

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



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

ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΔΟΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΥΜΜΙΚΤΗΣ ΚΑΛΩΔΙΩΤΗΣ ΠΕΖΟΓΕΦΥΡΑΣ

Διατριβή για την απόκτηση
Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

ΙΩΑΝΝΗΣ Γ. ΡΟΔΟΠΟΥΛΟΣ

ΑΘΗΝΑ, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2012

Ευχαριστίες..

Η παρούσα διπλωματική έγινε υπό την επίβλεψη του επίκουρου καθηγητή κ^ο Γκίκα Βασίλειου και σ' αυτό το σημείο θα ήθελα να τον ευχαριστήσω θερμά για την πολύτιμη βοήθεια και συμπαράστασή του καθώς και για την ευκαιρία που μου έδωσε να αναλάβω ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα για εκπόνηση μεταπτυχιακής εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Γ. Πηνιώτη (ΑΤΜ) και Αθ. Μπίμη (ΑΤΜ), για την πολύτιμη βοήθεια και συνεισφορά τους, διότι χωρίς αυτούς δεν θα ήταν δυνατόν η εργασία να έχει την παρούσα μορφή και επίπεδο.

Ακόμα, όλους τους συναδέλφους οι οποίοι βοήθησαν είτε στην ύπαιθρο κατά τις μετρήσεις είτε κατά την επεξεργασία και πιο συγκεκριμένα τους: Γ. Πάνου (ΑΤΜ), Γ. Λάγκα (ΑΤΜ), Π. Μέτση (ΠΜ) και την ομάδα του εργαστηρίου μεταλλικών κατασκευών της σχολής ΠΜ του ΕΜΠ. Τέλος, την οικογένεια μου και όλους τους στενούς φίλους για την κατανόηση και συμπαράστασή τους.

Περίληψη

Μια σημαντική προϋπόθεση για την επικύρωση του σχεδιασμού ενός τεχνικού έργου, την αξιολόγησή του ως κατασκευή αλλά και για την συντήρησή του είναι η παρακολούθηση δομικής συμπεριφοράς τεχνικών έργων (μελέτη υγείας κατασκευών - structural health monitoring).

Τα τεχνικά έργα είναι αποδέκτες δυναμικών φορτίσεων που προκαλούν παραμορφώσεις σε αυτά, οι επιπτώσεις των οποίων μπορούν να αποβούν έως και καταστροφικές για το έργο. Η αναγκαιότητα της μελέτης υγείας των κατασκευών αναλύεται σε δυο άξονες, αφενός στο γεγονός ότι η γνώση των αποτελεσμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την διόρθωση κατασκευαστικών ατελειών μέχρι και το σημείο να διαπιστωθεί ότι ένα τεχνικό έργο κρίνεται ακατάλληλο.

Ανάλογα τον τύπο και το μέγεθος του έργου οι πηγές των δυναμικών φορτίσεων πρέπει να μελετηθούν πριν την κατασκευή τους, έτσι ώστε να γίνει ποσοτική περιγραφή των φαινομένων αυτών και των επιπτώσεων που θα έχουν στην κατασκευή σε όλη την διάρκεια της ζωής της.

Παραδοσιακά, τέτοιου είδους μελέτες έχουν επιτευχθεί στην περίοδο λειτουργίας του τεχνικού έργου κυρίως με επιταχυνσιόμετρα. Ωστόσο είναι αδύνατον να προκύψει μια ολοκληρωμένη μελέτη των συνιστωσών της μικρομετακίνησης ενός τεχνικού έργου μόνο με την χρήση επιταχυνσιόμετρου. Ένα ολοκληρωμένο δορυφορικό και αδρανειακό σύστημα είναι ένας πολύ ικανός τρόπος για εκτίμηση πλήρους κλίμακας κατασκευαστικών μεγεθών.

Εάν τώρα συνδυαστεί το δορυφορικό-αδρανειακό σύστημα με μετρήσεις ρομποτικού γεωδαιτικού σταθμού τελευταίας γενιάς (*RTS*) και με μετρήσεις ψηφιακού χωροβάτη ακριβείας, προκύπτει πλέον μια ενοποιημένη λύση η οποία μπορεί να εξάγει τα μέγιστα δεδομένα της δομικής συμπεριφοράς του τεχνικού έργου.

Στην παρούσα εργασία εφαρμόστηκε ο παραπάνω συνδυασμός εξοπλισμού στην πεζογέφυρα που κατασκευάστηκε στην λεωφόρο Κηφισίας και συνδέει τους δήμους Φιλοθέης και Χαλανδρίου στο ύψος του κολεγίου Αθηνών.

Για πιο αποδοτικά αποτελέσματα πραγματοποιήθηκε ταυτόχρονη καταγραφή σε δυο διατομές του καταστρώματος και μάλιστα όχι σε τυχαία περίοδο λειτουργίας, αλλά σε εξαναγκασμένες φορτίσεις ώστε να έχουμε πιο σαφή εικόνα της συμπεριφοράς της γέφυρας.

Μια σημαντική καινοτομία, σε σύγκριση με παρόμοιες μελέτες που έχουν δημοσιευτεί, εκτός του πλήθους εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε είναι ότι πραγματοποιήθηκε μεγάλο εύρος μετρήσεων και στην περίοδο κατασκευής της πεζογέφυρας, με αποτέλεσμα να έχουμε σαφή εικόνα για την δομική συμπεριφορά της τόσο σε περίοδο λειτουργίας αλλά και πως παραμορφωνόταν σε κάθε φάση της κατασκευής.

Abstract

Accurate in situ measurement of the full-scale structural responses, especially for tall buildings and bridges under severe loading conditions, is an important requirement for validating their design, evaluating their construction as well as facilitating their maintenance.

Structures are subject to loads which cause deformities to them, whose consequences can prove disastrous. The necessity of structural health monitoring is twofold, first the fact that knowledge of results can be used to correct manufacturing defects and second that these results can be used to verify whether the structure is inappropriate.

Traditionally such response has been measured using accelerometers. However, it is impossible to measure the static components of motion only with acceleration sensors. Therefore, an integrated system comprising of GPS and accelerometers is necessary, as it is an efficient way for a full structural health monitoring.

If now, the integration of GPS-INS is combined with a robotic theodolite (RTS) and precise leveling, the result is a more integrated solution which can extract the maximum data from the structural behavior.

In this paper, the aforementioned combination of equipment on a pedestrian bridge was implemented. The bridge was located in the urban area of Athens, crossing over a main highway.

For most effective results, simultaneous recording of two sections of the deck was performed. This was not done during a random period of operation. Instead, forced loads were applied during the measurements in order to have a clearer picture of the bridge's behavior.

Apart from the variety of equipment that was used, another important innovation, compared to similar studies that have been published in the past, is that a big part of the measurements took place during the bridge's construction period too. This way, a clear picture of the structural behavior in both periods was acquired.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	
Περίληψη	σελ. 1
Abstract	σελ. 2
Περιεχόμενα	σελ. 3
Εισαγωγή	σελ. 4
1. Παρακολούθηση Δομικής Συμπεριφοράς Τεχνικών Έργων	σελ. 6
2. Γέφυρες – Πεζογέφυρες	σελ. 22
3. Σύστημα – Εξοπλισμός Γεωδαιτικού Ελέγχου	σελ. 34
4. Παρακολούθηση Γέφυρας στη Φάση Κατασκευής	σελ. 61
5. Παρακολούθηση Γέφυρας στη Φάση Λειτουργίας	σελ. 91
6. Σύνοψη και Συμπεράσματα	σελ. 124
7. Βιβλιογραφία	σελ. 139

Εισαγωγή

Η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας σε όλους τους τομείς κατά το δεύτερο μισό του εικοστού αιώνα οδήγησε στην κατασκευή μεγάλων τεχνικών και βιομηχανικών έργων με υψηλές απαιτήσεις σε ακρίβεια σχεδιασμού και εκτέλεσης. Μεγάλα σε μέγεθος και έκταση τεχνικά έργα (π.χ. μεγάλες γέφυρες, σιλό, φράγματα) με ειδικές απαιτήσεις χάραξης στη φάση της κατασκευής, αλλά και παρακολούθησης της συμπεριφοράς τους κατά τη φάση λειτουργίας απαιτούν βελτιωμένες μεθοδολογίες γεωδαιτικών μετρήσεων. Επίσης η εξέλιξη της τεχνολογίας οδήγησε στη βελτίωση των γεωδαιτικών οργάνων μέτρησης, με αποτέλεσμα η επιστήμη της γεωδαισίας να μπορεί πλέον να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις ακριβείας των έργων αυτών.

Οι γεωδαιτικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των παραμορφώσεων σε τεχνικά έργα περιλαμβάνουν κατά περίπτωση την ίδρυση και μέτρηση οριζόντιων, κατακόρυφων ή τρισδιάστατων τοπικών γεωδαιτικών δικτύων ελέγχου. Είναι δυνατός ο προσδιορισμός της μεταβολής των συντεταγμένων στο χώρο, σημείων ελέγχου στο έδαφος ή σε τεχνικά έργα με επίγειες ή δορυφορικές γεωδαιτικές μεθόδους. Οι γεωδαιτικές μετρήσεις έχουν ακρίβεια της τάξης των λίγων mm, απαιτούν επεξεργασία για την εξαγωγή αποτελεσμάτων, ελέγχεται η ποιότητα των αποτελεσμάτων, η πληροφορία σχετικά με τις μετακινήσεις των σημείων ελέγχου δίνεται για συγκεκριμένο επίπεδο εμπιστοσύνης και μπορούν να συνδυαστούν και με γεωτεχνικές μετρήσεις σε ενιαία επίλυση.

Ο στόχος της παρούσας διπλωματικής είναι να μελετηθεί η δομική συμπεριφορά ενός τεχνικού έργου σε περίοδο κατασκευής και σε περίοδο λειτουργίας. Συγκεκριμένα πρόκειται για την παρακολούθηση της πεζογέφυρας που βρίσκεται στην λεωφόρο Κηφισίας και συνδέει τους δήμους Χαλανδρίου και Φιλοθέης στο ύψος του κολεγίου Αθηνών. Τα τεχνικά έργα είναι αποδέκτες δυναμικών φορτίσεων που προκαλούν παραμορφώσεις σε αυτά, οι επιπτώσεις των οποίων μπορούν να αποβούν έως και καταστροφικές για το έργο. Έτσι, το θέμα της εργασίας εκτός από ερευνητικό ενδιαφέρον παρουσιάζει και μεγάλη σημαντικότητα για την μελέτη της υγείας της κατασκευής και τα εξαγόμενα αποτελέσματά της αξιοποιήσιμα.

Μια σημαντική πτυχή της παρούσας εργασίας είναι το πλήθος του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε. Πρόκειται για μια σειρά σύγχρονου εξοπλισμού ο οποίος ανήκει στην σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου και συγκεκριμένα στα εργαστήρια Γενικής Γεωδαισίας και Δορυφορικής Γεωδαισίας, τα οποία προορίζεται για εκπαιδευτικούς και ερευνητικούς σκοπούς. Πρόκειται για ολοκληρωμένο αδρανειακό και δορυφορικό σύστημα Novatel, δορυφορικό σύστημα Leica σειράς Smart Rover 1200GP, ολοκληρωμένο γεωδαιτικός σταθμό Leica TDA-5005, ολοκληρωμένο γεωδαιτικός σταθμό Leica TCA-1800 και ψηφιακό χωροβάτη Leica DNA-03.

Κατά την διάρκεια της κατασκευής παρακολούθηθηκε το κατάστρωμα και οι πυλώνες της πεζογέφυρας. Η περίοδος αυτή διαχωρίζεται σε δυο κύριες κατηγορίες: την οριζοντιογραφία και την υψομετρία, οι οποίες τεκμηριώθηκαν σε τρεις φάσεις: την αρχική κατάσταση, μετά την τάνυση και τέλος μετά την σκυροδέτηση (τελική κατάσταση πεζογέφυρας).

Όσον αφορά το κατάστρωμα οι μετακινήσεις ελέγχθηκαν μόνο υψομετρικά δεδομένου ότι από την μελέτη του έργου επιτρέπεται η κατά μήκος κίνηση (κύλιση) του καταστρώματος. Όσον αφορά τους πυλώνες η παρακολούθηση έγινε και στις τρεις διαστάσεις. Σκοπός των μετρήσεων είναι να προκύψουν αποτελέσματα με τα οποία να είναι εφικτή η παρατήρηση της μεταβολής θέσης κάθε διατομής σε κάθε περίοδο της φάσης κατασκευής όσον αφορά το κατάστρωμα και η παρατήρηση μεταβολής θέσης κάθε μετρούμενου σημείου για τους πυλώνες.

Μετά το πέρας της κατασκευής (δηλαδή, στην περίοδο λειτουργίας της γέφυρας) προγραμματίστηκε μια σειρά πειραμάτων με ελεγχόμενη φόρτιση δυναμική και στατική. Σε αυτήν την φάση έγινε παρακολούθηση του καταστρώματος της γέφυρας και όχι και των πυλώνων στήριξης και συνολικά πραγματοποιήθηκαν επτά πειράματα. Για την επίτευξη αυτών των πειραμάτων ως μέσο φόρτισης χρησιμοποιήθηκε ανθρώπινο δυναμικό (εκατό ατόμων περίπου) το οποίο αποτελούνταν από μαθητές του κολεγίου Αθηνών.

Τα πρώτα έξι πειράματα που πραγματοποιήθηκαν ήταν στατικές φορτίσεις του καταστρώματος (μέσω του πλήθους) με έξι διαφορετικές διατάξεις - χωροθετήσεις. Όσον αφορά το έβδομο πείραμα, αυτό αποτελείται από μια σειρά συγχρονισμένων αλμάτων του πλήθους και από συγχρονισμένο επιτόπιο βάδην.

Να σημειωθεί εδώ ότι ο στόχος της μελέτης της δομικής συμπεριφοράς της πεζογέφυρας δεν είναι να κριθεί ως κατασκευή, αλλά να μελετηθεί γεωδαιτικά και να εξαχθούν όσον το δυνατόν ποιοτικότερα αποτελέσματα ώστε σε δεύτερη φάση από αρμόδιο φορέα να εκλεχθεί η "υγεία της κατασκευής"

1. ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΔΟΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

1.1 Μελέτη της υγείας των κατασκευών (structural health monitoring)

Τα τεχνικά έργα είναι αποδέκτες δυναμικών φορτίσεων που προκαλούν παραμορφώσεις σε αυτά, οι επιπτώσεις των οποίων μπορούν να αποβούν έως και καταστροφικές για το έργο. Η αναγκαιότητα της μελέτης υγείας των κατασκευών αναλύεται σε δυο άξονες, αφενός στο γεγονός ότι η γνώση των αποτελεσμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την διόρθωση κατασκευαστικών ατελειών μέχρι και το σημείο να διαπιστωθεί ότι ένα τεχνικό έργο κρίνεται ακατάλληλο. Ανάλογα τον τύπο και το μέγεθος του έργου οι πηγές των δυναμικών φορτίσεων πρέπει να μελετηθούν πριν την κατασκευή τους, έτσι ώστε να γίνει ποσοτική περιγραφή των φαινομένων αυτών και των επιπτώσεων που θα έχουν στην κατασκευή σε όλη την διάρκεια της ζωής της.

1.2 Κατηγορίες Μεγάλων Τεχνικών Έργων

Ως τεχνικό έργο νοείται κάθε νέα κατασκευή ή επέκταση ή ανακαίνιση ή επισκευή ή συντήρηση με οικονομικά ή τεχνικά αυτοτελής λειτουργία. Η κατηγοριοποίηση τους μπορεί να γίνει με ποικίλους τρόπους, π.χ. αναλόγως με το χαρακτηριστικό που έχουν άμεση σχέση:

Νερό → Φράγματα

Οδοποιία (ΤΕΟ) → Σήραγγες, Οχετοί, γέφυρες, τοιχία υποστήριξης - αντιστήριξης κτλ

Πολυεδομίας → Υψηλά κτίρια, βιομηχανικά κτίρια, καμινάδες, ιστοί κτλ

Επίσης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε συνδυασμό του μεγέθους, σχήματος, προϋπολογισμού, υλικών κατασκευής κτλ αναλόγως τις ανάγκες.

1.2.1 Σήραγγες

Σήραγγα ονομάζεται η οριζόντια, υπόγεια εκσκαφή γαιών, με σκοπό την διάνοιξη οδού για την διέλευση οχημάτων, συρμών και ανθρώπων. Όταν η εκσκαφή γίνεται κατά τον κατακόρυφο άξονα, τότε η σήραγγα ονομάζεται φρέαρ. Τα κύρια μέρη μιάς σήραγγας είναι η βάση, τα πλευρικά τμήματα και η οροφή.

1.2.2 Γέφυρες

Γέφυρα, είναι η δομική κατασκευή, με την οποία επιτυγχάνεται η ζεύξη δύο θέσεων, μεταξύ των οποίων μεσολαβεί ένα εμπόδιο (ποτάμι, χαράδρα, δρόμος, κτλ). Ο σχεδιασμός, η κατασκευή και η λειτουργία μιάς γέφυρας ποικίλουν, με κυριότερα κριτήρια την τοπογραφία και τα χαρακτηριστικά του εδάφους που πρόκειται να κατασκευαστεί, ενώ λαμβάνονται υπόψη και δευτερεύοντα στοιχεία όπως η αισθητική και η αρμονική σύνδεση με τον περιβάλλοντα χώρο.

Οι παραμορφώσεις που υφίστανται οι γέφυρες, κατά μείζονα λόγο χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τις μόνιμες και τις δυναμικές (παροδικού χαρακτήρα). Οι μόνιμες παραμορφώσεις οφείλονται στην “κόπωση” του καταστρώματος της γέφυρας λόγω παλαιότητας, στην χαλάρωση των στοιχείων του φορέα (καλώδια, δοκοί) κτλ. Στις δυναμικές κατατάσσονται οι παραμορφώσεις λόγω ανέμου, σεισμικής δράσης, κίνησης των αυτοκινήτων, παλίρροιας, κτλ.

1.2.3 Φράγματα

Φράγμα ονομάζεται ένα τεχνικό έργο, το οποίο κατασκευάζεται κάθετα στην κοίτη ενός υδατορεύματος και αποσκοπεί στην δέσμευση του νερού για την περαιτέρω αξιοποίηση του σε άρδευση, ύδρευση ή την κίνηση υδροστρόβιλων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα σημαντικότερα είδη φραγμάτων είναι:

- Τοξοτά φράγματα (Arch dams)
- Φράγματα βαρύτητας (Gravity dams)
- Χωμάτινα φράγματα (Embankment/Earthen dams)

1.2.4 Κτίρια

Τα κτίρια είναι κατασκευές σταθερές επί του εδάφους με σκοπό να στεγάσουν τον άνθρωπο και τις δραστηριότητες του. Δομικά ένα κτήριο, κατασκευάζεται από οπλισμένο σκυρόδεμα, από χάλυβα ή ξύλο, ενώ υπάρχουν και περιπτώσεις εφαρμογής συνθετικών υλικών και κραμάτων άλλων μετάλλων ή συνδυασμός τους. Τα κτίρια μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε κτίρια για κατοικία, κτίρια για εργασιακή χρήση, βιομηχανικά κτήρια, καθώς και ειδικά κτήρια (π.χ. πύργοι ελέγχου αεροδρομίων).

Μια κτιριακή κατασκευή υπόκειται σε πλήθος διαφορετικών τύπων παραμορφώσεων:

- Καθίζηση. Η καθίζηση προκαλείται από την υποχώρηση του εδάφους κάτω από τα θεμέλια της κατασκευής, ενώ το επίπεδο της θεμελίωσης παραμένει οριζόντιο και η πίεση του εδάφους παραμένει ίση σε όλη την επιφάνεια της θεμελίωσης.
- Διαφορική καθίζηση. Στην διαφορική καθίζηση, με την υποχώρηση του εδάφους παρατηρείται άνιση κατανομή των δυνάμεων στο επίπεδο της θεμελίωσης με αποτέλεσμα την ανάπτυξη δυνάμεων εφελκυσμού, θλίψης και στρέψης σε στοιχεία της κατασκευής.
- Γωνιακή στροφή. Σε αυτή την περίπτωση, η κατασκευή περιστρέφεται γύρω από κάποιον άξονα, κάθετο στο επίπεδο θεμελίωσης, χωρίς να υπάρχει καθίζηση.
- Γωνιακή παραμόρφωση. Το κτήριο περιστρέφεται με ταυτόχρονη καθίζηση, ή διαφορική καθίζηση. Μαζί με το φαινόμενο της διαφορικής καθίζησης, αποτελούν τις δυσμενέστερες περιπτώσεις παραμόρφωσης κατασκευών.

1.3 Δομική Τρωτότητα Τεχνικών Έργων

1.3.1 Γενικά

Η άσκηση δύναμης σ' ένα σώμα έχει σαν συνέπεια την πιθανή αλλαγή θέσης του, της μορφής του και του μεγέθους του. Αυτές οι αλλαγές είναι γνωστές σαν παραμόρφωση (deformation) του σώματος. Μεταβολές μεγέθους αναφέρονται σαν ογκομετρικές μεταβολές (dilatation ή dilation) [διόγκωση (μεγέθυνση) - συρρίκνωση (σμίκρυνση)] και οφείλονται στην άσκηση ορθών τάσεων. Μεταβολές σχήματος είναι γνωστές σαν αλλοίωση μορφής - παραμόρφωση (distortion) και οφείλονται σε διατμητικές τάσεις. Γενικά λοιπόν, οι συνιστώσες της παραμόρφωσης που μπορεί να υποστεί ένα σώμα είναι μετάθεση, στροφή, αλλοίωση μορφής και μεταβολή όγκου. Κάποιες από αυτές τις παραμέτρους μπορεί να είναι μηδενικές (μπορεί δηλ. ένα σώμα να υφίσταται μετάθεση χωρίς να παραμορφώνεται στο σχήμα του).

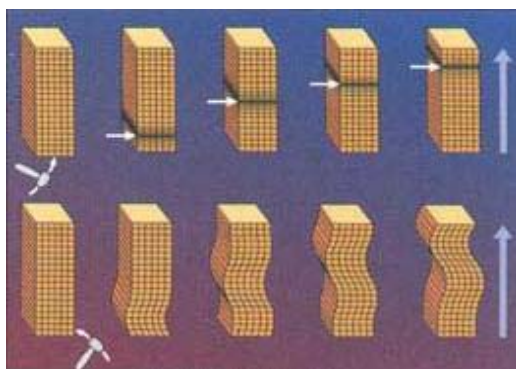
Κάποια φυσικά φαινόμενα που μπορούν να παραμορφώσουν ένα τεχνικό έργο είναι η σεισμική δράση, ο άνεμος, η θερμοκρασία καθώς και φορτία που τυχόν εδράζουν σε αυτό.

1.3.2 Σεισμική δράση

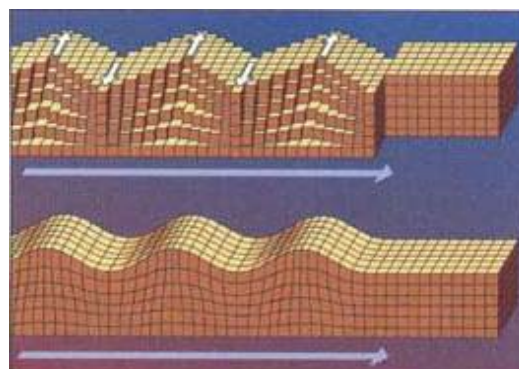
Με τον όρο "σεισμός", νοείται η απότομη απελευθέρωση συσσωρευμένης ενέργειας από τα στρώματα του φλοιού της γης προς την επιφάνεια. Οι σεισμοί που σχετίζονται με τις κινήσεις των τεκτονικών πλακών του στερεού φλοιού της γης, ονομάζονται τεκτονικοί. Επίσης, σεισμοί εκδηλώνονται από την έκρηξη ηφαιστειών (ηφαιστειογενείς), την κατάρρευση υπόγειων σπηλαίων (κατακρημνησιγενείς), ενώ μπορούν να εκδηλωθούν και μικρότερης κλίμακας σεισμοί από ανθρώπινη παρέμβαση, όπως η έκρηξη μιας ατομικής βόμβας. Κατά την εκδήλωση ενός σεισμού γίνεται μετατροπή της δυναμικής ενέργειας σε κινητική και η εξάπλωση της στον χώρο γίνεται μέσω των σεισμικών κυμάτων. Τα σεισμικά κύματα διαχωρίζονται στις εξής κατηγορίες (Μ. Σακελλαρίου, 2008) :

- Κύματα Χώρου (Body Waves) (εικόνα 2.2)
 - α) Διαμήκη κύματα τύπου P
 - β) Εγκάρσια κύματα τύπου S

- Κύματα Επιφανείας (Surface waves) (εικόνα 2.3)
 - α) Κύματα επιφανείας τύπου Love
 - β) Κύματα επιφανείας τύπου Rayleigh



εικόνα 1.1. Σεισμικά κύματα χώρου



εικόνα 1.2. Σεισμικά κύματα επιφανείας

Τα τεχνικά έργα εφόσον εξ' ορισμού συνδέονται με το υλικό μέσο μετάδοσης των ανωτέρω κυμάτων, επηρεάζονται άμεσα από την ενέργεια που αυτά μεταφέρουν και πρέπει να έχει γίνει εκ των πρότερων μελέτη για την όσο το δυνατόν καλύτερη αντίδραση του φορέα σε περίπτωση εκδήλωσης σεισμού.

1.3.3 Άνεμος

Άνεμος ονομάζεται η κίνηση των αερίων μαζών που αποτελούν την ατμόσφαιρα της γης. Η κίνηση αυτή, επηρεάζεται από παράγοντες όπως η διαφορά της ατμοσφαιρικής πίεσης και η δύναμη Coriolis. Ο άνεμος επηρεάζει άμεσα τις κατασκευές που βρίσκονται πάνω από την επιφάνεια της Γης ή της θάλασσας ασκώντας πίεση στον φορέα της κατασκευής, η οποία μεταβάλλεται συναρτήσει του εμβαδού της μετωπικής επιφάνειας στην οποία προσκρούει ο άνεμος, και της έντασης του ανέμου.

1.3.4 Μεταβολές στην θερμοκρασία περιβάλλοντος

Χαρακτηριστικό στοιχείο των στερεών υλικών, είναι η μεταβολή των διαστάσεων τους (μήκος, επιφάνεια, όγκος) με την μεταβολή της θερμοκρασίας (συστολή-διαστολή). Το φαινόμενο αυτό έχει άμεση επίδραση στη δυναμική συμπεριφορά των κτηρίων και γενικότερα των τεχνικών έργων αφού ο συνδυασμός διαφορετικών τύπων υλικών στην εκάστοτε κατασκευή, επιβάλλει εκ των προτέρων (πριν την κατασκευή του τεχνικού έργου) την προσεκτική μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς της κατασκευής στις θερμοκρασιακές μεταβολές, για την αντιμετώπιση εμφάνισης φαινομένων ασυνέχειας (ρωγμές) σε κρίσιμα για την λειτουργική ικανότητα σημεία του φορέα της κατασκευής, ενώ για ιδιόρρυθμες κατασκευές κρίνεται απαραίτητη και η εκ των υστέρων (μετά την κατασκευή του τεχνικού έργου) παρακολούθηση του κτηρίου (ή τεχνικού έργου) για την έγκαιρη αντιμετώπιση φαινομένων αστοχίας του φορέα.

1.3.5 Άλλα φορτία

Σε ένα τεχνικό έργο ασκούνται δυναμικά φορτία από τον σκοπό που έχει σχεδιαστεί το έργο να εξυπηρετήσει. Σε μια γέφυρα για παράδειγμα τα διερχόμενα φορτία, αποτελούν επιπρόσθετη δύναμη που καλείται να αντεπεξέλθει η κατασκευή. Σε αυτή την περίπτωση

γίνεται επίσης μελέτη του φαινομένου του συντονισμού του φορέα. Επίσης σημαντικό ρόλο παίζουν τα φορτία του νερού σε φράγματα καθώς και τα πυροθερμικά φορτία.

1.3.6 Κατηγοριοποίηση φορτίων

Η κατηγοριοποίηση των φορτίων (δράσεων) μπορεί να αναλυθεί σε κύριες κατηγορίες σύμφωνα με τον τρόπο επιβολής, τον τρόπο εφαρμογής, πιθανοτικά και σύμφωνα με το αποτέλεσμα που επιφέρουν. Έτσι διαχωρίζονται ως εξής:

- Τρόπος επιβολής
 - Στατικά (αργά επιβαλλόμενα ή ανεξάρτητα του χρόνου)
 - Δυναμικά (συναρτήσει του χρόνου, ταλαντώσεις κτλ)
- Τρόπος εφαρμογής
 - Συγκεντρωμένα (σημειακή δύναμη)
 - Επιφανειακά (ανεμοπίεση)
 - Μαζικά (βαρύτητα)
- Πιθανοτικά
 - Μόνιμα: σπάνια μεταβάλλονται (π.χ. ιδίων βάρους στοιχείων)
 - Μεταβλητά: μεταβάλλονται συχνά (π.χ. φορτία χρήσης)
 - Τυχηματικά: μικρή πιθανότητα εμφάνισης (π.χ. έκρηξη)
- Αποτέλεσμα δράσης (χρονικό, είδος..)
 - Μόνιμες παραμορφώσεις (πλαστική συμπεριφορά)
 - Προσωρινές παραμορφώσεις (ελαστική συμπεριφορά)
 - Αξονικές παραμορφώσεις
 - Καμπτικές παραμορφώσεις
 - Διατμητικές παραμορφώσεις

1.4 Μέθοδοι Παρακολούθησης Δομικής Συμπεριφοράς Τεχνικών Έργων

Την μέθοδο παρακολούθησης της δομικής συμπεριφοράς των τεχνικών έργων είμαστε σε θέση να την διαχωρίσουμε σε δυο μεγάλες κατηγορίες αναλόγως της μεθοδολογίας και πιο συγκεκριμένα σε μεθόδους πειραματικής μηχανικής και γεωδαιτικές μεθόδους.

1.4.1 Μέθοδοι Πειραματικής μηχανικής

Σε αυτήν την κατηγορία τα μέσα που χρησιμοποιούμε είναι τα δυναμόμετρα, κλισίμετρα, οπτικές ίνες και αδρανειακοί αισθητήρες (γυροσκόπια και επιταχυνσιόμετρα).

1.4.1.α Γυροσκόπια

Τα γυροσκόπια είναι συσκευές οι οποίες χρησιμοποιούν τις αρχές της αδράνειας και της διατήρησης της στροφορμής για να διατηρήσουν σταθερό τον προσανατολισμό τους σε σχέση με μια αρχικώς καθορισμένη διεύθυνση. Το παραπάνω χαρακτηριστικό τους κάνει τα γυροσκόπια ιδανικές συσκευές για την μέτρηση των γωνιακών περιστροφών και κατ' επέκταση τον προσδιορισμό των διορθώσεων που πρέπει να επιβληθούν στους φορείς τους, ώστε οι τελευταίοι να διατηρήσουν σταθερή διεύθυνση.

Τα γυροσκόπια μπορούν να ταξινομηθούν με βάση την αρχή λειτουργίας του και τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά τους σε τρεις μεγάλες κατηγορίες, κάθε μια από τις οποίες περιλαμβάνει πλήθος παραλλαγών που έχουν όμως κοινή βάση λειτουργίας Έτσι οι κύριες κατηγορίες των γυροσκοπίων είναι :

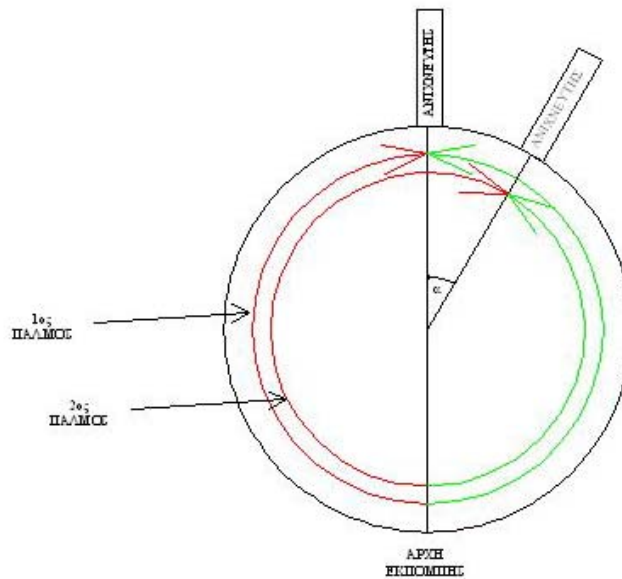
- **Τα μηχανικά γυροσκόπια**

Η λειτουργία τους βασίζεται στην χρήση ενός ταχέως περιστρεφόμενου τροχού, ο οποίος στηρίζεται σε μια κατασκευή από έδρανα και πλατφόρμες που του επιτρέπουν να κινείται σε ένα σύστημα αξόνων. (Ο αριθμός των χρησιμοποιούμενων εδράνων καθορίζει τον αριθμό των αξόνων περί των οποίων ο τροχός μπορεί να περιστραφεί ελεύθερα και άρα και τους βαθμούς ελευθερία τους συστήματος).

Στην προσπάθεια να διορθωθούν μερικά από τα μειονεκτήματα των μηχανικών γυροσκοπίων με τροχό δημιουργήθηκαν νέα είδη γυροσκοπίων (floating gyroscopes). Οι συγκεκριμένες συσκευές φιλοξενούν το παραπάνω σύστημα του τροχού όχι προσαρμοσμένο σε μια σειρά από έδρανα αλλά εγκιβωτισμένο μέσα σε ένα θάλαμο που περιέχει κολλώδες υγρό υψηλού ιξώδους, το οποίο και διατηρεί τον προσανατολισμό του συστήματος.

- **Οπτικά γυροσκόπια**

Τα οπτικά γυροσκόπια βασίζονται στην λειτουργία τους στο φαινόμενο Sagnac, το οποίο παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το 1913 από τον γάλλο φυσικό George Sagnac. Σύμφωνα με αυτό αν δυο ακτίνες φωτός εκπνευθούν από μια πηγή και ακολουθήσουν αντίθετες διαδρομές γύρω από ένα σταθερό δακτύλιο ακτίνας R τότε θα καλύψουν την ίδια αδρανειακή απόσταση στον ίδιο χρόνο και θα συναντηθούν στο αυτό σημείο. Σε περίπτωση όμως που ο δακτύλιος δεν είναι σταθερός αλλά περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα ω είναι προφανές ότι η ακτίνα που έχει την ίδια φορά περιστροφή με τον δακτύλιο θα διανύσει μεγαλύτερη απόσταση στον ίδιο χρόνο ενώ το αντίθετο θα συμβεί με την ακτίνα που έχει αντίθετη φορά περιστροφής. Το αποτέλεσμα είναι οι δύο ακτίνες να συναντηθούν σε διαφορετικό σημείο, η θέση του οποίου εξαρτάται άμεσα από την γωνιακή περιστροφή του δακτυλίου. Στην εικόνα 1.3, που ακολουθεί, παρουσιάζεται μια σχηματική απεικόνιση του φαινομένου Sagnac.



Εικόνα 1.3-Σχηματική απεικόνιση του φαινομένου Sagnac

Σήμερα υπάρχουν δύο διαφορετικές υλοποιήσεις των οπτικών γυροσκοπίων, πρόκειται για τα Γυροσκόπια με Δακτύλιο Λείζερ (Ring Laser Gyro) και τα Γυροσκόπια Οπτικών Ινών (Fiber Optic Gyro). Τα γυροσκόπια με δακτύλιο λέιζερ αποτελούνται από μια γεννήτρια λέιζερ, η οποία εκπέμπει μια δέσμη φωτός που με την βοήθεια κατάλληλων κατόπτρων διασπάται σε δύο ακτίνες που ακολουθούν αντίθετες πορείες δημιουργώντας κύματα, η σύζευξη των οποίων οδηγεί στην ανίχνευση των ρυθμών γωνιακής περιστροφής της συσκευής. Τα γυροσκόπια οπτικών ινών αντίθετα δεν χρησιμοποιούν πρίσματα για την κατεύθυνση της δέσμης φωτός αλλά μια σπείρα από οπτικές ίνες, μέσω της οποίας γίνεται η δρομολόγηση των ακτινών φωτός καθώς και η σύζευξη αυτών για την παραγωγή του στάσιμου κύματος η συχνότητα του οποίου προσδιορίζει την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του συστήματος.

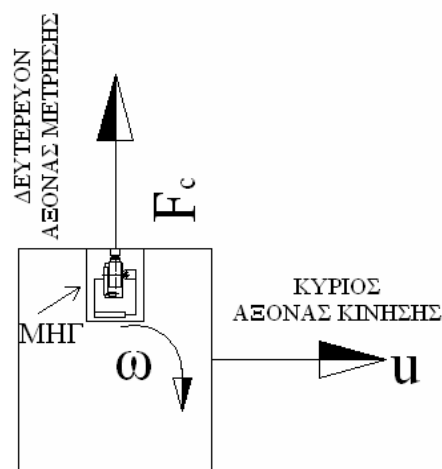
- **Τα μικρο ηλεκτρομηχανικά γυροσκόπια**

Τα Μικρο Ηλεκτρομηχανικά Γυροσκόπια βασίζουν την λειτουργία τους στο φαινόμενο της δύναμης Coriolis, η οποία περιγράφει την φαινόμενη επιτάχυνση των σωμάτων που κινούνται με σταθερή ταχύτητα σε ένα σύστημα που περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα Ω . Η δύναμη Coriolis δίνεται από την σχέση 1.1, που ακολουθεί, και στην οποία ω είναι η γωνιακή ταχύτητα και u η γραμμική ταχύτητα του σώματος.

$$F_c = -2 \cdot m \cdot (\omega \times u)$$

σχέση 1.1 - δύναμη coriolis

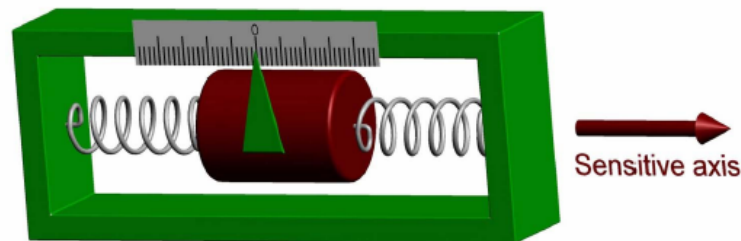
Η αρχή λειτουργίας των μικρο ηλεκτρομηχανικών γυροσκοπίων βασίζεται στον προσδιορισμό της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής του φορέα μέσω της μέτρησης της επιτάχυνσης που οφείλεται στην δύναμη Coriolis και της χρήσης της σχέσης 1.1.



Εικόνα 1.4 - Αρχή λειτουργίας ηλεκτρομηχανικών γυροσκοπίων

1.4.1.β Επιταχυνσιόμετρα

Τα επιταχυνσιόμετρα βασίζονται στην αρχή λειτουργίας τους (Εικόνα 1.5) στη χρήση μιας δοκιμής μάζας (proof mass), η οποία βρίσκεται στερεωμένη στο εσωτερικό τους με ένα σύστημα ελατηρίων.



Εικόνα 1.5 - Αρχή λειτουργίας επιταχυνσιόμετρων (Gade, 2004)

Η κίνηση του φορέα προκαλεί την ανάπτυξη δυνάμεων που μετατοπίζουν την μάζα, είτε προς την θετική είτε προς την αρνητική κατεύθυνση του συστήματος, και συσπειρώνουν ή επιμηκύνουν ανάλογα τα ελατήρια. Η συσπείρωση ή η επιμήκυνση των ελατηρίων αυτή από την θέση ισορροπίας είναι σύμφωνα με τον νόμο του Hook (σχέση 1.2) ανάλογη με την αναπτυσσόμενη δύναμη με αποτέλεσμα να προσδιορίζεται το μέγεθος της ασκούμενης δύναμης.

$$F_k = -k \cdot x$$

σχέση 1.2 - νόμος του Hook

Από τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα και αφού είναι γνωστή η δοκιμη μάζα προσδιορίζεται η επιτάχυνση στην οποία υπόκειται η μάζα και κατ' επέκταση το

κινούμενο σώμα. Η επιτάχυνση αυτή όμως δεν είναι αυτή που οφείλεται στην κίνηση του σώματος αλλά εμπεριέχει και άλλες επιδράσεις με κυριότερη την επιτάχυνση της βαρύτητας g , που οφείλεται στην έλξη της γης. Αν η επιτάχυνση της βαρύτητας g είναι γνωστή στη συγκεκριμένη περιοχή, μέσω κάποιου μοντέλου, τότε μπορεί να προσδιοριστεί η πραγματική επιτάχυνση του συστήματος εξαιτίας της κίνησης του με βάση την σχέση 1.3 που ακολουθεί και στην οποία ο όρος f είναι η δύναμη ανά μονάδα μάζας (specific force).

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} + \vec{g} = \vec{f} + \vec{g}$$

σχέση 1.3

Τελικά η διπλή ορισμένη ολοκλήρωση της προσδιοριζόμενης επιτάχυνσης δίνει την διανυθείσα απόσταση και προσδιορίζει την τροχιά της κίνησης του φορέα. Το σύνολο των επιταχυνσιόμετρων χρησιμοποιούν την δόκιμη μάζα και την παραπάνω περιγραφείσα αρχή λειτουργίας για τον προσδιορισμό των επιταχύνσεων, εκείνο όμως που διαφοροποιεί τις διάφορες υλοποιήσεις και προσδίδει τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά σε αυτές είναι ο τρόπος με τον οποίο μετράται η μετατόπιση της δόκιμης μάζας και μετατρέπεται σε ένδειξη επιτάχυνσης. Με βάση την παραπάνω διαφοροποίηση τα επιταχυνσιόμετρα μπορούν να καταταγούν στις παρακάτω κατηγορίες :

- **Τα πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα**

Τα πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα κάνουν χρήση του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου. Έτσι στα συγκεκριμένα επιταχυνσιόμετρα υπάρχει πάνω στην δόκιμη μάζα προσκολλημένο ένα πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο, συνήθως από χαλάζια ή από κεραμικό υλικό, το οποίο παράγει ένα σήμα ανάλογο της δύναμης που υφίσταται η δόκιμη μάζα λόγω των επιταχύνσεων του φορέα. Το σήμα που παράγεται από το διηλεκτρικό υλικό ανιχνεύεται και μετατρέπεται σε ψηφιακή ένδειξη της επιτάχυνσης. Η επιλογή του διηλεκτρικού υλικού έχει πολύ μεγάλη σημασία για την αξιοπιστία του αισθητήρα αφού είναι το μέσο που φιλτράρει τις επιδράσεις των εξωτερικών παραγόντων και διαφοροποιεί τις πραγματικές παραμέτρους που προκαλούν την επιτάχυνση.

- **Τα επιταχυνσιόμετρα με χρήση ηλεκτρικών κυκλωμάτων**

Τα επιταχυνσιόμετρα αυτής της κατηγορίας χρησιμοποιούν ηλεκτρικά κυκλώματα για τη μέτρηση της μετατόπισης της δόκιμης μάζας και την μετατροπή της σε ένδειξη επιτάχυνσης. Τα κυριότερα ηλεκτρικά κυκλώματα είναι τα ποτενσιόμετρα, οι γέφυρες Wheatstone και οι συνδυασμοί αντιστάσεων και χρησιμοποιούνται ώστε να μετατρέψουν την μηχανική μικρομετακίνηση σε ηλεκτρικό ρεύμα, η συχνότητα του οποίου στην συνέχεια αναλύεται παρέχοντας τις απαιτούμενες μετρήσεις επιτάχυνσης.

- **Τα επιταχυνσιόμετρα με πυκνωτές**

Τα επιταχυνσιόμετρα αυτής της κατηγορίας διαφέρουν από αυτά της προηγούμενης στο γεγονός ότι αντί για ηλεκτρικά κυκλώματα χρησιμοποιούν κυκλώματα πυκνωτών και πηνίων ως μετρητικές διατάξεις. Οι μετακινήσεις της δόκιμης μάζας προκαλούν ροή ηλεκτρικού ρεύματος στο κύκλωμα αλλάζοντας την συχνότητα λειτουργίας του, η οποία δεδομένων των συντελεστών L και C των πηνίων και των πυκνωτών αντίστοιχα μπορεί να προσδιοριστεί και να οδηγήσει στον προσδιορισμό της επιτάχυνσης.

- **Τα επιταχυνσιόμετρα με σερβομηχανισμούς**

Τα συγκεκριμένα επιταχυνσιόμετρα είναι κλειστού τύπου λειτουργίας και βασίζονται σε ένα σύστημα σερβομηχανισμών. Η μετατόπιση της δοκιμής μάζας εντοπίζεται από ένα αισθητήρα, ο οποίος την μετατρέπει σε ένα σήμα. Το παραγόμενο σήμα περνάει από ένα κύκλωμα ενισχυτών και φίλτρων, το οποίο το αναλύει και αφαιρεί τον θόρυβο διαμορφώνοντας με αυτό τον τρόπο ένα σήμα διόρθωσης. Το σήμα αυτό επανεισάγεται στο σύστημα και ανατροφοδοτεί τους σερβομηχανισμούς ώστε οι τελευταίοι να πραγματοποιήσουν τις αναγκαίες κινήσεις που θα διατηρήσουν την δόκιμη μάζα στην θέση ισορροπίας ενώ ταυτόχρονα παράγει και μια ένδειξη του αποτελέσματος.



*Εικόνα 1.6 - Επιταχυνσιόμετρο με σερβομηχανισμούς
(Sagem Défense Sécurité)*

Τα επιταχυνσιόμετρα με σερβομηχανισμούς αποτελούν την κορυφή των συσκευών μέτρησης επιτάχυνσης αφού παρουσιάζουν πολύ μεγάλη ακρίβεια, αυξημένη ευαισθησία και μεγάλο εύρος μετρήσεων.

- **Τα επιταχυνσιόμετρα με ανίχνευση δονήσεων**

Στα επιταχυνσιόμετρα με ανίχνευση δονήσεων η μετατόπιση της δόκιμης μάζας διεγείρει ένα ηλεκτρικό κύκλωμα που βρίσκεται μέσα σε ένα μόνιμο μαγνητικό πεδίο. Το κυκλοφορούν ρεύμα προκαλεί δονήσεις του ηλεκτρικού κυκλώματος η συχνότητα των οποίων είναι ανάλογη των αναπτυσσομένων επιταχύνσεων και η οποία ανιχνεύεται με χρήση ενός δευτερεύοντος ηλεκτρικού κυκλώματος που την μετατρέπει σε ψηφιακή ένδειξη επιτάχυνσης.

1.4.1.γ Οπτικές Ίνες

Οι αισθητήρες οπτικών ινών χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση μεταβολών κάποιας ποσότητας, όπως θερμοκρασία, μηχανική καταπόνηση, δονήσεις, επιταχύνσεις, πίεση κλπ. Η αρχή λειτουργίας τους, βασίζεται στην εκπομπή μιας ακτίνας laser μέσω της οπτικής ίνας που τοποθετείται στο αντικείμενο προς μελέτη. Η αλλαγή των χαρακτηριστικών της ακτίνας μετράται από έναν ευαίσθητο αισθητήρα και τα αποτελέσματα μετά από τις κατάλληλες μετατροπές, δίνουν τα επιθυμητά μεγέθη. Το κυριότερο πλεονέκτημα των αισθητήρων οπτικών ινών, είναι ότι εγγενώς δεν αλληλεπιδρούν με ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία, κάτι το οποίο εφιστά δυνατή τη χρήση τους σε περιβάλλοντα υψηλής τάσης, εύφλεκτα περιβάλλοντα, θέσεις ευαίσθητες σε ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές, κ.α. Άλλα πλεονεκτήματα, είναι η μη διαβρωσιμότητα του υλικού κατασκευής τους από οξέα και το μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας τους, σε σύγκριση με άλλου τύπου ηλεκτρονικούς αισθητήρες και όργανα.

1.5 Τοπογραφικές - Γεωδαιτικές μέθοδοι

Οι γεωδαιτικές μετρήσεις μπορούν, εάν επαναλαμβάνονται κατά διαστήματα, να καταγράψουν την μεταβολή των σημείων ενδιαφέροντος με την πάροδο του χρόνου (δηλαδή να περιγράψουν ένα πεδίο μετακινήσεων). Χρησιμοποιούνται λοιπόν στις μελέτες παρακολούθησης των παραμορφώσεων, είτε αυτές αφορούν παραμορφώσεις του στερεού φλοιού της γης (τεκτονικές παραμορφώσεις) είτε στην παρακολούθηση της συμπεριφοράς τεχνικών έργων.

Τα γεωδαιτικά δίκτυα που ιδρύονται για την μελέτη των παραμορφώσεων διακρίνονται σε απόλυτα και σχετικά. Αν τα όρια του σώματος που μελετάται είναι σαφή προτιμούνται τα απόλυτα δίκτυα. Μερικά σημεία του δικτύου θεωρούνται ότι εδράζονται σε περιοχή σταθερή, περιμετρικά της υπό μελέτη περιοχής και αποτελούν το δίκτυο αναφοράς. Οι μετακινήσεις που υπολογίζονται στα σημεία που βρίσκονται επάνω στο εξεταζόμενο σώμα (σημεία ελέγχου) είναι απόλυτες σε σχέση με το δίκτυο αναφοράς. Το βασικό πρόβλημα στην περίπτωση αυτή είναι να επιβεβαιωθεί η σταθερότητα των σημείων αναφοράς.

Η συνηθέστερη γεωδαιτική μέθοδος που ακολουθείται για την εκτίμηση του ρυθμού της παραμόρφωσης είναι να σχεδιάζεται το γεωδαιτικό δίκτυο ειδικά για τον σκοπό αυτό και να υλοποιούνται παρατηρήσεις σε τουλάχιστον δυο διακριτές εποχές. Υπολογίζονται χωριστά οι συντεταγμένες κάθε περιόδου σ' ένα κοινό γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς επιλύοντας το δίκτυο με τις ελάχιστες εξωτερικές δεσμεύσεις. Αυτές πρέπει να διατηρούνται ίδιες σε όλες τις εποχές για να εξασφαλίζεται ο ορισμός του δικτύου στο χώρο και το χρόνο. Κάθε περίοδος ελέγχεται για την ύπαρξη χονδροειδών λαθών στις παρατηρήσεις.

Σήμερα οι δορυφορικές παρατηρήσεις με το σύστημα GPS επιτρέπουν την συλλογή τρισδιάστατης πληροφορίας για την θέση των σημείων παρέχοντας είτε καρτεσιανές (X,Y,Z) συντεταγμένες, είτε ελλειψοειδείς (φ,λ,h). Ωστόσο, η ακρίβειά προσδιορισμού

της τρίτης συνιστώσας της θέσης είναι τουλάχιστον μια τάξη μεγέθους χειρότερη από τις άλλες δυο. Εξ άλλου, τα δίκτυα GPS είναι δίκτυα στο χώρο που εξαρτώνται από την γεωμετρία των τροχιών των δορυφόρων και η γεωμετρία των δικτύων αυτών είναι συνήθως ασύμμετρη ως προς την τρίτη συνιστώσα. Οι αποστάσεις μεταξύ των σταθμών πάνω στην γη είναι της τάξης μερικών χιλιομέτρων, ενώ οι αντίστοιχες αποστάσεις ως προς τους δορυφόρους μερικές χιλιάδες χιλιόμετρα.

Οι γεωδαιτικές μέθοδοι για την παρακολούθηση της κινηματικής συμπεριφοράς τεχνικών έργων διακρίνονται σε επίγειες και δορυφορικές. Όσον αφορά στις επίγειες μεθόδους μπορεί να γίνει:

- Ίδρυση τρισδιάστατων, οριζοντίου ή κατακορύφου ελέγχου δικτύων.
- Συνεχής παρακολούθηση με σύγχρονους γεωδαιτικούς σταθμούς σε μόνιμα τοποθετημένα σημεία στο κυρίως σώμα του τεχνικού έργου.
- Σάρωση της επιφάνειας του τεχνικού έργου με γεωδαιτικούς σταθμούς που μετρούν μήκη χωρίς τη χρήση ανακλαστήρα (reflectorless) ή συστήματα τρισδιάστατης σάρωσης (laser scanner).
- Χρήση συμβολομετρίας με κατάλληλο εξοπλισμό, όπως επίγειο σύστημα Radar συνθετικού ανοίγματος
- Παρακολούθηση (σε μεγάλες συχνότητες) κινηματικής συμπεριφοράς σώματος με την βοήθεια αδρανειακού συστήματος.
- Με σύστημα βιντεομετρίας

Στις δορυφορικές μεθόδους γίνεται ίδρυση ενός δικτύου σημείων αντίστοιχου των τρισδιάστατων επίγειων δικτύων ελέγχου για την παρακολούθηση της κινηματικής συμπεριφοράς ταυτόχρονα και στις τρεις διαστάσεις. Σε συνδυασμό με μια αδρανειακή μονάδα έχουμε ένα ολοκληρωμένο σύστημα με πολύ ενδιαφέροντα εξαγόμενα αποτελέσματα.

1.5.1 Επίγεια γεωδαιτικά δίκτυα

Απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή και επιμέλεια στην επιλογή της θέσης των κορυφών των επίγειων γεωδαιτικών δικτύων. Τα κυριότερα κριτήρια επιλογής τους για την παρακολούθηση παραμορφώσεων σε τεχνικά έργα είναι:

- Χαρακτηριστικές – κατάλληλες θέσεις ώστε να καλύπτουν και να εξασφαλίζουν την παρακολούθηση όλης της περιοχής ενδιαφέροντος.
- Εύκολη πρόσβαση, ώστε να μπορεί να μεταφερθεί ο κατάλληλος γεωδαιτικός εξοπλισμός.
- Αμοιβαία ορατότητα μεταξύ τους ώστε να μπορούν να πραγματοποιηθούν οι απαραίτητες σκοπεύσεις (οριζοντιογραφικά και τρισδιάστατα δίκτυα).
- Το σταθερό σημείο του δικτύου να επιλέγεται σε τέτοια θέση, ώστε να εξασφαλίζεται η ανεξαρτησία της κινηματικής συμπεριφοράς του, σε σχέση με τα υπόλοιπα σημεία στο τεχνικό έργο.

- **Δίκτυα κατακόρυφου ελέγχου**

Τα δίκτυα κατακόρυφου ελέγχου (υψομετρικά δίκτυα) χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της κινηματικής συμπεριφοράς ενός τεχνικού έργου σε κατακόρυφη μόνο διεύθυνση (ανύψωση ή καθίζηση). Στα δίκτυα αυτά οι μετρήσεις αποβλέπουν στον προσδιορισμό των υψομετρικών διαφορών μεταξύ των σημείων ελέγχου και στην επίλυση ενός δικτύου με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Έτσι υπολογίζονται τα υψόμετά τους και η ακρίβεια του προσδιορισμού τους, που σήμερα μπορεί να είναι της τάξης του $\pm 1\text{mm}$.

Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται με τη μέθοδο της ψηφιακής γεωμετρικής χωροστάθμησης χρησιμοποιώντας ψηφιακό χωροβάτη και κωδικοποιημένες σταδίες. Η επιλογή των υψομετρικών συνδέσεων μεταξύ των σημείων ελέγχου προϋποθέτει τη διαδικασία της βελτιστοποίησης με τη βοήθεια της οποίας επιλέγεται ο συνδυασμός των συνδέσεων που πρέπει να πραγματοποιηθούν ώστε να επιτευχθεί η απαιτούμενη ακρίβεια με τη μικρότερη χρονική επιβάρυνση. Η μέτρηση του δικτύου επαναλαμβάνεται σε διάφορες χρονικές στιγμές (φάσεις). Ακολουθεί ο υπολογισμός της μεταβολής της υψομετρικής θέσης των κορυφών του δικτύου μεταξύ δύο διαδοχικών φάσεων και ο έλεγχος της απόλυτης και σχετικής μεταβολής της θέσης τους, για ένα συγκεκριμένο επίπεδο εμπιστοσύνης. Με τα δίκτυα αυτά είναι δυνατός ο προσδιορισμός κατακόρυφων μεταβολών από λίγα mm έως 1cm, ανάλογα με τη μορφή του δικτύου, την εφαρμοζόμενη μέθοδο μέτρησης και την παρεχόμενη ακρίβεια των οργάνων που θα χρησιμοποιηθούν.

- **Δίκτυα οριζοντίου και τρισδιάστατου ελέγχου**

Τα γεωδαιτικά δίκτυα οριζοντίου ελέγχου χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της κινηματικής συμπεριφοράς ενός τεχνικού έργου στις δύο διαστάσεις (επίπεδο). Η εξέλιξη των γεωδαιτικών σταθμών στην ευχρηστία και η αύξηση της ακρίβειας μέτρησης των κατακόρυφων γωνιών και μηκών επιτρέπουν σήμερα την εξέλιξη των δικτύων αυτών σε τρισδιάστατα, έτσι ώστε να είναι δυνατή η παρακολούθηση των παραμορφώσεων ενός σώματος και στις τρεις διαστάσεις. Η σήμανση των σημείων ελέγχου γίνεται με ειδικές κατασκευές. Έτσι διευκολύνεται η τοποθέτηση του κατάλληλου γεωδαιτικού εξοπλισμού για την πραγματοποίηση των μετρήσεων, εξασφαλίζεται η μονιμότητα και σταθερότητα των σημείων στο χώρο και στο χρόνο καθώς και ο μοναδικός ορισμός του σημείου ελέγχου σε όλες τις φάσεις των μετρήσεων. Συνήθως χρησιμοποιούνται:

- ειδικά βάρη τα οποία φέρουν στην κεφαλή τους κατάλληλο κοχλία στον οποίο προσαρμόζεται κάθε φορά ο χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός.
- πλακέτες με προεξοχικό κοχλία, οι οποίες πακτώνονται στο σώμα του φράγματος ή σε άλλη σταθερή θέση.

Πραγματοποιούνται μετρήσεις μηκών, οριζόντιων γωνιών ή διευθύνσεων και κατακόρυφων γωνιών μεταξύ των σημείων του δικτύου, χρησιμοποιώντας σύγχρονους ολοκληρωμένους γεωδαιτικούς σταθμούς. Μετά από κατάλληλη επεξεργασία με τη MET προσδιορίζονται τόσο οι συντεταγμένες των κορυφών του δικτύου όσο και οι αβεβαιότητές τους για κάθε φάση μέτρησης. Η επίλυση γίνεται σε τοπικό σύστημα αναφοράς θεωρώντας σταθερό ένα σημείο και μια διεύθυνση (ελάχιστες δεσμεύσεις). Ακολουθεί ο υπολογισμός της μεταβολής της θέσης (οριζοντιογραφικά και υψομετρικά) των κορυφών του δικτύου και ο έλεγχος της απόλυτης και σχετικής μεταβολής της θέσης τους, για ένα συγκεκριμένο επίπεδο εμπιστοσύνης. Έτσι είναι δυνατός ο ταυτόχρονος προσδιορισμός της μεταβολής της θέσης κάθε σημείου και στις τρεις.

1.5.2 Δορυφορικά γεωδαιτικά δίκτυα

Οι δορυφορικές γεωδαιτικές μετρήσεις, οι οποίες πραγματοποιούνται χρησιμοποιώντας δέκτες του συστήματος GPS, αποβλέπουν στον προσδιορισμό των διανυσμάτων στο χώρο, μεταξύ των κορυφών του τρισδιάστατου γεωδαιτικού δικτύου και φυσικά είναι ανεξάρτητες από την αμοιβαία ορατότητα μεταξύ των κορυφών του δικτύου.

Η σήμανση των σημείων αυτών μπορεί να γίνει με κατασκευές αντίστοιχες με τα επίγεια τρισδιάστατα δίκτυα ή και με πιο μικρά – χαμηλά βάθρα και στυλεούς στήριξης των κεραιών του συστήματος. Στα δίκτυα αυτά, ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στην επιλογή της θέσης των κορυφών τους, ώστε να βρίσκονται σε χώρο με ανοικτό ορίζοντα γύρω τους, να φαίνεται όσο το δυνατόν μεγαλύτερο τμήμα της ουράνιας σφαίρας και να μην επιλέγονται θέσεις κοντά σε φυσικά εμπόδια, τεχνητές κατασκευές, δέντρα και μεταλλικές κατασκευές. Έτσι προσδιορίζονται μετά από επίλυση κάθε φάσης μέτρησης, οι μεταβολές της θέσης των κορυφών του με ακρίβεια της τάξης των μερικών mm.

Οι διαφορές των συντεταγμένων των σημείων του δικτύου προσδιορίζονται αρχικά στο παγκόσμιο γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς WGS '84 και μετατρέπονται κατόπιν στο τοπικό σύστημα του τεχνικού έργου χρησιμοποιώντας έναν πίνακα στροφής A (σχέση 2.1), που εξαρτάται από τη θέση του φράγματος πάνω στη γη (φ , λ είναι οι γεωδαιτικές συντεταγμένες του κέντρου βάρους του δικτύου).

$$A = \begin{bmatrix} -\sin\delta \cdot \cos\lambda & -\sin\delta \cdot \sin\lambda & \cos\delta \\ -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ \cos\varphi \cdot \cos\lambda & \cos\varphi \cdot \sin\lambda & \sin\varphi \end{bmatrix}$$

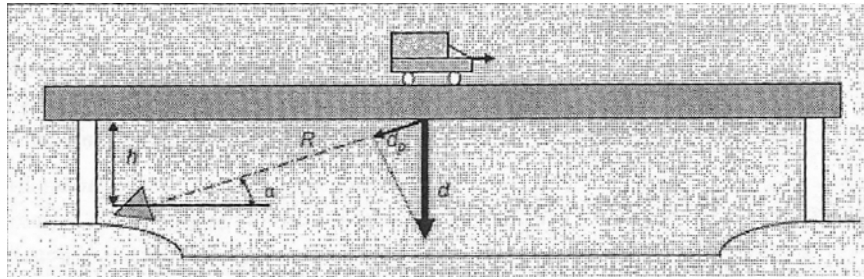
σχέση 1.4

Έτσι τελικά υπολογίζονται οι μεταβολές ΔN , ΔE , ΔU_p σε τοπικό τρισδιάστατο σύστημα στην περιοχή του σώματος. Μ' αυτό τον τρόπο τα διανύσματα των μεταβολών των συντεταγμένων και οι διευθύνσεις τους είναι άμεσα αντιληπτά και μπορούν να συσχετιστούν.

1.5.3 Επίγιο σύστημα radar συνθετικού ανοίγματος

Ένα άλλο μέσο το οποίο είναι διαθέσιμο τα τελευταία χρόνια είναι το γεωδαιτικό radar (Ground based Interferometric Synthetic Aperture Radar - GB InSAR). Οι γενικές αρχές λειτουργίας του είναι η διαμόρφωση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, το radar συνθετικού ανοίγματος και η χρήση της αρχής της συμβολομετρίας. Η πρωτογενής μέτρηση περιέχει μέτρηση διαφοράς φάσης (phase difference) και βαθμό ανακλαστικότητας (reflectivity) του αντικειμένου.

Με ακρίβεια μέτρησης μετακίνησης έως και 0.01mm, εμβέλεια έως 4km και συχνότητα καταγραφής έως 100Hz μπορούμε να ισχυριστούμε ότι το γεωδαιτικό radar είναι πλέον ένα μέσο πολύ χρήσιμο για μέτρηση μετακίνησης σε κατασκευές και μεγάλου μεγέθους τεχνικά έργα. Ο υπολογισμός της μετακίνησης στηρίζεται στον υπολογισμό της διαφοράς φάσης για εκπομπές ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε διαφορετικές χρονικές στιγμές.



εικόνα 1.7- υπολογιζόμενα μεγέθη από radar

όπως φαίνεται και στην εικόνα 1.7 οι μετακινήσεις υπολογίζονται κατά το μήκος της διεύθυνσης σκόπευσης. Οι μετακινήσεις είναι 1D δηλαδή για δεδομένη απόσταση R_i ο αισθητήρας επιστρέφει την μετακίνηση που αφορά το σφαιρικό κέλυφος από ακτίνα R_{i-1} έως R_{i+1} .

2. ΓΕΦΥΡΕΣ - ΠΕΖΟΓΕΦΥΡΕΣ

2.1 Κατηγορίες Γεφυρών

Γέφυρα, είναι η δομική κατασκευή, με την οποία επιτυγχάνεται η ζεύξη δύο θέσεων, μεταξύ των οποίων μεσολαβεί ένα εμπόδιο (ποτάμι, χαράδρα, δρόμος, κτλ). Ο σχεδιασμός, η κατασκευή και η λειτουργία μίας γέφυρας ποικίλουν, με κυριότερα κριτήρια την τοπογραφία και τα χαρακτηριστικά του εδάφους που πρόκειται να κατασκευαστεί, ενώ λαμβάνονται υπόψη και δευτερεύοντα στοιχεία όπως η αισθητική και η αρμονική σύνδεση με τον περιβάλλοντα χώρο.

Υπάρχει ποικιλία τύπων γεφυρών, αφού η κατάταξη μπορεί να γίνει βάσει των εξής επί μέρους χαρακτηριστικών:

- > Φύση γεφυρούμενου κωλύματος
- > Χρήση
- > Διατομή Καταστρώματος
- > Στατικό σύστημα
- > Μέθοδος Κατασκευής
- > Υλικό κατασκευής (σιδηρές, σύμμεικτες κ.α)

Έτσι κάποιοι χαρακτηριστικοί τύποι γεφυρών είναι :

- Κρεμαστή γέφυρα (Cable-stayed bridge)
- Αρθρωτή γέφυρα (Cantilever bridge)
- Καλωδιωτή γέφυρα
- Κινητή γέφυρα (Moveable bridge)
- Πλωτή γέφυρα (Pontoon bridge)

ή σε σχέση με την χρήση τους :

- οδικές
- σιδηροδρομικές
- πεζογέφυρες

2.2 Σιδηρές Γέφυρες

Ιστορική Αναδρομή

Η συστηματική χρησιμοποίηση των κραμάτων του σιδήρου στην κατασκευή σιδηρών γεφυρών, στις οποίες το κυρίως φέρον σύστημα συντίθεται από σιδηρά στοιχεία, άρχισε περί το τέλος του 18ου αιώνα, όπου τοποθετείται χρονικά και η έναρξη της πλέον αξιόλογης περιόδου της γεφυροποιίας. Με δεδομένα τα πολλαπλά πλεονεκτήματα του υλικού αυτού στις διάφορες μορφές του, (χυτοσίδηρος, πολτοπαγής ή ρευστοπαγής σίδηρος, χάλυβες υψηλής αντοχής), έναντι των μέχρι τότε εν χρήσει φυσικών υλικών (λίθος και ξύλο), διανοίγονται πλέον νέοι ορίζοντες για την γεφυροποιία, η οποία καλείται να παρακολουθήσει την πρόοδο των μέσων συγκοινωνίας και της τεχνολογίας, αλλά και τις διαρκώς αυξανόμενες απαιτήσεις του ανθρώπου (μετακινήσεις, διακίνηση

αγαθών κτλ). Παράλληλα και σταδιακά εγκαταλείπεται ο εμπειρισμός και παραχωρεί τη θέση του στην ασφαλέστερη και ακριβέστερη ανάλυση μέσω γραφικών στην αρχή και αναλυτικών στην συνέχεια μεθόδων υπολογισμού. Οι μέθοδοι κατασκευής και ανέγερσης, μέρα με τη μέρα βελτιώνονται, ενώ η επαναστατική εξέλιξη της βιομηχανίας του σιδήρου δίνει την δυνατότητα μαζικής παραγωγής του απαραίτητου υλικού, σε ποιότητες συνεχώς βελτιούμενες. Γίνεται με αυτόν τον τρόπο δυνατή η ζεύξη όλο και μεγαλύτερων ανοιγμάτων χωρίς την μεσολάβηση ενδιάμεσων στηρίξεων, με αποκορύφωμα την κρεμαστή γέφυρα Akashi-Kaikyo (Ιαπωνία 1998), που έχει σήμερα το μεγαλύτερο ελεύθερο άνοιγμα μεταξύ των πυλώνων (1990 m), ενώ σύμφωνα με τις εκτιμήσεις των ειδικών, υπάρχει η δυνατότητα μελλοντικά το ελεύθερο άνοιγμα να φθάσει και να ξεπεράσει τα 3000 m. Από την άλλη μεριά, ή εμφάνιση του σκυροδέματος (απλού, οπλισμένου και στη συνέχεια προεντεταμένου) στις αρχές του 20ου αιώνα, προκάλεσε μεν τον οικονομικό ανταγωνισμό των δύο αυτών υλικών, συνετέλεσε όμως στην εξεύρεση της τεχνικά αρτιότερης και οικονομικά βέλτιστης λύσης στα προβλήματα της γεφυροποιίας, με αποκορύφωμα την ανάπτυξη κατά τις τελευταίες δεκαετίες των συμμεικτών κατασκευών, όπου η συνεργασία των δύο υλικών οδηγεί στην αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων τους κατά τον καλύτερο δυνατό τρόπο.

2.2.1 Ιστορικά Χαρακτηριστικά Παραδείγματα Σιδηρών Γεφυρών

Η πρώτη στον κόσμο σιδηρά οδική γέφυρα κατασκευάστηκε από χυτοσίδηρο στον ποταμό Severn της Αγγλίας (1776-1779) (εικόνα 2.1). Αποτελείται από πέντε τοξωτούς κύριους φορείς, με άνοιγμα 30.50 m, ύψος τόξου 12 m και πλάτος γέφυρας 7.30m. Στην Αγγλία κατασκευάστηκε και η πρώτη στον κόσμο σιδηρά σιδηροδρομική γέφυρα το 1824, στη γραμμή Stockton-Darlington, με χυτοσιδηρές κύριες δοκούς αμφίκυρτης μορφής, ανοίγματος 3.80m. Η σιδηροδρομική γέφυρα Britannia (1846-1850), κατασκευάστηκε από πολτοπαγή σίδηρο, με κύριο φορέα συνεχή δοκό δύο ανοιγμάτων (71,90 m + 141,73 m) και διατομή κλειστού ορθογωνικού σχήματος διαστάσεων 4,27 m x 9,14 m. Η σιδηροδρομική γέφυρα απλής τροχιάς στο Dirschau της Γερμανίας (1851-1855) είναι η πρώτη μεγάλη γέφυρα με κύριο φορέα δικτυωτή δοκό. Δίπλα σ' αυτήν κατασκευάστηκε αργότερα (1889-1891) από τον Schwedler νεότερη σιδηροδρομική γέφυρα με κύριο φορέα δικτυωτή αμφίκυρτη δοκό με διαγώνιες διπλής δικτύωσης και ενδιάμεσο πέλμα, ενώ το κατάστρωμα ήταν αναρτημένο από το κάτω πέλμα.

Η σιδηροδρομική γέφυρα Firth of Forth (1883-1890), διπλής τροχιάς, κατασκευάστηκε με κύριες ράβδους σωληνωτής διατομής (μέγιστη διάμετρος 3,66 m) από ρευστοπαγή χάλυβα. Το ελεύθερο άνοιγμα μεταξύ των βάθρων είναι 521 m, ενώ το ύψος του δικτύωματος παρά τα βάθρα είναι 105 m. Το ύψος αυτό, γίνεται 12,50 m στο σημείο στήριξης του ενδιάμεσου αμφιέριστου τμήματος. Ο φορέας είναι δικτυωτή δοκός Gerber, όπου τα ογκώδη δικτύωματα ξεκινούν από τα βάθρα υπό μορφή προβόλου και προς τις δύο κατευθύνσεις, και στηρίζουν στο άκρο τους τα αμφιέριστα μεσαία δικτύωματα, τα οποία μεταφέρθηκαν κατά τη φάση ανέγερσης με πλωτά μέσα επί τόπου. Ο δικτυωτός φορέας γίνεται πιο πλατύς στη βάση, έτσι ώστε να αυξηθεί η ευστάθεια του. Από το 1965 έχει κατασκευασθεί δίπλα σ' αυτήν μία καινούργια κρεμαστή γέφυρα, όπως φαίνεται στο ίδιο σχήμα.



εικόνα 2.1 - γέφυρα Severn της Αγγλίας

Της ίδιας εποχής (1884) είναι και η σιδηροδρομική γέφυρα Trisanna στην Αυστρία, με κύριους φορείς σιδηρές αμφίκυρτες δικτυωτές δοκούς, στηριζόμενες σε λίθινους πυλώνες. Το 1900 άρχισε η κατασκευή της γέφυρας Quebec στον ποταμό St. Lawrence (Καναδάς). Είναι του ίδιου τύπου με τη γέφυρα Forth (συνεχής δικτυωτή δοκός με αρθρώσεις) με το μεγαλύτερο μέχρι σήμερα μεσαίο άνοιγμα για δικτυωτές δοκούς (549 m). Η οδοφόρος γέφυρα New Orleans στον Mississippi (USA, 1958), ενώ είναι πολύ μεταγενέστερη, βασίζεται (όπως και πολλές άλλες), στην ίδια ιδέα με τη Forth και τη Quebec, και έχει μεσαίο άνοιγμα 480 m. Στην κατηγορία των τοξωτών γεφυρών, από τις πρώτες γέφυρες μεγάλου ανοίγματος είναι η σιδηροδρομική γέφυρα Garabit (1880-1884), με κατασκευαστή το γνωστό G. Eiffel (1832-1923), κατασκευαστή και του ομώνυμου πύργου στο Παρίσι (1889), ύψους 330 m. Μία συνεχής δικτυωτή δοκός υποβαστάζει το κατάστρωμα και στηρίζεται σε πέντε δικτυωτά μεταλλικά βάρθα μεταβλητής διατομής (λόγω των ισχυρών ανεμοπιέσεων), καθώς και σε δικτυωτό αμφιαρθρωτό τόξο ανοίγματος 165 m. Η γέφυρα Hell Gate (New York, 1917) με άνοιγμα 298m, η γέφυρα του Sydney (Αυστραλία, 1932) με άνοιγμα 503 m και πλάτος 49 m, καθώς και η γέφυρα Bayonne στον ποταμό Rill van Kull (New York, 1931) με άνοιγμα 510 m, αποτελούν κλασικά παραδείγματα παλαιών τοξωτών γεφυρών.

Στην κατηγορία των κρεμαστών γεφυρών, που ήταν από παλιά μια προσφιλή λύση για τη ζεύξη μικρών και μεγάλων ανοιγμάτων, βασισμένη στη διαίσθηση και την εμπειρία παρά σε στατικές αναλύσεις, από τα πρώτα δείγματα είναι η γέφυρα Menai (Αγγλία, 1819-1826) με καλώδια ανάρτησης άλυσο από σφυρήλατο σίδηρο (αμφιαρθρωτά ελάσματα μήκους 3 m με ειδική διαμόρφωση στα άκρα για τη μεταξύ τους σύνδεση μέσω βλήτρων Φ76). Η γέφυρα είχε άνοιγμα 177 m και πλάτος 9 m, ήταν δε αναρτημένη από τέσσερις αλύσους των τεσσάρων λεπίδων η κάθε μία. Η γέφυρα Brooklyn (1870-1883) επί του East River με κύριο άνοιγμα 488 m και δύο πλευρικά 284 m, (μελετητής J. Roebling), η γέφυρα G. Washington (New York, 1927-1931) με κύριο άνοιγμα 1067 m, πλάτος 36,5 m, ύψος πυλώνων 198 m και διάμετρο κάθε καλωδίου 76 cm (σύνθεση 26474 συρμάτων), μελετητής O. H. Ammann, καθώς και η γέφυρα Golden Gate στο San

Francisco (1933-1937) με κύριο άνοιγμα 1280 m, πλάτος 18,3 m, ύψος πυλώνων 227,5 m και διάμετρο κάθε καλωδίου 93 cm (27512 σύρματα), είναι μερικά δείγματα παλαιών κρεμαστών γεφυρών.

Άλλα χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η ολόσωμη γέφυρα στο Ρήνο, κιβωτοειδούς μεταβλητής διατομής, τριών ανοιγμάτων (132+184+121 m), με ύψος στη στήριξη 7,80 m και στο μεσαίο άνοιγμα 3,3 m (Γερμανία, 1946). Η ολόσωμη γέφυρα (και αυτή στο Ρήνο) με τέσσερις κύριες δοκούς μεταβλητής διατομής, τριών ανοιγμάτων (99+196+99 m), με ύψος 11 m στη στήριξη και 3,45 m στο μεσαίο άνοιγμα (Γερμανία, 1948). Αξιοσημείωτοι εκπρόσωποι τοξωτών γεφυρών είναι η Matsushima (Ιαπωνία) με άνοιγμα 126 m, πλάτος 8,30 m και διάμετρο σωληνωτών τόξων 1,80 m, η Saikai (Ιαπωνία, 1955) με άνοιγμα 243 m, η Matoya (Ιαπωνία), η New River Gorge (USA) με το μεγαλύτερο άνοιγμα σε τοξωτό δικτυωτό φορέα (510 m), πλάτος καταστρώματος 22 m και ύψος πάνω από το ποτάμι 268 m (εικόνα 2.2), η Scwabelweis στο Δούναβη (Regensburg, 1982), η Fehmarnsund με άνοιγμα 248 m και διατομή τόξου 1,90 X 3,30 m, όπου η συνένωση των δύο τόξων στην κορυφή συντελεί στην καλύτερη παραλαβή των σεισμικών δυνάμεων και της ανεμοπίεσης, και η Milwaukee (USA), όπου γίνεται συνδυασμός εύκαμπτων τόξων με δύσκαμπτες δοκούς καταστρώματος.



εικόνα 2.2 - γέφυρα New river George (USA)

Στην κατηγορία των πλαισιωτών γεφυρών ορισμένες από τις οποίες μπορούν να υπαχθούν και στις τοξωτές, αναφέρονται οι Kinki (Ιαπωνία) με άνοιγμα 116 m και Sfalassa Gorge (Ιταλία), όπου η δοκός του καταστρώματος (σε ύψος 250 m πάνω από τον ποταμό) έχει ύψος 6,40 m και ανοίγματα 108+160+108 m. Επίσης γέφυρες αναρτημένες με ευθύγραμμα καλώδια όπως η North (Düsseldorf, 1958), έχει δύο ζεύγη μεμονωμένων πυλώνων (διαστάσεων 1,90 X 1,55 m) ύψους 40 m, το δε κατάστρωμα (πλάτους 26,60 m) στηρίζεται σε μεταλλική κιβωτοειδή διατομή ύψους 3,12 m και αναρτάται από παράλληλα διατεταγμένα ευθύγραμμα καλώδια (τρία από κάθε πυλώνα), η Mannheim (Ρήνος, 1971) στηρίζεται σε ένα πυλώνα ύψους 70 m μορφής A, με ανοίγματα 287+125 m, η Flehe στο Ρήνο (Düsseldorf, 1979) με κύριο άνοιγμα 368 m, στηρίζεται σε ένα πυλώνα μορφής ανάποδου Y και έχει ένα επίπεδο καλωδίωσης.

Τέλος, κρεμαστές γέφυρες με καμπύλα καλώδια, μία μορφή που χρησιμοποιήθηκε από πολύ παλιά, η Mackinac Straits (Michigan, 1957) με κύριο άνοιγμα 1140 m, ύψος κιβωτοειδούς δικτυωτής διατομής καταστρώματος 11,60 m και πλάτος 15 m, η Tacotna Narrows (USA), η οποία αντικατέστησε την καταστραφείσα από ανεμοπίεση το 1940 παλαιά γέφυρα, η Verrazano Narrows (New York, 1964), με κύριο άνοιγμα 1298 m, διώροφη, η Humber (England, 1980) με κύριο άνοιγμα 1410 m και πυλώνες από σκυρόδεμα ύψους 152 m.



εικόνα 2.3 - παλαιά γέφυρα Tacotna Narrows



εικόνα 2.4 - νέα γέφυρα Tacotna Narrows

2.2.2 Πλεονεκτήματα Σιδηρών Γεφυρών

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των σιδηρών γεφυρών, απορρέουν από τις ιδιότητες του χάλυβα και είναι τα ακόλουθα:

- Υψηλή αντοχή (λεπτές διατομές, μικρό ίδιο βάρος, οικονομία υλικού και χώρου)
- Ολκιμότητα (εκτεταμένη παραμόρφωση χωρίς αστοχία)
- Ομοιομορφία υλικού (επισταμένοι έλεγχοι κατά την παραγωγή)
- Μεγάλη διάρκεια ζωής
- Ταχύτητα ανέγερσης
- Τροποποίηση ή ενίσχυση υπάρχουσων γεφυρών (για αύξηση ωφέλιμου φορτίου)
- Επαναχρησιμοποίηση υλικού
- Ευκολία προκατασκευής
- Δυνατότητα ζεύξης μεγάλων ανοιγμάτων
- Αισθητικά αποτελέσματα

Από την άλλα πλευρά ως κυριότερο μειονέκτημα αναφέρεται η σκωρίαση, η οποία αποτελεί την "Αχίλλειο πτέρνα" γενικά των σιδηρών κατασκευών. Αυτό συνεπάγεται αύξηση του κόστους συντήρησης σε σχέση με άλλα υλικά.

2.2.3 Κατηγορίες Σιδηρών Γεφυρών

Ανάλογα με τον εκάστοτε εξεταζόμενο παράγοντα, οι σιδηρές και οι σύμμεικτες γέφυρες μπορούν να ταξινομηθούν σε διάφορες κατηγορίες, ανεξάρτητες μεταξύ τους, οι κυριότερες από τις οποίες είναι οι ακόλουθες:

- Προορισμός (οδικές σιδηροδρομικές, μικτές, πεζογέφυρες κτλ)
- Στατική μορφή κυρίων δικών (αμφιέριστες, συνεχείς, πλαισιωτές κτλ)
- Μόρφωση κυρίων δοκών (ολόσωμες πρότυπες, κιβωτοειδείς, ισοστατικές κτλ)
- Θέση καταστρώματος (άνω, μέσης και κάτω διάβασης)
- Αριθμός καταστρωμάτων (μονώροφες και διώροφες)
- Είδος συνδέσεων (ηλωτές, συγκολλητές)
- Λοξότητα (ορθές, λοξές)
- Γεωμετρική χάραξη άξονα (ευθύγραμμες, καμπύλες, οριζόντιες, κεκλιμένες)
- Διάρκεια χρήσης (μόνιμες, προσωρινές)
- Κινητότητα (σταθερές και κινητές)

2.3 Πεζογέφυρες

Πεζογέφυρα είναι μια γέφυρα σχεδιασμένη για τους πεζούς και σε ορισμένες περιπτώσεις για την κυκλοφορία των ποδηλατών, των ζώων κυκλοφορίας και για τους ιππείς, και όχι οχημάτων. Σε πολλές ανεπτυγμένες χώρες, οι πεζογέφυρες είναι όχι μόνο λειτουργικές, αλλά και αξιοσημείωτα σύγχρονης αρχιτεκτονικής και γλυπτικής. Για φτωχές αγροτικές κοινότητες στον αναπτυσσόμενο κόσμο, μια γέφυρα μπορεί να είναι μόνο η πρόσβαση μιας κοινότητας σε ιατρικές κλινικές, τα σχολεία και τις αγορές, οι οποίες διαφορετικά θα ήταν απρόσιτες.

Πεζογέφυρες βρίσκονται συχνά για να δώσουν την δυνατότητα στους πεζούς να διασχίσουν το υδάτινο στοιχείο, ή έναν σιδηρόδρομο. Βρίσκονται επίσης σε οδικές αρτηρίες ώστε οι πεζοί να διασχίζουν με ασφάλεια την οδό χωρίς να επιβραδύνεται η κυκλοφορία. Πεζογέφυρα σε οδική αρτηρία παρατηρείται ιδιαίτερα κοντά σε σχολεία, ή άλλου κοινωφελείς χώρους ώστε να βοηθήσει στην πρόληψη ατυχημάτων.

2.3.1 Στοιχεία Σχεδιασμού Πεζογεφυρών – Δομική Συμπεριφορά

Όσον αφορά τον σχεδιασμό των πεζογεφυρών απαραίτητα στοιχεία υπολογισμού είναι οι κατακόρυφες και οριζόντιες δράσεις σύμφωνα με τον κανονισμό.

Κατακόρυφα φορτία:

Ο κανονισμός ορίζει τρία μοντέλα φόρτισης για ελέγχους αντοχής και λειτουργικότητας, με τις ακόλουθες χαρακτηριστικές τιμές:

α) Ομοιόμορφα διανεμημένο φορτίο

$$q_{fk} = 5 \text{ kN/m}^2$$

σχέση 2.1 – διανεμημένο φορτίο

Για μεμονωμένο άνοιγμα γέφυρας από 10m έως 210m ισχύει:

$$2.5 \text{ kN/m}^2 \leq q_{fk} = 2.0 + 120/(L_{sj}+30) \leq 5.0 \text{ kN/m}^2$$

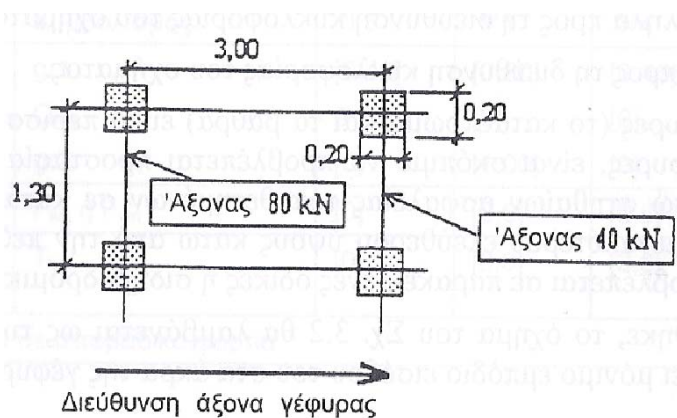
σχέση 2.2 – γενική σχέση

β) Συγκεντρωμένο Φορτίο

Για γενικές και τοπικές επιδράσεις τοποθετείται ένα συγκεντρωμένο φορτίο $Q_{f_{wk}} = 10 \text{ kN}$ που ενεργεί σε μία τυπική επιφάνεια $0.10 \times 0.10 \text{ m}^2$. Το φορτίο αυτό δεν λαμβάνεται υπόψη, εφόσον γίνει χρήση του οχήματος συντήρησης.

γ) Όχημα Συντήρησης

Υπάρχει περίπτωση από την αρμόδια κατασκευάστρια αρχή ή από τον ιδιοκτήτη της πεζογέφυρας να ορισθεί συγκεκριμένος τύπος οχήματος ή άλλης χρήσης (νοσοκομειακό, πυροσβεστικό κλπ), εάν δεν ισχύει αυτό τότε εφαρμόζεται ως τυχηματικό φορτίο το τυπικό όχημα όπως φαίνεται στην εικόνα 2.5.



εικόνα 2.5 – τυχηματικό φορτίο

Το παραπάνω όχημα εφαρμόζεται εφόσον δεν παρεμποδίζεται με μόνιμα εμπόδια η είσοδος του στο κατάστρωμα της πεζογέφυρα. Με το συγκεκριμένο όχημα δεν συνυπολογίζεται ταυτόχρονα άλλη μεταβλητή δύναμη, εκτός αν ορίζεται αλλιώς από σχετικές προδιαγραφές. Το αντίστοιχο φορτίο τροχοπέδησης είναι ίσο με το 60% του κατακόρυφου φορτίου του οχήματος.

Οριζόντια φορτία:

Η χαρακτηριστική τιμή της οριζόντιας δύναμης Q_{fwk} που δρα κατά μήκος του άξονα της γέφυρας στο επίπεδο του οδοστρώματος, είναι η μεγαλύτερη από τις ακόλουθες τιμές:

- 10% του συνολικού ομοιόμορφα διανεμημένου φορτίου , ή
- 60% του συνολικού βάρους του οχήματος συντήρησης

Η δύναμη αυτή θεωρείται, ότι ενεργεί ταυτόχρονα με την αντίστοιχη κατακόρυφη δύναμη.

Τυχηματικές δράσεις:

Οι δράσεις αυτές προέρχονται είτε από κυκλοφορία κάτω από την γέφυρα ή από τυχαία παρουσία μεγάλου φορτίου πάνω στην γέφυρα. Οι δυνάμεις πρόσκρουσης με τα βάρθρα ή άλλα στοιχεία στήριξης της πεζογέφυρας θεωρείται ότι ενεργούν σε ύψος 1.25m πάνω από την επιφάνεια του οδοστρώματος και λαμβάνονται ίσες με:

- 1000 kN παράλληλα προς την διεύθυνση κυκλοφορίας του οχήματος
- 500 kN κάθετα προς τη διεύθυνση κυκλοφορίας του οχήματος.

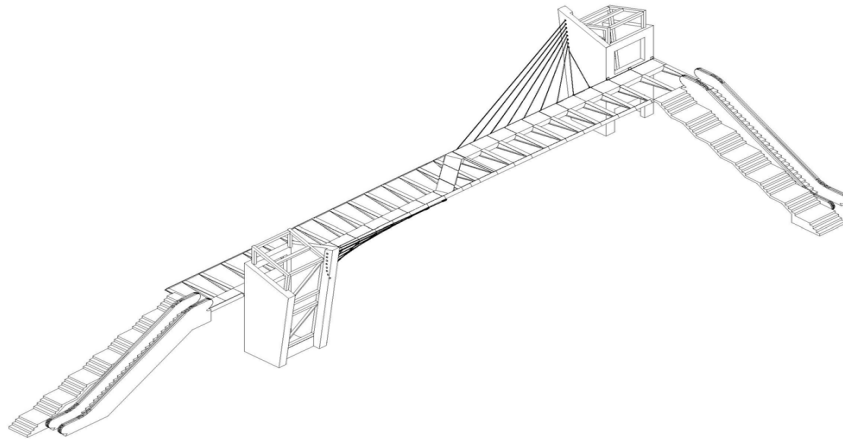
Επειδή οι πεζογέφυρες είναι πιο ευαίσθητες από τις οδικές γέφυρες είναι σκόπιμο να προβλέπεται προστασία από τέτοια πρόσκρουση, είτε μέσω στηθαίων ασφαλείας τοποθετημένων σε κατάλληλη θέση, είτε μέσω πρόβλεψης μεγαλύτερου ελεύθερου ύψους κάτω από την πεζογέφυρα, από το αντίστοιχο που προβλέπεται σε παρακείμενες οδικές ή σιδηροδρομικές γέφυρες.

2.4 Η Πεζογέφυρα της Λεωφόρου Κηφισίας

2.4.1 Βασικά Στοιχεία

Η πεζογέφυρα στην οποία εκτελέστηκε η παρούσα εργασία εντοπίζεται σε μία από τις κύριες οδικές αρτηρίες της Αθήνας, την Λεωφόρο Κηφισίας και συνδέει τους δήμους Χαλανδρίου και Φιλοθέης στο ύψος του κολεγίου Αθηνών. Η γέφυρα έχει συνολικό μήκος 60.00m, με καθαρό κατάστρωμα 31.50m, πλάτος 4.00m και πάχος καταστρώματος 0.75m. Το ελάχιστο ύψος της γέφυρας από το οδόστρωμα της λεωφόρου είναι 5.15m έτσι ώστε να υπάρχει ικανό διάκενο για την διέλευση δικτύου (ιστοί, καλώδια) του ΗΛΠΑΠ καθώς και για τα ίδια ηλεκτροκίνητα λεωφορεία.

Πρόκειται για καλωδιωτής μορφής, πακτωμένη από δύο πυλώνες ορθογωνικής διατομής, διαγώνια τοποθετημένους, σε κάθε πλευρά του καταστρώματος. Υποστηρίζεται από 16 γαλβανισμένα καλώδια διαμέτρου 33mm, οκτώ από κάθε πλευρά.

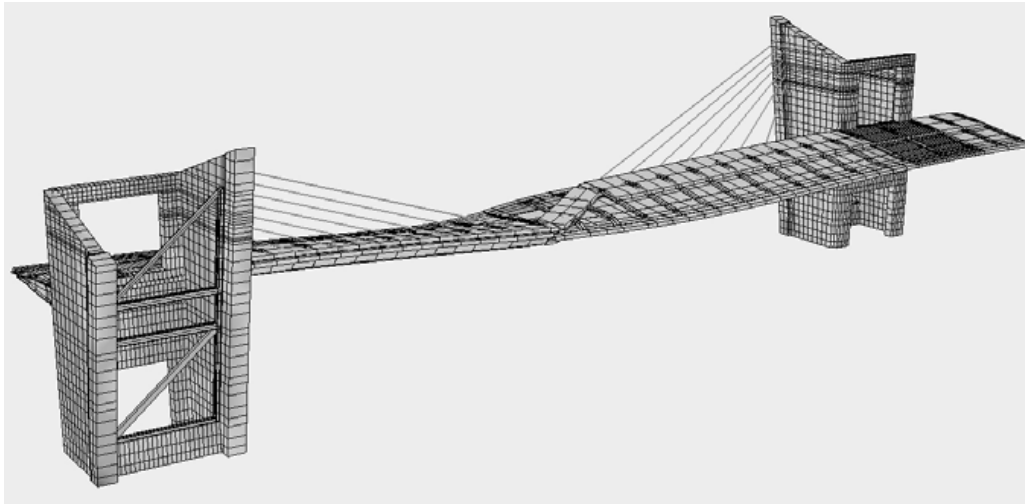


εικόνα 2.6 - δομικό σύστημα γέφυρας

Η πρόσβαση από τους χρήστες επιτυγχάνεται μέσω κλιμάκων (μία ηλεκτρικής κίνησης και μία σταθερή σε κάθε πλευρά) καθώς και από τέσσερις ανεγκυστήρες, που στεγάζονται εντός των πυλώνων.

2.4.2 Σχεδιασμός και Κατασκευή Πεζογέφυρας

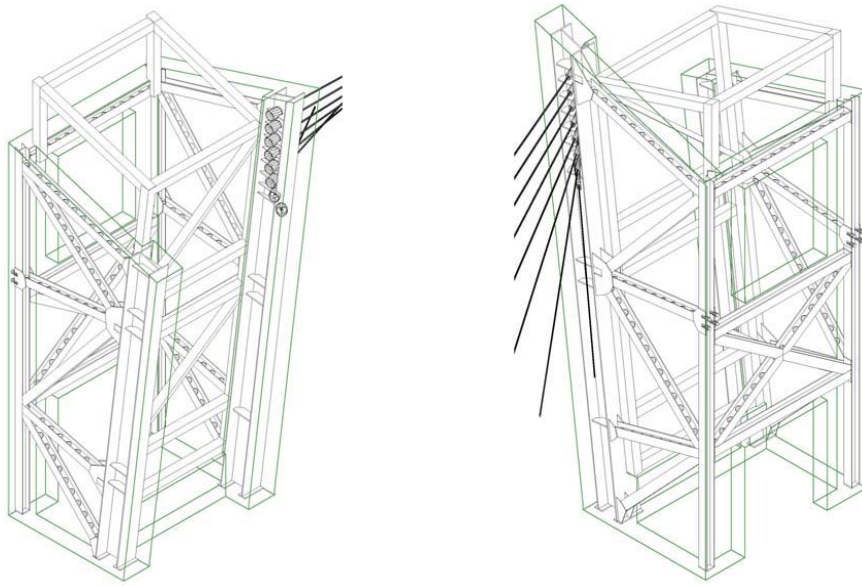
Η κύρια δοκός στήριξης είναι σχήματος z και διαμορφώνεται κατά μήκος του καταστρώματος με εγκάρσιες δοκούς σχήματος I οι οποίες απέχουν μεταξύ τους απόσταση 1.50m. Τα καλώδια εδράζουν και στις δυο παρειές της γέφυρας, δίνοντας μάλιστα την εικόνα ενός δημοφιλούς παιδικού παιχνιδιού. Για την αποφυγή θερμικής παραμόρφωσης, εξαιτίας της ασύμμετρης τοποθέτησης των πυλώνων στήριξης, σχεδιάστηκε ένας διαμήκης αρμός κοντά στο κέντρο του καταστρώματος. Έτσι λόγω του αντισυμμετρικού σχήματος της κατασκευής, αξονικές δυνάμεις οι οποίες δρουν στο κατάστρωμα εξαιτίας της διαφοράς θερμοκρασίας θα μπορούσαν να προκαλέσουν σημαντική δομική παραμόρφωση, ροπές κάμψεως κατά μήκος του κατακόρυφου άξονα του καταστρώματος και στρέψη των πυλώνων. Προκειμένου να αποφευχθεί αυτή η δυσμενής δομική κατάσταση, ο αρμός κοντά στο κέντρο του καταστρώματος επιτρέπει μόνο διαμήκη ολίσθηση, μεταξύ των δύο τμημάτων της γέφυρας



εικόνα 2.7 - το μαθηματικό μοντέλο της γέφυρας

Τα δύο τμήματα συνδέονται με έναν άξονα από ανοξείδωτο χάλυβα, σε μια κυλινδρική υποδοχή, που επιτρέπει μόνο κατά μήκος κινήσεις, ενώ περιορίζει κινήσεις κατά την εγκάρσια κατεύθυνση καθώς και περιστροφές. Τα φορτία αγκυρώσεως των καλωδίων μεταφέρονται μέσω των συνδέσμων χάλυβα στην πρόσοψη των πυλώνων στις κεφαλές των πασσάλων και στην συνέχεια στην θεμελίωση της κατασκευής, η οποία παρέχεται μέσω δώδεκα πασσάλων, έξι για κάθε πύλωνα. Οι πάσσαλοι βρίσκονται υπό συνεχή ένταση ώστε να ελέγχουν ρωγμές στο σκυρόδεμα και διάβρωση του οπλισμού.

Με τη χρήση του ολισθαίνοντος κυλινδρικού άξονα στο κέντρο της κύριας δοκού και ένα πρόσθετο μικρότερου κοντά στο τέλος της κοινής εγκάρσιας δοκού, κάμψη, στρεπτικές ροπές και δυνάμεις διάτμησης μεταφέρονται μέσω των δύο τμημάτων της γέφυρας, με αποτέλεσμα μία συνεχή δομή χωρίς δυσμενείς συνέπειες.



εικόνα 2.8 - οι πυλώνες με το σύστημα αγκύρωσης των καλωδίων

Τα καλώδια τοποθετούνται αντισυμμετρικά σε κάθε πλευρά της γέφυρας, κεκλιμένα στις δύο κατευθύνσεις, μεταξύ της κορυφής των πυλώνων και την εξωτερική πλευρά του καταστρώματος και αγκυρώνονται στους πυλώνες, μέσω ενός συστήματος ειδικά σχεδιασμένου με σύστημα παρακολούθησης πίεσης καθώς και σύστημα φωτισμού.

Για την περίοδο της κατασκευής τοποθετήθηκε μία προσωρινή μεσαία στήριξη στο κεντρικό διάζωμα μεταξύ των δυο ρευμάτων κυκλοφορίας και τα δύο τμήματα της γέφυρας μέχρις ότου συνδεθούν με τους πυλώνες και τανυστούν τα καλώδια θα εδράζουν προσωρινά και στο μεσαίο στήριγμα.

3. ΣΥΣΤΗΜΑ - ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

3.1 Γενικά

Το σύστημα που θα αναλυθεί παρακάτω ανήκει στην σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου και συγκεκριμένα στα εργαστήρια Γενικής Γεωδαισίας και Δορυφορικής Γεωδαισίας, τα οποία προορίζεται για εκπαιδευτικούς και ερευνητικούς σκοπούς.

Πρόκειται για:

- Ολοκληρωμένο αδρανειακό και δορυφορικό σύστημα Novatel
- Δορυφορικό σύστημα Leica σειράς Smart Rover 1200GP
- Ολοκληρωμένος Γεωδαιτικός σταθμός Leica TDA-5005
- Ολοκληρωμένος Γεωδαιτικός σταθμός Leica TCA-1800
- Ψηφιακός χωροβάτης Leica DNA-03

3.2 Κλασσικές Τοπογραφικές Μέθοδοι

3.2.1 Τοπογραφική Αποτύπωση Ακριβείας

Για την ίδρυση του δικτύου οριζοντίου ελέγχου αλλά και για την παρακολούθηση των πυλώνων χρησιμοποιήθηκε ένας γεωδαιτικός σταθμός ακριβείας και συγκεκριμένα ο TDA 5005 της εταιρείας Leica Geosystems. Αποτελεί μέρος της σειράς TPS 5000, κατασκευασμένη ειδικά για βιομηχανική γεωδαισία. Τα υπόλοιπα όργανα που συμπληρώνουν την οικογένεια είναι το Total Station TDM 5005 και τα ψηφιακά θεοδόλιχα TM 5005, TM 5100, TM 5100A. Και τα τρία όργανα είναι τα νεότερα μοντέλα των αρχικών TDM 5000, TDA 5000 και TM 5000. Η σειρά TPS 5000 περιλαμβάνει τα καλύτερα και ακριβέστερα όργανα που κατασκευάζει η εταιρεία Leica σε σχέση με τους υπόλοιπους τύπους.



εικόνα 3.1 – Γεωδαιτικός σταθμός Leica TDA 5005 [leica-geosystems]

Το TDA 5005 παρέχει υψηλή ακρίβεια στις μετρήσεις γωνιών και αποστάσεων, είναι πλήρως ψηφιακό και διαθέτει υψηλής ποιότητας οπτικά στοιχεία. Η απόδοση (ανάγνωση) των οριζόντιων και των κατακόρυφων γωνιών γίνεται με 0.1cc ενώ η ακρίβεια των οριζόντιων και κατακόρυφων γωνιών είναι 1.5cc (σύμφωνα με DIN 18723). Εάν θεωρήσουμε ως συνηθισμένες αποστάσεις της βιομηχανικής γεωδαισίας τα 10 m έως τα 60 m, η παραπάνω ακρίβεια μεταφράζεται σε γραμμικό σφάλμα 0.024 mm και 0.141 mm αντίστοιχα.

Η ελάχιστη ανάγνωση στη μέτρηση αποστάσεων είναι 0.01 mm ενώ η ακρίβεια μέτρησης αποστάσεων είναι 1 mm + 2 ppm (σύμφωνα με DIN 18723). Η μέγιστη απόσταση μέτρησης με άριστες συνθήκες είναι 3500/5000 m (1 ή 3 πρίσματα αντίστοιχα). Επιπλέον μπορούν να οριστούν παράμετροι που μεταβάλλουν την απόσταση ώστε αυτή να διορθώνεται (όπως θερμοκρασία, πίεση, διάθλαση, χαρτογραφική παραμόρφωση, καμπυλότητα γης κ.α.). Υπάρχει η δυνατότητα ορισμού μέτρησης με μικρότερη ακρίβεια προκειμένου να μειώνεται ο χρόνος μέτρησης κάθε απόστασης.

Διαθέτει διπλό αντισταθμιστή εύρους 7c με ακρίβεια μέτρησης αποκλίσεων, άρα και ακρίβεια των διορθώσεων 1cc. Ακόμη διαθέτει κυκλική αεροστάθμη ευαισθησίας 4' / 2 mm ενώ δεν διαθέτει σωληνωτή αλλά ηλεκτρονική αεροστάθμη με ευαισθησία 2". Αυτό σημαίνει ότι με βάση τη σχέση $\delta a = i \tan u \sin a$, η μεταβολή των οριζόντιων γωνιών για $i=2''$ για $u=20^\circ$, $a=90^\circ$ θα είναι 0,73". Σε γραμμικό μέγεθος ενός σημείου, αυτό μεταφράζεται σε μεταβολή 0.21 mm για απόσταση 60 m. Η μεταβολή αυτή μειώνεται περαιτέρω λόγω της λειτουργίας του αντισταθμιστή. Επίσης διαθέτει πολλές δυνατότητες αυτοελέγχου.

Το τηλεσκόπιο του έχει αντικειμενικό φακό 42 mm και ικανότητα μεγέθυνσης 32x. Αυτό σημαίνει ότι, χρησιμοποιώντας το προσεγγιστικό τύπο:

$$\delta_{cc} = 37.5 / d = 37.5 / 4.2 = 8.929cc$$

εξίσωση 3.1 - διακριτική ικανότητα τηλεσκοπίου

η διακριτική ικανότητα του τηλεσκοπίου είναι 8,929cc. Δηλαδή, σε αποστάσεις των 10 m μπορούν να διακριθούν σημεία που απέχουν 0,14 mm ενώ σε αποστάσεις 60 m μπορούν να διακριθούν σημεία που απέχουν 0,84 mm.

Μπορεί να συνδεθεί με υπολογιστή μέσω θύρας RS232 ή να αποθηκεύσει τα δεδομένα σε κάρτα PCMCIA (4500-36000 σημεία). Έχει τη δυνατότητα να εκτελεί εφαρμογές οπισθοτομίας, χάραξης, έκκεντρης στάσης, κ.α. ή να δημιουργήσει ο χρήστης δική του εφαρμογή. Οι κοχλίες μικρομετακίνησης είναι ατέρμονοι και ρυθμίζονται από το χρήστη.

Διαθέτει επίσης σερβομηχανισμούς για τη ρομποτική του λειτουργία και σε συνδυασμό με συσκευή ράδιο-ζεύξης (*radio link*) δύναται να λειτουργήσει από ένα μόνο χρήστη. Επίσης το TDA 5005 διαθέτει δυνατότητα αυτόματης αναγνώριση στόχου (ATR). Με αυτή τη λειτουργία του και το αντίστοιχο κατάλληλο στόχο, το όργανο εντοπίζει την

ακριβή θέση του στόχου εφ' όσον έχει οριστεί μια συγκεκριμένη περιοχή. Σε συνέχεια αυτής της δυνατότητας, μπορεί να ακολουθεί κινούμενο στόχο για ορισμένο εύρος ταχύτητας και να καταγράφει σε κάθε παύση κίνησης.

Η λειτουργία του ATR βασίζεται στην χρήση κάμερας CCD στο όργανο. Η συσκευή στέλνει μια ακτίνα laser και κατά την επιστροφή της ελέγχει κατά πόσο αποκλίνει από το κέντρο της κάμερας CCD, επιβάλλοντας τις ανάλογες διορθώσεις ή κινώντας τους σερβομηχανισμούς. Η ακρίβεια του ATR στην επιφάνεια του στόχου είναι 1-3 mm από το κέντρο του στόχου και εξαρτάται από την απόσταση τους.

Η ακρίβεια τοποθέτησης του ATR είναι 1.5cc, όσο δηλαδή η ακρίβεια του οργάνου που είναι και η ακρίβεια μετακίνησης των σερβομηχανισμών (αυτό ισχύει σε άριστες συνθήκες και για μήκος >200 m). Η ακρίβεια του ATR εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις εξωτερικές συνθήκες, την απόσταση του στόχου, το είδος και την κατάσταση του στόχου και από τη συχνότητα βαθμονόμησης του ATR.

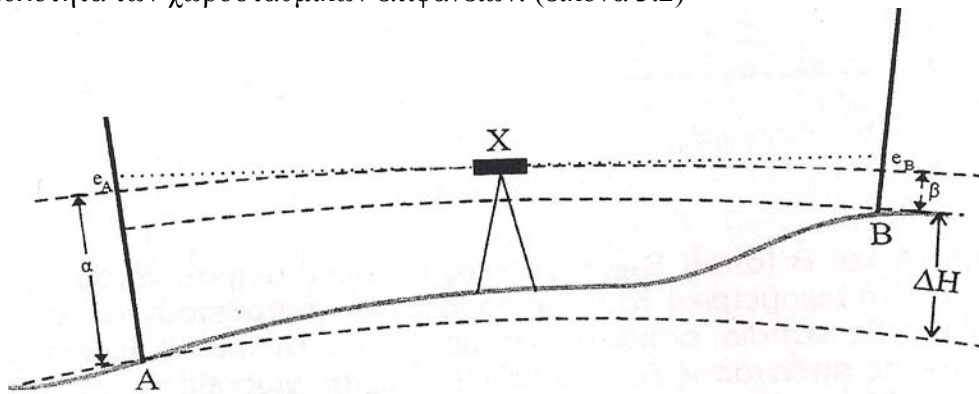
Πίνακας 3.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά TDA 5005 [leica-geosystems]

Απόδοση οριζόντιων & κατακόρυφων	0,1 °
Ακρίβεια οριζόντιων & κατακόρυφων	1,5 °
Απόδοση αποστάσεων	0,01 mm
Ακρίβεια αποστάσεων	1 mm + 2 ppm
Μέγιστη απόσταση μέτρησης	3500/5000 m (1 / 3 πρίσματα)
Εύρος διπλού αντισταθμιστή	7 °
Ακρίβεια διπλού αντισταθμιστή	1 °
Ευαισθησία κυκλικής αεροστάθμης	4' / 2 mm
Ευαισθησία ηλεκτρονικής αεροστάθμης	2"
Διάμετρος αντικειμενικού φακού	42 mm
Ικανότητα μεγέθυνσης	32x
Μέγιστη ακρίβεια ATR	1,5°
Εύρος μέτρησης με ATR	έως 1000 m
Διάρκεια λειτουργίας με 1 μπαταρία	600 μετρήσεις γωνιών & αποστάσεων

3.2.2 Γεωμετρική Χωροστάθμιση Ακρίβειας

Για τον έλεγχο του κατακορύφου ελέγχου χρησιμοποιήθηκε γεωδαιτικός ψηφιακός χωροβάτης ώστε να έχουμε την μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια από πλευράς εξοπλισμού. Για να επιτύχουμε την μέγιστη ακρίβεια που μπορεί να μας παρέχει ο χωροβάτης αντιμετωπίστηκαν όλα τα πιθανά σφάλματα τα οποία προέρχονται από την φύση του οργάνου και των μετρούμενων μεγεθών.

