαρτάται και από άλλους παράγοντες. Συγκεκριμένα η συμβολομετρική διαφορά φάσης  $\Delta\varphi$  για ένα στόχο βρίσκεται μεταξύ  $-\pi$  και  $\pi$  και δίνεται από την ακόλουθη σχέση

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{\text{μετατόπισης}} + \Delta\varphi_{\text{διηλεκτρική}} + \Delta\varphi_{\text{ατμοσφαιρική}} + \Delta\varphi_{\text{θόρυβου}} - 2\pi n \quad (7)$$

Όπου

$n$  είναι ο ακέραιος αριθμός που δηλώνει τον αριθμό των πλήρων κύκλων φάσης. Η φάση  $\Delta\varphi$  είναι η μετρούμενη φάση ενώ το δεξί μέλος τις εξίσωσης δηλώνει τις άγνωστες μεταβλητές:

$\Delta\varphi_{\text{μετατόπισης}}$  : μετατοπίσεις στην ακτίνα εκπομπής του radar

$\Delta\varphi_{\text{διηλεκτρική}}$  : μεταβολές στις διηλεκτρικές ιδιότητες του στόχου

$\Delta\varphi_{\text{ατμοσφαιρική}}$ : μεταβολές στις ατμοσφαιρικές ιδιότητες μεταξύ αισθητήρα και στόχου

$\Delta\varphi_{\text{θόρυβου}}$  : θόρυβος μετρήσεων

Η μετατόπιση του στόχου εξαρτάται μόνο από την διαφορά φάσης  $\Delta\varphi_{\text{μετατόπισης}}$  και συγκεκριμένα συνδέονται με την ακόλουθη εξίσωση:

$$d_{\text{ακτ}} = -\frac{\lambda}{4\pi} \Delta\varphi_{\text{μετατόπισης}} \quad (8)$$

Όπου  $\lambda$  είναι το μήκος κύματος του ηλεκτρομαγνητικού κύματος και  $d_{\text{ακτ}}$  η μετατόπιση του στόχου στην ακτινική διεύθυνση.

Για τον καθορισμό της  $\Delta\varphi_{\text{μετατόπισης}}$  από την εξίσωση (7) είναι απαραίτητος ο καθορισμός των υπόλοιπων παραμέτρων. Οι μεταβολές στις διηλεκτρικές ιδιότητες του στόχου δεν μπορούν εύκολα να μοντελοποιηθούν και λαμβάνονται ως υψισυχνός θόρυβος ο οποίος δύναται να απομακρυνθεί με την χρήση βαθυπέρατων φίλτρων (low pass filtering).

Οι μεταβολές στις ατμοσφαιρικές ιδιότητες μπορεί να είναι σημαντικές με αποτέλεσμα να επηρεάζουν σημαντικά τις μετρήσεις της συμβολομετρικής φάσης. Τα μικροκύματα επηρεάζονται σημαντικά από την υγρασία. Όπως προτάθηκε από τον Zebker (Zebker et. al. 1997) η καθυστέρηση των κυμάτων λόγω των ατμοσφαιρικών συνθηκών δίνεται από την εξίσωση

$$dr_{\text{ατμοσφαιρικῆ}} = 7.76 \times 10^{-5} \int_0^R \frac{P}{T} dr + 3.73 \times 10^{-1} \int_0^R \frac{e}{T^2} dr \quad (9)$$

Όπου

$P$  : η πίεση σε hectopascal (100 x Pa)

$T$  : η θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin °K

$e$  : η μερική πίεση υδρατμών σε hectoPascal (100 x Pa)

$r$  : η απόσταση

Από την παραπάνω σχέση μπορούμε να υπολογίσουμε ότι μια αλλαγή της υγρασίας μόνο 1% έχει ως αποτέλεσμα καθυστέρηση 2mm σε απόσταση 1km. Για μικρότερες αποστάσεις (< 300 – 500 m) η ατμόσφαιρα μπορεί μοντελοποιηθεί επαρκώς υποθέτοντας σταθερές ατμοσφαιρικές συνθήκες κατά μήκος της διαδρομής:

$$\Delta\varphi_{\text{ατμοσφαιρικῆ}} = a \times r \quad (10)$$

Όπου ο παράγοντας  $a$  μπορεί να καθοριστεί είτε από σημεία ελέγχου (σημεία τα οποία δεν μετακινούνται και επομένως η διαφορά φάσης για αυτά οφείλεται μόνο σε ατμοσφαιρικές διακυμάνσεις) είτε μετρώντας την υγρασία, την θερμοκρασία και την πίεση και χρησιμοποιώντας την εξίσωση (9).

Για μεγαλύτερες αποστάσεις (> 300 – 500 m) υψηλότερης τάξης μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ληφθούν υπόψη οι μη – γραμμικότητες των ατμοσφαιρικών μεταβολών κατά μήκος της διαδρομής:

$$\Delta\varphi_{\text{ατμοσφαιρικῆ}} = \sum_{i=1}^n a \times r^i \quad (10)$$

Ο ακριβής αριθμός των πλήρων κύκλων φάσης είναι δυνατόν να προσδιορισθεί μόνο κάτω από ορισμένες συνθήκες. Για μετρήσεις μετατόπισης γενικά υποθέτουμε ότι δεν ξεπερνάει το ¼ του μήκους κύματος του μεταδιδόμενου μικροκύματος σε κάθε επανάληψη.



### 2.3 Μετρούμενη και Υπολογιζόμενη Μετατόπιση

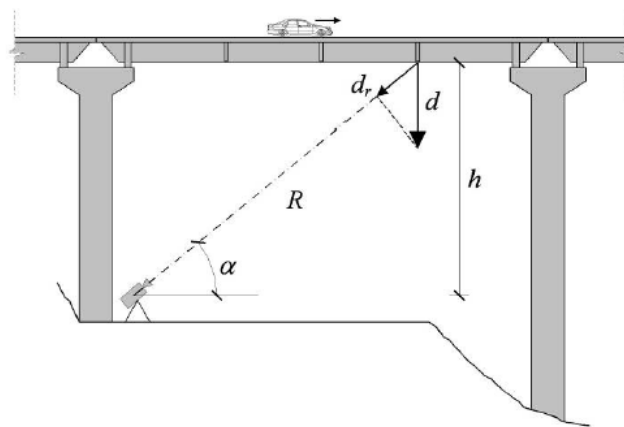
Η μετατόπιση μετράται στην ακτινική διεύθυνση, δηλαδή στη διεύθυνση που ενώνει τη πηγή εκπομπής με τα σημεία στην υπό εξέταση κατασκευή. Δεδομένης της γεωμετρίας της κατασκευής και της θέσης της σχετικά με την πηγή εκπομπής, η μετατόπιση των σημείων της κατασκευής σε οποιαδήποτε διεύθυνση μπορεί να υπολογιστεί με γεωμετρικούς μετασχηματισμούς. Αν η ακτινική μετατόπιση είναι  $d_r$  τότε η μετατόπιση στην κατακόρυφη διεύθυνση  $d$  (Σχήμα ) δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$d_r = d \sin(\alpha) \quad (11)$$

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

$$d = d_r \frac{r}{h} \quad (12)$$

Όπου  $r$  η ακτινική και η και  $h$  κάθετη απόσταση της πηγής εκπομπής (κεραία) και του υπό εξέταση σημείου, και η και  $h$  κάθετη απόσταση της πηγής εκπομπής (κεραία) και του υπό εξέταση σημείου, αντίστοιχα

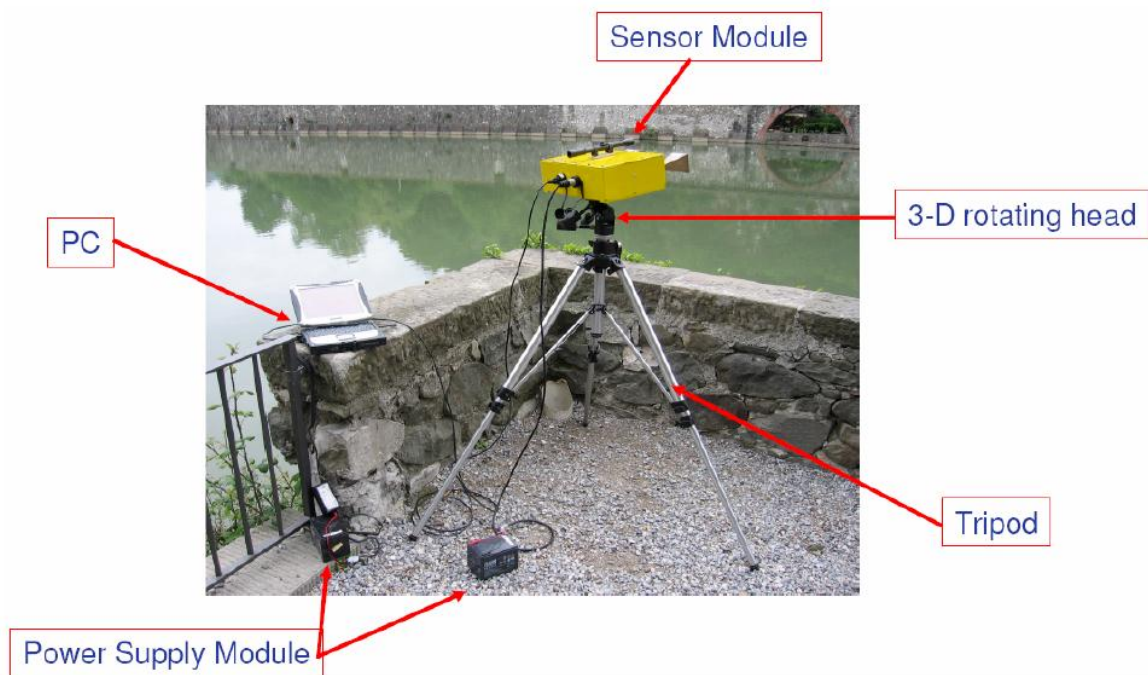


Σχήμα 16. Ακτινική και κατακόρυφη μετατόπιση (Gentile 2009)

### 2.4 Σύστημα IBIS – S

Οι τεχνικές radar που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο έχουν υλοποιηθεί σε ένα σύστημα επίγειας συμβολομετρίας μικροκυματικής ακτινοβολίας από την εταιρεία IDS (Ingegneria Dei Sistemi, Pisa, Italy); το σύστημα ονομάζεται IBIS-S (Image By Interferometric Survey of Structures), και αποτελείται από τον αισθητήρα, την μονάδα

ελέγχου σε Η/Υ και την μονάδα τροφοδοσίας (Σχήμα 17). Ο αισθητήρας είναι ένα πλήρως σύμφωνο radar (ένα radar το οποίο διατηρεί την πληροφορία της φάσης του λαμβανόμενου σήματος) το οποίο παράγει, μεταδίδει και λαμβάνει τα ηλεκτρομαγνητικά σήματα από τα οποία ύστερα από επεξεργασία υπολογίζονται οι χρονοσειρές της μετατόπισης της υπό εξέταση κατασκευής. Η μονάδα ζυγίζει 12 kg, και περιλαμβάνει δύο χωνοειδείς κεραίες (horn) για την μετάδοση και την λήψη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και είναι εγκατεστημένο σε τρίποδο με περιστροφική κεφαλή για να είναι δυνατή η σκόπευση του συστήματος στην επιθυμητή διεύθυνση.



*Σχήμα 17. Σύστημα IBIS – S μικροκυματικής συμβολομετρίας (Gentile 2009)*

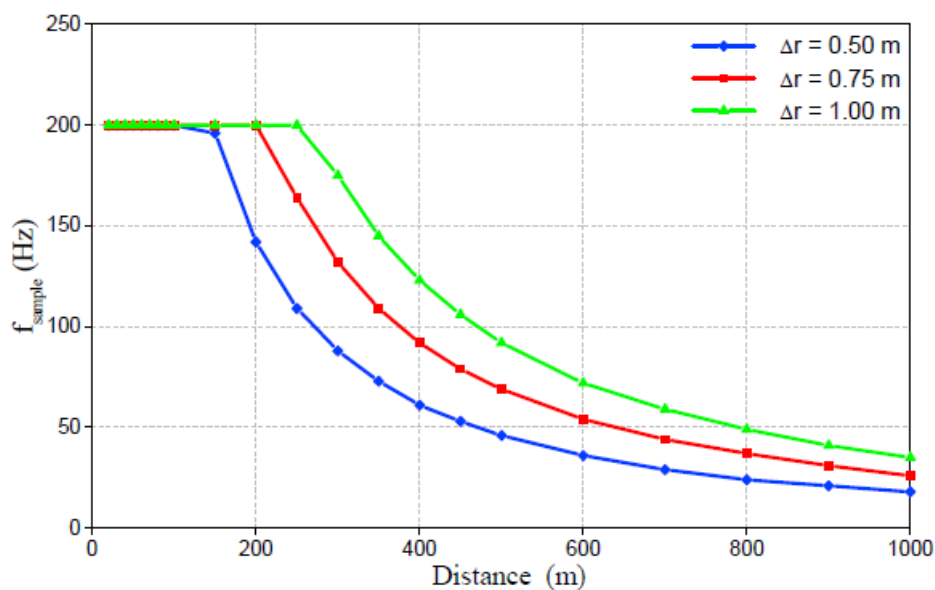
Το σύστημα ραδιοσυχνοτήτων εκπέμπει στη κεντρική συχνότητα των 16.75 GHz με μέγιστο εύρος ζώνης τα 300 MHz; Επομένως το ραντάρ κατηγοριοποιείται ως Ku-band σύμφωνα με το πρότυπο IEEE Standard 521-1984 (Skolnik 1990). Ο αισθητήρας συνδέεται με μονάδα ελέγχου Η/Υ μέσω θύρας USB 2.0; η μονάδα ελέγχου Η/Υ ενσωματώνει συγκεκριμένο λογισμικό για την διαχείριση του συστήματος και τον καθορισμό των παραμέτρων της συλλογής των δεδομένων, για την διαχείριση και την αποθήκευση των μετρήσεων και για την απεικόνιση των μετατοπίσεων σε πραγματικό χρόνο.

Η μονάδα τροφοδοσία αποτελείται από συστοιχία ηλεκτρικών στηλών 12V και μπορεί να τροφοδοτεί το σύστημα για 5-6 h.

Το σύστημα Image By Interferometric Survey ή IBIS έχει σχεδιαστεί ώστε:

- Να δίνει ελάχιστη ανάλυση απόστασης ίση με 0,5 m, ώστε δύο στόχοι να μπορούν να ανιχνευθούν ανεξάρτητα αρκεί να απέχουν απόσταση μεγαλύτερη ή ίση από 0,5 m.
- Η μέγιστη συχνότητα δειγματοληψίας κάθε σεναρίου καθορίζεται στα 200 Hz, η οποία είναι ικανή για την δειγματοληψία των σημάτων μετατόπισης η ενέργεια των οποίων βρίσκεται σε ένα εύρος συχνοτήτων από 0 – 20 Hz για μεγάλες κατασκευές. Αντίστοιχα, ένα διάστημα δειγματοληψίας =  $1/200 = 0,0005$  s είναι κατάλληλο για την συλλογή και την ανάλυση των σημάτων.

Η εξάρτηση της συχνότητας δειγματοληψίας σε σχέση με την μέγιστη απόσταση παρουσιάζεται στο Σχήμα 18 για τρεις διαφορετικές αναλύσεις της απόστασης. Από το παραπάνω σχήμα φαίνεται ότι η για ανάλυση απόστασης 0,5 m, η συχνότητα δειγματοληψίας μειώνεται για αποστάσεις μεγαλύτερες των 150 m, ενώ για ανάλυση 1 m η συχνότητα δειγματοληψίας μειώνεται για αποστάσεις μεγαλύτερες από 300 m και φθάνει στα 35 Hz για απόσταση 1000 m.



**Σχήμα 18.** Συχνότητα δειγματοληψίας σε σχέση με την μέγιστη μετρούμενη απόσταση (Gentile 2009)

## 2.5 Σύγκριση με άλλα συστήματα

Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της επίγειας συμβολομετρίας μικροκυματικής ακτινοβολίας σε σχέση με άλλες παραδοσιακές τεχνικές (επιταχυνσιόμετρα, κλισίμετρα, κ.α.) συνοψίζονται ως εξής:

### Πλεονεκτήματα

- Παρακολουθεί την ταλάντωση μιας κατασκευής εξ' απόστασεως 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 επιλεγεί 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.
- 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.
- Παρουσιάζει ακρίβεια μετακινήσεων έως 1/10 mm.
- Η εγκατάσταση του απαιτεί περιορισμένο χρόνο.

### Μειονεκτήματα

- Σχετικές μετατοπίσεις μόνο σε μία διεύθυνση (ακτινικά)
- Αδυναμία ανίχνευσης πολλαπλών στόχων στην ίδια απόσταση από τον αισθητήρα
- Το κόστος είναι πολύ υψηλό

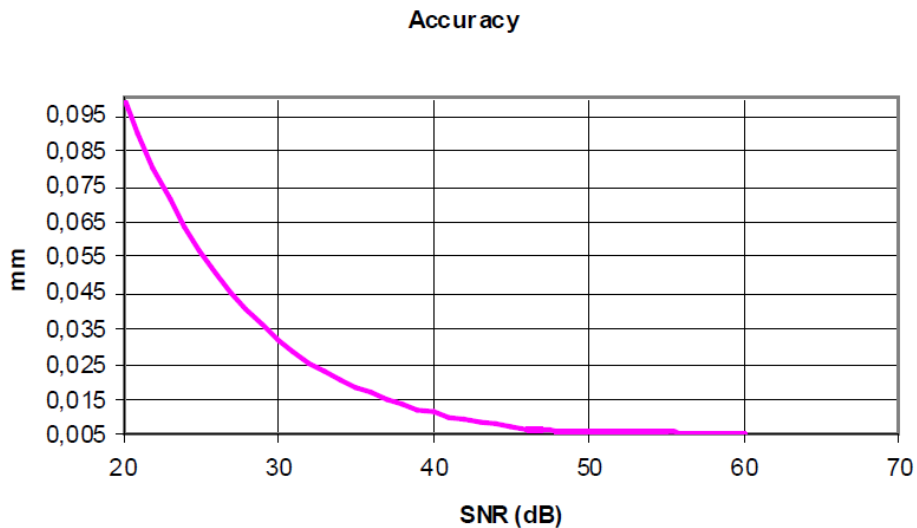
Η δυνατότητα απομακρυσμένης παρακολούθησης είναι ένα σημαντικό πλεονέκτημα σε σχέση με τα παραδοσιακά συστήματα τα οποία απαιτούν την πρόσβαση στην υπό εξέταση κατασκευή. Με μέγιστη εμβέλεια 1 km ακόμα και δυσπρόσιτα σημεία των κατασκευών όπως ψηλοί πύργοι μπορούν να παρακολουθούνται. Επίσης, λόγω της χρήσης ηλεκτρομαγνητικών

μικροκυμάτων η παρακολούθηση μπορεί να διενεργείται κατά την διάρκεια της νύχτας αλλά και σε περιπτώσεις μειωμένης ορατότητας λόγω ομίχλης ή συννεφιάς.

Σε αντίθεση με τα περισσότερα παραδοσιακά συστήματα το IBIS – S παρέχει και υψηλή ακρίβεια και υψηλή χωρική ανάλυση. Επιπλέον λόγω υψηλού κόστους δεν είναι πάντα εφικτή η παρακολούθηση όλης της κατασκευής με υψηλής ακρίβειας εξοπλισμό. Αντίθετα με το σύστημα IBIS – S μπορούν να παρακολουθούνται οι επιφανειακές μετατοπίσεις όλης της κατασκευής με ακρίβεια. Η μέγιστη ακρίβεια που μπορεί να επιτευχθεί καθορίζεται από τον σηματοθορυβικό λόγο (signal to noise ratio – SNR) του στόχου

$$\sigma_{\Delta\varphi} = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot SNR}} \quad (13)$$

Αντίστοιχα, η μέγιστη ακρίβεια σε mm συναρτήσκει του σηματοθορυβικού λόγου δίνεται στο Σχήμα . Ο σηματοθορυβικός λόγος εξαρτάται από την ανακλαστικότητα του στόχου και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Σε περίπτωση που υπάρχουν σημεία στην υπό εξέταση κατασκευή με μικρή ανακλαστικότητα, μπορούν να τοποθετηθούν παθητικά συστήματα ανάκλασης, αν και αυτό προϋποθέτει πρόσβαση στην κατασκευή. Ο πιο περιοριστικός παράγοντας για την ακρίβεια είναι οι ατμοσφαιρικές συνθήκες. Η επίδραση δεν είναι μεγάλη όταν πραγματοποιούνται δυναμικές μετρήσεις σε σχετικά κοντινές αποστάσεις, αφού συνήθως τα χρονικά διαστήματα για την υλοποίηση των σεναρίων είναι μικρά, συνήθως μικρότερα των 10 min και η συχνότητα μεταβολής των ατμοσφαιρικών συνθηκών πολύ μικρότερη από την συχνότητα των μεταβολών των κατασκευών. Ωστόσο στη περίπτωση στατικών μετρήσεων οι οποίες διαρκούν συνήθως για μεγάλες χρονικές περιόδους οι περιβαλλοντικές συνθήκες επηρεάζουν σημαντικά τις μετρήσεις των σεναρίων. Σε αυτή τη περίπτωση η επίδραση των περιβαλλοντικών συνθηκών είναι σημαντική και πρέπει να αντισταθμιστεί είτε μετρώντας τις ατμοσφαιρικές συνθήκες είτε μετρώντας κάποια σταθερά σημεία όπως είδαμε στις προηγούμενες παραγράφους.



*Σχήμα 19. Μέγιστη ακρίβεια σε χιλιοστά (mm) συναρτήσει του σηματοθορυβικού λόγου (IDS 2010)*

Ένα μειονέκτημα του συστήματος IBIS είναι ο περιορισμός παρακολούθησης των μετατοπίσεων σε μια διάσταση (ακτινική). Επομένως για τον υπολογισμό των κατακόρυφων ή οριζόντιων μετατοπίσεων θα πρέπει να γνωρίζουμε ή να υποθέσουμε κάποια γεωμετρικά στοιχεία της υπό εξέταση κατασκευής. Επίσης το σύστημα IBIS – S διαθέτει μόνο ακτινική ανάλυση και επομένως στόχοι στην ίδια απόσταση αντιστοιχίζονται στην ίδια διαμέριση (Σχήμα ).

### 3. ΜΕΘΟΔΟΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗΣ ΧΩΡΟΣΤΑΘΜΗΣΗΣ

Η τεχνική της γεωμετρικής χωροστάθμησης ανήκει σε μια ευρύτερη κατηγορία μεθόδων υψομετρίας. Η υψομετρία είναι η διαδικασία υπολογισμού του υψομέτρου ενός σημείου στην επιφάνεια της γης ή της υψομετρικής διαφοράς μεταξύ δύο σημείων. Στη πρώτη περίπτωση υπολογίζουμε την κατακόρυφη απόσταση από την επιφάνεια αναφοράς που λαμβάνεται ως η μέση στάθμη της θάλασσας και το υψόμετρο ονομάζεται απόλυτο υψόμετρο. Στη δεύτερη περίπτωση υπολογίζουμε το σχετικό υψόμετρο το οποίο είναι η υψομετρική διαφορά του υπό εξέταση σημείου από ένα σημείο υψομετρικής αναφοράς.

Για τον υπολογισμό του σχετικού υψομέτρου, της σχετικής υψομετρικής διαφοράς δύο σημείων έχουν αναπτυχθεί διάφορες μεθοδολογίες, μεταξύ αυτών οι κυριότερες είναι (Παναγιωτόπουλος 2001):

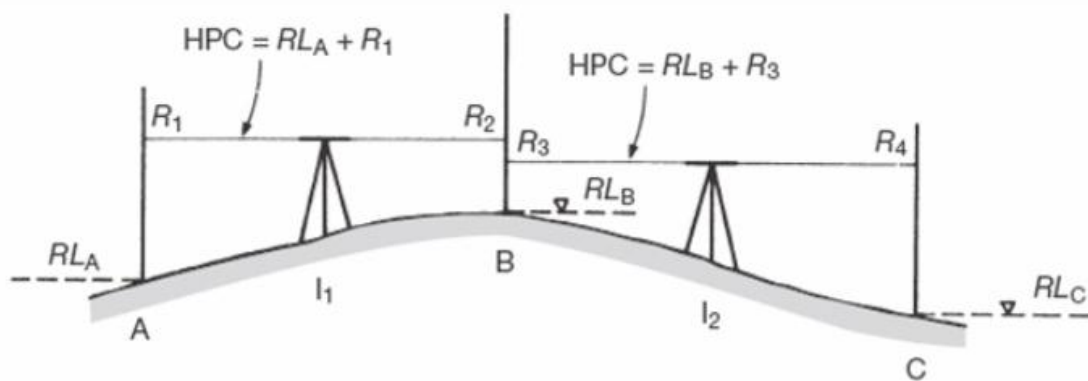
Η *Γεωμετρική χωροστάθμηση*, η οποία είναι μια μέθοδος άμεσου προσδιορισμού του σχετικού υψομέτρου που βασίζεται σε απλές γεωμετρικές σχέσεις και εκτελείται χρησιμοποιώντας ειδικό τοπογραφικό εξοπλισμό. Η ακρίβεια της μέτρησης εξαρτάται από τον εξοπλισμό, την μορφολογία του εδάφους και τις αποστάσεις και κυμαίνεται μεταξύ 0,5 – 10 mm/km. Η μέθοδος θα αναλυθεί περισσότερο στις επόμενες ενότητες.

Η *Τριγωνομετρική χωροστάθμηση*, η οποία είναι μια μέθοδος έμμεσου προσδιορισμού του σχετικού υψομέτρου που βασίζεται σε σύνθετες γεωμετρικές σχέσεις τριγώνων και εκτελείται χρησιμοποιώντας ένα ταχύμετρο. Η ακρίβεια της μέτρησης είναι της τάξης των δέκα (10) cm.

