ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΘΟΔΟΙ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ ΚΤΙΡΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ: ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ:

ΚΑΔΑ ΒΑΣΙΛΙΚΗ

ΚΑΤΣΑΦΑΡΑ ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ

ΣΤΑΘΑΚΟΣ ΣΤΕΦΑΝΟΣ

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: ΛΥΚΟΥΡΓΙΩΤΗΣ ΣΩΤΗΡΗΣ

ΠΑΤΡΑ 2016

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε στο Ανώτατο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Δυτικής Ελλάδας (Α.Τ.Ε.Ι). Η πτυχιακή εργασία ενός προπτυχιακού φοιτητή είναι απαραίτητη προϋπόθεση για να λάβει το πτυχίο του. Στη δική μας πτυχιακή αποφασίσαμε να ασχοληθούμε με τη Μέθοδο Ταλαντώσεων Κτιριακών Έργων Με Τοπογραφική Προσσέγγιση. Το θεωρούμε ένα ενδιαφέρον θέμα και πρωτότυπο. Κοινός παράγοντας ήταν η επιθυμία μας να έχει σχέση η πτυχιακή μας με τη τοπογραφία. Σε αυτό μας βοήθησε ο δρ. Λυκουργιώτης Σωτήρης με το θέμα της εργασίας. Σε αυτό το σημείο θα θέλαμε να τον ευχαριστήσουμε για τη πολύτιμη βοήθεια, την υποστήριξη, την επίβλεψη κ την ενασχόληση του με την εργασία μας. Οι συμβουλές του ήταν αρκετά σημαντικές και εποικοδομητικές για εμάς.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο σκοπός της πτυχιακής είναι η αποτύπωση ταλαντώσεων με σύγχρονα τοπογραφικά όργανα. Ξεκινώντας την εργασία μελετήσαμε σύγχρονα τοπογραφικά όργανα, πιο συγκεκριμένα είδαμε το Παγκόσμιο Σύστημα Προσδιορισμού Θέσης (GPS) και το Ρομποτικό Θεοδόλιχο (RTS). Μελετώντας το κάθε ένα όργανο αναλυτικά ανακαλύψαμε τις δυνατότητες, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα, τις βασικές λειτουργίες τους, ακόμα και πως μπορούμε να τα χρησιμοποιούμε. Στη συνέχεια, είδαμε πως μπορούμε να εφαρμόσουμε το GPS και το RTS σε μετρήσεις ταλαντώσεων δύσκαμπτων κατασκευών. Αυτό είναι ένα ενδιαφέρον κομμάτι της πτυχιακής, υπάρχει υλικό από γέφυρες σε περιοχές της Ελλάδας (Σιδηροδρομική γέφυρα Γοργοποτάμου και Μεταλλική Πεζογέφυρα Κηφισού) και από τη Σκωτία (Γέφυρα Forth Road). Τέλος, ασχολούμαστε με το πρόγραμμα Matlab, με τη βοήθεια του οποίου μελετάμε ταλαντώσεις κατασκευών που έχουν καταγραφεί σε βίντεο.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στη φυσική με τον όρο ταλάντωση εννοούμε οποιαδήποτε παλινδρομική περιοδική μεταβολή οποιουδήποτε φυσικού μεγέθους γύρω από μια τιμή. Οι ταλαντώσεις είναι πολλών ειδών, χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η μηχανική ταλάντωση και η ηλεκτρική ταλάντωση. Στη μηχανική ταλάντωση, που μας αφορά, μεταβάλλεται αρμονικά η θέση του σώματος γύρω από τη θέση ισορροπίας του. Οι ταλαντώσεις είναι βασικές κινήσεις κατασκευών και εκδηλώνονται κατά τη δυναμική αλληλεπίδραση όπως για παράδειγμα συντονισμό.

Στην εργασία αυτή θα ασχοληθούμε με την Αποτύπωση Ταλαντώσεων Με Σύγχρονα Τοπογραφικά Όργανα. Στόχος μας με την επιλογή αυτού του θέματος ήταν να ασχοληθούμε με ένα πρωτότυπο θέμα. Αρκετά ενδιαφέρον για εμάς ήταν το κομμάτι που αφορά το λογισμικό Matlab, μιας και το συναντήσαμε πρώτη φορά. Θα σας κινήσει το ενδιαφέρον το πώς μπορούν να συνδυαστούν τα σύγχρονα τοπογραφικά όργανα και να μας βοηθήσουν να πάρουμε μετρήσεις σε μια ταλάντωση κατασκευής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ (GPS)

1.1 Παγκόσμιο Σύστημα Προσδιορισμού Θέσης (GPS)

Το GPS ή Global Positioning System είναι ένα σύστημα εντοπισμού γεωγραφικής θέσης ενός ακινήτου ή κινητού στόχου. Δημιουργήθηκε από το Υπουργείο Άμυνας των ΗΠΑ για στρατιωτική χρήση. Στα μέσα της δεκαετίας του 1960 το σύστημα δορυφορικής πλοήγησης, γνωστό τότε και ως Transit system, δοκιμάζεται από το αμερικάνικο ναυτικό. Περνώντας τα χρόνια εξελίχθηκε σε ένα σύστημα με δυνατότητα να καλύψει τις ανάγκες εντοπισμού, με οποιοσδήποτε καιρικές συνθήκες, οποιαδήποτε ώρα της ημέρας για απεριόριστο αριθμό χρηστών. Ρυθμίζεται καθημερινά από τη βάση της πολεμικής αεροπορίας Σρίβερ.

- Αποτελείται από 34 δορυφόρους σήμερα, ενώ η πλήρης ανάπτυξη του συστήματος απαιτεί 24 δορυφόρους (εικ. 1.2), είναι τοποθετημένοι ομοιόμορφα στον πλανήτη και ο καθένας κινείται σε καθορισμένη τροχιά γύρω από τη Γη. Οι δορυφόροι είναι τοποθετημένοι ομοιόμορφα σε 6 τροχιακά επίπεδα (4 τουλάχιστον δορυφόρους κάθε θέση πάνω στη Γη), ανά 60 μοίρες στο ισημερινό επίπεδο και έχουν γωνία κλίσης 55 μοίρες ως προς αυτό. Το μέσο ύψος των δορυφόρων από την επιφάνεια της γης είναι 20.189 χιλιόμετρα. Οι δορυφόροι έχουν κάποιες ειδικές συσκευές που ονομάζονται πομποδέκτες GPS, σε αυτές οφείλεται η ικανότητα του GPS να δίνει πληροφορίες για την ακρίβεια της θέσης, της ταχύτητας, του υψομέτρου, της κατεύθυνσης, ακόμα και ώρας σε όλα τα σημεία της Γης.
- Το επίγειο τμήμα ελέγχου που αποτελείται από:
  - → 5 απομακρυσμένους μεταξύ τους σταθμούς παρακολούθησης,
  - → 3 σταθμούς επικοινωνίας με τους δορυφόρους και
  - → 1 κεντρικό σταθμό ελέγχου που ελέγχει τη λειτουργία του συστήματος και έχει τη δυνατότητα επέμβασης στο δορυφορικό σχηματισμό, τροποποιώντας τη θέση στη τροχιά του και τη λειτουργία δορυφόρων.
- Το τμήμα χρηστών που αποτελείται από όλους τους χρήστες (επίγειους, επιθαλάσσιους και εναέριους). Αυτοί με κατάλληλο εξοπλισμό δεκτών μπορούν κάθε στιγμή να προσδιορίσουν τη θέση τους, τη ταχύτητα και τη κατάσταση του

χρονομέτρου τους εκμεταλλευόμενοι τις δυνατότητες του συστήματος (από Εφαρμοσμένη Γεωδαισία, εκδόσεις Ζητη και βικιπαίδεια).

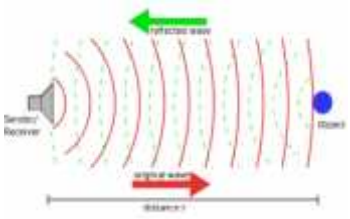
Εικόνα 1.1: Ένας δορυφόρος του συστήματος GPS.

Εικόνα 1.2: Το δίκτυο των 24 δορυφόρων που είναι ομοιόμορφα κατανεμημένοι σε 6 σχεδόν κυκλικές τροχιές (4 δορυφόροι σε καθεμία από τις 6 τροχιές). (εικόνα από το google).

1.2 Ιστορία του GPS

Στην αρχαιότητα για τον προσανατολισμό τους οι άνθρωποι χρησιμοποιούσαν τα σημεία του ορίζοντα, μέχρι και τα άστρα. Γνώριζαν την γεωγραφική θέση ενός σταθερού άστρου οπότε ήταν εύκολο να εντοπίσουν την πορεία τους. Στη συνέχεια ανακαλύφθηκαν άλλα μέσα που βοηθούσαν στο προσανατολισμό, τα οποία είναι η πυξίδα, ο έξαντας και το ραντάρ. Ο

έξαντας προσδιορίζει με ευκολία το γεωγραφικό πλάτος, αντιθέτως μειονεκτεί στον προσδιορισμό του γεωγραφικού μήκους. Το ραντάρ είναι το πρώτο σύστημα που βασίζεται σε ηλεκτρομαγνητικά κύματα, έδινε όμως ανακριβείς πληροφορίες. Στη τεχνολογία του ραντάρ και άλλων μεθόδων στηρίχτηκε το σημερινό GPS, καθώς χρησιμοποιεί τη τεχνολογία των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και τη παρατήρηση ενός τεχνητού ουράνιου σώματος.



Εικόνα 1.3: Η αρχή λειτουργίας του ραντάρ όπως και του GPS βασίζεται στην εκπομπή και λήψη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μετά από ανάκλαση σε κάποιο αντικείμενο (εικόνα από το διαδίκτυο).

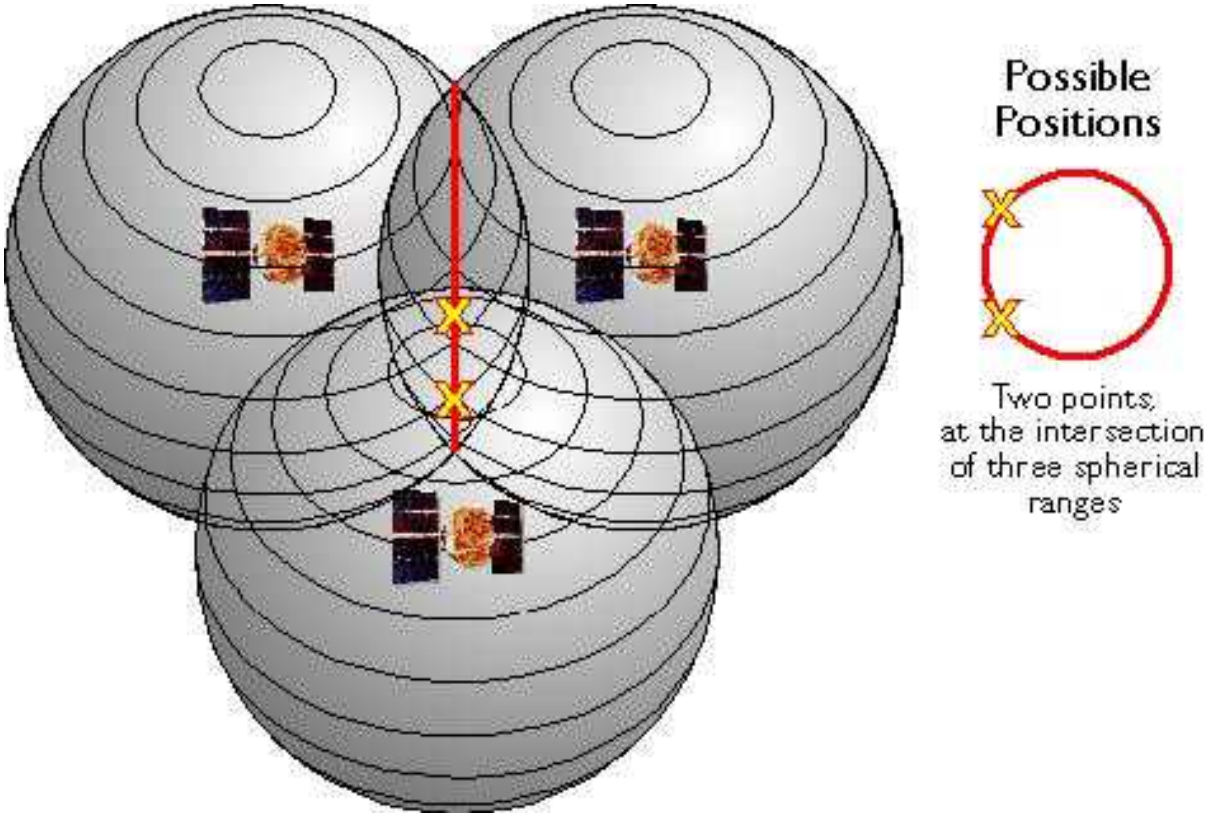
1.3 Βασικές αρχές λειτουργίας

Ο προσδιορισμός της ακριβής θέσης ενός σημείου βασίζεται στη λειτουργία των δορυφόρων. Οι δορυφόροι λειτουργούν ως σημεία αναφοράς στο χώρο. Η εύρεση θέσης ενός σημείου γίνεται με τον υπολογισμό των αποστάσεων της κεραίας του δέκτη από τρεις δορυφόρους τουλάχιστον.

Το άγνωστο σημείο που αναζητούμε είναι στη τομή τριών σφαιρών, κάθε σφαίρα έχει κέντρο ένα δορυφόρο και ακτίνα την απόσταση από το δορυφόρο. Οι συντεταγμένες του σημείου υπολογίζονται με μια εμπροσθοτομία στο χώρο. Υπολογίζονται οι αποστάσεις ενός σημείου από το δορυφόρο, δηλαδή οι συντεταγμένες.

Η απόσταση του δορυφόρου από το δέκτη βρίσκεται με τη μέτρηση του χρόνου που πέρασε από τη στιγμή που εστάλη σήμα από το δορυφόρο στο δέκτη, η ταχύτητα είναι ίση με τη ταχύτητα του φωτός. Η θέση ενός δέκτη υπολογίζεται με παραπάνω από τέσσερις δορυφόρους και από σήμα δύο διαφορετικών συχνοτήτων (L1, L2) που εκπέμπουν δορυφόροι. Αναλυτικότερα, ο δέκτης πρέπει να μετρήσει το χρόνο που χρειάζεται να ταξιδέψει το σήμα από το δορυφόρο μέχρι τη κεραία του. Είναι γνωστή η ακριβής θέση των δορυφόρων στη τροχιά τους κάθε χρονική στιγμή (δηλαδή είναι γνωστές οι συντεταγμένες τους x,y,z). Τέλος, γίνονται οι απαραίτητες διορθώσεις λόγω καθυστερήσεων, ανακλάσεων και σφαλμάτων μεταξύ χρονομέτρων δορυφόρου και δέκτη.