Έτσι ο χωροβάτης τοποθετείται κάθε φορά στην μεσοκάθετο της απόστασης γερεστούχου ώστε να εξαλείφεται (σε πρώτο βαθμό) το σφάλμα που προέρχεται από την καμπυλότητα των χωροσταθμικών επιφανειών. (εικόνα 3.2)

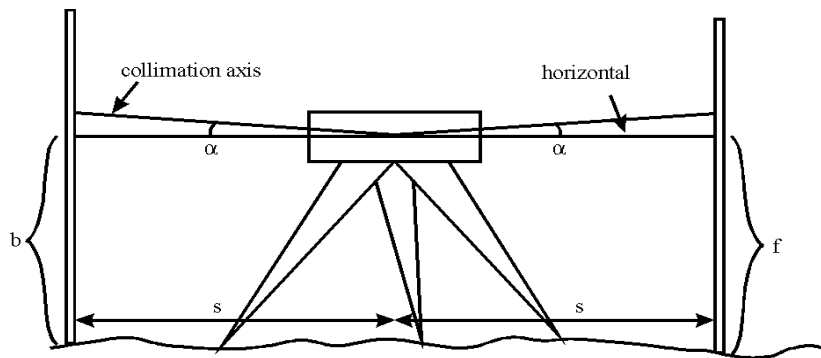


εικόνα 3.2 - Χωροβάτης στην μεσοκάθετο [Μπαλοδήμος, 2004]

όπως φαίνεται και ην εικόνα 3.2 επειδή οι χωροσταθμικές επιφάνειες ακολουθούν περίπου την μορφή της καμπυλότητας της γης, για τον προσδιορισμό της ΔH_{AB} θα πρέπει ο χωροβάτης να τοποθετείται στην μεσοκάθετο της απόστασης AB ώστε $e_A = e_B$.

Αυτή η διαδικασία ακολουθήθηκε σε όλη την διάρκεια των χωροσταθμίσεων με αποτέλεσμα για το κατάστρωμα της γέφυρας (30m περίπου), εκτελέστηκαν τρεις ανεξάρτητες ακτινωτές χωροσταθμίσεις, ώστε σε κάθε χωροστάθμιση να εξασφαλίζεται ότι ο χωροβάτης βρίσκεται στην μεσοκάθετο.

Ένα ακόμα σφάλμα της χωροστάθμισης που λήφθηκε υπόψη είναι το σφάλμα οριζοντίωσης του σκοπευτικού άξονα, γνωστό και ως "collimation error". Αυτό συμβαίνει όταν ο σκοπευτικός άξονας δεν είναι πραγματικά οριζόντιος όταν το όργανο είναι οριζοντιωμένο. Το αποτέλεσμα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (εικόνα 3.3) όπου στην συγκεκριμένη περίπτωση το αποτέλεσμα είναι να γίνει ανάγνωση μεγαλύτερης τιμής.



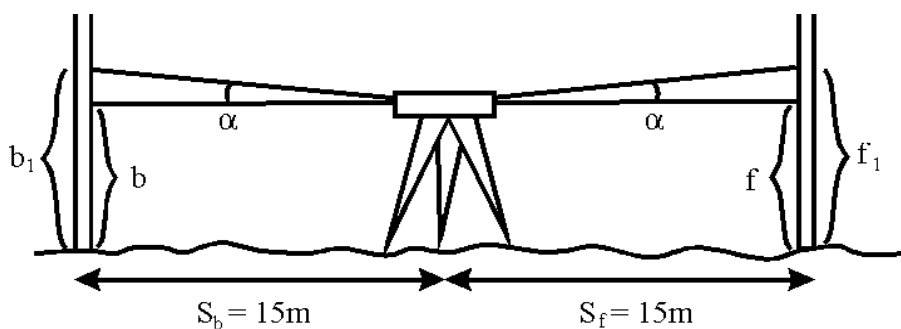
εικόνα 3.3 – σφάλμα οριζοντίωσης του σκοπευτικού άξονα [www.psmsl.org]

Για ένα σύνηθες τυπικό σφάλμα 20", σε μήκος 50m το αποτέλεσμα του σφάλματος είναι 5mm. Εάν οι αποστάσεις των όπισθεν και εμπροσθεν είναι ίσες, τότε και τα σφάλματα είναι ίσα και στις δυο αναγνώσεις οπότε και εξαλείφονται.

$$\delta h = (b + s \cdot \alpha) - (f + s \cdot \alpha) = b - f \quad (3.2)$$

Το σφάλμα οριζοντίωσης του σκοπευτικού άξονα (collimation error) είναι το πιο σημαντικό από όλα τα σφάλματα που επηρεάζουν τις χωροσταθμίσεις. Όσο πιο μικρό είναι τόσο εξασφαλίζεται ότι θα προκύψουν μετρήσεις ακριβείας. Για να διορθωθεί αυτό το σφάλμα ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία, γνωστή και ως "Two-peg test" (σε τρία βήματα):

- Υλοποιούμε δυο σημεία στο έδαφος σε απόσταση 30m και τοποθετούμε τον χωροβάτη στο μέσο της απόστασης όπως στην εικόνα 3.4 (με ακρίβεια $\pm 0,50m$).

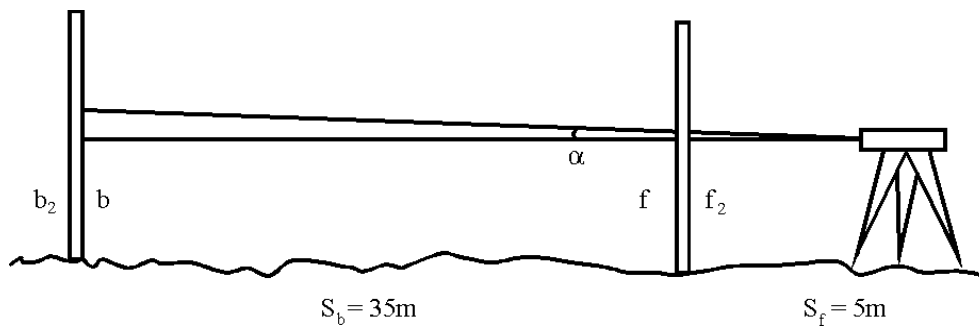


εικόνα 3.4 – βήμα πρώτο [www.psmsl.org]

Λαμβάνεται ανάγνωση όπισθεν και έμπροσθεν, η υψομετρική διαφορά δh_1 θα είναι ανεξάρτητη του σφάλματος και ίση με:

$$\begin{aligned} \delta h_1 &= b_1 - f_1 = (b + s_b \cdot \alpha) - (f + s_f \alpha) \quad (3.3) \\ &= b - f + \alpha (s_b - s_f) \\ &= b - f \quad (\text{δεδομένου ότι } s_b = s_f) \end{aligned}$$

- Στην συνέχεια, μετακινείται ο χωροβάτης πίσω από τις δυο σταδίες σε απόσταση περίπου 5m από την τελευταία, όπως στην εικόνα 3.5.



εικόνα 3.5 – βήμα δεύτερο [www.psmsl.org]

Πραγματοποιείται επανάληψη στις μετρήσεις. Σε αυτήν την περίπτωση έχουμε: $s_b = 35\text{m}$ και $s_f = 5\text{m}$. Έτσι η υψομετρική διαφορά θα είναι:

$$\begin{aligned} \delta h_2 &= b_2 - f_2 = (b + s_b \cdot \alpha) - (f + s_f \cdot \alpha) \quad (3.4) \\ &= b - f + \alpha \cdot (s_b - s_f) \\ &\neq b - f \quad (\text{δεδομένου ότι } s_b \neq s_f) \end{aligned}$$

Προφανώς η νέα υψομετρική διαφορά είναι επηρεασμένη από το τρέχον σφάλμα.

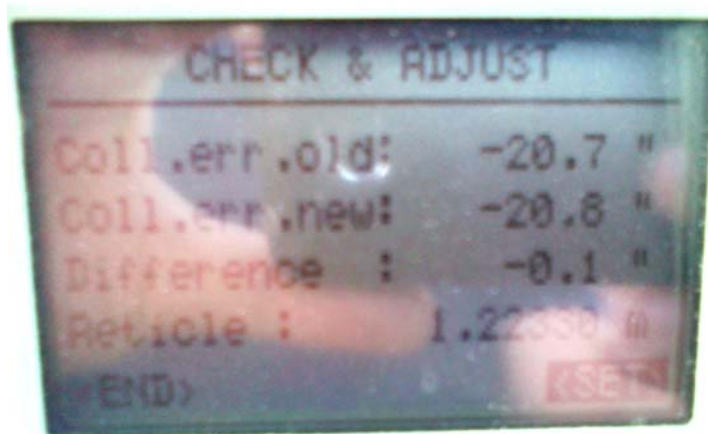
- Η διαφορά $\delta h_2 - \delta h_1$ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της πραγματικής ανάγνωσης όπισθεν εάν δεν υπήρχε το σφάλμα:

$$b = b_2 - \frac{s_b - s_f}{s_b} \cdot (\delta h_2 - \delta h_1) = b_2 - \frac{30}{35} \cdot (\delta h_2 - \delta h_1) \quad (3.5)$$

Ανάλογα με τον τύπο του χωροβάτη το σφάλμα εξαλείφεται είτε διορθώνοντας τις αεροστάθμες μέχρι να γίνει η επιθυμητή ανάγνωση στην θέση "όπισθεν", ή στην περίπτωση αυτόματου χωροβάτη μετακινείται το σταυρόνημα κατακόρυφα μέχρι το επιθυμητό ή τέλος σε ηλεκτρονικούς χωροβάτες σαν τον Leica DNA 03 που

χρησιμοποιήθηκε αποθηκεύεται στο όργανο και γίνονται οι απαραίτητες διορθώσεις αυτόματα. Σημειώνεται ότι το collimation error δεν εξαλείφεται τελείως αλλά αυτό που μπορεί να επιτευχθεί είναι να το μειωθεί όσον τον δυνατόν περισσότερο ώστε να προκύψουν τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα.

Στις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στην πεζογέφυρα τα αποτελέσματα της διαδικασίας φαίνονται στην παρακάτω εικόνα (εικόνα 3.6)



εικόνα 3.6 – αποτελέσματα διαδικασίας Leica DNA 03

3.2.2α Ψηφιακός Χωροβάτης DNA 03

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο εδάφιο για το δίκτυο κατακορύφου ελέγχου χρησιμοποιήθηκε ο ψηφιακός χωροβάτης DNA 03 της Leica Geosystems. Πρόκειται για το ανώτερο μοντέλο της σειράς DNA με ακρίβεια χωροστάθμησης με invar σταδία στα 0.3mm και εμβέλεια μέτρησης 1.8-110m.



εικόνα 3.7 – Ψηφιακός χωροβάτης Leica DNA-03

Ο συγκεκριμένος χωροβάτης έχει την δυνατότητα αυτόματης μέτρησης και αποθήκευσης υψομετρικής διαφοράς και απόστασης, εκμηδένιση σφάλματος ανάγνωσης και καταγραφής, αυτόματη καταγραφή και αποθήκευση των δεδομένων σε εσωτερική μνήμη 6000 μετρήσεων, X-Function λειτουργία με όργανα Leica, συνεργασία με το λογισμικό LGO με δυνατότητες συνόρθωσης – Design and Adjustment 1D δικτύου και επίλυσης χωροσταθμικού δικτύου – Level Data processing and analysis.

Επίσης ο χρήστης έχει την δυνατότητα:

- Έλεγχος “κλεισίματος” χωροσταθμικής όδευσης μέσω της λειτουργίας “Quick-closure” και χρήση του Line Adjustment για τη συνόρθωση χωροσταθμικής όδευσης
- “Point to Point” λειτουργία για την εύρεση υψομέτρων ενδιάμεσων σημείων
- Ταυτόχρονης μέτρησης μετάβασης επιστροφής (aller-retour)
- Διόρθωσης λόγω καμπυλότητας της γης
- Διόρθωσης του collimation error
- Ποικίλοι μέθοδοι μέτρησης όπως: μονή, μέσης τιμής, επαναλαμβανόμενη κ.α.

3.3 Σύστημα Ρομποτικού Γεωδαιτικού Σταθμού

Στην φάση λειτουργίας της γέφυρας κρίθηκε απαραίτητο η υψομετρική παρακολούθηση του καταστρώματος της γέφυρας με ρομποτικό γεωδαιτικό σταθμό. Ένας ρομποτικός γεωδαιτικός σταθμός μας δίνει την δυνατότητα να παρακολουθούμε την μετακίνηση ενός πρίσματος με συνεχή καταγραφή (απόστασης, οριζόντιας και κατακόρυφης γωνίας) χωρίς παρατηρητή. Αυτό επιτυγχάνεται με την λειτουργία αυτόματης αναγνώρισης στόχου “ATR” (Automatic Target Recognition) και η καταγραφή των άνω μεγεθών με την χρήση κατάλληλου λογισμικού όπου αναλόγως τον τύπο του οργάνου ενδέχεται να απαιτείται και ηλεκτρονικός υπολογιστής στο πεδίο.

Το εξαγόμενο αποτέλεσμα από αυτήν την μεθοδολογία είναι οι αντίστοιχες χρονοσειρές της κίνησης που παρακολουθούμε σε συνάρτηση με τον χρόνο. Ένα αρκετά διαδεδομένο εργαλείο φασματικής ανάλυσης χρονοσειρών αποτελεί ο Ταχύς Μετασχηματισμός Fourier (FFT) ο οποίος χρησιμοποιείται για την ανάλυση διακριτού σήματος και ο οποίος μετατρέπει το σήμα από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο των συχνοτήτων. Οι σειρές Fourier βασίζονται στην παραδοχή ότι κάθε περιοδική συνάρτηση αποτελείται από το άθροισμα συναρτήσεων ημιτόνων και συνημιτόνων πολλαπλάσιας συχνότητας από την αρχική, οι οποίες ονομάζονται αρμονικές. Επομένως, μια περιοδική συνάρτηση μπορεί να αναπαρασταθεί με ανάπτυγμα σειράς Fourier ως εξής:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(nx) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(nx)$$

εξίσωση 3.6 - ανάπτυγμα σειράς Fourier

όπου:

x , περιοδικό όρισμα (π.χ. $x = 2\pi t$),
 a_0 , a_n και b_n , συντελεστές.

Ο συντελεστής $a_0/2$, αναφέρεται ως μέση τιμή του σήματος ή αλλιώς τιμή DC, η οποία τις περισσότερες φορές είναι πρακτικά μηδενική. Οι συντελεστές a_n και b_n , εκφράζουν τον βαθμό συμβολής της κάθε αρμονικής στην αναπαραγωγή του κυρίου σήματος. Η δυσκολία στην διάσπαση ενός σήματος σε αρμονικές εστιάζεται στον υπολογισμό των δύο αυτών συντελεστών. Ο υπολογισμός τους στηρίζεται στο γεγονός ότι οι συναρτήσεις $\cos(nx)$ και $\sin(nx)$, πληρούν τις παρακάτω ιδιότητες ορθογωνικότητας:

$$\int_{-\pi}^{+\pi} \cos(mx) \sin(nx) dt = 0 \quad \forall m, n \in \mathbb{Z} \quad \text{εξίσωση 3.7}$$

$$\int_{-\pi}^{+\pi} \cos(mx) \cos(nx) dt = \begin{cases} 0 & m \neq n \\ 2\pi & m = n = 0 \\ \pi & (m = n) > 0 \end{cases} \quad \text{εξίσωση 3.8}$$

$$\int_{-\pi}^{+\pi} \sin(mx) \sin(nx) dt = \begin{cases} 0 & m \neq n \\ \pi & (m = n) > 0 \end{cases} \quad \forall m, n \in \mathbb{Z} \quad \text{εξίσωση 3.9}$$

Πολλαπλασιάζοντας και τα δύο μέλη της εξίσωσης (3.6) με $\cos(nx)$ ή $\sin(nx)$ και ολοκληρώνοντας στο διάστημα $[-\pi, \pi]$, καταλήγουμε σε μια σχέση της οποίας οι όροι, λαμβάνοντας υπόψη μας τις ιδιότητες της ορθογωνικότητας, μηδενίζονται, εκτός από τους όρους των συντελεστών a_0 , a_n και b_n , οι οποίοι είναι:

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} f(x) dx \quad \text{εξίσωση 3.10}$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} f(x) \cos(nx) dx \quad \text{εξίσωση 3.11}$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} f(x) \sin(nx) dx \quad \text{εξίσωση 3.12}$$

Οι σειρές Fourier, είναι δυνατόν να αναπαρασταθούν και σε εκθετική μορφή, σύμφωνα με την σχέση 3.13

$$e^{-i\theta} = \cos(\theta) + i \sin(\theta)$$

εξίσωση 3.13

μέσω της οποίας, η αρχική εξίσωση (3.6) των σειρών Fourier, γίνεται:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} a_n (e^{inx} + e^{-inx}) + \frac{1}{2i} \sum_{n=1}^{\infty} b_n (e^{inx} - e^{-inx})$$

εξίσωση 3.14

3.3.1 Ταχύς Μετασχηματισμός Fourier FFT (Fast Fourier Transform)

Ταχύς Μετασχηματισμός Fourier (FFT), είναι μια μεθοδολογία υπολογισμού του Διακριτού Μετασχηματισμού Fourier (DFT), μέσω της οποίας ελαχιστοποιείται ο αριθμός των υπολογισμών που απαιτούνται για την αναπαράσταση ενός σήματος. Ο FFT, σχεδιάστηκε κυρίως για χρήση σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές, όπου το πλήθος των υπολογισμών κοστίζει σε μνήμη και χρόνο.

Ο Ταχύς Μετασχηματισμός Fourier προσδιορίζεται από την σχέση:

$$F_k = F\left(\frac{k}{NT}\right) = \sum_{n=0}^{N-1} f(nT_s) e^{-i2\pi nk/N} \quad k=0,1,\dots,N-1$$

εξίσωση 3.15

όπου

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

Με τον FFT προκύπτει ένα νέο σήμα N τιμών όπου κάθε τιμή αντιστοιχεί σε μία συχνότητα (δηλαδή όσο και το πλήθος των διακριτών τιμών της χρονοσειράς), οι οποίες απέχουν μεταξύ τους κατά μία συχνότητα ίση με

$$f_s = \frac{1}{NT_x}$$

εξίσωση 3.16

Η τιμή F_k που αντιστοιχεί σε κάθε συχνότητα είναι γνωστή στη διεθνή βιβλιογραφία σαν amplitude (μέτρο). Το μέγεθος της κάθε συχνότητας εκφράζει την σημαντικότητα με την οποία συμμετέχει η αντίστοιχη συχνότητα στην χρονοσειρά (Press et al., 1992). Δηλαδή, μεγάλη τιμή του μεγέθους F_k σημαίνει μεγάλη συμμετοχή της συχνότητας στη χρονοσειρά. Άρα, αν μία χρονοσειρά παρουσιάζει μία περιοδικότητα τότε η αντίστοιχη συχνότητα θα παρουσιάζει μεγάλη τιμή μεγέθους.

Ένα μειονέκτημα του μετασχηματισμού Fourier είναι ότι κύρια απαίτησή του είναι τα διακριτά σημεία της χρονοσειράς πρέπει να είναι χρονικά ισαπέχοντα. Τα δεδομένα μας δεν είναι θεωρητικά ισαπέχοντα χρονικά αλλά η μεταβολή της συχνότητας καταγραφής είναι τόσο μικρή που μας επιτρέπει να χρησιμοποιήσουμε τον αλγόριθμο. Έτσι εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα:

3.3.2 Περιοδόγραμμα Lomb

Μία πιο απλοποιημένη μέθοδος για την φασματική ανάλυση χρονοσειρών με μη ισαπέχοντα χρονικά σημεία είναι το περιοδόγραμμα Lomb (Lomb 1976, Pytharouli et al., 2005). Σημαντικό χαρακτηριστικό της είναι ότι θεωρεί ισοβαρείς όλες τις μετρήσεις. Η φασματική ανάλυση (υπολογισμός ισχύος για κάθε συχνότητα f) με το κανονικοποιημένο περιοδόγραμμα Lomb μίας χρονοσειράς που αποτελείται από N σημεία υπολογίζεται με βάση την μέση τιμή \bar{x} και την τυπική απόκλιση σ της χρονοσειράς και την σχέση:

$$P(T) = \frac{1}{2\hat{\sigma}^2} \left\{ \frac{\left[\sum_{j=1}^N (x_j - \hat{x}) \cos \frac{2\pi(t_j - \tau)}{T} \right]^2}{\sum_{j=1}^N \cos^2 \frac{2\pi(t_j - \tau)}{T}} + \frac{\left[\sum_{j=1}^N (x_j - \hat{x}) \sin \frac{2\pi(t_j - \tau)}{T} \right]^2}{\sum_{j=1}^N \sin^2 \frac{2\pi(t_j - \tau)}{T}} \right\} \quad (3.17)$$

με την οποία υπολογίζεται το εύρος (amplitude) που αντιστοιχεί στην συχνότητα ω (Press et al., 1992 ; Pytharouli and Stiros, 2005). Η σταθερά (τ) δίνεται από την παρακάτω σχέση και στην ουσία εισάγει έμμεσα την σχέση με την οποία θα μπορούσε να υπολογισθεί η αρμονική συνιστώσα μιας χρονοσειρά για συγκεκριμένη γωνιακή συχνότητα ω .

$$\tan(2\omega\tau) = \frac{\sum_{i=1}^N \sin 2\omega t_i}{\sum_{i=1}^N \cos 2\omega t_i} \quad (3.18)$$

3.3.3 Ρομποτικός Γεωδαιτικός Σταθμός TCA 1800

Στην φάση λειτουργίας της γέφυρας χρησιμοποιήθηκε ο ρομποτικός γεωδαιτικός σταθμός TCA 1800 της εταιρείας Leica Geosystems. Αποτελεί μέρος της σειράς System 2000. Η σειρά System 2000 αποτελείται από όργανα που κατασκευάζει η εταιρεία Leica, όπως το TCA 1800 και τα TC2003/TCA2003, και είναι γεωδαιτικοί σταθμοί για μετρήσεις υψηλής ακρίβειας.



εικόνα 3.8 – Γεωδαιτικός σταθμός Leica TCA 1800 [leica-geosystems]

Ο γεωδαιτικός σταθμός TCA 1800 χαρακτηρίζεται από υψηλή ακρίβεια στις μετρήσεις γωνιών και αποστάσεων, είναι πλήρως ψηφιακό και έχει υψηλής ποιότητας οπτικά στοιχεία. Η απόδοση των οριζόντιων και των κατακόρυφων γωνιών γίνεται με 1cc ενώ η ακρίβεια των οριζόντιων και κατακόρυφων γωνιών είναι της τάξεως των 3cc. Η ελάχιστη ανάγνωση στη μέτρηση αποστάσεων είναι 0.1 mm ενώ η ακρίβεια μέτρησης αποστάσεων είναι 1 mm + 2 ppm. Η μέγιστη απόσταση μέτρησης με ένα πρίσμα, με ιδανικές ατμοσφαιρικές συνθήκες, είναι 2500 m. Επιπλέον, μπορούν να οριστούν ατμοσφαιρικές παράμετροι πώς θερμοκρασία, πίεση, διάθλαση, συντελεστής χαρτογραφικής παραμόρφωσης κ.α. υπάρχει η δυνατότητα ορισμού μέτρησης με μικρότερη ακρίβεια προκειμένου να μειώνεται ο χρόνος μέτρησης κάθε απόστασης. Διαθέτει κυκλική αεροστάθμη ευαισθησίας 4'2 mm, ενώ δεν διαθέτει σωληνωτή αλλά ηλεκτρονική αεροστάθμη με ευαισθησία 2". Το τηλεσκόπιο του έχει αντικειμενικό φακό 42 mm με ικανότητα μεγέθυνσης 30x. Μπορεί να συνδεθεί με H/Y μέσω θύρας RS232 ή να αποθηκεύσει τα δεδομένα σε κάρτα PCMCIA (4500-36000 σημεία). Έχει τη δυνατότητα να εκτελεί εφαρμογές οπισθοτομίας, χάραξης, έκκεντρης στάσης, κ.α. ή να δημιουργήσει ο χρήστης δική του εφαρμογή. Οι κοχλίες μικρομετακίνησης είναι ατέρμονοι και ρυθμίζονται από το χρήστη προσφέροντας την δυνατότητα για το ποιος θα είναι για τις κατακόρυφες ή οριζόντιες γωνίες. Επίσης διαθέτει σερβομηχανισμούς για τη ρομποτική του λειτουργία (εκτελεί την αλλαγή από I θέση σε II θέση τηλεσκοπίου χωρίς τη βοήθεια του χρήστη). Επίσης ο γεωδαιτικός σταθμός TCA 1800 διαθέτει μηχανισμό

αυτόματης αναγνώρισης στόχου (ATR). Με αυτή τη λειτουργία του και τον κατάλληλο στόχο, το όργανο μπορεί να εντοπίσει την ακριβή θέση του στόχου εφ' όσον έχει οριστεί μια συγκεκριμένη περιοχή διερεύνησης. Η ακρίβεια του μηχανισμού ATR στην επιφάνεια του στόχου είναι 1-3 mm από το κέντρο του στόχου και εξαρτάται από την απόσταση μέτρησης. Η ακρίβεια του ATR εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις εξωτερικές συνθήκες, την απόσταση του στόχου, το είδος και την κατάσταση του στόχου και από τη συχνότητα ελέγχου και βαθμονόμησης του ATR.

Πίνακας 3.2: Τεχνικά χαρακτηριστικά TCA 1800 [leica-geosystems]

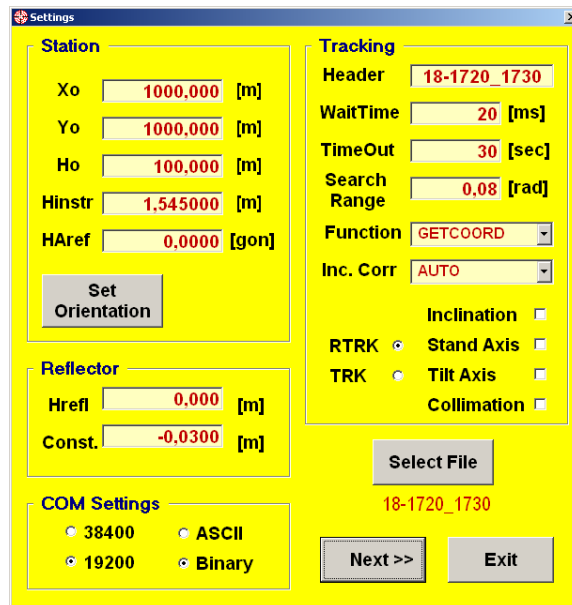
Απόδοση οριζόντιων & κατακόρυφων Γωνιών	1 ^{cc}
Ακρίβεια οριζόντιων & κατακόρυφων Γωνιών	3 ^{cc}
Απόδοση αποστάσεων	0,1 mm
Ακρίβεια αποστάσεων	1 mm + 2 ppm
Μέγιστη απόσταση μέτρησης	2500 m (1 πρίσμα)
Ευαισθησία κυκλικής αεροστάθμης	4'2 mm
Ευαισθησία ηλεκτρονικής αεροστάθμης	2"
Διάμετρος αντικειμενικού φακού	42 mm
Ικανότητα μεγέθυνσης	30x
Μέγιστη ακρίβεια ATR	1 mm μέχρι 200 m
Εύρος μέτρησης με ATR	έως 1000 m
Διάρκεια λειτουργίας με 1 μπαταρία	400 μετρήσεις γωνιών & αποστάσεων

Στις μετρήσεις των δυναμικών φορτίσεων χρησιμοποιήθηκε ο ρομποτικός γεωδαιτικός σταθμός Leica TCA 1800 και για τις ανάγκες του πειράματος χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό "Leica TCA1800 Tracking Controller" προϊόν του εργαστηρίου γενικής γεωδαισίας του Ε.Μ.Π. σε γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic 6.0 / C++, με βάση το πρωτόκολλο επικοινωνίας GeoCOM v1.07 της εταιρείας Leica. Το όργανο συνδέεται σειριακά με τον φορητό υπολογιστή όπου είναι εγκατεστημένο το λογισμικό.

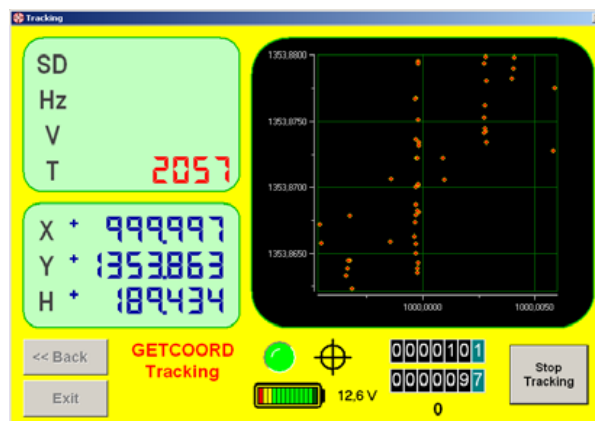
Αρχικά "αναγνωρίζεται" το όργανο, στην συνέχεια στο επόμενο παράθυρο του οργάνου ορίζονται οι συντεταγμένες της στάσης του γεωδαιτικού σταθμού, το ύψος οργάνου, η γωνία μηδενισμού, το ύψος σκόπευσης, η σταθερά κατάφωτου και όλα τα απαραίτητα στοιχεία για το αρχείο καταγραφής. Επίσης ρυθμίζονται η συνάρτηση καταγραφής δεδομένων (καρτεσιανές ή πολικές συντεταγμένες), η αυτόματη ή μη διόρθωση των ισοσταθμιστών (incline correction), το εύρος εντοπισμού του στόχου (search range), και τέλος, καθορίζονται στοιχεία όπως η μέθοδος μέτρησης (TRK ή RTRK) και η διεύθυνση και το όνομα του αρχείου εξαγωγής ".txt", όπου γίνεται η αποθήκευση των δεδομένων.

Στο επόμενο παράθυρο του λογισμικού εμφανίζονται στοιχεία που αφορούν την κατάσταση της ισχύος ενέργειας και την θερμοκρασία, καθώς και έναν αριθμό, ο οποίος υποδηλώνει την ποιότητα του αποτελέσματος της κάθε μέτρησης που προκύπτει από τις επιστρεφόμενες τιμές των συναρτήσεων του συστήματος αποσφαλμάτωσης του πρωτοκόλλου GeoCOM,

Ο συνδυασμός των δεδομένων της τρίτης οθόνης, δίνει στον χρήστη σε πραγματικό χρόνο την πληροφορία για την ποιότητα των μετρήσεων, τον συνολικό αριθμό καταγεγραμμένων σημείων και άλλα χαρακτηριστικά.



εικόνα 3.9 - περιβάλλον Leica TCA1800 Tracking Controller



εικόνα 3.10 - περιβάλλον Leica TCA1800 Tracking Controller

3.4 Σύστημα Δορυφορικού Εντοπισμού

Εκτός των μεθόδων κλασικής τοπογραφίας και του ρομποτικού σταθμού κρίθηκε απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί και σύστημα δορυφορικού εντοπισμού. Το πεδίο εφαρμογής του στην συγκεκριμένη εργασία είναι στην παρακολούθηση του καταστρώματος της γέφυρας σε δυο σημεία. Η μεγάλη συχνότητα καταγραφής θα βοηθήσει στην πλήρως τεκμηρίωση της υψομετρικής κίνησης του καταστρώματος. Το σύστημα που χρησιμοποιήθηκε είναι το δορυφορικό σύστημα Leica GNSS 1200GP smart rover με κεραία Leica ATX 1230+ (εικόνα 3.9) και χειριστήριο Leica RX1250 (εικόνα 3.10).



εικόνα 3.11 – Leica ATX1230+



εικόνα 3.12 – Leica RX1250

Είναι ένα ολοκληρωμένο δορυφορικό σύστημα GNSS (global navigation satellite system) όπου αποτελείται από δυο κεραίες ATX1230+ το χειριστήριο RX1250, τον δέκτη GX1230 και τα απαραίτητα παρελκόμενά του. Πρόκειται για γεωδαιτικό δορυφορικό σύστημα τελευταίας γενιάς με τεχνικά χαρακτηριστικά όπως φαίνονται στους παρακάτω πίνακες:

Πίνακας 3.3 – Χαρακτηριστικά Leica 1200[leica-geosystems]

	GX1230	ATX1230	RX1250
Διαστάσεις	212*166*79mm (μ*π*υ)	186*79 (Διάμετρος*Υ)	-
Βάρος	1.20 kg	1.12 kg	0.75 kg
Επιπλέον Χαρακτηριστικά	12 κανάλια στην L1 12 κανάλια στην L2 12V τροφοδοσία	Bluetooth	Οθόνη αφής Πληκτρολόγιο qwerty Bluetooth

Πίνακας 3.4 –Ποιοτικά χαρακτηριστικά Leica 1200[leica-geosystems]

Τεχνική μέτρησης		Ορθότητα (Accuracy)
Εκ των υστέρων επίλυση (Post Processing)	Στατικός εντοπισμός με μετρήσεις φάσεις	H 3mm ± 0.5 ppm V 6mm ± 0.5 ppm
	Ταχύς στατικός εντοπισμός με μετρήσεις φάσης	H 5mm ± 0.5 ppm V 10mm ± 0.5 ppm
	Κινηματικός εντοπισμός με μετρήσεις φάσης	H 10mm ± 1 ppm V 20mm ± 1 ppm
	Μετρήσεις κώδικα	~ 25cm
Επίλυση σε πραγματικό χρόνο (Real time -RTK)	Ταχύς στατικός εντοπισμός με μετρήσεις φάσης	H 5mm ± 0.5 ppm V 10mm ± 0.5 ppm
	Κινηματικός εντοπισμός με μετρήσεις φάσης	H 10mm ± 1 ppm V 20mm ± 1 ppm
	Μετρήσεις κώδικα	~ 25cm
Διαφορικός Εντοπισμός (DGPS/RCTM)		~ 25cm
Ναυσιπλοΐα με έναν δέκτη (Single receiver Navigation)		5-10m για κάθε συντ/νη

3.5 Σύστημα Αδρανειακού Εντοπισμού

Ένα ακόμα σύστημα εντοπισμού που χρησιμοποιήθηκε είναι το ολοκληρωμένο αδρανειακό και δορυφορικό σύστημα. Πρόκειται ουσιαστικά από έναν συνδυασμό δορυφορικού συστήματος με μια αδρανειακή μονάδα. Το πλεονέκτημα αυτού του συνδυασμού είναι ότι συγχρόνως με τα δεδομένα καταγραφής του δορυφορικού συστήματος έχουμε συνεχή καταγραφή μετακινήσεων από την αδρανειακή μονάδα σε πολύ μεγάλες συχνότητες. Λόγω των πολύ ευαίσθητων γυροσκοπίων και επιταχυνσιομέτρων που χρησιμοποιεί μπορούμε με κατάλληλο λογισμικό να εξάγουμε χρονοσειρές ταχυτήτων, επιταχύνσεων και των τριών γωνιών πλοήγησης.

3.5.1 Βαθμοί Συνέργιας Αδρανειακών και Δορυφορικών Συστημάτων

Στην βιβλιογραφία έχει επικρατήσει να χρησιμοποιείται ο όρος βαθμός συνέργιας (level of integration), ο οποίος και εκφράζει τον βαθμό στον οποίο έχουν συνδυαστεί τα δύο συστήματα. Στην πράξη η συνέργια των δύο συστημάτων καθορίζεται από δύο βασικά χαρακτηριστικά (Jekeli,2001) :

- ο από τον βαθμό στον οποίο αναμιγνύονται τα δεδομένα των δύο συστημάτων για να εξαχθεί μια συνδυαστική λύση, και ο οποίος χαρακτηρίζεται από την δομή του αλγορίθμου που χρησιμοποιείται για την σύζευξη των δεδομένων
- ο από τον βαθμό στον οποίο οι μετρήσεις του ενός συστήματος χρησιμοποιούνται για να υποβοηθήσουν την λειτουργία του άλλου

Η κατηγοριοποίηση με βάση τα παραπάνω κριτήρια έχει απασχολήσει εκτεταμένα την διεθνή βιβλιογραφία με αποτέλεσμα να συναντάται πληθώρα όρων, που δεν αντιστοιχούν όμως κατ' ανάγκη σε διαφορετικούς βαθμούς συνέργιας. Μια καλή αντιμετώπιση του παραπάνω θέματος γίνεται από την Gautier J.D. (Gautier, 2003) και είναι αυτή που θα ακολουθηθεί στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας με ταυτόχρονη προσπάθεια να αποδοθούν οι όροι και στα ελληνικά.

Έτσι στην περίπτωση όπου οι πρωτογενείς μετρήσεις από τα δύο συστήματα επεξεργάζονται ανεξάρτητα και στην συνέχεια τα παραγόμενα αποτελέσματα συνδυάζονται με χρήση τεχνικών, (πχ φίλτρα KALMAN), για να παραχθεί μια συνδυαστική λύση ο βαθμός συνέργιας χαρακτηρίζεται ως χαλαρή σύζευξης (loosely coupled), μια ειδική μορφή της οποίας είναι η τελείως χαλαρή σύζευξη (uncoupled systems).

Αντίθετα στην περίπτωση όπου οι πρωτογενείς μετρήσεις από τα δύο συστήματα συνδυάζονται και επεξεργάζονται σε ένα βήμα για να παραχθεί μια συνδυαστική λύση ο βαθμός συνέργιας χαρακτηρίζεται ως στενής σύζευξης (tightly coupled), μια ειδική μορφή της οποίας είναι η πλήρως στενή σύζευξη (ultra tightly coupled).

Συγκεντρωτικά οι διάφοροι βαθμοί συνέργειας, που απαντώνται στα σύγχρονα ολοκληρωμένα αδρανειακά και δορυφορικά συστήματα είναι :

- ο τελείως χαλαρής σύζευξης (uncoupled systems)
- ο χαλαρής σύζευξης (loosely coupled)
- ο στενής σύζευξης (tightly coupled)
- ο πλήρως στενής σύζευξης (ultra tightly coupled)

Οι τρεις πρώτοι βαθμοί συνέργειας χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις όπου το αδρανειακό σύστημα χρησιμοποιείται σαν κύριο σύστημα προσδιορισμού της τροχιάς του κινητού ενώ το δορυφορικό σύστημα χρησιμοποιείται για την παροχή δεδομένων με σκοπό τον περιορισμό των σφαλμάτων του αδρανειακού και την βελτίωση της λύσης του ολοκληρωμένου συστήματος.

Ο τέταρτος βαθμός συνέργειας, στις διάφορες υλοποιήσεις του, χρησιμοποιείται όταν το αδρανειακό σύστημα χρησιμοποιείται ως βοηθητικό σύστημα στην λειτουργία του δορυφορικού. Το αδρανειακό χρησιμοποιείται ως εξωτερική βοήθεια ώστε το δορυφορικό σύστημα χρησιμοποιώντας τα δεδομένα του πρώτου να εντοπίζει πιο γρήγορα το σήμα των δορυφόρων, να προβαίνει σε ταχύτερη και αποτελεσματικότερη επίλυση ασαφειών κα.

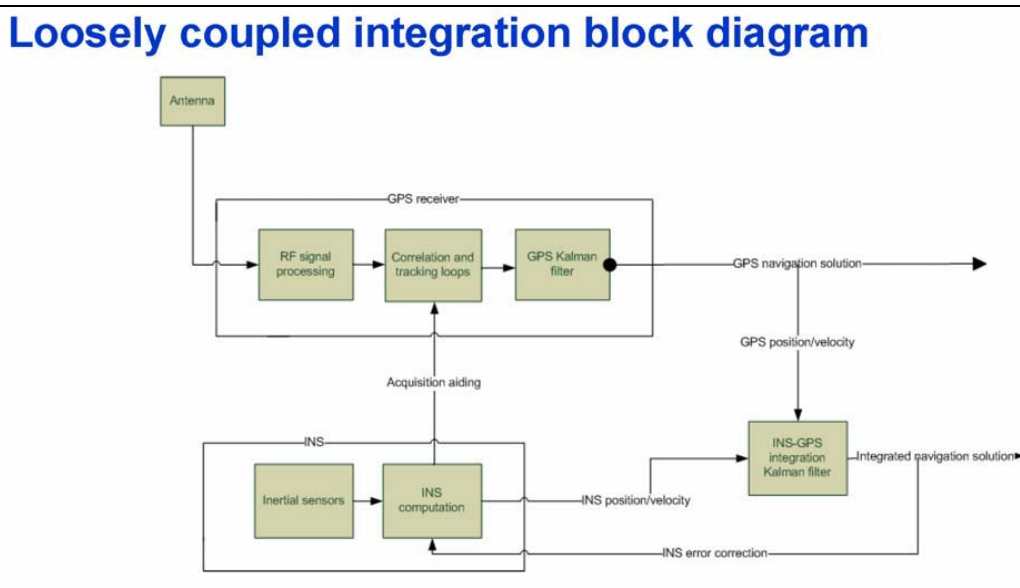
Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε μόνο ο βαθμός συνέργειας χαλαρής σύζευξης, οπότε και θα αναλυθεί περαιτέρω.

3.5.2 Συστήματα χαλαρής σύζευξης (loosely coupled)

Σ' αυτήν την περίπτωση ακολουθείται η εξής μεθοδολογία:

Υπολογίζονται η ταχύτητα και η θέση από το δορυφορικό σύστημα και από το αδρανειακό σύστημα ξεχωριστά. Χρησιμοποιώντας φίλτρο Kalman δημιουργούμε μια ενοποιημένη λύση θέσης και ταχύτητας από τα δυο συστήματα. Το φίλτρο Kalman που χρησιμοποιούμε για την ενοποιημένη λύση είναι άλλο από αυτό που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό θέσης του δορυφορικού συστήματος.

Το πλεονέκτημα των συστημάτων χαλαρής σύζευξης είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οποιοδήποτε συνδυασμό δορυφορικού – αδρανειακού συστήματος καθώς επίσης ενδείκνυται για σύγκριση αποτελεσμάτων της λύσης του δορυφορικού συστήματος με την λύση του συνδυασμού.



εικόνα 3.13 – μεθοδολογία loosely coupled integration (AlttiJokinen)

Το μοναδικό μειονέκτημα σε αυτήν την μέθοδο είναι ότι δεν μπορεί να αποφευχθεί η διαδικασία να χρησιμοποιηθούν τα εξαγόμενα του πρώτου φίλτρου Kalman ως στοιχεία εισαγωγής του δεύτερου φίλτρου Kalman.

3.5.3 Μέθοδοι επίλυσης αδρανειακής μονάδας

Ο όρος επίλυση αδρανειακής μονάδας είναι λίγο γενικός και δεν αντιπροσωπεύει ακριβώς την μεθοδολογία. επικρατεί ο όρος “Method of Initial Alignment” που θα μπορούσαμε να τον αποδώσουμε σαν μέθοδο με την οποία επιτυγχάνουμε ένα είδος βαθμονόμησης της αδρανειακής μονάδας, μέθοδος με την οποία επιτυγχάνουμε την αρχική ευθυγράμμιση της.

Οι μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι:

- static coarse alignment only
- static coarse + fine alignment
- transfer alignment
- In-motion Kinematic Alignment

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτήν την εργασία ήταν οι “static coarse alignment only” και “static coarse + fine alignment”. Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για αυτήν την μέθοδο πρέπει να προέρχονται από στατική μέτρηση διότι κάθε κίνηση επιφέρει και σφάλμα. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται τα πρώτα 30-120 δευτερόλεπτα συλλογής στατικών δεδομένων της αδρανειακής μονάδας και χρησιμοποιούνται ως αρχική τιμή για τη στάση. Χρησιμοποιούνται διανύσματα βαρύτητας ώστε να εκτιμηθούν διατοιχισμός

(roll) και προνευστασμός (pitch). Επίσης απαραίτητος είναι ο ρυθμός περιστροφής της γης ώστε να δοθεί πρώτη εκτίμηση του Yaw του αδρανειακού.

3.5.4 Δορυφορικό και Αδρανειακό Σύστημα Novatel / GNSS-IMU

Πρόκειται για ένα προϊόν κατηγορίας Span (Synchronized Position Attitude & Navigation) της εταιρίας Novatel που εδρεύει στον Καναδά και δραστηριοποιείται σε προϊόντα δορυφορικού εντοπισμού και πλοήγησης. Το σύστημα αποτελείται από δυο κεραίες GPS, από το αδρανειακό σύστημα IMU (Inertial Measurement Unit), από δυο δέκτες (Receiver) και τα παρελκόμενα.



εικόνα 3.14 – συσκευές συστήματος

- **Μονάδα καταγραφής σταθερού δέκτη (Receiver Base)**

Η μονάδα καταγραφής του σταθερού δέκτη ονομάζεται "receiver DL V3" ο οποίος είναι εφοδιασμένος με μια θύρα USB και Bluetooth για επικοινωνία με ηλεκτρονικό υπολογιστή. Επίσης έχει και κάρτα μνήμης (compact flash) χωρητικότητας 2GB για αποθήκευση δεδομένων η οποία έχει την δυνατότητα να εξέρχεται από τον δέκτη, για χρήση σε μηχανήμα ανάγνωσης καρτών. Είναι συμβατός στα δεδομένα από δορυφορικό σύστημα GPS και GLONASS καθώς επίσης υποστηρίζει την L2 συχνότητα αλλά και την μελλοντική L5. Παρέχει ακρίβεια προσδιορισμού θέσης κάτω του μέτρου με την χρήση διορθώσεων της L-Band χρησιμοποιώντας OMNISTAR η CDGPS. Με την χρήση της τεχνολογίας κινηματικού εντοπισμού σε πραγματικό χρόνο (RTK) παρέχει ακρίβεια εκατοστού και μεταφορά δεδομένων με συχνότητα 50Hz.



εικόνα 3.15 – Receiver base DL V3

Έχει μέγεθος 185*162*76mm και ζυγίζει μόλις 1.3kg, η τροφοδοσία του γίνεται με παροχή +9 ~ +28V ενώ είναι αδιάβροχος και έχει την δυνατότητα να καταγράφει χωρίς πρόβλημα από -50°C έως +95°C.

Πίνακας 3.5 – Χαρακτηριστικά μονάδας καταγραφής

Συχνότητα Μεταφοράς Δεδομένων		Ακρίβεια Θέσης (RMS)		Ακρίβεια Μετρήσεων	
Μετρήσεις	50Hz	Single Point L ₁	1.8m	L ₁ C/A Code	4cm (RMS)
Θέση	50Hz	Single Point L ₁ /L ₂	1.5m	L ₁ Carrier Phase	0.50mm
OmniSTAR HP	20Hz	SBAS	0.6m	(differential channel)	
		CDGPS	0.6m	L ₂ P(Y) Code	8cm (RMS)
Ακρίβεια Μέτρησης Ταχύτητας	0.03 m/s RMS	DGPS	0.45m	L ₂ Carrier Phase	1mm
		OmniSTAR VBS	0.70m	(differential channel)	
		OmniSTAR XP	0.15m		
		OmniSTAR HP	0.10m	Ακρίβεια Μέτρησης Χρόνου	
Δυναμικότητα		RT-20	0.20m	20ns RMS	
Ταχύτητα 515m/s		RT-2	1cm+1ppm		

- **Κινητή Μονάδα Καταγραφής (Receiver Rover)**

Η κινητή μονάδα καταγραφής ονομάζεται receiver Pro Pak V3 και σ' αυτόν συνδέονται η κεραία GPS, το αδρανειακό σύστημα και ο υπολογιστής. Περιέχει 72 κανάλια, L₁, L₂ GPS, GLONASS και τεχνολογία RTK. Διαθέτει τρεις σειριακές θύρες υψηλής ταχύτητας. Έχει διαστάσεις 185*160*71mm, ζυγίζει μόλις 1kg ενώ μπορεί να λειτουργεί χωρίς κανένα πρόβλημα από -45°C έως + 95°C. Είναι ικανός να δεχθεί διορθώσεις από γεωστατικούς δορυφόρους όπως ο OMNISTAR και CDGPS. Διαθέτει επίσης την απαραίτητη τεχνολογία για υποστήριξη της L₅ συχνότητας όταν αυτή θα είναι διαθέσιμη. Με ένα καλώδιο σύνδεσης μονάδας καταγραφής και αδρανειακής μονάδας (Receiver – IMU) έχουμε ένα σύστημα ανταλλαγής δεδομένων όπου μεταφέρονται μετρήσεις θέσης σε συχνότητα 100Hz.

Πίνακας 3.6 – Χαρακτηριστικά μονάδας καταγραφής κινητού δέκτη

Channel Configuration	Ακρίβεια Θέσης (RMS)		Ακρίβεια Μετρήσεων	
14L ₁ , 14L ₂ , 6L ₅ GPS	Single Point L ₁	1.8m	L ₁ C/A Code	6cm (RMS)
12L ₁ , 12L ₂ GLONASS	Single Point L ₁ /L ₂	1.5m	L ₁ Carrier Phase	0.75mm
2 SBAND	SBAS	0.6m	(differential channel)	
1 L-BAND	CDGPS	0.6m	L ₂ P(Y) Code	25cm (RMS)
	DGPS	0.45m	L ₂ Carrier Phase	2mm
Ακρίβεια Μέτρησης Χρόνου	OmniSTAR VBS	0.70m	(differential channel)	
	OmniSTAR XP	0.15m		
20ns RMS	OmniSTAR HP	0.10m	Ακρίβεια Μέτρησης Ταχύτητας	
	RT-20	0.20m		
	RT-2	1cm+1ppm		
Συχνότητα Μεταφοράς Δεδομένων	Δυναμικότητα		Χρόνος για πρώτη λύση (Time to First Fix)	
Μετρήσεις 50Hz	Ταχύτητα	515m/s	Cold Start	60s
Θέση 50Hz	Vibration	4G	Hot Start	35s
OmniSTAR HP 20Hz	Υψόμετρο ⁽¹⁾	18288m		

- **Κεραία GPS**

Πρόκειται για μια κεραία GPS συμβατή με L1 και L2 συχνότητα η οποία συνδέεται με την μονάδα καταγραφής με κοινό καλώδιο δεκτών. Είναι πολύ εύχρηστη με διάμετρο λιγότερο από 20cm και βάρος 468gr. Περιμετρικά έχει μια προστατευτική ζώνη από λάστιχο η οποία την κάνει πολύ ανθεκτική στις πτώσεις ενώ μπορεί να λειτουργεί χωρίς κανένα πρόβλημα από -55°C έως + 85°C.



εικόνα 3.16 – κεραία GPS

Τα χαρακτηριστικά της κεραίας φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (3.6):

Πίνακας 3.6 – Χαρακτηριστικά Δέκτη

Performance	
3 db Pass Band	1.15 - 1.65 GHz
LNA Gain	External Required
Gain at Zenith (90°)	
L1	+6.0 dBic (minimum)
L2	+2.5 dBic (minimum)
L5, E5a	+2.0 dBic (minimum)
E6	+3.0 dBic (minimum)
L-Band	+6.0 dBic (minimum)
Gain Roll-Off (from Zenith to Horizon)	
L1, L-Band	14dB
L2, E6	11dB
L5, E5	11dB
VSWR	≤20:1
Nominal Impedance	50Ω
Attitude	9.000m

- **Αδρανειακό σύστημα – IMU**

Πρόκειται για το αδρανειακό σύστημα (Inertial Measurement Unit) IMU-FSAS της εταιρίας Novatel διαστάσεων 128mm*128mm*104mm και βάρους 2.1 kg. Αποτελείται από τρία οπτικά γυροσκόπια κλάσης 0.75 deg/hr και τρία επιταχυνσιόμετρα κλάσης 1mg, ενώ μπορεί να λειτουργεί χωρίς κανένα πρόβλημα από -40°C έως + 85°C.



εικόνα 3.17 – IMU FSAS

Στην στέψη της συσκευής υπάρχει ένα σύστημα αξόνων όπου το κέντρο των αξόνων X και Y είναι το οριζοντιογραφικό κέντρο της πλοήγησης και όχι το σημείο του Z άξονα που φαίνονται στο ίδιο σημείο αλλά απέχουν περίπου μισό χιλιοστό. Κατά την πλοήγηση ενός οχήματος η αδρανειακή μονάδα (IMU) θα πρέπει να τοποθετηθεί με τον άξονα Y

προς την φορά της κίνησης. Το ύψος του κέντρου πλοήγησης είναι 45.4mm από την βάση της συσκευής.

Η αδρανειακή μονάδα (IMU – FSAS) μπορεί να εξάγει μετρήσεις στην μονάδα καταγραφής (receiver) με ρυθμό 200Hz. Συχνότητα πολύ υψηλή η οποία δίνει την δυνατότητα να πραγματοποιήσης μετρήσεων σε εφαρμογές με μεγάλη επιτάχυνση και ταχύτητα χωρίς να προκύπτουν ασάφειες λόγω κενών στα δεδομένα. Τα χαρακτηριστικά της αδρανειακής μονάδας φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (3.7).

Πίνακας 3.7 – Χαρακτηριστικά αδρανειακής μονάδας (IMU)

Gyro Input Range	±500 degrees /s
Gyro Rate Bias	0.75°/hr
Gyro Rate Scale Factor	300 ppm
Angular Random Walk	0.1 degrees / (hr) ^{1/2}
Accelerometer Range	± 5 g
Accelerometer Linearity	-
Accelerometer Scale Factor	400 ppm
Accelerometer Bias	1.0 mg

- **Ολοκληρωμένο Δορυφορικό και Αδρανειακό Σύστημα (FSAS SPAN)**

Σαν συνολικό σύστημα η αδρανειακή μονάδα της Novatel με δέκτη GPS και μονάδα καταγραφής έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά.