Η *Βαρυτική χωροστάθμηση*, η οποία είναι μια μέθοδος έμμεσου προσδιορισμού του σχετικού υψομέτρου που βασίζεται στην μεταβολή της ατμοσφαιρικής πίεσης με το ύψος και εκτελείται χρησιμοποιώντας ένα βαρόμετρο. Η ακρίβεια της μέτρησης είναι της τάξης των 100 m.

### 3.1 Περιγραφή της μεθόδου

Για την εκτέλεση της γεωμετρικής χωροστάθμησης απαιτείται τοπογραφικός εξοπλισμός και συγκεκριμένα ένας χωροβάτης με τρίποδα και σταδίες. Ο χωροβάτης χρησιμοποιείται για την οριζοντίωση της οπτικής γραμμής μεταξύ των δύο σημείων μέτρησης, ενώ οι σταδίες για τον υπολογισμό των σχετικών κατακόρυφων αποστάσεων. Κατά την γεωμετρική χωροστάθμηση υπολογίζουμε την υψομετρική διαφορά μεταξύ ενός σημείου αναφοράς και του υπό εξέταση σημείου. Αφού το υψόμετρο του σημείου αφετηρίας είναι γνωστό ή προκαθορισμένο τότε το υψόμετρο του υπό εξέταση σημείου μπορεί να υπολογιστεί.



Σχήμα 20. Γεωμετρική χωροστάθμηση

Έστω το σημείο αναφοράς  $A$  με γνωστό υψόμετρο  $RL_A$  και θέλουμε να υπολογίσουμε τα υψόμετρα στα σημεία  $B$  ( $RL_B$ ),  $C$  ( $RL_C$ ) (Σχήμα 0).

Τοποθετούμε τον χωροβάτη στο σημείο  $I_1$  και την σταδιά στο σημείο  $A$ . Σκοπεύουμε με τον χωροβάτη την σταδιά και λαμβάνουμε την μέτρηση  $R_1$ . Η φορά της μέτρησης ορίζεται από το σημείο  $A$  (αφετηρία) προς το σημείο  $B$  και για αυτό η μέτρηση αυτή ονομάζεται και οπισθοσκόπευση. Αφού το υψόμετρο στο σημείο  $A$  είναι γνωστό, τότε το υψόμετρο της γραμμής σκόπευσης στο  $L_1$  είναι

$$HPC \text{ at } L1 = RL_A + R_1 \quad (14)$$

Επαναλαμβάνουμε την διαδικασία για το σημείο  $B$  και λαμβάνουμε την μέτρηση  $R_2$  (εμπροσθοσκόπευση). Το υψόμετρο της γραμμής σκόπευσης στο  $L_1$  μπορεί να γραφεί και ως



$$HPC \text{ at } L1 = RL_B + R_2 \quad (15)$$

Από τις σχέσεις (14) και (15) και λαμβάνουμε το υψόμετρο στο σημείο B ως

$$RL_B = RL_A + (R_1 - R_2) \quad (16)$$

Αν το σημείο A βρίσκεται χαμηλότερα από το σημείο B τότε η ένδειξη  $R_1$  θα είναι μεγαλύτερη από την  $R_2$  και η διαφορά  $(R_1 - R_2)$  θα είναι θετική.

Η παραπάνω διαδικασία ονομάζεται και *απλή χωροστάθμιση*. Αν θέλαμε να μετρήσουμε το υψόμετρο στο σημείο C τότε αν υποθέσουμε ότι η απόσταση είναι μεγάλη μεταξύ του σημείου αναφοράς A και του C θα χρησιμοποιούσαμε την μέθοδο της *χωροσταθμικής όδευσης*.

Ο χωροβάτης τοποθετείται στην θέση  $I_2$  και η οπισθοσκόπευση γίνεται στο σημείο B ενώ η εμπροσθοσκόπευση στο σημείο C. Αν  $R_3$  και  $R_4$  είναι οι αντίστοιχες μετρήσεις τότε

$$RL_C = RL_B + (R_3 - R_4) \quad (16)$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (15) και (16)

$$RL_C = RL_A + (R_1 - R_2) + (R_3 - R_4) \quad (17a)$$

ή

$$RL_C = RL_A + (R_1 + R_3) - (R_2 + R_4) \quad (17b)$$

Και γενικότερα με την μέθοδο της χωροσταθμικής όδευσης για κάθε σημείο K με  $k$  ενδιάμεσες μετρήσεις

$$RL_K = RL_R + \sum_{n=1}^k R_k^O - \sum_{n=1}^k R_k^E \quad (18)$$

Όπου

$RL_K$  : το υψόμετρο του σημείου  $K$

$RL_R$  : το υψόμετρο του σημείου αναφοράς  $R$

$R_k^O$  : η ένδειξη της οπισθοσκόπευσης κατά την  $k$  μέτρηση

$R_k^E$  : η ένδειξη της εμπροσθοσκόπευσης κατά την  $k$  μέτρηση

## 3.2 Εξοπλισμός

Ο βασικός εξοπλισμός για την εκτέλεση της γεωμετρική χωροστάθμησης είναι ο χωροβάτης και η σταδία.

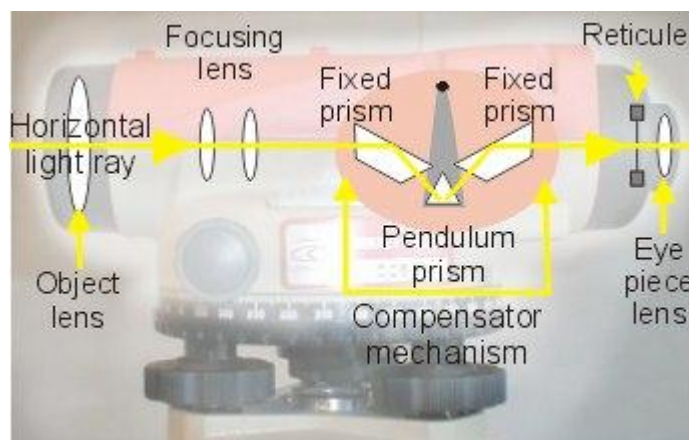
Το κυρίως όργανο αποτελείται από την βάση, το τηλεσκόπιο και την αεροστάθμη (Σχήμα 21). Στους παλιού τύπου οπτικούς χωροβάτες η οριζοντίωση πραγματοποιείται με τον ίδιο τρόπο που πραγματοποιείται και στον θεοδόλιχο, ανεβοκατεβάζοντας ένα μικρομετρικό κοχλία, μέχρι η φυσαλίδα να μπει μέσα στην σφαιρική αεροστάθμη.



*Σχήμα 21. Ηλεκτρονικός χωροβάτης (Sprinter 50) (<http://www.conmet.gr/psifiakoi-xorobates/sprinter>)*

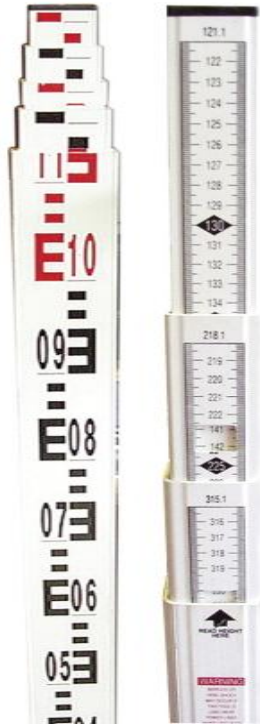
Στους σύγχρονους οπτικούς ή ψηφιακούς χωροβάτες υπάρχει σύστημα ισοσταθμιστή για την αυτόματη οριζοντίωση του σκοπευτικού άξονα του χωροβάτη. Οι αυτόματοι χωροβάτες

ενσωματώνουν ένα μηχανισμό ισοστάθμισης ο οποίος χρησιμοποιεί ένα συνδυασμό σταθερών πρισμάτων ή κάτοπτρων και ένα κινούμενο πρίσμα αναρτημένο σε ένα εκκρεμές το οποίο και δίνει την οριζόντια αναφορά στο σύστημα. Ο ισοσταθμιστής διασφαλίζει ότι η ακτίνα σκόπευσης είναι οριζόντια. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι κατασκευής αυτών των ισοσταθμιστών. Ωστόσο το πιο σημαντικό κομμάτι είναι ο μηχανισμός απόσβεσης ο οποίος αποτρέπει το εκκρεμές να κινείται όταν το όργανο μεταφέρεται. Αν η απόσβεση είναι πολύ μικρή τότε το όργανο θα είναι ευαίσθητο στις περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως για παράδειγμα στο άνεμο, ενώ αν η απόσβεση είναι πολύ μεγάλη τότε μειώνεται η ακρίβεια του οργάνου αφού το εκκρεμές δεν θα μπορεί να διορθώνει μικρές κινήσεις του οργάνου.



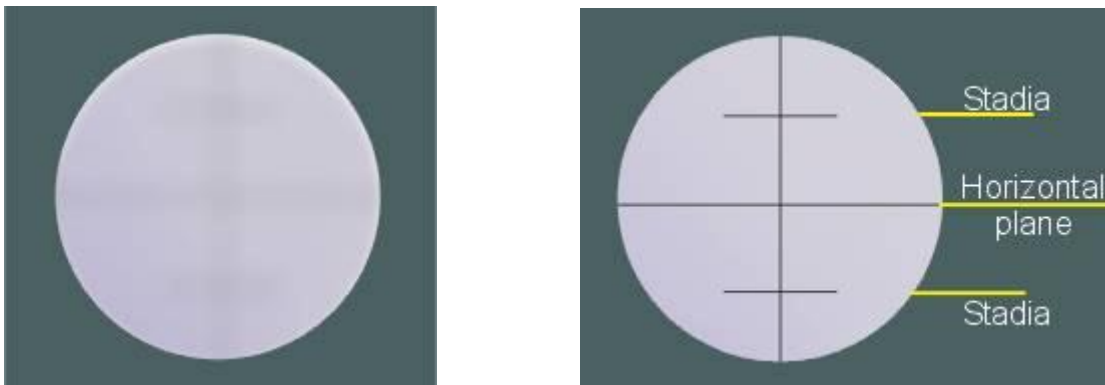
**Σχήμα 22.** Σύστημα ισοστάθμισης αυτόματου χωροβάτη (<http://www.levelling.uhi.ac.uk/index.html>)

Οι σταδίες κατασκευάζονται από ξύλο ή από αλουμίνιο. Οι ξύλινες δεν χρησιμοποιούνται πλέον στη πράξη λόγω της ευαισθησίας τους στις καιρικές συνθήκες. Έχουν διατομή ορθογωνική ή- σε σχήμα T ή διπλού T. Το μήκος τους ποικίλει σε 3, 4 ή και 5 m, το πλάτος φθάνει μέχρι τα 12 cm και το πάχος τους 2 μέχρι 3 cm. Μπορεί να είναι ενιαίες ή πτυσσόμενες. Οι σταδίες έχουν ενσωματωμένη μορφή με διπλό E όπως φαίνεται και στο Σχήμα 23. Είναι σχεδιασμένο ώστε να επιτρέπει την εύκολη ανάγνωση της κλίμακας μέσα από το τηλεσκόπιο. Η αριθμηση είναι σε μέτρα και εκατοστά και επιτρέπει την εκτίμηση των υψομέτρων στο χιλιοστό. Κάθε ένα μέτρο εναλλάσσονται τα χρώματα της αριθμησης, συνήθως μαύρα και κόκκινα σε λευκό φόντο. Η βασική κλίμακα είναι στα 100 mm και αποτυπώνεται με αριθμούς, ενώ οι υποδιαίρέσεις σε διαστήματα των 10mm τα οποία αποτυπώνονται με χρωματιστά τετράγωνα. Τα 50 πρώτα χιλιοστά κάθε βασικής διαμέρισης των 100 mm ενώνεται με ένα μοτίβο E το οποίο κάνει πιο εύκολη την ανάγνωση της μέτρησης.



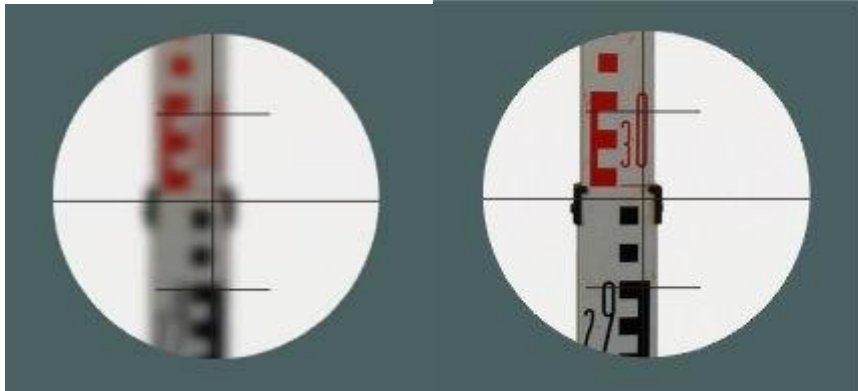
*Σχήμα 23. Πτυσσόμενες σταδίες αλουμινίου*

Το διάφραγμα είναι ένα γυάλινο εξάρτημα στο οποίο είναι χαραγμένες λεπτές γραμμές (σταυρόνημα) προκειμένου να προκύψει η οριζόντια αναφορά και τα σημεία της σταδίας για τον υπολογισμό της απόστασης. Έχοντας εστιάσει τον μηχανισμό παρατήρησης, μπορούμε να δούμε μέσα από το τηλεσκόπιο μια κεντρική οριζόντια γραμμή (γραμμή οπτικού πεδίου) η οποία αναφέρεται στο οριζόντιο επίπεδο και μέσω της οποίας θα γίνει η μέτρηση των ενδείξεων (Σχήμα 24). Οι δύο μικρότερες οριζόντιες γραμμές χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της απόστασης της σταδίας από τον παρατηρητή. Η απόσταση συνήθως προκύπτει ως το γινόμενο της διαφοράς των δύο ενδείξεων των νημάτων επί ένα σταθερό συντελεστή. π.χ. 100



*Σχήμα 24. Εστίαση μηχανισμού παρατήρησης. Μη εστιασμένος μηχανισμός (αριστερά). Ορθά εστιασμένος μηχανισμός παρατήρησης (δεξιά). ([http://www.levelling.uhi.ac.uk/tutorial1\\_8.html](http://www.levelling.uhi.ac.uk/tutorial1_8.html))*

Εφόσον εστιαστεί ο μηχανισμός παρατήρησης, εστιάζεται το τηλεσκόπιο στην σταδία χρησιμοποιώντας κοχλίες. Όταν εστιαστεί η οριζόντια γραμμή του σταυρονήματος στη σταδία μπορούμε να πάρουμε την μέτρηση του υψομέτρου του αντίστοιχου σημείου (Σχήμα ).



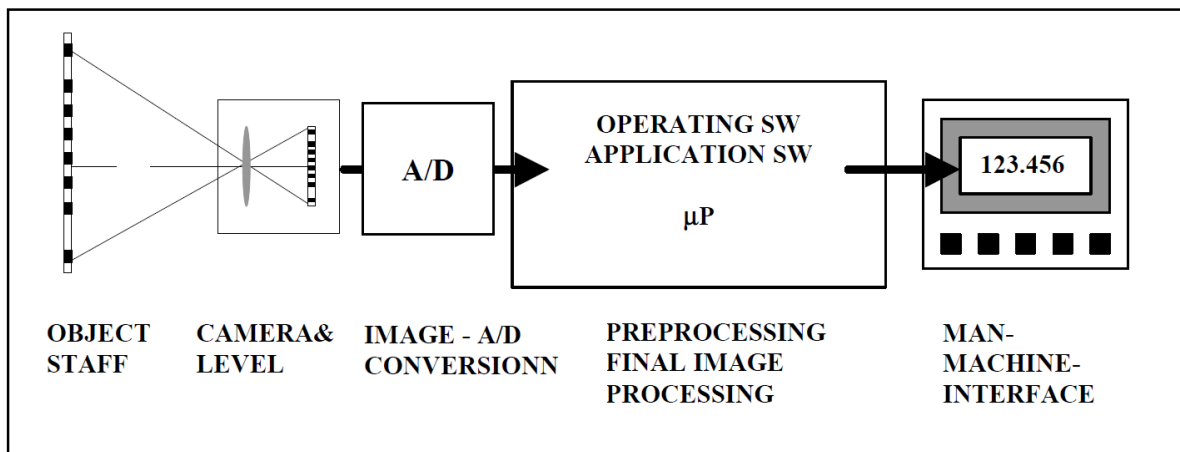
*Σχήμα 25. Εστίαση τηλεσκοπίου στη σταδία. Μη εστιασμένο τηλεσκόπιο στη σταδία (αριστερά). Ορθά εστιασμένο τηλεσκόπιο στη σταδία (δεξιά). ([http://www.levelling.uhi.ac.uk/tutorial1\\_8.html](http://www.levelling.uhi.ac.uk/tutorial1_8.html))*

### **3.3 Ο Ψηφιακός Χωροβάτης Leica DNA03**

Οι σύγχρονοι ψηφιακοί χωροβάτες, είναι ένας συνδυασμός αυτόματου οπτικού χωροβάτη και ψηφιακής κάμερας. Οι ψηφιακοί χωροβάτες χρησιμοποιούν ειδικές σταδιές γραμμωτού κώδικα, αισθητήρες εικόνας (semiconductor charge-coupled devices - CCD) και μικροπεξεργαστές. Οι αισθητήρες εικόνας μετατρέπουν την οπτική εικόνα σε ψηφιακή και εν συνεχεία εξειδικευμένοι αλγόριθμοι επεξεργασίας εικόνας, που στηρίζονται στον μετασχηματισμό Fourier και η ανάλυση συσχέτισης χρησιμοποιούνται προκειμένου να «αντιστοιχηθεί» η ψηφιακή εικόνα που έχει ληφθεί από την κωδικοποιημένη σταδία στο υψόμετρο.



*Σχήμα 26. Ψηφιακός χωροβάτης (Leica DNA03), τρίποδο και σταδίες (αναλογική και ψηφιακή)*  
[www.nokaut.pl](http://www.nokaut.pl)



*Σχήμα 27. Λήψη και επεξεργασία εικόνας με ψηφιακούς χωροβάτες*

Οι ψηφιακοί χωροβάτες προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των παραδοσιακών οπτικών δεδομένου ότι εξαλείφουν σφάλμα ανάγνωσης της ένδειξης, δεν χρειάζεται η καταγραφή των μετρήσεων μιας και αυτή μπορεί να γίνει ψηφιακά και επομένως μειώνουν σημαντικά και τον χρόνο διεξαγωγής της μέτρησης. Επιπλέον αυξάνουν την επιτρεπόμενη απόσταση χωροβάτη στόχου και την ακρίβεια.

Τέλος, ειδική κατηγορία χωροβατών είναι οι χωροβάτες laser οι οποίοι έχουν την δυνατότητα γεωμετρικής χωροστάθμησης πολλαπλών σημείων στην ακτίνα εμβέλειας του laser.

Για τις ανάγκες της συγκεκριμένης εργασίας χρησιμοποιείται ο ψηφιακός χωροβάτης Leica DNA03 της Leica Geosystems AG (Σχήμα 26). 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.

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  $n$  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.

Συγκεκριμένα για τον ψηφιακό χωροβάτη της Leica που χρησιμοποιήθηκε και για τα πειράματα που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία η ακρίβεια αυξάνεται σε 0.3 mm ανά χιλιόμετρο ενώ η μέγιστη απόσταση ηλεκτρονικής μέτρησης διαμορφώνεται στα 110 μέτρα. Να σημειωθεί ότι οι παραδοσιακοί οπτικοί χωροβάτες έχουν ακρίβεια μέχρι 1 mm και η απόσταση δεν πρέπει να ξεπερνάει τα 25 – 30 m. Στα μειονεκτήματα των ψηφιακών χωροβατών είναι το αυξημένο κόστος τους, η ανάγκη για τροφοδοσία ρεύματος και η επίδραση των περιβαλλοντικών συνθηκών όπως η ομίχλη και γενικότερα οι συνθήκες φωτισμού.

### **3.4 Διαδικασία διεξαγωγής των μετρήσεων**

Η διαδικασία εκτέλεσης της γεωμετρικής χωροστάθμησης έχει ως εξής:

- Καθορίζονται τα σημεία αναφοράς στα οποία προσδίδεται ένα συγκεκριμένο υψόμετρο γνωστά ως Reper.
- Τοποθετείται ο χωροβάτης μεταξύ του σημείου αναφοράς και του προς μέτρηση σημείου. Κατά το δυνατόν τοποθετείται πάνω στη μεσοκάθετο του ευθυγράμμου τμήματος που ενώνει τα δύο σημεία προκειμένου να ελαχιστοποιήσουμε ή και να απαλείψουμε τα διάφορα σφάλματα (τα σφάλματα από τις δυο σκοπεύσεις αλληλοεξουδετερώνονται )

- Γίνεται οριζοντίωση του χωροβάτη χρησιμοποιώντας την σφαιρική αεροστάθμη ή μέσω του ισοσταθμιστή (για αυτόματους χωροβάτες).
- Τοποθετείται κατακόρυφα η σταδία πάνω από το σημείο αναφοράς.
- Ο παρατηρητής στο όργανο σκοπεύει τη σταδία και στη συνέχεια κοιτώντας από το τηλεσκόπιο του χωροβάτη εστιάζει το σταυρόνημα στη σταδία. Εφόσον η σταδία και το κέντρο του σταυρονήματος ταυτίζονται λαμβάνεται και καταγράφεται η μέτρηση.
- Όταν όλα τα σημεία (refer και άλλα χαρακτηριστικά σημεία) βρίσκονται σε ακτίνα μικρή που για τους περισσότερους χωροβάτες είναι τα 60-70 m τότε κάνουμε απλή χωροστάθμιση. Όταν τα σημεία μας ευρίσκονται σε μεγαλύτερες αποστάσεις τότε εκτελούμε την διαδικασία της χωροσταθμικής όδευσης

### Πηγές σφάλματος

Τρεις είναι οι βασικές πηγές σφαλμάτων κατά την μέτρηση του υψομετρικών διαφορών με την μέθοδο της γεωμετρικής χωροστάθμισης:

- Σφάλματα στον εξοπλισμό
- Σφάλματα στο σημείο μέτρησης
- Η επίδραση της καμπυλότητας (curvature) και της διάθλασης (refraction)

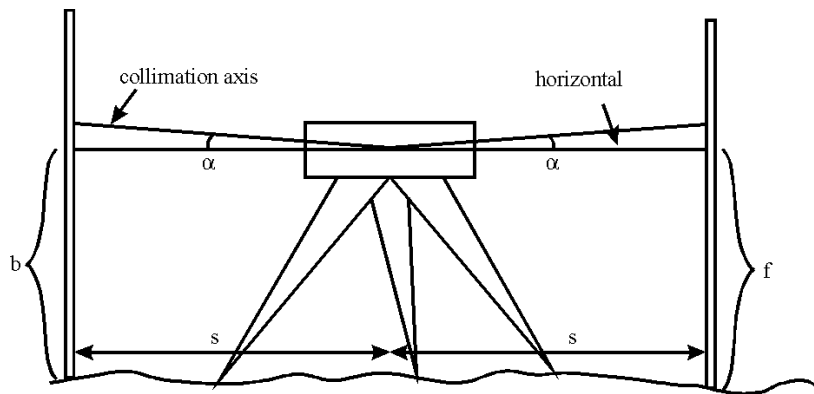
Τα σημαντικότερα σφάλματα κατά την γεωμετρική χωροστάθμιση είναι:

- Σφάλμα οπτικού άξονα χωροβάτη (Collimation error)

Ένα από τα σημαντικότερα σφάλματα στη γεωμετρική χωροστάθμιση είναι το σφάλμα οριζοντίωσης του οπτικού άξονα του τηλεσκοπίου του χωροβάτη. Το σφάλμα αυτό προκύπτει όταν ο χωροβάτης είναι οριζοντιωμένος αλλά ο οπτικός άξονας του τηλεσκοπίου αποκλίνει από την οριζόντια γραμμή κατά μια γωνία  $\alpha$  (Σχήμα 2). Αν η απόκλιση είναι της τάξης των  $20''$  τότε το σφάλμα για μέτρηση σε απόσταση  $s = 50\text{ m}$  είναι  $5\text{ mm}$  ( $e = s \cdot \tan(\alpha) = 50 \cdot \tan(20'') = 0.00485\text{ m}$ ). Αυτό το σφάλμα μπορεί να είναι σημαντικό όταν η απόσταση του χωροβάτη από τους στόχους κατά την οπισθοσκόπευση και την εμπροσθοσκόπευση είναι διαφορετική. Συγκεκριμένα το σφάλμα είναι ανάλογο της διαφοράς των αποστάσεων, ενώ όταν οι αποστάσεις είναι ακριβώς ίσες το σφάλμα κατά τις δύο σκοπεύσεις αλληλοεξουδετερώνεται,

$$\delta h = (b + s \cdot \tan(\alpha)) - (f + s \cdot \tan(\alpha)) = b - f \quad (19)$$





Σχήμα 28. Σφάλμα οπτικού άξονα χωροβάτη (Collimation error) (Charles – Spencer 1998)

- Σφάλμα καμπυλότητας

Σε μακρινές αποστάσεις η οριζόντια γραμμή και η γραμμή σκόπευσης του χωροβάτη θα διαφέρουν (Σχήμα 29). Ιδανικά θα ήταν επιθυμητό η γραμμή του χωροβάτη να ακολουθεί την καμπυλότητα της γης (να είναι κάθετη στη διεύθυνση της βαρύτητας). Αυτή είναι μια πιθανή πηγή σφάλματος αφού οι μετρήσεις λαμβάνονται στην ευθεία οριζόντια γραμμή στη θέση του χωροβάτη και όχι στην ιδανική γραμμή σκόπευσης. Η διαφορά μεταξύ των δύο γραμμών αναφέρεται και ως καμπυλότητα (curvature) και δίνεται από την σχέση:

$$e_c = \frac{10^3 \cdot s^2}{2R} \cong 0.0785 \cdot s^2 \quad (20)$$

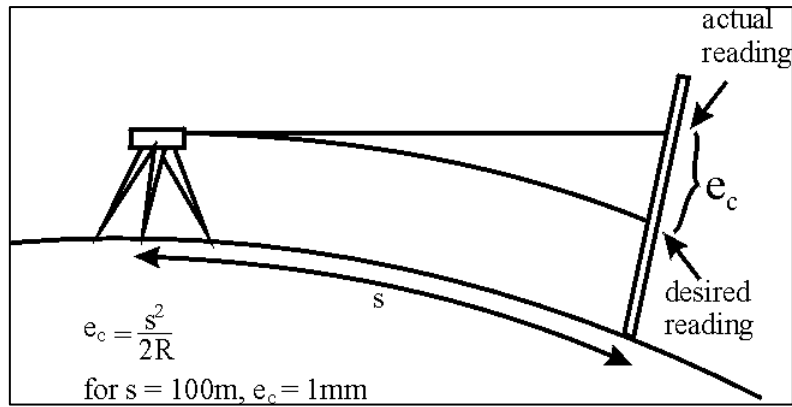
Όπου

$c$  : η καμπυλότητα σε μέτρα (m)

$s$ : η απόσταση σε χιλιόμετρα (km)

$R$ : η ακτίνα της γης σε χιλιόμετρα (km),  $\cong 6371$

Όπως προκύπτει και από την παραπάνω σχέση η διόρθωση για μια απόσταση στόχου 100 m είναι μικρότερη από 1 mm (συγκεκριμένα 0,785 mm) και στις περισσότερες περιπτώσεις αγνοείται. Σε κάθε περίπτωση αν οι αποστάσεις κατά την οπισθοσκόπευση και την εμπροσθοσκόπευση είναι ίδιες το σφάλμα κατά τις δύο σκοπεύσεις αλληλοεξουδετερώνεται.