Έτσι, με τη μέτρηση των αποστάσεων από τους δορυφόρους υπολογίζεται η θέση του παρατηρητή. Η θέση του παρατηρητή είναι το σημείο τομής των τριών σφαιρών (εικ. 1.4), που έχουν κέντρο τους δορυφόρους και ακτίνα έχει η καθεμία μια απόσταση που μετρήθηκε (παρατηρούμε ότι ο αριθμός των σφαιρών είναι ίδιος με τον αριθμό των απαιτούμενων δορυφόρων). Καθώς οι δέκτες δεν έχουν ρολόι ακριβείας, ο χρόνος θεωρείται άγνωστος και προσθέτεται μία απόσταση ακόμη από ένα τέταρτο δορυφόρο, με αποτέλεσμα να χρειάζεται και τέταρτη μέτρηση.



Εικόνα 1.4: Το άγνωστο σημείο που αναζητούμε, η θέση της κεραίας του δέκτη είναι στη τομή τριών σφαιρών, κάθε σφαίρα έχει κέντρο ένα δορυφόρο και ακτίνα την απόσταση από το δορυφόρο.

1.4 Λειτουργικά τμήματα

Το Global Positioning System σχηματίζει ένα παγκόσμιο δίκτυο που καλύπτει ξηρά, θάλασσα και αέρα. Χωρίζεται σε τμήματα για να πραγματοποιούνται οι λειτουργίες και ο συντονισμός του, όπως είδαμε και στην αρχή. Ας δούμε αναλυτικότερα τα επιμέρους τμήματα:

- Το διαστημικό τμήμα αποτελείται από 24-34 δορυφόρους, οι οποίοι είναι ομοιόμορφα σ’ όλο τον πλανήτη, μειώνοντας έτσι τις πιθανότητες να αποπροσανατολιστεί

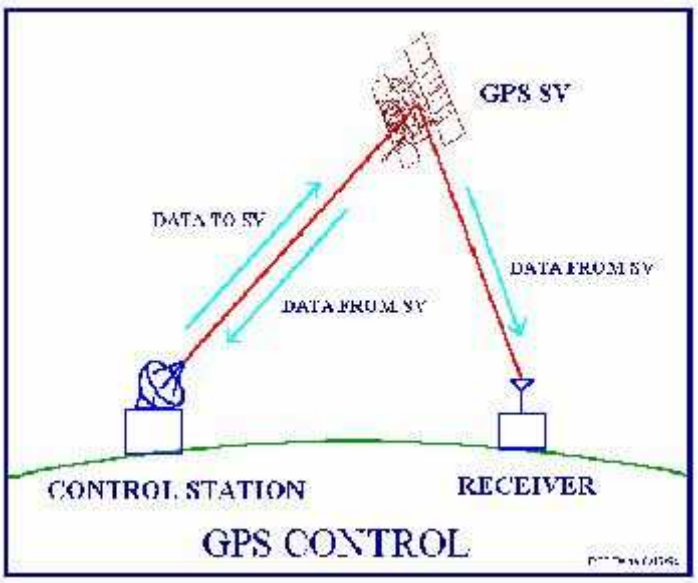
κάποιος. Οι δορυφόροι βρίσκονται σε ύψος 20.189 χιλιομέτρων πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας και εκτελούν δύο περιστροφές γύρω από τη Γη κάθε 24ωρο. Η εκτόξευσή τους πραγματοποιήθηκε από το ακρωτήρι Canaveral και η ηλεκτρική τους ενέργεια παρέχεται από τα φωτοβολταϊκά συστήματα που διαθέτουν (εικ 1.5).

Εικόνα 1.5: Ένας δορυφόρο του συστήματος GPS με φωτοβολταϊκό σύστημα (εικόνα από το διαδίκτυο).

- Το επίγειο τμήμα, το οποίο ελέγχει για προβλήματα των δορυφόρων (εικ. 1.6). Οι έλεγχοι που γίνονται είναι για τη σωστή ταχύτητα, το σωστό υψόμετρο και την επάρκεια δορυφόρων σε ηλεκτρική ενέργεια. Σε αυτό το τμήμα γίνονται οι διορθώσεις λαθών για να μη δίνονται λάθος πληροφορίες στους χρήστες. Αποτελείται από ένα επανδρωμένο και τέσσερα μη επανδρωμένα κέντρα, εγκατεστημένα σε ισάριθμες περιοχές του πλανήτη (Κολοράντο, Χαβάη, Ascension Island, Diego Garcia, Kwajalein). Ο κύριος σταθμός βάσης είναι στις ΗΠΑ στο Κολοράντο. Είναι ο μοναδικός που βρίσκεται στη στεριά, ελέγχει τη σωστή λειτουργία των εναπομεινάντων τεσσάρων σταθμών και τον συντονισμό τους. Οι άλλοι είναι αντίστοιχα στον Ανατολικό Ειρηνικό Ωκεανό, Ατλαντικό Ωκεανό, Ινδικό Ωκεανό, Δυτικό Ειρηνικό Ωκεανό. Η διάταξή τους δεν είναι τυχαία, ακολουθούν μια γραμμή παράλληλη με τα γεωγραφικά μήκη της Γης.

Εικόνα 1.6: Χάρτης απεικόνισης των σταθμών του επίγειου ελέγχου (εικόνα από το διαδίκτυο).

- Το τμήμα τελικού ελέγχου λαμβάνει στίγμα από τους δορυφόρους και τα μετατρέπει σε κατανοητή μορφή (εικ. 1.7). Αποτελείται από χιλιάδες χρήστες δεκτών GPS που χρησιμοποιούνται σε πεζοπορία, σε οχήματα και σε θαλάσσια σκάφη. Διαθέτει ένα ειδικό λογισμικό που λαμβάνει τις πληροφορίες για την γεωγραφική θέση των χρηστών και τις προβάλλει σε ένα χάρτη στην οθόνη της συσκευής.



Εικόνα 1.7: Το τμήμα τελικού ελέγχου μέσω του λογισμικού που διαθέτει λαμβάνει πληροφορίες, τις μετατρέπει σε κατανοητή μορφή και τις προβάλλει σε χάρτη στην οθόνη (εικόνα από το διαδίκτυο).

1.5 Συσκευές GPS

Τα τελευταία χρόνια έχει αυξηθεί η ζήτηση συσκευών GPS λόγω της ύπαρξης φορητών δεκτών GPS για αυτοκίνητα, πεζούς και συσκευών που περιέχουν δέκτη GPS. Οι δέκτες του αποτελούνται από τρία κύρια μέρη που είναι η κεραία, ο κύριος δέκτης, το χειριστήριο και από άλλα μέρη, όπως καλώδια, μπαταρίες, μόντεμ και άλλα ανάλογα με τη χρήση τους.

Η κεραία λαμβάνει από τους δορυφόρους του συστήματος το σήμα, που φθάνει εξασθενημένο, το ενισχύει με τη βοήθεια του προενισχυτή και το στέλνει στο δέκτη για να το επεξεργαστεί. Η κεραία με το δέκτη συνδέεται με ενσύρματα (καλώδιο) ή ασύρματα (bluetooth). Ο δέκτης λαμβάνει σήμα σε μια συχνότητα (L1)ή σε δύο (L1 και L2). Σημαντικό κριτήριο για τη κεραία είναι η ικανότητα της στη λήψη σημάτων διαφορετικής διεύθυνσης από διαφορετικές γωνίες ύψους ανάλογα με τους δορυφόρους που έχει οπτική επαφή.

Ο κύριος δέκτης GPS παραλαμβάνει το δορυφορικό σήμα από την κεραία το αποκωδικοποιεί και εκτελεί όλη την επεξεργασία. Υπάρχουν δέκτες μονής και διπλής συχνότητας L1, L1 και L2 αντίστοιχα. Οι πρώτοι μπορούν να αποκωδικοποιήσουν ένα σήμα ενώ οι δεύτεροι μπορούν να αποκωδικοποιήσουν δύο σήματα. Αυτοί τις διπλής συχνότητας δίνουν γρηγορότερα καλύτερη ακρίβεια. Βέβαια οι σύγχρονοι δέκτες διαθέτουν αρκετά κανάλια που λειτουργούν ταυτόχρονα και κάθε ένα παρακολουθεί ένα δορυφόρο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να παρακολουθούν όλους τους δορυφόρους που βρίσκονται πάνω από το επίπεδο της κεραίας. Ο δέκτης διαθέτει τον μικροεπεξεργαστή και λογισμικά κατάλληλα για την επεξεργασία και διαχείριση δεδομένων (μετατρέπει το σήμα σε κατανοητή μορφή για τους ανθρώπους και το εμφανίζει σε οθόνη, προσδιορισμό θέσης). Υπάρχουν αρκετοί τύποι δεκτών, κάποιοι που ο κύριος δέκτης είναι ενσωματωμένος στη κεραία με ανεξάρτητο χειριστήριο και άλλοι που ο κύριος δέκτης είναι ενσωματωμένος στο χειριστήριο και έχει ανεξάρτητη κεραία (μειώνεται έτσι το μέγεθος της κεραίας). Τέλος, έχουν τη δυνατότητα σύνδεσης με ηλεκτρονικό υπολογιστή για να μεταφέρουν στοιχεία.

Το χειριστήριο είναι η μονάδα επικοινωνίας με το χρήστη. Είναι ένας υπολογιστής με οθόνη και πληκτρολόγιο, που ο χρήστης χρησιμοποιεί για να δώσει εντολές.

Εικόνα 1.8: Γεωδαιτικό GPS.

Εικόνα 1.9: Σύγχρονο σύστημα gps

Εικόνα 1.10: Σύστημα πλοήγησης σε Smartphone.

1.6 Χρήσεις GPS

Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω οι χρήσεις του GPS είναι αρκετές, σε αυτό το κεφάλαιο θα τις αναπτύξουμε. Εφευρέθηκε για **στρατιωτικούς λόγους.** Το GPS χρησιμοποιείται από το στρατό για να βρεθεί με ακρίβεια η θέση του στόχου και να γίνει σωστός έλεγχος δυνάμεων μιας περιοχής. Οι δορυφόροι περιέχουν ανιχνευτές πυρηνικών εκπυρσοκροτήσεων, αυτό είναι ένα τεράστιο πλεονέκτημα των Η.Π.Α. Οι εμπορικοί δέκτες έχουν περιορισμό στην ακρίβεια του σήματος για να μη χρησιμοποιηθούν πύραυλοι όπως αυτοί των Η.Π.Α. Μια από τις πιο σημαντικές του χρήσεις είναι και η **πλοήγηση**. Χρησιμοποιείται σε οχήματα, αεροπλάνα, πλοία (εικ. 1.12) και βοηθά να βρίσκουν τη σωστή κατεύθυνση. Τα τελευταία χρόνια ορισμένα κινητά τηλέφωνα παρέχουν GPS (εικ. 1.11) με αποτέλεσμα να τα χρησιμοποιούν σε πεζοδρομία, ορειβασία καθώς και άτομα με προβλήματα όρασης. Επίσης, είναι χρήσιμο για να αυτοματοποιηθεί γεωργική παραγωγή και άλλες διαδικασίες που απαιτούν χειρισμό οχημάτων. Άλλη χρήσιμη ιδιότητα του GPS είναι ο **εντοπισμός θέσης.** Για παράδειγμα αν

έχει χαθεί κάποιος μπορεί να εντοπιστεί από ομάδες διάσωσης από τη θέση που δίνει το κινητό του. Ο εντοπισμός ενός τηλεφώνου εξαρτάται από τις ικανότητες της συσκευής και όχι από το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο. Επιπλέον δυνατότητα που μας παρέχουν τα GPS είναι **ακριβή ώρα.**

Εικόνα 1.11: Σε αυτή την εικόνα βλέπουμε σε κινητό τηλέφωνο gps που δίνει οδηγίες για τη σωστή κατεύθυνση.

Εικόνα 1.12: Εδώ βλέπουμε πως χρησιμοποιείται η τεχνολογία των GPS σε οχήματα, αεροπλάνα και πλοία.

1.7 Σφάλματα μετρήσεων και ακρίβεια των GPS

Οι μετρήσεις του GPS έχουν κάποια σφάλματα, με αποτέλεσμα για την ακρίβεια των μετρήσεων να απαιτούνται έξι με επτά δορυφόροι. Τα κύρια σφάλματα των μετρήσεων εξαρτώνται από τα παρακάτω:

- Τα χαρακτηριστικά του δέκτη (μιας συχνότητας η δύο).
- Σφάλμα προσδιορισμού των συντεταγμένων της θέσης των δορυφόρων που παρατηρούνται.
- Σφάλματα παρατηρήσεων που διακρίνονται στα εξής:

→ Τα τυχαία σφάλματα που οφείλονται σε τυχαίες εσωτερικές επιδράσεις δεκτών ή καιρικών συνθηκών (θερμοκρασία, ακτινοβολία, υγρασία), σε ανακλάσεις.

→ Τα συστηματικά σφάλματα περιλαμβάνονται οι επιδράσεις της ατμόσφαιρας, των χρονομέτρων.

→ Τα χονδροειδή σφάλματα εξαρτώνται από το χρήστη, δηλαδή, λάθος τοποθέτηση κεραίας δέκτη

- Τον αριθμό των δορυφόρων
- Τη τοποθέτηση τους, όσο μεγαλύτερος είναι ο όγκος του τετράεδρου που σχηματίζεται από τους δορυφόρους και το δέκτη τόσο μικρότερη είναι η πιθανότητα για σφάλμα.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια του GPS:

Όπως κάθε μετρητικό σύστημα, το GPS παρουσιάζει περιορισμούς στη χρησιμοποίηση του και σφάλματα που οφείλονται σε διάφορους παράγοντες οι οποίοι προκαλούν τελικά μείωση της απόδοσής τους. Τέτοιοι παράγοντες είναι:

- Η κακή λήψη των σημάτων από τους δορυφόρους στο δέκτη
- Λάθη στον κώδικα προσδιορισμού της θέσης του δορυφόρου
- Η ακρίβεια των εκπεμπόμενων σημάτων

Η βελτίωση της ακρίβειας του συστήματος GPS μπορεί να γίνει με την βελτίωση των συσκευών που χρησιμοποιούνται.

1.8 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα του GPS

Κάποια από αυτά τα είδαμε και σε προηγούμενα υποκεφάλαια, σε αυτό το μέρος θα τα δούμε όλα συγκεντρωμένα.

Τα πλεονεκτήματα του GPS είναι τα εξής:

- Είναι διαθέσιμο στους χρήστες σε οποιοδήποτε μέρος της γης, κάθε λεπτό της μέρας και σε όλες τις καιρικές συνθήκες.
- Όσον αφορά τον προσδιορισμό της θέσης υπάρχει ένα σφάλμα ελάχιστων μέτρων.
- Οι μετρήσεις δεν έχουν ανθρώπινο λάθος, γίνονται χωρίς τη παρέμβαση ανθρώπου.
- Οι μετρήσεις γίνονται σε αρκετά μικρό χρονικό διάστημα.
- Γίνεται ο προσδιορισμός θέσης ενός σημείου, υπολογίζονται οι συνταγμένες του.
- Οι μετρήσεις από κάθε σημείο είναι ανεξάρτητες.

Τα μειονεκτήματα της χρήσης GPS είναι τα εξής:

- Είναι μεγάλο το κόστος, κάθε σύστημα αποτελείται από τουλάχιστον δύο δέκτες.
- Πρέπει να υπάρχει «οπτική επαφή» δέκτη και δορυφόρου, δε γίνονται μετρήσεις σε απρόσιτα σημεία.
- Δεν γίνεται ολική διόρθωση του χρόνου διάδοσης του σήματος.
- Οι αντανακλάσεις του σήματος, που πολλές φορές γίνονται, αυξάνουν την αβεβαιότητα του προσδιορισμού και κάνουν πολλές φορές αδύνατο το προσδιορισμό θέσης.