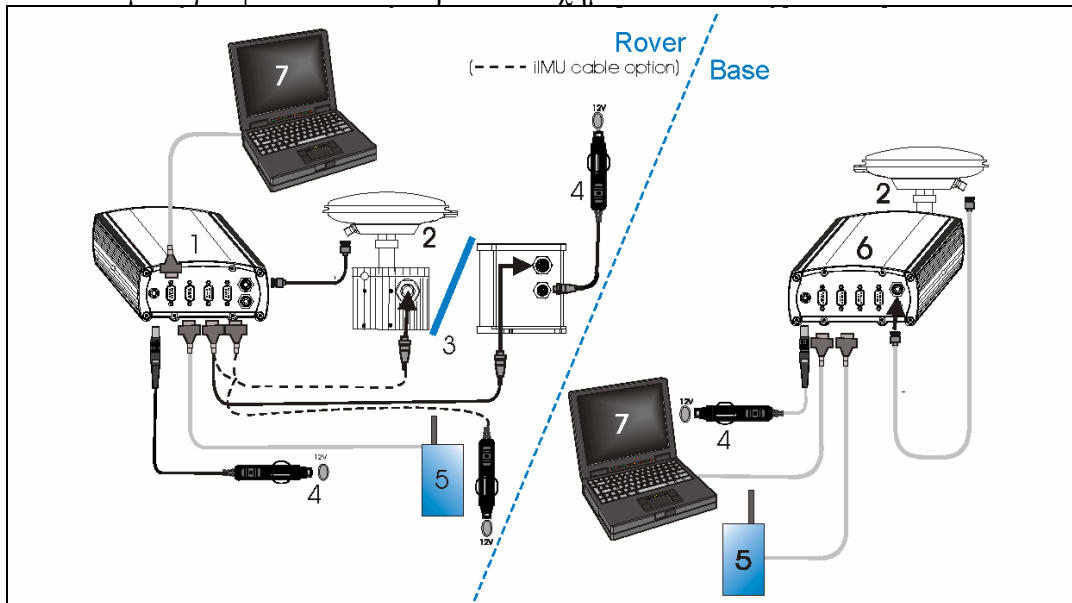
Πίνακας 3.8 – Χαρακτηριστικά FSAS SPAN

Attitude Accuracy (RMS)	Ακρίβεια Θέσης (RMS)	Συχνότητα Μεταφοράς Δεδομένων
Pitch 0.015°	Single Point L ₁ 1.8m	IMU Measurements 200Hz
Roll 0.015°	Single Point L ₁ /L ₂ 1.5m	INS Position 200Hz
Azimuth 0.041°	WAAS L ₁ only 1.2m	INS Velocity 200Hz
	WAAS L ₁ /L ₂ 0.9m	INS Attitude 200Hz
	DGPS 0.45m	
Ακρίβεια Μέτρησης Ταχύτητας	OmniSTAR VBS 0.70m	Μέγιστη Ταχύτητα
0.02 m/s RMS	OmniSTAR XP 0.15m	514 m/s
	OmniSTAR HP 0.10m	
Ακρίβεια Μέτρησης Επιτάχυνσης	RT-20 0.20m	Μέγιστο Υψόμετρο
0.03 m/s ² RMS	RT-2 1cm+1ppm	18288m

- **Συνδεσμολογία**

Η μονάδα καταγραφής (receiver) και η αδρανειακή μονάδα (IMU) θέλουν παροχή 12Volts, έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν ειδικές μπαταρίες πολύ μικρού μεγέθους ή μπαταρίες αυτοκινήτου.

Η συνδεσμολογία φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



εικόνα 3.18 - συνδεσμολογία

τροφοδοσία Receiver Σύνδεση με Laptop Σύνδεση με κεραία GPS



εικόνα 3.19 – Συνδεσμολογία στις θύρες του Receiver

Σειριακές θύρες σύνδεσης

Receiver rover

3.5.5 Λογισμικά Επεξεργασίας Δεδομένων

INS Window in CDU

Η επικοινωνία του συστήματος με τον υπολογιστή πραγματοποιείται με το λογισμικό CDU της Novatel. Είναι μια εφαρμογή 32bit η οποία είναι εφικτή σε περιβάλλον Windows. Παρέχει στον χρήστη ένα παραθυρικό περιβάλλον με γραφήματα και ποικίλες ενδείξεις δίνοντας του την δυνατότητα να μπορεί ανά πάσα στιγμή να ελέγχει την λειτουργία του συστήματος αλλά και να ενημερώνεται για τις τρέχουσες μετρήσεις και αποτελέσματα.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα ενδείξεων φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (3.18). Πρόκειται για ένα χαρακτηριστικό παράθυρο του CDU στο οποίο έχουμε ένδειξη της παρούσας θέσης, ταχύτητας, κινηματικής κατάστασης (roll, pitch, azimuth), της παρούσας κατάστασης του συστήματος (π.χ. INS solution good) καθώς και ένα όργανο ενδείξεων στο οποίο παρατηρούμε κάθε στιγμή τις μεταβολές που έχει το αδρανειακό σύστημα στην κινηματική του κατάσταση.

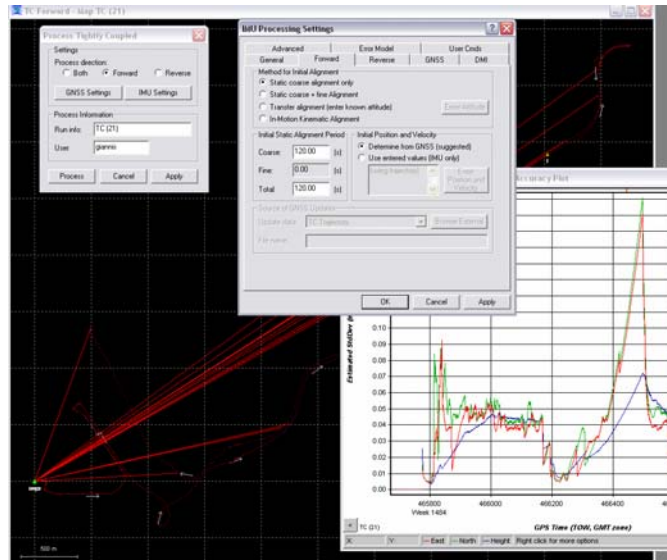


εικόνα 3.20 – χαρακτηριστικό παράθυρο ενδείξεων CDU

Inertial Explorer 8.10

Πρόκειται για λογισμικό, προϊόν της εταιρίας Waypoint products Group, με το οποίο πραγματοποιείται εκ των υστερών επεξεργασία και επίλυση δεδομένων δορυφορικού εντοπισμού (GNSS) και αδρανειακής μονάδας (IMU) με σκοπό την δημιουργία ενοποιημένης λύσης. Χρησιμοποιεί την πληροφορία των επιταχυνσιόμετρων (Δv) και τον γωνιακό ρυθμό ($\Delta\theta$) για να παράγει υψηλού ρυθμού θέση και κινηματική κατάσταση.

Το λογισμικό έχει την δυνατότητα να εφαρμόσει είτε συστήματα στενής σύζευξης (tightly coupled) για την χρησιμοποίηση ενός φίλτρου Kalman είτε συστήματα χαλαρής σύζευξης (loosely coupled) για τον υπολογισμό θέσης και ταχύτητας από το δορυφορικό και αδρανειακό σύστημα ξεχωριστά. Πρόκειται για ένα λογισμικό παραθυρικό, το οποίο εκτός από τις επιλύσεις εξάγει ποικίλα γραφήματα καθώς και έχει πολλές τεχνικές επεξεργασίας και μετατροπές αρχείων.

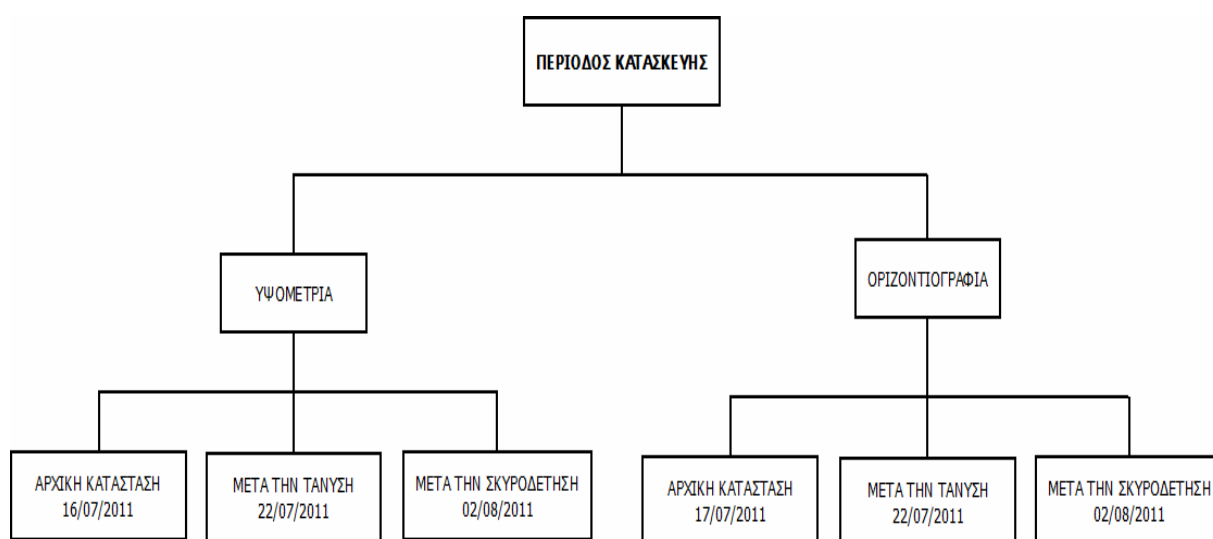


εικόνα 3.21 - περιβάλλον Inertial Explorer

4. ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΓΕΦΥΡΑΣ ΣΤΗ ΦΑΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

4.1 Γενικά - Σενάρια Παρακολούθησης

Ο στόχος του πειράματος ήταν η μελέτη παραμόρφωσης της πεζογέφυρας της λεωφόρου Κηφισίας (κόμβος Φιλοθέης) τόσο με άσκηση δυναμικής φόρτισης αλλά και με στατική. Στο παρόν κεφάλαιο θα περιγραφεί η παρακολούθηση κατά την διάρκεια της κατασκευής κατά την οποία παρακολούθηθηκε το κατάστρωμα και οι πυλώνες της πεζογέφυρας. Όπως παραστατικά διακρίνεται και στην εικόνα 4.1 η περίοδος αυτή διαχωρίζεται σε δυο κύριες κατηγορίες: την οριζοντιογραφία και την υψομετρία, οι οποίες τεκμηριώθηκαν σε τρεις φάσεις: την αρχική κατάσταση, μετά την τάνυση και τέλος μετά την σκυροδέτηση (τελική κατάσταση πεζογέφυρας).



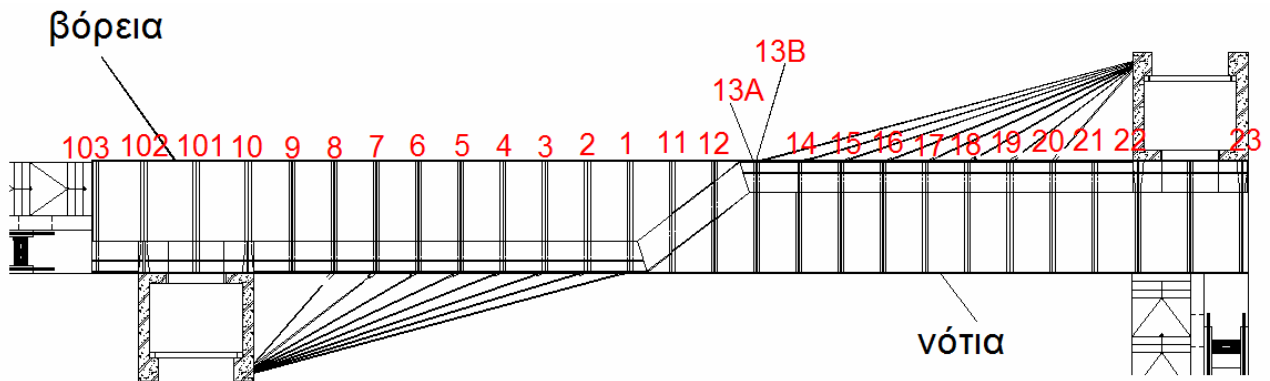
εικόνα 4.1 - Διάγραμμα μετρήσεων στην φάση κατασκευής

Όσον αφορά το κατάστρωμα οι μετακινήσεις ελέγχθηκαν μόνο υψομετρικά δεδομένου ότι από την μελέτη του έργου επιτρέπεται η κατά μήκος κίνηση (κύλιση) του καταστρώματος. Όσον αφορά τους πυλώνες η παρακολούθηση έγινε και στις τρεις διαστάσεις. Σκοπός των μετρήσεων είναι να προκύψουν αποτελέσματα με τα οποία να είναι εφικτή η παρατήρηση της μεταβολής θέσης κάθε διατομής σε κάθε περίοδο της φάσης κατασκευής όσον αφορά το κατάστρωμα και η παρατήρηση μεταβολής θέσης κάθε μετρούμενου σημείου για τους πυλώνες.

4.2 Παρακολούθηση Μετακινήσεων του Καταστρώματος

4.2.1 Γενικά

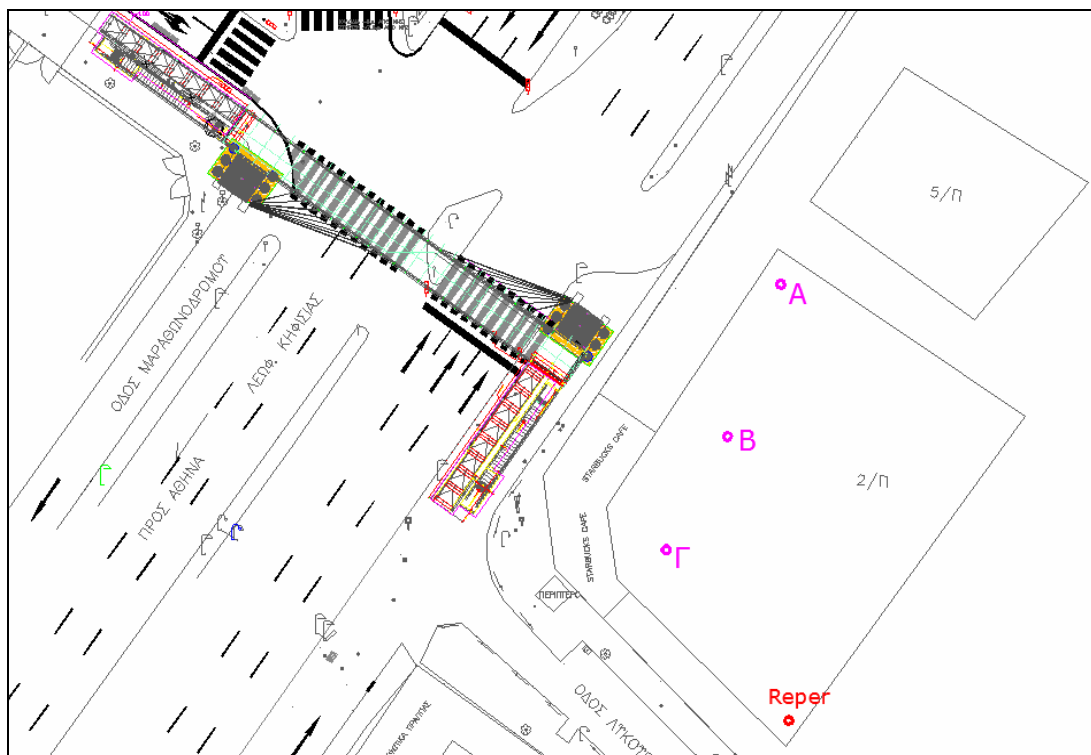
Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν τις πρωινές ώρες 06,30πμ ~ 10,30πμ για αποφυγή επιπλέον σφαλμάτων λόγω αυξημένης θερμοκρασίας που επικρατούσε τις μεσημβρινές ώρες. Οι διατομές στις οποίες έγινε χωροστάθμηση είναι η θέση των εγκάρσιων δοκών της γέφυρας οι οποίες απέχουν 1.50m μεταξύ τους και όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.2 μετρήθηκαν 27 διατομές. Οι διατομές 13A και 13B είναι οι μόνες διαδοχικές διατομές που δεν απέχουν 1.50m μεταξύ τους λόγω του ότι σε αυτό το σημείο βρίσκεται ο αρμός της γέφυρας οπότε η διατομή 13A βρίσκεται στον ένα φορέα και η διατομή 13B βρίσκεται στον άλλο φορέα σε απόσταση μερικών εκατοστών. Επίσης, κάθε διατομή μετρήθηκε και στις δυο παρειές της γέφυρας βόρεια και νότια, πλην των διατομών που δεν ήταν εφικτό, όπως π.χ. οι διατομές 101-102 όπου στην νότια πλευρά βρίσκεται ο ανελκυστήρας.



εικόνα 4.2 – Θέσεις διατομών χωροστάθμησης

Με γνώμονα τους περιορισμούς της γεωμετρικής χωροστάθμησης ακριβείας (εδάφιο 3.2.2) η χωροστάθμηση πραγματοποιήθηκε σε τρεις διαφορετικές θέσεις χωροβάτη (εικόνα 4.3):

- την θέση Α για τις διατομές 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,101,102,103
- την θέση Β για τις διατομές 11,12,13A,13B,14,15,16
- την θέση Γ για τις διατομές 17,18,19,20,11,22,23



εικόνα 4.3 – Θέσεις χωροβάτη

4.2.2 Διαδικασία Μετρήσεων

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω στο κατάστρωμα της γέφυρας έγινε υψομετρική παρακολούθηση. Αρχικά υλοποιήθηκε μια υψομετρική αφετηρία (reper) σε ακλόνητο σημείο κοντά στην κατασκευή. Η αφετηρία τοποθετήθηκε σε τέτοιο σημείο ώστε να εξασφαλίζεται αφενός η μονιμότητα του αλλά και η θέση του να μας δίνει την δυνατότητα να τοποθετείται ο χωροβάτης σε κάθε σετ μετρήσεων στην μεσοκάθετο της απόστασης reper-στόχος.

Για την ίδρυση της υψομετρικής μας αφετηρίας χρησιμοποιήσαμε ειδικό μπρούτζινο μπουλόνι που ενδείκνυται για υλοποίηση τέτοιων σημείων. Χρησιμοποιήθηκε τρυπάνι ώστε να διανοιχτεί τρύπα σε υποστύλωμα της έναντι πολυκατοικίας και ειδικό κονίαμα ώστε να σταθεροποιηθεί το μπουλόνι στην τρύπα και να μείνει ακλόνητο (εικόνα4.4).

Έχοντας ιδρύσει την υψομετρική αφετηρία πλέον εκτελούμε την διαδικασία που περιγράφηκε στο εδάφιο 3.2.2 για τον περιορισμού του σφάλματος οριζοντίωσης σκοπευτικού άξονα (*collimation error*) και έχοντας πλέον καλιμπράρει τον χωροβάτη μπορούν να επιτευχθούν οι μετρήσεις κατακορύφου ελέγχου.



εικόνα 4.4 – Υλοποίηση της υψομετρικής αφετηρίας

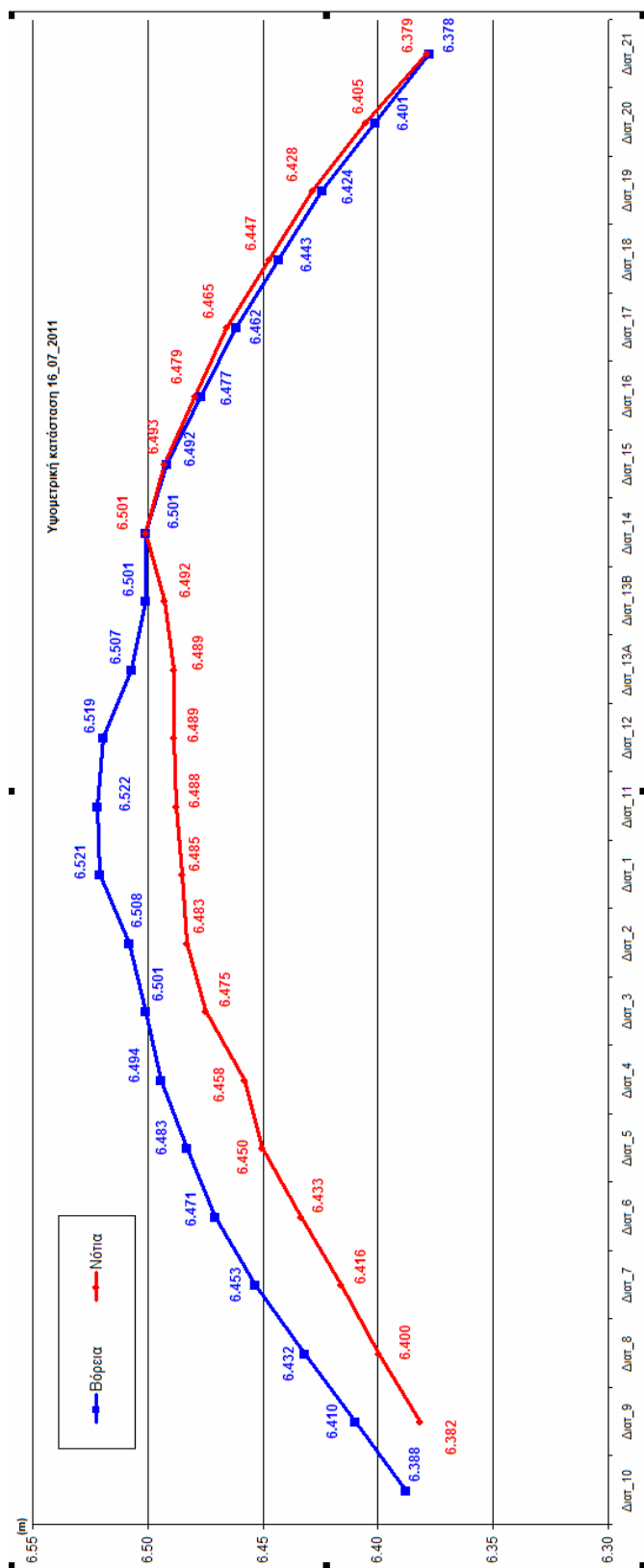
4.2.3 Επιμέρους Φάσεις Παρακολούθησης

4.2.3α Αρχική Κατάσταση (προ τάνυσης) - 16/07/2011

Η πρώτη φάση των μετρήσεων της παρακολούθησης της γέφυρας έγινε την 16/07/2011 κατά την οποία θεωρούμε ότι η γέφυρα βρίσκεται σε αρχική κατάσταση και πραγματοποιήθηκε χωροστάθμιση στο κατάστρωμα της γέφυρας. Την δεδομένη χρονική περίοδο η γέφυρα βρίσκεται τοποθετημένη σε τρεις θέσεις, τους δυο πυλώνες και ένα μεταλλικό προσωρινό υποστήλωμα στο μέσο του καταστρώματος. Το μεταλλικό υποστήλωμα θα αφαιρεθεί μετά την τάνυση των καλωδίων. Έτσι, η αρχική κατάσταση έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Ιδίων βάρους σε τρία στηρίγματα
- Χωρίς καλώδια
- Ευθυγραμμισμένοι οι δυο φορείς
- Θεωρητική ελεύθερη ροπή

Ορίζοντας ως τιμή του $reper$ $h=8.00m$, μετά από την επίλυση της χωροστάθμισης προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα:



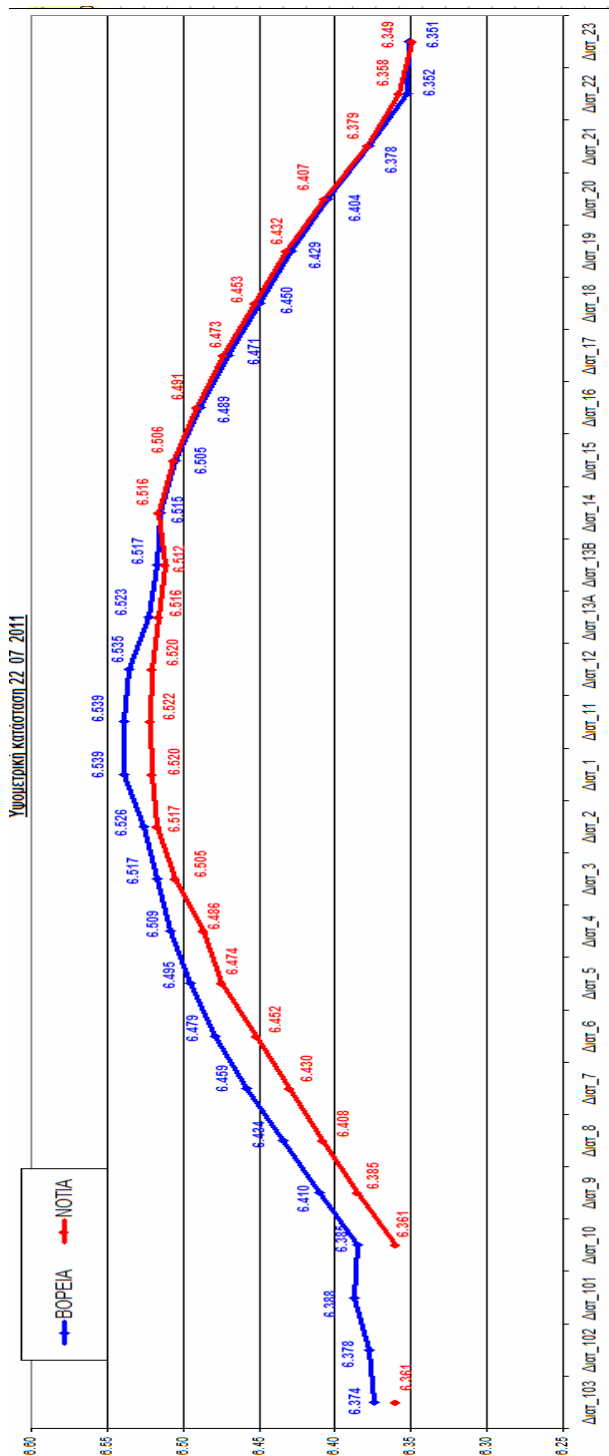
εικόνα 4.5 – υψομετρική κατάσταση της 16/07/2011

Πίνακας 4.1 – υψομετρική κατάσταση 16/07/2011

ΤΕΛΙΚΑ ΥΨΟΜΕΤΡΑ – 16/07/2011			
Βόρεια		Νότια	
Διατομή	Η(m)	Διατομή	Η(m)
Βορ_10	6.3879	-	-
Βορ_9	6.4099	Νοτ_9	6.3816
Βορ_8	6.4318	Νοτ_8	6.3997
Βορ_7	6.4532	Νοτ_7	6.4163
Βορ_6	6.4705	Νοτ_6	6.4335
Βορ_5	6.4833	Νοτ_5	6.4505
Βορ_4	6.4944	Νοτ_4	6.4582
Βορ_3	6.5011	Νοτ_3	6.4749
Βορ_2	6.5080	Νοτ_2	6.4831
Βορ_1	6.5206	Νοτ_1	6.4852
Βορ_11	6.5218	Νοτ_11	6.4878
Βορ_12	6.5191	Νοτ_12	6.4887
Βορ_13A	6.5072	Νοτ_13A	6.4888
Βορ_13B	6.5010	Νοτ_13B	6.4925
Βορ_14	6.5007	Νοτ_14	6.5007
Βορ_15	6.4919	Νοτ_15	6.4927
Βορ_16	6.4768	Νοτ_16	6.4794
Βορ_17	6.4617	Νοτ_17	6.4655
Βορ_18	6.4433	Νοτ_18	6.4474
Βορ_19	6.4240	Νοτ_19	6.4281
Βορ_20	6.4013	Νοτ_20	6.4052
Βορ_21	6.3779	Νοτ_21	6.3789

4.2.3β Μετά την Τάνυση των Καλωδίων Ανάρτησης (22/07/2011)

Στις 22/07/2011 στην γέφυρα πραγματοποιήθηκε η τάνυση των καλωδίων και βρισκόταν σε κατάσταση ηρεμίας ώστε να μπορεί να επιτευχθεί η επόμενη χωροστάθμηση. Από την επίλυσή της προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα:



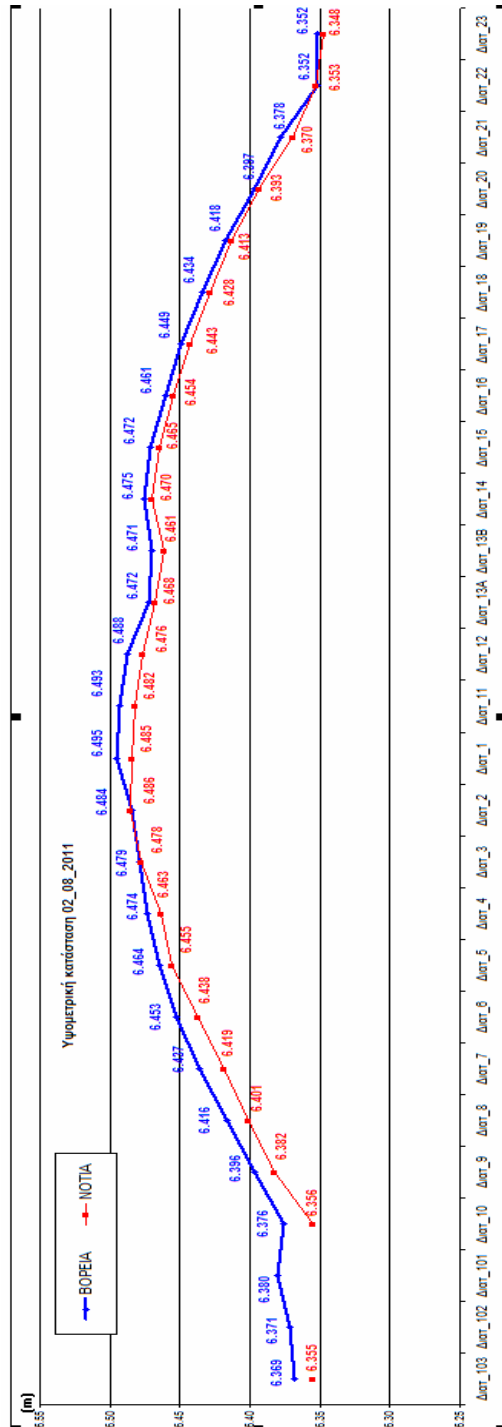
εικόνα 4.6 – υψομετρική κατάσταση της 22/07/2011

πίνακας 4.2 – υψομετρική κατάσταση 22/07/2011

ΤΕΛΙΚΑ ΥΨΟΜΕΤΡΑ – 22/07/2011			
Βόρεια		Νότια	
Λιατομή	H(m)	Λιατομή	H(m)
Bop_103	6.3740	Bop_103	6.3605
Bop_102	6.3778	Bop_102	
Bop_101	6.3878	Bop_101	
Bop_10	6.3854	Not_10	6.3606
Bop_9	6.4101	Not_9	6.3852
Bop_8	6.4341	Not_8	6.4078
Bop_7	6.4587	Not_7	6.4298
Bop_6	6.4789	Not_6	6.4521
Bop_5	6.4952	Not_5	6.4743
Bop_4	6.5088	Not_4	6.4863
Bop_3	6.5175	Not_3	6.5055
Bop_2	6.5255	Not_2	6.5171
Bop_1	6.5387	Not_1	6.5201
Bop_11	6.5388	Not_11	6.5218
Bop_12	6.5355	Not_12	6.5203
Bop_13A	6.5228	Not_13A	6.5162
Bop_13B	6.5168	Not_13B	6.5120
Bop_14	6.5152	Not_14	6.5165
Bop_15	6.5052	Not_15	6.5062
Bop_16	6.4888	Not_16	6.4905
Bop_17	6.4708	Not_17	6.4730
Bop_18	6.4499	Not_18	6.4530
Bop_19	6.4286	Not_19	6.4319
Bop_20	6.4044	Not_20	6.4070
Bop_21	6.3789	Not_21	6.3788
Bop_22	6.3522	Not_22	6.3581
Bop_23	6.3509	Not_23	6.3493

4.2.3γ Μετά την Σκυροδέτηση του Καταστρώματος (02/08/2011)

Στις 02/08/2011 στην γέφυρα είχε ολοκληρωθεί η σκυροδέτηση του καταστρώματος και βρισκόταν σε κατάσταση ηρεμίας ώστε να μπορεί να επιτευχθεί η επόμενη χωροστάθμηση. Από την επίλυσή της προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα:



εικόνα 4.7 – υψομετρική κατάσταση της 02/08/2011

πίνακας 4.3 – υψομετρική κατάσταση

ΤΕΛΙΚΑ ΥΨΟΜΕΤΡΑ – 02/08/2011			
Βόρεια		Νότια	
Διατομή	Η(μ)	Διατομή	Η(μ)
Bop_103	6.36850	Not_103	6.35514
Bop_102	6.37126	Not_102	
Bop_101	6.38005	Not_101	
Bop_10	6.37569	Not_10	6.35563
Bop_9	6.39622	Not_9	6.38225
Bop_8	6.41645	Not_8	6.40096
Bop_7	6.43651	Not_7	6.41916
Bop_6	6.45254	Not_6	6.43772
Bop_5	6.46414	Not_5	6.45542
Bop_4	6.47377	Not_4	6.46333
Bop_3	6.47883	Not_3	6.47808
Bop_2	6.48380	Not_2	6.48580
Bop_1	6.49485	Not_1	6.48453
Bop_11	6.49267	Not_11	6.48232
Bop_12	6.48781	Not_12	6.47624
Bop_13A	6.47232	Not_13A	6.46756
Bop_13B	6.47050	Not_13B	6.46137
Bop_14	6.47534	Not_14	6.46964
Bop_15	6.47165	Not_15	6.46451
Bop_16	6.46072	Not_16	6.45447
Bop_17	6.44886	Not_17	6.44298
Bop_18	6.43429	Not_18	6.42838
Bop_19	6.41769	Not_19	6.41265
Bop_20	6.39717	Not_20	6.39341
Bop_21	6.37586	Not_21	6.36987
Bop_22	6.35232	Not_22	6.35300
Bop_23	6.35195	Not_23	6.34778

4.2.4 Αξιολόγηση Υψομετρικών Μεταβολών Καταστρώματος

Από τα διαγράμματα των χωροσταθμίσεων παρατηρήθηκαν τα εξής:

- Υψομετρική κατάσταση 16/07/2011 - Αρχική κατάσταση (προ τάνυσης καλωδίων)

Από την διατομή 1 έως και την διατομή 12 η βόρεια παρειά της γέφυρας βρίσκεται περίπου 3cm πιο ψηλά από την νότια παρειά.

Από την διατομή 13Α η διαφορά μηδενίζεται όπου στην διατομή 14 είναι μηδέν.

Στις διατομές 14 έως 21 η νότια παρειά είναι οριακά υψηλότερα με μεγαλύτερη διαφορά στα 4mm.

- Υψομετρική κατάσταση 22/07/2011 - Μετά την τάνυση των καλωδίων

Από την διατομή 4 έως την διατομή 10 η βόρεια παρειά είναι υψηλότερα περίπου 2.5cm.

Στην διατομή 3 μειώνεται στο 1.2cm, έπειτα στην διατομή 2 στα 8mm και στην συνέχεια στις διατομές 1,11 και 12 η βόρεια παρειά επανέρχεται υψηλότερα κατά 1.8cm περίπου.

Από την διατομή 13Α έως την διατομή 22 η νότια παρειά βρίσκεται οριακά υψηλότερα με μέγιστη διαφορά στα 6mm.

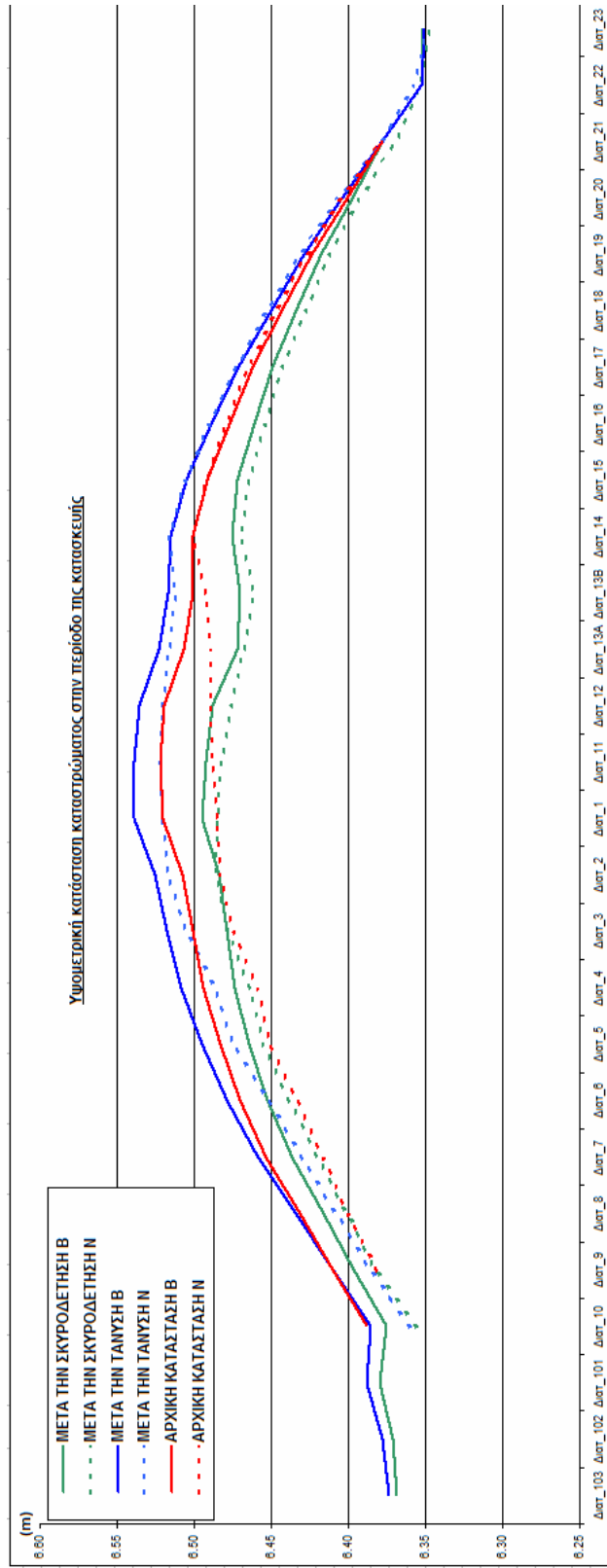
- Υψομετρική κατάσταση 02/08/2011 - Μετά την σκυροδέτηση του καταστρώματος

Στην διατομή 10 η βόρεια παρειά βρίσκεται υψηλότερα κατά 2cm και μειώνεται έως την διατομή 2 όπου μπορούμε να ισχυριστούμε ότι μηδενίζεται.

Στις διατομές 1,11 και 12 η βόρεια παρειά βρίσκεται υψηλότερα κατά 1.1cm και από την διατομή 13Α έως την διατομή 21 βρίσκεται υψηλότερα περίπου 6mm.

Να σημειωθεί ότι οι διατομές 10, 103, 22 και 23 βρίσκονται σε σημείο του καταστρώματος (στους πυλώνες αγκύρωσης) όπου θεωρητικά δεν μεταβάλλεται υψομετρικά ή μεταβάλλεται οριακά. Αυτό επιβεβαιώνεται από τις μετρήσεις δεδομένου ότι στην διατομή 10 είχαμε μια μεταβολή 5mm στην διατομή 103 μεταβολή 0mm και στις διατομές 22 και 23 μεταβολές 5mm και 3mm αντίστοιχα.

Αν παραστήσουμε όλες τις εποχές σε ένα διάγραμμα προκύπτει το σχήμα 4.8 στο οποίο μπορούμε να διακρίνουμε την υψομετρική κατάσταση του καταστρώματος σε όλες τις φάσεις της κατασκευής.



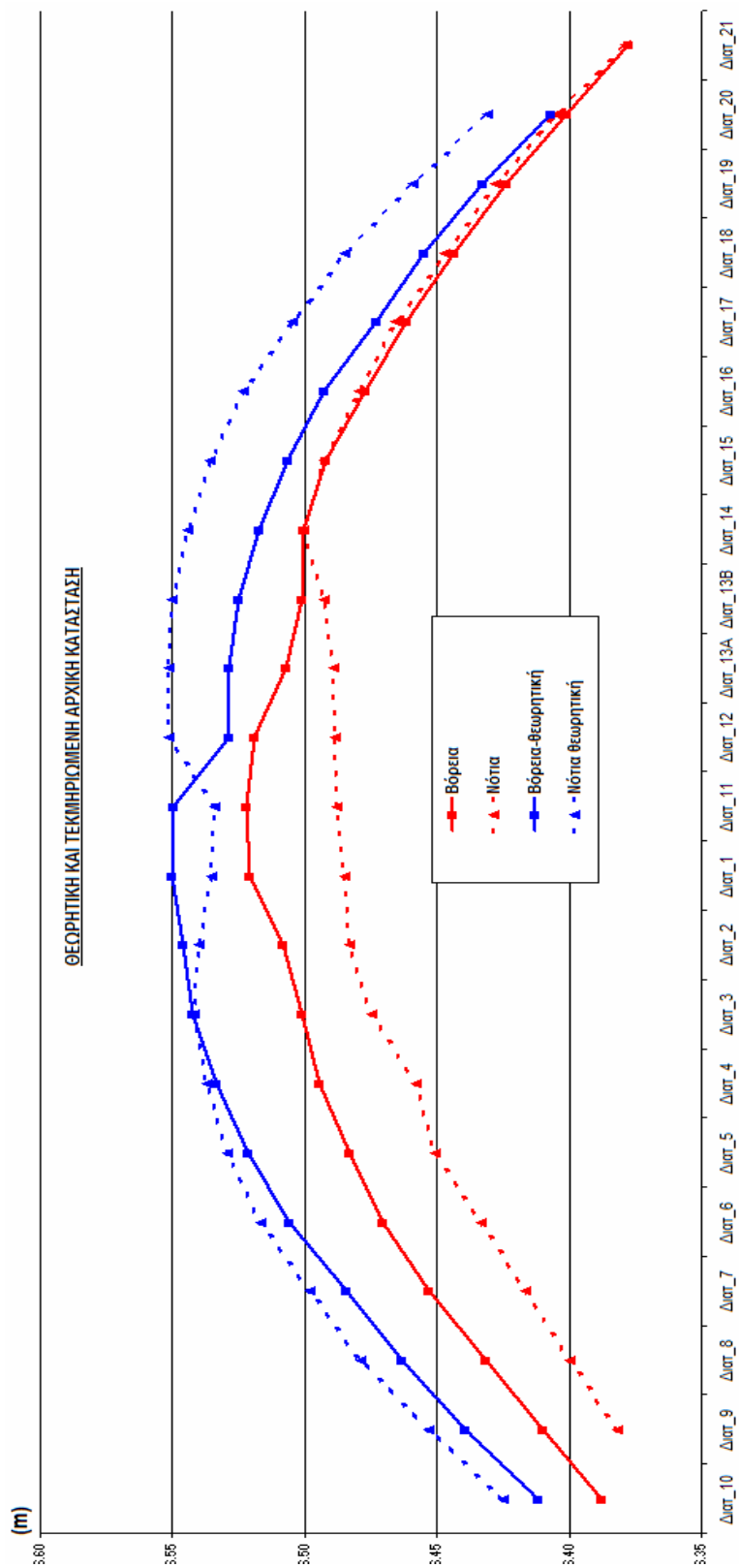
εικόνα 4.8 – υψομετρική κατάσταση καταστρώματος σε όλες τις φάσεις κατασκευής

Έτσι συνολικά μπορούμε να βγάλουμε τα εξής συμπεράσματα:

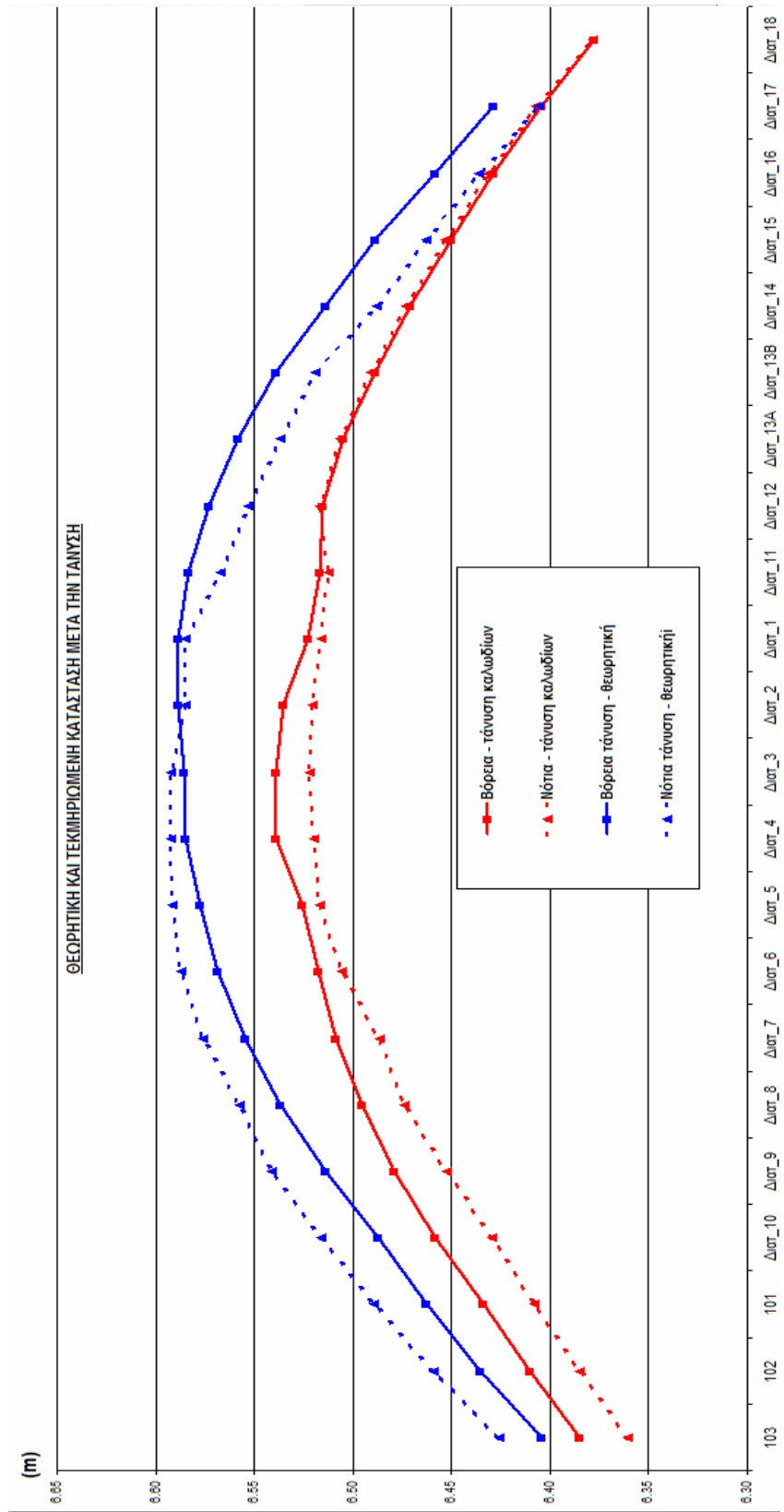
(για βοήθεια στην κατανόηση του σχήματος να σημειωθεί ότι η διατομή 103 βρίσκεται στην Φιλοθέη-κολέγιο και η διατομή 23 στο Χαλάνδρι-Starbucks, η βόρεια παρειά είναι αυτή που "κοιτάει" προς Κηφισιά και η νότια αυτή που "κοιτάει" προς Αθήνα)

- Στην αρχική κατάσταση και στην τάνυση από τον πυλώνα Φιλοθέης έως την διατομή 14 (πρώτη στο δεύτερο φορέα) η βόρεια παρειά είναι υψηλότερα από την νότια και έπειτα η νότια παρειά είναι οριακά υψηλότερα ενώ στην τελική της κατάσταση μετά την σκυροδέτηση σε όλες τις διατομές η βόρεια παρειά είναι υψηλότερα με μοναδική εξαίρεση την διατομή 3 όπου βρίσκεται η νότια παρειά οριακά υψηλότερα κατά 2mm.
- Από τον πυλώνα Φιλοθέης έως την διατομή 14 (πρώτη στο δεύτερο φορέα) υπάρχει σχετικά μεγάλη υψομετρική διαφορά μεταξύ βόρειας και νότιας παρειάς, όπου στην τάνυση μειώνεται και στην σκυροδέτηση σε μεγαλύτερο βαθμό.
- Παρατηρώντας τις καμπύλες έχουμε ότι η βόρεια παρειά διατηρεί περίπου την ίδια μορφή σαν γεωμετρία αλλά μεταβάλλεται στο υψόμετρο, έχοντας σε σχέση με την αρχική κατάσταση μεγαλύτερο υψόμετρο μετά την τάνυση και μικρότερο μετά την σκυροδέτηση. Γεγονός λογικό αφού κατά την τάνυση ασκούνται τάσεις από το κατάστρωμα προς το σημείο έδρασης των καλωδίων και μετά την σκυροδέτηση εκτός από το ιδίον βάρος έχουμε και το βάρος του σκυροδέματος. Η νότια παρειά ακολουθεί αυτήν την συμπεριφορά αλλά με μεγαλύτερες μεταβολές.
- Οι δύο παρειές μεταξύ τους μπορούμε να ισχυριστούμε ότι στην αρχική κατάσταση δεν συσχετίζονται, στην τάνυση παρατηρείται μια τάση προς συσχέτιση αλλά μόνο στον πρώτο φορά (Φιλοθέης) και τέλος μετά την σκυροδέτηση πλην της περιοχής της διατομής 3 υπάρχει συσχέτιση μεταξύ τους.

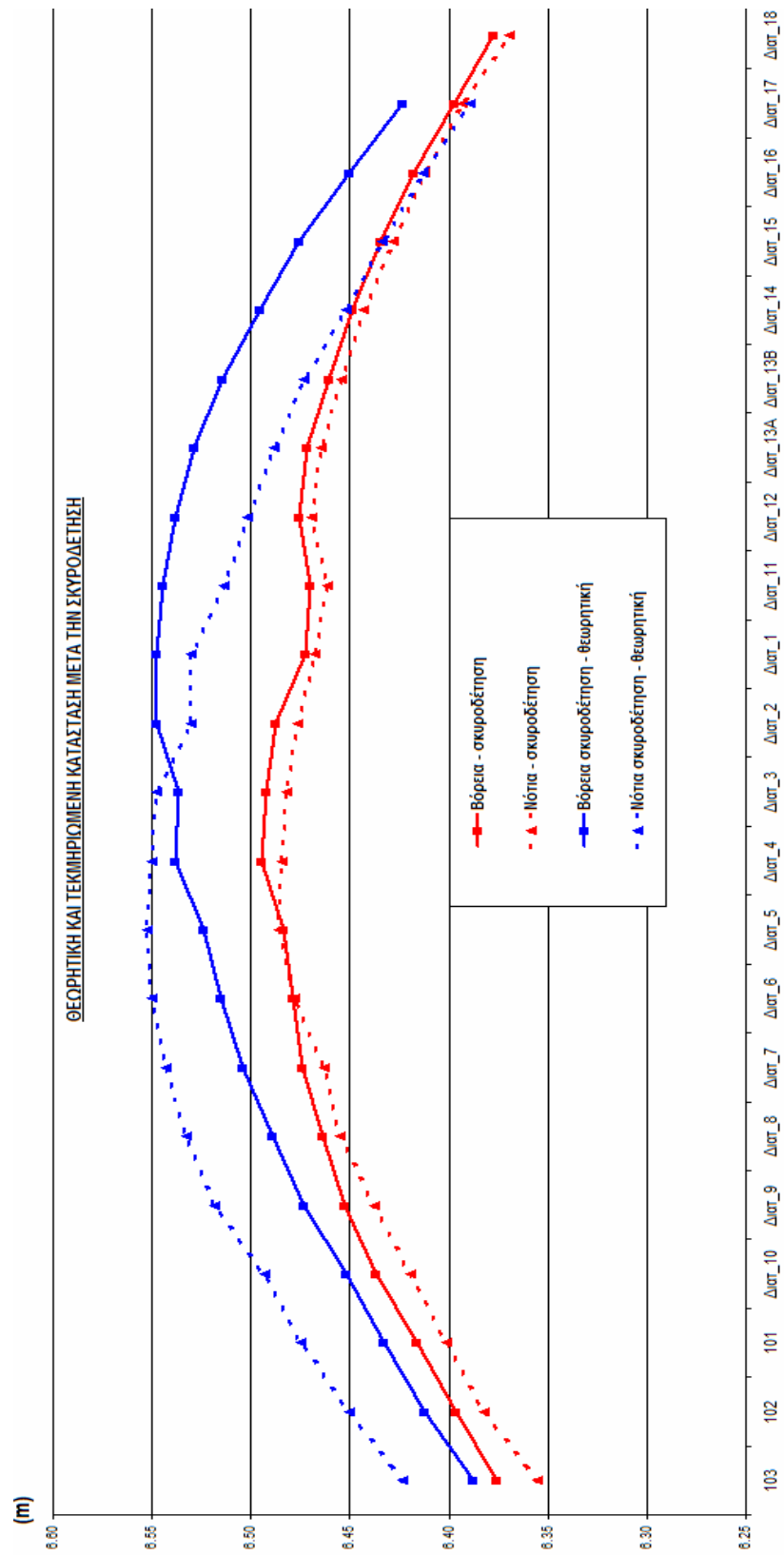
Ενδιαφέρον παρουσιάζεται αν παραστούν σε διαγράμματα οι υψομετρικές καταστάσεις που τεκμηριώθηκαν με τις χωροσταθμίσεις μαζί με τις θεωρητικές εκτιμήσεις που παραδόθηκαν από τον μελετητή (σχήμα 4.9 – 4.10 – 4.11).



εικόνα 4.9 – θεωρητική και τεκμηριωμένη αρχική κατάσταση



εικόνα 4.10– θεωρητική και τεκμηριωμένη κατάσταση μετά την τάνυση



εικόνα 4.11 – θεωρητική και τεκμηριωμένη κατάσταση μετά την σκυροδέτηση

4.3 Παρακολούθηση Μετακινήσεων Πυλώνων

4.3.1 Γενικά

Εκτός από την υψομετρική παρακολούθηση του καταστρώματος της γέφυρας πραγματοποιήθηκε και οριζοντιογραφική παρακολούθηση των πυλώνων της γέφυρας σε κάθε φάση της κατασκευής. Η περιοχή που ελέγχθηκε είναι αυτό όπου κατά μείζονα λόγο δέχεται τις τάσεις από τα καλώδια της γέφυρας (εικόνα 4.12).