Σχήμα 29. Σφάλμα λόγω καμπυλότητας της γης (Charles – Spencer 1998)

- Σφάλμα διάθλασης.

Η διάθλαση του φωτός είναι κυρίως συνάρτηση της ατμοσφαιρικής πίεσης και των κλίσεων της θερμοκρασίας και μπορεί να δημιουργήσει καμπύλωση του φωτός προς τα πάνω ή κάτω.

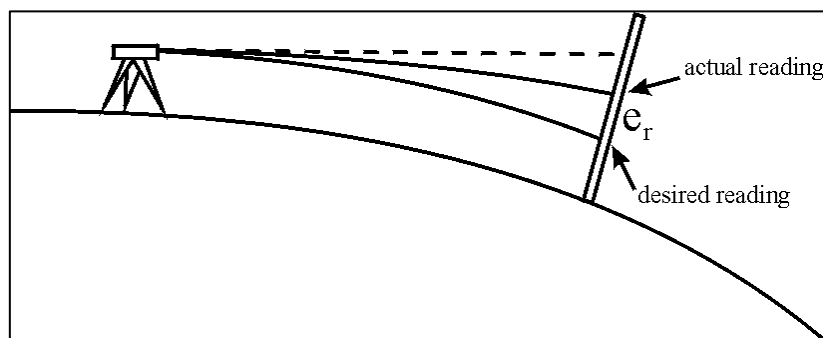
Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι κλίσεων της θερμοκρασίας  $\frac{dT}{dh}$

- Απορρόφηση. Συμβαίνει κυρίως τη νύχτα όταν το ψυχρό έδαφος απορροφάει θερμοκρασία από την ατμόσφαιρα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ατμοσφαιρική θερμοκρασία να αυξάνεται με την απόσταση από το έδαφος και η κλίση να είναι θετική,  $\frac{dT}{dh} > 0$
- Εκπομπή. Συμβαίνει κατά την διάρκεια της ημέρας, όταν το θερμό έδαφος εκπέμπει θερμοκρασία στην ατμόσφαιρά, έχοντας ως αποτέλεσμα αρνητικές κλίσεις της θερμοκρασίας,  $\frac{dT}{dh} < 0$
- Ισορροπία. Για μικρό χρονικό διάστημα το πρωί και το απόγευμα δεν υπάρχει ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ εδάφους και ατμόσφαιρας και  $\frac{dT}{dh} = 0$

Η γεωμετρική χωροστάθμιση λαμβάνει χώρα την ημέρα και επομένως επηρεάζεται από τις αρνητικές κλίσεις της θερμοκρασίας. Η αρνητική κλίση της θερμοκρασία έχει ως αποτέλεσμα την καμπύλωση του φωτός προς κάτω (κοίλη προς το έδαφος) και είναι μεγαλύτερη ως πιο κοντά στο έδαφος είναι η δέσμη του φωτός. Τα σφάλματα κοντά στο έδαφος φθάνουν τα 5mm/km. Η καμπύλωση της δέσμης του φωτός είναι μικρότερη από αυτή της καμπυλότητας της γης, και το συνδυασμένο φαινόμενο (καμπυλότητα και διάθλαση) παρουσιάζει μικρότερα σφάλματα από ότι τα σφάλματα μόνο λόγω της καμπυλότητας της γης:

$$e_r = (1 - k) \cdot 10^3 \cdot \frac{s^2}{2R} \quad (21)$$

Όπου  $k$  είναι ο συντελεστής διάθλασης και συμβολίζει το λόγο της καμπυλότητας λόγω διάθλασης σε σχέση με την καμπυλότητα της γης. Η τιμή του  $k$  κατά μέσο όρο κυμαίνεται στο 13% και επομένως η παραπάνω σχέση δίνει  $e_r \cong 0,0683 \cdot s^2$  ή για 100 m σφάλμα 6,83 mm



Σχήμα 30. Σφάλμα λόγω διάθλασης (Charles – Spencer 1998)

Άλλα γνωστά σφάλματα κατά την γεωμετρική χωροστάθμιση είναι τα ακόλουθα:

- Αντισταθμιστής (Compensator)

Στη περίπτωση των αυτόματων χωροβατών, θα πρέπει να ελεγχθεί ότι οι ενδείξεις παραμένουν σταθερές σε μικρές αλλαγές όπως παραδείγματος χάρη η ελαφριά χαλάρωση ενός κοχλία βάσης.

- Σφάλματα των Σταδίων

Θα πρέπει να ελεγχθεί αν η βάση της σταδίας έχει κάποια φθορά. Αυτές οι φθορές δεν επηρεάζουν την μέτρηση αν η ίδια σταδία χρησιμοποιηθεί κατά την οπισθοσκόπευση και την εμπροσθοσκόπευση. Εισάγονται όμως σφάλματα σε περίπτωση χρήσης διαφορετικής σταδίας. Όταν χρησιμοποιούνται πτυσσόμενες σταδίες θα πρέπει να ελεγχθεί αν η σταδία είναι πλήρως αναπτυγμένη και τα επιμέρους τμήματα είναι σταθερά

- Οριζοντίωση του χωροβάτη

Η χρήση των μικρομετρικών κοχλιών για την οριζοντιοποίηση του χωροβάτη μπορεί να εισάγει σφάλματα. Για τους μη αυτόματους χωροβάτες θα πρέπει να ελεγχθεί η αεροστάθμη πριν και μετά την μέτρηση.

- Σφάλματα εισαγωγής των μετρήσεων.

Πολλά σφάλματα μπορούν να δημιουργηθούν κατά την καταγραφή των μετρήσεων. Συνίσταται η άμεση καταγραφή των μετρήσεων σε ειδικούς πίνακες χωροστάθμησης ακριβώς μετά την λήψη της μέτρησης

- Περιβαλλοντικές συνθήκες

Σε συνθήκες ισχυρού ανέμου η οπτική γραμμή του χωροβάτη συνεχώς κινείται ενώ συνήθως είναι δύσκολο να κρατηθούν σταθερές οι σταδιές. Επομένως είναι σχεδόν αδύνατον να ληφθούν αξιόπιστες μετρήσεις και θα πρέπει να αποφευχθεί η μέτρηση σε τέτοιες συνθήκες.

- Σημεία αλλαγής και χειρισμός οργάνων

Τα σημεία αλλαγής θα πρέπει να επιλεγθούν προσεκτικά και να χρησιμοποιηθούν σκληρές επιφάνειες ώστε να διασφαλιστεί ότι οι βάσεις των σταδίων παραμένουν στο ίδιο ύψος μεταξύ της οπισθοσκόπευσης και της εμπροσθοσκόπευσης.

Ο τρίποδας μπορεί να βυθιστεί σε μαλακά εδάφη και επομένως να αλλάξει η οπτική του γραμμή με αποτέλεσμα την εισαγωγή σφαλμάτων στις μετρήσεις. Συνίσταται η τοποθέτηση του τρίποδα σε στερεό έδαφος και η βύθιση των ποδιών του μέσα στο έδαφος. Για τους ίδιους λόγους κατά τη μέτρηση δεν πρέπει ο χειριστής να έρχεται σε επαφή με τον τρίποδα ή να ακουμπάει σε αυτόν ή στο χωροβάτη.

## 4. ΓΕΦΥΡΑ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ

Στη παρούσα ενότητα γίνεται μια σύντομη επισκόπηση της υπό εξέταση καλωδιωτής γέφυρας του Σταθμού Εξυπηρέτησης Αυτοκινήτων Παλλήνης, Αττικής Οδού ΑΕ καθώς και τα συστήματα παρακολούθησης της.

### 4.1 Καλωδιωτή Γέφυρα ΣΕΑ Παλλήνης

Στη παρούσα εργασία έγινε μελέτη των μετατοπίσεων της καλωδιωτής γέφυρας ΣΕΑ Παλλήνης. Πρόκειται για μια οδική γέφυρα με σκοπό την εξυπηρέτηση επιχειρήσεων που στεγάζονται εκατέρωθεν της Αττικής Οδού στην περιοχή της Παλλήνης (Σχήμα 31). Η γέφυρα είναι καλωδιωτή δύο πυλώνων με σύμμικτο κατάστρωμα. Ο συγκεκριμένος σχεδιασμός επιλέχθηκε μιας και δεν ήταν δυνατή η κατασκευή μεσόβαθρων λόγω της λειτουργίας της Αττικής Οδού και του Προαστιακού Σιδηρόδρομου.



*Σχήμα31. Καλωδιωτή γέφυρα ΣΕΑ Παλλήνης*

Η γέφυρα φέρει ένα άνοιγμα μήκους  $L = 55.50$  m (Σχήμα 31). Τα βασικά στοιχεία της γέφυρα είναι

*Φορέας καταστρώματος.* Ο φορέας καταστρώματος μορφώνεται ως σύμμικτη κατασκευή αποτελούμενη από:

- πλάκα καταστρώματος, σκυρόδεμα B35 ενεργού πάχους 0.20 m τοπικά αυξανόμενου σε 0.40 m
- δύο χαλύβδινες κύριες δοκούς (St 52.3 σε μεταβλητή μεταξύ τους απόσταση 13.40 ÷ 16.50 m)
- είκοσι δύο χαλύβδινες διαδοκίδες (St 52.3)

*Πυλώνας.* Ο πυλώνας συντίθεται από τους προεντεταμένους ελκυστήρες και τις χαλύβδινες αντηρίδες (S355). Στους ελκυστήρες εφαρμόζεται κεντρική προένταση με δώδεκα (12) τένοντες (διατομής  $19 \times 0.6''$  κατηγορίας 1570/1770).

*Αναρτήρες.* Το σύστημα ανάρτησης αποτελείται από τρία ζεύγη αναρτήρων:

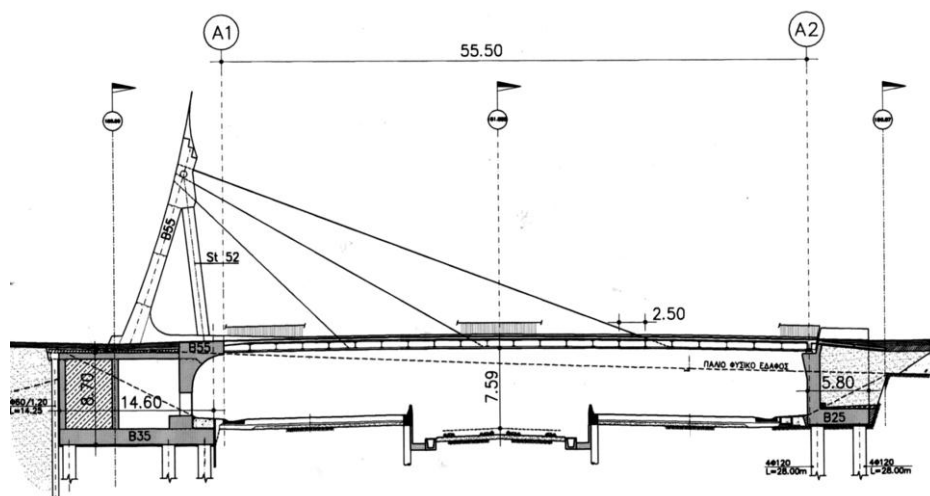
No 1 19TSR15, FGUTS = 5035 kN

No 2 42TSR15, FGUTS = 11,130 kN

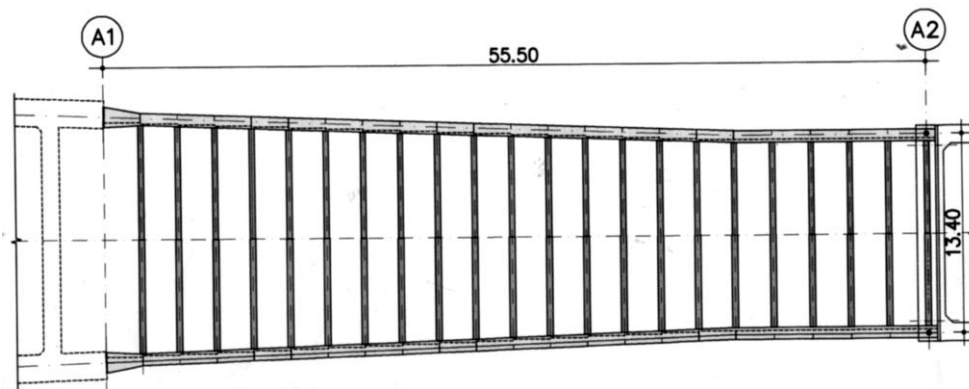
No 3 42TSR15, FGUTS = 11,130 kN

*Ακρόβαθρα.* Το ακρόβαθρο A1, στο οποίο θεμελιώνεται ο πυλώνας της γέφυρας, είναι σύνθετη κατασκευή με εσωτερικό θάλαμο ο οποίος πληρώνεται κατά το ήμισυ με σκυρόδεμα B5 (αντίβαρο) και θεμελιώνεται σε πασσάλους ( $2 \times 7 \text{ } \varnothing 120$ ,  $L = 30.00$  m). Περιλαμβάνει δε και πρόσθετους πασσάλους ( $7\varnothing 120$ ,  $L = 16.00$  m) οι οποίοι παραλαμβάνουν τις σεισμικές ανωστικές δυνάμεις (εξόλκευσης). Το ακρόβαθρο A2 είναι κλασικό, θεμελιούμενο επί πασσάλων ( $2 \times 4\varnothing 120$ ,  $L = 28.00$  m.α ακρόβαθρα)

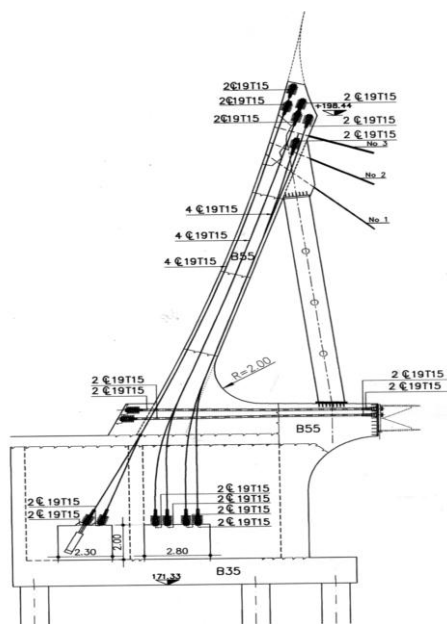
Αναλυτικά η περιγραφή της γέφυρας και του τρόπου κατασκευής της δίνεται στην από την εργασία (Σταθόπουλος 2003) από όπου και ελήφθησαν τα παραπάνω στοιχεία



**Σχήμα 32.** Κατά μήκος τομή της γέφυρας ΣΕΑ Παλλήνης (Σταθόπουλος 2003)



Σχήμα 33. Διαδοκίδωση καταστρώματος της γέφυρας ΣΕΑ Παλλήνης (Σταθόπουλος 2003)



Σχήμα 34. Ανάπτυγμα και διατομές πυλώνα της γέφυρας ΣΕΑ Παλλήνης (Σταθόπουλος 2003)

## 4.2 Προπαρασκευαστικές Εργασίες και Συλλογή δεδομένων πεδίου

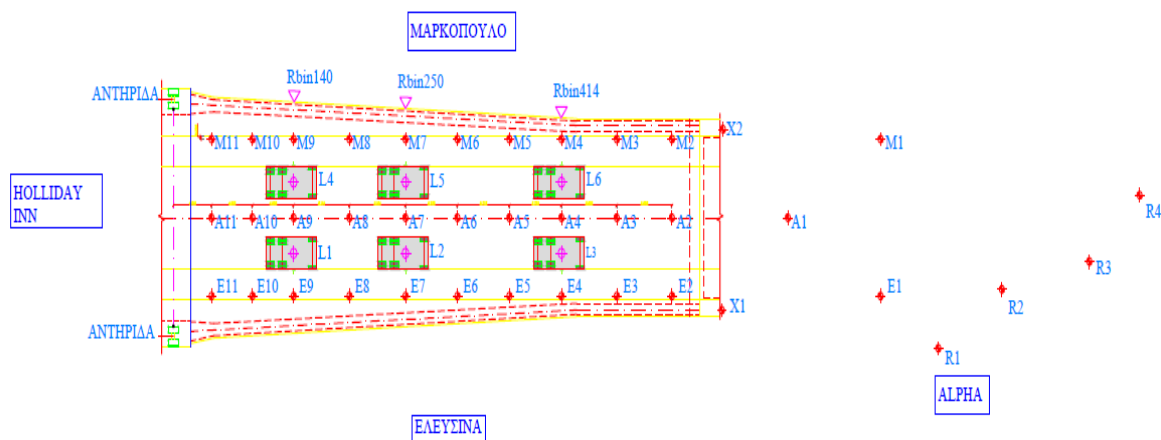
Είναι σαφές ότι η διαδικασία συλλογής των μετρήσεων αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα σημεία μιας μελέτης, έτσι ώστε το αποτέλεσμα της να μπορεί να στηριχτεί σε πλήρη, αξιόπιστα και ακριβή δεδομένα. Με βάση αυτό το γνώμονα διαμορφώνεται η διαδικασία συλλογής των μετρήσεων πεδίου για την παρακολούθηση 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 να 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.

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 των κωνικών πρισμάτων στο κατάστρωμα της γέφυρας για τη συλλογή δεδομένων. 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. Τη συγκεκριμένη ημέρα έπρεπε οι καιρικές συνθήκες να είναι κατάλληλες και να μην υπάρχουν τοπικές θερμοκρασιακές διαφορές. Συγκεκριμένα, να μην υπάρξει βροχόπτωση η οποία δυσκολεύει τις εργασίες πεδίου ή δυνατοί άνεμοι που να επηρεάζουν τη συμπεριφορά γέφυρας. Επιπλέον, επειδή η Αττική Οδός έπρεπε να τεθεί εκτός λειτουργίας και να μην διέρχονται ηλεκτρικοί συρμοί κάτω από την γέφυρα τις ώρες συλλογής των δεδομένων, οι μετρήσεις έγιναν αργά το βράδυ.

Για την εκτέλεση της γεωμετρικής χωροστάθμησης δημιουργήθηκαν χωροσταθμικές οδεύσεις 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 35).





**Σχήμα 35.** Σχηματική αναπαράσταση χωροσταθμικών σημείων (κόκκινοι κύκλοι)

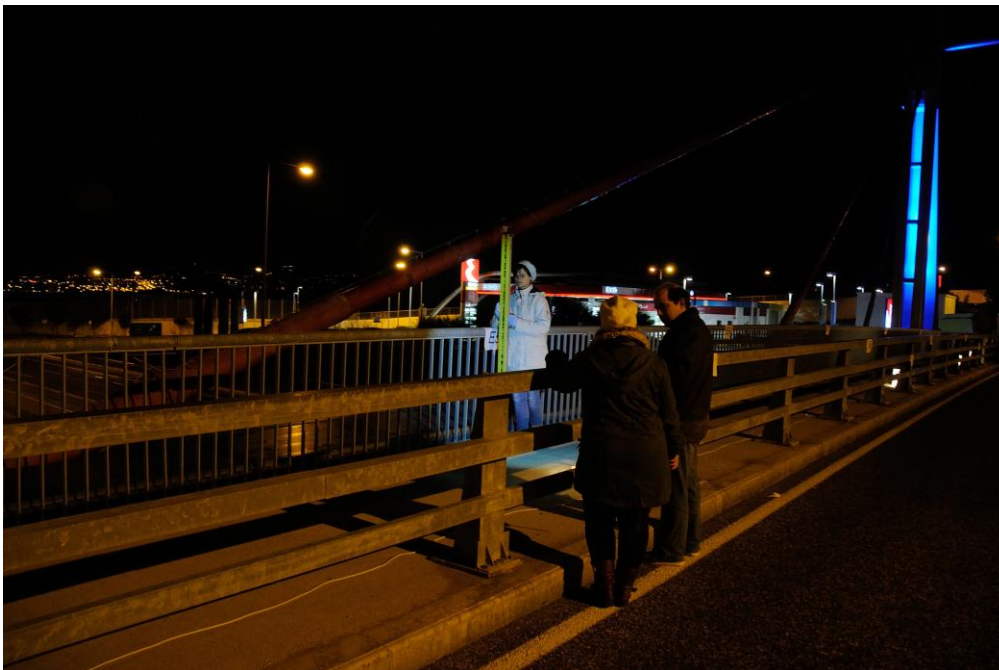
Τα χωροσταθμικά σημεία τοποθετούνται σε ισαπέχουσες αποστάσεις και διατρέχουν το κατάστρωμα στο σύνολό τους. Επομένως, ορίζονται δώδεκα χωροσταθμικά σημεία ανά άξονα (Ελευσίνα, Μαρκόπουλο, κύριος άξονας γέφυρας). Οι υψομετρικές διαφορές αυτών θα υπολογιστούν με τη βοήθεια σημείων γνωστών υψομέτρων (Réper) που είναι τα R1,R2,R3,R4. Για να οριστούν τα σημεία αυτά επί της γέφυρας χρησιμοποιούνται κατάλληλα σχεδιασμένοι ήλοι που πακτώνονται επάνω στην επιφάνεια της γέφυρας.

Όσον αφορά στη γεωμετρική χωροστάθμιση, ο χωροβάτης Leica DNA03(Σχήμα 36) με την τρίποδά του τοποθετήθηκε σε δύο διαφορετικές θέσεις της γέφυρας. Η μία θέση είναι στην παρειά προς Ελευσίνα και η άλλη στην παρειά προς Μαρκόπουλο (Σχήμα 35). Αυτό γίνεται για λόγους ορατότητας της σταδίας όταν αλλάζει θέσεις το φορτηγό όχημα.



**Σχήμα 36.** Χωροβάτης Leica DNA03 στη θέση X1 στην παρειά προς Ελευσίνα

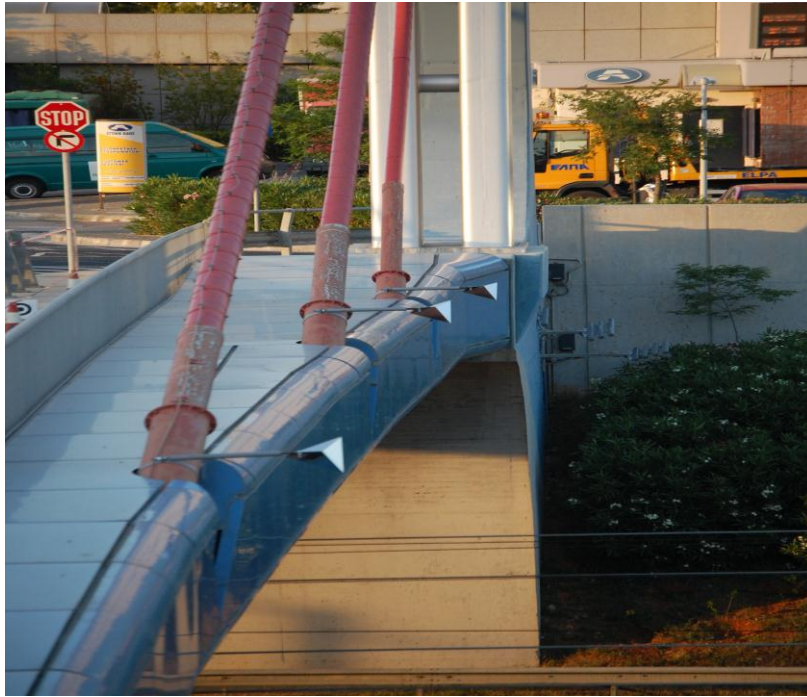
Για την πραγματοποίηση της γεωμετρικής χωροστάθμησης χρησιμοποιούνται τρεις σταδίες Invar, από συνθετικό υλικό (fiberglass), με πολύ μικρό συντελεστή θερμικής διαστολής. Στις συγκεκριμένες σταδίες, η αρίθμηση έχει αντικατασταθεί από κώδικα barcode .Αξίζει να αναφερθεί ότι για την εκτέλεση της χωροστάθμησης, 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 37).



*Σχήμα 37. Φωτισμός της σταδίας κατά τη διαδικασία της χωροστάθμησης*

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. Η καταγραφή του χρόνου πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια δέκτη GPS χειρός.

Για την μέθοδο GBMI τοποθετήθηκαν με τη βοήθεια συνεργείου ειδικά κωνικά πρίσματα πάνω στο κατάστρωμα τις γέφυρας και από τις δύο πορείες πριν ξεκινήσουν οι μετρήσεις.