1.9 Κριτήρια σχεδιασμού και επιλογή βάσεων GPS

Τα βασικά κριτήρια με τα οποία επιλέγονται οι θέσεις των νέων σημείων του δικτύου είναι να παρατηρούν ελεύθερο ορίζοντα. Πιο συγκεκριμένα να μην επιλέγονται θέσεις που τριγύρω υπάρχουν ψηλά κτίρια ή δέντρα για να εξασφαλίζεται η οπτική επαφή του δέκτη με τον δορυφόρο. Επιπλέον, είναι απαραίτητο να αποφεύγονται θέσεις που είναι κοντά σε κεραίες για λόγους παρεμβολών, ή κοντά σε επιφάνειες που εμφανίζουν μεγάλη ανακλαστικότητα.

Σε ένα δίκτυο GPS το οποίο αποτελείται από N κορυφές μπορούν να σχηματιστούν στο δίκτυο N(N-1)/2 βάσεις. Επιλέγεται ο αριθμός βάσεων που θα μετρηθεί σε μία ή περισσότερες μετρητικές περιόδους. Από αυτέ τις μετρήσεις καθορίζεται η γεωμετρική

μορφή του δικτύου. Οι βάσεις είναι διανύσματα, δηλαδή έχουν μέτρο, διεύθυνση και φορά. Χαρακτηρίζονται ως ανεξάρτητες όταν περιγράφονται με μοναδικό τρόπο ως γραμμικός συνδυασμός των υπολοίπων βάσεων του δικτύου, δηλ:

$$a_1 i_1 + a_2 i_2 + \ldots + a_n i_n = 0 \Rightarrow a_1 = a_2 = \ldots = a_\neg = 0$$

Τα $\chi_1, \chi_2, \ldots, \chi_n$ είναι διανύσματα διανυσματικού χώρου S και για να είναι γραμμικά ανεξάρτητα μεταξύ τους απαιτείται η ικανοποίηση της παραπάνω συνθήκης.

Ανάλογα με τον διαθέσιμο αριθμό δεκτών GPS σε σχέση με τα σημεία ενός δικτύου διακρίνονται τρεις περιπτώσεις:

- Να υπάρχουν δύο δέκτες GPS, οπότε όλες οι βάσεις να είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Απαιτείται μεγαλύτερη χρονική διάρκεια εργασιών πεδίου γιατί σε κάθε μέτρηση βάσης αντιστοιχεί και μια περίοδος
- Να υπάρχουν διαθέσιμοι δέκτες GPS περισσότεροι από 2 αλλά λιγότεροι από το πλήθος των κορυφών N. Σε κάθε περίοδο μετρούνται R(R-1)/2 βάσεις. Επομένως για την ολοκλήρωση της μέτρησης, απαιτείται μεγάλος αριθμός περιόδων. Από περίοδο σε περίοδο υπάρχει αριθμός σημείων που παραμένουν κοινά ώστε να συνδέονται μεταξύ τους οι μετρήσεις . Οι ανεξάρτητες βάσεις που μετρούνται σε κάθε περίοδο είναι R-1 και η επιλογή τους εξαρτάται από τα κριτήρια που θα θέσει ο εκάστοτε χρήστης. Γενικά, προτιμούνται βάσεις μικρού μήκους.
- Να υπάρχουν N δέκτες GPS όσα είναι και τα σημεία του δικτύου. Οι ανεξάρτητες βάσεις είναι N-1. Αυτή η περίπτωση χρησιμοποιείται για την περιγραφή μετακινήσεων τεκτονικών πλακών καθώς και μικρομετακινήσεων. Η κάθε περίοδος διαρκεί μια μέρα και συνολικά οι μετρήσεις διαρκούν μέρες.

Γενικά, κατά τον σχεδιασμό του δικτύου υπάρχουν κάποιοι κανόνες που πρέπει να τηρηθούν:

1. Το σημείο να μετριέται τουλάχιστον δύο φορές σε κάθε εποχή
2. Δημιουργία κλειστών γεωμετρικών σχημάτων για να προσδιορίζονται τα σφάλματα κλεισίματος ανά βρόγχο
3. Όταν το δίκτυο έχει μεγάλο αριθμό κορυφών, πρέπει να χρησιμοποιηθούν δύο δέκτες
4. Για τον έλεγχο της αξιοπιστίας του δικτύου πρεέπει να περιλαμβάνονται μόνιμοι σταθμό GPS
5. Ο χρόνος μέτρησης των βάσεων αυξάνεται σε σχέση με το μέγεθος της βάσης και την αβεβαιότητα που προδιαγράφεται.

Σε μια συνόρθωση δικτύου το βασικό μειονέκτημα χρησιμοποίησης και μη ανεξαρτήτων βάσεων είναι η εκτίμηση των στατιστικών ποσοτήτων και συνεπώς προσδιορίζονται εκτιμήσεις με σημαντικά καλύτερες ακρίβειες σε σχέση με τη συνόρθωση με αποκλειστικά **ανεξάρτητες βάσεις**. Θεωρητικά οι εξαρτημένες βάσεις δεν προσφέρουν καμία χρήσιμη πληροφορία στη συνόρθωση του δικτύου. Από την άλλη μεριά, η επιλογή των ανεξαρτήτων δεν είναι μοναδική και άρα η κάθε λύση θα διαφέρει ανάλογα με τα κριτήρια επιλογής των ανεξάρτητων βάσεων. Στη συνήθη περίπτωση όπου οι ασάφειες φάσης επιλύονται ανά βάση χωριστά, έστω ότι επιλύονται όλες οι δυνατές βάσεις και έπεται η συνόρθωση με γνωστές πλέον τις ασάφειες , είναι εύλογος ο ισχυρισμός ότι όλες οι βάσεις που θα λάβουν μέρος στη συνόρθωση μπορούν να θεωρηθούν ως ανεξάρτητες ή έστω ως '**ψευδοανεξάρτητες**'. Ο ισχυρισμός αυτός τεκμηριώνεται κατά κάποιον τρόπο από το γεγονός ότι σε κάθε επίλυση βάσης ανά περίοδο δεν χρησιμοποιείται ακριβώς ο ίδιος αριθμός παρατηρήσεων που αντιστοιχούν στους ίδιους κοινούς δορυφόρους και ότι πιθανός διαφέρει η στρατηγική επίλυσης σε κάθε βάση. Έτσι πολλές φορές, ιδιαίτερα από τα συνήθη λογισμικά ,ακολουθείται η διαδικασία της επίλυσης των ασαφειών όλων των δυνατών βάσεων και κατόπιν της συνόρθωσης του δικτύου με όλες τις βάσεις που έχουν επιλυθεί. Τελικά η επιλογή των βάσεων είναι θέμα του χρήστη σε σχέση με τις δυνατότητες του λογισμικού που χρησιμοποιεί. Αν δηλαδή ,έχουμε σοβαρούς λόγους να θεωρήσουμε ότι όλες οι δυνατές βάσεις μπορούν να θεωρηθούν ως ανεξάρτητες τότε έχουμε και το πλεονέκτημα της αύξησης των βαθμών ελευθερίας και οι στατιστικοί έλεγχοι είναι πιο αξιόπιστοι.

1.10 Μέθοδοι μέτρησης που χρησιμοποιούνται

Γενικά, οι τρόποι μέτρησης GPS κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το αν ο δέκτης κινείται ή παραμένει στάσιμος στο σημείο μέτρησης, αν προσδιορίζονται απευθείας οι συντεταγμένες του σημείου στο WGS84 ή έμμεσα ως προς ένα άλλο γνωστό σημείο, αν υπολογίζονται οι συντεταγμένες ενός σημείου σε πραγματικό χρόνο ή εκ των υστέρων.

Ανάλογα με το αν ο δέκτης είναι ακινητοποιημένος στο σημείο παρατήρησης, υπάρχουν δύο κατηγορίες προσδιορισμού θέσης, ο στατικός και ο κινηματικός. Στον στατικό προσδιορισμό (Static Positioning) οι δέκτες GPS είναι ακίνητοι στα καθορισμένα σημεία καθ' όλη τη διάρκεια της μέτρησης. Στον κινηματικό προσδιορισμό οι δέκτες GPS κινούνται κατά μήκος μιας διαδρομής και υπολογίζουν συντεταγμένες σε τυχαία σημεία ανά τακτά χρονικά διαστήματα που ορίζει ο χρήστης.

Ανάλογα με το αν το σημείο προσδιορίζεται το σημείο απευθείας στο σύστημα αναφοράς ή αν προσδιορίζεται η σχετική του θέση ως προς άλλο γνωστό σημείο διακρίνονται δύο κατηγορίες, ο απόλυτος και ο σχετικός προσδιορισμός θέσης.

1.10.1 Απόλυτος προσδιορισμός θέσης

Με τον όρο απόλυτο προσδιορισμό θέσης εννοούμε τον προσδιορισμό των συντεταγμένων (X,Y,Z) ενός δέκτη από τις δικές του παρατηρήσεις.

Η λύση πλοήγησης ή ναυσιπλοΐας είναι μια ειδική περίπτωση απόλυτου προσδιορισμού θέσης σε πραγματικό χρόνο. Αν ο δέκτης παραμένει ακίνητος μπορούμε εκ των υστέρων να αξιοποιήσουμε όλες τις εποχές παρατήρησης και να οδηγηθούμε σε αποτελέσματα μεγαλύτερης ακρίβειας, αφού κατά κάποιον τρόπο τείνουν να εξομαλυνθούν διάφορα σφάλματα και ιδίως το σφάλμα της επιλεκτικής διαθεσιμότητας. Στον απόλυτο προσδιορισμό θέσης χρησιμοποιούνται συνήθως παρατηρήσεις ψευδοαποστάσεων (τουλάχιστον τέσσερις δορυφόρους).

1.10.2 Σχετικός προσδιορισμός θέσης

Με τον όρο σχετικός προσδιορισμό θέσης, εννοούμε τον προσδιορισμό του διανύσματος μεταξύ δύο σημείων, έστω Α και Β, δηλαδή των συνιστωσών ($\Delta X_{AB,}$ $\Delta Y_{AB,}$ ΔZ_{AB}). Το διάνυσμα αυτό ονομάζεται **βάση**. Με άλλα λόγια, με τον σχετικό προσδιορισμό προσδιορίζονται οι συντεταγμένες ενός (ή και περισσότερων σημείων) ως προς κάποιο άλλο που θεωρείται γνωστό.

Ο σχετικός προσδιορισμός προϋποθέτει ταυτόχρονες μετρήσεις προς S δορυφόρους από δύο τουλάχιστον δέκτες ($R \geq 2$). Στη συνέχεια θα εννοείται ότι ο σχετικός προσδιορισμός αφορά σε προσδιορισμό εκ των υστέρων και όχι σε πραγματικό χρόνο, διαφορετικά θα γίνεται ειδική αναφορά.

Αντί των πρωτογενών παρατηρήσεων GPS χρησιμοποιούνται συνήθως **γραμμικοί συνδυασμοί** τους με σημαντικά πλεονεκτήματα αλλά και κάποια μειονεκτήματα. Ο κυριότερος λόγος είναι ότι με αυτόν τον τρόπο, απαλείφονται ή ελαχιστοποιούνται τα περισσότερα από τα συστημικά σφάλματα, μερικά από τα οποία είναι δύσκολο να περιγραφούν μαθηματικά πλήρως. Το ίδιο ισχύει και για τα σφάλματα της επιλεκτικής διαθεσιμότητας όταν η κατάσταση αυτή είναι ενεργή. Παράλληλα, επιτυγχάνεται και σημαντική αλγοριθμική ευκολία.

Ως μειονεκτήματα των γραφικών συνδυασμών θα μπορούσαμε να αναφέρουμε τη **μαθηματική συσχέτιση** των παρατηρήσεων η οποία συνεπάγεται δυσκολία προσδιορισμού του στοχαστικού μοντέλου, την αύξηση του θορύβου στις συνθετικές παρατηρήσεις και επίσης τη μείωση της πλεονάζουσας πληροφορίας σε σχέση με την αρχική των πρωτογενών παρατηρήσεων.

1.11 Τεχνικές μετρήσεων στο GPS

Οι δορυφορικές παρατηρήσεις εκφράζονται από μαθηματικές συναρτήσεις της θέσης των δορυφόρων και των σταθμών. Οι δέκτες του σήματος GPS είναι ικανοί να κάνουν μετρήσεις της ψευδοαπόστασης, μετρήσεις Doppler και μετρήσεις της φάσης του φέροντος κύματος.

1.11.1 Μέτρηση ψευδοαπόστασης

Ο προσδιορισμός της θέσης ενός στόχου με την χρήση ενός συστήματος δορυφορικού εντοπισμού βασίζεται στη μέτρηση του μήκους προς τους κινούμενους δορυφόρους. Αυτό το μήκος μπορεί να μετρηθεί με τη μέτρηση χρόνου που χρειάζεται για να φθάσει στον δέκτη σήμα από το δορυφόρο. Το μήκος βρίσκεται από τον πολλαπλασιασμό ταχύτητας με το χρόνο (μήκος = ταχύτητα x χρόνος). Η ταχύτητα αυτή είναι ίση με την ταχύτητα φωτός στο κενό (c =299792458 μέτρα/ δευτερόλεπτο). Οι μετρήσεις ψευδοαπόστασης διαφέρουν από το πραγματικό μήκος δορυφόρου δέκτη για αυτό άλλωστε καλούνται μετρήσεις ψευδοαπόστασης. Αυτό γίνεται εξαιτίας μη συγχρονισμένων χρονομέτρων δεκτών και δορυφόρων, καθυστερήσεων του σήματος στο πέρασμα του από την ατμόσφαιρα και από ανακλάσεις σήματος σε άλλες επιφάνειες μέχρι να ληφθεί από το δέκτη.

1.11.2 Μέτρηση Doppler

Σύμφωνα με το φαινόμενο Doppler η συχνότητα ενός ραδιοκύματος που εκπέμπεται από μια πηγή αλλάζει ανάλογα με την κίνηση της πηγής ως προς τον παρατηρητή ή την κίνηση του παρατηρητή ή και των δύο. Η τεχνική στην οποία βασίζονται τα συστήματα Doppler είναι η εξής: συγκρίνεται η σταθερή συχνότητα (που είναι γνωστή) των ραδιοκυμάτων που εκπέμπονται από κάποιο δορυφόρο με την αντίστοιχη συχνότητα των ραδιοκυμάτων που δέχεται ένας σταθμός.

Έστω ότι η σταθερή συχνότητα που εκπέμπεται από το δορυφόρο είναι f_s και η ονομαστική συχνότητα που παράγει ο δέκτης είναι f_g και η συχνότητα που λαμβάνει ο δορυφόρος από τον παρατηρητή είναι f_r . Όσο ο δορυφόρος πλησιάζει τον παρατηρητή, η f_r είναι μεγαλύτερη της f_s, ίση με την f_s στην εγγύτερη απόσταση και μικρότερη της f_s, όταν ο

δορυφόρος απομακρύνεται από τον παρατηρητή. Η συχνότητα f_g επιλέγεται από 5-10 Hz, μεγαλύτερη της f_s και πάντοτε μεγαλύτερη της f_r. Συνήθως το GPS μετράει τους κύκλους της συχνότητας που προκύπτει από την συμβολή των f_g και f_r. Οπότε μετρώντας την μεταβολή Δf, μπορεί να υπολογίσει την διαφορά της απόστασης του δορυφόρου από έναν σταθμό μεταξύ δύο χρονικών στιγμών. Η μέθοδος Doppler μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για απολυτό προσδιορισμό θέσης (ακρίβεια μερικών μέτρων) και για σχετικό προσδιορισμό θέσης μεταξύ σημείων (ακρίβεια μερικών ppm).