εικόνα 4.12 - επίπεδο ελέγχου πυλώνων

Ο υπόψη έλεγχος αναφέρεται ως οριζοντιογραφικός ωστόσο, στην πραγματικότητα αφορά σε έλεγχο μετακινήσεων και στις τρεις διαστάσεις. Το τρισσορθογώνιο σύστημα αναφοράς ορίζεται ως εξής:

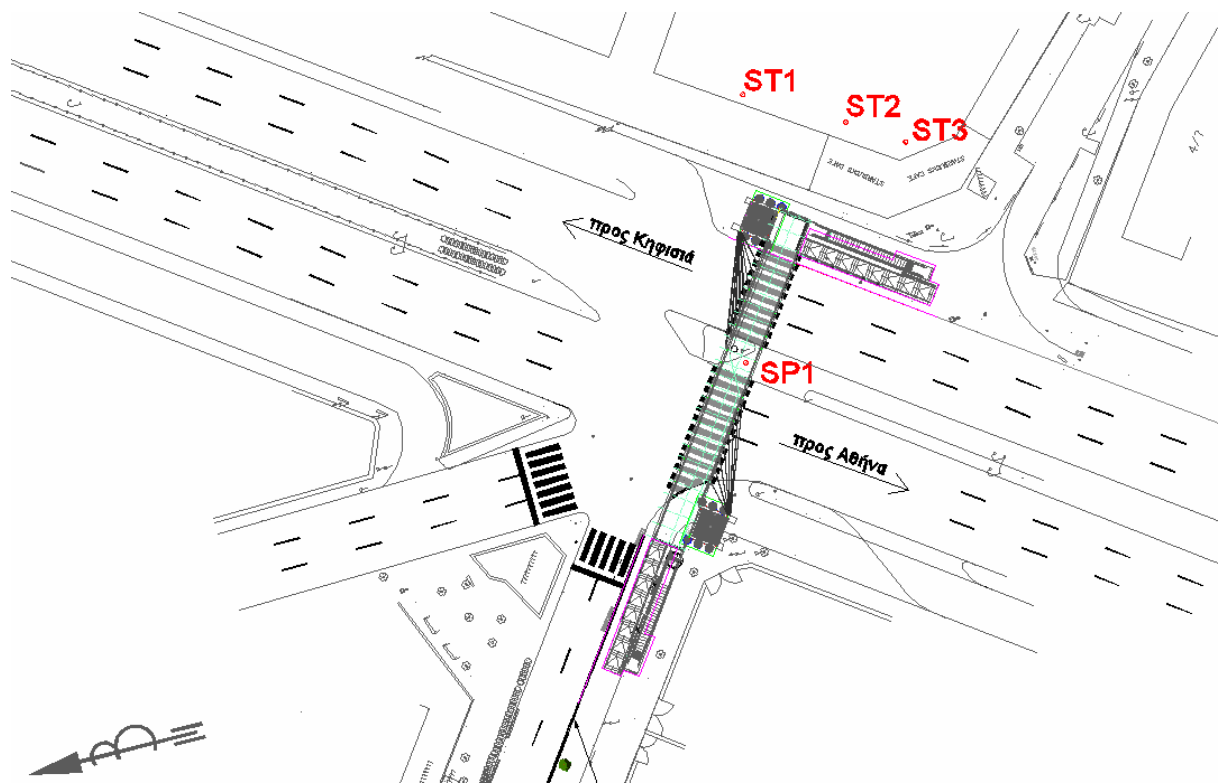
Άξονας τετμημένων: άξονας παράλληλος με τον διαμήκη άξονα του καταστρώματος,

άξονας τεταγμένων: άξονας παράλληλος με τον εγκάρσιο άξονα της γέφυρας,

άξονας υψομέτρων: η κατακόρυφος.

Όπως είναι κατανοητό, μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο άξονας των τετμημένων ο οποίος ουσιαστικά θα πληροφορήσει κατά πόσο οι δύο πυλώνες συγκλίνουν ή αποκλίνουν σε κάθε φάση της κατασκευής. Να σημειωθεί εδώ ότι επειδή οι μετακινήσεις που αναμένονται σύμφωνα με την μελέτη είναι ιδιαίτερα μικρές επιλέχθηκαν ως σημεία ελέγχου τα σημεία όπου αναμένονται οι μέγιστες μετακινήσεις στο επίπεδο. Τα σημεία αυτά σύμφωνα με τον μελετητή είναι τα σημεία αγκύρωσης των καλωδίων στους πυλώνες.

Απαραίτητη προϋπόθεση παρακολούθησης οροζοντιογραφικών μετακινήσεων αποτελεί η ίδρυση πολυγωνομετρικού δικτύου. Οι κορυφές του πολυγωνομετρικού δικτύου επιλέχθηκαν έτσι ώστε να είναι εκτός ζώνης επιρροής του έργου (θεωρητικά αμετάβλητης θέσης). Επιλέχθηκε η διάταξη που διακρίνεται στο εικόνα 4.13.



εικόνα 4.13 – διάταξη πολυγωνομετρίας

Οι κορυφές ΣΤ1, ΣΤ2, ΣΤ3 υλοποιήθηκαν με μόνιμους, αμετακίνητους αυτοκόλλητους στόχους τοποθετημένους στα υποστυλώματα της έναντι κατασκευής (εικόνα 4.14). Ο σκοπός τους είναι καθαρά και μόνον για εξάρτηση της κορυφής SP1 σε κάθε ομάδα μετρήσεων κατά τον προσδιορισμό θέσης με την μέθοδο της οπισθοτομίας. Όσον αφορά την κορυφή SP1 πρόκειται για την κορυφή όπου θα τοποθετείται ο γεωδαιτικός σταθμός.



εικόνα 4.14 - κορυφές ΣΤ1-2-3

Η υλοποίηση του σημείου SP1 πραγματοποιήθηκε με την κατασκευή εξαναγκασμένης κέντρωσης. Ουσιαστικά δημιουργώντας μια μεταλλική μόνιμη κατασκευή πακτωμένη στο έδαφος όπου στην στέγη της υπάρχει ένα μόνιμο σπείρωμα ώστε να τοποθετείται ο γεωδαιτικός σταθμός (εικόνα 4.15).



εικόνα 4.15 – κορυφή πολυγωνομετρίας με κατασκευή εξαναγκασμένης κέντρωσης

Τα σημεία ελέγχου τοποθετήθηκαν στην όψη του πυλώνα (εικόνα 4.16) με αυτοκόλλητο στόχο, όπως και οι κορυφές ΣΤ1, ΣΤ2, ΣΤ3, έτσι σε κανένα σημείο δεν θα χρησιμοποιηθεί πρίσμα και σε συνδυασμό της υλοποίησης της κορυφής SP1 όλα τα σημεία θεωρούνται πακτωμένα χωρίς σφάλμα κέντρωσης και κατακορυφότητας.

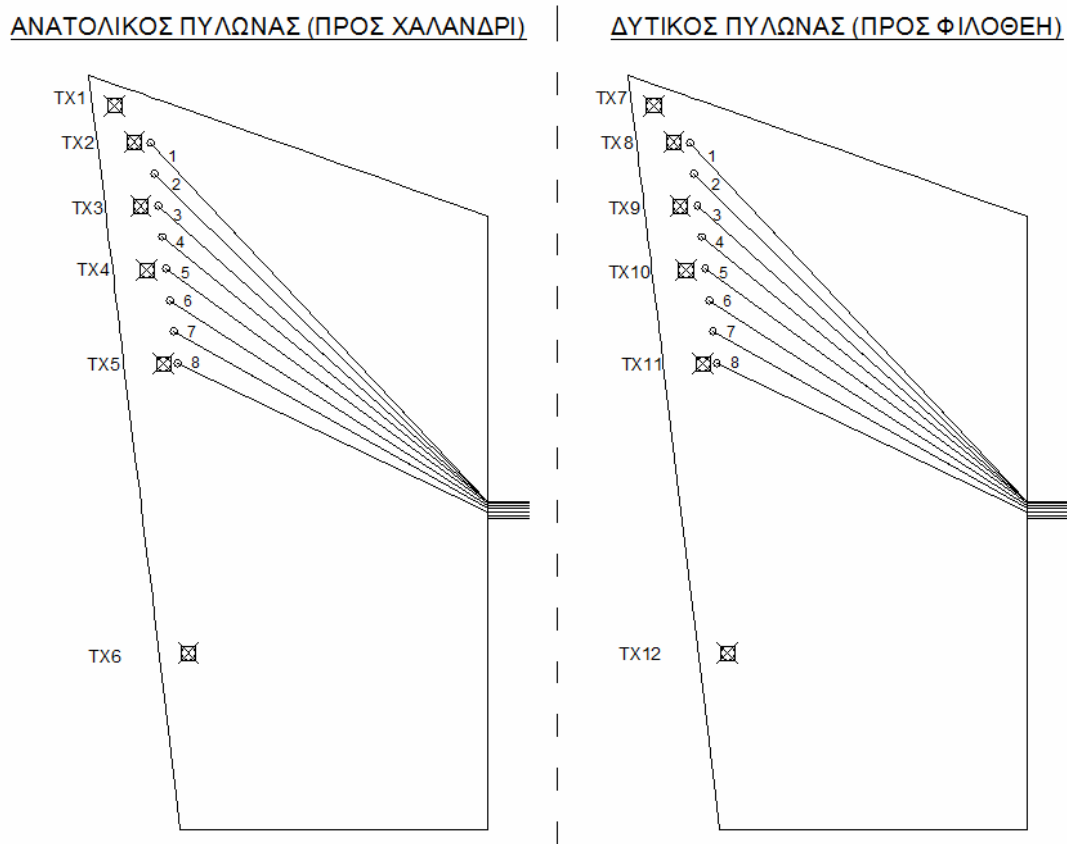
Για το ύψος οργάνου στην κορυφή SP1 υλοποιήθηκε μια υψομετρική αφετηρία σε πολύ κοντινή απόσταση όπου πριν από κάθε ομάδα μετρήσεων στοχεύοντας σε δυο θέσεις του ορίζοντα του οργάνου (100g και 300g) δύναται να υπολογισθεί το ύψος οργάνου.

4.3.2 Διαδικασία μετρήσεων

Τα σημεία ελέγχου που επιλέχθηκαν είναι έξι σε κάθε πυλώνα (12 σύνολο) και αποτελούνται όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.16 από:

- υψηλότερο σημείο επιπέδου πυλώνα (TX1, TX7)
- πρώτο καλώδιο (TX2-TX8)
- τρίτο καλώδιο (TX3-TX9)
- πέμπτο καλώδιο (TX4-TX10)
- όγδοο καλώδιο (TX5-TX11)
- χαμηλό σημείο (TX6-TX12)

Για τις μετρήσεις του δικτύου οριζοντίου ελέγχου χρησιμοποιήθηκε ο γεωδαιτικός σταθμός Leica TDA-5005 σε δυο περιόδους για κάθε σημείο ελέγχου. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν τις πρωινές ώρες 06,30πμ ~ 10,30πμ για αποφυγή σφαλμάτων λόγω αυξημένης θερμοκρασίας που επικρατούσε τις μεσημβρινές ώρες.



εικόνα 4.16 - σημεία ελέγχου

4.3.3 Επιμέρους Φάσεις Παρακολούθησης

4.3.3α Αρχική Κατάσταση (προ τάνυσης καλωδίων) - 17/07/2011

Κατά την αποτύπωση της 17/07/2011 (αρχική κατάσταση) οι συντεταγμένες των σημείων ελέγχου ήταν:

πίνακας 4.4 – συντ/νες σημείων ελέγχου της 17/07/2011

ΣΗΜΕΙΟ	x (m)	y (m)	z (m)
ΣΤ1	1000.0000	1028.8835	7.8887
ΤΧ1	1000.0185	1013.9156	9.6237
ΤΧ2	1000.1840	1013.8526	9.1291
ΤΧ3	1000.2839	1013.8183	8.4357
ΤΧ4	1000.3488	1013.7965	7.7727
ΤΧ5	1000.4354	1013.7643	6.8010
ΤΧ6	1000.6193	1013.6969	4.0243
ΣΤ2	1015.1759	1023.4299	7.7837
ΣΤ3	1018.9129	1022.0774	7.8478
ΤΧ7	999.7554	980.5177	9.6720
ΤΧ8	999.5233	980.6116	9.0917
ΤΧ9	999.4464	980.6406	8.4403
ΤΧ10	999.3820	980.6652	7.7907
ΤΧ11	999.2949	980.6984	6.8091
ΤΧ12	999.1505	980.7563	4.2397

4.3.3β Μετά την τάνυση των καλωδίων ανάρτησης - 22/07/2011

Κατά την αποτύπωση της 22/07/2011 (μετά την τάνυση) οι συντεταγμένες των σημείων ελέγχου ήταν:

πίνακας 4.5 – συντ/νες σημείων ελέγχου της 22/07/2011

ΣΗΜΕΙΟ	x (m)	y (m)	z (m)
ΣΤ1	1000.0000	1028.8831	7.8879
ΤΧ1	1000.0179	1013.9109	9.6225
ΤΧ2	1000.1836	1013.8482	9.1282
ΤΧ3	1000.2835	1013.8140	8.4348
ΤΧ4	1000.3485	1013.7925	7.7719
ΤΧ5	1000.4355	1013.7610	6.8000
ΤΧ6	1000.6196	1013.6951	4.0233
ΣΤ2	1015.1757	1023.4303	7.7828
ΣΤ3	1018.9126	1022.0775	7.8470
ΤΧ7	999.7564	980.5226	9.6710
ΤΧ8	999.5244	980.6159	9.0908
ΤΧ9	999.4473	980.6448	8.4391
ΤΧ10	999.3827	980.6692	7.7897
ΤΧ11	999.2953	980.7020	6.8081
ΤΧ12	999.1506	980.7582	4.2389

4.3.3γ Μετά την Σκυροδέτηση του Καταστρώματος - 02/08/2011

Κατά την αποτύπωση της 02/08/2011 (μετά την σκυροδέτηση) οι συντεταγμένες των σημείων ελέγχου ήταν:

πίνακας 4.6 – συντ/νες σημείων ελέγχου της 02/08/2011

ΣΗΜΕΙΟ	x (m)	y (m)	z (m)
ΣΤ1	1000.0000	1028.8833	7.8890
TX1	1000.0182	1013.9077	9.6236
TX2			
TX3	1000.2831	1013.8001	8.4300
TX4	1000.3485	1013.7897	7.7725
TX5			
TX6			
ΣΤ2	1015.1754	1023.4308	7.7836
ΣΤ3	1018.9122	1022.0784	7.8482
TX7	999.7564	980.5254	9.6719
TX8	999.5243	980.6187	9.0921
TX9	999.4473	980.6474	8.4404
TX10	999.3827	980.6716	7.7908
TX11	999.2956	980.7039	6.8091
TX12	999.1508	980.7592	4.2398

όπως φαίνεται στον πίνακα 4.6 τα σημεία TX2, TX5 και TX6 δεν ήταν εφικτό να συμπεριληφθούν στις μετρήσεις. Αυτό συνέβη λόγω εμποδίων της κατασκευής (τα οποία δεν υπήρχαν τις προηγούμενες μέρες) και διέκοψαν την ορατότητα SP1-TX2, SP1-TX5 και SP1-TX6.

4.3.4 Αξιολόγηση Μεταβολών Οριζοντιογραφίας Πυλώνων

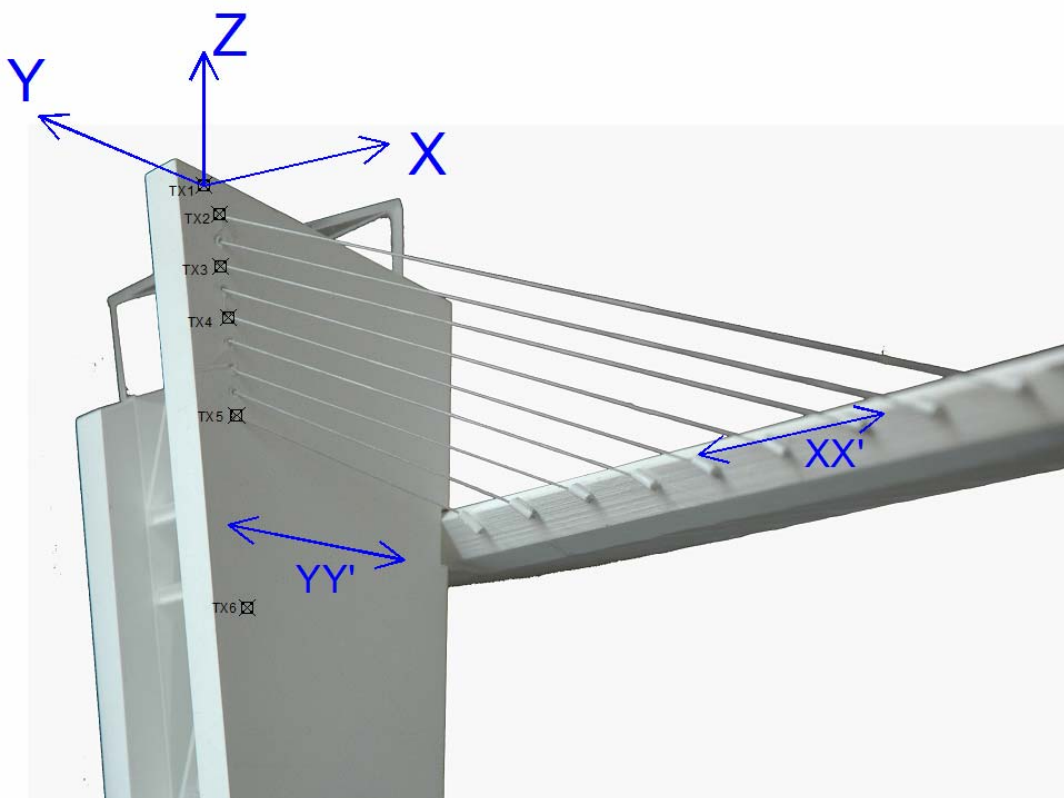
Από τους πίνακες 4.4 - 4.5 - 4.6 μπορούμε πολύ εύκολα να υπολογίσουμε τα διανύσματα ΔX , ΔY , ΔZ για κάθε σημείο. Αυτός ο τρόπος όμως θα μας έδινε μετακινήσεις στο σύστημα αναφοράς που υλοποιήθηκε κατά τις μετρήσεις, το οποίο είναι ένα τοπικό σύστημα σε ισαπέχουσα προβολή όπου η κορυφή SP1 και ΣΤ1 είναι συνευθειακά στον άξονα Y. Οπότε διακρίνοντας και την εικόνα 4.12 παρατηρούμε ότι το σύστημά μας (άξονας Y περνάει από SP1 & ΣΤ1, άξονας X κάθετος στον Y) θα μας έδινε αποτελέσματα όχι κατασκευαστικά σημαντικά.

Όσον αφορά την μελέτη παραμορφώσεων που πραγματοποιούμε αλλά και την μελέτη του κατασκευαστή, οι μετακινήσεις που μας ενδιαφέρουν είναι σε σύστημα όπου οι άξονες είναι, ο ένας παράλληλος στο επίπεδο της όψης του πυλώνα και ο άλλος κάθετος στον προηγούμενο δηλαδή ταυτόσημος (θεωρητικά όχι) με τον άξονα όπου δέχεται τις τάσεις από τα καλώδια της γέφυρας.

Έτσι από το σύστημα των μετρήσεων έγινε μετασχηματισμός στο σύστημα ενδιαφέροντος. Αυτό υλοποιήθηκε ως εξής:

- αρχή του συστήματος είναι το σημείο TX1 της 17/07/2011 με συντ/νες (0.00, 0.00)
- θεωρήθηκε ότι το ευθύγραμμο τμήμα των προβολών TX1 - TX6 της 17/07/2011 ορίζει το επίπεδο της όψης του πυλώνα.
- το ευθύγραμμο τμήμα που ενώνει τις προβολές των TX1 και TX6 ορίζει τον άξονα Y
- ο κάθετος στον άξονα Y ορίζει τον άξονα X, ο οποίος είναι θεωρητικά παράλληλος με τον διαμήκη άξονα του καταστρώματος της γέφυρας
- ο άξονας των υψομέτρων ταυτίζεται με την κατακόρυφο στην προβολή

Οπότε προκύπτει στο σύστημα συντεταγμένων της εικόνας 4.17



εικόνα 4.17 – σύστημα συντεταγμένων οριζοντιογραφίας πυλώνων

(Ομοίως έγινε και στον δυτικό πύλωνα με τα αντίστοιχα σημεία TX7 και TX12)

Οπότε πραγματοποιώντας ουσιαστικά μια μετάθεση και μία στροφή ορίζουμε το ζητούμενο σύστημα όπου παρατηρώντας τις μεταβολές ΔX , ΔY , ΔZ μπορούμε να βγάλουμε σημαντικά συμπεράσματα. Οι συντεταγμένες των σημείων που προέκυψαν είναι :

πίνακας 4.7 – νέες συντ/νες σημείων ελέγχου της 16/07/2011

17/07	X(m)	Y(m)	Z(m)
TX1	0.0000	0.0000	9.6237
TX2	0.0027	0.1770	9.1291
TX3	0.0007	0.2826	8.4357
TX4	-0.0010	0.3511	7.7727
TX5	-0.0004	0.4434	6.8010
TX6	0.0000	0.6393	4.0243
TX7	0.0000	0.0000	9.6720
TX8	0.0022	0.2504	9.0917
TX9	0.0009	0.3326	8.4403
TX10	0.0002	0.4014	7.7907
TX11	-0.0009	0.4947	6.8091
TX12	0.0000	0.6503	4.2397

πίνακας 4.8 – νέες συντ/νες σημείων ελέγχου της 22/07/2011

22/07	X(m)	Y(m)	Z(m)
TX1	0.0047	0.0011	9.6235
TX2	0.0070	0.1782	9.1292
TX3	0.0049	0.2837	8.4358
TX4	0.0028	0.3522	7.7729
TX5	0.0027	0.4447	6.8010
TX6	0.0016	0.6403	4.0243
TX7	0.0049	0.0009	9.6720
TX8	0.0066	0.2509	9.0918
TX9	0.0051	0.3332	8.4401
TX10	0.0042	0.4023	7.7907
TX11	0.0026	0.4957	6.8091
TX12	0.0018	0.6509	4.2399

πίνακας 4.9 – νέες συντ/νες σημείων ελέγχου της 02/08/2011

02/08	X(m)	Y(m)	Z(m)
TX1	0.0076	0.0024	9.6236
TX2			
TX3	0.0077	0.2844	8.4358
TX4	0.0055	0.3531	7.7725
TX5			
TX6			
TX7	0.0076	0.0019	9.6719
TX8	0.0092	0.2521	9.0921
TX9	0.0076	0.3343	8.4404
TX10	0.0064	0.4031	7.7908
TX11	0.0045	0.4960	6.8091
TX12	0.0027	0.6510	4.2398

Από τις συντεταγμένες των σημείων προκύπτουν, υπολογίζοντας αλγεβρικές διαφορές, οι σχετικές διαφορές θέσης των σημείων ελέγχου ανά εποχές. Έτσι προκύπτουν οι κάτωθι πίνακες 4.10 και 4.11.

πίνακας 4.10 – διαφορές σημείων ελέγχου μεταξύ 17/07 και 22/07/2011

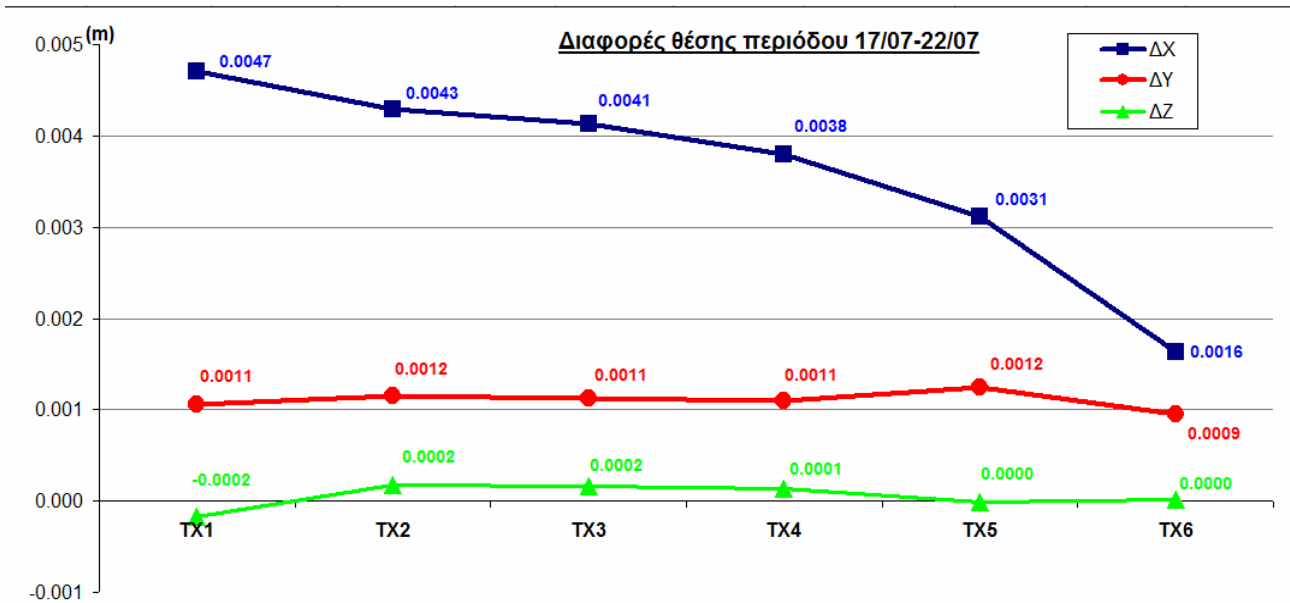
17/07-22/07	$\Delta X(m)$	$\Delta Y(m)$	$\Delta Z(m)$
TX1	0.0047	0.0011	-0.0002
TX2	0.0043	0.0012	0.0002
TX3	0.0041	0.0011	0.0002
TX4	0.0038	0.0011	0.0001
TX5	0.0031	0.0012	0.0000
TX6	0.0016	0.0009	0.0000
TX7	-0.0049	-0.0009	0.0000
TX8	-0.0044	-0.0006	-0.0001
TX9	-0.0042	-0.0007	0.0002
TX10	-0.0040	-0.0008	-0.0001
TX11	-0.0034	-0.0010	0.0000
TX12	-0.0018	-0.0006	-0.0001

πίνακας 4.11 – διαφορές σημείων ελέγχου μεταξύ 22/07 και 02/08/2011

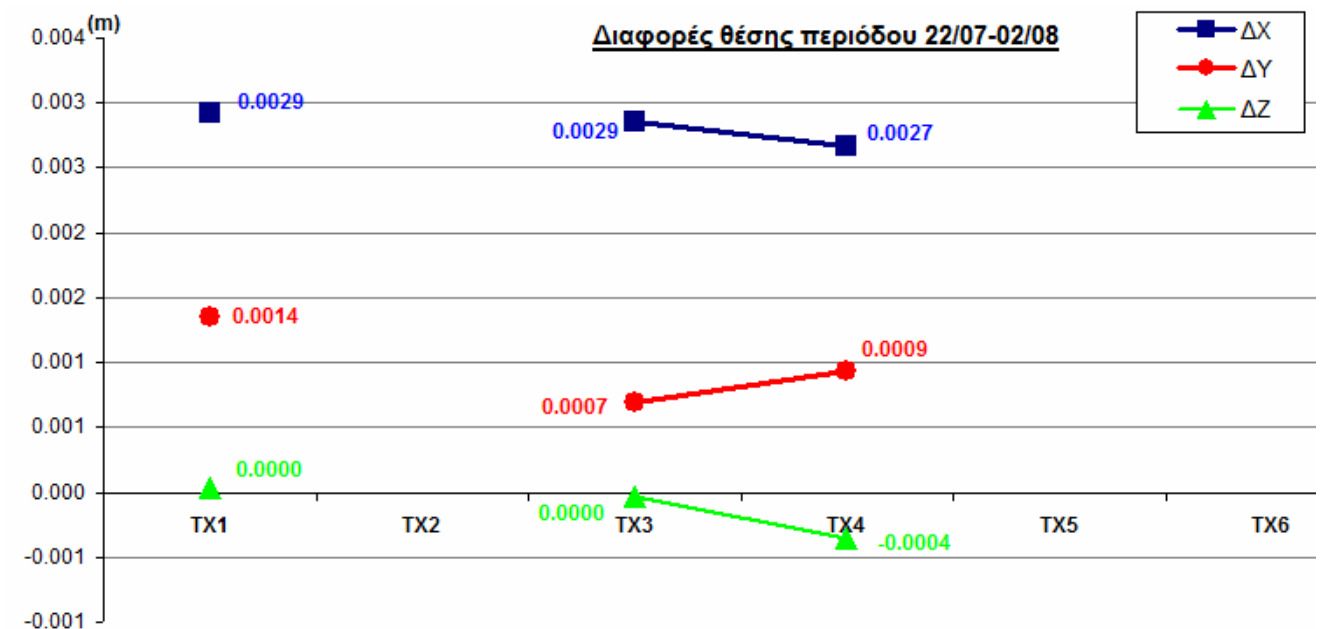
22/07-02/08	$\Delta X(m)$	$\Delta Y(m)$	$\Delta Z(m)$
TX1	0.0029	0.0014	0.0000
TX2			
TX3	0.0029	0.0007	0.0000
TX4	0.0027	0.0009	-0.0004
TX5			
TX6			
TX7	-0.0027	-0.0010	-0.0001
TX8	-0.0026	-0.0011	0.0003
TX9	-0.0025	-0.0010	0.0003
TX10	-0.0022	-0.0009	0.0000
TX11	-0.0019	-0.0004	0.0000
TX12	-0.0010	-0.0001	0.0000

Ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα παρακάτω διαγράμματα (4.18, 4.19, 4.20, 4.21, 4.22) όπου διακρίνονται γραφικά οι διαφορές θέσεις των σημείων ελέγχου ανά πυλώνα και ανά περίοδο. Στον ορισμό του συστήματος αναφοράς θέσαμε ως θετική φορά, την διεύθυνση από ανατολικό πυλώνα προς δυτικό. Έτσι για να υπάρχει κοινή αλγεβρική μορφή σε όλες τις φάσεις αλλά και με τα θεωρητικά δεδομένα, οι διαφορές θέσης υπολογίσθηκαν έτσι ώστε να τηρείται ο παραπάνω περιορισμός.

- Ανατολικός πυλώνας (προς Χαλάνδρι)

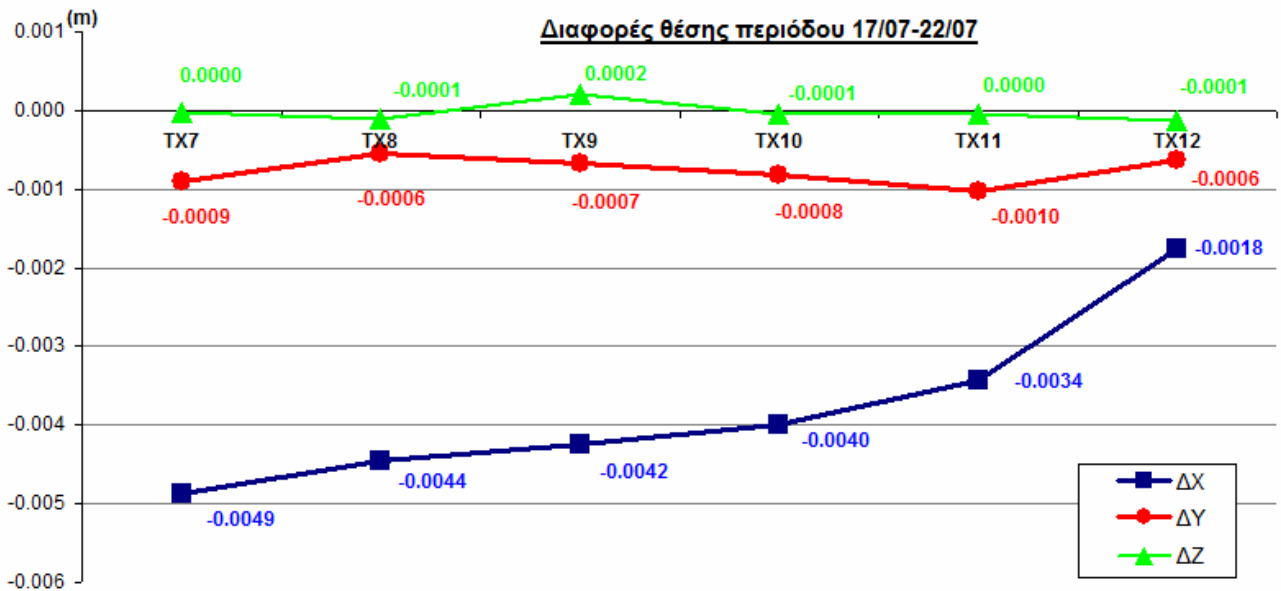


εικόνα 4.18 - διαφορές σημείων ελέγχου μεταξύ 17/07 και 22/07 ανατολικού πυλώνα

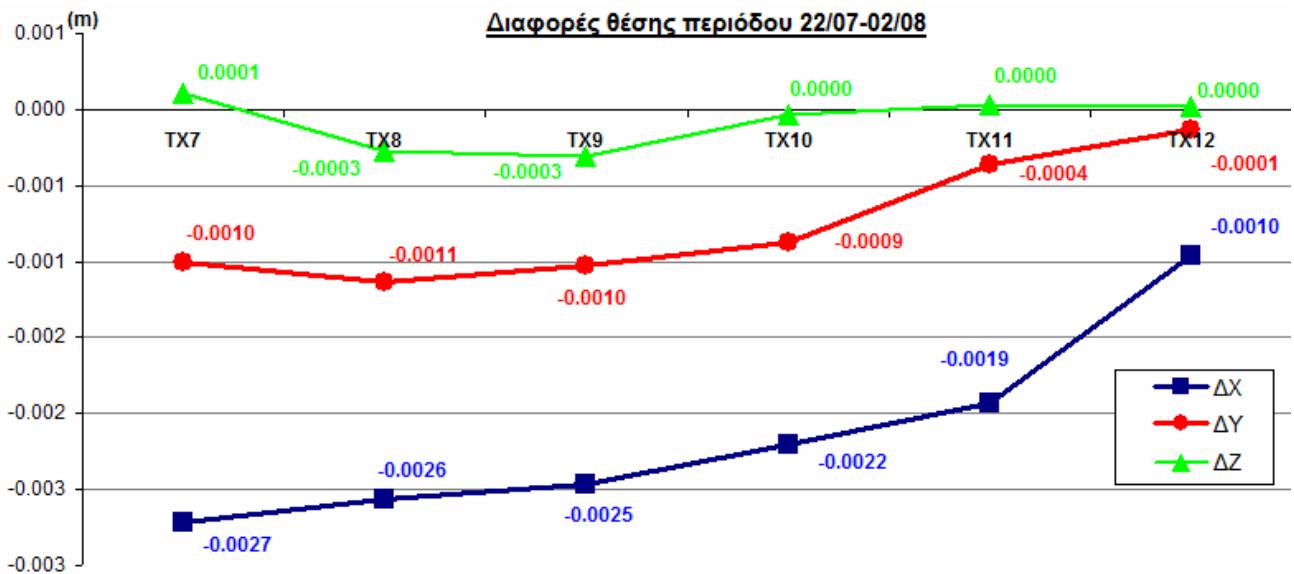


εικόνα 4.19 - διαφορές σημείων ελέγχου μεταξύ 22/07 και 02/08 ανατολικού πυλώνα

• Δυτικός Πυλώνας (προς Φιλοθέη)

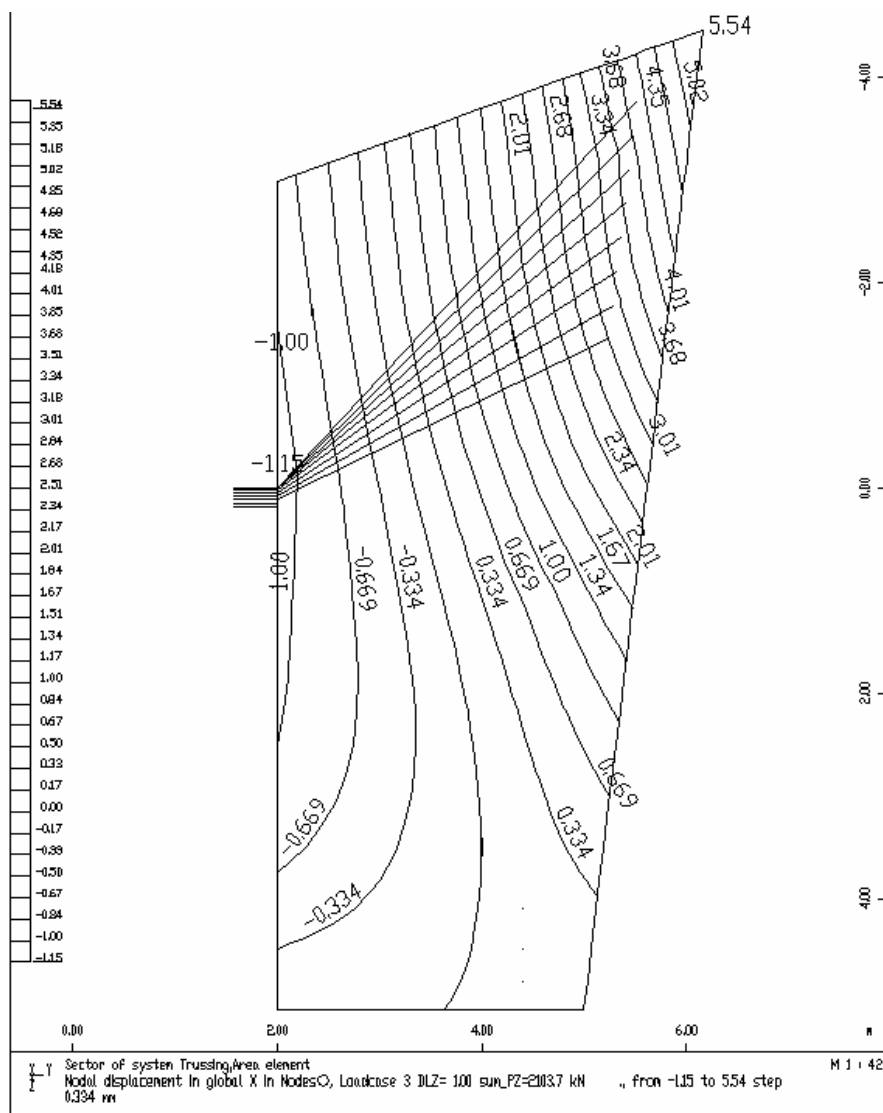


εικόνα 4.20 - διαφορές σημείων ελέγχου μεταξύ 22/07 και 02/08 δυτικού πυλώνα



εικόνα 4.21 - διαφορές σημείων ελέγχου μεταξύ 22/07 και 02/08 δυτικού πυλώνα

Για την σύγκριση των παραπάνω μεταβολών που προέκυψαν από τις μετρήσεις με τις θεωρητικές αναμενόμενες μεταβολές έγινε χρήση τεσσάρων διαγραμμάτων όπως αυτό της παρακάτω εικόνας (4.22). Έχει προκύψει από την μελέτη για κάθε πυλώνα ένα διάγραμμα με αναμενόμενες παραμορφώσεις μετά την τάνση των καλωδίων και ένα με τις αναμενόμενες τιμές μετά την σκυροδέτηση του φορέα.



εικόνα 4.22 - διάγραμμα αναμενόμενης παραμόρφωσης πυλώνα βάσει μελέτης

Έτσι, με γραμμική παρεμβολή υπολογίζεται η αναμενόμενη θεωρητική τιμή μετακίνησης κάθε σημείου ελέγχου και προκύπτουν οι παρακάτω πίνακες. Για λόγους σύγκρισης εμφανίζονται και οι πραγματικές μετακινήσεις καθώς και η απόλυτη διαφορά μεταξύ των δυο ομάδων.

πίνακας 4.12 – διαφορές θέσεων σημείων ελέγχου μεταξύ 17/07 και 22/07

<u>17/07- 22/07</u>	Θεωρητικές ΔΧ (m)	Πραγματικές ΔΧ (m)	Διαφορά ΔΔΧ (m)	Ανηγγμένη Διαφορά
TX1	0.0048	0.0047	0.0001	2.13%
TX2	0.0042	0.0043	0.0001	2.33%
TX3	0.0039	0.0041	0.0003	6.10%
TX4	0.0036	0.0038	0.0003	6.58%
TX5	0.0031	0.0031	0.0000	0.00%
TX6	0.0017	0.0016	0.0001	4.37%
TX7	-0.0045	-0.0049	0.0004	-8.16%
TX8	-0.0040	-0.0044	0.0004	-9.09%
TX9	-0.0038	-0.0042	0.0004	-9.52%
TX10	-0.0035	-0.0040	0.0005	-12.50%
TX11	-0.0031	-0.0034	0.0003	-8.82%
TX12	-0.0013	-0.0018	0.0005	-27.78%

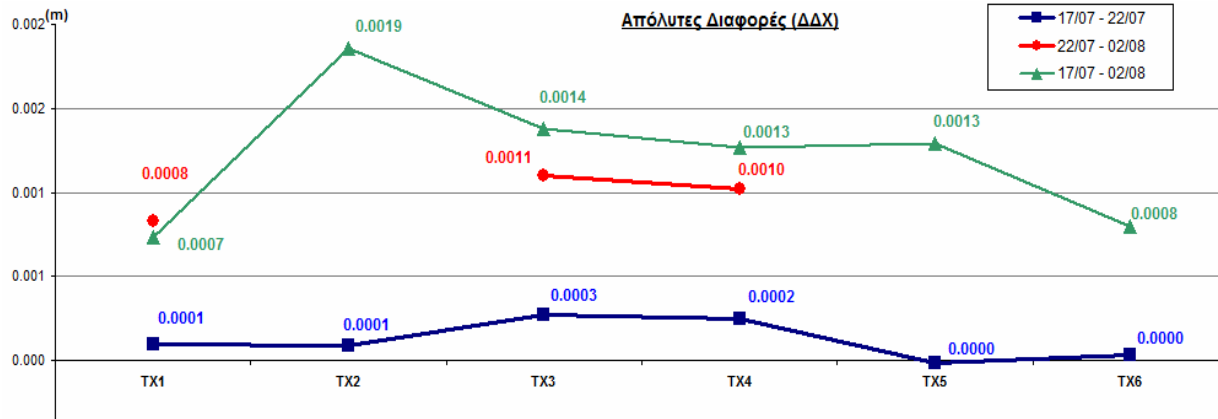
πίνακας 4.13 – διαφορές θέσεων σημείων ελέγχου μεταξύ 22/07 και 02/08

<u>22/07- 02/08</u>	Θεωρητικές ΔΧ (m)	Πραγματικές ΔΧ (m)	Διαφορά ΔΔΧ (m)	Ανηγγμένη Διαφορά
TX1	0.0021	0.0029	0.0008	27.59%
TX2	0.0020			
TX3	0.0018	0.0029	0.0011	37.50%
TX4	0.0017	0.0027	0.0011	38.89%
TX5	0.0013			
TX6	0.0008			
TX7	-0.0023	-0.0027	0.0004	-14.81%
TX8	-0.0021	-0.0026	0.0005	-19.23%
TX9	-0.0018	-0.0025	0.0007	-28.00%
TX10	-0.0018	-0.0022	0.0004	-18.18%
TX11	-0.0015	-0.0019	0.0005	-26.32%
TX12	-0.0006	-0.0010	0.0004	-40.00%

πίνακας 4.14 – διαφορές θέσεων σημείων ελέγχου μεταξύ 17/07 και 02/08

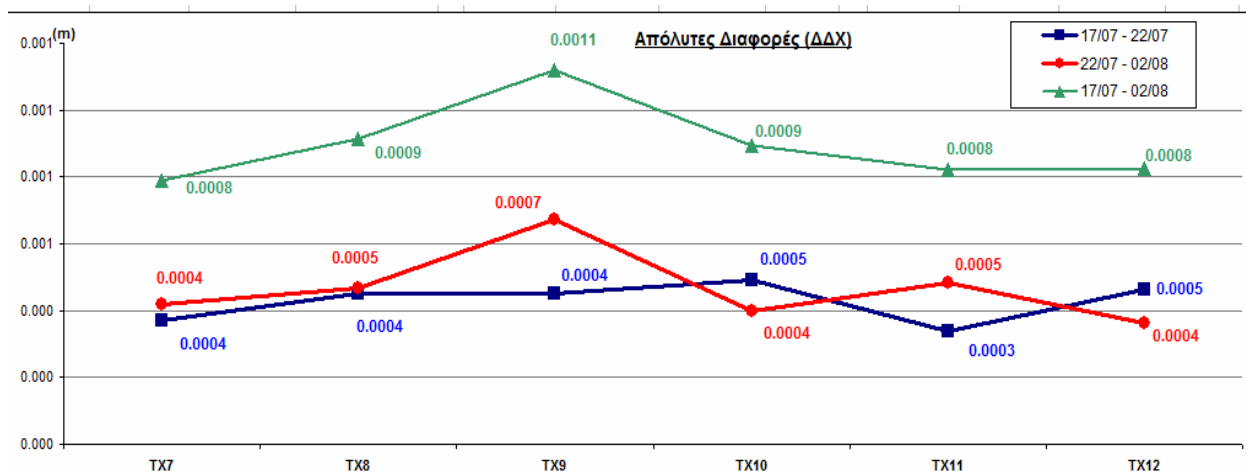
<u>17/07- 02/08</u>	Θεωρητικές ΔΧ (m)	Πραγματικές ΔΧ (m)	Διαφορά ΔΔΧ (m)	Ανηγγμένη Διαφορά
TX1	0.0069	0.0076	0.0007	9.21%
TX2	0.0062			
TX3	0.0056	0.0070	0.0013	18.84%
TX4	0.0052	0.0065	0.0013	20.00%
TX5				
TX6				
TX7	-0.0068	-0.0076	0.0008	-10.53%
TX8	-0.0061	-0.0070	0.0009	-12.86%
TX9	-0.0056	-0.0067	0.0011	-16.42%
TX10	-0.0053	-0.0062	0.0009	-14.52%
TX11	-0.0046	-0.0054	0.0008	-15.09%
TX12	-0.0019	-0.0027	0.0009	-32.14%

• Ανατολικός πυλώνας (προς Χαλάνδρι)



εικόνα 4.23 - διαφορές θέσεων θεωρητικές-μετρημένες ανατολικού πυλώνα

• Δυτικός Πυλώνας (προς Φιλοθέη)



εικόνα 4.24 - διαφορές θέσεων θεωρητικές-μετρημένες δυτικού πυλώνα

Όπως διακρίνεται από τους παραπάνω πίνακες και φαίνεται παραστατικά και στα ανωτέρω διαγράμματα οι μετρημένες μετακινήσεις είναι πολύ κοντά στις αναμενόμενες θεωρητικές. Παρατηρείται μια μέση απόλυτη συνολική διαφορά 1mm, μέγεθος το οποίο σε πρώτη προσέγγιση φαίνεται σχετικά μικρό. Το 1mm σαν μέγεθος είναι περίπου το 20% έως 30% της μέσης μετακίνησης οπότε θα μπορούσαμε να ισχυριστούμε ότι είναι σημαντική διαφορά μεταξύ θεωρητικών και μετρούμενων τιμών μιας και η αναμενόμενη ακρίβεια της χωροστάθμησης είναι μικρότερη από 1mm.

Όσον αφορά όμως τις θεωρητικές τιμές, αυτές έχουν προκύψει από διαγράμματα (εικόνα 4.22) τα οποία είναι προϊόντα παρεμβολής της αρχικής στατικής επίλυσης της κομβικής μετατόπισης με σκοπό να δημιουργηθεί μια γραφική αναπαράσταση της επίλυσης με καμπύλες. Σε αυτήν την μορφή, πραγματοποιήθηκε εκ νέου παρεμβολή για τον υπολογισμό των τιμών σε συγκεκριμένες θέσεις. Τα διαγράμματα των θεωρητικών τιμών έχουν βήμα από 0.32mm έως 0.48mm, έτσι υπολογίζοντας το σφάλμα χωροθέτησης των σημείων ενδιαφέροντος στο διάγραμμα ίσο με μισό βήμα (εκτίμηση) προκύπτει μια αβεβαιότητα της τάξεως του 0.25mm στην υπολογιζόμενη θεωρητική μετακίνηση.

Το συνολικό σφάλμα της υπολογιζόμενης θεωρητικής μετακίνησης είναι άγνωστο καθώς δεν είναι γνωστός ο τρόπος (αλγόριθμος παρεμβολής, παράμετροι, παραδοχές κλπ) με τον οποίο προέκυψαν τα παραπάνω διαγράμματα από τον μελετητή. Εκτιμάται ότι το σφάλμα δεν θα υπερβαίνει το 0.50mm συνολικά, και θα κυμαίνεται μεταξύ 0.20mm (στην ευνοϊκότερη περίπτωση) και 0.50mm καθώς και μεμονωμένα στα σημεία TX6 και TX12 την τιμή 1mm όπου υπάρχει η μεγαλύτερη αβεβαιότητα χωροθέτησης.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η ακρίβεια της χωροστάθμησης με τον συγκεκριμένο χωροβάτη και την συγκεκριμένο μέθοδο που εφαρμόστηκε είναι της τάξεως του 0.40mm, παρατηρούμε ότι στην ευνοϊκότερη περίπτωση έχουμε μια αβεβαιότητα $\pm 0.60\text{mm}$ και στην χειρότερη περίπτωση $\pm 1.40\text{mm}$.

Οπότε, όσον αφορά τα σημεία TX6 και TX12 οι άνω υπολογιζόμενες διαφορές που προέκυψαν θεωρούνται εντός έλλειψης σφάλματος. Για τα υπόλοιπα σημεία εάν υπολογίσουμε τα ανωτέρω η νέα ανηγμένη διαφορά θα είναι μικρότερη, π.χ. για το σημείο TX4 έχουμε συνολική ανηγμένη διαφορά 20% ή 1.3mm, υπολογίζοντας όμως ότι η αβεβαιότητα είναι τουλάχιστον 0.60mm έχουμε $\Delta\Delta X = 1.3\text{mm} \pm 0.60\text{mm}$ και η ανηγμένη διαφορά δεν είναι 20% αλλά $20\% \pm 11\%$

Συμπερασματικά, προκύπτει ότι οι ανηγμένες διαφορές είναι από 5% έως 25%, με τις οποίες μπορούμε να ισχυριστούμε ότι οι δυο ομάδες δεδομένων (θεωρητικές-πραγματικές) είναι πολύ κοντά. Το παραπάνω σφάλμα (0.6mm έως 1mm) θα μπορούσε να περιοριστεί κατά πολύ (έως και στο μισό) εάν υπήρχε διαθέσιμη στατική επίλυση του πυλώνα με πεπερασμένα στοιχεία ή εάν ήταν γνωστή πλήρως η γεωμετρία και όλες οι παράμετροι που απαιτούνται για τον υπολογισμό κομβικής μετατόπισης ακριβώς σε όποιο σημείο που μας ενδιαφέρει χωρίς να χρειάζεται παρεμβολή.

5. ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΓΕΦΥΡΑΣ ΣΤΗ ΦΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

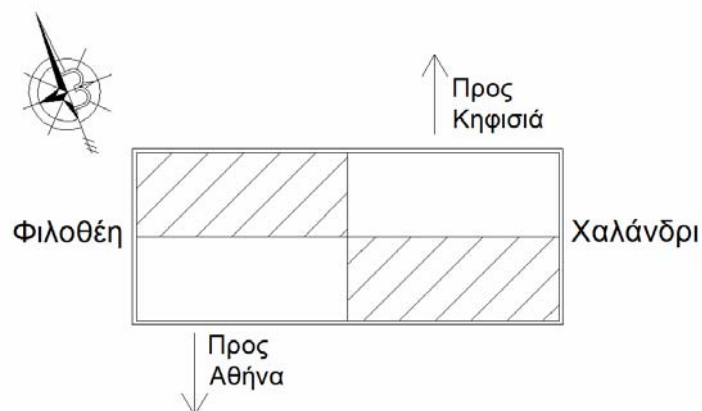
5.1 Γενικά – Σενάρια Παρατήρησης

Στο παρόν κεφάλαιο θα περιγραφεί η παρακολούθηση της γέφυρας μετά το πέρας της κατασκευής. Έτσι προγραμματίστηκε μια σειρά πειραμάτων με ελεγχόμενη φόρτιση δυναμική και στατική. Σε αυτήν την φάση έγινε παρακολούθηση του καταστρώματος της γέφυρας και όχι και των πυλώνων στήριξης, συνολικά πραγματοποιήθηκαν επτά πειράματα τα οποία θα αναλυθούν παρακάτω αναλυτικά. Για την επίτευξη αυτών των πειραμάτων ως μέσο φόρτισης χρησιμοποιήθηκε ανθρώπινο δυναμικό (εκατό ατόμων περίπου) το οποίο αποτελούνταν από μαθητές του κολεγίου Αθηνών. Τα πειράματα απεικονίζονται στο παρακάτω διάγραμμα (5.1)



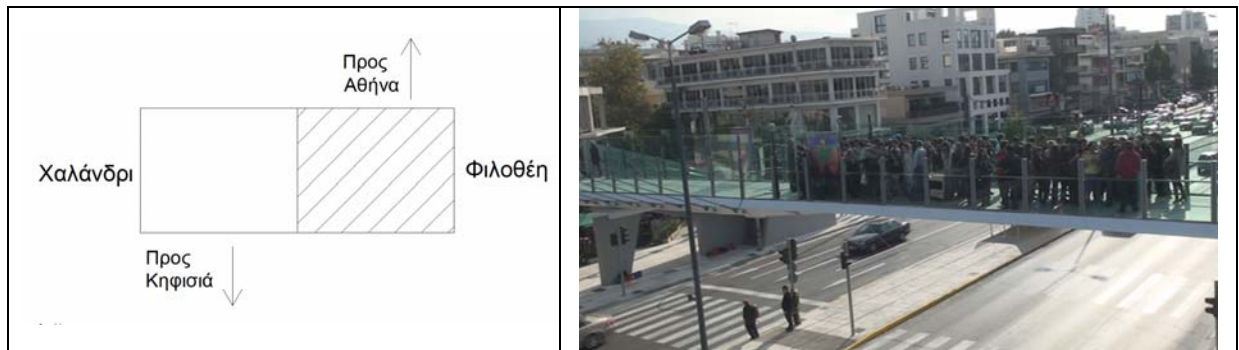
εικόνα 5.1 - Διάγραμμα μετρήσεων στην φάση λειτουργίας

Στην εικόνα 5.1 έχει εφαρμοστεί ο προσανατολισμός του παρακάτω σκαριφήματος (εικόνα 5.2)



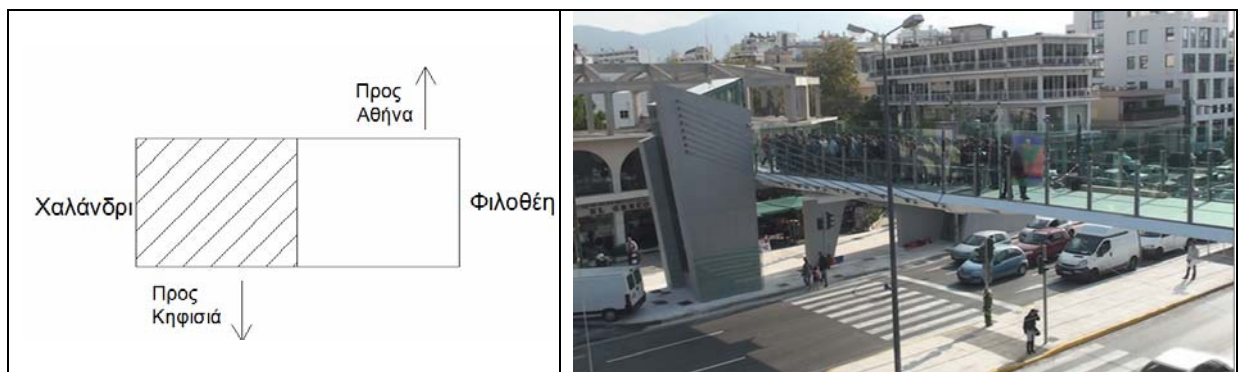
εικόνα 5.2 – σκαρίφημα προσανατολισμού γέφυρας

Όπου τα επιμέρους πειράματα είναι τα εξής:
Το πρώτο πείραμα ήταν η συσσώρευση του φορτίου στο μισό της γέφυρας (προς Φιλοθέη) όπως φαίνεται στην εικόνα 5.3



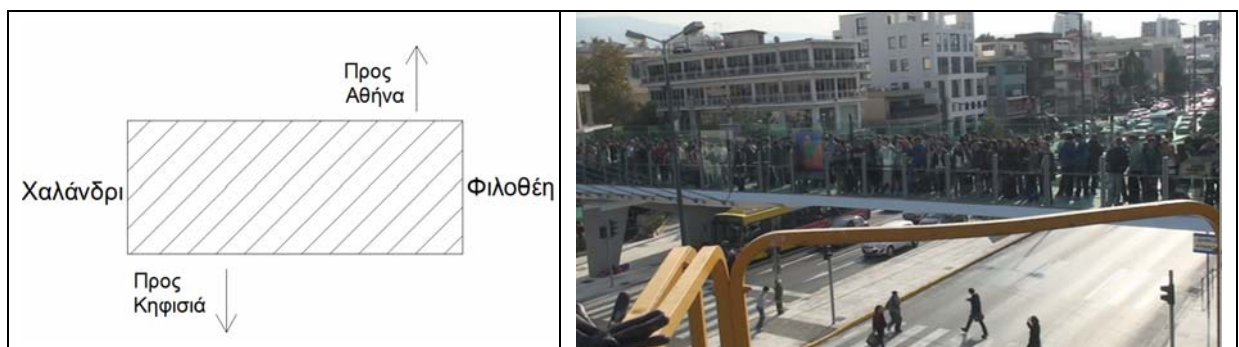
εικόνα 5.3 – πείραμα 1

Το δεύτερο πείραμα ήταν η συσσώρευση του φορτίου στο άλλο μισό της γέφυρας (προς Χαλάνδρι) όπως φαίνεται στην εικόνα 5.4



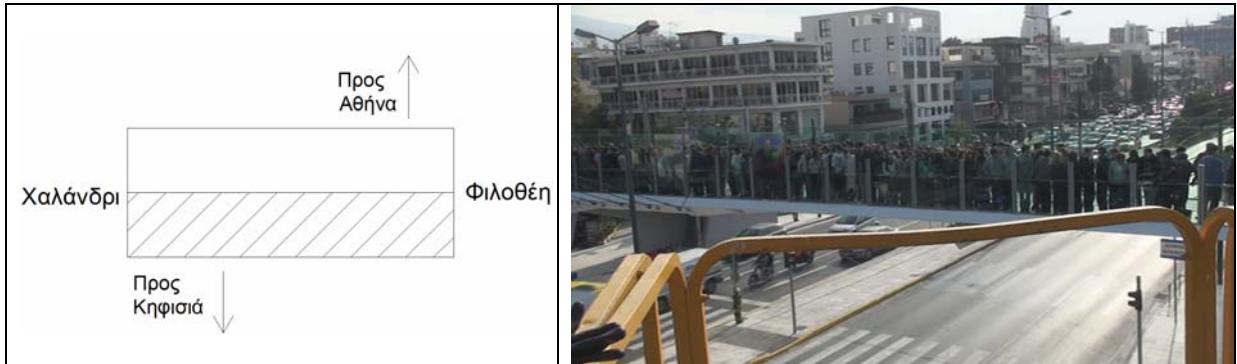
εικόνα 5.4 - Πείραμα 2

Το τρίτο πείραμα ήταν η κατανομή του φορτίου σε όλο το μήκος της γέφυρας όπως φαίνεται στην εικόνα 5.5



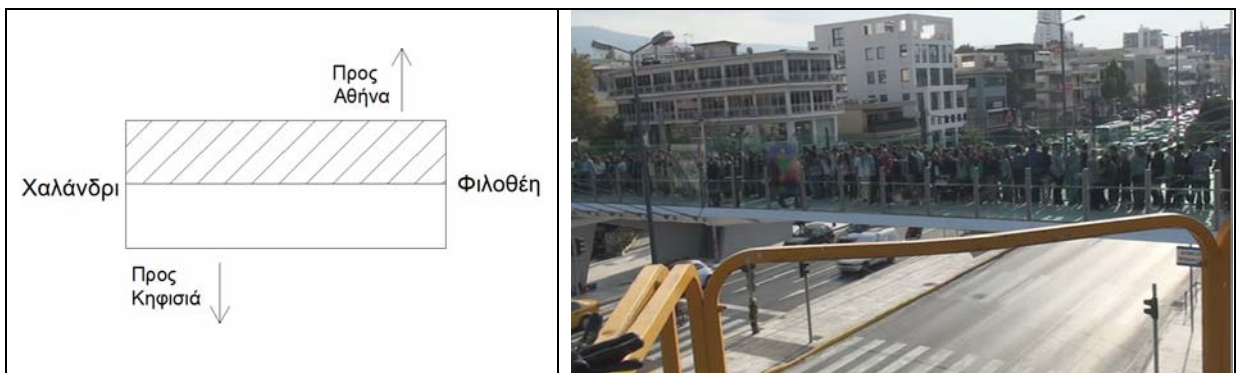
εικόνα 5.5 - Πείραμα 3

Το τέταρτο πείραμα ήταν η συσσώρευση του φορτίου στο βόρειο μισό της γέφυρας όπως φαίνεται στην εικόνα 5.6



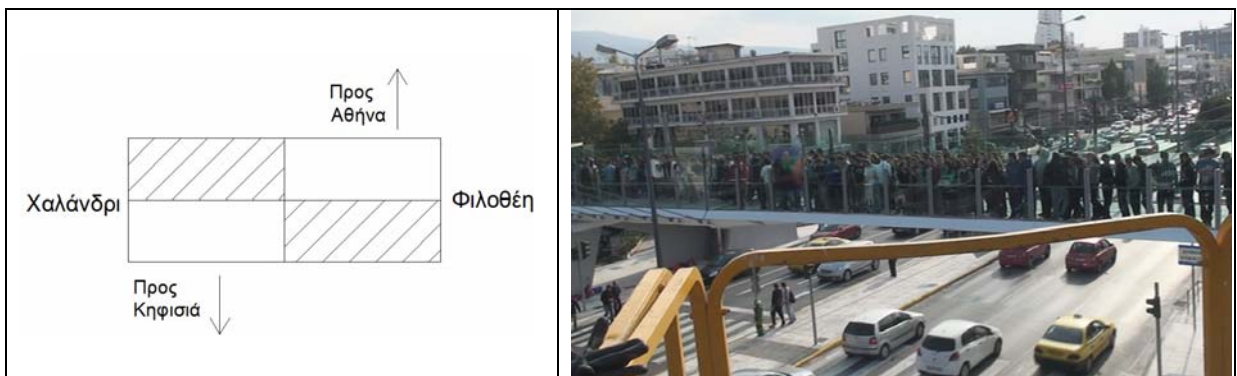
εικόνα 5.6 - Πείραμα 4

Το πέμπτο πείραμα ήταν η συσσώρευση του φορτίου στο νότιο μισό της γέφυρας όπως φαίνεται στην εικόνα 5.7



εικόνα 5.7 - Πείραμα 5

Το έκτο πείραμα ήταν η συσσώρευση ενός φορτίου στο βόρειο μισό της γέφυρας και ένα δεύτερο σχετικά ίσο φορτίο στο νότιο μισό της γέφυρας όπως φαίνεται στην εικόνα 5.8



εικόνα 5.8 - Πείραμα 6

Το έβδομο πείραμα ήταν μια σειρά από κινήσεις του φορτίου, ως εξής:

- πέντε συγχρονισμένα επιτόπια άλματα του πλήθους
- επιτόπιο βάδην του πλήθους

Να σημειωθεί ότι κατά το έβδομο πείραμα το πλήθος ήταν κατανεμημένο σε όλο το μήκος της γέφυρας.

Ταξινομώντας τα πειράματα σε έναν πίνακα προκύπτει ο παρακάτω πίνακας 5.1 όπου υπάρχει συσχέτιση μεταξύ πειραμάτων και χρόνου.

πίνακας 5.1 – χρονική αλληλουχία πειραμάτων

	Δt	Time	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
t0		11:13:38	άδεια γέφυρα
t1	0:03:00	11:16:38	αρχή πειρ. 1
t2	0:06:10	11:22:48	τέλος πειρ. 1
t3	0:00:05	11:22:53	αρχή πειρ.2
t4	0:07:45	11:30:38	τέλος πειρ.2
t5	0:02:20	11:32:58	αρχή πειρ.3
t6	0:09:50	11:42:48	τέλος πειρ.3
t7	0:00:42	11:43:30	αρχή πειρ. 4
t8	0:03:33	11:47:03	τέλος πειρ. 4
t9	0:00:20	11:47:23	αρχή πειρ. 5
t10	0:04:45	11:52:08	τέλος πειρ. 5
t11	0:00:12	11:52:20	αρχή πειρ. 6
t12	0:05:28	11:57:48	τέλος πειρ. 6
t13	0:02:30	12:00:18	1ο άλμα
t14	0:05:22	12:05:40	2ο άλμα
t15	0:08:11	12:13:51	3ο άλμα
t16	0:01:33	12:15:24	4ο άλμα
t17	0:00:26	12:15:50	5ο άλμα
t18	0:02:05	12:17:55	αρχή βάδην
t19	0:00:23	12:18:18	τέλος βάδην
t20	0:03:20	12:21:38	άδεια γέφυρα

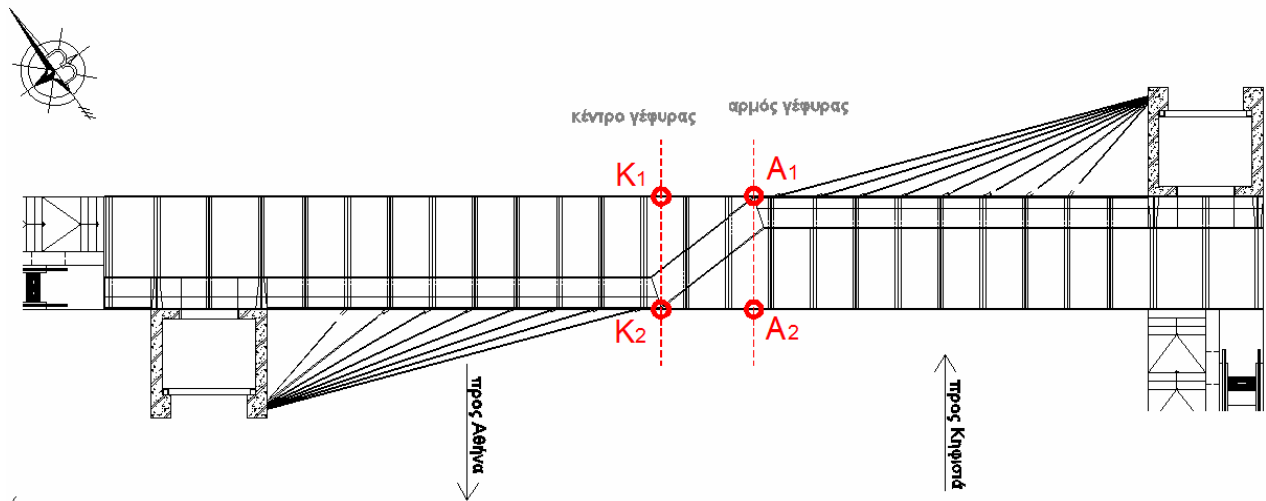
5.1.1 Διάταξη Εξοπλισμού

Στα παραπάνω πειράματα υπήρξε καταγραφή της συμπεριφοράς της γέφυρας από τον εξής εξοπλισμό:

- Δορυφορικό σύστημα Leica 1200+
- Ολοκληρωμένο αδρανειακό και δορυφορικό σύστημα Novatel
- Σύστημα ρομποτικού γεωδαιτικού σταθμού Leica TCA-1800
- Ψηφιακός χωροβάτης Leica DNA-03
- Ψηφιακή κάμερα βιντεοσκόπησης

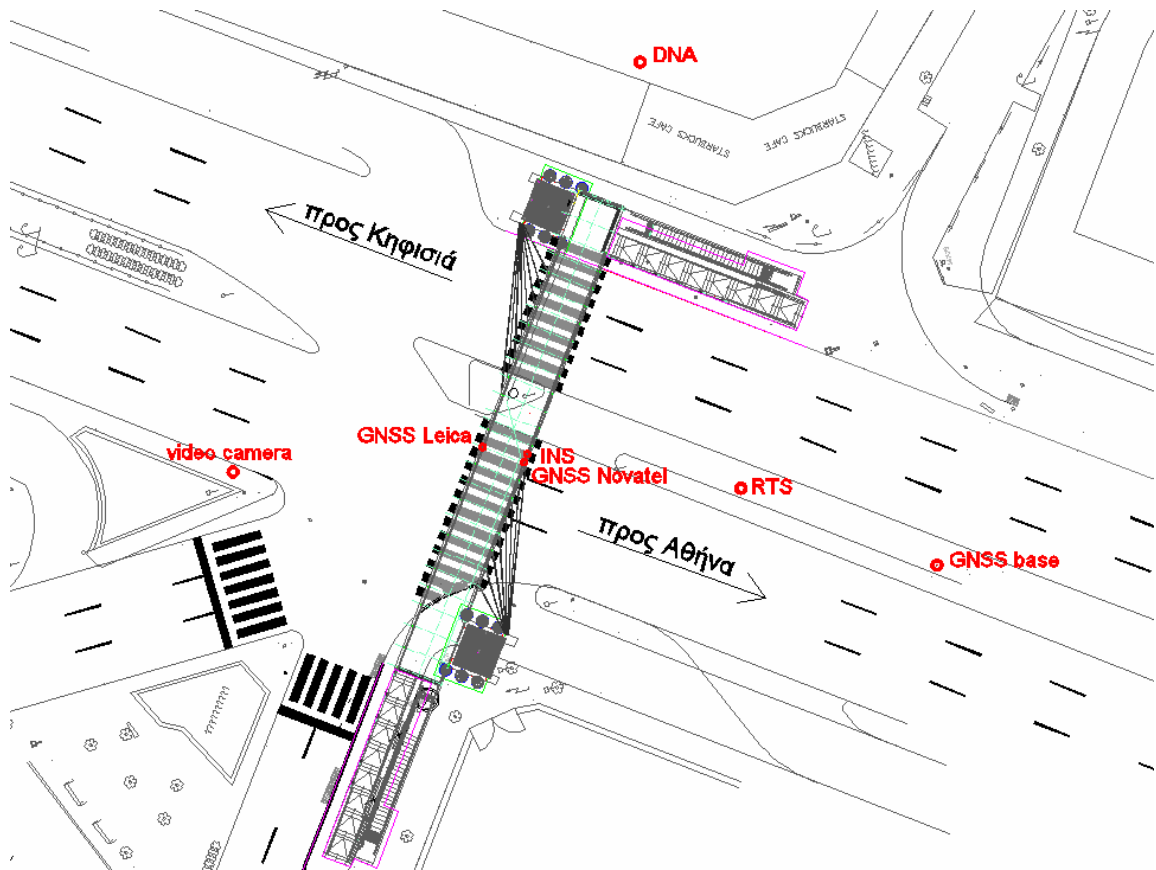
Να σημειωθεί ότι όλα τα όργανα πλην του χωροβάτη κατέγραφαν συνεχώς χωρίς την παραμικρή διακοπή καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων. Όσον αφορά τον χωροβάτη χρησιμοποιήθηκε σε κάθε πείραμα όταν το φορτίο είχε τοποθετηθεί στην ακριβή θέση και βρισκόταν σε θέση ηρεμίας.

Τα σημεία στα οποία έγινε καταγραφή φαίνονται στην παρακάτω εικόνα (5.9) και πρόκειται για δυο σημεία στο κέντρο του καταστρώματος (K1 και K2) καθώς και δυο σημεία στον αρμό (A1 και A2). Στην διατομή του κέντρου του καταστρώματος χρησιμοποιήθηκε δορυφορικό σύστημα, αδρανειακό σύστημα και σύστημα ρομποτικού γεωδαιτικού σταθμού. Ο ψηφιακός χωροβάτης παρακολουθούσε και τα τέσσερα σημεία των δυο διατομών.



εικόνα 5.9 – θέσεις σημείων καταγραφής

Όσον αφορά τις θέσεις του εξοπλισμού διακρίνονται παραστατικά στην εικόνα 5.10.



εικόνα 5.10 – θέσεις σημείων καταγραφής

όπου:

- GNSS Leica: ο κινητός σταθμός του δορυφορικού σταθμού Leica 1200+
- GNSS Novatel: ο κινητός σταθμός του δορυφορικού σταθμού Novatel
- INS: η αδρανειακή μονάδα
- RTS : ο ρομποτικός γεωδαιτικός σταθμός Leica TCA 1800
- GNSS base : ο σταθερός σταθμός του δορυφορικού σταθμού Novatel
- DNA: ο ψηφιακός χωροβάτης Leica DNA03

Δορυφορικό σύστημα

Για τις μετρήσεις με τα δορυφορικά συστήματα υλοποιήθηκαν δύο βάσεις, μία στην οροφή του κτιρίου Λαμπαδαρίου της σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων μηχανικών του ΕΜΠ, όπου χρησιμοποιήθηκε σταθμός του Leica 1200 και μια στην λεωφόρο Κηφισίας κοντά στην γέφυρα όπου χρησιμοποιήθηκε ο σταθμός της Novatel. Οι δυο κινητοί σταθμοί (rover) τοποθετήθηκαν στο κατάστρωμα της γέφυρας με τον δέκτη Leica στην βόρεια παρειά και τον δέκτη της Novatel στην νότια παρειά. Έτσι με αυτόν τον τρόπο συνδυάζοντας τις επιλύσεις των δυο ζευγών μπορούμε να παρακολουθήσουμε το κατάστρωμα της γέφυρας ως σώμα και όχι ως σημείο, έχουμε δηλαδή την δυνατότητα να παρακολουθήσουμε και τις τυχόν εγκάρσιες στροφές που μπορεί να προκύψουν από την φόρτιση και όχι μόνο την σχετική διαφορά υψομετρική θέσης.

Τα δυο σταθερά σημεία (base) του δορυφορικού συστήματος εγκαταστάθηκαν το μεν Leica σε βάθρο (Λαμπαδάριο) και το Novatel σε βιομηχανικό τρίποδα. Όσον αφορά τα δυο rover δημιουργήθηκε μια αυτοσχέδια κατασκευή από κοίλα δοκό ύψους δύο μέτρων ώστε να μην εμποδίζουν οι υαλοπίνακες της γέφυρας με ενσωματωμένο σπείρωμα στη στέψη του για να προσαρμόζουν οι κεραίες του συστήματος.



εικόνα 5.11 σταθερό σημείο Novatel



εικόνα 5.12 - κινητός δέκτης στην βόρεια παρειά

Γεωδαιτικός σταθμός

Ο γεωδαιτικός σταθμός Leica TCA-1800 εγκαταστάθηκε στην νησίδα της λεωφόρου Κηφισίας, συνδεδεμένος με φορητό υπολογιστή, σε σημείο όπου στοχεύει στην νότια παρειά της γέφυρας και σε απόσταση 30μ περίπου. Το πρίσμα που παρακολουθεί ο γεωδαιτικός σταθμός (round prism της Leica) τοποθετήθηκε στην νότια παρειά της γέφυρας πακτωμένος με μαγνητική βάση.



εικόνα 5.13 – θέση πρίσματος



εικόνα 5.14 - γεωδαιτικός σταθμός RTS

Αδρανειακή μονάδα

Η αδρανειακή μονάδα IMU εγκαταστάθηκε στην νότια παρειά του καταστρώματος της γέφυρας στο ίδιο σημείο όπου παρακολουθεί ο rover της Novatel. Θεωρούμε ότι rover Novatel, αδρανειακή μονάδα, και πρίσμα παρακολουθούν το ίδιο σημείο (κέντρο-νότια παρειά) της γέφυρας.



εικόνα 5.15- θέση αδρανειακής μονάδας

5.2 Επίλυση – Υπολογισμοί Γεωμετρικής Χωροστάθμησης

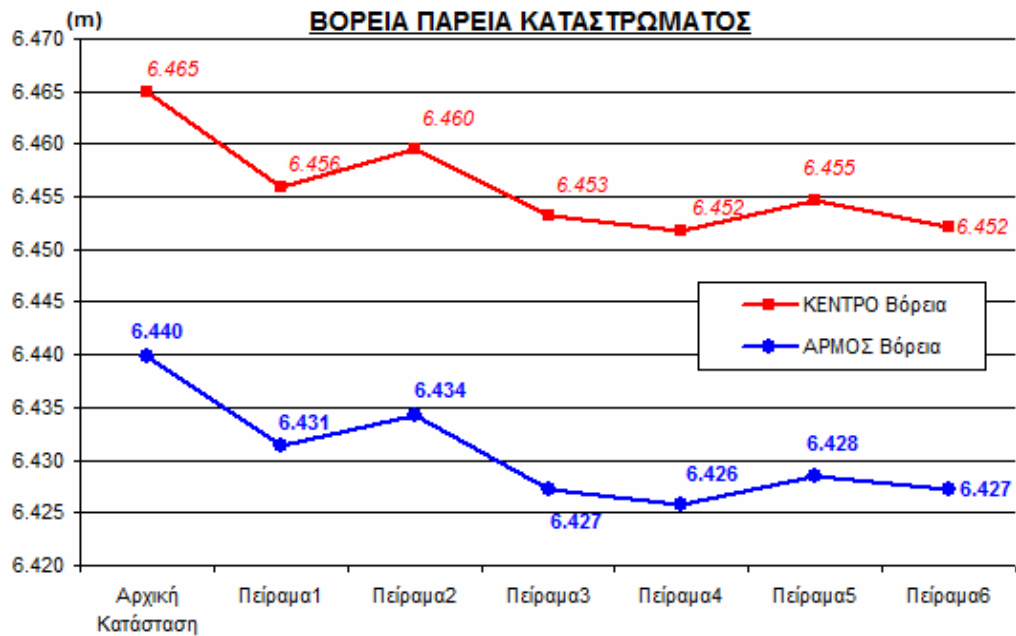
Σε κάθε πείραμα, εκτός του τελευταίου όπου ήταν τεχνικώς αδύνατον, πραγματοποιούνταν χωροστάθμηση σε δυο διατομές. Η πρώτη διατομή ήταν το κέντρο του καταστρώματος της γέφυρας και η δεύτερη ο αρμός της. Κάθε διατομή ήταν διπλή, δηλαδή σε κάθε μια γινόταν ανάγνωση σε δύο σημεία ένα στην βόρεια παρειά και ένα στην νότια.

Επιλύοντας την χωροστάθμηση και δίνοντας τιμή στην υψομετρική μας αφετηρία $H_{\text{refer}}=8.00\text{m}$ προκύπτει ο παρακάτω πίνακας (πιν. 4.12) στον οποίο παρατηρούμε τα υψόμετρα των σημείων για κάθε διατομή (κέντρο γέφυρας και αρμός γέφυρας).

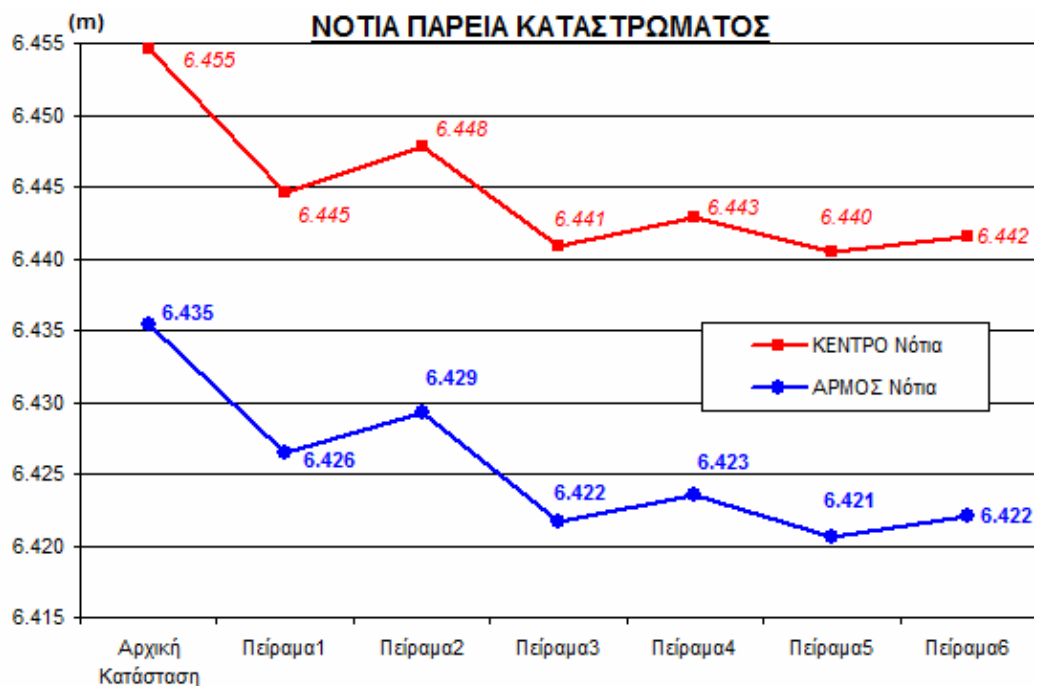
πίνακας 5.2 – αποτελέσματα χωροστάθμησης

	ΚΕΝΤΡΟ (m)		ΑΡΜΟΣ (m)	
	ΝΟΤΙΑ (Αθήνα)	ΒΟΡΕΙΑ (Κηφισιά)	ΝΟΤΙΑ (Αθήνα)	ΒΟΡΕΙΑ (Κηφισιά)
Αρχική Κατάσταση	6.4556	6.4653	6.4357	6.4402
Πείραμα1	6.4446	6.4559	6.4264	6.4314
Πείραμα2	6.4478	6.4596	6.4292	6.4343
Πείραμα3	6.4408	6.4532	6.4216	6.4273
Πείραμα4	6.4429	6.4518	6.4235	6.4257
Πείραμα5	6.4404	6.4546	6.4206	6.4284
Πείραμα6	6.4416	6.4522	6.4221	6.4273

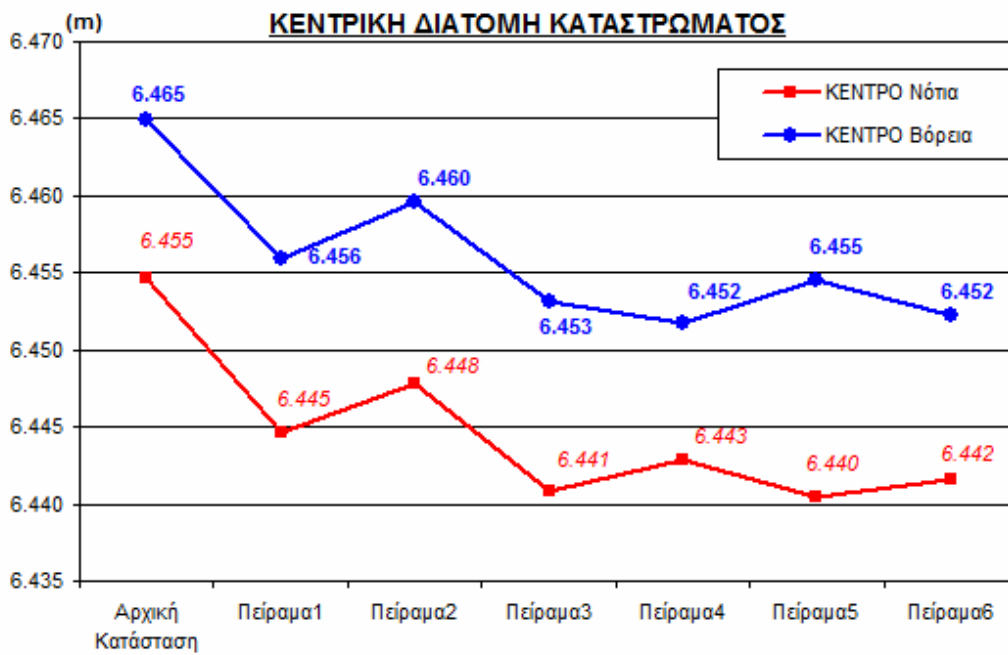
Αν τώρα αναπαραστήσουμε τα αποτελέσματα της χωροστάθμησης προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα (σχήμα 5.16 ~ 5.20).



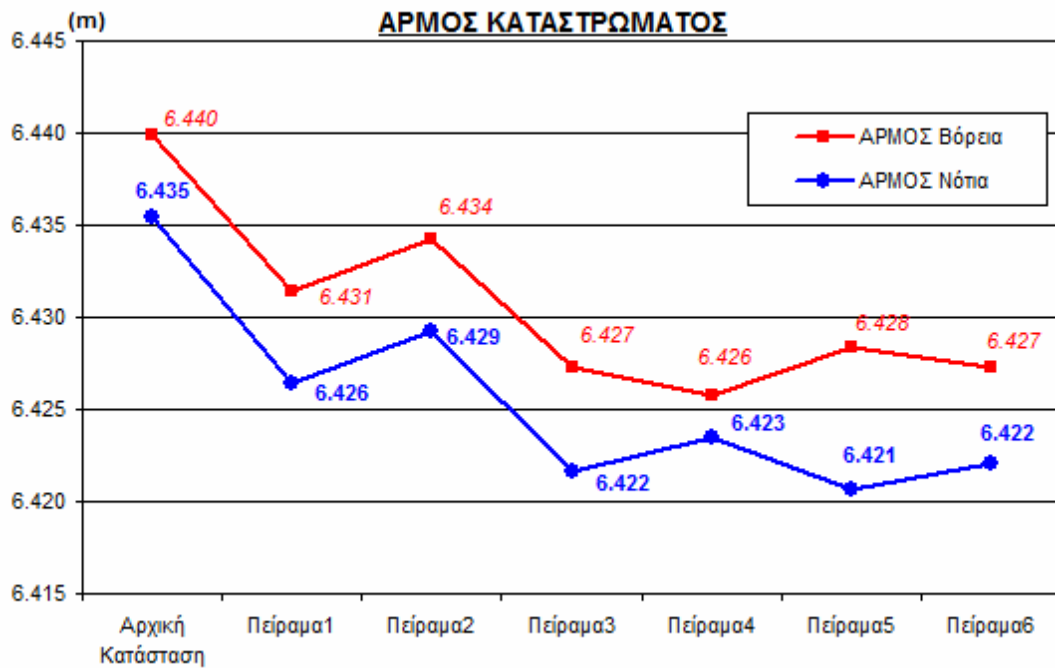
εικόνα 5.16 – υψόμετρα βόρειας παρειάς καταστρώματος



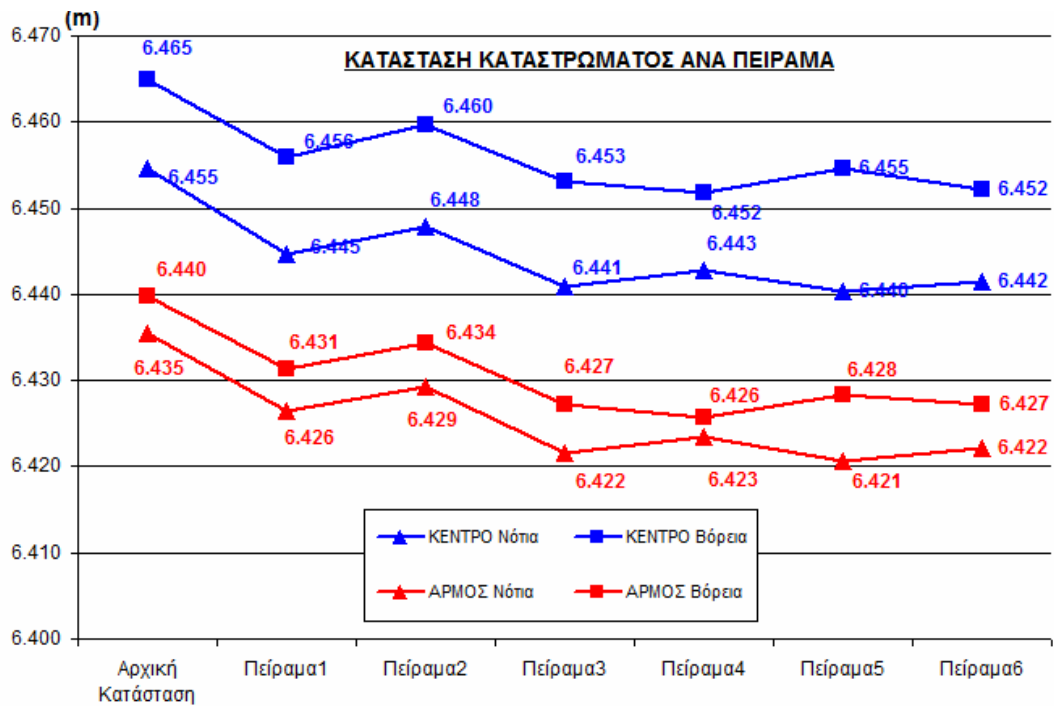
εικόνα 5.17 – υψόμετρα νότιας παρειάς καταστρώματος



εικόνα 5.18 – υψόμετρα κεντρικής διατομής καταστρώματος



εικόνα 5.19 – υψόμετρα αρμού καταστρώματος



εικόνα 5.20 – υψόμετρα καταστρώματος ανά πείραμα

Παρατηρούμε ότι η σχηματική αναπαράσταση σχετίζεται με τα γεγονότα των πειραμάτων με χαρακτηριστικό παράδειγμα την αλλαγή της υψομετρικής κατάστασης της γέφυρας από το πείραμα 3 στο πείραμα 4 και 5 όπου διακρίνεται η μεταβολή της βόρειας παρειάς σε σχέση με την νότια όπως ακριβώς είχε τοποθετηθεί το φορτίο.

Παρατηρούμε δηλαδή ότι από την κατάσταση της γέφυρας στο πείραμα 3 όπου το πλήθος ήταν κατανεμημένο σε όλο το κατάστρωμα, στο πείραμα 4 το φορτίο τοποθετείται στην βόρεια παρειά και αντιστοίχως αυξάνεται το υψόμετρο της και μειώνεται της νότιας. Ομοίως και αντιστοίχως έπειτα στο πείραμα 4.

Παρατηρείται μέγιστη διαδοχική υψομετρική διαφορά από την κατάσταση του πειράματος 2 στην κατάσταση του πειράματος 3 με μέγιστη τιμή 7.50 mm, η οποία είναι και μέγιστη υψομετρική διαφορά της ίδιας θέσης που κατέγραψε ο χωροβάτης.

5.3 Επίλυση – Υπολογισμοί Ρομποτικού Γεωδαιτικού Σταθμού

Από τις 10:51:45 πμ έως και τις 12:28:45 μμ της ημέρας των πειραμάτων είχε τεθεί σε λειτουργία ο γεωδαιτικός σταθμός Leica TCA-1800 ο οποίος κατέγραφε την μεταβολή της νότιας παρειάς της γέφυρας περίπου στο κέντρο του καταστρώματος με συχνότητα μη σταθερή αλλά περίπου στα 5Hz.

Ένα πρόβλημα που έπρεπε να αντιμετωπισθεί ήταν η καταγραφή χρόνου από τον γεωδαιτικό σταθμό. Το λογισμικό μας εξήγαγε αρχείο με την παρακάτω μορφή :

1	977.455	1019.690	105.316	226.184
2	977.454	1019.690	105.316	226.354
3	977.456	1019.670	105.316	226.526

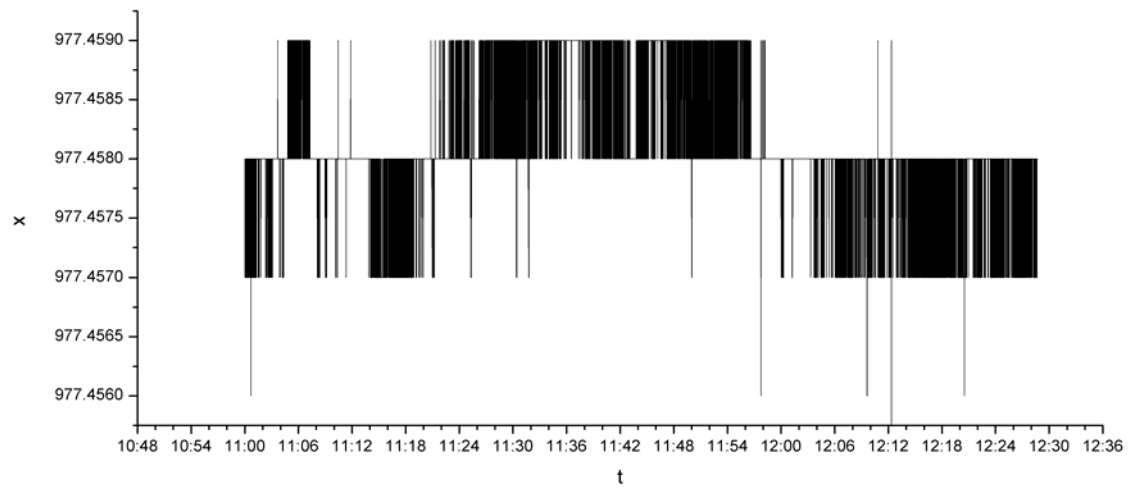
όπου στην πρώτη στήλη είναι ο αύξων αριθμός κάθε σημείου καταγραφής στην δεύτερη στήλη η τετμημένη x, στην δεύτερη στήλη η τεταγμένη y, στην τρίτη στήλη η τιμή του υψομέτρου και στην τέταρτη η καταγραφή του χρόνου σε μορφή όπως φαίνεται παραπάνω η οποία προκύπτει από το εσωτερικό ρολόι του σταθμού.

Όπως έχει αναφερθεί χρησιμοποιήθηκε ψηφιακή κάμερα με την οποία καταγράψαμε το ρολόι κάθε οργάνου και στην συνέχεια έγινε συσχέτιση όλων σε κοινή αναφορά. Σε όλα τα όργανα και λογισμικά ήταν εύκολο διότι είχαμε ώρα GMT ή ώρα GPS, σε αντίθεση με το RTS όπου είχαμε την παραπάνω μορφή. Αυτό αντιμετωπίστηκε ως εξής: την χρονική στιγμή 10:51:45πμ ώρα GMT ο σταθμός κατέγραψε ώρα 226.184sec (η ώρα 10:51:45πμ της 11/11/2011 GMT είναι 471104.60 ώρα GPS). Η ώρα 10:51:45πμ είναι σε δεκαδική μορφή 10.8625.

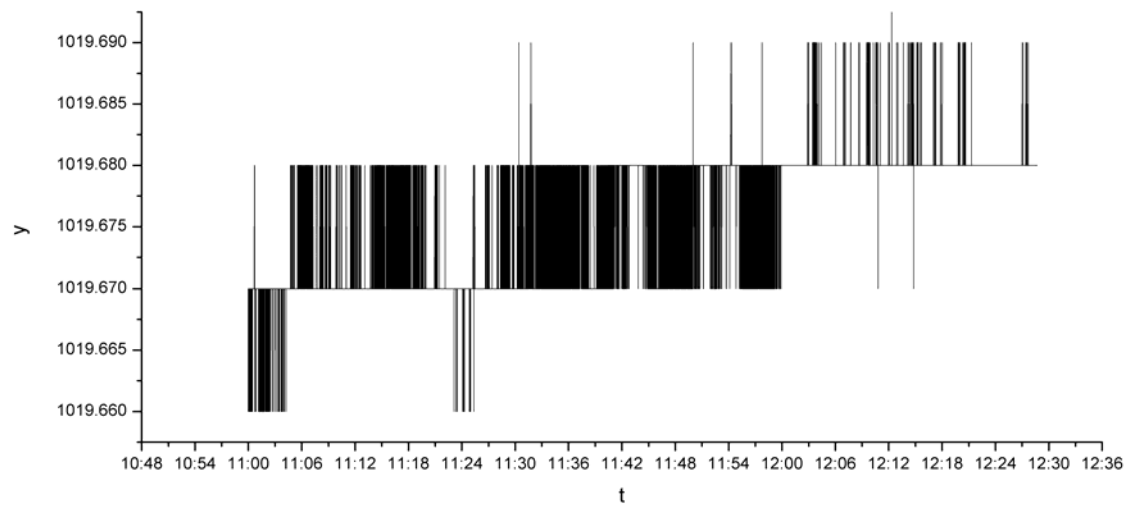
Από κάθε καταγραφή του RTS είναι πολύ εύκολο να υπολογίσουμε το Δt πχ για τα πρώτα δύο σημεία είναι 0.17 ή $0.17/3600 = 0.0000472222$ ” οπότε προσθέτοντας τώρα αυτήν την τιμή στην δεκαδική μορφή ώρας της πρώτης καταγραφής έχουμε την ώρα της δεύτερης καταγραφής σε δεκαδική μορφή, δηλαδή:

$$t_2=10.8625 + 0.0000472222 = 10.862547222222.$$

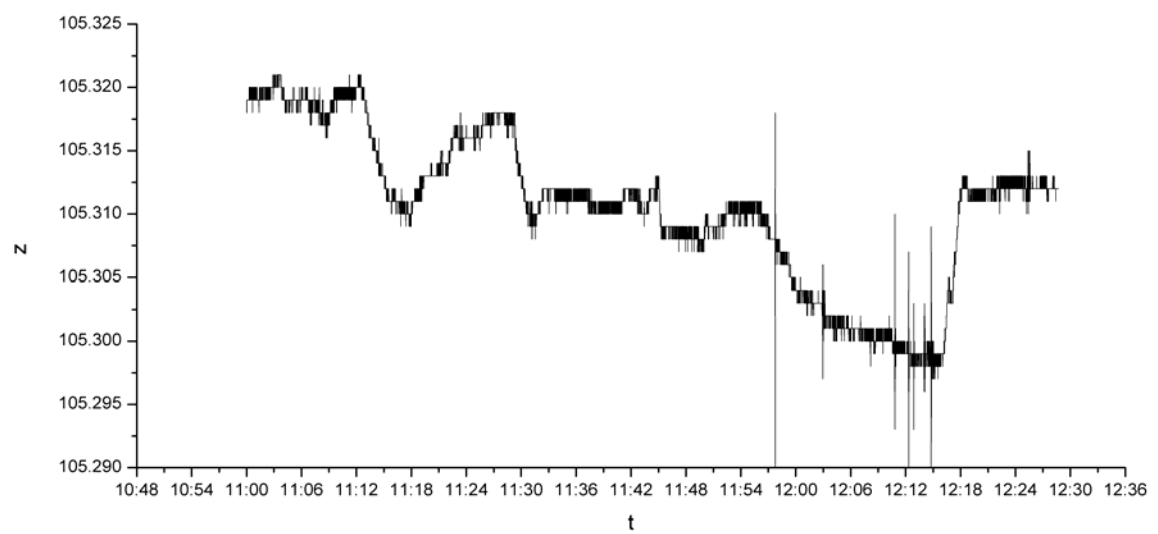
Με αυτόν τον τρόπο έχουμε τελικά σε όλες τις καταγραφές την ένδειξη ώρας σε δεκαδική μορφή. Για να είναι όμως πιο εύκολα επεξεργάσιμα τα αποτελέσματα έπρεπε να γίνει μετατροπή της ώρας σε εξηκονταδική μορφή, όπου αυτό πραγματοποιήθηκε με την συνάρτηση time. Για την επεξεργασία των δεδομένων του RTS χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Origin με το οποίο μπορούμε να αναπαραστήσουμε τις μετατοπίσεις του σημείου που παρακολουθούσε ο σταθμός ανά x,y,z σε σχέση με τον χρόνο (εικόνα 5.21 έως 5.23). Να σημειωθεί εδώ ότι ο άξονας y είναι ο άξονας (περίπου) κάθετος στον άξονα της Κηφισίας, άξονας x ο κάθετος στον y και (περίπου) παράλληλος με τον άξονα της λεωφόρου και άξονας z η κατακόρυφος.



εικόνα 5.21 – Μετακινήσεις στον άξονα x

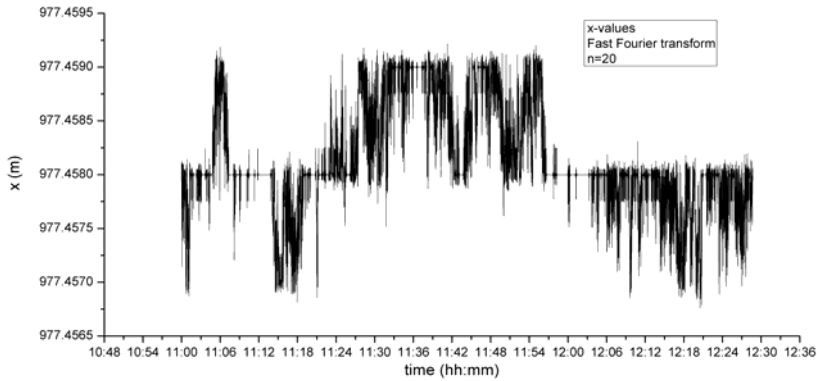


εικόνα 5.22 – Μετακινήσεις στον άξονα y

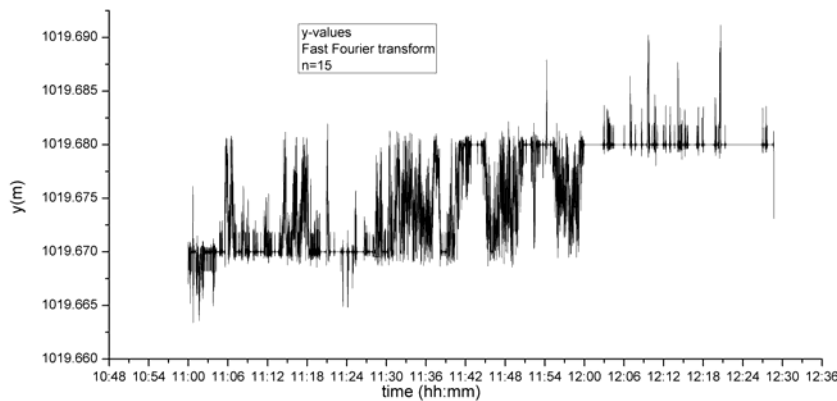


εικόνα 5.23 – Μετακινήσεις στον άξονα z

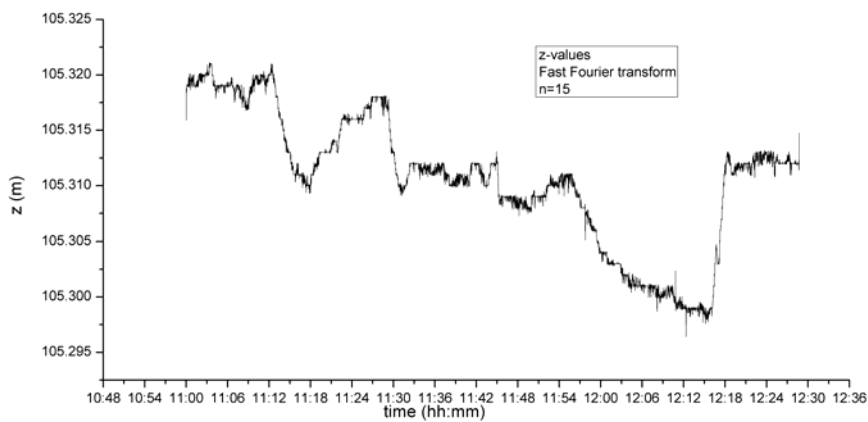
Ένα μειονέκτημα του μετασχηματισμού Fourier, που αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, είναι ότι κύρια απαίτησή του είναι τα διακριτά σημεία της χρονοσειράς πρέπει να είναι χρονικά ισαπέχοντα. Τα δεδομένα μας δεν είναι θεωρητικά ισαπέχοντα χρονικά αλλά η μεταβολή της συχνότητας καταγραφής είναι τόσο μικρή που μας επιτρέπει να χρησιμοποιήσουμε τον αλγόριθμο. Έτσι εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα:



*εικόνα5.24- FFT
στις τιμές x,
n=20*



*εικόνα5.25- FFT
στις τιμές y,
n=15*



*εικόνα5.26- FFT
στις τιμές z,
n=15*

Σε αυτήν την μορφή των διαγραμμάτων είναι πιο εύκολο να βγουν συμπεράσματα παρατηρώντας τα, ενώ στην αρχική τους μορφή (ειδικά οι τιμές x και y) ήταν πρακτικά ανέφικτο.

- **τιμές x**

Εξετάζοντας τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι η μέγιστη μεταβολή στον άξονα x που έχει καταγράψει το RTS είναι της τάξεως των 2mm με ελάχιστες μεμονωμένες τιμές τάξεως 4mm. Οι μεταβολές που καταγράψαμε σε αυτόν τον άξονα είναι τόσο μικρές ώστε θεωρούνται εντός θορύβου και μη αξιοποιήσιμες. Κάποια στατιστικά στοιχεία του συγκεκριμένου σετ είναι:

- μέση τιμή, Mean = 977.45814m
- τυπική απόκλιση, St. dev. = $5.62421 * 10^{-4}$
- Ελάχιστη τιμή, Min = 977.455m - Μέγιστη τιμή, Max = 977.459m

- **τιμές y**

Εξετάζοντας τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι η μέγιστη μεταβολή στον άξονα y που έχει καταγράψει το RTS είναι της τάξεως των 4cm. Παρατηρείται ότι από την έναρξη της καταγραφής μέχρι το πέρας των πειραμάτων η τιμή y έχει μια τάση να αυξάνεται. Να σημειωθεί εδώ ότι οι τιμές αυξάνονται προς Χαλάνδρι και μειώνονται προς Φιλοθέη. Ένα άλλο στοιχείο που παρουσιάζει ενδιαφέρον είναι ότι πριν την χρονική στιγμή $t_3=11:13:38\mu\mu$ όπου η γέφυρα ήταν άδεια είχαμε μία μέση τιμή ηρεμίας $Y_1=1019.67m$, ενώ μετά την χρονική στιγμή $t_{22}=12:21:38\mu\mu$ έχουμε μέση τιμή ηρεμίας $Y_2=1019.68m$, διαφορά δηλαδή 1cm.

Κάποια στατιστικά στοιχεία του συγκεκριμένου σετ είναι:

- μέση τιμή, Mean = 1019.68m
- τυπική απόκλιση, St. dev. = 0.00517
- Ελάχιστη τιμή, Min = 1019.66m - Μέγιστη τιμή, Max = 1019.70m

- **τιμές z**

Οι μεταβολές των τιμών των υψομέτρων παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον μιας και αναμένεται να είναι στην γραφική αναπαράστασή τους άμεσα συσχετιζόμενες με τα πειράματα. Εξετάζοντας τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι η μέγιστη μεταβολή στον άξονα z που έχει καταγράψει το RTS είναι $\Delta z = 0.038m$.

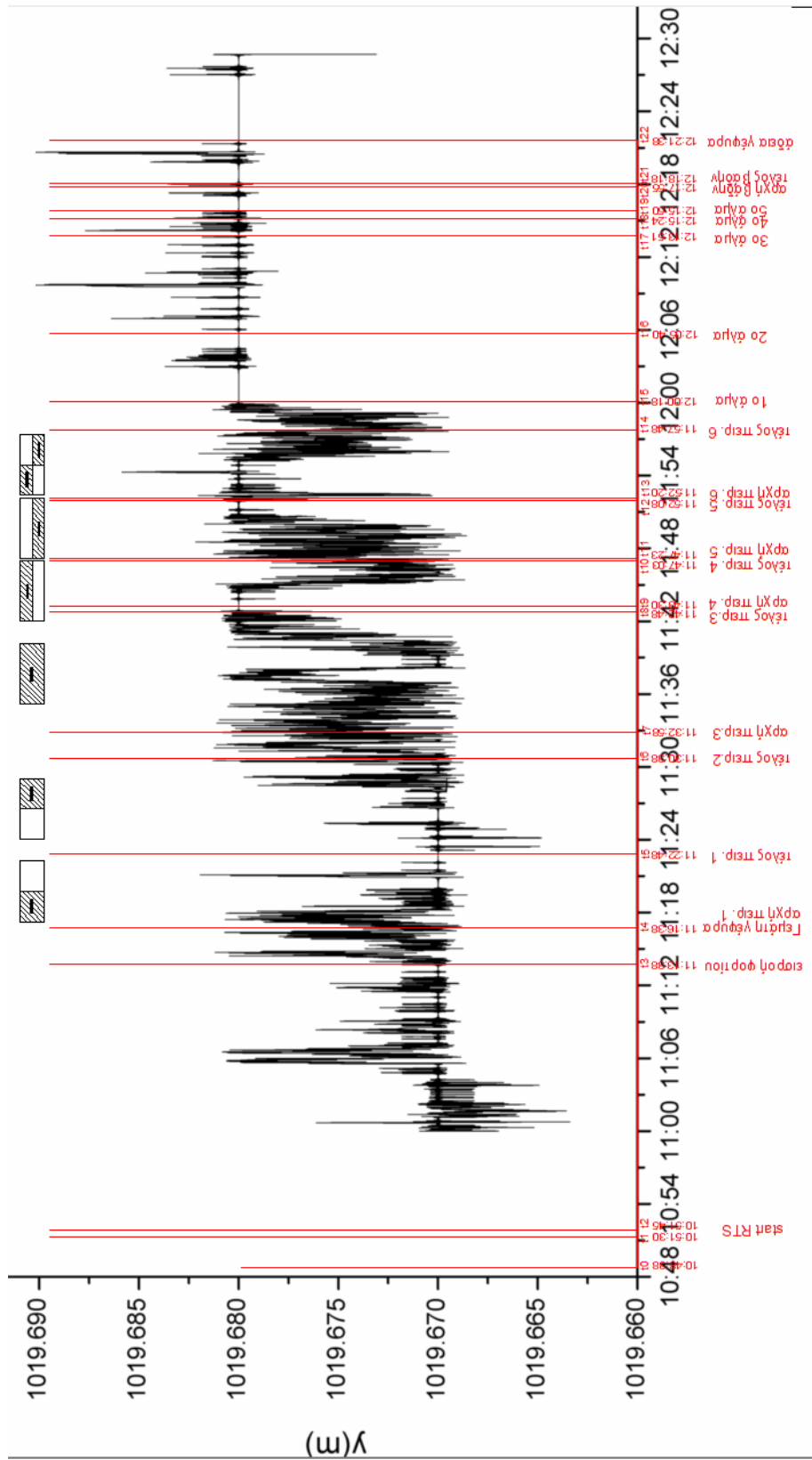
- Παρατηρείται ότι από την έναρξη της καταγραφής μέχρι το πέρας των πειραμάτων η τιμή z έχει μια τάση να μειώνεται.