**Σχήμα 38.** Κωνικά πρίσματα τοποθετημένα στο κατάστρωμα της γέφυρας ΣΕΑ Παλλήνης

Στη συνέχεια τοποθετήθηκε το επίγειο radar στην Αττική Οδό και συνδέθηκε με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή (Σχήμα 39), με προσανατολισμό προς τα τριγωνικά πρίσματα στο κατάστρωμα της γέφυρας. Οι θέσεις φαίνονται στο σχήμα 35 αντίστοιχα. Ένα άτομο από το συνεργείο ήταν υπεύθυνο για την παρακολούθηση του radar σε όλη την διάρκεια των μετρήσεων.



**Σχήμα 39.** Επίγειο radar μικροκυματικής συμβολομετρίας συνδεδεμένο με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή.

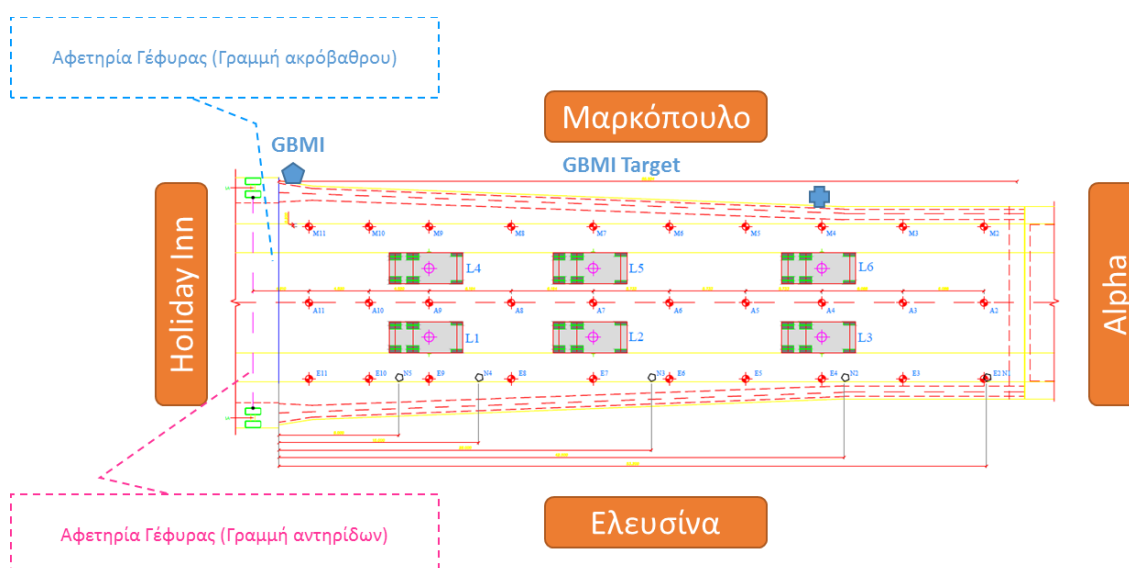
Κατόπιν τοποθέτησης και σύνδεσης του επίγειου radar με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή, προετοιμασίας της χωροστάθμησης (τοποθέτηση ψηφιακού χωροβάτη στον τρίποδα, οριζοντίωση) και έλεγχου λήψης μετρήσεων στη σταδία, ξεκίνησε η λήψη μετρήσεων για το πρώτο σενάριο παρατήρησης L0 (χωρίς φορτηγό όχημα).

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 στη συνέχεια. Ειδικότερα, για κάθε μία από τις θέσεις στις οποίες βρίσκεται το φορτηγό όχημα, πραγματοποιήθηκε γεωμετρική χωροστάθμηση 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 φορτηγό 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.

Η γέφυρα ελέγχθηκε έναντι προγραμματισμένων στατικών δοκιμαστικών φορτίσεων και έναντι περιβαλλοντικών φορτίων. Συγκεκριμένα υλοποιήθηκαν οκτώ σενάρια φόρτισης της γέφυρας τα οποία συμβολίζουμε με το λατινικό γράμμα L και τους αριθμούς 0,1,...,7, εκ των οποίων το πρώτο (L0) και το τελευταίο (L7) περιλαμβάνει μετρήσεις της γέφυρας χωρίς την επιβολή φορτίου ενώ τα υπόλοιπα έξι σενάρια την επιβολή στατικής φόρτισης. Για την υλοποίηση των στατικών φορτίσεων χρησιμοποιήθηκε φορτηγό όχημα της ιδιοκτήτριας εταιρίας Αττικές Διαδρομές ΑΕ συνολικής μάζας 30 ton (Σχήμα ) Το φορτηγό τοποθετήθηκε σε έξι διαφορετικές θέσεις κατά μήκος της γέφυρας, τρεις θέσεις προς την παρειά του Μαρκόπουλου (σενάρια L2 – L6) και τρεις προς την παρειά τις Ελευσίνας (σενάρια L1 – L3) όπως φαίνεται στο Σχήμα 41.



**Σχήμα 40.** Το φορτηγό της Αττικής Οδού που χρησιμοποιήθηκε για τις στατικές μετρήσεις



**Σχήμα 41.** Κάτοψη γέφυρας με τις θέσεις των χωροσταθμικών σημείων, του συστήματος IBIS-S και του φορτηγού για κάθε σενάριο. Τα σημεία AI, MI, EI, εκτείνονται εκτός του ανοίγματος της γέφυρας και δεν παρουσιάζονται στο παραπάνω σχήμα

Για την καλύτερη επεξεργασία και ανάλυση των μετρήσεων κατά την διάρκεια των πειραμάτων κρατήθηκε ημερολόγιο χρησιμοποιώντας GPS χειρός στο οποίο καταγράφηκαν όλα τα σημαντικά γεγονότα κατά την διάρκεια των μετρήσεων όπως η έναρξη λήψης των μετρήσεων, η διέλευση οχημάτων από την γέφυρα και του προαστιακού καθώς και η άφιξη και αναχώρηση του φορτηγού οχήματος της Αττικής οδού στις διάφορες θέσεις για την στατική φόρτιση της γέφυρας. Το ημερολόγιο των μετρήσεων στο πεδίο παρουσιάζεται στον Πίνακα 1. Σημειώνεται ότι οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν τα μεσάνυχτα στις 27 – Φεβρουαρίου 2014 προς 28 – Φεβρουαρίου 2014.

*Πίνακας 1. Ημερολόγιο μετρήσεων στο πεδίο*

<b>Χρόνος</b>	<b>Γεγονός</b>
<b>11:10:01</b>	Έναρξη μετρήσεων INC
<b>11:06:29</b>	Έναρξη μετρήσεων TEMP
<b>11:33:03</b>	Έναρξη μετρήσεων VC
<b>11:34:35</b>	Έναρξη μετρήσεων DIC
<b>11:42:56</b>	Έναρξη χωροστάθμησης στο R1
<b>11:56:39</b>	Διέλευση προαστιακού προς Ελευσίνα
<b>11:56:44</b>	Διέλευση οχήματος προς το Holiday Inn
	Λόγω σβησίματος του GPS χειρός και αντικατάστασης του από άλλο δεν καταγράφηκαν δύο οχήματα
<b>12:15:36</b>	Διέλευση οχήματος προς το Holiday Inn
<b>12:17:58</b>	Διέλευση οχήματος προς το Holiday Inn με φώτα
<b>12:19:42</b>	Διέλευση οχήματος προς το Holiday Inn
<b>12:20:29</b>	Διέλευση οχήματος προς το Alpha με φλας χωρίς φώτα
<b>12:21:10</b>	Διέλευση οχήματος προς το Alpha με φώτα
<b>12:22:13</b>	Διέλευση οχήματος προς το Holiday Inn
<b>12:22:57</b>	Διέλευση οχήματος προς το Alpha
<b>12:24:19</b>	Άφιξη οχήματος στη θέση 1 και σβήσιμο μηχανής
<b>12:24:36</b>	Διέλευση οχήματος προς το Holiday Inn με φώτα
<b>12:25:36</b>	Διέλευση οχήματος προς το Alpha
<b>12:33:05</b>	Διέλευση οχήματος προς το Alpha με φώτα
<b>12:33:14</b>	Διέλευση οχήματος προς το Alpha
<b>12:33:44</b>	Αναχώρηση οχήματος από θέση 1
<b>12:35:27</b>	Άφιξη οχήματος στη θέση 2 και σβήσιμο μηχανής
<b>12:39:51</b>	Διέλευση οχήματος προς το Holiday Inn με φώτα
<b>12:42:06</b>	Διέλευση οχήματος προς το Holiday Inn
<b>12:43:51</b>	Αναχώρηση οχήματος από θέση 2
<b>12:44:25</b>	Άφιξη οχήματος στη θέση 3 και σβήσιμο μηχανής
<b>12:53:00</b>	Αναχώρηση οχήματος από θέση 3
<b>12:54:15</b>	Διέλευση οχήματος προς το Holiday Inn
<b>12:55:31</b>	Άφιξη οχήματος στη θέση 4. Ακινητοποίηση φορτηγού (από εδώ και πέρα



	θα καταγράψω ακινητοποίηση της ρόδας και σβήσιμο μηχανής)
<b>12:59:54</b>	Διέλευση οχήματος Αττικής Οδού προς Holiday Inn
<b>1:01:10</b>	Διέλευση οχήματος προς το Alpha με φλας και φώτα
<b>1:01:27</b>	Διέλευση οχήματος προς το Alpha
<b>1:03:33</b>	Διέλευση οχήματος προς το Alpha με φώτα
<b>1:05:08</b>	Αναχώρηση οχήματος από θέση 4
<b>1:05:38</b>	Άφιξη οχήματος και ακινητοποίηση της ρόδας στη θέση 5
<b>1:06:35</b>	Διέλευση οχήματος Αττικής Οδού προς Holiday Inn
<b>1:13:45</b>	Αναχώρηση οχήματος από θέση 5
<b>1:14:16</b>	Άφιξη οχήματος στη θέση 6
<b>1:14:49</b>	Κύλιση ρόδας λίγο πιο μπροστά και ακινητοποίηση οχήματος
<b>1:23:08</b>	Αναχώρηση οχήματος από θέση 6
<b>1:41:55</b>	Διέλευση οχήματος προς το Holiday Inn

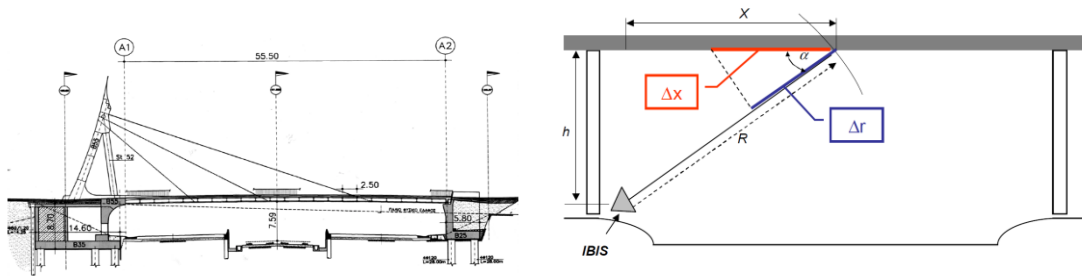
Σύμφωνα και με το ημερολόγιο των μετρήσεων τα σενάρια φόρτισης παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 2

*Πίνακας 2. Σενάρια φόρτισης*

Σενάριο	Περιγραφή	Χρόνος Έναρξης	Χρόνος Λήξης
<b>L0</b>	Μετρήσεις χωρίς στατική φόρτιση		12:24:19
<b>L1</b>	Στατική φόρτιση στη θέση L1	12:24:19	12:33:44
<b>L2</b>	Στατική φόρτιση στη θέση L2	12:35:27	12:43:51
<b>L3</b>	Στατική φόρτιση στη θέση L3	12:44:25	12:53:00
<b>L4</b>	Στατική φόρτιση στη θέση L4	12:55:31	1:05:08
<b>L5</b>	Στατική φόρτιση στη θέση L5	1:05:38	1:13:45
<b>L6</b>	Στατική φόρτιση στη θέση L6	1:14:16	1:23:08
<b>L7</b>	Μετρήσεις χωρίς στατική φόρτιση	1:41:55	

Η μέτρηση της γέφυρας πραγματοποιήθηκε με την μέθοδο της επίγειας συμβολομετρίας μικροκυματικής ακτινοβολίας χρησιμοποιώντας το σύστημα IBIS-S καθώς και με την μέθοδο της γεωμετρικής χωροστάθμησης χρησιμοποιώντας το ψηφιακό χωροβάτη της Leica DNA03 (Σχήμα 26).

Οι μετρήσεις με το radar ήταν συνεχείς, και ξεκίνησαν στις 28 – Φεβρουαρίου – 2014 και ώρα 00:07:37, και είχαν διάρκεια 1h26m04s δευτερολέπτων. Το radar τοποθετήθηκε πλησίον της γέφυρας στο επίπεδο του καταστρώματος της Αττικής Οδού προς την πλευρά του Μαρκοπούλου (θέση GBMI) με εστίαση σε πρίσματα τα οποία είχαν τοποθετηθεί στη θέση GBMI Target όπως φαίνεται στο Σχήμα . Η κατακόρυφη απόσταση από την γέφυρα υπολογίστηκε στα  $h \approx 6.80\text{m}$  και η οριζόντια  $x_0 = 1.950\text{m}$  από την αρχή της γέφυρας όταν αυτή θεωρείται ως η γραμμή που ορίζεται από τις δύο αντηρίδες της γέφυρας στην πλευρά του Holiday Inn ή  $x_0 \approx 0$  αν θεωρηθεί η γραμμή που ορίζει το ακρόβαθρο A1 ( Σχήμα ) . Αντίστοιχα η απόσταση του στόχου είναι  $x = 42,777$  μέτρα και  $x = 40,827$  μέτρα . Σύμφωνα με τα παραπάνω και με βάση το Σχήμα 42 η γωνία στόχευσης του GBMI υπολογίζεται ως



**Σχήμα 42.** Σχέδιο γέφυρας και σκαρίφημα θέσης συστήματος GBMI

$$\tan(a) = \frac{h}{x} = \frac{6,80}{40,827} = 0.17$$

$$a \approx 9.46^\circ$$

Οι παράμετροι των μετρήσεων με το σύστημα επίγειας συμβολομετρίας μικρομυματικής ακτινοβολίας IBIS-S παρουσιάζονται συνοπτικά στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 3)



**Πίνακας 3.** Παράμετροι μετρήσεων με το σύστημα μικροκυματικής συμβολομετρίας IBIS-S

Μέγεθος	Τιμή
Έναρξη μετρήσεων	00:07:37
Λήξη μετρήσεων	01:33:41
Συχνότητα δειγματοληψίας	48,02 Hz
Διάρκεια μετρήσεων	5164 sec (1h 26M 04S)
x - Θέση GBMI	1,950 (0) m
y - Θέση GBMI	-6,80 m
x - Θέση GBMI Target	42,777 (40,827) m
Γωνία στόχευσης	9.46°

Η γεωμετρική χωροστάθμιση πραγματοποιήθηκε σε διάφορα σημεία κατά μήκος της γέφυρας όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Οι ακριβείς θέσεις των χωροσταθμικών σημείων φαίνεται στο Σχήμα ενώ οι αποστάσεις τους από την αρχή της γέφυρας δίνονται στον ακόλουθο Πίνακα (Πίνακας 4).

**Πίνακας 4.** Αποστάσεις χωροσταθμικών σημείων από την αρχή της γέφυρας (γραμμή που ορίζεται από τις δύο αντηρίδες της γέφυρας στην πλευρά του Holiday Inn)

Σημείο χωροστάθμισης			Απόσταση από την αφετηρία (m)	
Άξονας Ελευσίνας	Διαχωριστική γραμμή	Άξονας Μαρκόπουλο	Αντηρίδες	Ακρόβαθρο
<b>E1</b>		M1	77,953	76,003
	A1		67.737	65,787
<b>E2</b>	A2	M2	54,953	53,003
<b>E3</b>	A3	M3	48,865	46,915
<b>E4</b>	A4	M4	42,777	40,827
<b>E5</b>	A5	M5	37,044	35,094
<b>E6</b>	A6	M6	31,311	29,361
<b>E7</b>	A7	M7	25,578	23,628
<b>E8</b>	A8	M8	19,414	17,464
<b>E9</b>	A9	M9	13,25	11,300

<b>E10</b>	A10	M10	8,730	6,780
<b>E11</b>	A11	M11	4,210	2,260

Οι υψομετρικές διαφορές των χωροσταθμικών σημείων υπολογίστηκαν με την βοήθεια σημείων αναφοράς τα οποία έχουν γνωστό υψόμετρο (Reper) όπως απεικονίζονται και στο σχήμα 35. Το υψόμετρο των σημείων παρουσιάζονται στον Πίνακας 5.

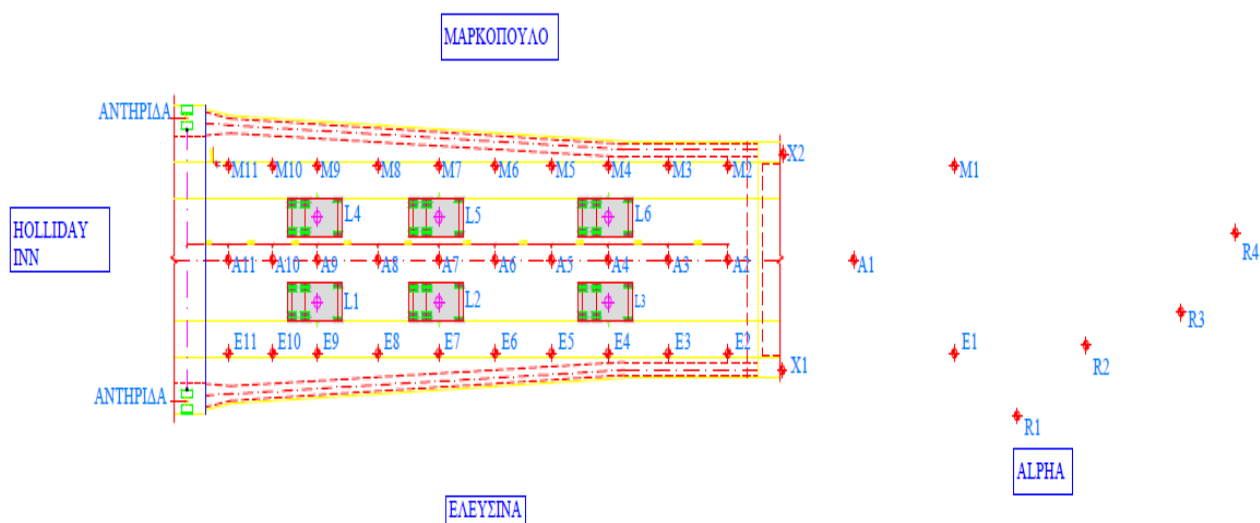
*Πίνακας 5. Υψόμετρο των σημείων αναφοράς (Reper)*

Σημείο αναφοράς (Reper)	Υψόμετρο (m)
<b>R1</b>	10,45
<b>R2</b>	10,69
<b>R3</b>	10,50
<b>R4</b>	10

## 5. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΕΔΙΟΥ

### 5.1 Γεωμετρική χωροστάθμηση

Οι θέσεις του χωροβάτη( $X1,X2$ ), των σημείων Ρεπέρ( $R1,R2,R3,R4$ ), των χωροσταθμικών σημείων ( $A1,A2\dots,E1,E2\dots,M1,M2\dots$ ) και οι θέσεις του φορτηγού ( $L1,\dots,L7$ ) απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 43). Οι θέσεις  $L0$  και  $L7$  αναφέρονται όταν δεν υπήρχε φορτίο, δηλαδή χωρίς το φορτηγό.



*Σχήμα 43. Απεικόνιση χωροσταθμικών σημείων, σημείων Reper, θέσεις χωροβάτη  $X1,X2$  και θέσεις φορτηγού*

Οι μετρήσεις της γεωμετρικής χωροστάθμησης φαίνονται στους ακόλουθους πίνακες για κάθε σενάριο (Πίνακας 6 - Πίνακας 9). Σε κάθε περίπτωση παρουσιάζονται για κάθε σενάριο οι μετρήσεις από τα σημεία αναφοράς και τα χωροσταθμικά σημεία. Επίσης για κάθε σημείο αναφέρεται εκτός της μέτρησης η θέση του χωροβάτη καθώς και η ώρα της μέτρησης. Η αντιστοιχία χωροσταθμικού σημείου και σημείου αναφοράς που χρησιμοποιήθηκε για την οπισθοσκόπευση φαίνεται στο Πίνακας 10. Να σημειωθεί ότι όταν δεν υπάρχουν μετρήσεις για τα σημεία αναφοράς  $R2$  και  $R3$ , η οπισθοσκόπευση έγινε με το σημείο  $R1$ . Επίσης στο

συγκεκριμένο πείραμα ελήφθησαν μετρήσεις μόνο για τα χωροσταθμικά σημεία A1, A4, A7, A9, E1, E4, E7, E9, και M1, M4, M7, M9

*Πίνακας 6. Μετρήσεις χωροσταθμικών σημείων και σημείων αναφοράς. Σενάριο L0 & L1(θέσεις χωρίς φορτίο)*

Σενάριο L0				Σενάριο L1			
Κωδικός Σημείου	Θέση Χωροβάτη	Ανάγνωση χωροβάτη	Ωρα	Κωδικός Σημείου	Θέση Χωροβάτη	Ανάγνωση χωροβάτη	Ωρα
R1	X1	1,339	23:42:56	R1	X1	1,396	0:30:47
R2	X1	1,09	23:45:49	R2	X1	1,153	0:31:12
R3	X1	1,282	23:44:10	R3	X1	1,339	0:31:35
R1	X2	1,586	0:21:05	R1	X2	1,586	0:21:05
R2	X2	1,343	0:21:45	R2	X2	1,343	0:21:45
R3	X2	1,529	0:22:42	R3	X2	1,529	0:22:42
A1	X1	1,293	23:46:59	A1	X2	1,540	0:27:52
A4	X1	0,927	0:15:20	A4	X2	1,176	0:28:30
A7	X1	0,85	0:15:55	A7	X2	1,104	0:28:55
A9	X1	0,986	0:16:31	A9	X2	1,237	0:29:15
E1	X2	1,522	0:23:00	E1	X2	1,522	0:25:30
E4	X2	1,049	0:18:56	E4	X2	1,050	0:26:22
E7	X2	0,98	0:19:36	E7	X2	0,988	0:26:49
E9	X2	1,130	0:20:42	E9	X2	1,133	0:27:15
M1	X1	1,369	23:44:58	M1	X1	1,427	0:33:44
M4	X1	0,796	0:10:28	M4	X1	0,854	0:33:20
M7	X1	0,743	0:11:20	M7	X1	0,802	0:32:46
M9	X1	0,884	0:11:48	M9	X1	0,944	0:32:10

*Πίνακας 7. Μετρήσεις χωροσταθμικών σημείων και σημείων αναφοράς. Σενάριο L2 & L3*

Σενάριο L2				Σενάριο L3			
Κωδικός Σημείου	Θέση Χωροβάτη	Ανάγνωση χωροβάτη	Ωρα	Κωδικός Σημείου	Θέση Χωροβάτη	Ανάγνωση χωροβάτη	Ωρα
R1	X1	1,396		R1	X1	1,381	0:48:09

R2	X1			R2	X1	1,137	0:48:35
R3	X1			R3	X1	1,323	0:49:10
R1	X2	1,589	0:40:49	R1	X2	1,589	
R2	X2	1,345	0:41:12	R2	X2		
R3	X2	1,532	0:41:41	R3	X2		
A1	X1	1,351	0:38:59	A1	X1	1,33	0:52:36
A4	X1	0,990	0:38:14	A4	X1	0,979	0:52:09
A7	X1	0,920	0:37:49	A7	X1	0,902	0:51:45
A9	X1	1,047	0:37:35	A9	X1	1,030	0:51:49
E1	X2	1,525	0:43:29	E1	X2	1,525	0:44:42
E4	X2	1,058	0:42:06	E4	X2	1,063	0:45:29
E7	X2	0,998	0:42:29	E7	X2	0,995	0:45:45
E9	X2	1,137	0:43:05	E9	X2	1,135	0:46:40
M1	X1	1,427	0:35:52	M1	X1	1,411	0:49:35
M4	X1	0,85799	0:36:27	M4	X1	0,845	0:50:19
M7	X1	0,80585	0:36:58	M7	X1	0,788	0:50:41
M9	X1	0,94518	0:37:16	M9	X1	0,928	0:50:02

*Πίνακας 8. Μετρήσεις χωροσταθμικών σημείων και σημείων αναφοράς. Σενάριο L4 & L5*

Σενάριο L4				Σενάριο L5			
Κωδικός Σημείου	Θέση Χωροβάτ η	Ανάγνωση χωροβάτη	Ωρα	Κωδικός Σημείου	Θέση Χωροβάτη	Ανάγνωση χωροβάτη	Ωρα
R1	X1	1,381		R1	X1	1,504	1:10:35
R2	X1			R2	X1	1,260	1:10:49
R3	X1			R3	X1	1,446	1:11:35
R1	X2	1,641	1:01:42	R1	X2	1,641	
R2	X2	1,397	1:02:16	R2	X2		
R3	X2	1,584	1:02:50	R3	X2		
A1	X1	1,335	0:58:52	A1	X2	1,595	1:08:46
A4	X1	0,970	0:58:33	A4	X2	1,784	1:08:13
A7	X1	0,899	0:58:10	A7	X2	1,165	1:07:41
A9	X1	1,032	0:57:44	A9	X2	1,292	1:07:27
E1	X2	1,577	1:04:29	E1	X2	1,577	1:06:00
E4	X2	1,104	1:03:08	E4	X2	1,108	1:06:32

<b>E7</b>	X2	1,042	1:03:40	E7	X2	1,047	1:06:52
<b>E9</b>	X2	1,187	1:04:02	E9	X2	1,187	1:07:13
<b>M1</b>	X1	1,411	0:55:44	M1	X1	1,534	1:13:13
<b>M4</b>	X1	0,839	0:56:32	M4	X1	0,966	1:12:09
<b>M7</b>	X1	0,787	0:56:59	M7	X1	0,915	1:12:24
<b>M9</b>	X1	0,930	0:57:25	M9	X1	1,053	1:12:55