1.11.3Μέτρηση συνεχούς φάσης του φέροντος κύματος

Εκτός από τις μετρήσεις ψευδοαποστάεων οι δέκτες μπορούν να πραγματοποιήσουν και μέτρηση φάσης του φέροντος κύματος. Αυτό μας δίνει τη δυνατότητα να υπολογίζουμε το μήκος μεταξύ δορυφόρου και δέκτη σα συνάρτηση των μετρούμενων κύκλων φάσης του μήκους κύματος λ του χρησιμοποιούμενου δορυφορικού σήματος. Ο δέκτης του συστήματος μπορεί να μετρήσει με ακρίβεια τη στιγμιαία κλασματική φάση του φέροντος κύματος τη στιγμή λήψης του σήματος. Δε μπορεί όμως να μετρήσει τον ακέραιο αριθμό κύκλων (μήκη κύματος) που μεσολαβούν από το δορυφόρο μέχρι τον δέκτη.

Στο μέγεθος που μετράται πρέπει να προστεθεί ο ακέραιος αριθμός n των μηκών κύματος. Ο άγνωστος αυτός αριθμός ονομάζεται ασάφεια φάσης. Επιλύονται συστήματα εξισώσεων, τα οποία δημιουργούνται από τις παρατηρήσεις, περιλαμβάνουν και άλλες άγνωστες παραμέτρους. Από την επίλυση αυτών των συστημάτων προσδιορίζεται και η ασάφεια φάσης.

Οι μετρήσεις φάσης φέροντος κύματος είναι ακριβέστερες κατά δυο τουλάχιστον τάξεις μεγέθους των αντίστοιχων μετρήσεων ψευδοαπόστασης. Για αυτό αποτελούν το μοναδικό τύπο μετρήσεων μικρής αβεβαιότητας με το δορυφορικό σύστημα. Χρησιμοποιούνται πάντα σε σχετικό προσδιορισμό θέσης. Αντιθέτως στις μετρήσεις ψευδοαποστάσεων μπορεί να γίνει προσδιορισμός προσεγγιστικών συντεταγμένων και συγχρονισμός ρολογιών

1.12 Γενικές εφαρμογές GPS

Η πλέον προφανής εφαρμογή GPS είναι η δορυφορική πλοήγηση για οχήματα, αεροσκάφη και πλοία. Παρέχει σε όλους όσους διαθέτουν έναν λήπτη GPS, τη δυνατότητα να προσδιορίζουν τη ταχύτητα και τη θέση τους στο χάρτη, στον αέρα ή στη θάλασσα, με μεγάλη ακρίβεια. Οι οδηγοί μπορούν να χρησιμοποιούν φορητές συσκευές δορυφορικής

πλοήγησης αυτοκινήτου για να ακολουθήσουν μία διαδρομή ή να επιλέγουν διαφορετικά δρομολόγια για την παράκαμψη κυκλοφοριακών προβλημάτων και με το εγκαταστημένο πρόσθετο λογισμικό να λαμβάνουν ενημερώσεις και προειδοποιήσεις σχετικές με τις θέσεις καμερών ασφάλειας.

Το GPS χρησιμοποιείται από πολλούς και διάφορους χρήστες. Άτομα που πεζοπορούν και άλλοι που ‘‘βολεύονται’’ από τη χρήση του, μπορούν να χρησιμοποιούν δέκτες GPS για να ελέγχουν κατά πόσον ακολουθούν την επιλεγμένη διαδρομή και να επισημαίνουν σημεία συνάντησης πάνω σε αυτή. Τα άτομα που συμμετέχουν στο παιχνίδι της ‘γεωαναζήτησης’, ένα είδος κυνηγιού θησαυρού της ψηφιακής εποχής που χρησιμοποιεί ακριβή σήματα GPS για να βοηθήσει τους παίκτες να εντοπίσουν μία κρυψώνα. Ακόμα οι υπηρεσίες πρώτων βοηθειών, μπορούν να χρησιμοποιήσουν τους δέκτες GPS όχι μόνο για να προσδιορίζουν τη διαδρομή προς το σημείο ενός γεγονότος πιο γρήγορα, αλλά και για να εντοπίζουν το σημείο ενός ατυχήματος παρέχοντας στο επικουρικό προσωπικό τη δυνατότητα να εντοπίσει γρήγορα το σημείο. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για επιχειρήσεις έρευνας και διάσωσης στη θάλασσα και υπό ακραίες καιρικές συνθήκες στην ξηρά, όταν ο χρόνος μπορεί να αποτελεί ζήτημα ζωής ή θανάτου.
Πιο συγκεκριμένα οι δέκτες του GPS χρησιμοποιούνται στα παρακάτω:

- Στο προσδιορισμό συντεταγμένων αστικών δικτύων
- Στις αποτυπώσεις περιοχών
- Σε χαράξεις τεχνικών έργων
- Στη μελέτη παραμορφώσεων μεγάλων τεχνικών έργων
- Στον εντοπισμό, στη καθοδήγηση και στη παρακολούθηση οχημάτων.
- Στη πλοήγηση σκαφών, αεροσκαφών και πεζών.

1.12.1 Εφαρμογές του GPS στη Γεωδαισία και την Γεωδυναμική

Η ακρίβεια προσδιορισμού του μήκους βάσεων με τη χρησιμοποίηση του GPS ανέρχεται στα 0,1ppm. Δηλαδή στην μέτρηση μιας απόστασης περίπου 300 km το σφάλμα είναι 3cm. Τέτοιες ακρίβειες καθιστούν ικανοποιητική την εφαρμογή του GPS σε περιπτώσεις γεωδυναμικής, όπως είναι:

1. η παρακολούθηση της μικρομετακίνησης τεκτονικών πλακών
2. η παρακολούθηση της μικρομετακίνησης σημείων σε σεισμογενής περιοχές πριν και μετά από κάθε σεισμό
3. η παρακολούθηση της παραμόρφωσης της επιφάνειας του εδάφους που προκαλείται πριν από την έκρηξη κάποιου ηφαιστείου.

Οι μετρήσεις του GPS με δέκτες είναι γρήγορες, δεν επηρεάζονται από τις καιρικές συνθήκες και δεν χρειάζονται πολυμελές προσωπικό. Συνήθης εφαρμογή του GPS παρατηρείται στην παρακολούθηση μεγάλων γεωλογικών ρηγμάτων με τη βοήθεια σταθμών.

Ένα βασικό πλεονέκτημα του GPS είναι ότι παρέχει τρισδιάστατη πληροφορία (x,y,z). Αυτό το πλεονέκτημα σε συνδυασμό με την ακρίβεια που παρέχει, είναι ικανά για την παρακολούθηση παραμορφώσεων τεχνικών έργων και εδαφών (π.χ υδροηλεκτρικά φράγματα). Άλλο ένα πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα μόνιμης εγκατάστασης δέκτη ή δεκτών σε επιλεγμένα σημεία που καταγράφουν τη θέση με τηλεχειρισμό και online σύνδεση.

Τα παραπάνω ισχύουν και για την παρακολούθηση μικρομετακινήσεων του εδάφους.

Μία παρόμοια εφαρμογή είναι ο προσδιορισμός των καθιζήσεων του εδάφους σε υπόγεια ορυχεία και γεωτρήσεις. Αυτές οι καθιζήσεις προκαλούνται από την απομάκρυνση των συστατικών της Γης. Η σύγκριση της απόδοσης GPS σε σχέση με την κλασική **Τεχνική Γεωδαισία** φαίνεται να αποδεικνύει την καλύτερη απόδοση του GPS.

Μία άλλη εφαρμογή του που δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα είναι ο εντοπισμός καθιζήσεων σε θαλάσσιες κατασκευές.

Από την άλλη, υπάρχει και μία εφαρμογή του GPS που περιέχει προβλήματα. Είναι η παρακολούθηση των μικρομετακινήσεων σε τεχνικά έργα που βρίσκονται σε αστικό δομημένο περιβάλλον και χρειάζονται πολλά σημεία ελέγχου και αρκετή μελέτη. Υπάρχει όμως και εδώ μεγάλη βελτίωση στους δέκτες που λαμβάνουν σήματα από το GPS και το GLONASS με 48 δορυφόρους.

Σήμερα χρησιμοποιούμε το GPS και για απλές γεωδαιτικές εργασίες, όπως η μέτρηση των στάσεων και η αποτύπωση ορίων ιδιοκτησιών. Θα πρέπει όμως εδώ να γίνει παρατήρηση ότι το GPS παρέχει διανύσματα στο χώρο και τρισδιάστατες διαφορές συντεταγμένων. Για να χρησιμοποιηθούν αυτά τα στοιχεία στην Ελλάδα πρέπει να γίνουν οι κατάλληλες αλλαγές datum και προβολικών συστημάτων.


Εικόνες 1.13 και 1.14: Το GPS στην αποτύπωση ορίων ιδιοκτησίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΣ ΘΕΟΔΟΛΙΧΟΣ (RTS)

2.1 Βασικές αρχές λειτουργίας

Το RTS (Robotic Total Station) είναι γεωδαιτικό όργανο νέας γενιάς και αποτελεί την εξέλιξη του ηλεκτρονικού θεοδολίχου. Βασίζεται στον εφοδιασμό του ηλεκτρονικού θεοδόλιχου με σερβοκινητήρα και έναν μικροεπεξεργαστή που επιτρέπουν είτε προγραμματισμένες σκοπεύσεις, είτε παρακολούθηση και μέτρηση των συντεταγμένων του κινητού στόχου. Η λειτουργία του βασικά στηρίζεται στην εκπομπή μιας ακτίνας laser, η οποία ανακλάται σε έναν ανακλαστήρα, επιστρέφει στο όργανο και μετράται η θέση του κινούμενου ή σταθερού ανακλαστήρα σε τοπικό σύστημα πολικών συντεταγμένων (απόσταση μεταξύ οργάνου και ανακλαστήρα και η γωνία της ακτίνας ως προς τον κατακόρυφο και κάποιον οριζόντιο άξονα αναφοράς). Στη συνέχεια, οι συντεταγμένες μετασχηματίζονται σε καρτεσιανό σύστημα αναφοράς που ορίζεται από τον χρήστη. (Π. Ψιμούλης 2009)

Ο ρομποτικός θεοδόλιχος άρχισε να χρησιμοποιείται τα τελευταία χρόνια για τις ανάγκες χαράξεων τεχνικών έργων αλλά και ως σύστημα παρακολούθησης κτιρίων (π.χ. παρακολούθηση μετακινήσεων κτιρίων που βρίσκονται σε περιοχές διάνοιξης σήραγγας), φραγμάτων κλπ. καθώς επίσης και στην παρακολούθηση της εξέλιξης πολλών φυσικών φαινομένων όπως η ηφαιστειακή δραστηριότητα , η κίνηση κατολισθήσεων και οι θαλάσσιοι κυματισμοί.

Εικόνα 2.1: Ρομποτικός θεοδόλιχος της Trimble (αριστερά) και της Leica (δεξιά)

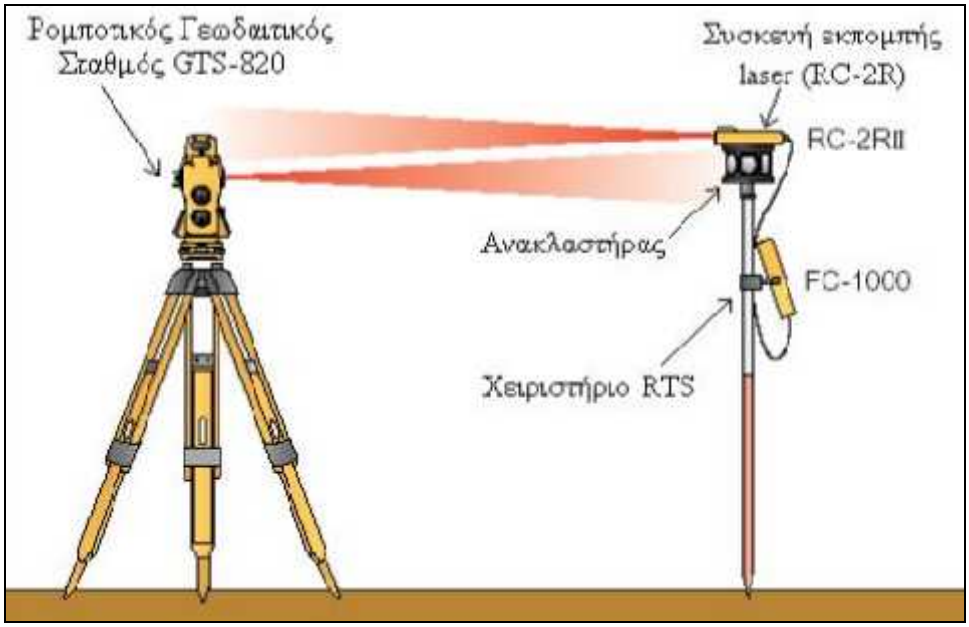
Τα χαρακτηριστικά που διαφοροποιούν τον ρομποτικό θεοδόλιχο από τους κοινούς γεωδαιτικούς σταθμούς και του δίνουν τη δυνατότητα παρακολούθησης μεγαλύτερου πλήθους σημείων είναι τα εξής:

- Μπορεί να περιστρέφεται προγραμματισμένα και αυτόματα προς όλες τις διευθύνσεις και κλίσεις με την βοήθεια ενός σερβο-κινητήρα περιστροφής του τηλεσκοπίου και να εκτελεί προγραμματισμένες μετρήσεις (αυτόματη περιστροφή τηλεσκοπίου)

- Χάρη σε ένα ειδικό σύστημα laser που διαθέτει μπορεί να εντοπίζει της ανακλαστήρες σαρώνοντας επιλεγμένη περιοχή σκόπευσης με βάση τη δυνατότητα κίνησης που του δίνει ο σερβο-κινητήρας

- Σύμφωνα με τις εντολές του χρήστη μπορεί να καταγράφει μετρήσεις αυτόματα (ανά τακτά χρονικά διαστήματα ανά συγκεκριμένη υψομετρική διαφορά ή και ανά τακτές αποστάσεις). Οι μετρήσεις αποθηκεύονται σε εσωτερική μνήμη ή με κατάλληλη σύνδεση σε ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Όλοι οι ρομποτικοί θεοδόλιχοι διαθέτουν την ίδια βασική λειτουργία, μπορεί να διαφέρουν στα τμήματα από τα οποία αποτελούνται, ορισμένοι συνοδεύονται από συσκευή-πομπό η οποία επιτρέπει να γίνεται ο εντοπισμός του ανακλαστήρα αυτόματα (Π. Ψιμούλης 2009) (Topcon, εικόνα 2.2)

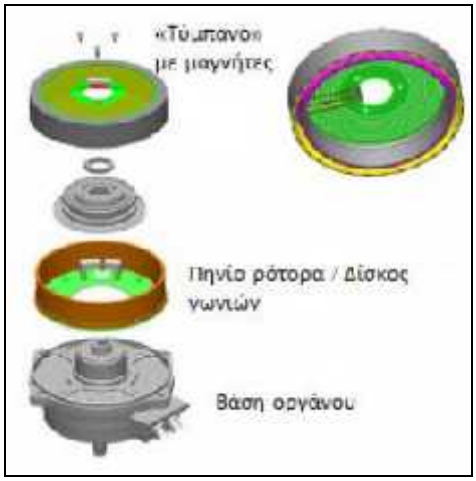


Εικόνα 2.2: Σύστημα Εντοπισμού του RTS από τον ανακλαστήρα της εταιρείας Topcon

2.1.1 Αυτόματη περιστροφή τηλεσκοπίου

Η αυτόματη περιστροφή τηλεσκοπίου υλοποιείται με τρεις διαφορετικές τεχνολογίες.