- Ομοίως όπως και στις τιμές y πριν την χρονική στιγμή $t_3=11:13:38\mu\text{s}$ όπου η γέφυρα ήταν άδεια είχαμε μία μέση τιμή ηρεμίας $Z_1=105.319\text{m}$, ενώ μετά την χρονική στιγμή $t_{22}=12:21:38\mu\text{s}$ έχουμε μέση τιμή ηρεμίας $Z_2=105.312\text{m}$, διαφορά δηλαδή $\Delta Z = 7 \text{ mm}$.
- Την χρονική στιγμή $t_3=11:13:38\mu\text{s}$ το φορτίο παίρνει θέση στο κατάστρωμα της γέφυρας και παρατηρούμε σημαντική μείωση στην υψομετρική της θέση της τάξεως $\Delta H=1\text{cm}$.
- Την χρονική στιγμή t_4 όπου σταθεροποιήθηκε το φορτίο η γέφυρα ανυψώνεται κατά 6mm περίπου, έπειτα με την μετακίνησή του και κατανομή του προς όλο το κατάστρωμα της γέφυρας από την χρονική στιγμή $11:30\mu\text{s}$ το υψόμετρο μειώνεται σταδιακά.
- Χαρακτηριστικό παράδειγμα της συσχέτισης της συμπεριφοράς του φορτίου στην γέφυρα και της υψομετρικής της κατάστασης είναι μεταξύ των χρονικών στιγμών $t_7=11:32:58\mu\text{s}$ και $t_8=11:42:48\mu\text{s}$ όπου το φορτίο ήταν κατανεμημένο σε όλο το κατάστρωμα και θεωρητικά ακίνητο διότι βρισκόταν σε εξέλιξη χωροστάθμηση και αντιστοίχως παρατηρούμε στο διάγραμμα ότι η τιμή z παραμένει σχετικά σταθερή.
- Επίσης μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει το διάγραμμα μετά την χρονική στιγμή $t_{14}=11:57:48\mu\text{s}$ όπου αρχίζουν τα στατικά άλματα του φορτίου και παρατηρούμε σημαντική σταδιακή μείωση της υψομετρικής θέσης της γέφυρας.
- Αμέσως μετά το πέρας των αλμάτων και συγχρόνως με την απομάκρυνση του φορτίου παρατηρούμε ότι η γέφυρα ανυψώνεται σταδιακά και τελικώς σταθεροποιείται σε υψόμετρο ηρεμίας $Z_2=105.312\text{m}$.

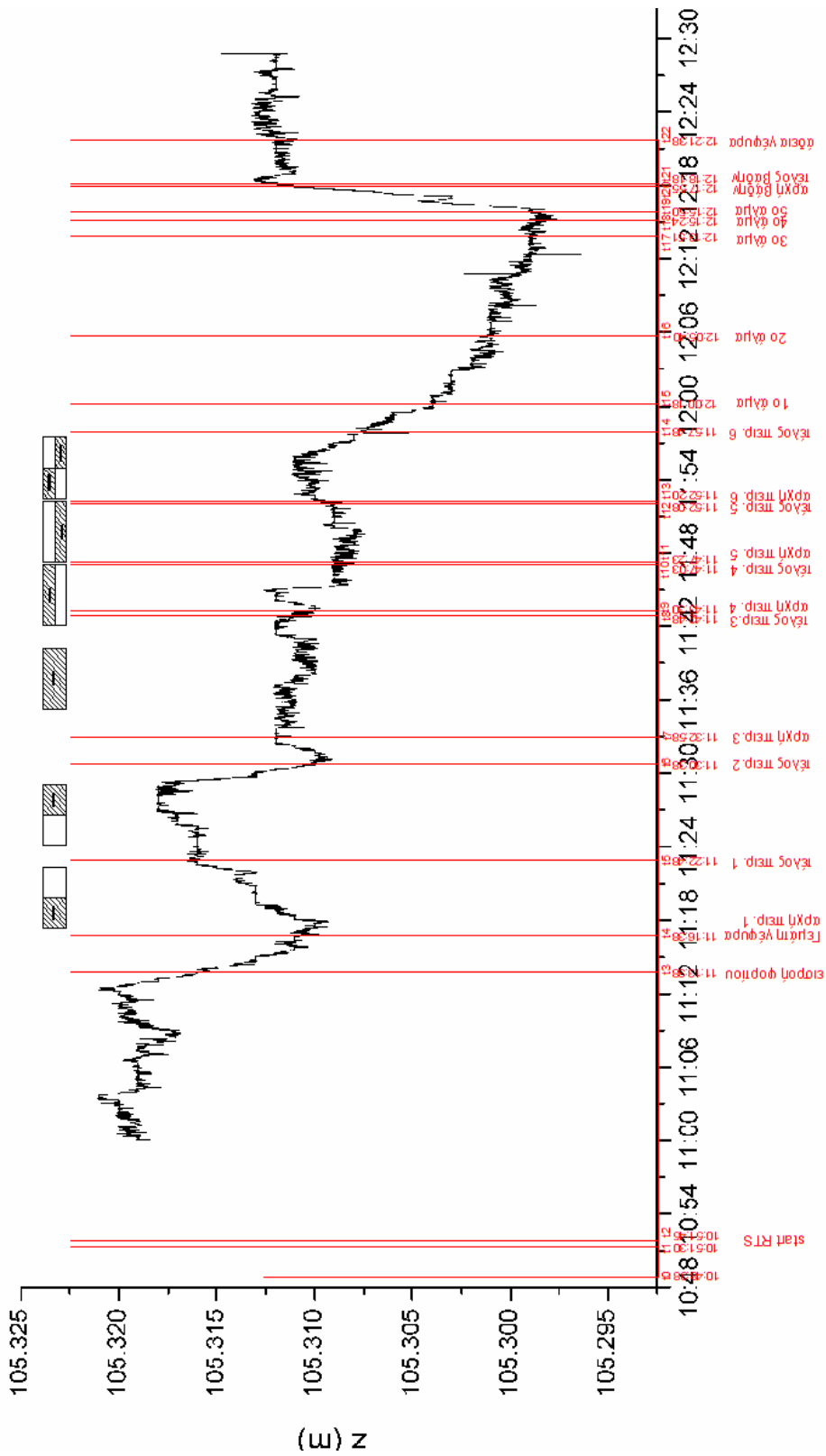
Κάποια στατιστικά στοιχεία του συγκεκριμένου σετ είναι:

- μέση τιμή, Mean = 105.3106m
- τυπική απόκλιση, St. dev. = 0.00599
- Ελάχιστη τιμή, Min = 105.28m - Μέγιστη τιμή, Max = 105.32m

Για ευκολότερη κατανόηση των διαγραμμάτων y και z ενδιαφέρον παρουσιάζει αν παραστήσουμε τις χρονικές στιγμές των πειραμάτων (εικόνα 5.27 - 5.28).



εικόνα 5.27- Αξονικές μετακινήσεις άξονα y με χρονικές στιγμές



εικόνα 5.28- Κατακόρυφες μετακινήσεις στο μέσο της νότιας παρειάς του καταστρώματος

5.4 Επίλυση – Υπολογισμοί Μετακινήσεων GPS και GPS/INS

5.4.1 Γενικά

Όπως έχουμε αναφέρει σε προγενέστερο κεφάλαιο χρησιμοποιήθηκαν δυο ζεύγη δορυφορικών συστημάτων:

- Δορυφορικό σύστημα Leica 1200+
- Ολοκληρωμένο αδρανειακό και δορυφορικό σύστημα Novatel

Όσον αφορά την διάταξη του εξοπλισμού, στόχος ήταν να χρησιμοποιηθούν μικρές βάσεις (μικρότερες από 1km) για ποιοτικότερα αποτελέσματα, διδόμενου ότι οι δυο δέκτες σε αυτήν την περίπτωση βρίσκονται σε ίδιες ατμοσφαιρικές και καιρικές συνθήκες. Στο δορυφορικό σύστημα Leica 1200+ λόγω τεχνικού προβλήματος ο σταθερός δέκτης σταμάτησε την καταγραφή πριν την ολοκλήρωση των πειραμάτων. Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα ζητήθηκαν και δόθηκαν δεδομένα από μόνιμο σταθμό σε σχετικά κοντινή θέση της εταιρίας Metrica. Έτσι, η βάση πλέον του συστήματος ήταν περίπου 5km και σε συνδυασμό της χαμηλής συχνότητας καταγραφής του σταθερού δέκτη της Metrica τα αποτελέσματα προβλέπονται να είναι μειωμένης ποιότητας σε σχέση με το προσδοκώμενο.

Το δορυφορικό σύστημα Leica 1200 τέθηκε σε λειτουργία με καταγραφή στα 20Hz, ενώ τα δεδομένα του σταθμού της Metrica δόθηκαν στο 1Hz, έτσι πραγματοποιήθηκε αναδειγματοληψία (resampling) στα δεδομένα αυτά σε συχνότητες 5Hz για επίλυση με τα Novatel και σε 20Hz για επίλυση με τα Leica.

Πρώτο βήμα ήταν να δημιουργηθούν τα αρχεία που θα χρησιμοποιηθούν για τις επιλύσεις. Έτσι προκύπτουν τα αρχεία βάσης Leica:

- Metrica_base_1.gpb
το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για επιλύσεις με τον Leica rover, και χαρακτηριστικά: data interval = 0.05 sec (20Hz)
time range = 469080.70 start & 477351.65 end
- Metrica_base_2.gpb
το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για επιλύσεις με τα Novatel, και χαρακτηριστικά:
data interval = 0.20sec (5Hz)
time range = 469904.0 start & 477252.20 end

Επίσης, είναι διαθέσιμα τα αρχεία καταγραφής του Novatel σταθερού δέκτη, κινητού δέκτη, αδρανειακού και το αρχείο καταγραφής Leica κινητού δέκτη. Για τις επιλύσεις θα χρησιμοποιηθούν όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί οργάνων και αρχείων για την επίτευξη καλύτερων αποτελεσμάτων. Να σημειωθεί εδώ ότι όλες οι επιλύσεις του δορυφορικού συστήματος πραγματοποιήθηκαν με το λογισμικό Inertial explorer και η στατιστική

επεξεργασία τους με το λογισμικό Origin. Συνολικά θα πραγματοποιηθούν τέσσερις συνδυασμοί μεταξύ των δορυφορικών συστημάτων, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

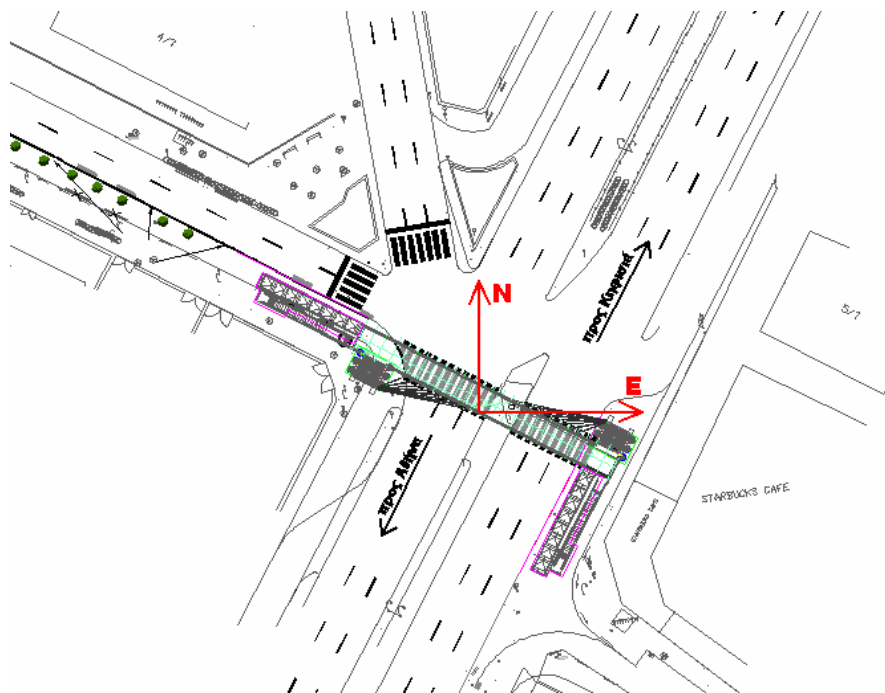
Πίνακας 5.2 – Επιλύσεις υπολογισμού μετακινήσεων κεντρικής διατομής με GPS, GPS/INS

Επίλυση	Rover	Base	Χρονική Διάρκεια
Noth_1	Leica	Leica	10:18:00,75 - 12:35:51,65
North_2	Leica	Novatel	10:31:55,00 – 12:34:10,61
South_1	Novatel / IMAR	Novatel	10:48:18,00 – 11:36:47,00
South_2	Novatel / IMAR	Leica	10:48:18,00 – 11:36:47,00

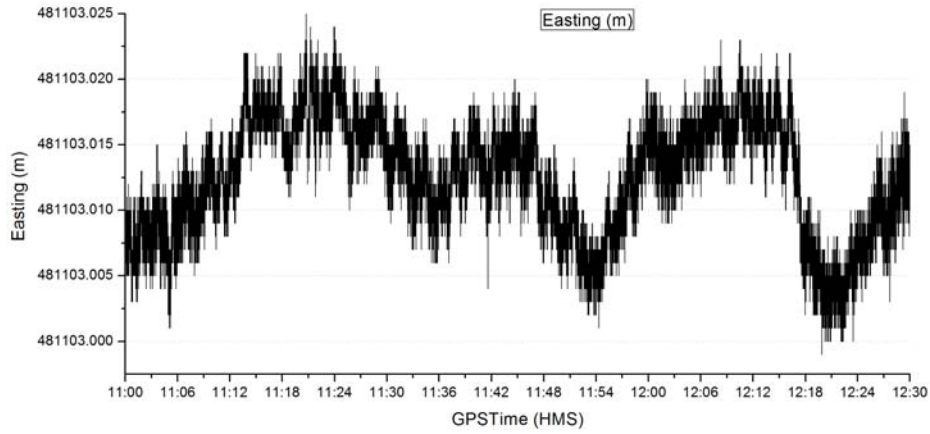
5.4.2 Μετακινήσεις Βόρειας Παρειάς

5.4.2α Επίλυση North_1 (GPS_rover (leica) – GPS_base (leica))

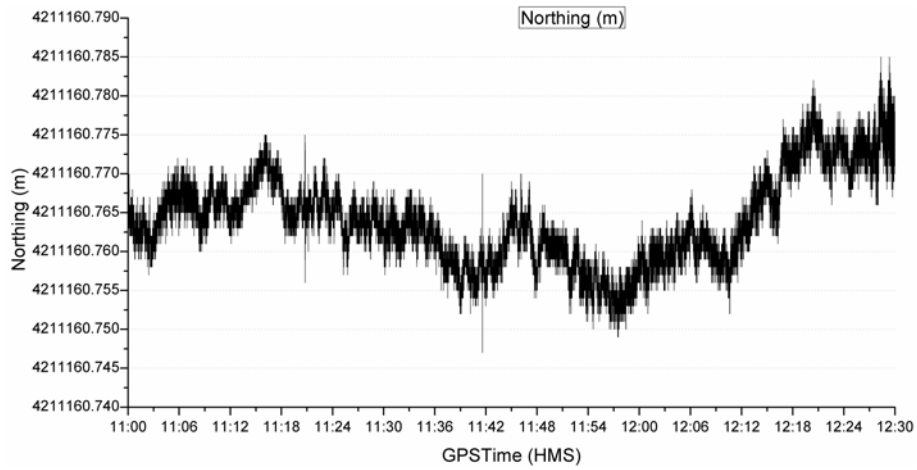
Η πρώτη επίλυση που έλαβε χώρα ήταν η επίλυση “North_1” (project_L_L) με σταθερό δέκτη τον Leica της Metrica (Metrica_base_1) και κινητό δέκτη τον Leica_rover. Χρησιμοποιήθηκε η L1 και η L2 συχνότητα. Πριν παρουσιαστούν τα διαγράμματα μεταβολής θέσης από την συγκεκριμένη επίλυση κρίνεται σκόπιμο να ορίσουμε το σύστημα αναφοράς στο οποίο αναφέρονται τα αποτελέσματα. Στην παρακάτω εικόνα (5.29) ορίζονται οι άξονες του προβολικού συστήματος αναφοράς.



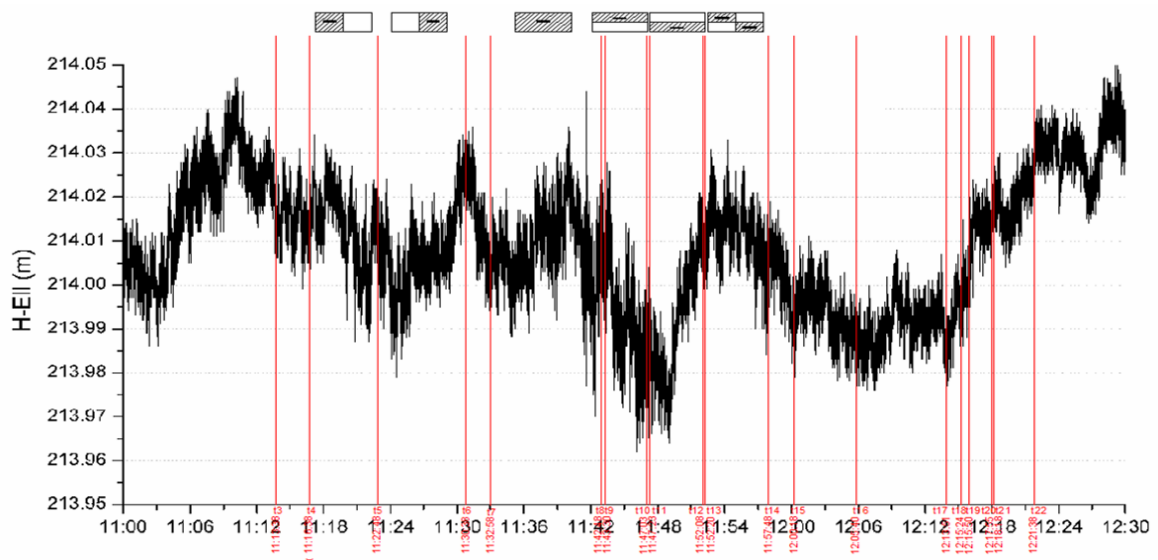
εικόνα 5.29 - Σύστημα αναφοράς GPS



εικόνα 5.30- Φαινόμενη αξονική μετακίνηση (easting) βόρειας παρειάς κεντρικής διατομής



εικόνα 5.31- Φαινόμενη αξονική μετακίνηση (northing) βόρειας παρειάς κεντρικής διατομής

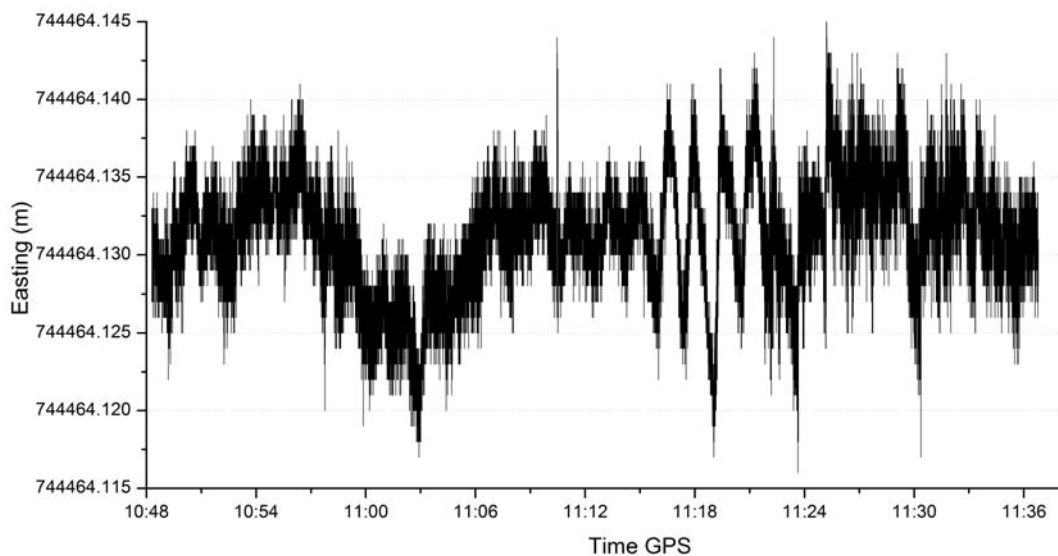


εικόνα 5.32- Φαινόμενες κατακόρυφες μετακινήσεις κεντρικής διατομής βόρειας παρειάς (επίλυση North_1) με χρονικές στιγμές πειραμάτων

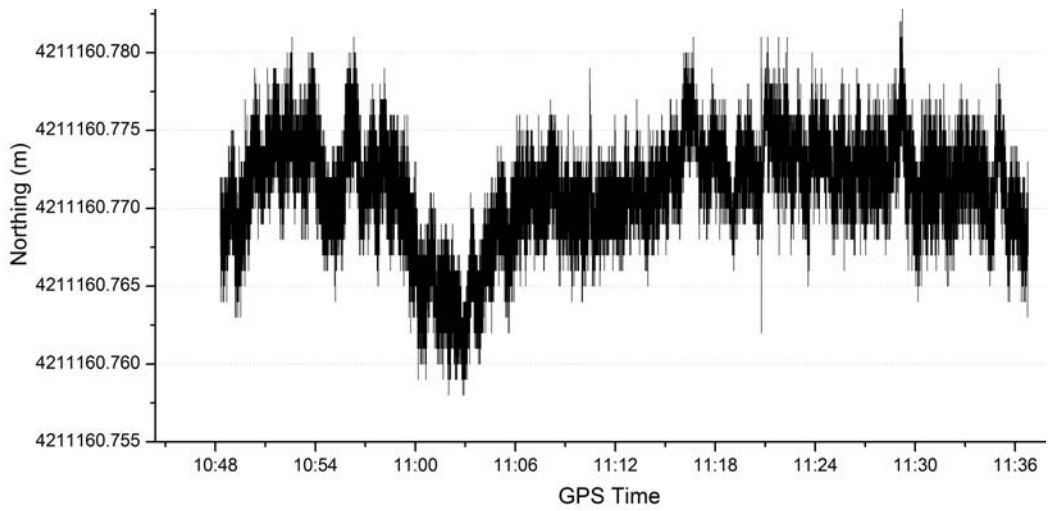
Το σενάριο μειωμένης ποιότητας αποτελεσμάτων επαληθεύτηκε μετά την επεξεργασία και επίλυση των δεδομένων. Έτσι παρατηρούμε διαδοχικές μεταβολές στο υψόμετρο μεταξύ πειραμάτων, της τάξεως των 3 ~ 4cm. Είναι προφανές ότι τα παραπάνω διαγράμματα δεν απεικονίζουν τις πραγματικές μετακινήσεις της γέφυρας αλλά τις μεταβολές τις οποίες έχει καταγράψει το GPS. Για λόγους πληρότητας παρουσιάζονται τα εξαγόμενα διαγράμματα αλλά δεν θα αναλυθούν περαιτέρω.

5.4.2β Επίλυση North_2 (GPS_rover (leica) – GPS_base (novatel))

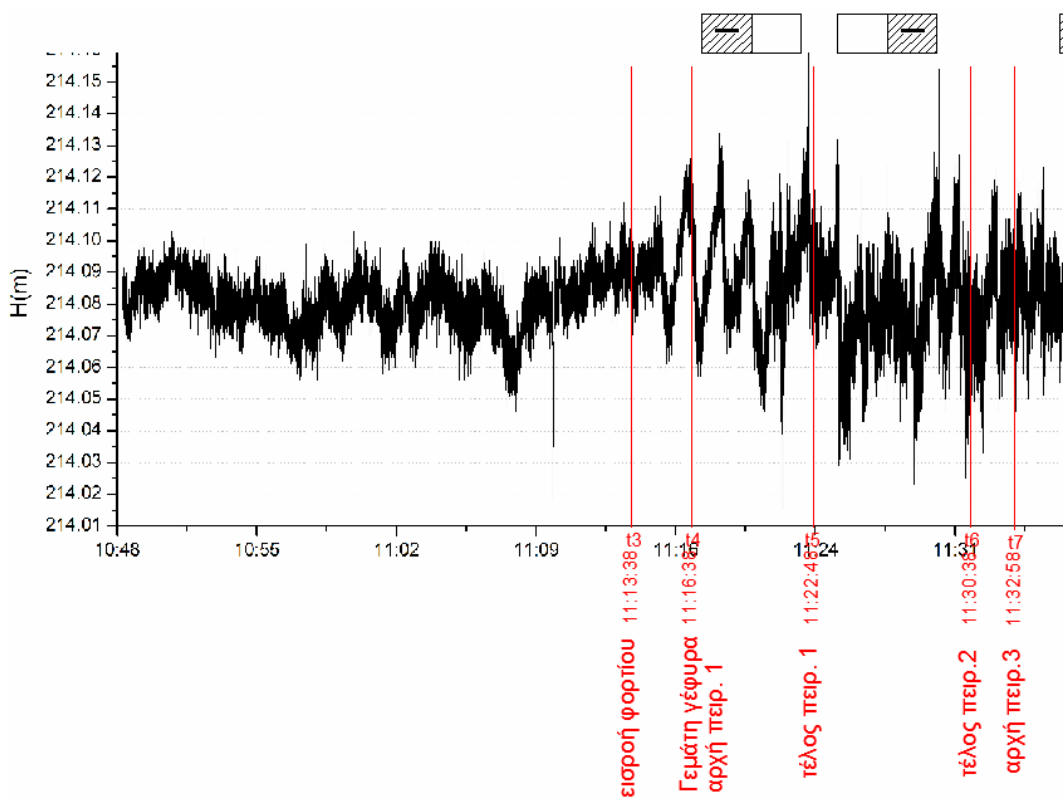
Η δεύτερη επίλυση που έλαβε χώρα ήταν η επίλυση “North_2” με σταθερό δέκτη (base) τον Novatel και κινητό δέκτη (rover) τον Leica. Λόγω κάποιου αδιευκρίνιστου προβλήματος το σταθερός δέκτης Novatel κατέγραψε μέχρι τις 11:36πμ και εξαιτίας αυτού του γεγονότος τα αποτελέσματα κρίνονται μη αξιοποιήσιμα διότι σε αυτό το διάστημα μόλις που καλύπτονται χρονικά τα δυο πρώτα πειράματα. Για λόγους πληρότητας της εργασίας παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της παραπάνω επίλυσης.



εικόνα 5.33– Φαινόμενη αξονική μετακίνηση (easting) βόρειας παρειάς κεντρικής διατομής (επίλυση North_2)



εικόνα 5.34- Φαινόμενη αξονική μετακίνηση (northing) βόρειας παρειάς κεντρικής διατομής (επίλυση North_2)



εικόνα 5.35- Φαινόμενες κατακόρυφες μετακινήσεις κεντρικής διατομής βόρειας παρειάς (επίλυση North_2) με χρονικές στιγμές πειραμάτων

5.4.3 Μετακινήσεις Νότιας Παρειάς

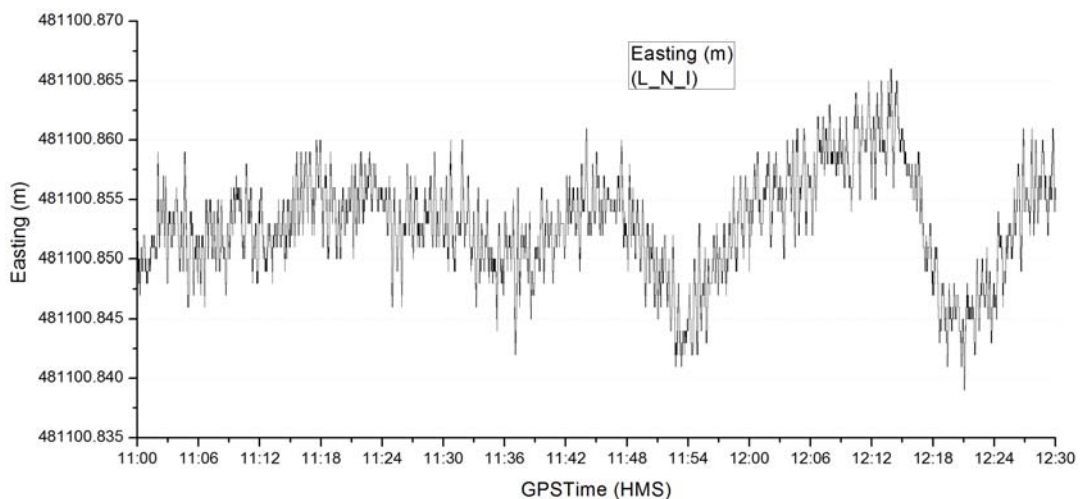
5.4.3α Επίλυση South_1 (GPS_rover (novatel) / INS (IMAR) – GPS_base (leica))

Η τρίτη επίλυση που έλαβε χώρα ήταν η επίλυση “South_1” (project_L_N_I) με σταθερό δέκτη (base) το Metrica_base_2, κινητό δέκτη (rover) το Novatel και την αδρανειακή μονάδα IMAR. Χρησιμοποιήθηκε η L1 και η L2 συχνότητα, επίσης με έναν γεωδαιτικό σταθμό Leica TS02 έγινε μέτρηση των level arms τα οποία είναι:

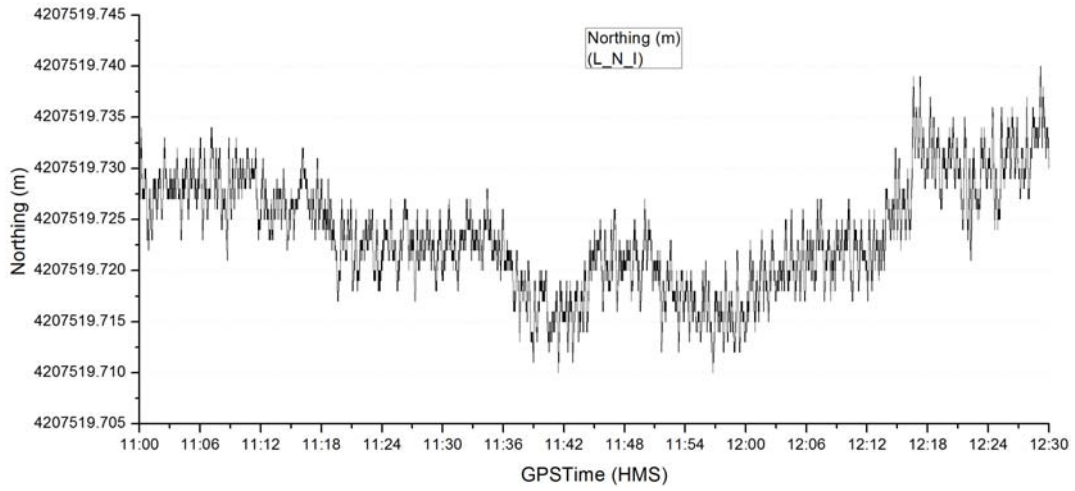
$$\begin{aligned} dx &= -0.0288 \text{ m} \\ dy &= +0.0822 \text{ m} \\ dz &= +2.4259 \text{ m} \end{aligned}$$

εξίσωση 5.1 – level arms αδρανειακής μονάδας

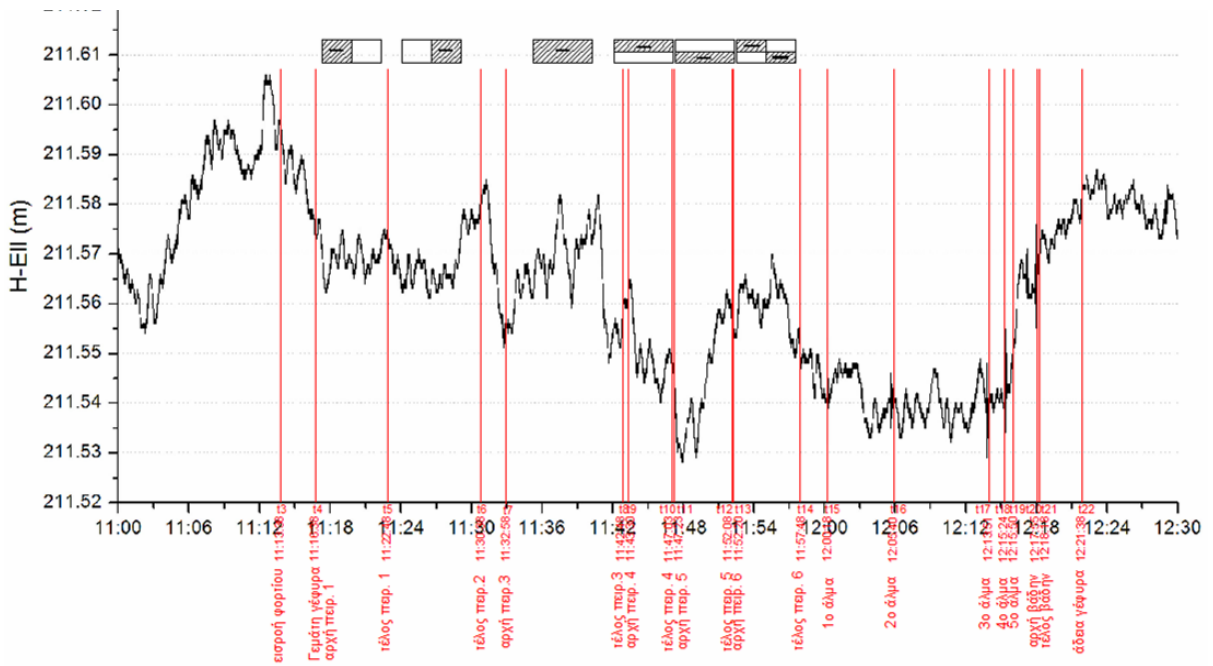
Για την επίλυση του ολοκληρωμένου αδρανειακού και δορυφορικού συστήματος (INS-GPS) χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο (error model) IMAR_FSAS με 0,75deg/hr, σαν βαθμός συνέργιας (level of integration) επιλέχθηκε ο χαλαρής σύζευξης (loosely coupled) και σαν μέθοδος ανάλυσης ο “static coarse alignment only”. Η πρώτη χονδροειδής επίλυση (coarse) πραγματοποιείται τα πρώτα 30 έως 120 sec της λειτουργίας του δορυφορικού – αδρανειακού συστήματος όπου γίνεται συλλογή στατικών δεδομένων και χρησιμοποιούνται για αρχικές τιμές. Έτσι, δεδομένου ότι η αδρανειακή μονάδα ήταν σταθερή τα πρώτα δυο λεπτά λειτουργίας κρίνεται σκόπιμο να επιλεγεί ως μέθοδος ανάλυσης ο “static coarse alignment only”. Η επίλυση του συγκεκριμένου σετ έφερε τα κάτωθι αποτελέσματα:



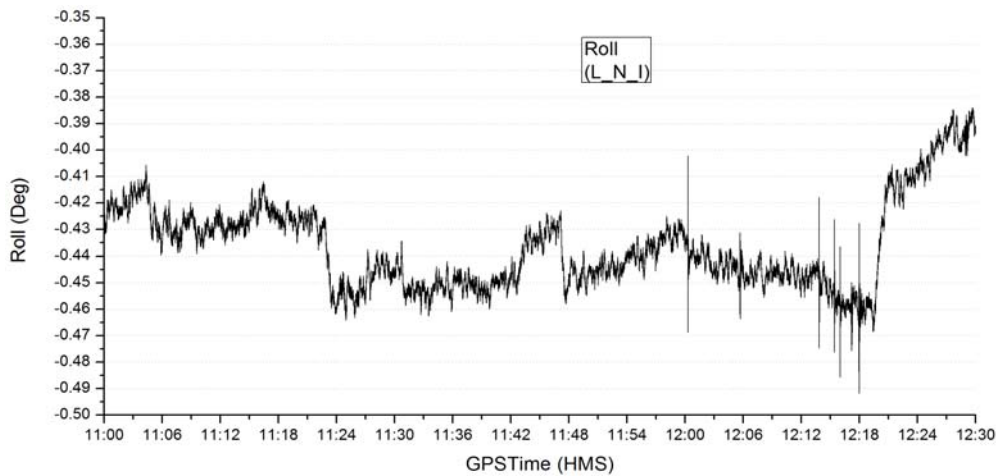
εικόνα 5.36 – Φαινόμενη αξονική μετακίνηση (easting) κεντρικής διατομή νότιας παρειάς (επίλυση South_1)



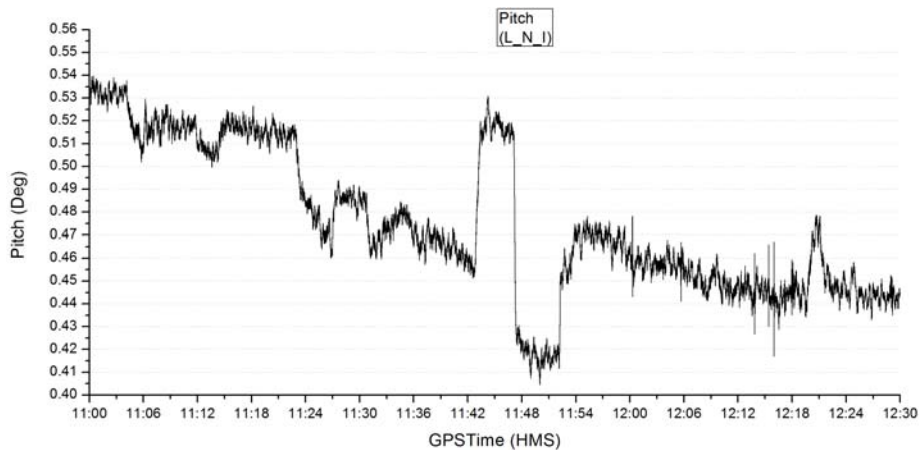
εικόνα 5.37 – Φαινόμενη αξονική μετακίνηση (northing) κεντρικής διατομής νότιας παρειάς (South_1)



εικόνα 5.38 – Φαινόμενες κατακόρυφες μετακινήσεις κεντρικής διατομής νότιας παρειάς (South_1)



εικόνα 5.39 – διατοιχισμός (roll) νότιας παρειάς κεντρικής διατομής (επίλυση South_1)



εικόνα 5.40 – προνευστασμός (pitch) νότιας παρειάς κεντρικής διατομής (επίλυση South_1)

Όπως φαίνεται και στα παραπάνω διαγράμματα τα αποτελέσματα και της συγκεκριμένης επίλυσης δεν κρίνονται ικανοποιητικά, δεδομένου ότι έχει χρησιμοποιηθεί η ίδια βάση και οι φαινόμενες μετακινήσεις κρίνονται μη πραγματικές.

Όσον αφορά την αδρανειακή μονάδα, έχει προκύψει καταγραφή κινηματικής κατάστασης του καταστρώματος η οποία κρίνεται ικανοποιητική. Παρατηρούμε ότι ενώ κατά x (Easting) το σύστημα έχει καταγράψει μέγιστη ταχύτητα $V_E=0.115\text{m/s}$ (περίπου ίδια τιμή σαν μέγιστη και προς τις δυο κατευθύνσεις) κατά y (Northing) έχει καταγράψει $V_N=0.135\text{m/s}$ (περίπου ίδια τιμή σαν μέγιστη και προς τις δυο κατευθύνσεις) κατά Z (up) έχουμε τιμές:

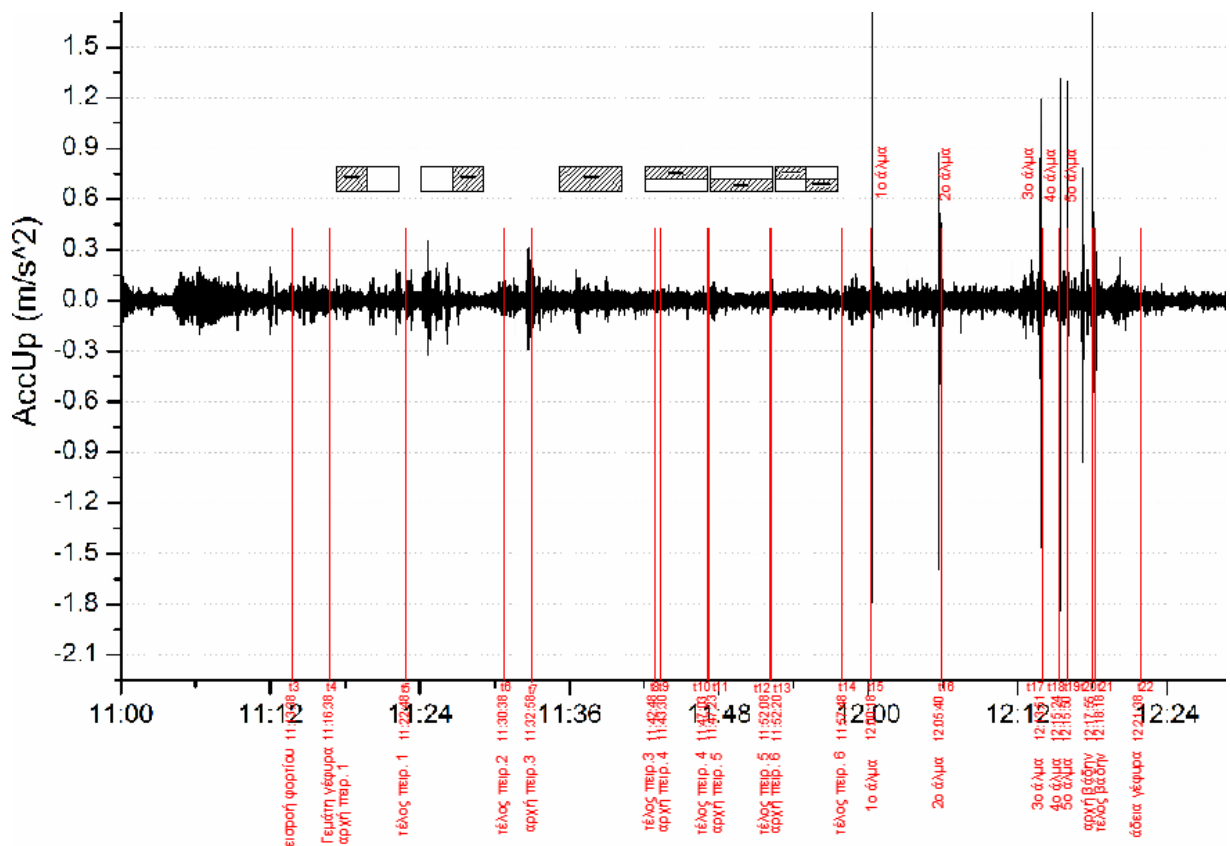
για καθίζηση της γέφυρας $V_{up} = -0.16\text{m/s}$,

για ανύψωση της γέφυρας $V_{up} = +0.15\text{m/s}$, και για επιτάχυνση ανά άξονες:

Πίνακας 5.3 – Επιταχύνσεις ανά άξονα

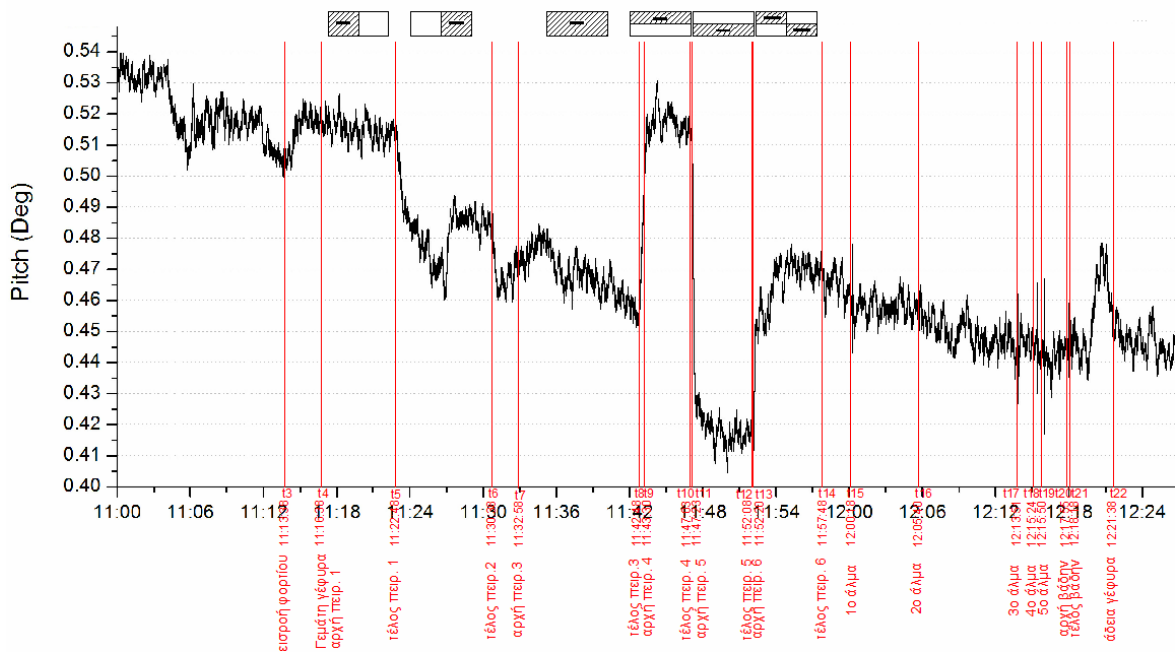
	Min (m/s ²)	Max (m/s ²)
Acc-East	-0.394	0.328
Acc-North	-0.474	0.397
Acc-Up	-2.247	2.077

Ενδιαφέρον παρουσιάζει το παρακάτω διάγραμμα (εικόνα 5.41) όπου αναπαρίστανται οι επιταχύνσεις του κατακόρυφου άξονα της νότιας παρειάς του κεντρικού άξονα, στο οποίο διακρίνονται οι μέγιστες τιμές τις χρονικές στιγμές όπου το πλήθος πραγματοποιούσε επιτόπια άλματα.



εικόνα 5.41 – επιταχύνσεις του κατακόρυφου άξονα νότιας παρειάς κεντρικής διατομής (επίλυση South_1)

Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει η αναπαράσταση του προνευστασμού (Pitch), της εγκάρσιας στροφής δηλαδή του καταστρώματος της γέφυρας, σε συνδυασμό με τις χρονικές στιγμές των γεγονότων (εικόνα 5.42).



εικόνα 5.42 – προνευστασμός (pitch) νότιας παρειάς κεντρικής διατομής (επίλυση South_1)

Παρατηρούμε ότι μετά από το πείραμα 3 όπου το πλήθος ήταν κατανεμημένο σε όλο το κατάστρωμα, την χρονική στιγμή όπου μετακινείται προς την βόρεια παρειά (πείραμα 4) παρουσιάζεται έντονη στροφή καταγράφοντας μάλιστα και την μέγιστη τιμή (0.54 deg). Με την μετακίνηση δηλαδή του φορτίου στην βόρεια παρειά είχαμε, όπως και αναμενόταν, μείωση υψομέτρου στην βόρεια παρειά και αύξηση στην νότια, πράγμα το οποίο αποτυπώνεται με την στροφή Pitch πολύ παραστατικά.

Αντιστοίχως στο αμέσως επόμενο πείραμα συμβαίνει ακριβώς το αντίθετο, την χρονική στιγμή όπου το φορτίο μετακινείται προς την νότια παρειά (πείραμα 5) παρουσιάζεται έντονη στροφή καταγράφοντας μάλιστα και την ελάχιστη τιμή (0.40 deg). Με την μετακίνηση δηλαδή του φορτίου στην νότια παρειά είχαμε, όπως και αναμενόταν, μείωση υψομέτρου στην νότια παρειά και αύξηση στην βόρεια, πράγμα το οποίο αποτυπώνεται όπως και πριν με την στροφή Pitch πολύ παραστατικά. Να σημειωθεί εδώ ότι έχουμε διαδοχική μεταβολή $P=0.135\text{deg}$.

Επίσης το συγκεκριμένο διάγραμμα αποτυπώνει με πολύ παραστατικό τρόπο τα άλματα του πλήθους, γεγονός στο οποίο είχε εν μέρει αποτύχει ο δορυφορικός σταθμός. Έτσι στις θέσεις των αλμάτων διακρίνονται τοπικά μέγιστα και ελάχιστα τα οποία αντιστοιχούν σε κάθε άλμα.

Αναλύοντας αυτές τις καταγραφές έχουμε:

Πριν την μετακίνηση του φορτίου στην βόρεια παρειά του καταστρώματος (11:32πμ) έχουμε καταγραφή γωνίας:

$$P_1 = 0.455 \text{ deg}$$

Μετά την μετακίνηση έχουμε καταγραφή γωνίας:

$$P_2 = 0.515 \text{ deg}$$

Οπότε έχουμε διαφορά: $P_3 = P_2 - P_1 = 0.515 - 0.455 = 0.06 \text{ deg}$. Λαμβάνοντας ως πλάτος καταστρώματος $d = 4.00 \text{ m}$, η κατακόρυφη μεταβολή που υπολογίζεται εν τέλει από την αδρανειακή μονάδα είναι:

$$\Delta h_1 = \tan(P_3) * d = 4 \text{ mm}$$

εξίσωση 5.1

Στην συνέχεια το πλήθος μετακινείται στην νότια παρειά (11:47πμ) του καταστρώματος και από καταγραφή $P_2 = 0.515 \text{ deg}$ έχουμε καταγραφή $P_4 = 0.415 \text{ deg}$, οπότε διαφορά:

$$P_5 = P_2 - P_4 = 0.515 - 0.415 = 0.10 \text{ deg}$$

Έτσι η κατακόρυφη μεταβολή σε αυτήν την περίπτωση είναι:

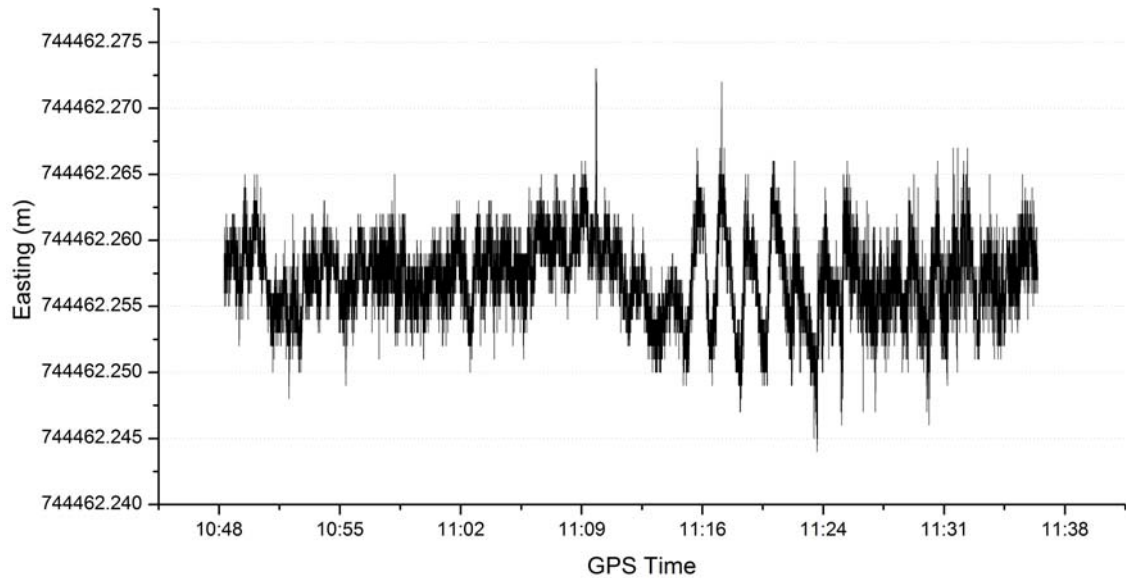
$$\Delta h_2 = \tan(P_5) * d = 6.90 \text{ mm}$$

εξίσωση 5.2

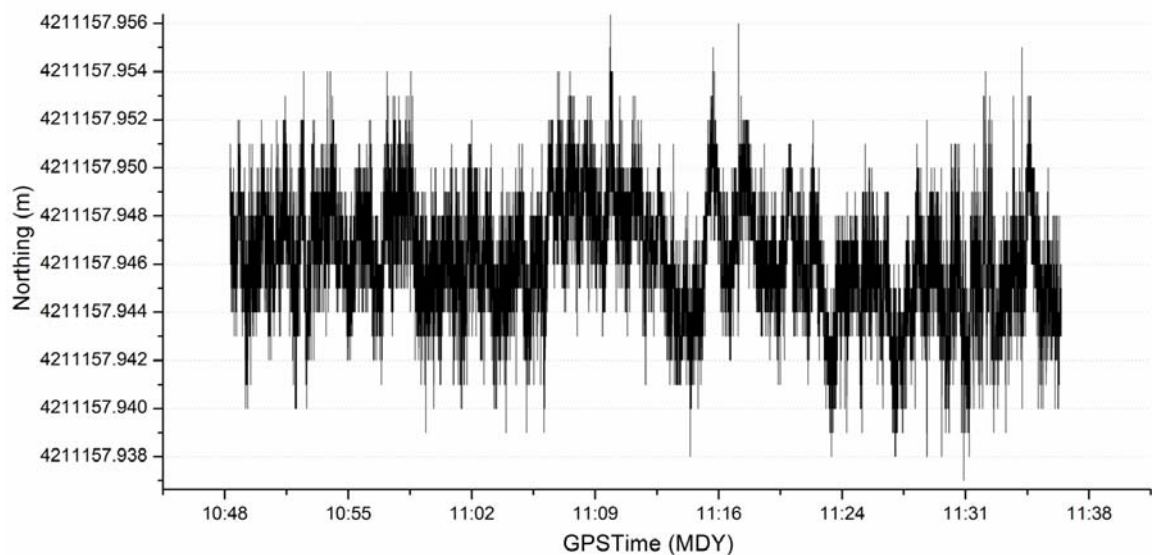
η οποία είναι και η μέγιστη διαδοχική μεταβολή που έχει καταγραφεί από την αδρανειακή μονάδα.