*Πίνακας 9. Μετρήσεις χωροσταθμικών σημείων και σημείων αναφοράς. Σενάριο L6 & L7*

Σενάριο L6				Σενάριο L7			
Κωδικός Σημείου	Θέση Χωροβάτη	Ανάγνωση χωροβάτη	Ωρα	Κωδικός Σημείου	Θέση Χωροβάτη	Ανάγνωση χωροβάτη	Ωρα
<b>R1</b>	X1	1,504		R1	X1	1,408	1:31:56
<b>R2</b>	X1			R2	X1	1,164	1:31:27
<b>R3</b>	X1			R3	X1	1,351	1:30:58
<b>R1</b>	X2	1,579	1:17:29	R1	X2	1,579	1:17:29
<b>R2</b>	X2	1,336	1:17:53	R2	X2	1,336	1:17:53
<b>R3</b>	X2	1,522	1:18:31	R3	X2	1,522	1:18:31
<b>A1</b>	X2	1,533	1:20:43	A1	X2	1,534	1:26:45
<b>A4</b>	X2	1,178	1:21:15	A4	X2	1,167	1:27:28
<b>A7</b>	X2	1,101	1:21:36	A7	X2	1,095	1:27:57
<b>A9</b>	X2	1,228	1:22:05	A9	X2	1,227	1:28:20
<b>E1</b>	X2	1,515	1:20:09	E1	X2	1,515	1:28:43
<b>E4</b>	X2	1,050	1:18:50	E4	X2	1,042	1:26:24
<b>E7</b>	X2	0,983	1:19:15	E7	X2	0,979	1:25:55
<b>E9</b>	X2	1,125	1:19:49	E9	X2	1,123	1:25:30
<b>M1</b>	X1	1,534	1:14:36	M1	X1	1,439	1:32:20
<b>M4</b>	X1	0,972	1:15:09	M4	X1	0,864	1:32:42
<b>M7</b>	X1	0,913	1:15:35	M7	X1	0,811	1:33:13
<b>M9</b>	X1	1,051	1:16:10	M9	X1	0,954	1:33:35

*Πίνακας 10. Αντιστοιχία χωροσταθμικών σημείων και σημείων αναφοράς (Reper)*

Σημείο αναφοράς (Reper)	Χωροσταθμικό σημείο
<b>R1</b>	1,2,3

<b>R2</b>	4,5,6
<b>R3</b>	7,8,9
<b>R4</b>	10,11,12

Με βάση τις παραπάνω μετρήσεις και τον βασικό μαθηματικό τύπο της γεωμετρικής χωροστάθμησης υπολογίστηκε το πραγματικό ύψος για κάθε σημείο χωροστάθμησης και κάθε σενάριο, ως:

$$H_L = H_R + (R_L - R_R)$$

Όπου

$H_L$  : το πραγματικό ύψος του υπό εξέταση χωροσταθμικού σημείου

$H_R$  : το πραγματικό ύψος του σημείου αναφοράς (Πίνακας 5)

$R_R$  : η μέτρηση του σημείου αναφοράς  $R$  (οπισθοσκόπευση) (Πίνακας 6Πίνακας 9)

$R_L$ : η μέτρηση του χωροσταθμικού σημείου  $L$  (εμπροσθοσκόπευση) (Πίνακας 6Πίνακας 9)

Τα αποτελέσματα της παραπάνω διαδικασίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 11

**Πίνακας 11.** Υψόμετρο σε (m) για κάθε σημείο χωροστάθμησης και κάθε σενάριο

Κωδικός Σημείου	Σενάριο L0 $H_{L0}$	Σενάριο L1 $H_{L1}$	Σενάριο L2 $H_{L2}$	Σενάριο L3 $H_{L3}$	Σενάριο L4 $H_{L4}$	Σενάριο L5 $H_{L5}$	Σενάριο L6 $H_{L6}$	Σενάριο L7 $H_{L7}$
<b>A1</b>	10,497	10,497	10,497	10,497	10,497	10,497	10,497	10,497
<b>A4</b>	10,863	10,862	10,858	10,853	10,862	10,858	10,853	10,864
<b>A7</b>	10,936	10,933	10,928	10,930	10,933	10,928	10,930	10,936
<b>A9</b>	10,804	10,801	10,801	10,802	10,800	10,801	10,802	10,804
<b>E1</b>	10,516	10,516	10,516	10,516	10,516	10,516	10,516	10,516
<b>E4</b>	10,989	10,988	10,982	10,978	10,988	10,985	10,982	10,989
<b>E7</b>	11,052	11,049	11,043	11,0458	11,050	11,045	11,0477	11,052
<b>E9</b>	10,907	10,904	10,90	10,906	10,906	10,905	10,906	10,908
<b>M1</b>	10,421	10,421	10,421	10,421	10,421	10,421	10,421	10,421
<b>M4</b>	10,995	10,994	10,991	10,988	10,993	10,989	10,984	10,995
<b>M7</b>	11,048	11,046	11,043	11,044	11,045	11,039	11,042	11,049
<b>M9</b>	10,906	10,904	10,903	10,904	10,903	10,902	10,905	10,906

Τέλος θεωρώντας το σενάριο L0 ως σενάριο αναφοράς, αφαιρέσαμε τα υψόμετρα όλων των χωροσταθμικών σημείων από κάθε σενάριο από τα αντίστοιχα του σεναρίου L0 για να έχουμε μια εκτίμηση της κατακόρυφης μετατόπισης (βύθισης) της γέφυρας λόγω των στατικών φορτίων

$$\Delta H_{L_k} = H_{L_k} - H_{L_0}$$

Τα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 12

**Πίνακας 12.** Βύθιση σε χιλιοστά (mm) για κάθε σημείο χωροστάθμησης και κάθε σενάριο

Κωδικός Σημείου	Σενάριο L0 $\Delta H_{L0}$	Σενάριο L1 $\Delta H_{L1}$	Σενάριο L2 $\Delta H_{L2}$	Σενάριο L3 $\Delta H_{L3}$	Σενάριο L4 $\Delta H_{L4}$	Σενάριο L5 $\Delta H_{L5}$	Σενάριο L6 $\Delta H_{L6}$	Σενάριο L7 $\Delta H_{L7}$
<b>A1</b>	0	-0,020	-0,090	-0,490	-0,220	-0,110	-0,100	-0,150
<b>A4</b>	0	-1,120	-5,115	-10,140	-1,345	-5,105	-10,130	0,320
<b>A7</b>	0	-2,760	-8,174	-6,240	-3,044	-8,544	-6,190	-0,060
<b>A9</b>	0	-3,660	-3,424	-2,060	-4,274	-3,714	-2,060	-0,370
<b>E1</b>	0	0,000	-0,090	-0,140	-0,060	-0,030	-0,090	-0,180
<b>E4</b>	0	-1,210	-6,440	-11,415	-0,940	-4,265	-7,430	0,230
<b>E7</b>	0	-2,650	-8,970	-6,624	-1,680	-6,534	-4,790	0,050
<b>E9</b>	0	-3,080	-3,120	-1,654	-1,640	-2,494	-1,340	0,320
<b>M1</b>	0	-0,050	-0,140	-0,320	-0,200	0,010	0,060	-0,190
<b>M4</b>	0	-1,110	-4,085	-7,140	-1,255	-5,480	-10,905	0,530
<b>M7</b>	0	-1,770	-5,374	-4,450	-2,654	-8,640	-6,044	0,450
<b>M9</b>	0	-1,990	-2,924	-2,240	-3,694	-4,220	-1,804	-0,690

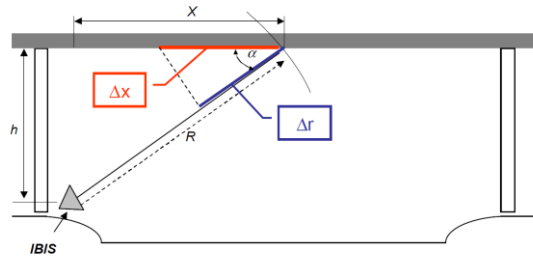
## 5.2 Μετρήσεις GBMI

Στην παρούσα ενότητα θα γίνει ανάλυση και επεξεργασία των μετρήσεων που ελήφθησαν με το radar χρησιμοποιώντας το συνοδευτικό λογισμικό IBIS Data Viewer (IDIS 2009) το οποίο είναι υλοποιημένο με κώδικα MATLAB.

Αρχικά πρέπει να εισαχθεί το αρχείο των μετρήσεων καθώς και να καθοριστεί η βασική γεωμετρία της υπό ελέγχου κατασκευής, καθώς και η γωνία στόχευσης του radar.

Με βάση το Σχήμα 44 η γωνία στόχευσης του GBMI υπολογίζεται ως



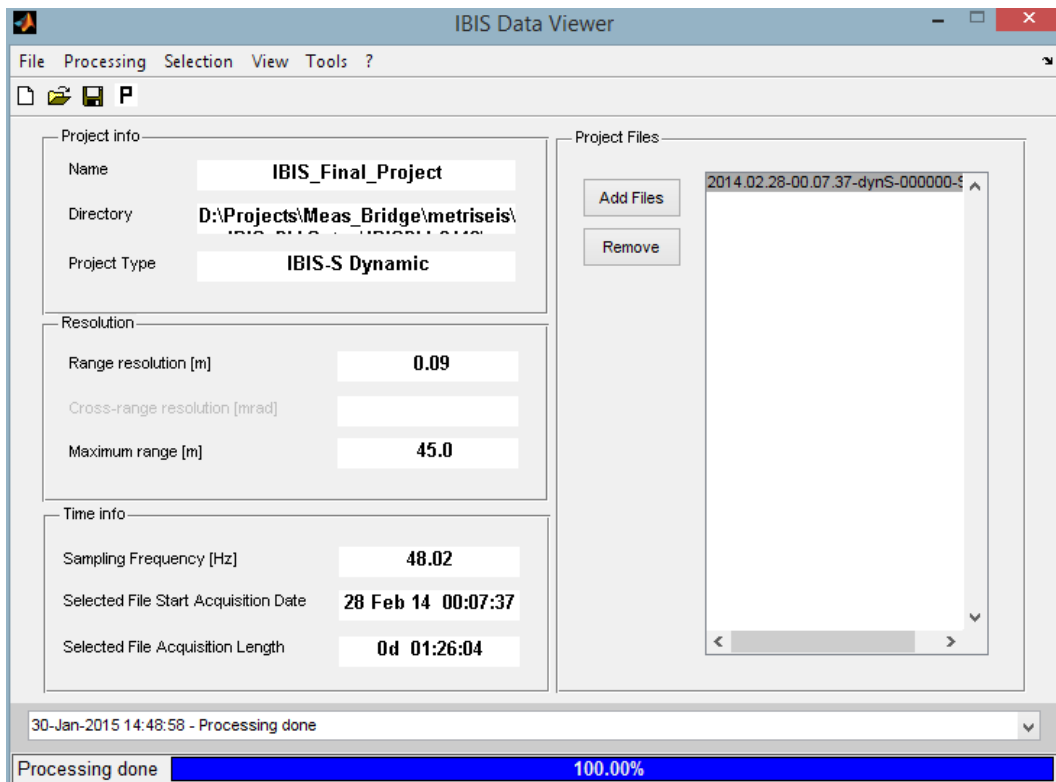


*Σχήμα 44. Γωνία στόχευσης*

$$\tan(\alpha) = \frac{h}{x} = \frac{6,80}{40,827} = 0.17$$

$$\alpha \approx 9.46^\circ$$

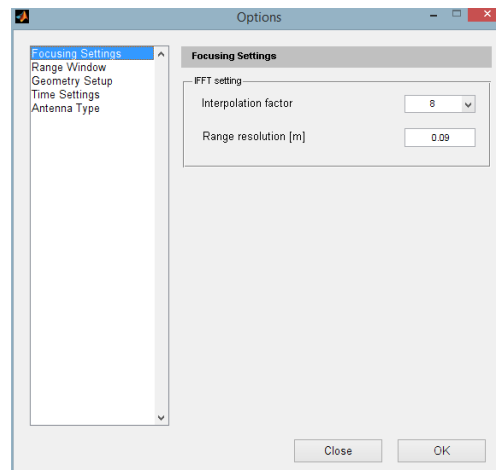
Δημιουργούμε ένα νέο project IBIS-S Dynamic και ορίζουμε το παραπάνω αρχείο μετρήσεων



*Σχήμα 45. Καθορισμός project και αρχείου μετρήσεων*

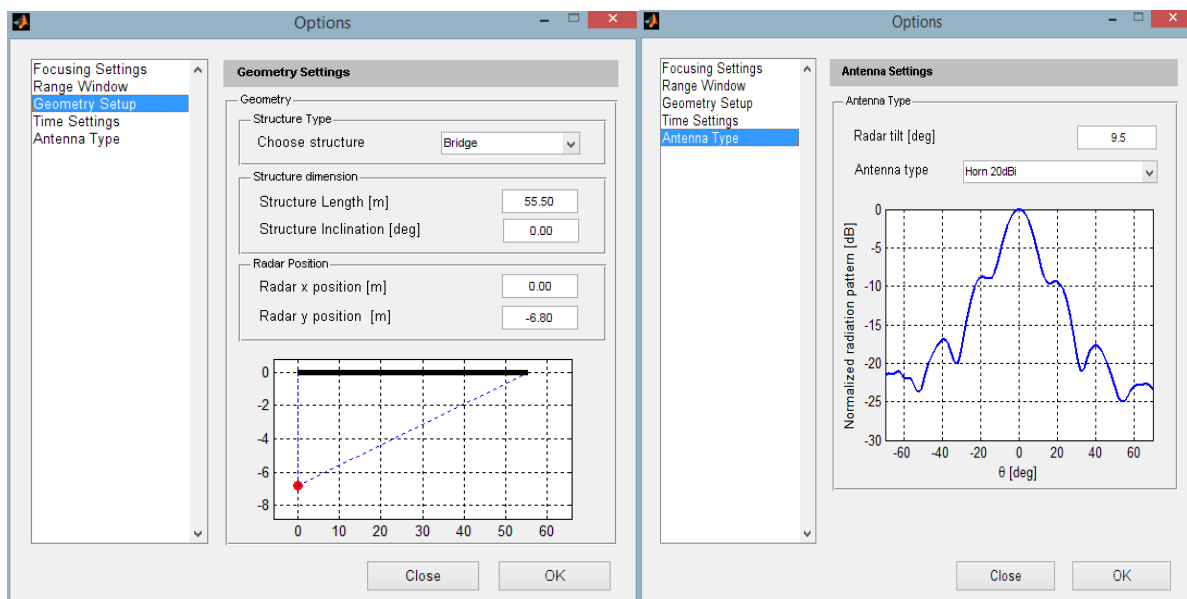
Σύμφωνα με τις παραμέτρους του Πίνακα 3 εισάγουμε τα παραπάνω δεδομένα στο λογισμικό, από το μενού **Processing/Options**:

Ορίζουμε το βαθμό παρεμβολής σε 8 ώστε να αυξήσουμε την ανάλυση σε 0.09 m (Σχήμα



Σχήμα 46. Focusing Settings. Ορισμός βαθμού παρεμβολής

Στη συνέχεια ορίζουμε τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τις υπό εξέτασης κατασκευής και της αντίστοιχης κεραίας που στην εργασία αναφέρονται στα κωνικά πρίσματα(Σχήμα 38). Συγκεκριμένα μελετήθηκε η γέφυρα ΣΕΑ Παλλήνης με μήκος 55m. Η κατακόρυφη απόσταση από την γέφυρα υπολογίστηκε στα  $h \approx 6.80\text{m}$  και η οριζόντια  $x_0 = 1.950\text{m}$  από την αρχή της γέφυρας όταν αυτή θεωρείται ως η γραμμή που ορίζεται από τις δύο αντηρίδες της γέφυρας στην πλευρά του Holiday Inn ή  $x_0 \approx 0$  αν θεωρηθεί η γραμμή που ορίζει το ακρόβαθρο A1. Αντίστοιχα η απόσταση του στόχου είναι  $x = 42,777\text{ m}$  και  $x = 40,827\text{ m}$ .



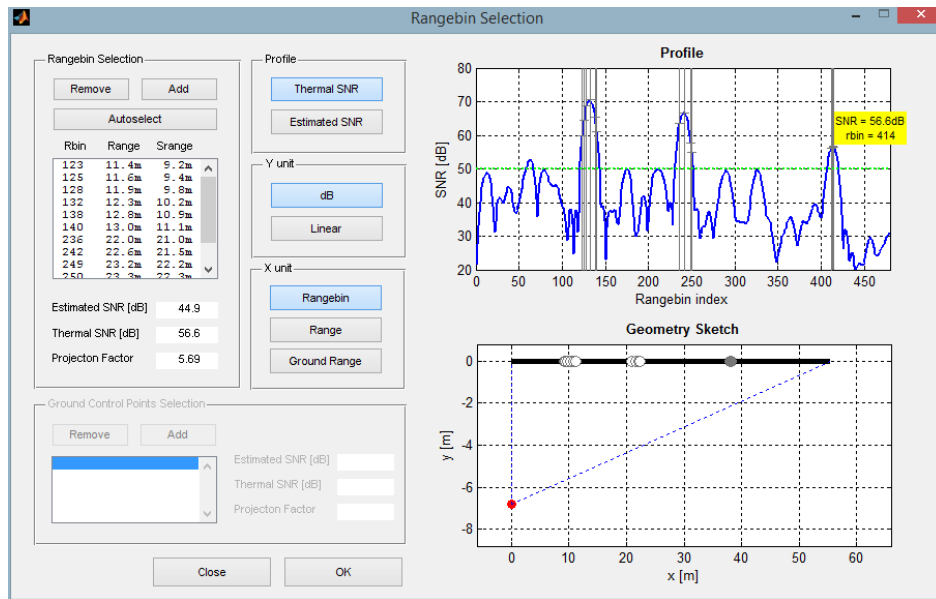
Σχήμα 47. Καθορισμός γεωμετρίας της γέφυρας και κεραίας

Εν συνεχεία το λογισμικό επεξεργάζεται τα δεδομένα σύμφωνα τις επιλογές μας και τα δεδομένα που έχουν καταγραφεί.

Επιλέγονται αυτόματα τα σημεία με ανακλαστικότητα μεγαλύτερη από κάποιο κατώφλι (Σχήμα 48). Τα τελικά επιλεγμένα σημεία καθώς και διάφορα χαρακτηριστικά τους όπως η απόσταση από την αφετηρία (ακρόβαθρο A1) της γέφυρας καθώς και η ανακλαστικότητα παρουσιάζονται στον Πίνακα 13.

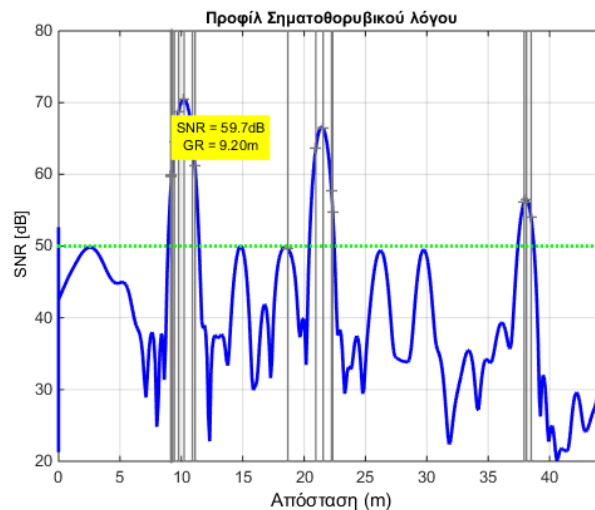
*Πίνακας 13. Επιλεγμένα σημεία μεθόδου μικροκυματικής συμβολομετρίας*

Κωδικός σημείου	Ακτινική Απόσταση (m)	Απόσταση από Ακρόβαθρο (m)	Ανακλαστικότητα (dB)	Ακρίβεια (mm)	Συντελεστής Προβολής
123	11,4000	9,2000	51,2000	0,0027	1,6800
125	11,6000	9,4000	55,4000	0,0017	1,7100
128	11,9000	9,8000	60,2000	0,0010	1,7500
132	12,3000	10,2000	63,8000	0,0006	1,8100
138	12,8000	10,9000	56,3000	0,0015	1,8900
140	13,0000	11,1000	52,9000	0,0022	1,9200
236	22,0000	21,0000	46,8000	0,0045	3,2400
242	22,6000	21,5000	44,7000	0,0057	3,3200
249	23,2000	22,2000	39,0000	0,0110	3,4200
250	23,3000	22,3000	37,2000	0,0136	3,4300
412	38,5000	37,9000	44,6000	0,0058	5,6700
414	38,7000	38,1000	44,9000	0,0056	5,6900



**Σχήμα 48.** Rangebin Selection. Επιλογή σημείων μετρήσεων

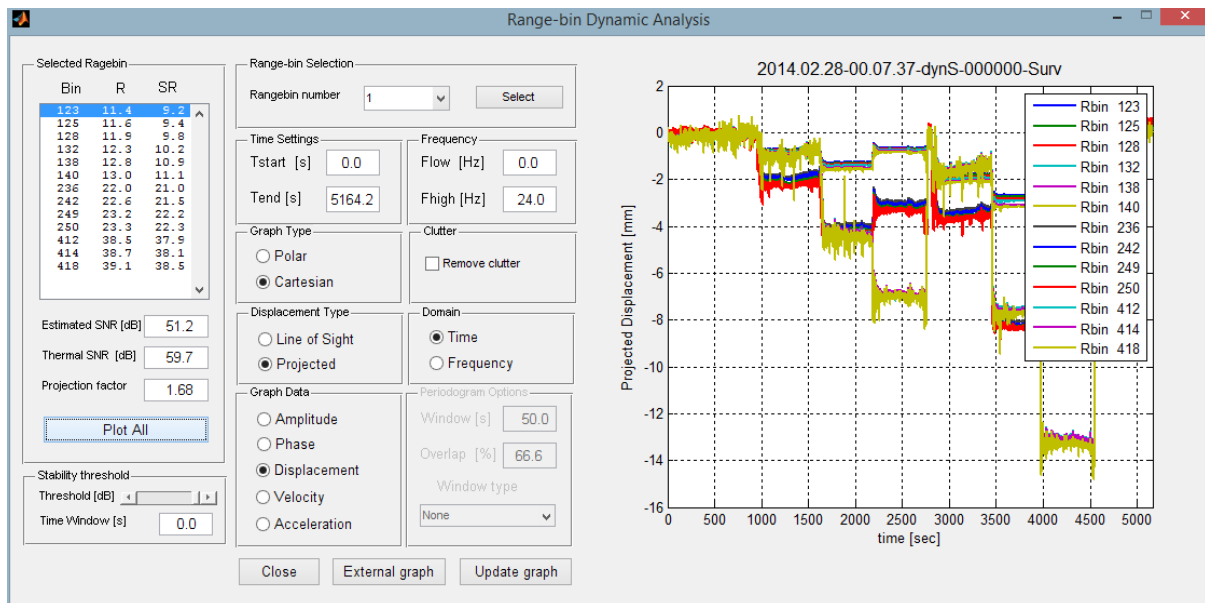
Α ανακλαστικότητα συναρτήσει της απόστασης από την αφετηρία φαίνεται στο Σχήμα 49. Από το διάγραμμα παρατηρούμε ότι τα σημεία με υψηλή ανακλαστικότητα είναι συγκεντρωμένα σε τρεις περιοχές κοντά στα 10m, στα 20 m και στα 38 m, ενώ όλες οι άλλες περιοχές είναι κάτω από το κατώφλι.



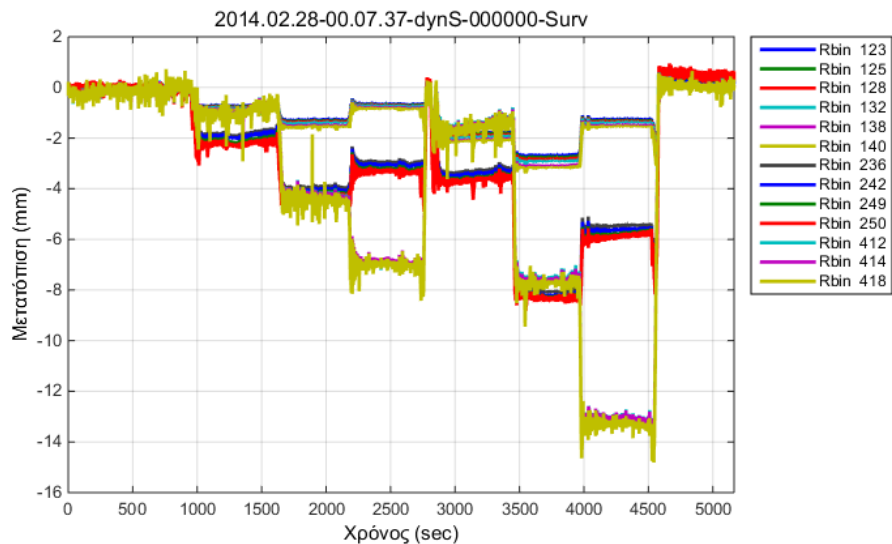
**Σχήμα 49.** SNR συναρτήσει της απόστασης από την αφετηρία

Τέλος υπολογίζουμε για τα επιλεγμένα σημεία την μετατόπιση για όλη τη διάρκεια των μετρήσεων (Σχήμα ) και αποθηκεύουμε τα δεδομένα η μορφή του οποίου φαίνεται στο Σχήμα . Να σημειωθεί ότι η επιλογή σημείων με υψηλή ανακλαστικότητα είναι σημαντική

μας και τα σημεία με ανακλαστικότητα κάτω από το κατώφλι παρουσιάζουν αυξημένο θόρυβο και μειωμένη ακρίβεια, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 53.