Η πρώτη αποτελεί ευρεσιτεχνία της εταιρείας Trimble και είναι γνωστή με το όνομα MagDrive® (εικόνα 2.3). Η βασική αρχή λειτουργίας στηρίζεται στη χρήση ενός ομοαξονικά τοποθετημένου τυμπάνου με ενσωματωμένους μαγνήτες, το οποίο περιστρέφεται γύρω από ένα πηνίο σταθερά συνδεδεμένο με τη βάση του οργάνου. Στο πηνίο διέρχεται ηλεκτρικό ρεύμα που παράγει ηλεκτρομαγνητική δύναμη η οποία περιστρέφει το τύμπανο με τους μαγνήτες, το οποίο με τη σειρά του είναι σταθερά συνδεδεμένο με το όργανο. Πάνω στον ίδιο μηχανισμό είναι επίσης ομοαξονικά τοποθετημένος και ο δίσκος ανάγνωσης των γωνιών. Αντίστοιχα επιτυγχάνεται και η περιστροφή γύρω από τον δευτερεύοντα άξονα του οργάνου. Βασικό πλεονέκτημα αυτού του συστήματος είναι, αφενός είναι ότι η ίδια διάταξη μπορεί να επιταχύνει ή να επιβραδύνει γωνιακά την κίνηση του οργάνου χωρίς να γίνεται απαραίτητη η χρήση επιπλέον μηχανισμού επιβράδυνσης, γεγονός που συνεπάγεται απλούστερα μηχανικά μέρη, μικρότερο αναρτώμενο βάρος, και μειωμένη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και αφετέρου, ότι η συγκεκριμένη τεχνολογία, έχει εν γένει την ικανότητα επίτευξης πολύ υψηλών γωνιακών ταχυτήτων, συγκρινόμενη με την κίνηση των κλασικών σερβομηχανισμών (Lemmon, Jung, 2005).



Εικόνα 2.3: Τεχνολογία MagDrive®

Η δεύτερη τεχνολογία εισήχθη και χρησιμοποιείται από τις εταιρείες Topcon και Leica Geosystems και βασίζεται στη χρήση σερβομηχανισμών (servomotors), οι οποίοι είναι ηλεκτρικοί κινητήρες με δυνατότητα πλήρους ελέγχου της ταχύτητας και της γωνίας περιστροφής του άξονά τους. Οι μηχανισμοί αυτοί δεν είναι συνδεδεμένοι με ομοαξονικά με

τον πρωτεύοντα και δευτερεύοντα άξονα των οργάνων, αλλά συνδέονται με αυτούς μέσω ενός συστήματος μετάδοσης της κίνησης (gearbox).

Τα βασικότερα μειονεκτήματά τους σε σχέση με την τεχνολογία MagDrive® είναι ότι με την προσθήκη επιπλέον μηχανικών μερών, αυξάνεται το βάρος και η πολυπλοκότητα του συστήματος, ενώ απαιτείται μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας για τη λειτουργία τους. Σημαντικό όμως πλεονέκτημα των σερβομηχανισμών είναι το χαμηλότερο κόστος τους λόγω της ευρείας χρήσης τους σε πληθώρα μηχανημάτων.

Η τρίτη τεχνολογία η οποία εισήχθη πρόσφατα από την εταιρεία Leica βασίζεται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει απειροελάχιστες μικροκινήσεις της τάξης των νανομέτρων στον οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα του γεωδαιτικού σταθμού με πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Επιπλέον έχει πολύ αθόρυβη κίνηση και αρκετά μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής (180º/sec) από τους μέχρι σήμερα αντίστοιχους γεωδαιτικούς σταθμούς (πιν. 2.1). Τέλος, μια καινοτομία αυτών των σταθμών είναι ότι μπορούν να περιστραφούν από τον χρήστη με τρεις διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποιοι ρομποτικοί σταθμοί με τις αντίστοιχες ταχύτητες περιστροφής τους (ΒΓ Σπυράκης 2011).

Πίνακας 2.1: Μέγιστες ταχύτητες περιστροφής

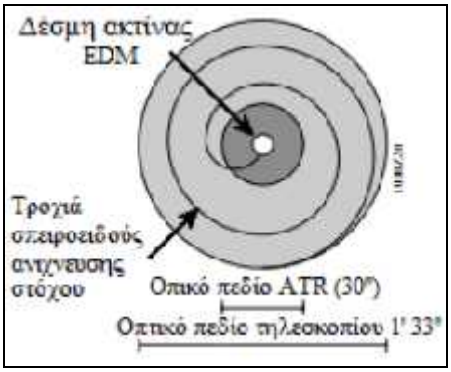
Γεωδαιτικός σταθμός	**Μέγιστη ταχύτητα περιστροφής**
Leica TS30	180 º/sec
Trimble VS	115º/sec
Trimble S6	115º/sec
Topcon IS	85º/sec
Leica TPS-1200	45º/sec
Topcon GTP-8200	50º/sec

2.1.2 Αυτόματη αναγνώριση στόχου (ATR-Automatic Target Recognition)

Βασιζόμενοι οι κατασκευαστές των οργάνων στην αυτόματη κίνηση του τηλεσκοπίου, το επόμενο βήμα αφορά στην δυνατότητα αναγνώρισης ενός γεωδαιτικού στόχου και στην παρακολούθησή του όσο είναι σε κίνηση. Όπως και στην παραπάνω περίπτωση, οι εταιρείες κατασκευής των οργάνων, έχουν αναπτύξει δύο διαφορετικές τεχνολογίες αυτόματης αναγνώρισης και παρακολούθησης στόχου, το σύστημα ενεργητικής αναγνώρισης στόχου και το σύστημα παθητικής αναγνώρισης στόχου.

Το σύστημα αναγνώρισης στόχου βασίζεται στην εκπομπή μιας αόρατης ακτίνας laser χαμηλής ισχύος από το όργανο, η οποία ανακλώμενη στο στόχο, επιστρέφει στο όργανο πάνω στον ίδιο άξονα εκπομπής της (ομοαξονικά). Κατόπιν αφού διαχωριστεί από τις υπόλοιπες ακτίνες (ακτίνα EDM και ορατό φως) προσπίπτει σε μια διάταξη CCD (Charged Coupled Device). Ανάλογα με τη θέση της προσπίπτουσας ακτίνας laser ως προς το κέντρο της διάταξης CCD, δίνεται εντολή στους σερβομηχανισμούς να εκτελέσουν μικροδιορθώσεις στις γωνιακές θέσεις του οργάνου (οριζόντια και κατακόρυφη γωνία), έως ότου η απόκλιση της προσπίπτουσας ακτίνας από τον σκοπευτικό άξονα δηλαδή από το κέντρο του σταυρονήματος να μην ξεπερνά μια προκαθορισμένη τιμή.

Πρακτικά για την έναρξη της λειτουργίας της αυτόματης αναγνώρισης στόχου, απαιτείται ο αρχικός εντοπισμός του στόχου από τον παρατηρητή. Αν ο ανακλαστήρας βρίσκεται στο 1/3 του οπτικού πεδίου του τηλεσκοπίου του γεωδαιτικού σταθμού, η αναγνώριση γίνεται αυτόματα και στιγμιαία. Σε διαφορετική περίπτωση το όργανο εκτελεί σπειροειδής κινήσεις διάρκειας 2-4 sec, απομακρυνόμενο από το κέντρο του άξονα σκόπευσης, έως ότου μπορέσει να λάβει την ανακλώμενη από τον στόχο ακτίνα (σχ 2.4). Εάν κάτι τέτοιο δεν καταστεί εφικτό, δηλαδή εάν ο στόχος είναι εκτός του πεδίου του τηλεσκοπίου, τότε η διαδικασία αναγνώρισης στόχου αποτυγχάνει. Η εμβέλεια λειτουργίας της διαδικασίας της αυτόματης αναγνώρισης στόχου εξαρτάται από τον γεωδαιτικό σταθμό, τον ανακλαστήρα, τις ατμοσφαιρικές συνθήκες και στη μέγιστη τιμή της φτάνει τα 3000m.



Σχήμα 2.4: Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος σπειροειδούς ανίχνευσης στόχου Leica TCA-1800

Στην περίπτωση που η οριζόντια και η κατακόρυφη γωνιακή απόσταση στο κέντρο του σταυρονήματος από το κέντρο του στόχου είναι μικρότερη από 50, τότε το όργανο υπολογίζει τη διόρθωση και παράγει τις τιμές των διευθύνσεων διορθωμένες, χωρίς να βρίσκεται στο κέντρο του στόχου. Έτσι, ενώ η μέτρηση λαμβάνεται έκκεντρα η καταγραφή της τιμής είναι η σωστή.

Η αβεβαιότητα με την οποία τοποθετείται το κέντρο του σταυρονήματος στο κέντρο του ανακλαστήρα από 2mm έως 5mm και εξαρτάται από

- την εσωτερική ακρίβεια του ATR, η οποία εξαρτάται κυρίως από την ποιότητα της διάταξης CCD που διαθέτει το RTS

- την εξωτερική ακρίβεια του ATR, που είναι συνάρτηση του τύπου του ανακλαστήρα και των ατμοσφαιρικών συνθηκών τη στιγμή της μέτρησης και της απόστασης του ανακλαστήρα από το RTS (Λάμπρου, Πανταζής, 2010).

Στην περίπτωση της παθητικής αναγνώρισης, όπως συμβαίνει με το ρομποτικό σταθμό GTS-8200 της εταιρείας Topcon, το όργανο λειτουργεί πλέον ως δέκτης μιας ακτινοβολίας που εκπέμπεται από τον στόχο (ενεργός στόχος) και όχι από το ίδιο το όργανο. Επίσης στα παθητικά συστήματα, η ακτίνα δεν εκπέμπεται ομοαξονικά με τον άξονα σκόπευσης, αλλά παρουσιάζει μια εκκεντρότητα ως προς αυτόν, με αποτέλεσμα να μην επιτρέπεται η λειτουργία του συστήματος σε δεύτερη θέση τηλεσκοπίου.

2.1.3 Κλείδωμα και παρακολούθηση κινούμενου στόχου (Auto Lock Mode)

Από τις πιο σημαντικές λειτουργίες των ρομποτικών σταθμών που τους κάνει να ξεχωρίζουν από τους απλούς είναι το κλείδωμα και η παρακολούθηση στόχου η οποία αποτελεί πραγματικό εργαλείο για τον Τοπογράφο Μηχανικό αφού έχει πολλές εφαρμογές.

Σε αυτή τη λειτουργία αφού ανιχνευτεί ο στόχος, πραγματοποιηθεί η πρώτη μέτρηση και αφού ενεργοποιηθεί στον σταθμό η κατάσταση παρακολούθησης στόχου, τότε αυτό κλειδώνει τον στόχο και ανάλογα με τις δυνατότητες του ρομποτικού σταθμού μπορεί να συνεχίσει τη λήψη μετρήσεων ανά κάποιο χρονικό διάστημα ή ανά τακτή απόσταση. Κατά τη λειτουργία παρακολούθησης στόχου (tracking) , η διαδικασία αναγνώρισης στόχου επαναλαμβάνεται με τη μορφή βρόγχου, ενώ εμπλέκονται στη διαδικασία ειδικοί αλγόριθμοι παρεμβολής.

Η λειτουργία της αυτόματης εύρεσης και παρακολούθησης στόχου βρίσκει εφαρμογή σε χαράξεις τεχνικών έργων οδοποιίας, όπου με αυτόν τον τρόπο παρέχεται η δυνατότητα καθοδήγησης του μηχανήματος διάνοιξης μιας οδού (Λάμπρου, Πανταζής, 2010).

2.1.4 Αυτόματα ελεγχόμενη λειτουργία (Robotic) μέσω ασύρματου τηλεχειριστηρίου

Με την προσθήκη του χαρακτηριστικού του αυτόματου τηλεχειριστηρίου του οργάνου σε πραγματικό χρόνο καθιστά τους γεωδαιτικούς σταθμούς αυτόματα ελεγχόμενους από απόσταση (robotic).

Ο χειρισμός τους μπορεί να γίνεται για πεπερασμένη απόσταση, της τάξης των 800m, μέσω ενός πληκτρολογίου, το οποίο έχει τη δυνατότητα να αποσπάται από το όργανο και να τοποθετείται πάνω σε ειδικό στύλο μαζί με τον ανακλαστήρα (σχ. 2.5).