5.4.3β Επίλυση South_2 (GPS_rover (novatel) / INS (IMAR) – GPS_base (novatel))

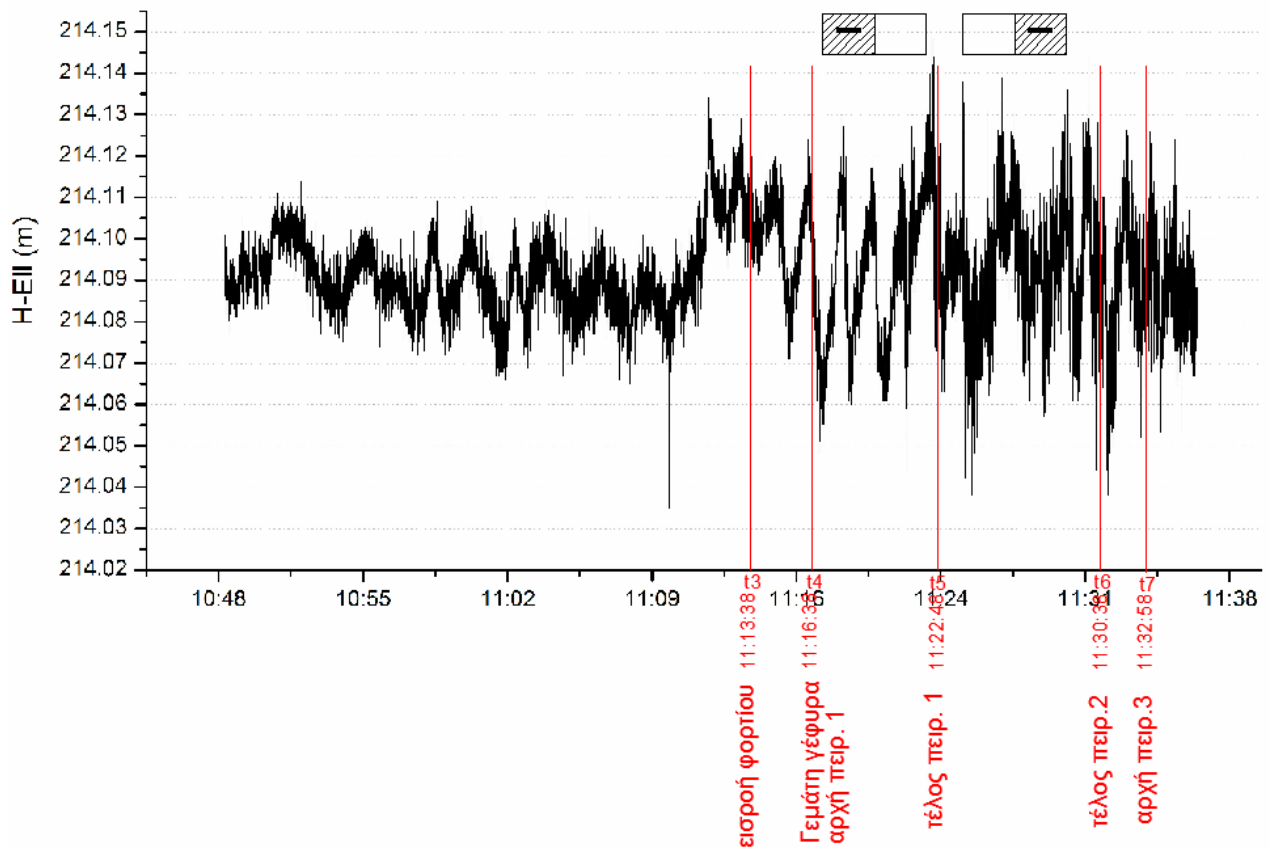
Ο επόμενος και τελευταίος συνδυασμός που επιλύθηκε ήταν ο South_2 με σταθερό δέκτη (base) το Novatel και κινητό δέκτη (rover) το Novatel καθώς και την αδρανειακή μονάδα IMAR. Όπως και στην επίλυση 5.4.2β διαθέτουμε δεδομένα σταθερού δέκτη βάσης μέχρι τις 11:36 πμ. Τα αποτελέσματα της επίλυσης είναι τα κάτωθι.



εικόνα 5.44 – Αξονική μετακίνηση (easting) κεντρικής διατομή νότιας παρειάς (επίλυση South_2)



εικόνα 5.45 – Αξονική μετακίνηση (northing) κεντρικής διατομής νότιας παρειάς (South_2)



εικόνα 5.46- Κατακόρυφες μετακινήσεις κεντρικής διατομής νότιας παρειάς (επίλυση South_2) με χρονικές στιγμές πειραμάτων

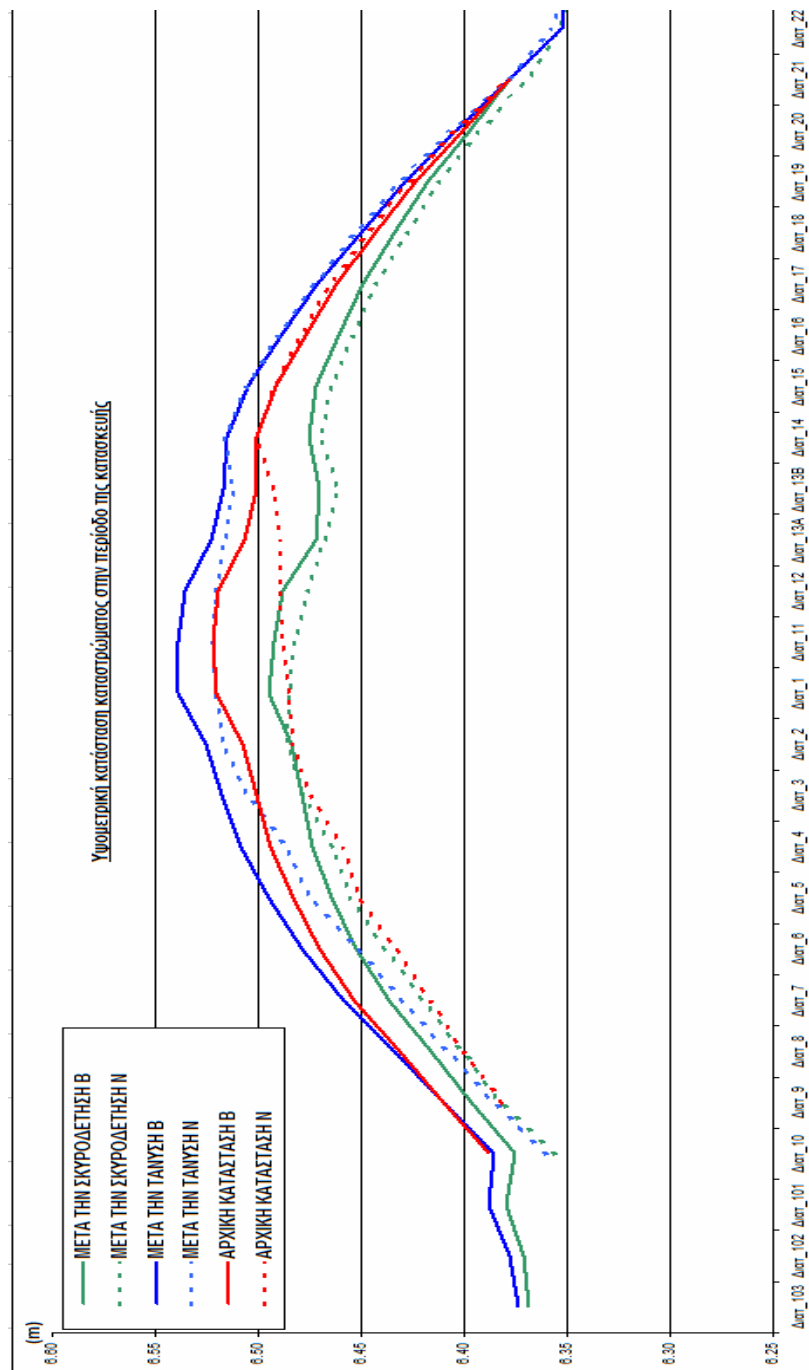
Τα οποία όπως και στις προηγούμενες επίλυσεις κρίνονται μη αξιοποιήσιμα, αλλά παρουσιάζονται χωρίς ανάλυση για λόγους πληρότητας.

6. ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1 Σύνοψη Αποτελεσμάτων

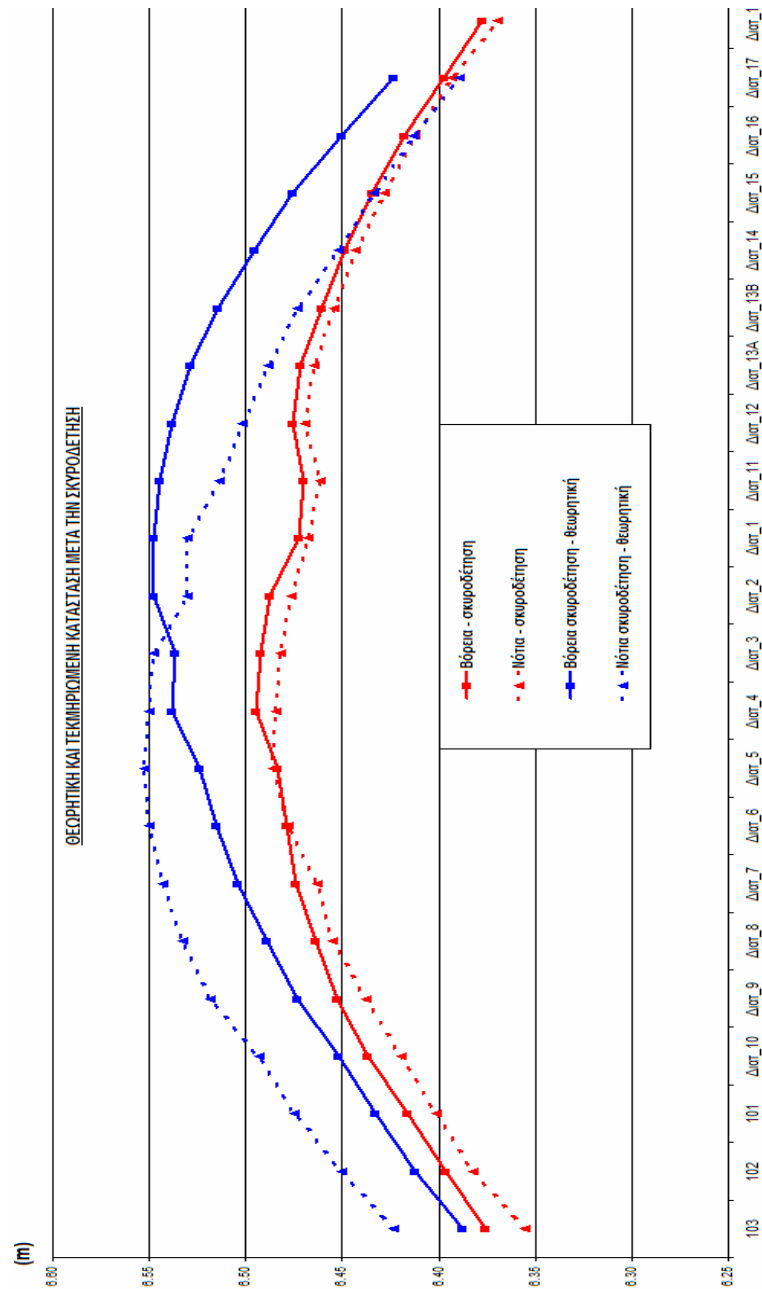
6.1.1 Υψομετρικές Μεταβολές Κατασρώματος (Φάση Κατασκευής)

Αν παραστήσουμε όλες τις εποχές σε ένα διάγραμμα προκύπτει το παρακάτω σχήμα στο οποίο μπορούμε να διακρίνουμε την υψομετρική κατάσταση του κατασρώματος σε όλες τις φάσεις της κατασκευής.



εικόνα 6.1 – υψομετρική κατάσταση κατασρώματος σε όλες τις φάσεις κατασκευής

Μια γενική παρατήρηση του παραπάνω διαγράμματος είναι ότι τόσο η βόρεια παρειά όσο και η νότια διατηρούν την ίδια μορφή σαν γεωμετρία αλλά μεταβάλλονται στο υψόμετρο, έχοντας σε σχέση με την αρχική κατάσταση μεγαλύτερο υψόμετρο μετά την τάνυση και μικρότερο μετά την σκυροδέτηση. Γεγονός εξηγήσιμο, δεδομένου ότι κατά την τάνυση ασκούνται τάσεις από το κατάστρωμα προς το σημείο έδρασης των καλωδίων και μετά την σκυροδέτηση εκτός από το ίδιο βάρος έχουμε και το βάρος του σκυροδέματος. Στην νότια παρειά οι μεταβολές είναι μεγαλύτερες συγκριτικά με την βόρεια παρειά.



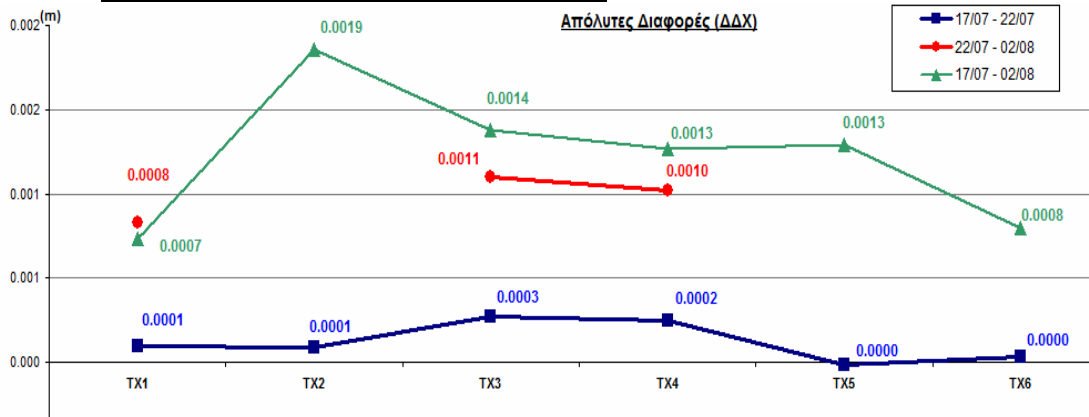
εικόνα 6.20 – θεωρητική και τεκμηριωμένη τελική κατάσταση καταστρώματος

Αναλύοντας το παραπάνω σχήμα (εικόνα 6.2) όπου αποτυπώνονται η θεωρητική και η τεκμηριωμένη τελική κατάσταση του καταστρώματος διακρίνουμε ότι:

- Στο βόρειο τμήμα του καταστρώματος και ειδικότερα στις διατομές Δ10 έως Δ3 οι δυο καμπύλες ακολουθούν την ίδια γεωμετρία με μία τάση οι υψομετρικές διαφορές των διατομών όσο πλησιάζουν τον αρμό να αυξάνονται.
- Στις διατομές Δ2, Δ1 και Δ11 (η Δ11 είναι το κέντρο του καταστρώματος) οι δυο καμπύλες δεν συσχετίζονται και μάλιστα η μια καμπύλη είναι κυρτή και η άλλη κοίλη.
- Στην συνέχεια στις διατομές Δ12 έως Δ17 ακολουθούν την ίδια γεωμετρία με τάση όσο πλησιάζουν τον πυλώνα οι υψομετρικές διαφορές των διατομών να μειώνονται.

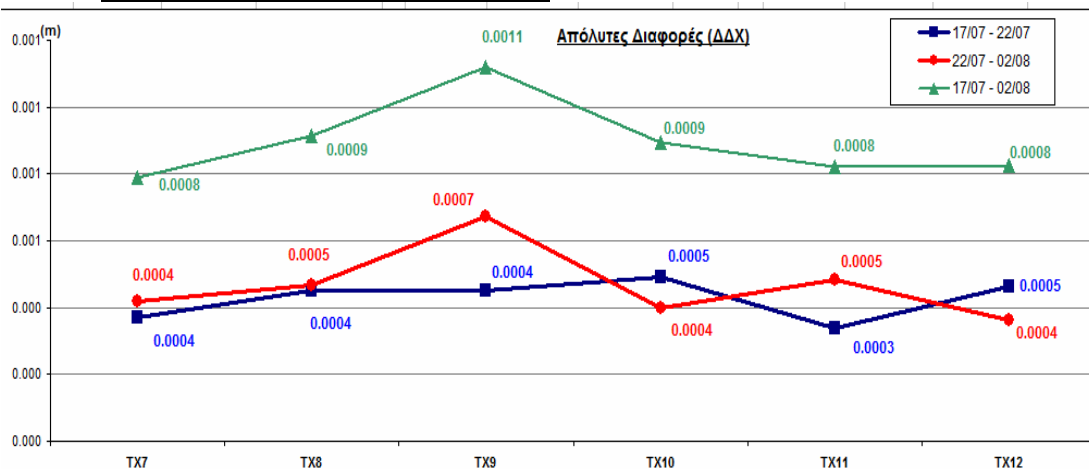
6.1.2 Μεταβολές Οριζοντιογραφίας Πυλώνων

• Ανατολικός πυλώνας (προς Χαλάνδρι)



εικόνα 6.3 - διαφορές θέσεων θεωρητικές-μετρημένες ανατολικού πυλώνα

• Δυτικός Πυλώνας (προς Φιλοθέη)



εικόνα 6.4 - διαφορές θέσεων θεωρητικές-μετρημένες δυτικού πυλώνα

Στα παραπάνω σχήματα (εικόνα 6.3 και εικόνα 6.4) διακρίνονται οι οριζοντιογραφικές μεταβολές του επιπέδου του πυλώνα στην φάση της κατασκευής. Όπως έχει αναλυθεί και στο κεφάλαιο 4 όσον αφορά τις θεωρητικές τιμές, αυτές έχουν προκύψει μέσω παρεμβολής σε διαγράμματα της αρχικής στατικής επίλυσης της κομβικής μετατόπισης τα οποία είναι ήδη προϊόντα παρεμβολής.

Το συνολικό σφάλμα της υπολογιζόμενης θεωρητικής μετακίνησης εκτιμάται ότι δεν θα υπερβαίνει το 0.50mm συνολικά, και θα κυμαίνεται μεταξύ 0.20mm (στην ευνοϊκότερη περίπτωση) και 0.50mm καθώς και μεμονωμένα στα σημεία TX6 και TX12 την τιμή 1mm όπου υπάρχει η μεγαλύτερη αβεβαιότητα χωροθέτησης.

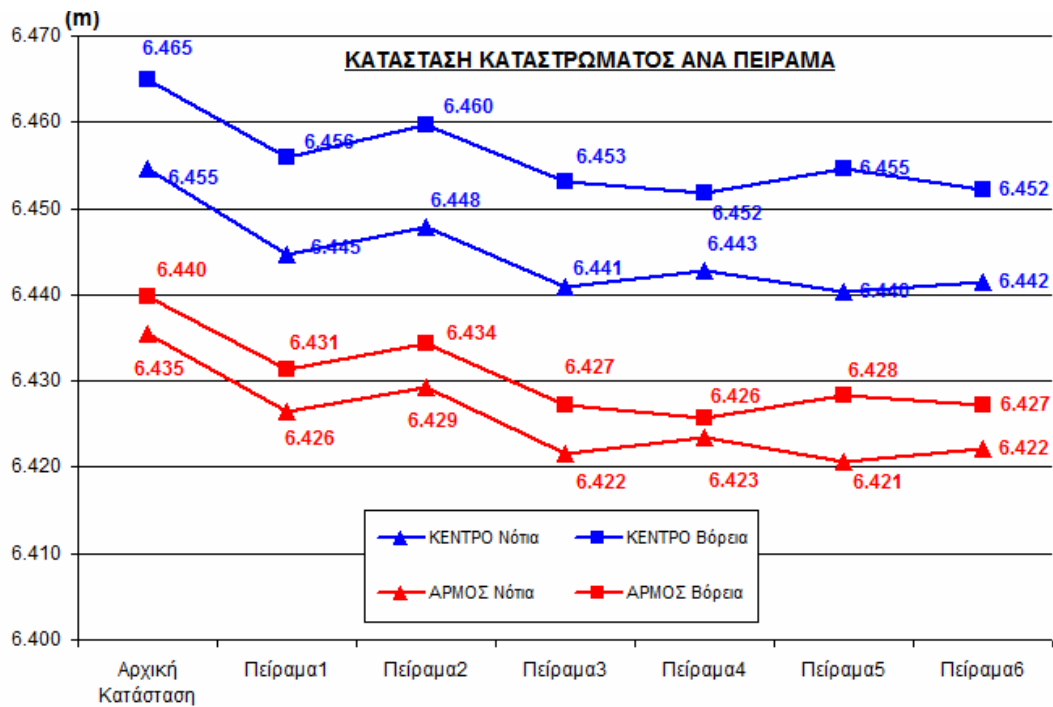
Συμπερασματικά, προκύπτει ότι οι ανηγμένες διαφορές ανά περίοδο είναι από 5% έως 25%, με τις οποίες μπορούμε να ισχυριστούμε ότι οι δυο ομάδες δεδομένων (θεωρητικές-πραγματικές) είναι πολύ κοντά. Το παραπάνω σφάλμα (0.6mm έως 1mm) θα μπορούσε να περιοριστεί κατά πολύ (έως και στο μισό) εάν υπήρχε διαθέσιμη στατική επίλυση του πυλώνα με πεπερασμένα στοιχεία ή εάν ήταν γνωστή πλήρως η γεωμετρία και όλες οι παράμετροι που απαιτούνται για τον υπολογισμό κομβικής μετατόπισης ακριβώς σε όποιο σημείο που μας ενδιαφέρει χωρίς να χρειάζεται παρεμβολή.

Οι απόλυτες και οι ανηγμένες διαφορές συνολικά (όχι ανά περίοδο) διακρίνονται στον πίνακα 6.1.

πίνακας 6.1– διαφορές θέσεων σημείων ελέγχου μεταξύ 1707 και 02/08

17/07- 02/08	Θεωρητικές ΔX (m)	Πραγματικές ΔX (m)	Διαφορά ΔΔX (m)	Ανηγμένη Διαφορά
TX1	0.0069	0.0076	0.0007	9.21%
TX2	0.0062			
TX3	0.0056	0.0070	0.0013	18.84%
TX4	0.0052	0.0065	0.0013	20.00%
TX5	0.0044			
TX6	0.0024			
TX7	-0.0068	-0.0076	0.0008	-10.53%
TX8	-0.0061	-0.0070	0.0009	-12.86%
TX9	-0.0056	-0.0067	0.0011	-16.42%
TX10	-0.0053	-0.0062	0.0009	-14.52%
TX11	-0.0046	-0.0054	0.0008	-15.09%
TX12	-0.0019	-0.0027	0.0009	-32.14%

6.1.3 Αποτελέσματα Γεωμετρικής Χωροστάθμησης (φάση λειτουργίας)



εικόνα 6.5 – υψόμετρα καταστρώματος ανά πείραμα

Στο παραπάνω διάγραμμα αν παρατηρήσουμε τις μεταβολές από πείραμα σε πείραμα διακρίνουμε ότι σχετίζονται με τα γεγονότα των πειραμάτων με χαρακτηριστικό παράδειγμα την αλλαγή της υψομετρικής κατάστασης της γέφυρας από το πείραμα 3 στο πείραμα 4 και 5 όπου διακρίνεται η μεταβολή της βόρειας παρειάς σε σχέση με την νότια όπως ακριβώς είχε τοποθετηθεί το φορτίο.

Οι μεταβολές είναι της τάξεως 0 έως 7mm μεταξύ πειραμάτων. Μεγαλύτερη μεταβολή έχουμε στην έναρξη των μετρήσεων όταν εισέρχεται το φορτίο στην γέφυρα. Η μέγιστη μεταβολή (όχι διαδοχική) είναι περίπου 2cm.

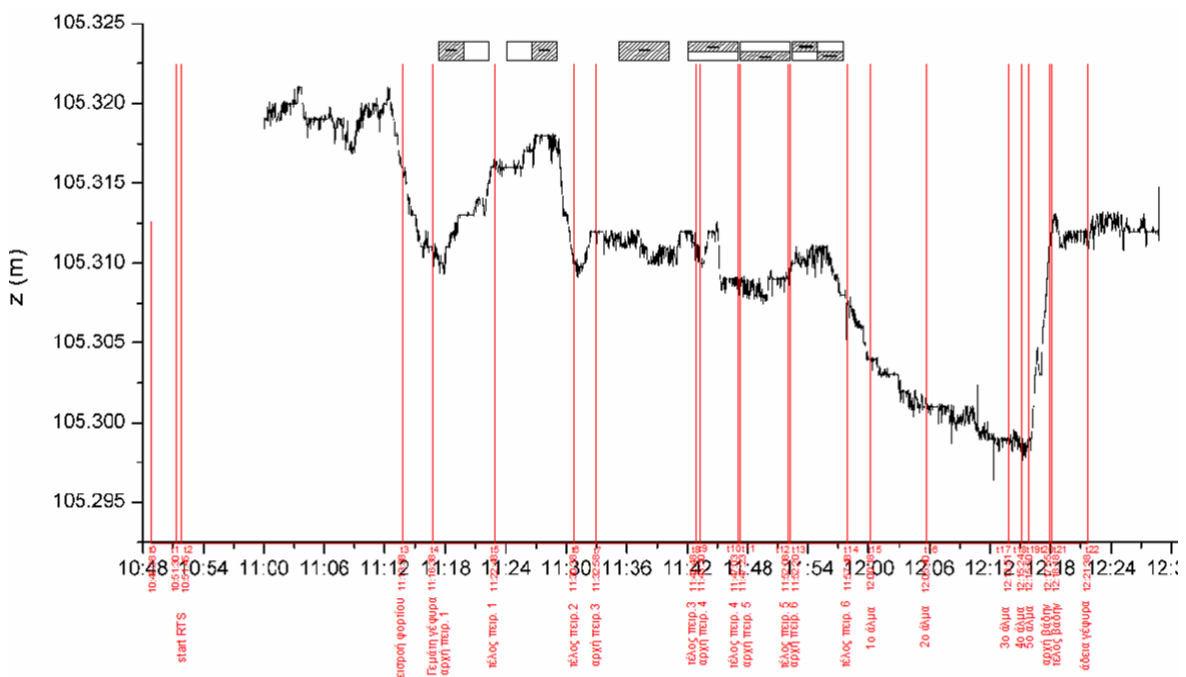
6.1.4 Αποτελέσματα Ρομποτικού Γεωδαιτικού Σταθμού

Σε αντίθεση με τον χωροβάτη με τον ρομποτικό γεωδαιτικό σταθμό έχουμε συνεχή καταγραφή η οποία αναλύεται και στις τρεις διαστάσεις του προβολικού συστήματος.

Η μέγιστη μεταβολή στον άξονα x που έχει καταγράψει το RTS είναι της τάξεως των 2mm με ελάχιστες μεμονωμένες τιμές τάξεως 4mm. Οι μεταβολές που καταγράψαμε σε αυτόν τον άξονα είναι τόσο μικρές ώστε θεωρούνται εντός θορύβου και μη αξιοποιήσιμες.

Η μέγιστη μεταβολή στον άξονα y που έχει καταγράψει το RTS είναι της τάξεως των 4cm. Παρατηρείται ότι από την έναρξη της καταγραφής μέχρι το πέρας των πειραμάτων η τιμή y έχει μια τάση να αυξάνεται.

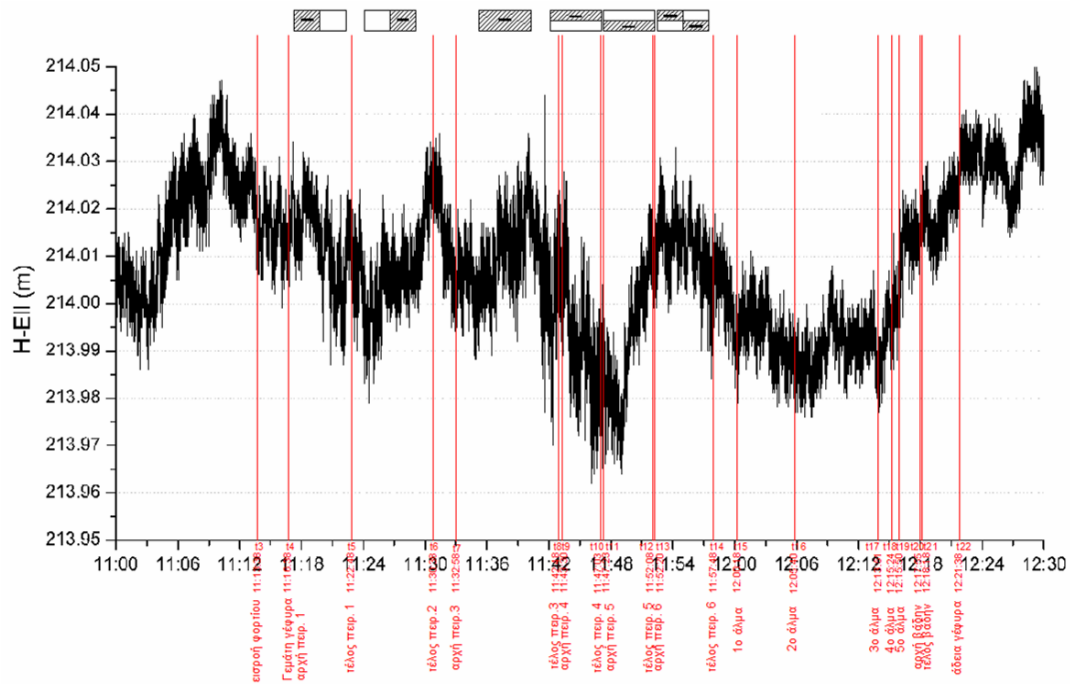
Οι μεταβολές των τιμών των υψομέτρων παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον μιας και αναμένεται να είναι στην γραφική αναπαράστασή τους άμεσα συσχετιζόμενες με τα πειράματα. Η μέγιστη μεταβολή στον άξονα z που έχει καταγράψει το RTS είναι 3,80cm. Από την έναρξη της καταγραφής μέχρι το πέρας των πειραμάτων η τιμή z έχει μια τάση να μειώνεται. Οι μεταβολές μεταξύ των πειραμάτων είναι της τάξεως 0 έως 8mm.



εικόνα 6.6- Κατακόρυφες μετακινήσεις στο μέσο της νότιας παρειάς του καταστρώματος

6.1.5 Αποτελέσματα GPS και GPS/INS

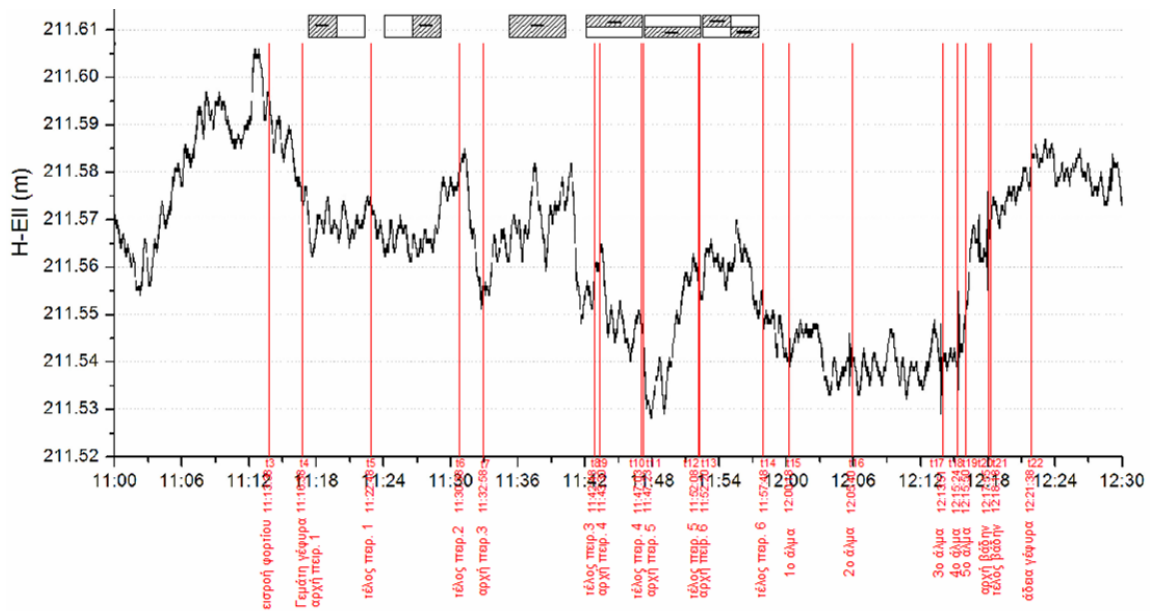
6.1.5α Βόρεια Παρειά



εικόνα 6.7- Κατακόρυφες μετακινήσεις κεντρικής διατομής βόρειας παρειάς με χρονικές στιγμές πειραμάτων

Εξετάζοντας το διάγραμμα παρατηρούμε ότι η μέγιστη μεταβολή που έχει καταγράψει το GPS μεταξύ των χρονικών στιγμών 11:13πμ έως 12:30πμ (χρονικό διάστημα πειραμάτων) είναι $\Delta h = 0.09\text{m}$, ενώ οι διαδοχικές μεταβολές είναι της τάξεως 3 έως 4cm.

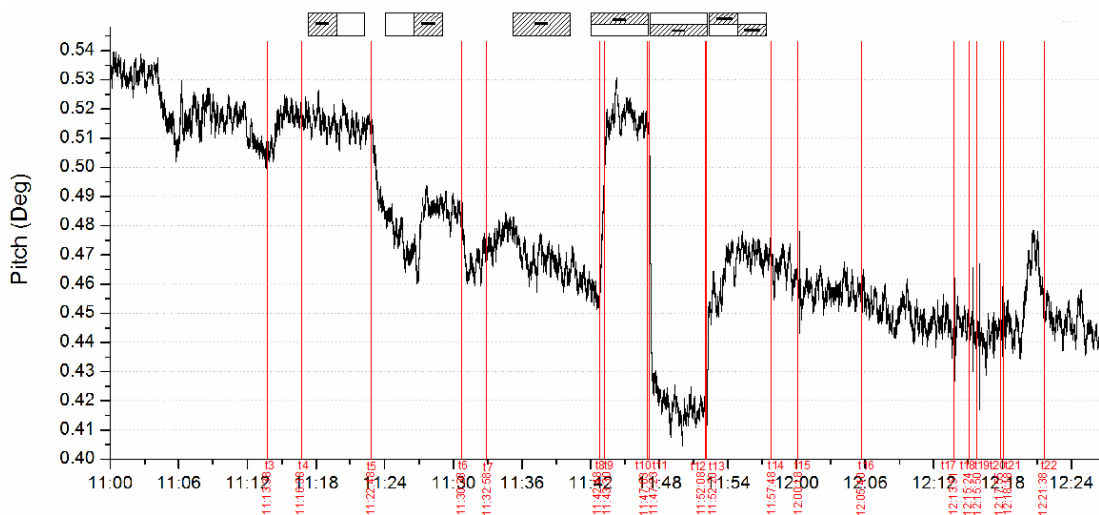
6.1.5β Νότια Παρειά



εικόνα 6.8- Κατακόρυφες μετακινήσεις κεντρικής διατομής νότιας παρειάς με χρονικές στιγμές πειραμάτων

Εξετάζοντας το παραπάνω διάγραμμα της κατακόρυφης μεταβολής παρατηρούμε ότι η μέγιστη μεταβολή που έχει καταγράψει το σύστημα είναι $\Delta h = 0.08\text{m}$, ενώ οι διαδοχικές μεταβολές είναι της τάξεως 2 έως 3cm.

Να σημειωθεί εδώ ότι το διάγραμμα της εικόνας 6.8 είναι σαφώς “πιο καθαρό” από το διάγραμμα της εικόνας 6.7 και αυτό οφείλεται στην αδρανειακή μονάδα και την ομαλοποίηση που προσφέρει στα εξαγόμενα αποτελέσματα.



εικόνα 6.9 – προνευστασμός (Pitch) νότιας παρειάς κεντρικής διατομής

6.2 Συνδυαστική Μελέτη Μετακινήσεων

6.2.1 Γενικά

Ένας από τους στόχους που τέθηκαν σε αυτήν την εργασία ήταν να ελεγχθούν τα συμπεράσματα που θα μπορούσαν να αποκομισθούν από τον συνδυασμό των επιμέρους επιλύσεων, τόσο για τον γεωδαιτικό εξοπλισμό όσο φυσικά και για την μελέτη παραμόρφωσης της γέφυρας. Η συνδυαστική επίλυση κυρίως μας παρέχει τα εξής:

- Έλεγχος για χονδροειδή λάθη, μπορούν να ελεγχθούν οι μετρήσεις δεδομένου ότι υπάρχει καταγραφή για το ίδιο μέγεθος από διαφορετικά όργανα γεωδαιτικού εξοπλισμού,
- συνεχής παρακολούθηση της κατασκευής, δεδομένου ότι σε περίπτωση προσωρινής μη καταγραφής ενός οργάνου υπάρχουν μετρήσεις από τον υπόλοιπο εξοπλισμό,
- είναι εφικτό να προκύψουν πολύ χρήσιμα συμπεράσματα όσον αφορά την δομική συμπεριφορά της κατασκευής, δηλαδή π.χ. με μια συνδυαστική λύση δεδομένων βόρειας – νότιας παρειάς προκύπτουν αποτελέσματα εγκάρσιας στροφής του καταστρώματος.

6.2.2 Παράθεση – Σύγκριση Επιλύσεων

Αν εξετάσουμε στο μέσο του καταστρώματος στην νότια παρειά τις επιλύσεις του ρομποτικού γεωδαιτικού εξοπλισμού, του δορυφορικού – αδρανειακού συστήματος και του χωροβάτη για κάθε πείραμα έχουμε τα εξής:

➤ Πείραμα 1

RTS: Αρχική τιμή υψομέτρου $H1 = 105.311\text{m}$ και τελική τιμή $H11 = 105.316\text{m}$
→ Μεταβολή: $+ 0.005\text{m}$

GPS/INS: $H1 = 211.577\text{m}$ και $H11 = 211.573\text{m}$
→ Μεταβολή: $- 0.004\text{m}$

DNA: $H1 = 6.445$

➤ **Πείραμα 2**

RTS: Αρχική τιμή υψομέτρου H2= 105.316m και τελική τιμή H22=105.31m
→ Μεταβολή: - 0.006m

GPS/INS: H2=211.573m και H22=211.576m
→ Μεταβολή: + 0.004m

DNA: H2= 6.448

➤ **Πείραμα 3**

RTS: Αρχική τιμή υψομέτρου H3= 105.312m και τελική τιμή H33=105.311m
→ Μεταβολή: - 0.001m

GPS/INS: H3=211.554m και H33=211.554m
→ Μεταβολή: 0.000m

DNA: H3= 6.441

➤ **Πείραμα 4**

RTS: Αρχική τιμή υψομέτρου H4= 105.31m και τελική τιμή H44=105.309m
→ Μεταβολή: - 0.001m

GPS/INS: H4=211.564m και H44=211.548m
→ Μεταβολή: -0.016m

DNA: H4= 6.443

➤ **Πείραμα 5**

RTS: Αρχική τιμή υψομέτρου H5= 105.308m και τελική τιμή H55=105.31m
→ Μεταβολή: + 0.002m

GPS/INS: H5=211.537m και H55=211.557m
→ Μεταβολή: +0.020m

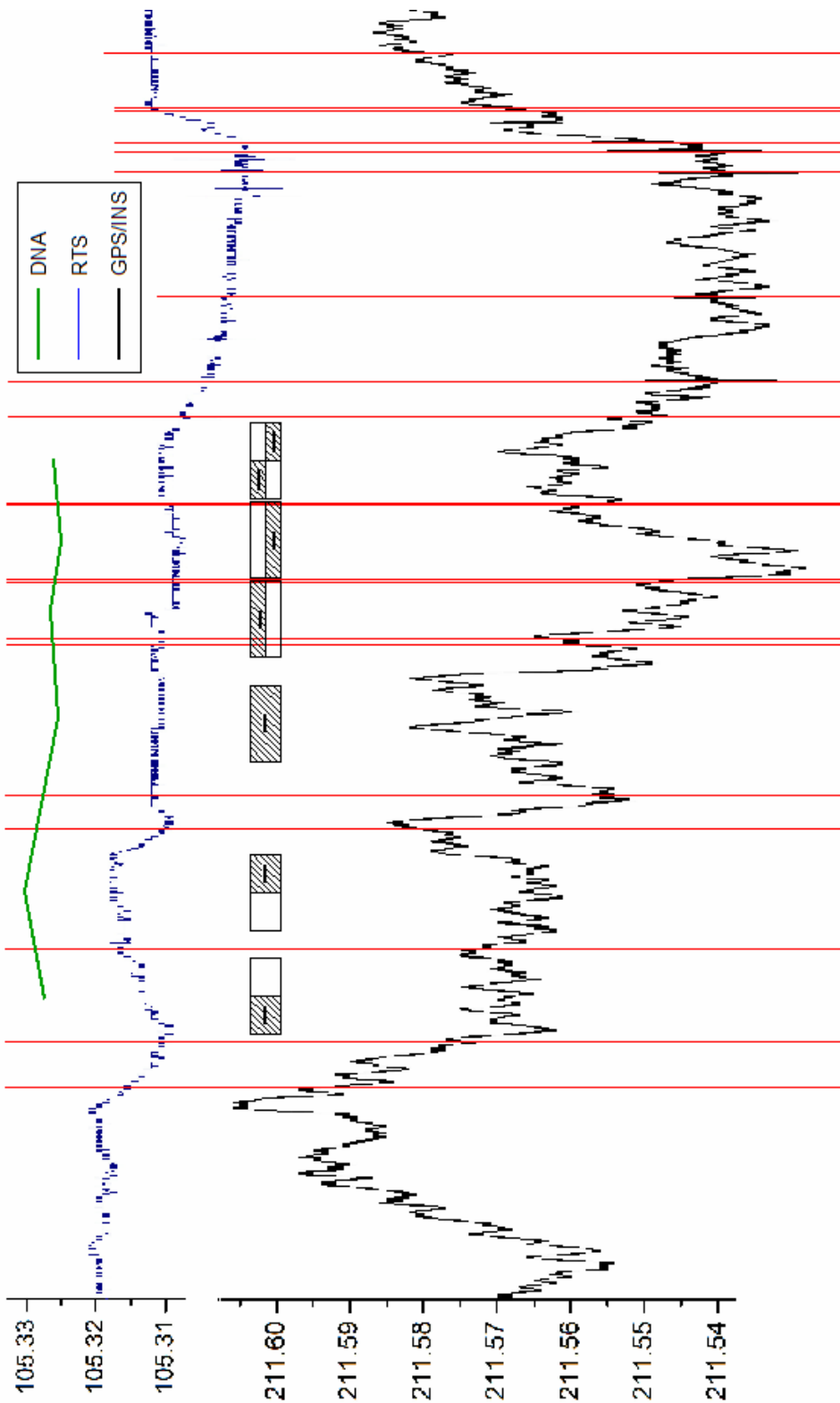
DNA: H5= 6.440

➤ **Πείραμα 6**

RTS: Αρχική τιμή υψομέτρου H6= 105.31m και τελική τιμή H66=105.308m
→ Μεταβολή: - 0.002m

GPS/INS: H6=211.553m και H66=211.554m
→ Μεταβολή: +0.001m

DNA: H6= 6.442

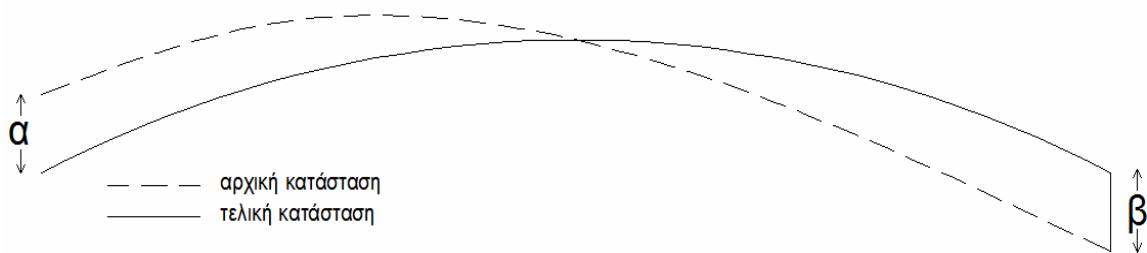


εικόνα 6.10 - Κατακόρυφες μετακινήσεις κεντρικής διατομής νότιας παρειάς (συνδυαστική λύση)

6.3 Συμπεράσματα

6.3.1 Φάση Κατασκευής – Κατάστρωμα

Όσον αφορά το κατάστρωμα της γέφυρας, πρόκειται για μία σύμμεικτη κατασκευή, υπερστατική και θεωρητικώς σχεδιασμένη με αντιβέλος (εικόνα 6.11).



εικόνα 6.11 – θεωρητική αρχική και τελική υψομετρική θέση καταστρώματος

Όπως διακρίνεται στην εικόνα 6.11 η κατασκευή (σύμφωνα με την θεωρητική της επίλυση) έχει αντιβέλος α και β ίσα μεταξύ τους. Με την τάνυση διατηρείται η ίδια κατάσταση με μικρή μεταβολή των α και β . Κατά την σκυροδέτηση τα α και β εξαλείφονται πλήρως και έχουμε την τελική κατάσταση.

Το παραπάνω σενάριο, μετά από εξέταση των μετρημένων μεγεθών και ειδικότερα την εικόνα 4.8 δεν τεκμηριώνεται. Αντί αυτού παρατηρείται μια υψομετρική μεταβολή του καταστρώματος σχεδόν ομοιοπαράλληλη.

Εξετάζοντας και την εικόνα 6.2 όπου διακρίνονται οι τελικές υψομετρικές θέσεις του καταστρώματος, παρατηρούμε ότι οι καμπύλες θεωρητική-τεκμηριωμένη γενικώς είναι ασύμμετρες, με έντονη ασυμμετρία στις διατομές κοντά στο κέντρο της γέφυρας. Παρατηρείται ότι στην νότια παρειά στις κεντρικές διατομές έχουμε θεωρητικές τιμές μεγαλύτερες από τις τεκμηριωμένες κατά 5cm περίπου, κοντά στον πυλώνα του Χαλανδρίου έχουμε πλήρη ανατροπή του γεγονότος και οι τεκμηριωμένες φθάνουν κάποια χιλιοστά υψηλότερα από τις θεωρητικές.

6.3.2 Φάση Κατασκευής – Πυλώνες

Όσον αφορά τους πυλώνες αναμένεται ίδια συμπεριφορά και στους δυο σε όλες τις φάσεις της κατασκευής, το οποίο μπορούμε να ισχυριστούμε ότι σύμφωνα με τους πίνακες 4.12 – 4.13 – 4.14 επαληθεύεται. Διακρίνεται μια διαφορά σε σύγκρισή των αντίστοιχων σημείων της τάξεως 0.1 έως 0.2mm η οποία δεν επηρεάζει τον παραπάνω ισχυρισμό, δεδομένου ότι τα σημεία δεν βρίσκονται ακριβώς στην ίδια θέση σε κάθε πυλώνα και αφετέρου υπάρχει και το σφάλμα της παρεμβολής.

Αναλύοντας τον πίνακα 6.1, παρατηρούμε ανηγμένη διαφορά θέσεων από 9% έως 20% και στο σημείο TX12 32%. Έχει υπολογισθεί το σφάλμα των μετρήσεων ως $\sigma_1=0.50\text{mm}$. Οι διαφορές θεωρητικών-πραγματικών τιμών ($\Delta\Delta X$) είναι της τάξεως 0.7mm έως 1.3mm. Έτσι αν παραστήσουμε τις μετρημένες τιμές με έλλειψη σφάλματος, δεδομένου ότι το σφάλμα μέτρησης είναι 0.50mm, όλες οι διαφορές είναι εκτός έλλειψης.

6.3.3 Φάση Λειτουργίας

Στην φάση λειτουργίας έχουμε αποτελέσματα από διαφορετικά συστήματα, τα οποία κατέγραψαν ανεξάρτητα μεταξύ τους, και πρέπει να αξιολογηθούν συνολικά. Από την θεωρητική εκτίμηση αναμενόταν υψομετρική μετακίνηση έως 2cm. Βάσει των προηγούμενων κεφαλαίων και με την βοήθεια του διαγράμματος της εικόνας 6.10 θα πραγματοποιηθεί τόσο μεμονωμένα αλλά και συνδυαστική εκτίμηση των αποτελεσμάτων.

Έτσι, όσον αφορά την καταγραφή του χωροβάτη έχουμε μέγιστη συνολική μεταβολή 1.5cm και διαδοχική μεταβολή της τάξεως από 1mm έως 7mm.

Από την καταγραφή του ρομποτικού γεωδαιτικού σταθμού έχουμε συνολική μεταβολή 4cm περίπου και διαδοχική μεταβολή από 1mm έως 6mm. Να σημειωθεί εδώ ότι διακρίνεται διαφορά στην συνολική μεταβολή μεταξύ χωροβάτη και γεωδαιτικού σταθμού και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο χωροβάτης δεν παρακολούθησε τα πειράματα με τις δυναμικές φορτίσεις (άλματα – βάδην) στα οποία ο γεωδαιτικός σταθμός κατέγραψε τις ελάχιστες τιμές όλου του φάσματος. Έτσι, και ο γεωδαιτικός σταθμός αν εξαιρέσουμε το τμήμα των αλμάτων έχει καταγράψει συνολική μεταβολή 1.5cm περίπου.

Σχετικά με το δορυφορικό σύστημα έχουμε διαδοχικές μεταβολές της τάξεως των 2 έως 4cm και μέγιστη συνολική μεταβολή 10cm περίπου, οι οποίες έχουν κριθεί μη πραγματικές. Να σημειωθεί εδώ ότι παρατηρώντας το διάγραμμα μεταβολών της συνδυαστικής λύσης (εικόνα 6.10) βγαίνει το συμπέρασμα ότι μπορεί μεν οι επιλύσεις του δορυφορικού συστήματος να είναι μια τάξη μεγέθους λάθος, αλλά σαν γεωμετρία η καμπύλη έχει σχετικά προσδοκώμενη μορφή.

Αυτή η παρατήρηση δίνει το έναυσμα για να ισχυριστούμε ότι υπάρχει ένα συστηματικό σφάλμα (το οποίο υφίσταται από την διαδικασία της μέτρησης και όχι της επεξεργασίας) και είναι δυνατό να εξαιρεθεί ώστε να προκύψουν αξιοποιήσιμα και συγκρίσιμα αποτελέσματα.

Έτσι συνδυάζοντας όλα τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι από τις επιλύσεις των παρατηρήσεων του χωροβάτη, του ρομποτικού γεωδαιτικού συστήματος και του αδρανειακού συστήματος έχουν προκύψει αποτελέσματα από τα οποία προκύπτει η ίδια τάση της κατασκευής για κάθε πείραμα, στην ίδια τάξη μεγέθους με μικρές διαφορές λόγω της ιδιαιτερότητας αλλά και της ακρίβειας κάθε οργάνου. Από την άλλη πλευρά τα αποτελέσματα του δορυφορικού συστήματος κρίνονται μη αξιοποιήσιμα για ανάλυση μικρομετακινήσεων.

Βιβλιογραφία

1. Υψομετρία - Δ. Μπαλοδήμος, Ο. Αραμπατζή - 2004
2. Προχωρημένες μέθοδοι Τεχνικής και Βιομηχανικής Γεωδαισίας - Χ. Μητσακάκη, 2006
3. Αγατζά – Μπαλοδήμου Α.Μ. 2005. Θεωρία Σφαλμάτων & Συνορθώσεις ΙΙ, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ.
4. Δ. Παραδείσης – Σημειώσεις Δορυφορικής Γεωδαισίας
5. Δ. Παραδείσης – Σημειώσεις Δορυφορικής Γεωδαισίας και Πλοήγησης
6. Δ. Δεληκαράογλου – Ειδικά θέματα Δορυφορικής Γεωδαισίας
7. Α. Φωτίου – Χ. Πικριδάς – Το Δορυφορικό σύστημα GPS
8. Σιδηρές κατασκευές - Ι. Βάγιας
9. Σιδηρές και Σύμμεικτες γέφυρες - Ι. Ερμόπουλος
10. Leica Geosystems
11. Novatel Span user manual
12. Inertial Explorer user manual
13. Παρακολούθηση παραμορφώσεων φραγμάτων με γεωδαιτικές μεθόδους, Λάμπρου, Πανταζής
14. Συμβολή στη διερεύνηση της δυνατότητας καταγραφής ταλαντώσεων με τα γεωδαιτικά όργανα GPS-RTS, Π. Ψιμούλης 2005
15. Καταγραφή και ανάλυση κινήσεων μονοβαθμιαίου ταλαντωτή με χρήση ρομποτικού θεοδόλιχου RTS - Χ. Ορφανός, Χ. Σφεντζούρης, 2009
16. Διερεύνηση λειτουργίας του γεωδαιτικού σταθμού Leica TCA-1800 για την παρακολούθηση κατασκευών σε συνθήκες ταλάντωσης με χρήση σεισμικής τράπεζας ακριβείας και μεθόδων φασματικής ανάλυσης - Γ. Νησωτάκης, 2008
17. Γεωμετρική τεκμηρίωση νομέων Υ/Β με μεθόδους βιομηχανικής γεωδαισίας - Α. Σοφής, 2008
18. Monitoring Bridges by GNSS, Gethin ROBERTS, Christopher BROWN
19. Structural health monitoring of bridges in Sweden - M. Enckell, 2007
20. Damage detection based on static measurements on bridge structures - Stöhr S., Link M., Rohrman R., Rucker W.
21. Full-scale structural monitoring using an integrated GPS and accelerometer system - Xiaojing Li, Linlin Ge, Eliathamby Ambikairajah, Chris Rizos, Yukio Tamura, Akihito Yoshida, 2006

22. Measurement of the dynamic displacements and of the modal frequencies of a short-span pedestrian bridge using GPS and an accelerometer - Fanis Moschas, Stathis Stiros, 2011
23. A supervised learning computer-based algorithm to derive the amplitude of oscillations of structures using noisy GPS and Robotic Theodolites (RTS) records - Panos Psimoulis, Stathis Stiros, 2012
24. Identification of a human walking force model based on dynamic monitoring data from pedestrian bridges, Takashi Obata, Yasunori Miyamori
25. Casper Ebbesen Schultz – INS and GPS Integration (2006)
26. Oliver J. Woodman – An Introduction To Inertial navigation, University of Cambridge
27. GPS and INS Integration with Kalman Filtering for Direct Georeferencing of Airborne Imagery - Sultan Kocaman
28. A GPS/INS Integration System with New Orientation Measurement Scheme for Land Vehicle Application – Nguyen Ho Quoc Phuong Hee - Jun Kang Young -Soo Suh Young - Shick Ro Kyu - Chan Lee
29. Basic Principles of Inertial Navigation, Seminar on inertial navigation systems - Tampere University of Technology
30. AlttiJokinen - Integrated Navigation Systems
31. Eun-Hwan Shin - Accuracy Improvement of Low Cost INS/GPS for Land Applications, 2001
32. Designing a neural Network for GPS/INS/PL Integration – Jianguo Jack Wang, Jinling Wang, David Sinclair, Leo Watts
33. Inertial Navigation - Kevin J Walchko1
34. The Application of Integrated GPS and Dead Reckoning Positioning in Automotive Intelligent Navigation System - Qingquan Li - Zhixiang Fang - Hanwu Li