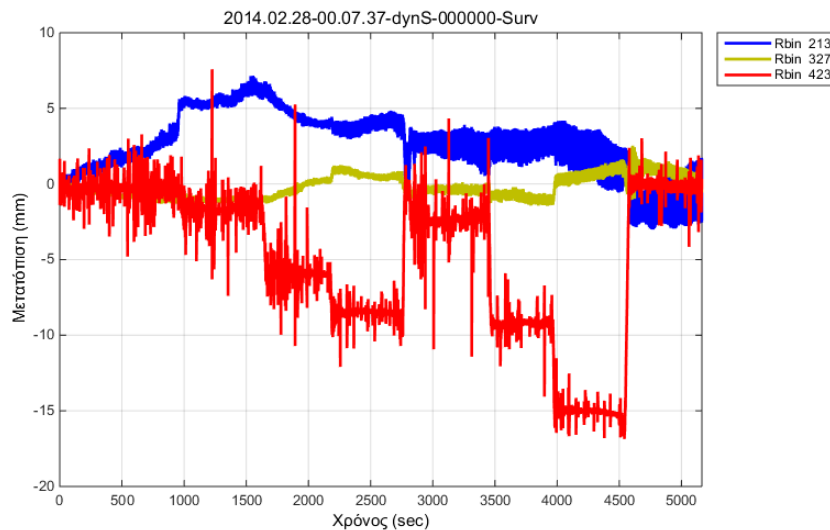
**Σχήμα 50.** Range-Bin Dynamic Analysis. Υπολογισμός χρονοσειρών μετατοπίσεων των επιλεγμένων σημείων.



**Σχήμα 51.** Χρονοσειρές μετατοπίσεων των επιλεγμένων σημείων

time	Rbin123	Rbin129	Rbin131	Rbin139	Rbin142	Rbin232	Rbin240	Rbin242	Rbin249	Rbin409	Rbin415	Rbin420
[sec]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
0.020825	0.002728	0.001744	0.001702	0.000884	0.000176	-0.011948	-0.010691	-0.010183	-0.001770	0.007379	-0.000848	-0.012343
0.041649	0.001530	0.001860	0.001954	0.001733	0.002919	-0.020362	-0.023084	-0.025582	-0.030614	-0.006584	-0.000101	-0.004587
0.062474	-0.002028	-0.000875	-0.000648	-0.000268	0.001476	-0.010734	-0.029991	-0.032934	-0.030648	0.002618	-0.000225	-0.008952
0.083299	-0.007194	-0.004974	-0.004752	-0.004649	-0.002872	-0.019858	-0.037808	-0.040626	-0.043272	-0.020888	-0.018592	-0.037405
0.104123	-0.008835	-0.006328	-0.006085	-0.006974	-0.007631	-0.018826	-0.030725	-0.033887	-0.037661	-0.034806	-0.026653	-0.036446
0.124948	-0.011469	-0.007016	-0.006635	-0.007510	-0.010555	-0.027075	-0.031969	-0.033148	-0.032829	-0.038218	-0.035172	-0.040531
0.145773	-0.010546	-0.006450	-0.006078	-0.005604	-0.003822	-0.034456	-0.033632	-0.034436	-0.042408	-0.075896	-0.060451	-0.068128
0.166597	-0.012541	-0.009461	-0.009105	-0.009368	-0.008167	-0.040072	-0.027914	-0.027262	-0.023055	-0.084502	-0.083200	-0.094913
0.187422	-0.019787	-0.016244	-0.015940	-0.016320	-0.015747	-0.048834	-0.034718	-0.033064	-0.015359	-0.108559	-0.111641	-0.131303
0.208247	-0.023175	-0.020607	-0.020608	-0.022741	-0.023694	-0.067974	-0.055098	-0.052549	-0.020637	-0.116857	-0.124237	-0.128073
0.229071	-0.027337	-0.022938	-0.022612	-0.022008	-0.016276	-0.075595	-0.066306	-0.063293	-0.012685	-0.154077	-0.152838	-0.163250
0.249896	-0.027277	-0.024147	-0.023868	-0.023862	-0.020085	-0.079079	-0.079127	-0.077332	-0.034671	-0.167919	-0.176172	-0.194280
0.270721	-0.028606	-0.027693	-0.027779	-0.030005	-0.031104	-0.092661	-0.087136	-0.084823	-0.049098	-0.168437	-0.188182	-0.212924
0.291545	-0.032412	-0.032069	-0.032255	-0.034988	-0.035869	-0.110787	-0.093785	-0.090169	-0.044698	-0.207338	-0.207134	-0.222235
0.312370	-0.035311	-0.035812	-0.036219	-0.041296	-0.046526	-0.103696	-0.101185	-0.099818	-0.075242	-0.201040	-0.214566	-0.217313
0.333195	-0.036501	-0.037236	-0.037589	-0.040324	-0.041799	-0.115762	-0.108808	-0.106590	-0.083563	-0.193634	-0.213174	-0.227512
0.354019	-0.036233	-0.037416	-0.037830	-0.041728	-0.044261	-0.119673	-0.123344	-0.122417	-0.103311	-0.208325	-0.225491	-0.227637
0.374844	-0.035421	-0.038444	-0.039030	-0.042706	-0.043587	-0.109506	-0.115359	-0.115077	-0.090616	-0.245306	-0.261089	-0.261222
0.395668	-0.038237	-0.041296	-0.042024	-0.045341	-0.045798	-0.118745	-0.115398	-0.110559	-0.041848	-0.253164	-0.247200	-0.252908
0.416493	-0.039087	-0.042056	-0.042705	-0.046134	-0.046914	-0.118049	-0.104647	-0.097228	-0.022712	-0.222205	-0.231453	-0.250631
0.437318	-0.039927	-0.041034	-0.041505	-0.045289	-0.047163	-0.113423	-0.091605	-0.081659	0.023543	-0.245056	-0.243841	-0.215868
0.458142	-0.037345	-0.039713	-0.040269	-0.043004	-0.043362	-0.104900	-0.101665	-0.094704	-0.011564	-0.211998	-0.261835	-0.312574
0.478967	-0.037583	-0.038623	-0.039247	-0.044413	-0.048244	-0.095978	-0.101592	-0.097824	-0.055414	-0.100389	-0.071740	-0.038418
0.499792	-0.036422	-0.037794	-0.038124	-0.041011	-0.042121	-0.092703	-0.106531	-0.104306	-0.066601	-0.212765	-0.186001	-0.261672
0.520616	-0.032186	-0.035563	-0.036097	-0.039303	-0.041235	-0.064839	-0.098291	-0.100692	-0.104003	-0.283237	-0.223518	-0.104362

Σχήμα 52. Μετρήσεις με την μέθοδο της μικροκυματικής συμβολομετρίας στα επιλεγμένα σημεία

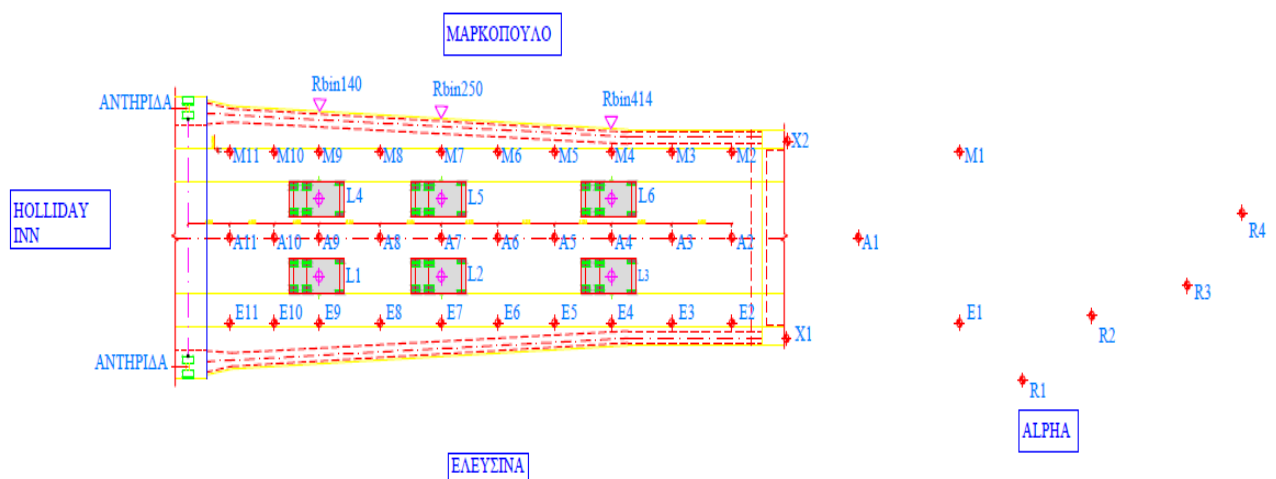


Σχήμα 53. Χρονοσειρές μετατοπίσεων σημείων με ανακάστικότητα κάτω από το κατώφλι

### 5.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Στην ενότητα αυτή θα γίνει σύγκριση της μετατόπισης όπως υπολογίζεται από τις μετρήσεις του radar (GBMI) σε σχέση με αυτή της γεωμετρικής χωροστάθμησης. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων θα εισαχθούν και θα απεικονισθούν χρησιμοποιώντας το λογισμικό MATLAB, και αναπτύσσοντας κατάλληλο κώδικα (Παράρτημα). Συγκεκριμένα θα συγκριθούν οι μετρήσεις των σημείων χωροστάθμησης M4, M7, M9 που βρίσκονται στη πλευρά του Μαρκόπουλου πάνω στην γέφυρα με τις μετρήσεις του radar από την πλευρά του Μαρκόπουλου σε σημεία κοντά στη θέση των παραπάνω και με καλό λόγο

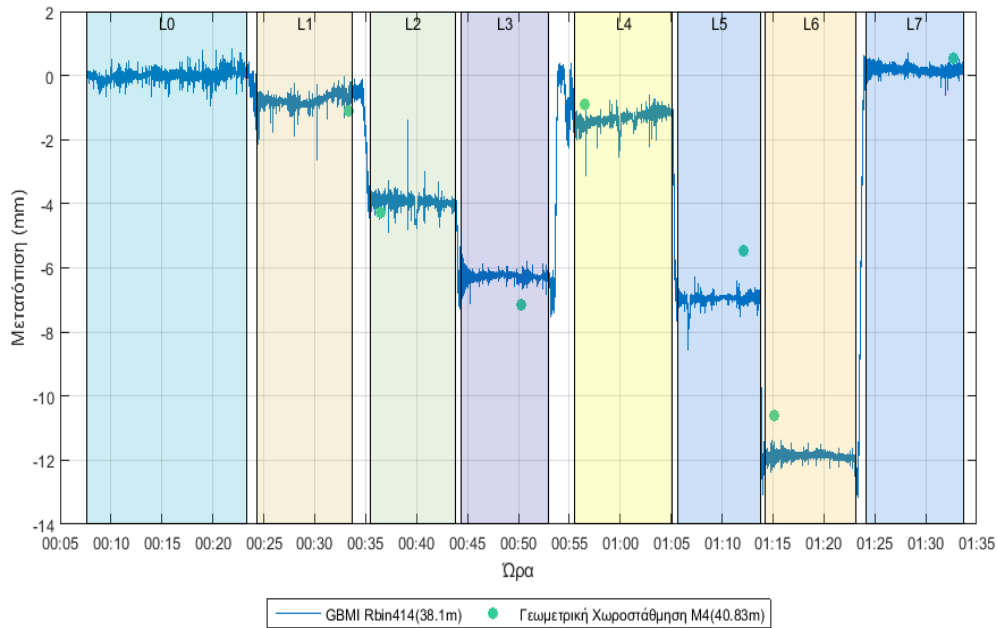
σήματος/θορύβου. Το σημείο M1 βρίσκεται εκτός της γέφυρας και δεν θα ελεγχθεί, ενώ τα υπόλοιπα σημεία της χωροστάθμησης βρίσκονται είτε στην διαχωριστική γραμμή είτε στην πλευρά της Ελευσίνας και επομένως η σύγκριση δεν θα είναι ορθή. Παρακάτω απεικονίζονται οι θέσεις της γεωμετρικής χωροστάθμησης και των αντίστοιχων πρισμάτων πάνω στο κατάστρωμα της γέφυρας.



**Σχήμα 54.** Σχηματική αναπαράσταση χωροσταθμικών σημείων(κόκκινοι κύκλοι) και θέσεων πρισμάτων(Rbin, τρίγωνα ματζέντα)

### 5.3.1 Ανάλυση για κάθε θέση

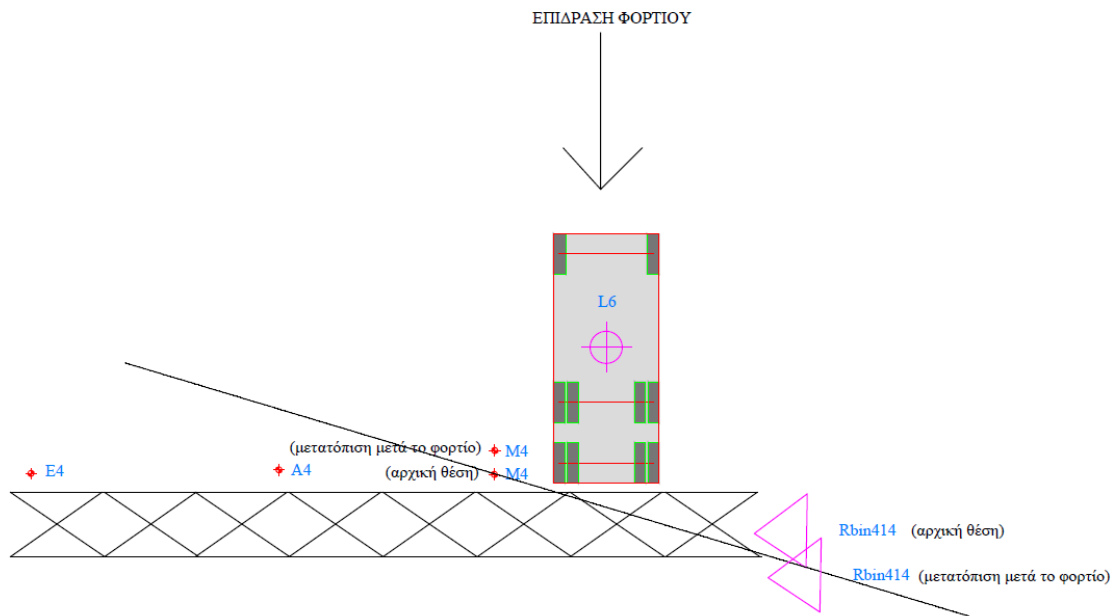
Αρχικά έγινε απεικόνιση των μετατοπίσεων στα σημεία Rbin414 (Σχήμα ), Rbin250 (Σχήμα ), και Rbin140 (Σχήμα ), τα οποία έχουν υψηλό λόγο σήματος/θορύβου και βρίσκονται κοντά στα χωροσταθμικά σημεία M4, M7 και M9, αντίστοιχα (Σχήμα 54). Στα διαγράμματα επίσης οριοθετούνται οι περιοχές για κάθε σενάριο φόρτισης. Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι οι μετρήσεις του radar βρίσκονται σε σχετικά καλή συμφωνία με τις μετρήσεις της γεωμετρικής χωροστάθμησης για τα σημεία M4 και M7.



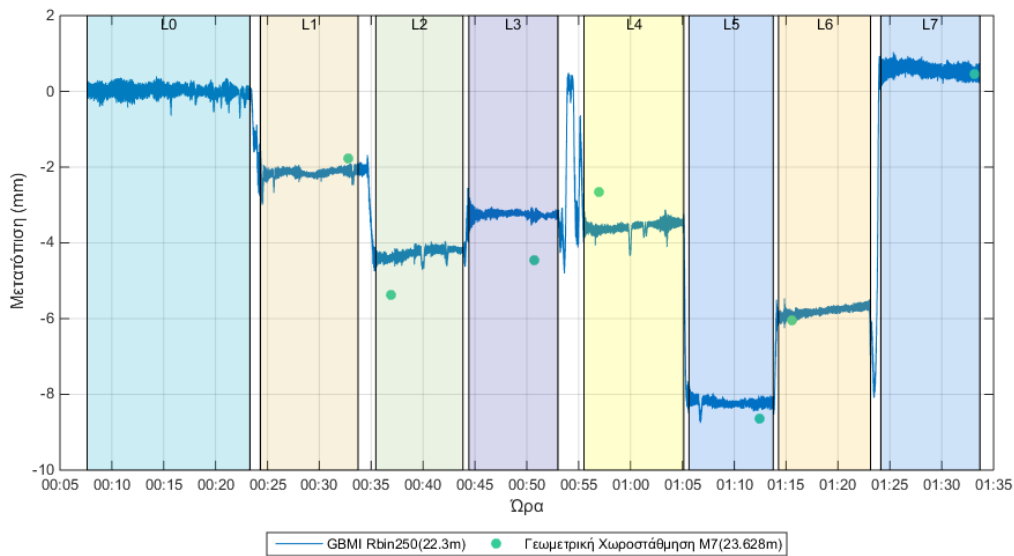
**Σχήμα 55.** Διάγραμμα χρονοσειράς μετατοπίσεων GBMI στη θέση Rbin414 (D: 38.1m) και μετρήσεις γεωμετρικής χωροστάθμησης στο σημείο M4 (D: 40.83m) για κάθε σενάριο φόρτισης.

Συγκεκριμένα όπως φαίνεται και στο παραπάνω διάγραμμα οι μετρήσεις του radar στο σημείο Rbin414 και γεωμετρικής χωροστάθμησης στο σημείο M4, σχεδόν συμπίπτουν για τα σενάρια L1, L2, L3, L4 και L7, καθώς η θέση του φορτίου βρίσκεται κοντά στις θέσεις αντηριδίων ενώ για τα σενάρια L5 και L6 οι μετρήσεις της γεωμετρικής χωροστάθμησης δίνουν μικρότερη βύθιση από τις αντίστοιχες του radar. Να σημειωθεί ότι στη συγκεκριμένη περιοχή η μέγιστη βύθιση παρουσιάζεται για για το σενάριο L6 (κατά το οποίο το φορτηγό βρίσκεται κοντά στα σημεία από την πλευρά του Μαρκόπουλου –Σχήμα 54) και με τις δύο μεθόδους. Συγκεκριμένα αυτό συμβαίνει καθώς στη θέση L6 όπου είναι τοποθετημένο το φορτίο(φορτηγό), το σημείο όπου είναι τοποθετημένο το πρίσμα Rbin414 όπως φαίνεται στο σχήμα δέχεται περισσότερο φορτίο σε σχέση με την θέση M4 της γεωμετρικής χωροστάθμησης, επομένως το σημείο Rbin414 βυθίζεται περισσότερο σε σχέση με το σημείο M4 όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 56. Ομοίως και στις L4 και L5 οι μετατοπίσεις είναι μεγαλύτερες στο πρίσμα Rbin414.





**Σχήμα 56.** Μετατόπιση Rbin414 και χωροσταθμικού σημείου M4 για το σενάριο L6.

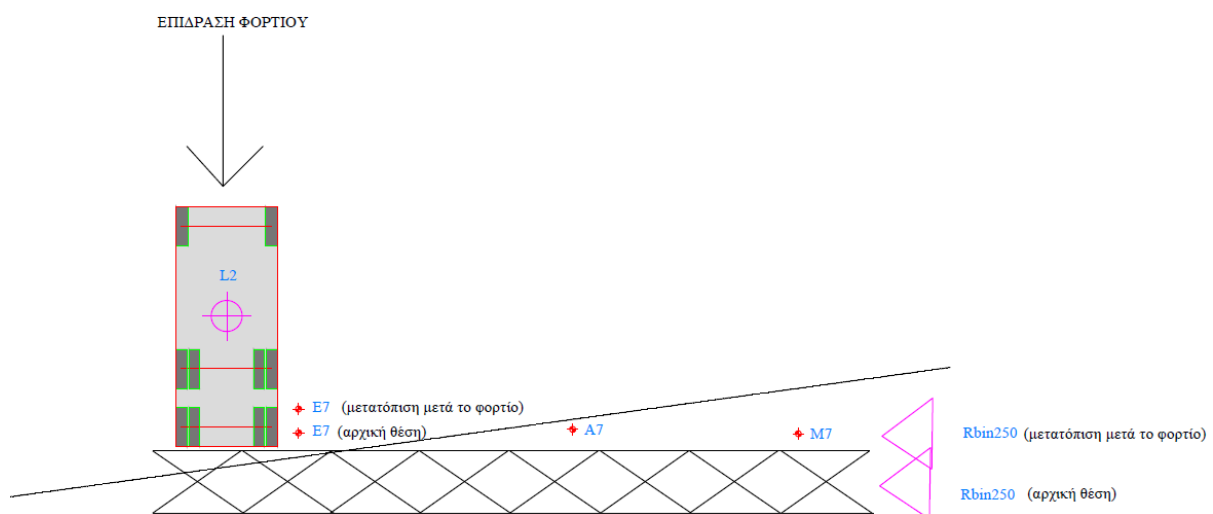


**Σχήμα 57.** Διάγραμμα χρονοσειράς μετατοπίσεων GBMI στη θέση Rbin250 D: 22.3m) και μετρήσεις γεωμετρικής χωροστάθμησης στο σημείο M7 (D: 23.63m) για κάθε σενάριο φόρτισης.

Αντίστοιχα, οι μετρήσεις του radar στο σημείο Rbin250 (απόσταση 22.3 m ) και της γεωμετρικής χωροστάθμησης στο σημείο M7 (απόσταση 23.628 m), σχεδόν συμπίπτουν για τα σενάρια L1, L5, L6 και L7, ενώ παρουσιάζουν μικρές εκατέρωθεν αποκλίσεις για τα σενάρια L2, L3 και L4. Να σημειωθεί ότι στη συγκεκριμένη περιοχή η μέγιστη βύθιση

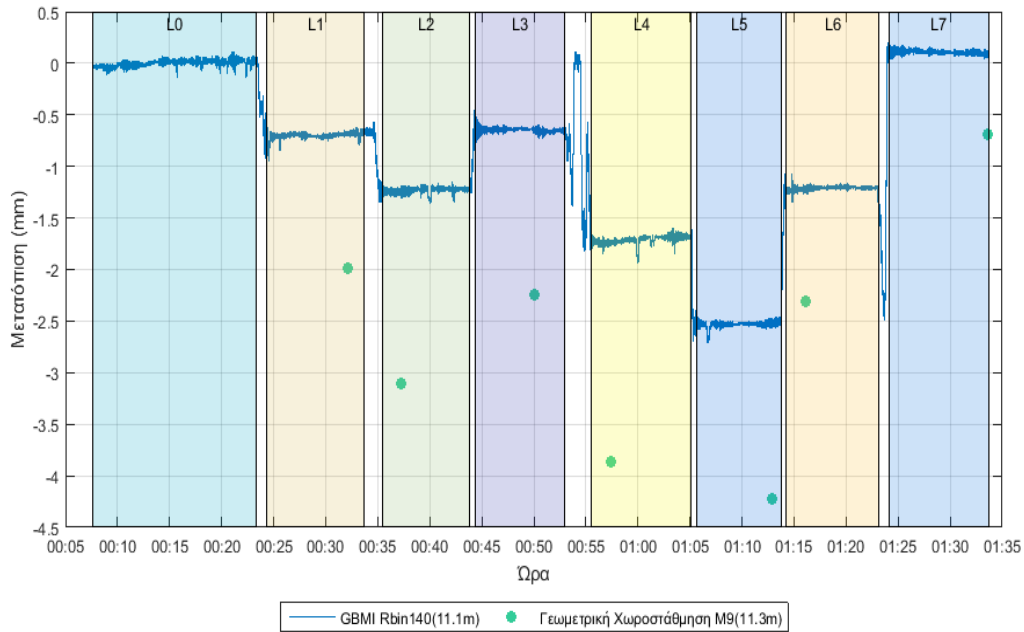
παρουσιάζεται για το για το σενάριο L5 (κατά το οποίο το φορτηγό βρίσκεται κοντά στα σημεία από την πλευρά του Μαρκόπουλου – Σχήμα ) και με τις δύο μεθόδους.

Στη θέση L2,L3,L4 όπου είναι τοποθετημένο το φορτίο(φορτηγό), το σημείο όπου είναι τοποθετημένο το πρίσμα Rbin250 όπως φαίνεται στο σχήμα 58 δέχεται λιγότερο φορτίο σε σχέση με την θέση M7 της γεωμετρικής χωροστάθμησης, επομένως το σημείο Rbin250 βυθίζεται λιγότερο σε σχέση με το σημείο M7.



**Σχήμα 58.** Μετατόπιση Rbin250 και χωροσταθμικού σημείου M7 για το σενάριο L2.

Τέλος δεν ισχύει το ίδιο για τις μετρήσεις του radar στο σημείο Rbin140 (απόσταση 11.1 m) και της γεωμετρικής χωροστάθμησης στο σημείο M9 (απόσταση 11.3 m), όπου οι διαφορές είναι σημαντικές για όλα τα σενάρια αν και οι βυθίσεις σε αυτή την περίπτωση είναι οι μικρότερες σε σχέση με τις άλλες περιπτώσεις. Ενδιαφέρον επίσης παρουσιάζει ότι οι μετρήσεις της γεωμετρικής χωροστάθμησης για το συγκεκριμένο σημείο δείχνουν για όλα τα σενάρια μεγαλύτερες βυθίσεις από τις αντίστοιχες του radar και μάλιστα για το σενάριο L7 κατά το οποίο δεν υπάρχει στατική φόρτιση (φορτηγό στην γέφυρα) παρουσιάζουν βύθιση περίπου 0.75 mm. Επίσης στη συγκεκριμένη περιοχή η μέγιστη βύθιση παρουσιάζεται για το για το σενάριο L5 και όχι για το σενάριο L4 (κατά το οποίο το φορτηγό βρίσκεται κοντά στα σημεία από την πλευρά του Μαρκόπουλου – Σχήμα 41) και με τις δύο μεθόδους.



**Σχήμα 59.** Διάγραμμα χρονοσειράς μετατοπίσεων GBMI στη θέση Rbin140 ( $D: 11.1m$ ) και μετρήσεις γεωμετρικής χωροστάθμισης στο σημείο M9 ( $D: 11.3m$ ) για κάθε σενάριο φόρτισης.