Σχήμα 2.5: Ασύρματο τηλεχειριστήριο Leica

Η επικοινωνία του πληκτρολογίου με το RTS γίνεται ασύρματα μέσω ενός radio-modem, που είναι ενσωματωμένο στον ρομποτικό θεοδόλιχο. Έτσι, οι μετρήσεις μπορούν να πραγματοποιούνται από μόνο ένα άτομο. Το όργανο παρακολουθεί τον ανακλαστήρα που κινείται με τον στοχοφόρο. Λαμβάνοντας εντολή από αυτόν εκτελεί την μέτρηση αποθηκεύοντάς την αυτόματα στην μνήμη του. Με αυτόν τον τρόπο ο χρήστης μπορεί να εκτελέσει εργασίες όπως η χάραξη ή η αποτύπωση σημείων, από τη θέση του κατάφωτου. (ΒΓ Σπυράκης 2011)

2.1.5 Αμφιπρισματικός ανακλαστήρας 360º

Το χαρακτηριστικό αυτού του τύπου πρίσματος είναι ότι δεν είναι απαραίτητη η μετωπική στροφή προς τον θεοδόλιχο. Ένας αμφιπρισματικός ανακλαστήρας, όπως στο σχήμα 2.6, διαθέτει έξι πρίσματα, τοποθετημένα ομοαξονικά σε ίσες γωνίες, με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι δυνατή η επιστροφή της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στο RTS, ανεξάρτητα από την γωνία πρόσπτωσης. (ΒΓ Σπυράκης)

Σχήμα 2.6: Αμφιπρισματικός ανακλαστήρας Leica 360º

2.2 Προδιαγραφές ρομποτικών θεοδόλιχων

Ένα βασικό στοιχείο που πρέπει να εξετάσει κανείς με προσοχή πριν προβεί στην αγορά ρομποτικού θεοδόλιχου είναι οι προδιαγραφές που δίνονται από τον κατασκευαστή και οι προοπτικές βελτίωσης ή εξέλιξης του οργάνου. Οι εταιρείες που κατασκευάζουν ρομποτικούς θεοδόλιχους παγκοσμίως είναι τέσσερις : η Leica, η Trimble, η Topcon και η Sokkia. Στον παρακάτω πίνακα 2.2 αναφέρονται οι προδιαγραφές για χαρακτηριστικούς τύπους ρομποτικών θεοδόλιχων των παραπάνω τεσσάρων γνωστών εταιρειών :

Πίνακας 2.2: Προδιαγραφές για χαρακτηριστικούς τύπους ρομποτικών θεοδόλιχων

Τύπος RTS	**Συχνότητα Καταγραφής(Hz)**	**Ακρίβεια Μέτρησης (mm)**	**Μέγιστη Απόσταση Μέτρησης (m)**
Leica TCA1200	έως και 10	5 ± 2ppm	3000
Trimble S6	έως και 2.5	5 ± 2ppm	3000
Trimble 5605	έως και 2.5	10 ± 3ppm	2500
Topcon GTS-900A	έως και 5	2 ± 2ppm	3000
Sokkia SRX	-	5 ± 2ppm	5000

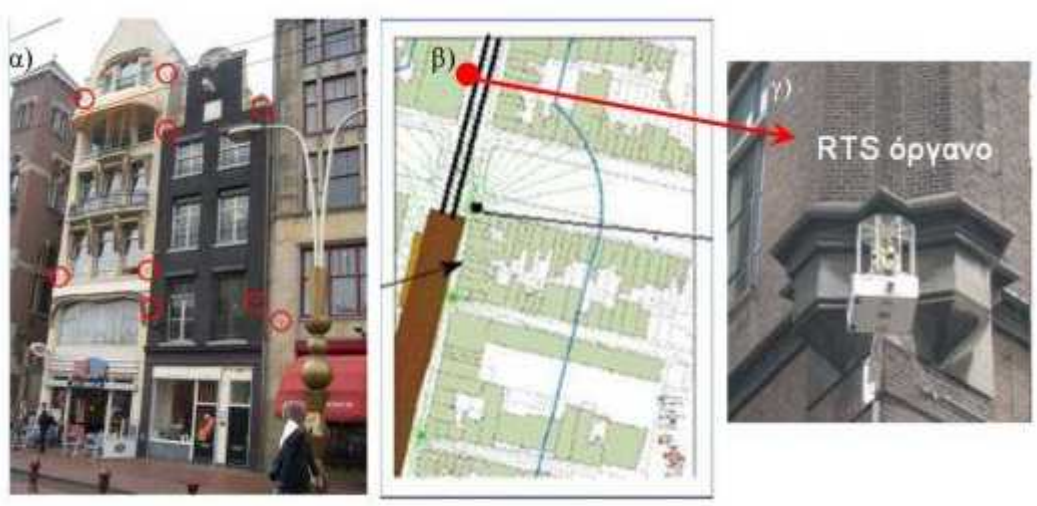
2.3 Εφαρμογές του RTS στην καταγραφή αργών-στατικών μετακινήσεων

Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του RTS (προγραμματισμένη περιοδική μέτρηση, μέτρηση κινούμενου στόχου) το καθιέρωσαν σε πολλές τοπογραφικές εφαρμογές (χάραξη, οδοποιία, έλεγχος σταθερότητας κτλ.) κάνοντας τις εργασίες πιο αυτοματοποιημένες, οικονομικές και γρήγορες. Ιδιαίτερα η δυνατότητα του εντοπισμού ανακλαστήρων και της αυτόματης μέτρησης βρήκε εφαρμογή σε δίκτυα ελέγχου μετακινήσεων.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η συστηματική καταγραφή των μετακινήσεων των κτιρίων που βρίσκονται στην περιοχή της διάνοιξης νέας σήραγγας του μετρό στο Άμστερνταμ. (Kaalberg et al., 2003, σχ 2.7). Ένα δίκτυο RTS τοποθετήθηκε σε θέσεις κατάλληλες ώστε να μπορούν να στοχεύουν τις προκαθορισμένες θέσεις ελέγχου στις προσόψεις των κτιρίων, ώστε να ελέγχεται αν και κατά πόσο μετακινούνται τα κτίρια πριν, κατά τη διάρκεια της διάνοιξης της σήραγγας, και μετά την αποπεράτωση των εργασιών. (Kontogianni et al., 2005). Όμοιες εφαρμογές αφορούν παρακολούθηση φράγματος κατολισθήσεων κτλ.

Ο πρόσφατος εφοδιασμός ορισμένων RTS με σερβοκινητήρα, με υψηλή συχνότητα δειγματοληψίας (ονομαστική συχνότητα ακόμη και 10Hz) δίνει την δυνατότητα να καταγράφονται μετακινήσεις κατασκευών υπό δυναμικές φορτίσεις (ανεμοπίεση κτλ).

Λόγω όμως της πρόσφατης εισαγωγής του RTS είναι λίγες οι σχετικές εφαρμογές.



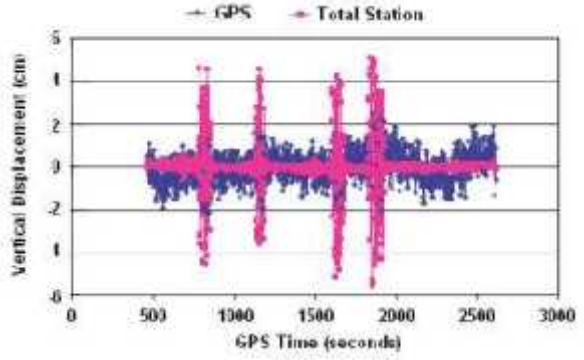
Σχήμα 2.7: α)Σημεία ελέγχου κτιρίων σε περιοχή διάνοιξης σήραγγας του μετρό του Άμστερνταμ. β)Περιοχή ελέγχου ενός σταθμού RTS που καταγράφει τις μετακινήσεις των ορατών σημείων ελέγχου. γ) Σταθμός RTS στην γωνία του οικοδομικού τετραγώνου, τοποθετημένος κατάλληλα για να προστατεύεται από βανδαλισμούς και καιρικές συνθήκες.

2.4 Εφαρμογές παρακολούθησης δυναμικών μετακινήσεων κατασκευών με χρήση RTS

Στη διεθνή βιβλιογραφία είναι γνωστές τέσσερεις, προκαταρκτικές μελέτες ταλαντώσεων κατασκευών πολιτικού Μηχανικού με χρήση RTS.

Α. Πεζογέφυρα Wilford (Νόττινγχαμ, Αγγλία)

Η πρώτη ίσως εφαρμογή παρακολούθησης δυναμικών μετακινήσεων με RTS είναι αυτή της γέφυρας Wilford στο Νόττινγχαμ της Αγγλίας, η οποία είναι κρεμαστή πεζογέφυρα μήκους 60m. Η μελέτη μετακινήσεων της γέφυρας λόγω διέλευσης πεζών έγινε από τους Cosser et al. (2003) με χρήση RTS με 1Hz συχνότητα καταγραφής και GPS με 10Hz συχνότητα καταγραφής. Ομάδες ανθρώπων περνούσαν πάνω από τη γέφυρα είτε περπατώντας είτε τρέχοντας με στόχο να προκαλέσουν την ταλάντωσή της. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στο σχήμα 2.8 το οποίο δείχνει μη συμβατές μετακινήσεις μεταξύ GPS και RTS. Ως αίτιο οι Cosser et al. (2003) αναφέρουν την αβεβαιότητα που προκλήθηκε από χρήση πολλαπλού ανακλαστήρα ο οποίος θεωρήθηκε ότι εισάγει σφάλμα κλίμακας.



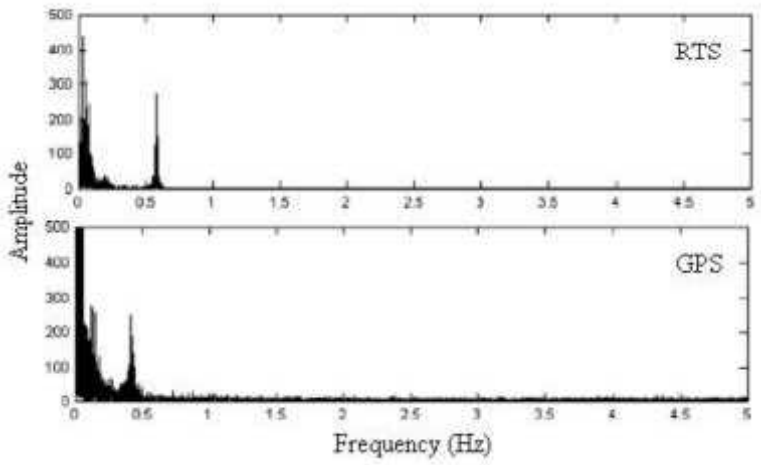
Σχήμα 2.8: Διάγραμμα μετακινήσεων της Wilford Bridge όπως κατεγράφησαν από τα GPS-RTS. Οι καταγραφές του RTS φαίνεται να περιέχουν σφάλμα κλίμακας

Β. Γέφυρα Ευρίπου

Η γέφυρα Ευρίπου είναι καλωδιωτή γέφυρα συνολικού μήκους 395m στην οποία υπάρχει μόνιμο δίκτυο 43 επιταχυνσιογράφων των οποίων οι καταγραφές συγχρονίζονται με χρήση GPS. Για την καταγραφή των μετακινήσεων λόγω κυκλοφοριακού φόρτου τοποθετήθηκαν ένας δέκτης GPS και ένας ανακλαστήρας στο μέσο του κεντρικού ανοίγματος, ενώ παραπλεύρως τοποθετήθηκαν ένα δεύτερο GPS (βάση) και ένα RTS τύπου Leica TCA1800 (σχ 2.9).

Σχήμα 2.9: Γέφυρα Ευρίπου

Κατά τους Lekidis et al (2006) από τις καταγραφές του RTS προέκυψαν μετρήσεις με ακρίβεια περίπου 5mm για τις οριζόντιες συντεταγμένες και 3mm για την κατακόρυφη. Με φασματική ανάλυση FFT προέκυψε κύρια συχνότητα στα 0,56Hz, καθώς και άλλες μη στατιστικά σημαντικές περίπου στα 0,35Hz (σχ. 2.10). Από την αντίστοιχη ανάλυση FFT των καταγραφών του GPS προέκυψε κύρια συχνότητα στα 0,45Hz, ενώ από τις καταγραφές επιταχυνσιογράφων ~0,40Hz. Η διαφορά των εκτιμημένων συχνοτήτων οφείλεται πιθανότατα σε σφάλμα της περιόδου δειγματοληψίας των καταγραφών του RTS (δηλ. αστάθεια ρυθμού δειγματοληψίας, γνωστό στη διεθνή βιβλιογραφία ως ‹‹ jitter ››) όπως αναφέρεται παρακάτω στο κεφάλαιο 2.7 (Stiros et al., 2008).



Σχήμα 2.10: Φασματικές αναλύσεις FFT των κατακόρυφων μεταβολών θέσης ελέγχου της Γέφυρας του Ευρίπου με βάση RTS και GPS

Γ. Γέφυρα Γοργοποτάμου

Από τον Stiros (2007) αναφέρονται προκαταρκτικά αποτελέσματα μέτρησης μετακίνησης της Σιδηροδρομικής Γέφυρας του Γοργοποτάμου για την οποία χρησιμοποιήθηκαν GPS και RTS.

Δ. Μετρήσεις μετακίνησης καμινάδας ΔΕΗ με RTS

Ο Gikas (2008) παρουσίασε συνοπτικά αποτελέσματα μέτρησης ταλάντωσης μιας μεταλλικής καμινάδας της ΔΕΗ με RTS το οποίο κατέγραφε με συχνότητα 5-6 Hz. Από την ανάλυση των καταγραφών του RTS αναφέρθηκε ότι η καμινάδα κινείτο σε ελλειπτική περιοχή με εύρος που κυμαινόταν από 3 έως 4 cm.

2.5 Σφάλματα Μετρήσεων του RTS

Όλα τα είδη σφαλμάτων που παρουσιάζονται κατά τις μετρήσεις με έναν απλό γεωδαιτικό σταθμό (σφάλματα οριζοντίωσης, κέντρωσης, διάθλασης, κατάφωτου, καμπυλότητας της γης) παρουσιάζονται και σε έναν ρομποτικό γεωδαιτικό σταθμό. Αυτά τα σφάλματα μέσω της μοντελοποίησης και των ειδικών τεχνικών μέτρησης μπορούν σε μεγάλο βαθμό να περιοριστούν. Πιο συγκεκριμένα, το RTS επηρεάζεται από σφάλματα που οφείλονται κυρίως (Kontogianni et al., 2007):

- Στην εσωτερική ακρίβεια του οργάνου
- Σε περιβαλλοντικές συνθήκες (επίπεδα υγρασίας, θερμοκρασίας κλπ.)
- Σε σφάλματα από ανθρώπινους παράγοντες κατά την σκόπευση και την κέντρωση
- Σε σφάλματα λόγω της ποιότητας του στόχου (παρεμβολή εμποδίων ανάμεσα στο όργανο και τον στόχο, με αποτέλεσμα την απώλεια του στόχου από το όργανο)
- Σε εξασθένιση του σήματος παρακολούθησης του στόχου λόγω απόστασης

Στους ρομποτικούς γεωδαιτικούς σταθμούς εισάγονται σφάλματα στις μετρήσεις, τα οποία προέρχονται από τη λειτουργία των μηχανισμών αυτοματοποίησης της λειτουργίας του οργάνου (σερβομηχανισμοί, σύστημα αυτόματης αναγνώρισης στόχου). Το κυριότερο σφάλμα που παρουσιάζεται σε αυτά τα όργανα είναι κατά τη λειτουργία TRK (tracking) και RTRK (rapid tracking) όταν ο στόχος βρίσκεται σε συνεχή κίνηση. Τότε παρουσιάζεται μια καθυστέρηση στην μέτρηση και καταγραφή του μήκους, σε σχέση με τη γωνία. Η αιτία αυτού του φαινομένου στηρίζεται στο γεγονός ότι η τιμή της γωνίας καταγράφεται ακαριαία από τους δίσκους του οργάνου, ενώ η μέτρηση της απόστασης και η καταγραφή της τιμής του μήκους απαιτεί περισσότερο χρόνο. Το αποτέλεσμα αυτής της καθυστέρησης είναι να καταγράφεται λανθασμένο ζεύγος γωνία-σημείου και να προκύπτει τελικώς λανθασμένη υπολογισμένη θέση για το μετρηθέν σημείο.

Η υψηλή τεχνολογία που χρησιμοποιείται στο όργανο RTS έχει οδηγήσει στον περιορισμό πολλών σφαλμάτων με αποτέλεσμα να επηρεάζουν σε μικρό ποσοστό τις μετρήσεις. Ιδιαίτερη βελτίωση έχει επέλθει στην ακρίβεια των μετρήσεων του RTS με την χρήση της τεχνολογίας του παλμικού σήματος (laser) για την μέτρηση των αποστάσεων ώστε να αποκλείεται η ταυτόχρονη μέτρηση δύο διαφορετικών στόχων που βρίσκονται σχεδόν σε ευθεία πχ. σε μια σήραγγα. Με βάση αυτή την τεχνολογία, το σήμα που εκπέμπει το RTS είναι σύμπλεγμα του συνήθους ημιτονικού και ενός παλμικού σήματος, τα οποία μπορούν να διαχωριστούν από το όργανο και να διαπιστωθεί εάν το όργανο μετρά συγχρόνως δύο ανακλαστήρες (Κοντογιάννη, 2005).

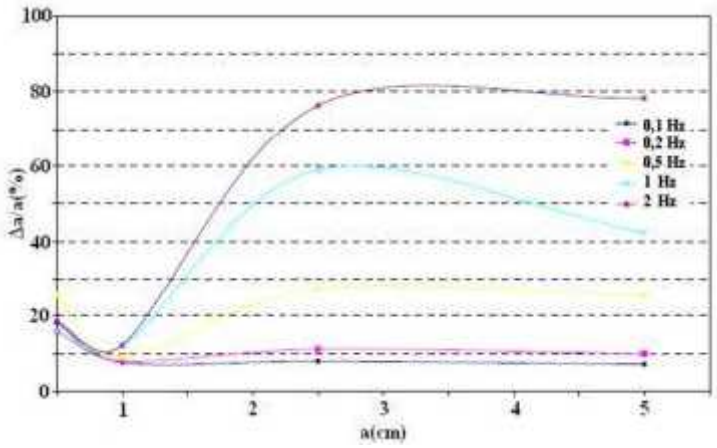
Επιπλέον, βελτίωση της ακρίβειας των μετρήσεων του RTS επέρχεται με την τεχνολογία laser που διαθέτει το όργανο για την κέντρωση και τον εντοπισμό του στόχου, ενώ διαθέτει και ηλεκτρονική οριζοντίωση που αυξάνει την απόδοσή του (Leica, 2008).

Η επίδραση των εξωτερικών παραγόντων όπως των ατμοσφαιρικών (θερμοκρασία, υγρασία κα.) μειώνεται με τη χρήση του παλμικού σήματος, όμως δεν εξαλείφεται. Ωστόσο, λόγω των επαναλαμβανόμενων μετρήσεων που πραγματοποιούνται σε περιπτώσεις γεωδαιτικής καταγραφής μετακινήσεων, πολλά συστηματικά σφάλματα που είναι κοινά στις μετρήσεις μειώνονται ή και απαλείφονται (Kontogianni et al., 2007).

2.6 RTS: Μέχρι τώρα πειραματική διερεύνηση ακρίβειας, αξιοπιστίας οργάνου

Το RTS είναι ένα νέο γεωδαιτικό όργανο και για αυτό δεν έχει διερευνηθεί πειραματικά η ακρίβεια και η αξιοπιστία του, ιδιαίτερα όσων αφορά την παρακολούθηση ταλαντώσεων που αποτελεί και το αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής εργασίας. Έχουν πραγματοποιηθεί περιορισμένα πειράματα ταλαντώσεων τα οποία έχουν επικεντρωθεί στην αξιολόγηση της ακρίβειας του για καταγραφή ταλαντώσεων με συχνότητες μικρότερες των 2Hz (Radovanovic and Teskey, 2001; Palazzo et al., 2006; Gikas and Daskalakis, 2006). Ένα βασικό συμπέρασμα των πειραμάτων αυτών είναι ότι η ακρίβεια του οργάνου αυξάνεται με τη μείωση του εύρους μετακίνησης (σχ. 2.11).

Ωστόσο τα πειράματα αυτά λόγω του μικρού πλήθους τους μπορούν να οδηγήσουν μόνο σε προκαταρκτικά αποτελέσματα. Επιπλέον έχουν περιοριστεί σε συχνότητες ταλάντωσης μικρότερης των 2 Hz, αποκλείοντας μεγάλο ποσοστό κατασκευών Πολιτικού Μηχανικού.



Σχήμα 2.11: Διάγραμμα συσχέτισης της ποσοστιαίας απόκλισης του εκτιμημένου εύρους ταλάντωσης από το πραγματικό σε σχέση με το εύρος ταλάντωσης για τις διάφορες συχνότητες ταλάντωσης που δοκιμάστηκαν (0,1 – 2Hz). Από Gikas et al.,2006

2.7 Προβλήματα καταγραφών RTS, διερεύνηση και προσπάθεια αντιμετώπισή τους

Τα πιο συνήθη προβλήματα που προκύπτουν κατά τη χρήση του RTS είναι:

- Η συχνότητα καταγραφής είναι συνήθως χαμηλότερη από την ονομαστική συχνότητα καταγραφής του οργάνου
- Η συχνότητα καταγραφής δεν είναι σταθερή
- Ο χρόνος των καταγραφών στρογγυλοποιείται στο δευτερόλεπτο

Το πρόβλημα της μη σταθερής συχνότητας καταγραφής δεν εμφανίζεται σε καταγραφές με συχνότητα <1Hz, η οποία όμως δεν είναι κατάλληλη για καταγραφή μετακινήσεων υψίσυχνων κινήσεων. Το πρόβλημα του μη σταθερού ρυθμού δειγματοληψίας (jitter) είναι πρόβλημα που συναντάται σε πολλά όργανα στο όριο της λειτουργίας τους.

Μια πιθανή προσεγγιστική λύση στο πρόβλημα αυτό θα ήταν να θεωρηθεί ότι τα διαστήματα μεταξύ των σημείων δειγματοληψίας έχουν κανονική κατανομή με μέση τιμή μηδέν και μικρή τυπική απόκλιση, οπότε η θεώρηση ότι όλες οι διαθέσιμες μετρήσεις είναι ισαπέχουσες θα εισήγαγε μικρές αλλοιώσεις στις εκτιμήσεις εύρους ταλαντώσεων και φασματικών χαρακτηριστικών. Αυτή η προσέγγιση έχει πρακτικά υιοθετηθεί από τους Lekidis et al στη μελέτη της γέφυρας του Ευρίπου με μετρήσεις RTS και στη συνέχεια εκτίμηση της κύριας ιδιοσυχνότητας με βάση φασματική ανάλυση με FFT.

Το φαινόμενο της αστάθειας στη δειγματοληψία συνήθως αγνοείται από τους διάφορους ερευνητές και τεχνικούς, αλλά φαίνεται ότι είναι πολύ σοβαρό πρόβλημα. Αγνόηση του φαινομένου jitter έχει ως αποτέλεσμα να εισάγεται σφάλμα. Μια άλλη λύση για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού είναι η δημιουργία ενός κατάλληλου λογισμικού το οποίο ενσωματώνεται στο όργανο και με το οποίο μπορεί να προσδιοριστεί ο χρόνος κάθε μέτρησης με ακρίβεια εκατοστού του δευτερολέπτου, και η αποτύπωσή του σε αρχείο με αντίστοιχη ανάλυση. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή, μπορεί να προσδιοριστεί ο χρόνος κάθε μέτρησης με ακρίβεια δεκάτου του δευτερολέπτου.

2.8 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ρομποτικών θεοδόλιχων

Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα γίνει συνοπτική αναφορά στα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ρομποτικών θεοδόλιχων ως προς την παρακολούθηση ταλαντώσεων τεχνικών έργων.

Τα πλεονεκτήματα των αυτόματα ελεγχόμενων γεωδαιτικών σταθμών είναι τα εξής:

- Είναι κατάλληλοι για την ακριβή παρακολούθηση αφού μπορούν να καταγράψουν με ακρίβεια (αβεβαιότητες από 1-5mm) το εύρος ταλάντωσης ακόμα και για μικρές ταλαντώσεις της τάξης του 1cm

- Μπορούν να προσδιορίσουν με ακρίβεια τη συχνότητα διέγερσης για χαμηλόσυχνες ταλαντώσεις ακόμη και μικρότερες του 1Hz

- Με κατάλληλη προσθήκη λογισμικού μπορεί να αυξηθεί η συχνότητα καταγραφής τους έως και 10Hz και η ικανότητά τους να μελετήσουν κατασκευές με μεγάλες ιδιοσυχνότητες δηλαδή μεγαλύτερες του 1Hz

- Είναι δυνατή η παρακολούθηση οποιουδήποτε σημείου του έργου σε οποιαδήποτε θέση

Τα βασικά μειονεκτήματά τους είναι:

- Επηρεάζονται από τις καιρικές συνθήκες, όπως ο ήλιος ,η βροχή, η ομίχλη κ.α.

- Είναι αναγκαστική η τοποθέτηση πρίσματος στο σημείο ελέγχου, αλλιώς δεν λαμβάνονται μετρήσεις ανεξάρτητα από τους σταθμούς

2.9 Μεθοδολογία μετρήσεων

2.9.1 Μετασχηματισμός συντεταγμένων

Οι μετρήσεις του RTS καταγράφονται ως προς τοπικό σύστημα αναφοράς που ορίζεται από τον χρήστη του RTS. Οι μετρήσεις του GPS ως προς το παγκόσμιο σύστημα αναφοράς WGS84, με άξονες Βορρά-Ανατολή-Κατακόρυφο. Για να οδηγηθούμε σε κατανοητά και συγκρίσιμα μεγέθη μεταξύ των δύο οργάνων είναι αναγκαία:

1. Η μετατόπιση του συστήματος συντεταγμένων των δύο οργάνων ώστε η αρχή των αξόνων να αντιστοιχεί στη θέση ισορροπίας του ταλαντωτή

2. Η στροφή των συστημάτων συντεταγμένων ώστε ο νέος άξονας X να αντιστοιχεί στον άξονα ταλάντωσης

Σύμφωνα με τη σχέση (2.1) φαίνεται μια γενική περίπτωση μετασχηματισμού ενός συστήματος συντεταγμένων, που πραγματοποιείται με μια μετάθεση και μια στροφή περί άξονα Z, και εκφράζεται με βάση την παρακάτω σχέση:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^{-} & \sin^{-} & 0 \\ -\sin^{-} & \cos^{-} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_y \\ z_0 \end{bmatrix} \qquad \text{σχέση (2.1)}$$

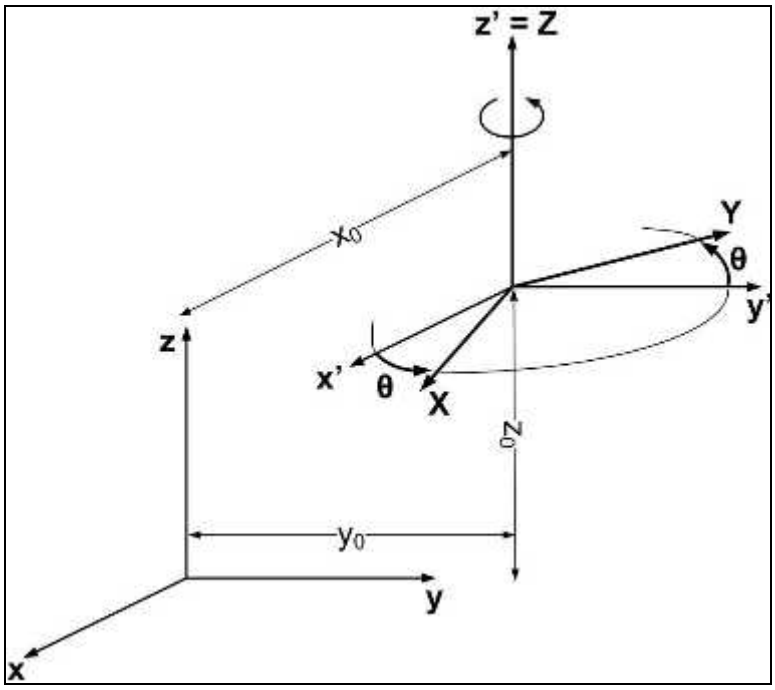
Όπου X: ο διαμήκης άξονας του νέου συστήματος

Y: ο αντίστοιχος εγκάρσιος άξονας, στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο με τον διαμήκη

Z: ο αντίστοιχος κατακόρυφος άξονας

θ: η γωνία στροφής των αξόνων x,y (αρχικό σύστημα) για να συμπέσουν με τους X,Y (τελικό σύστημα)

x_0, y_0, z_0 : η διαφορά των συντεταγμένων του αρχικού συστήματος του RTS ως προς τις συντεταγμένες της θέσης ισορροπίας του ανακλαστήρα.



Σχήμα 2.12: Μετασχηματισμός αρχικού συστήματος συντεταγμένων x, y, z στο τελικό σύστημα συντεταγμένων *X,Y,Z.* Ο μετασχηματισμός αυτός πραγματοποιείται με μια μετάθεση κατά x_0, y_0, z_0 και μια στροφή κατά γωνία θ

2.9.2 Ανάλυση χρονοσειράς των μετακινήσεων με βάση τις καταγραφές RTS

Η ανάλυση των χρονοσειρών των μετακινήσεων που προκύπτουν από τις πειραματικές μετρήσεις έχει στόχο την αξιολόγηση των μετρήσεων του RTS κατά την καταγραφή της ταλάντωσης. Η ανάλυση των χρονοσειρών αποτελείται από τρία μέρη :

- Στατιστική επεξεργασία για τον εντοπισμό χονδροειδών σφαλμάτων των μετρήσεων
- Έλεγχο του μέγιστου εύρους ταλάντωσης
- Φασματική ανάλυση των χρονοσειρών με διάφορες φασματικές μεθόδους

Κατά την φασματική ανάλυση μεταφέρονται τα δεδομένα από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο των συχνοτήτων (Randall, 1987), αναδεικνύοντας τις συχνότητες που εμφανίζονται στη χρονοσειρά. Σε περιπτώσεις που διεξάγονται πειράματα με μεταβλητή συχνότητα, εκτός από φασματική ανάλυση στο πεδίο συχνοτήτων, πραγματοποιείται φασματική ανάλυση στο πεδίο χρόνου-συχνοτήτων. Η ανάλυση αυτή γνωστή στη διεθνή βιβλιογραφία και ως ανάλυση κυματιδίων ή wavelet transform analysis, διαφέρει από την απλή φασματική ανάλυση στο ότι δίνει πληροφορία για το ποιες συχνότητες εμφανίζονται στις διάφορες χρονικές περιόδους της

χρονοσειράς (Daubechies, 1992; Kumar and Foufoula-Georgiou, 1997) και δείχνει πως μεταβάλλονται οι συχνότητες που διαμορφώνουν την χρονοσειρά ως συνάρτηση του χρόνου.

Η πιο διαδεδομένη τεχνική φασματικής ανάλυσης είναι ο μετασχηματισμός Fourier, ο οποίος χρησιμοποιείται ευρέως για την ανάλυση διακριτού σήματος και ο οποίος μετατρέπει το σήμα από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο συχνοτήτων. Ο πιο συνηθισμένος αλγόριθμος μετασχηματισμού Fourier είναι ο FFT (Fast Fourier Transform). Δύο μειονεκτήματα του μετασχηματισμού Fourier είναι :

- Η απαίτησή του τα διακριτά σημεία της χρονοσειράς να είναι χρονικά ισαπέχοντα (σταθερός ρυθμός δειγματοληψίας)

- Το πλήθος των δεδομένων πρέπει να είναι δύναμη του 2, $N=2^k$, με τις περισσότερες φορές να κυμαίνεται από 128 έως 4096 (Smith, 1999).