Τα αριθμητικά αποτελέσματα των δύο μεθόδων καθώς και οι διαφορές του για την ίδια χρονική στιγμή και τις αντίστοιχες θέσεις φαίνονται στους ακόλουθους πίνακες (Πίνακες Πίνακας 14- Πίνακας 16). Από τα αποτελέσματα παρατηρούμε ότι για τα σημεία (Rbin414,M4) η μέγιστη απόκλιση των μετρήσεων είναι 2,34mm για βύθιση (7.85,5.48mm) στο σενάριο L5 ενώ η μέγιστη εκτιμώμενη βύθιση είναι (13.21,10.90mm) στο σενάριο L6. Για τα σημεία (Rbin250,M7) η μέγιστη απόκλιση των μετρήσεων είναι 1,09mm για βύθιση (3.75, 2,65mm) στο σενάριο L4 ενώ η μέγιστη εκτιμώμενη βύθιση είναι (8.30,8.64mm) στο σενάριο L5. Τέλος για τα σημεία (Rbin140,M9) η μέγιστη απόκλιση των μετρήσεων είναι -1,55mm για βύθιση (-2.14, -3.69mm) στο σενάριο L4 ενώ η μέγιστη εκτιμώμενη βύθιση είναι (-3.12,-4.22mm) στο σενάριο L5. Παρατηρούμε ότι για όλες τις περιπτώσεις η μέγιστη απόκλιση των μετρήσεων σημειώνεται στο προηγούμενο σενάριο από αυτό που παρατηρείται η μέγιστη βύθιση.

**Πίνακας 14.** Μετρήσεις στις αντίστοιχες θέσεις και ώρα. Χωροσταθμικό σημείο M4 - Απόσταση : 40.82 m. Σημείο GBMI Rbin414 - Απόσταση : 38.1 m.

Σενάριο	Ώρα	Γεωμετρική Χωροστάθμηση (mm)	Μετρήσεις ραντάρ (mm)	Διαφορά Μετρήσεων (mm)
L1	0:33:20	-1.110	-1.005	-0.105
L2	0:36:27	-4.260	-3.936	-0.324
L3	0:50:19	-7.140	-6.443	-0.697
L4	0:56:32	-0.900	-1.703	0.803
L5	1:12:09	-5.480	-7.287	1.807
L6	1:15:09	-10.620	-12.085	1.465
L7	1:32:42	0.530	-0.113	0.643

**Πίνακας 15.** Μετρήσεις στις αντίστοιχες θέσεις και ώρα. Χωροσταθμικό σημείο M7 - Απόσταση : 23.628 m. Σημείο GBMI Rbin250 - Απόσταση : 22.3 m.

Σενάριο	Ώρα	Γεωμετρική Χωροστάθμηση (mm)	Μετρήσεις ραντάρ (mm)	Διαφορά Μετρήσεων (mm)
L1	0:32:46	-1.770	-1.513	-0.257
L2	0:36:58	-5.560	-3.520	-2.040
L3	0:50:41	-4.450	-2.727	-1.723
L4	0:56:59	-2.820	-2.946	0.126
L5	1:12:24	-8.640	-6.934	-1.706
L6	1:15:35	-6.550	-4.743	-1.807
L7	1:33:13	0.450	0.194	0.256

**Πίνακας 16.** Μετρήσεις στις αντίστοιχες θέσεις και ώρα. Χωροσταθμικό σημείο M9 - Απόσταση : 11.3 m. Σημείο GBMI Rbin140 – Απόσταση 11.1 m

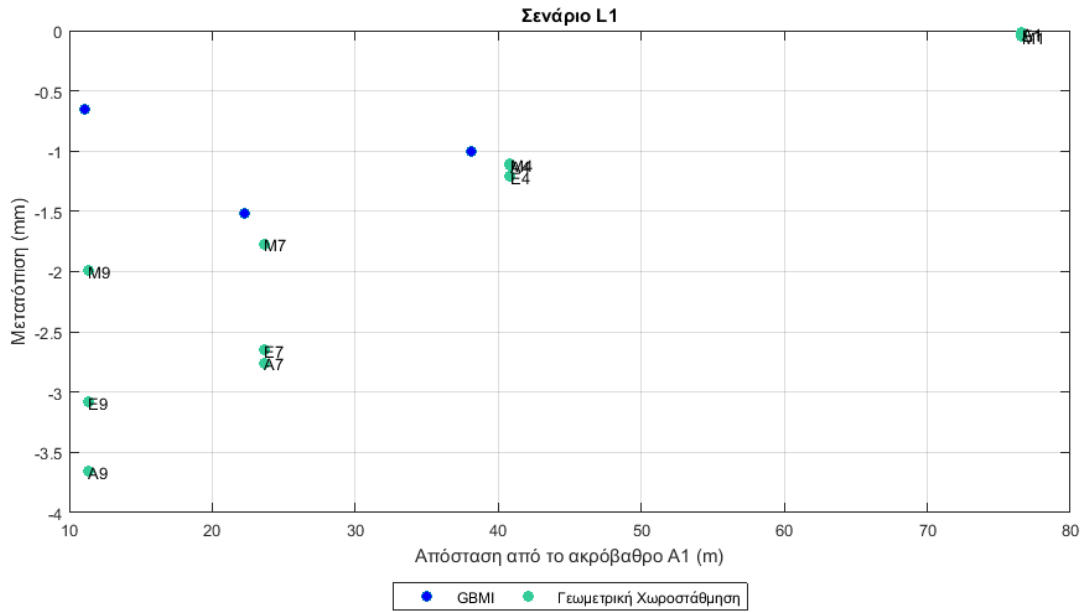
Σενάριο	Ώρα	Γεωμετρική Χωροστάθμηση (mm)	Μετρήσεις ραντάρ (mm)	Διαφορά Μετρήσεων (mm)
L1	0:32:10	-1.990	-0.649	-1.341
L2	0:37:16	-3.110	-1.187	-1.923
L3	0:50:02	-2.240	-0.645	-1.595
L4	0:57:25	-3.860	-1.718	-2.142
L5	1:12:55	-4.220	-2.489	-1.731
L6	1:16:10	-2.310	-1.210	-1.100
L7	1:33:35	-0.690	0.134	-0.824

### 5.3.2 Ανάλυση για κάθε σενάριο

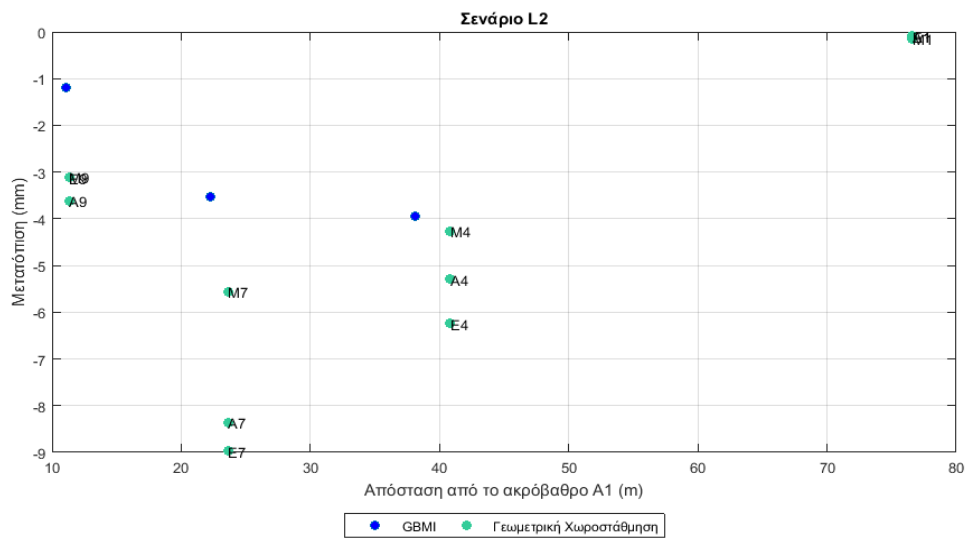
Στη συνέχεια εξετάστηκε η μορφή των μετατοπίσεων στη γέφυρα για κάθε σενάριο. Για τα σημεία γεωμετρικής χωροστάθμησης έχουμε μοναδικές μετρήσεις σε κάθε σενάριο. Δεν ισχύει όμως αυτό για τα αντίστοιχα σημεία του radar στο οποίο οι μετρήσεις είναι συνεχείς. Προκειμένου να πάρουμε μια μοναδική εκτίμηση για κάθε σενάριο εντοπίστηκαν τα δεδομένα των μετρήσεων για το αντίστοιχο σενάριο και υπολογίστηκε με βάση τον αντίστοιχο χρόνο καταγραφής.

Τα αποτελέσματα φαίνονται στα επόμενα διαγράμματα (Σχήμα - Σχήμα 66)

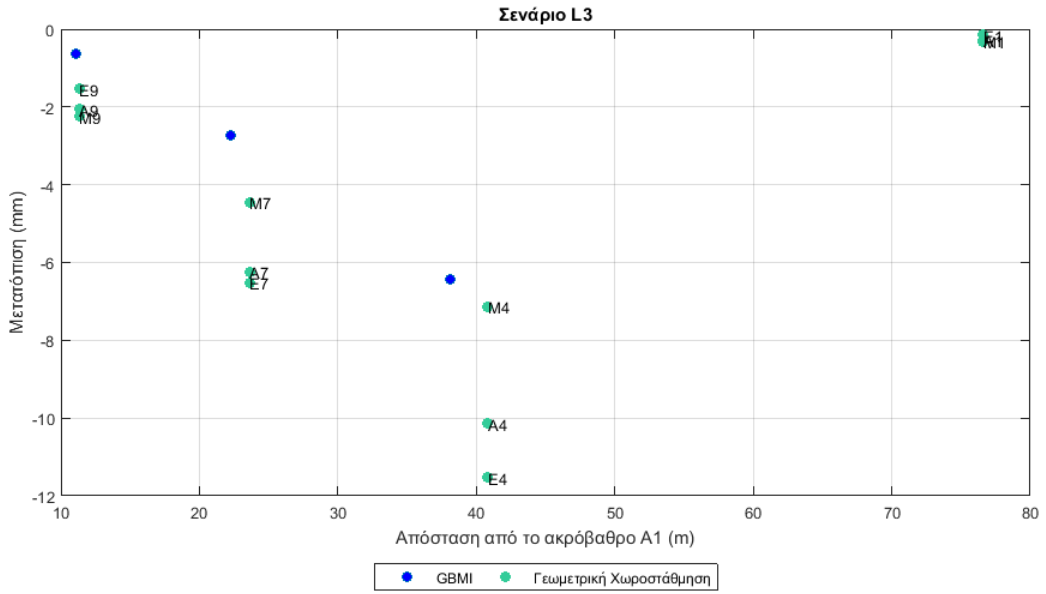
Από αυτά τα γραφήματά είναι φανερό ότι αν και υπάρχουν διαφορές μεταξύ των μετρήσεων η γενική μορφή των μετατοπίσεων όπως υπολογίζεται με τις δύο μεθόδους βρίσκεται σε αντιστοιχία για όλα τα σενάρια πλην του σεναρίου L7 στο οποίο όμως οι μετατοπίσεις είναι σχεδόν μηδενικές.



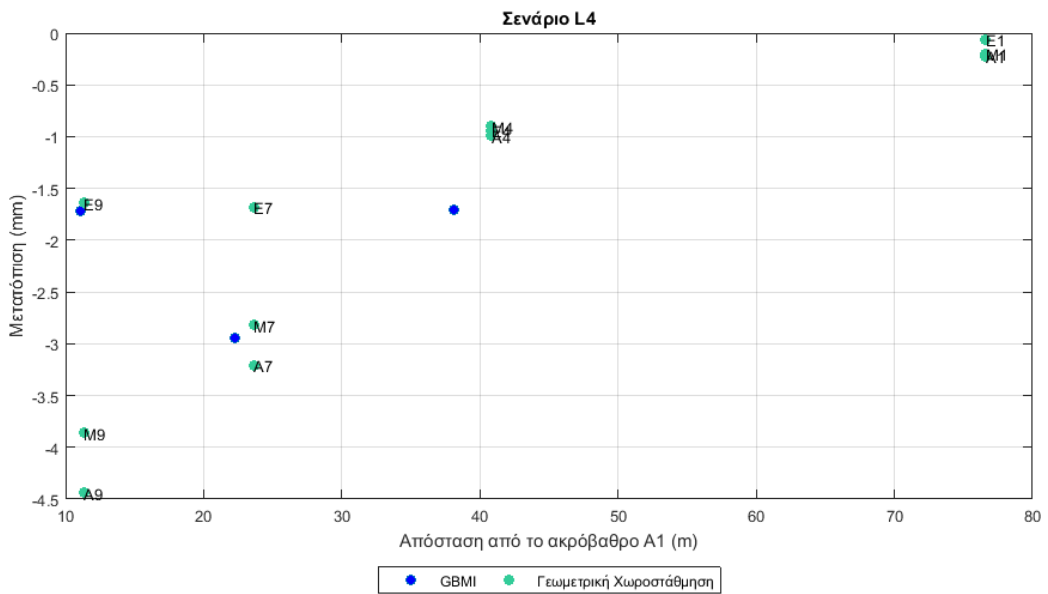
Σχήμα 60. Μετατοπίσεις κατά μήκος της γέφυρας με την μέθοδο της γεωμετρικής χωροστάθμισης και της μικροκυματικής συμβολομετρίας (GBMI). Σενάριο φόρτισης L1.



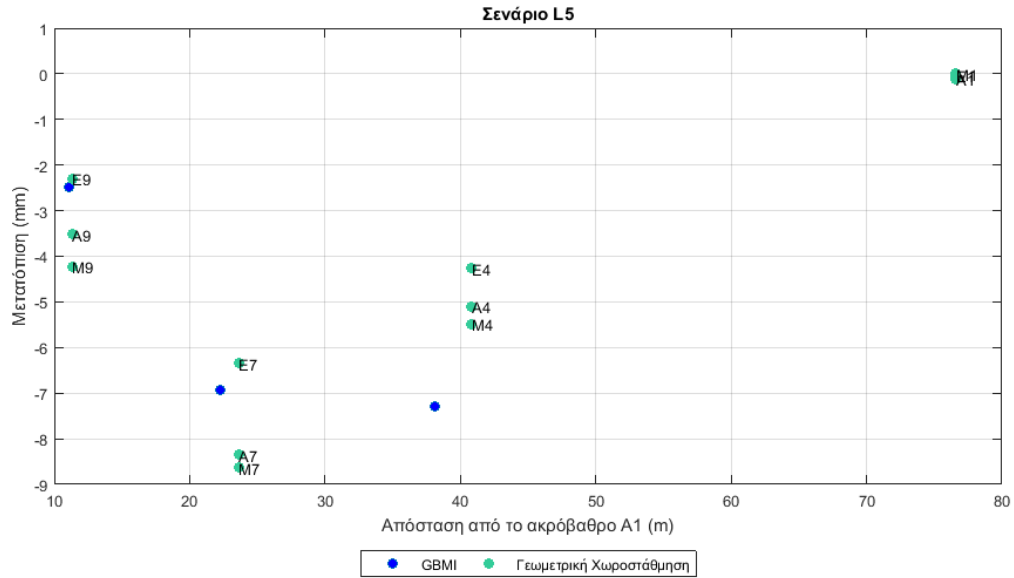
Σχήμα 61. Μετατοπίσεις κατά μήκος της γέφυρας με την μέθοδο της γεωμετρικής χωροστάθμισης και της μικροκυματικής συμβολομετρίας (GBMI). Σενάριο φόρτισης L2.



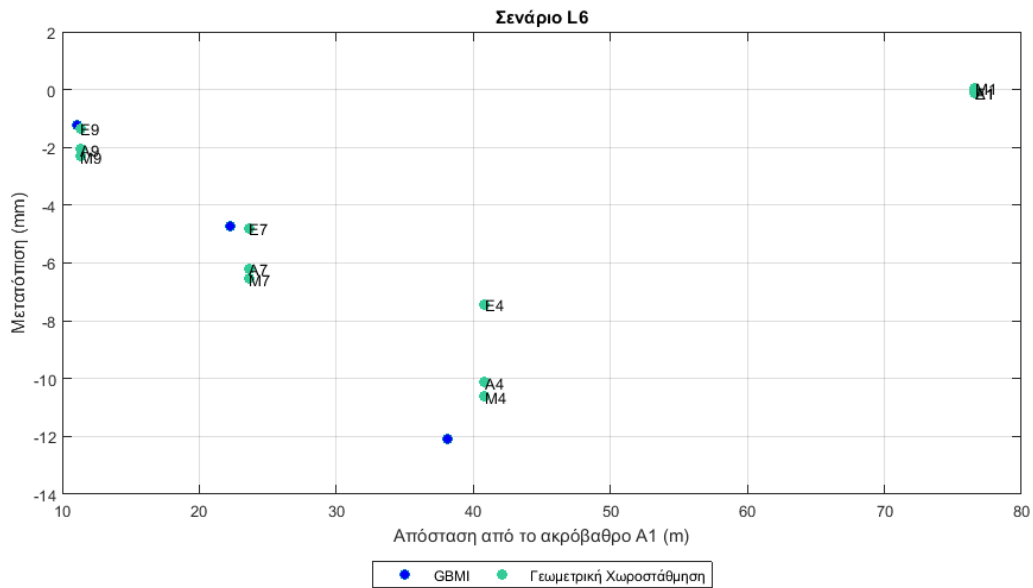
**Σχήμα 62.** Μετατοπίσεις κατά μήκος της γέφυρας με την μέθοδο της γεωμετρικής χωροστάθμισης και της μικροκυματικής συμβολομετρίας (GBMI). Σενάριο φόρτισης L3.



**Σχήμα 63.** Μετατοπίσεις κατά μήκος της γέφυρας με την μέθοδο της γεωμετρικής χωροστάθμισης και της μικροκυματικής συμβολομετρίας (GBMI). Σενάριο φόρτισης L4.

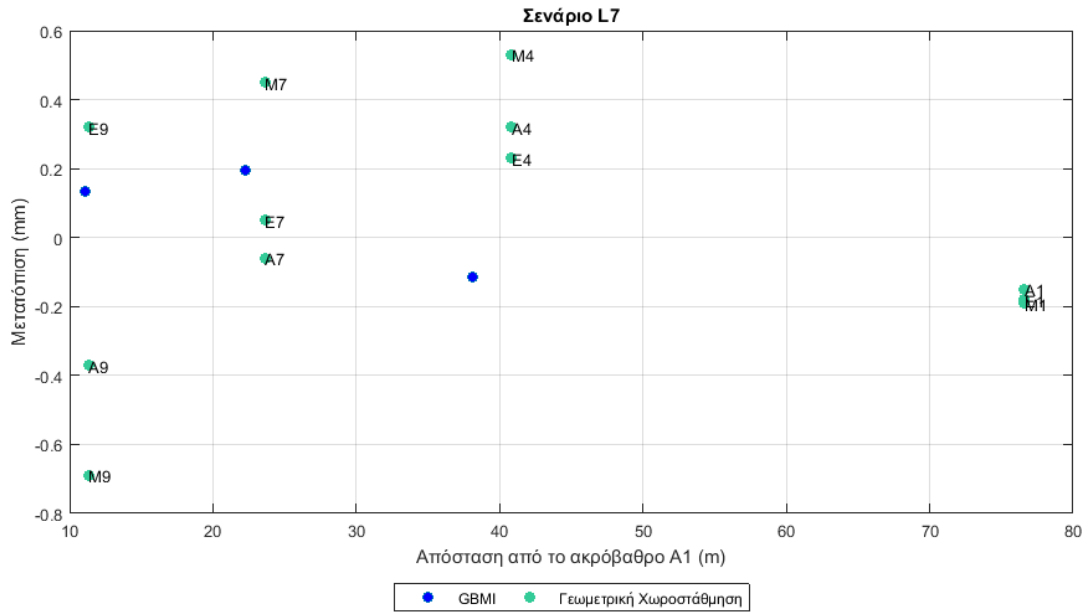


*Σχήμα 64. Μετατοπίσεις κατά μήκος της γέφυρας με την μέθοδο της γεωμετρικής χωροστάθμισης και της μικροκυματικής συμβολομετρίας (GBMI). Σενάριο φόρτισης L5.*



*Σχήμα 65. Μετατοπίσεις κατά μήκος της γέφυρας με την μέθοδο της γεωμετρικής χωροστάθμισης και της μικροκυματικής συμβολομετρίας (GBMI). Σενάριο φόρτισης L6.*





*Σχήμα 66. Μετατοπίσεις κατά μήκος της γέφυρας με την μέθοδο της γεωμετρικής χωροστάθμισης και της μικροκομματικής συμβολομετρίας (GBMI). Σενάριο φόρτισης*

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας πραγματοποιήθηκε μελέτη μεθόδων παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας γεφυρών. Συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκαν οι εξής εργασίες:

- Συνοπτική της βιβλιογραφίας για τις δημοφιλέστερες μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση των γεφυρών.
- Ανάλυση της σύγχρονης μεθόδου της επίγειας συμβολομετρίας μικροκυματικής ακτινοβολίας και της μεθόδου γεωμετρικής χωροστάθμησης.
- Υλοποίηση πειραμάτων δοκιμαστικών φορτίων με χρήση φορτηγού και ανάλυση των μετρήσεων που αποσκοπούν στον προσδιορισμό μετατοπίσεων στη καλωδιωτή γέφυρα ΣΕΑ Παλλήνης κάτω από διάφορα σενάρια φόρτισης.

Από τις παραπάνω αναλύσεις προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Υπάρχουν πολλά διαφορετικά συστήματα για την παρακολούθηση των γεφυρών. Τα κλασσικά συστήματα που βασίζονται σε αισθητήρες όπως τα επιταχυνσιμόμετρα και τα κλισίμετρα συνεχίζουν να χρησιμοποιούνται εκτενώς μιας και είναι αξιόπιστα και έχουν την δυνατότητα συνεχής παρακολούθησης της γέφυρας. Νέες μέθοδοι και συστήματα που βασίζονται στον απομακρυσμένο έλεγχο της γέφυρας χρησιμοποιώντας λήψεις εικόνας ή σάρωση μέσω laser παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα και χρησιμοποιούνται πλέον εκτενώς για την παρακολούθηση των γεφυρών.

Η μέθοδος της *επίγειας συμβολομετρίας μικροκυματικής ακτινοβολίας* είναι μια πολλά υποσχόμενη μέθοδος η οποία παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα όπως

- 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.
- Μπορεί να λάβει μετρήσεις όλη τη διάρκεια της μέρας και κάτω από οποιοσδήποτε καιρικές συνθήκες.
- Προσφέρει τη δυνατότητα μέτρησης σε μη προσβάσιμες ή ψηλές κατασκευές στις οποίες δεν είναι εφικτό να γίνουν μετρήσεις που απαιτούν πρόσβαση.
- Παρουσιάζει ακρίβεια μετακινήσεων έως 1/10 mm.

Αλλά και μειονεκτήματα όπως

- Η εγκατάσταση του απαιτεί περιορισμένο χρόνο.
- Σχετικές μετατοπίσεις μόνο σε μία διεύθυνση (ακτινικά)
- Αδυναμία ανίχνευσης πολλαπλών στόχων στην ίδια απόσταση από τον αισθητήρα
- Το κόστος είναι πολύ υψηλό

Η μέθοδος της *γεωμετρικής χωροστάθμησης* δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την συνεχή παρακολούθηση της κατασκευής, είναι όμως μια μέθοδος αξιόπιστη η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο άλλων μεθόδων. Στα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η αμεσότητα στον υπολογισμό των μετατοπίσεων. Ωστόσο οι καιρικές συνθήκες και ο φωτισμός μπορούν να επηρεάσουν την ακρίβεια της μέτρησης.

Κατά την πειραματική διαδικασία ελέγχθηκε η καλωδιωτή γέφυρα ΣΕΑ Παλλήνης σε περιβαλλοντικά φορτία και σε ισχυρές στατικές φορτίσεις. Υλοποιήθηκαν οκτώ σενάρια φόρτισης της γέφυρας εκ των οποίων το πρώτο (L0) και το τελευταίο (L7) περιλαμβάνει μετρήσεις της γέφυρας σε περιβαλλοντικές συνθήκες ενώ τα υπόλοιπα έξι σενάρια (L1 – L6) σε στατικές φορτίσεις. Οι μετρήσεις συμπεριέλαβαν τις μετρήσεις σε δώδεκα χωροσταθμικά σημεία ανά άξονα με τον ψηφιακό χωροβάτη Leica DNA03 και κατά μήκος της γέφυρας από την πλευρά του Μαρκόπολου με το σύστημα IBIS-S.

Η διαδικασία γεωμετρικής χωροστάθμησης αν και σχετικά απλή είναι χρονοβόρα και απαιτεί εξειδικευμένο προσωπικό στο πεδίο μετρήσεων.

Η πειραματική εγκατάσταση του συστήματος IBIS-S ήταν σχετικά εύκολη αν και απαιτείται παροχή ρεύματος. Τα δεδομένα αποθηκεύονται αυτόματα στον υπολογιστή ενώ για την ανάλυση τους προσφέρεται ειδικό λογισμικό.

Οι πειραματικές μετρήσεις με το IBIS – S δίνουν τις μετατοπίσεις κατά μήκος της γέφυρας για όλη την διάρκεια του πειράματος.

Ο χαμηλός λόγος σήματος/θορύβου των μετρήσεων του radar σε περιοχές της γέφυρας είχε ως αποτέλεσμα

- τον περιορισμό των διαθέσιμων προς ανάλυσης σημείων, καθώς και
- την μέτρηση σε σημεία κοντά αλλά σε διαφορετικές θέσεις από αυτές των χωροσταθμικών σημείων, με αποτέλεσμα οι ακόλουθες συγκρίσεις να μην μπορούν να είναι απόλυτες.

Η γενική μορφή των μετατοπίσεων κατά μήκος της γέφυρας όπως υπολογίστηκαν με τις δύο μεθόδους βρίσκεται σε αντιστοιχία για όλα τα σενάρια πλην του σεναρίου L7 στο οποίο όμως οι μετατοπίσεις είναι σχεδόν μηδενικές.

Από την σύγκριση των χρονικών αποκρίσεων του radar στα σημεία Rbin414, Rbin250 και Rbin140 και της γεωμετρικής χωροστάθμησης στα χωροσταθμικά σημεία M4, M7 και M9, αντίστοιχα, εξήχθησαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Οι μετρήσεις του radar βρίσκονται σε σχετικά καλή συμφωνία με τις μετρήσεις της γεωμετρικής χωροστάθμησης για τα σημεία προς το κέντρο της γέφυρας (M4 και M7) ενώ διαφέρουν σημαντικά προς τα άκρα της γέφυρας (σημείο M9).
- Οι μέγιστες βυθίσεις παρατηρήθηκαν και με τις δύο μεθόδους στα ίδια σενάρια.
- Οι μέγιστες βυθίσεις για τα σημεία προς το κέντρο της γέφυρας (M4 και M7) παρουσιάστηκαν για τα σενάρια φόρτισης στα οποία η θέση του στατικού φορτίου (φορτηγό) είναι κοντά στα σημεία μέτρησης (L6 και L5, αντίστοιχα).
- Οι μέγιστες βυθίσεις για το σημείο M9 στο άκρο της γέφυρας δεν εμφανίστηκε για το σενάριο L4 (στο οποίο το φορτηγό βρίσκεται κοντά στο σημείο M9) αλλά στο σενάριο L5 στο οποίο το φορτηγό βρίσκεται σχετικά κοντά στο σημείο M9 αλλά πιο κοντά προς το κέντρο της γέφυρας
- Οι ελάχιστες βυθίσεις εμφανίστηκαν στα σενάρια L0 και L7 στα οποία δεν εφαρμόζεται στατικό φορτίο.
- Σύμφωνα με τα παραπάνω καταδεικνύεται η αξιοπιστία της προτεινόμενης μεθόδου σε ανάλογα έργα.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

### Ξενόγλωσση

Baifeng, J.I. and Weilian Q.U. (2008). The Research of Acoustic Emission Techniques for Non Destructive Testing and Health Monitoring on Civil Engineering Structures. *International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, Beijing, China, April 21-24, 2008.

Bernardini, G. et al. (2007). Microwave interferometer for ambient vibration measurements on civil engineering structures: 1. Principles of the radar technique and laboratory tests, *Proceedings of Int. Conf. on Experimental Vibration Analysis of Civil Engineering Structures (EVACES'07)*. 143-152.

Carlos, M.F. (2003). Acoustic Emission: Heading the Warning Sounds from Materials. <http://ASTM.org>

Charles, M. (1998). Basics of levelling. *Lecture Notes, 1998 GLOSS Training Course at University of Cape Town* - Figures by Gillian Spencer

Cunha A. and Caetano E. (1999). Dynamic measurements on stay cables of cable-stayed bridges using an interferometry laser system. *Experimental Techniques*, 23(3), 38-43

De Roover, C., Vantomme, J., Wastiels, J. and Taerwe, L. (2002). Deformation Analysis of a Modular Connection System by Digital Image Correlation. *Experimental Techniques*. Nov/Dec 2002. pp. 37-40.

De Roover, C., Vantomme, J., Wastiels, J. and Taerwe, L. (2003). DIC for Deformation Assessment: A Case Study. *European Journal of Mechanical and Environmental Engineering*, March, pp. 13-19.

Farrar, C.R., Darling, T.W., Migliori, A. and Baker, W.E. (1999). Microwave interferometers for non-contact vibration measurements on large structures, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 13(2), 241-253.

Farrar, C.R. and Cone, K.M., (1995). Vibration testing of the I-40 bridge before and after the introduction of damage, *Proceedings of 13th Int. Modal Analysis Conference (IMACXIII)*.

Gastineau, A., Johnson, T. and Schultz, A. (2009). Bridge Health Monitoring and Inspections – A Survey of Methods, *Final Report MN/RC 2009-29, Minnesota Department of Transportation*. <http://www.lrrb.org/pdf/200929.pdf>

Gentile, C. and Bernardini, G. (2008). Output-only modal identification of a reinforced concrete bridge from radar-based measurements, *NDT&E International*, 41(7), 544-553.

Gentile, C. (2009). Radar-based measurement of deflections on bridges and large structures: advantages, limitations and possible applications, *Proc. SMART'09*.

Gikas, V. and Daskalakis, S. (2011). Radar-based Measurements of the Oscillation Parameters on Large Civil Engineering Structures. *Joint International Symposium on Deformation Monitoring*, 2-4 November, Hong Kong, China.

Henderson, F.M. & Lewis, A.J. (Eds.) (1998). *Manual of Remote Sensing. Principles and Applications of Imaging Radar*, Wiley & Sons, 3rd Ed.

IDS Ingegneria Dei Sistemi S.p.A. (2009). *Image By Interferometric Survey-Data Viewer (IBISDV)*, v. 03.04.005 User Manual, Pisa, March.

IDS Ingegneria Dei Sistemi S.p.A. (2010). *Image By Interferometric Survey-S (IBIS-S) Controller*, v 02.02.000 User Manual, Pisa, July.

Kaito, K., Abe, M. and Fujino, Y. (2005). Development of a non-contact scanning vibration measurement system for real-scale structures, *Structure and Infrastructure Engineering*, 1(3), 189-205.

Kulchin, Y., Vitrik, O., Dyshluk, A., Anochin, P. and Ilin, A. (2004). Health Monitoring on Engineering Structures on the Basis of Fiber Optic Tilt Sensor. *Fundamental Problems of Optoelectronics and Microelectronics II*. Sept. 2004. pp. 288-294.

Lee, J.J. and Shinozuka, M. (2006). A vision-based system for remote sensing of bridge displacement. *NDT&E International*. 39(5), 425-431.

Malesa, M. et. al. (2010). Monitoring of civil engineering structures using Digital Image Correlation technique. *14th International Conference on Experimental Mechanics ICEM 14*. Poitiers, France, 4 - 9 July. <http://www.ippt.pan.pl/Repository/o1859.pdf>

Meng, X., Dodson, A.H. and Roberts, G.W. (2007). Detecting bridge dynamics with GPS and triaxial accelerometers, *Engineering Structures*, 29(11), 3178-3184.

Mina, E. and Larson, J. (2007). Crucial Factors in Surveying with 3D Laser Scanners. *Our Common Borders Conference - Safety, Security, and the Environment Through Remote Sensing*, Ottawa, Canada. Oct. 28-Nov. 1.

Nickitopoulou, A., Protopsalti, K. and Stiros, S. (2006). Monitoring dynamic and quasi-static deformations of large flexible engineering structures with GPS: Accuracy, limitations and promises. *Engineering Structures*, 28(10), 1471-1482

Park, H.S., Lee, H.M., Adeli, H. and Lee, I. (2007). A New Approach for Health Monitoring of Structures: Terrestrial Laser Scanning. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 22, No. 1, pp. 19-30.

Pieraccini, M. et al. (2004). Highspeed CW step-frequency coherent radar for dynamic monitoring of civil engineering structures. *Electronics Letters*, 40(14), 907-908

Roberts, G.W., Meng, X. and Dodson, A. (2004). Integrating a Global Positioning System and Accelerometers to Monitor the Deflection of Bridges. *Journal of Surveying Engineering*, May, pp. 65-72.

Shigeishi, M., Colombo, S., Broughton, K., Rutledge, H., Batchelor, A. and Forde, M. (2001). Acoustic Emission to Assess and Monitor the Integrity of Bridges. *Construction and Building Materials*, Vol. 15, pp. 35-49.

Silva, S., Bateira, J. and Caetano, E. (2007). Development of a vision system for vibration analysis, *Proceedings of Int. Conf. on Experimental Vibration Analysis of Civil Engineering Structures (EVACES'07)*, 113-121.

Skolnik, M.I. (Ed.) (1990). Radar Handbook. McGraw-Hill.

Sohn, H. et.al. (2003). A Review of Structural Health Monitoring Literature: 1996-2001, *Los Alamos National Laboratory Report, LA-13976-MS*.

Taylor, J.D. (Ed.) (2001). Ultra-wideband radar technology. CRC Press

Vaccaro, R., Gindy, M., Nassif, H. and Velde, J. (2006). An Algorithm for Estimating Bridge Deflection from Accelerometer Measurements. *Conference Record - Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, Pacific Grove, CA, October, pp. 540-544.

Werner, T. and Morris, D. (2010). 3D Laser Scanning for Masonry Arch Bridges. *FIG Congress 2010 Facing the Challenges – Building the Capacity*, Sydney, Australia, 11-16 April. [https://www.fig.net/pub/fig2010/papers/ts04d%5Cts04d\\_werner\\_morris\\_4436.pdf](https://www.fig.net/pub/fig2010/papers/ts04d%5Cts04d_werner_morris_4436.pdf)

Zebker, H.A., Rosen, P.A. and Hensley, S. (1997). Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps. *Journal of Geophysical Research* 102: doi: 10.1029/96JB03804. issn: 0148-0227.

## Ελληνική

Καρπουζιάς Η. (2008). Εφαρμογές Παγκόσμιου Δορυφορικού Συστήματος Εντοπισμού Θέσης (GPS). *Πτυχιακή Εργασία, Τ.Ε.Ι. Θεσσαλονίκης, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Πολιτικών Έργων Υποδομής*, Θεσσαλονίκη.

Παναγιωτόπουλος, Ε. και Καριώτης, Γ. (2001). Τοπογραφία Ι. *Σημειώσεις μαθήματος, Τ.Ε.Ι. Σερρών*, Σέρρες.

Παπανικόλας, Π. Κ. (2008). Τεχνικά Γεφύρωσης Διαύλων Κνημίδας και Ωρεών, Σύγκριση με τη Ζεύξη του Ρίου-Αντιρρίου. *Εγνατία Οδός Α.Ε.*, Αθήνα, 15 Οκτωβρίου.  
[http://library.tee.gr/digital/m2345/m2345\\_papanikolas.pdf](http://library.tee.gr/digital/m2345/m2345_papanikolas.pdf)

Σταθόπουλος Σ., Κοτσανόπουλος Π., Σταθόπουλος Ε., Σταθόπουλος Κ., (2003). Καλωδιωτή γέφυρα ΣΕΑ Παλλήνης, *14ο Συνέδριο σκυροδέματος*, Κως, Ελλάδα, 15-17 Οκτωβρίου.

Φωτογραφίες - Διαδίκτυο

Wikipedia 1. Lake Pontchatrain Causeway Southbound  
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lake\\_Pontchatrain\\_Causeway\\_Southbound.jpg#mediaviewer/File:Lake\\_Pontchatrain\\_Causeway\\_Southbound.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lake_Pontchatrain_Causeway_Southbound.jpg#mediaviewer/File:Lake_Pontchatrain_Causeway_Southbound.jpg)

Wikipedia 2. Rio Bridge  
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rio\\_Bridge.jpg#mediaviewer/File:Rio\\_Bridge.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rio_Bridge.jpg#mediaviewer/File:Rio_Bridge.jpg)

Wikipedia 3. Akashi Bridge.  
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Akashi\\_Bridge.JPG#mediaviewer/File:Akashi\\_Bridge.JPG](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Akashi_Bridge.JPG#mediaviewer/File:Akashi_Bridge.JPG)

Wikipedia 4. Russian bridge" in Vladivostok  
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:%22Russian\\_bridge%22\\_in\\_Vladivostok.jpg#mediaviewer/File:%22Russian\\_bridge%22\\_in\\_Vladivostok.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:%22Russian_bridge%22_in_Vladivostok.jpg#mediaviewer/File:%22Russian_bridge%22_in_Vladivostok.jpg)

Wikipedia 5. Rio-Antirio bridge [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Rio-Antirio\\_bridge.jpg#mediaviewer/File:Rio-Antirio\\_bridge.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Rio-Antirio_bridge.jpg#mediaviewer/File:Rio-Antirio_bridge.jpg)

Wikipedia 6. Το Γεφύρι της Άρτας [σύνδεσμος](#)

Zanneioa. Δικτυωτή γέφυρα  
<http://zanneioa4group1englishclass2007.pbworks.com/w/page/9659449/technology>



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Στο παράρτημα επισυνάπτεται ο κώδικας MATLAB που αναπτύχθηκε για την εισαγωγή, απεικόνιση και σύγκριση των αποτελεσμάτων.

```
plotGraphs.m

clear, clc, close all
% Ανάλυση μετρήσεων
% Βασικό αρχείο εισαγωγής, διαχείριση και απεικόνισης των αποτελεσμάτων

% Πείραμα
% Παράμετροι της πειραματικής διαδικασίας

% Σενάρια φόρτισης
% L0 Μετρήσεις χωρίς στατικά φορτία - Περιβαλλοντικές συνθήκες
% L1 Στατική φόρτιση με το φορτηγό στη θέση L1
% L2 Στατική φόρτιση με το φορτηγό στη θέση L2
% L3 Στατική φόρτιση με το φορτηγό στη θέση L3
% L4 Στατική φόρτιση με το φορτηγό στη θέση L4
% L5 Στατική φόρτιση με το φορτηγό στη θέση L5
% L6 Στατική φόρτιση με το φορτηγό στη θέση L6
% L7 Μετρήσεις χωρίς στατικά φορτία - Περιβαλλοντικές συνθήκες

CaseNames = {'L0','L1','L2','L3','L4','L5','L6','L7'};

% Ημέρα διεξαγωγής του πειράματος
Day = '18-Feb-2014';

% Ώρα έναρξης και λήξης κάθε σεναρίου
DatesL = {
    '00:07:37' '0:23:19'
    '0:24:19' '0:33:44'
    '0:35:27' '0:43:51'
    '0:44:25' '0:53:00'
    '0:55:31' '1:05:08'
    '1:05:38' '1:13:45'
    '1:14:16' '1:23:08'
    '1:24:08' '1:33:41'
};

% Δημιουργία διανύσματος ημερομηνιών
DatesL = cellfun(@(x) [Day ' ' x],DatesL,'UniformOutput',false);
DatesLN = reshape(datum(DatesL(:)),8,2);

% Μετρήσεις γεωμετρικής χωροστάθμησης
% Οι υπολογισμένες τιμές γεωμετρικής χωροστάθμησης για κάθε σημείο

MGeoFull = [
    -0.02 -0.09 -0.29 -0.22 -0.11 -0.1 -0.15
    -1.12 -5.29 -10.14 -0.99 -5.1 -10.13 0.32
    -2.76 -8.36 -6.24 -3.21 -8.35 -6.19 -0.06
    -3.66 -3.61 -2.06 -4.44 -3.52 -2.06 -0.37
    -0.03 -0.09 -0.14 -0.06 -0.03 -0.09 -0.18
    -1.21 -6.24 -11.53 -0.94 -4.26 -7.43 0.23
    -2.65 -8.97 -6.51 -1.68 -6.34 -4.79 0.05
    -3.08 -3.12 -1.54 -1.64 -2.3 -1.34 0.32
    -0.05 -0.14 -0.32 -0.2 0.01 0.06 -0.19
    -1.11 -4.26 -7.14 -0.9 -5.48 -10.62 0.53
    -1.77 -5.56 -4.45 -2.82 -8.64 -6.55 0.45
    -1.99 -3.11 -2.24 -3.86 -4.22 -2.31 -0.69
];

%M1 = [ -0.050 -0.140 -0.320 -0.200 0.010 0.060 -0.190];
%M4 = [ -1.110 -4.085 -7.140 -1.255 -5.480 -10.905 0.530 ];
%M7 = [ -1.770 -5.374 -4.450 -2.654 -8.640 -6.044 0.450];
%M9 = [ -1.990 -2.924 -2.240 -3.694 -4.220 -1.804 -0.690];
%MGeo = [M4;M7;M9]';
```

```

MGeoNamesFull = {'A1','A4','A7','A9','E1','E4','E7','E9','M1','M4','M7','M9'};

% Αποστάσεις χωροσταθμικών σημείων από την αφετηρία (ακρόβαθρο A1)
MDistFull = [76.61 40.83 23.63 11.30 76.61 40.83 23.63 11.30 76.61 40.83 23.63 11.30];

% Ωρα λήψης των μετρήσεων
DatesMFull = {
    '0:27:52' '0:38:59' '0:52:36' '0:58:52' '1:08:46' '1:20:43' '1:26:45'
    '0:28:30' '0:38:14' '0:52:09' '0:58:33' '1:08:13' '1:21:15' '1:27:28'
    '0:28:55' '0:37:49' '0:51:45' '0:58:10' '1:07:41' '1:21:36' '1:27:57'
    '0:29:15' '0:37:35' '0:51:49' '0:57:44' '1:07:27' '1:22:05' '1:28:20'
    '0:25:30' '0:43:29' '0:44:42' '1:04:29' '1:06:00' '1:20:09' '1:28:43'
    '0:26:22' '0:42:06' '0:45:29' '1:03:08' '1:06:32' '1:18:50' '1:26:24'
    '0:26:49' '0:42:29' '0:45:45' '1:03:40' '1:06:52' '1:19:15' '1:25:55'
    '0:27:15' '0:43:05' '0:46:40' '1:04:02' '1:07:13' '1:19:49' '1:25:30'
    '0:33:44' '0:35:52' '0:49:35' '0:55:44' '1:13:13' '1:14:36' '1:32:20'
    '0:33:20' '0:36:27' '0:50:19' '0:56:32' '1:12:09' '1:15:09' '1:32:42'
    '0:32:46' '0:36:58' '0:50:41' '0:56:59' '1:12:24' '1:15:35' '1:33:13'
    '0:32:10' '0:37:16' '0:50:02' '0:57:25' '1:12:55' '1:16:10' '1:33:35'
};

%%
MGeo = MGeoFull(end-2:end,:);
MGeoNames = MGeoNamesFull(end-2:end);
MDist = MDistFull(end-2:end);
DatesM = DatesMFull(end-2:end,:);
%%
% Δημιουργία πίνακα ημερομηνιών
DatesMFull = cellfun(@(x) [Day ' ' x],DatesMFull,'UniformOutput',false);

DatesM = cellfun(@(x) [Day ' ' x],DatesM,'UniformOutput',false);
DatesMN = reshape(datenum(DatesM(:)),3,[]);

% Εισαγωγή της λίστας με τα σημεία μέτρησης GBMI
% Η λίστα είναι αποθηκευμένη μέσα από το λογισμικό IBIS Data Viewer στο
% αρχείο |ListRadar.txt|.

% Εισαγωγή των δεδομένων
ListF = dlmread('ListRadar.txt','\t',2,0);
% Keep
List = ListF([12 10 6],:);
display(List)
% Δημιουργία μεταβλητής για την διαχείριση των δεδομένων
Rbin = List(:, 1);
R = List(:, 2);
SR = List(:, 3);
SNRT = List(:, 4);
ThermicAccuracy = List(:, 5);
SNRe = List(:, 6);
EstimatedAccuracy = List(:, 7);
ProjectionFactor = List(:, 8);

% Δημιουργία ονομάτων σημείων
RadarNames = arrayfun(@(x) ['Rbin' int2str(x)],Rbin,'UniformOutput',false);

% Αποστάσεις σημείων
RadarDist = SR;

% Εισαγωγή των μετρήσεων
% Τα δεδομένα των μετρήσεων για τα παραπάνω σημεία είναι αποθηκευμένα μέσα
% από το λογισμικό IBIS Data Viewer στο αρχείο |TimeResponseRadar.txt|. Η
% λίστα εισάγεται χρησιμοποιώντας την εντολή |textscan|
load('R_D_M_All data.mat')

TimeR = R_D_M_ClTarget(:,1); % Διάνυσμα χρόνου σε sec
DataR = [R_D_M_ClTarget(:,2) ...
         R_D_M_CmTarget(:,2) ...
         R_D_M-CsTarget(:,2)]; % Μετρήσεις για κάθε σημείο
% Διάνυσμα ημερομηνιών
DatesR = datenum([Day ' 00:07:37']) + TimeR/(24*60*60);

% Σύγκριση μετρήσεων GBMI και γεωμετρικής χωροστάθμησης
% Εύρεση των μετρήσεων GBMI για τις αντίστοιχες θέσεις και ημερομηνίες της

```

```

% γεωμετρικής χωροστάθμησης.
%%
DatesMN_ = DatesMN(:);
for k = 1:length(DatesMN_)
    Ind = find(DatesR >= DatesMN_(k),1,'first');
    IndDate(k) = Ind;
    DatesRMN(k) = DatesR(Ind);
end
DatesRMN_S = cellstr(datestr(DatesRMN));
DatesRMN = reshape(DatesRMN,3,[]);
DatesRMN_S = reshape(DatesRMN_S,3,[]);

% Δείκτες των σημείων GBMI που αντιστοιχούν στις μετρήσεις της γεωμετρικής
% χωροστάθμησης
IndDate = reshape(IndDate,3,[]);

%%
% Επιλογή σημείων
% Επιλογή σημείων κοντά στα σημεία γεωμετρικής χωροστάθμησης
for k = 1:3
    [~,IndMeas(k)] = min(abs(MDist(k)-SR));
end
%IndMeas = [1 2 3];
% Μετρήσεις στις αντίστοιχες θέσεις και χρόνους
for k = 1:3
    fprintf('Χωροσταθμικό σημείο %s - Απόσταση : %f\n', MGeoNames{k}, MDist(k))
    fprintf('Σημείο GBMI Χωροσταθμικό σημείο %s - Απόσταση : %f\n', RadarNames{IndMeas(k)},
RadarDist(IndMeas(k)))
    MRadar = DataR(IndDate(k,:),IndMeas(k));
    %Results(:, :,k) = [MGeo(:,k) MRadar MGeo(:,k)-MRadar ];
    dispResults = table;
    dispResults.Date = cellstr(datestr(DatesMN(k,:)));
    dispResults.Geo = MGeo(:,k);
    dispResults.Radar = MRadar;
    dispResults.Diff = MGeo(:,k)-MRadar;
    Results{k} = dispResults;
    disp(dispResults)
end

%% Γραφήματα για κάθε θέση
for k = 1:3

    figure('Position',[680.00 422.00 1042.00 556.00])
    Ind = find(DatesR >= DatesLN(1,1) & DatesR <= DatesLN(1,2));
    MeanData = mean(DataR(Ind,IndMeas(k)));

    plot(DatesR, DataR(:,IndMeas(k))-MeanData)
    hold all
    plot(DatesMN(k,:),MGeo(:,k),'o','Color',[0.2 0.8 0.6],'MarkerFaceColor',[0.2 0.8 0.6])

    % Δημιουργία ζωνών για κάθε σενάριο
    cdata = [15 30 25 2 60 6 34 7];
    YLim = ylim;
    p = patch([DatesLN(:,1) DatesLN(:,2) DatesLN(:,2) DatesLN(:,1)]',...
    repmat([YLim(1) YLim(1) YLim(2) YLim(2)],8,1)'],'r','FaceAlpha',0.2');
    set(gca,'CLim',[0 40]);
    set(p,'FaceColor','flat',...
    'CData',cdata,...
    'CDataMapping','scaled')

    % Όνομα σεναρίου
    text(mean(DatesLN,2),YLim(2)*ones(8,1),CaseNames,...
    'HorizontalAlignment','center','VerticalAlignment','top')
    grid on

    % Labels
    datetick('x')
    xlabel('Ωρα')
    ylabel('Μετατόπιση (mm)')
    legend(['GBMI ' RadarNames{IndMeas(k)} '(' num2str(RadarDist(IndMeas(k))) 'm)'],...
    ['Γεωμετρική Χωροστάθμηση ' MGeoNames{k} '(' num2str(MDist(k)) 'm)'],...
    'Location','SouthOutSide','Orientation','horizontal')

```

```

end

%% Γραφήματα για κάθε σενάριο
% Βρίσκουμε τα δεδομένα για κάθε σενάριο και υπολογίζουμε την μέση τιμή των
% μετρήσεων

for k = 1:length(DatesLN)
    Ind = find(DatesR >= DatesLN(k,1) & DatesR <= DatesLN(k,2));
    % AllData{k} = DataR(Ind,:);
    ScenarioData(k,:) = mean(DataR(Ind,:));
end

% Βρίσκουμε τις μετρήσεις GBMI για κάθε σενάριο και την ίδια
% χρονική στιγμή με τις μετρήσεις της γεωμετρικής χωροστάθμησης

ScenarioData_ = [Results{1}.Radar Results{2}.Radar Results{3}.Radar];
ScenarioData = [ScenarioData(1,:) ; ScenarioData_];

%% Graphs with geo except A1 - E1 - M1
Inds = setdiff(1:12,1:4:12);
%NewRadarDist = 0:0.1:55.5;
MGeoF = [zeros(12,1) MGeoFull];
for k = 2:8
    figure('Position',[680.00 422.00 1042.00 556.00])
    plot(RadarDist,ScenarioData(k,:), 'o', 'MarkerFaceColor', 'b')

    hold all
    plot(MDistFull(Inds),MGeoF(Inds,k), 'o', 'Color', [0.2 0.8 0.6], 'MarkerFaceColor', [0.2 0.8
0.6])
    text(MDistFull(Inds),MGeoF(Inds,k),MGeoNamesFull(Inds))
    grid on
    xlabel('Απόσταση από το ακρόβαθρο A1 (m)')
    ylabel('Μετατόπιση (mm)')
    legend('GBMI', 'Γεωμετρική Χωροστάθμηση',...
'Location', 'SouthOutSide', 'Orientation', 'horizontal')
    title(['Σενάριο ' CaseNames{k}])
end

%% Graphs with all geo A1 - M9
Inds = 1:12;
%NewRadarDist = 0:0.1:55.5;
MGeoF = [zeros(12,1) MGeoFull];
for k = 2:8
    figure('Position',[680.00 422.00 1042.00 556.00])
    plot(RadarDist,ScenarioData(k,:), 'o', 'MarkerFaceColor', 'b')

    hold all
    plot(MDistFull(Inds),MGeoF(Inds,k), 'o', 'Color', [0.2 0.8 0.6], 'MarkerFaceColor', [0.2 0.8
0.6])
    text(MDistFull(Inds),MGeoF(Inds,k),MGeoNamesFull(Inds))
    grid on
    xlabel('Απόσταση από το ακρόβαθρο A1 (m)')
    ylabel('Μετατόπιση (mm)')
    legend('GBMI', 'Γεωμετρική Χωροστάθμηση',...
'Location', 'SouthOutSide', 'Orientation', 'horizontal')
    title(['Σενάριο ' CaseNames{k}])
end
end

```