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι αντιμετώπισης των προβλημάτων ώστε να είναι δυνατή η χρήση της τεχνικής FFT:

- Διαχωρισμός των χρονοσειρών σε διαστήματα όπου οι μετρήσεις δεν παρουσιάζουν διακοπές ώστε να είναι συνεχείς (εφόσον επαρκούν στο πλήθος)

- Παρεμβολή δεδομένων (π.χ. με χρήση κάποιου πολυωνύμου) ώστε μα προκύψει διαμορφωμένη ισαπέχουσα δειγματοληψία και επαρκή δεδομένα για τη χρήση FFT

- Πρόσθεση μηδενικών (zero padding, Pytharoulis and Stiros, 2008) στο τέλος της χρονοσειράς για να συμπληρωθεί ο αριθμός των απαραίτητων δεδομένων για την χρήση FFT.

Οι τεχνικές αυτές έχουν όμως βασικά μειονεκτήματα:

- Εισαγωγή πρόσθετου θορύβου λόγω των παρεμβαλόμενων τιμών

- Απαλοιφή μεγάλων περιόδων κατά τη διάσπαση των χρονοσειρών (Proakis and Manolakis, 2004).

Εναλλακτική μέθοδος για την φασματική ανάλυση χρονικά ανισοδιάστατων δεδομένων είναι η φασματική ανάλυση με βάση τη μέθοδο Ελαχίστων Τετραγώνων , γνωστή ως περιοδόγραμμα Lomb. Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε για την επεξεργασία χρονικά ανισοδιάστατων καθώς και ανισοβαρών δεδομένων (Vanicek, 1969) και αναπτύχθηκαν

αντίστοιχες φασματικές μέθοδοι όπως η Least Square Spectral Analysis (LSSA, Pagiatakis, 1999).

Επιπλέον, για τις χρονοσειρές με μεταβλητή συχνότητα διέγερσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ανάλυση κυματιδίων, με βάση την οποία ουσιαστικά πραγματοποιείται ένας μετασχηματισμός αντίστοιχος του FFT, με τη βοήθεια συνάρτησης μικρής χρονικής διάρκειας, επονομαζόμενη και ως κυματίδιο. Το κυματίδιο μετατοπίζεται μέσα στο χρόνο της χρονοσειράς και λαμβάνει τιμές ανάλογα με την σημαντικότητα των συχνοτήτων στους διάφορους εξεταζόμενους χρονικούς τόπους της χρονοσειράς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ ΔΥΣΚΑΜΠΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ GPS ΚΑΙ RTS

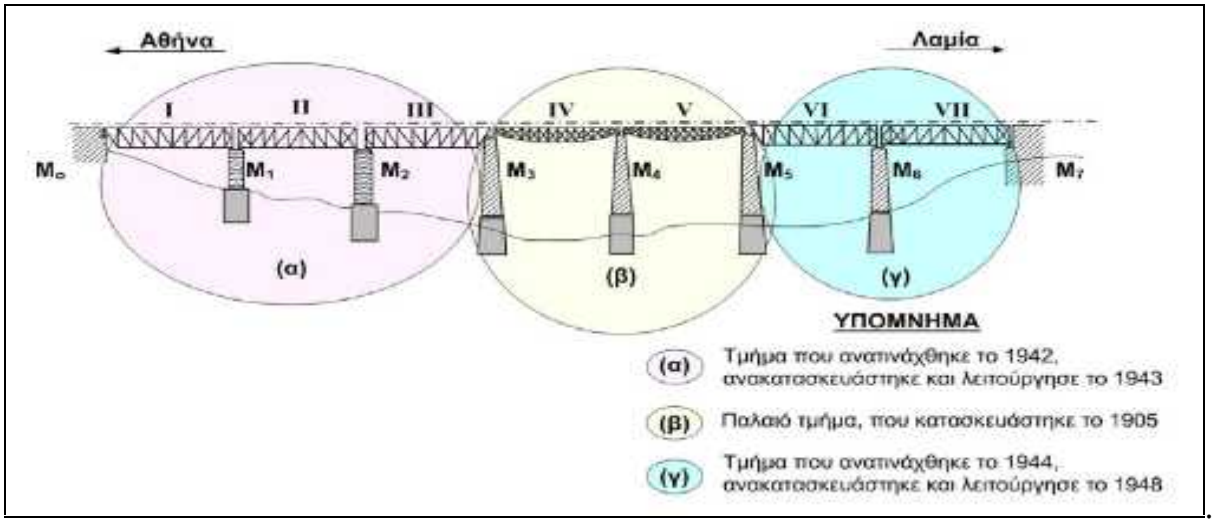
3.1 Σιδηροδρομική γέφυρα Γοργοποτάμου

3.1.1 Κατασκευαστικά στοιχεία

Η γέφυρα του Γοργοποτάμου (σχήμα 3.1) κατασκευάστηκε αρχικά το 1905 και αποτελεί ένα μέρος του σιδηροδρομικού δικτύου Αθήνα-Λάρισα. Παρουσιάζει ιδιαίτερο επιστημονικό ενδιαφέρον γιατί έχει ανατιναχθεί και ανακατασκευαστεί δύο φορές. Κατά την πρώτη ανατίναξη καταστράφηκαν τρία ανοίγματα του φορέα της γέφυρας και κατά τη δεύτερη ανατίναξη καταστράφηκαν δύο.

Σχήμα 3.1: Γέφυρα Γοργοποτάμου

Το συνολικό μήκος της γέφυρας είναι 211m και το συνολικό ύψος είναι περίπου 30m. Ο φορέας της αποτελείται από 7 ανοίγματα με 6 πυλώνες. Κάθε άνοιγμα έχει μήκος 28 έως 29m. Το κατάστρωμα της γέφυρας αποτελεί ένα μεταλλικό χωροδικτύωμα. Το ύψος των πυλώνων ποικίλλει από 11 έως 32m. Παρατηρώντας το σχήμα 3.2, οι πυλώνες M_1 και M_2 αποτελούν μεταλλικά χωροδικτυώματα και οι πυλώνες M_3, M_4, M_5, και M_6 είναι κατασκευασμένοι από οπτοπλινθοδομή ή/και τσιμέντο. Επομένως, όλη η γέφυρα είναι μια σύμμικτη κατασκευή. Αυτό οφείλεται και στις επισκευές και ανακατασκευές που έχουν γίνει, λόγω των δύο ανατινάξεων που έχει υποστεί ο φέρων οργανισμός.



Σχήμα 3.2: Στάδια ανακατασκευής της γέφυρας Γοργοποτάμου

Η τελική μορφή της γέφυρας έχει μεταβληθεί εξαιτίας των ανακατασκευών. Από το σχήμα 3.2 φαίνεται ότι στα ανοίγματα IV και V τα χωροδικτυώματα έχουν παραβολική μορφή. Αντίθετα, στα τμήματα I, II, III, VI και VII μετά την ανακατασκευή, τα χωροδικτυώματα έχουν ορθογωνική μορφή, προσδίδοντας στη γέφυρα μεγαλύτερη αντοχή. Παρατηρείται επίσης ότι το ύψος των νεοδημιουργηθέντων δικτυωμάτων είναι μεγαλύτερο από το ύψος των παλιών δίνοντας πάλι μεγαλύτερη αντοχή στο κατάστρωμα της γέφυρας.

Η γέφυρα αποτελείται από 7 δοκούς, όσες δηλαδή και τα ανοίγματά της. Κάθε δοκός είναι αμφιαρθρωτή. Βέβαια, παρόλο που κάθε άνοιγμα αποτελεί και μια ανεξάρτητη αμφιαρθρωτή δοκό, η συμπεριφορά μια συγκεκριμένης δοκού εξαρτάται από την συμπεριφορά των γειτονικών της αλλά και την αλληλεπίδραση εδάφους κατασκευής.

3.1.2 Δυναμικά Χαρακτηριστικά

Λόγω των δύο ανακατασκευών που έχει υποστεί η γέφυρα, έχουν τροποποιηθεί σε μεγάλο βαθμό τα δυναμικά χαρακτηριστικά της. Είναι δύσκολο να μελετηθεί η απόκρισης της γέφυρας κατά τη διέλευση ενός συρμού αφού από τον Ο.Σ.Ε οι μηχανικοί έχουν στη διάθεσή τους μόνο κάτοψη και όψη της γέφυρας χωρίς να γνωρίζουν το φορτίο σχεδιασμού και τις επιτρεπόμενες τάσεις ή παραμορφώσεις. Ακόμα, το έδαφος της περιοχής είναι αργιλώδες, με αποτέλεσμα σε περιόδους βροχοπτώσεων να αλλάζει η μηχανική του συμπεριφορά, και να επηρεάζεται έτσι η δυναμική συμπεριφορά της γέφυρας λόγω αλληλεπίδρασης εδάφους κατασκευής. Η εκτίμηση των δυναμικών χαρακτηριστικών της γέφυρας με GPS και RTS παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον.

Μια αρχική εκτίμηση (Bachmann et al., 1997) της κύριας ιδιοσυχνότητας f γέφυρας μήκους L με χωροδικτυώματα είναι

$$f = 36 \cdot L^{-0,73}$$ σχέση 3.1

Για την εξεταζόμενη γέφυρα Γοργοποτάμου, μήκους περίπου 30m, η κύρια ιδιοσυχνότητα *f* προκύπτει 3,11Hz σύμφωνα με την σχέση 3.1. Ακόμη, μια δεύτερη εκτίμηση της κύριας ιδιοσυχνότητας *f* μπορεί να γίνει με την σύγκριση της γέφυρας Γοργοποτάμου με άλλες γέφυρες παρόμοιων διαστάσεων και δομικής λειτουργίας με την εξεταζόμενη γέφυρα, στις οποίες όμως μπορούν να προσδιοριστούν τα δυναμικά χαρακτηριστικά. Η πιο αντιπροσωπευτική γέφυρα είναι η Osaka monorail steel bridge η οποία είναι μεταλλική και το μήκος κάθε ανοίγματος είναι 34,8m. Μετά από δυναμική ανάλυση της γέφυρας με πεπερασμένα στοιχεία προσδιορίστηκε η κύρια ιδιοσυχνότητα *f*=2,806Hz και η κατακόρυφη μετακίνηση σχεδιασμού 12mm. Επομένως, μπορεί να εκτιμηθεί η κύρια ισιοσυχνότητα *f* που θα είναι της τάξης των 3Hz και η κατακόρυφη μετακίνηση κατά τη διέλευση συρμού θα είναι της τάξης των 10mm.

3.1.3 Σχεδιασμός και Διεξαγωγή Γεωδαιτικών μετρήσεων

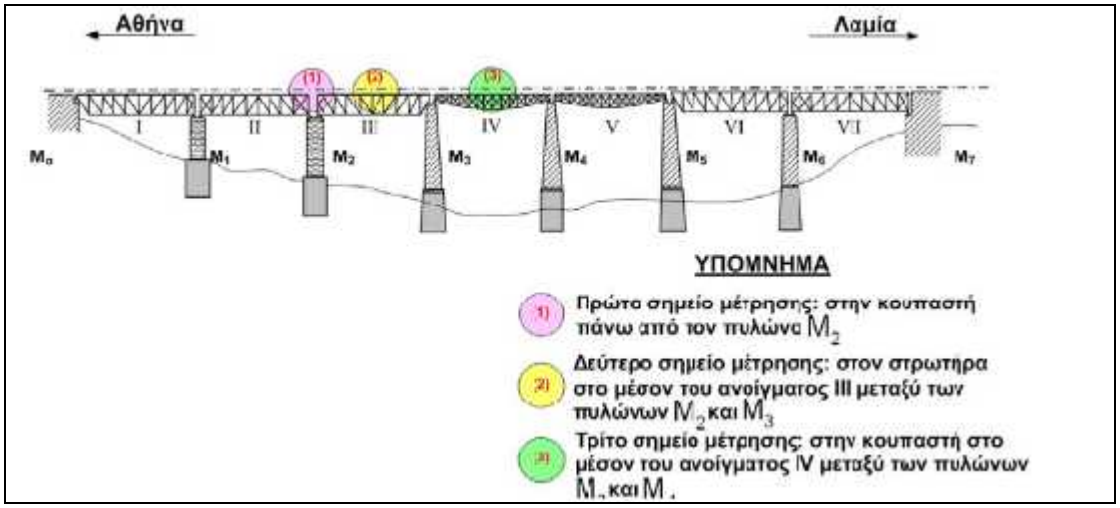
Διεξήχθησαν δύο περίοδοι γεωδαιτικών μετρήσεων με GPS και RTS για να προσδιοριστεί η δυναμική απόκριση της γέφυρας σε συρμό. Η πρώτη περίοδος μετρήσεων πραγματοποιήθηκε στις 7 Απριλίου 2006 και η δεύτερη στις 7 Μαΐου 2006. Στόχος των πειραμάτων ήταν να εξεταστεί κατά πόσο επηρεάζονται οι μετρήσεις του GPS από τη διέλευση συρμών και από τη μεταβολή της γεωμετρίας των δορυφόρων. Επιπλέον, εξετάστηκε πόσο επηρεάζονται οι μετρήσεις από την ταχύτητα του συρμού και την εποχή. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους μεταβάλλονται ανάλογα με την υγρασία και την εποχή. Επομένως, αναμένεται και μεταβολή στην απόκριση της κατασκευής λόγω της αλληλεπίδρασης εδάφους κατασκευής.

Πριν την διεξαγωγή των πειραμάτων επιλέχθηκαν τα σημεία της γέφυρας όπου θα καταγράφονταν οι μετακινήσεις και τα σημεία τοποθέτησης των γεωδαιτικών οργάνων εκτός γέφυρας. Στα σημεία εντός της γέφυρας κατασκευάστηκαν ειδικές βάσεις για να τοποθετηθούν με ασφάλεια τα όργανα. Αυτές οι βάσεις εξασφάλιζαν την σταθερότητα (πάκτωση) των οργάνων. Για τα συγκεκριμένα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν δύο δέκτες GPS τύπου Java και ένας RTS Leica TCA 1201 με τρεις ανακλαστήρες AGA. Το ένα GPS παρακολουθούσε τη μετακίνηση ενός σημείου της γέφυρας και το άλλο χρησιμοποιούνταν ως όργανο βάσης. Το RTS παρακολουθούσε την κίνηση τριών σημείων της γέφυρας, όσων

δηλαδή και οι ανακλαστήρες για διαφορετικές διελεύσεις συρμών. Το RTS και το GPS επιλέχθηκε να παρακολουθούν το ίδιο σημείο κατά μήκος του ανοίγματος της γέφυρας.

Το GPS έπρεπε να τοποθετηθεί σε σημείο της γέφυρα ώστε να έχει ανοικτό ορίζοντα για να μην παρεμποδίζεται το σήμα που λαμβάνει από τους δορυφόρους. Ακόμη, ο ανακλαστήρας που τοποθετείται πάνω στη γέφυρα έπρεπε να είναι ορατός από το RTS.

Ένα σημείο ελέγχου που επιλέχθηκε ήταν στο άκρο του ανοίγματος πάνω από τον πυλώνα (σημείο RTS1-GPS1). Ένα άλλο σημείο ελέγχου ήταν το μέσο του ανοίγματος πάνω στην κουπαστή (RTS3-GPS3) όπου οι μετακινήσεις είναι μέγιστες, ενώ οι μετακινήσεις κοντά στις στηρίξεις είναι μικρές. Τέλος, μόνο ανακλαστήρας τοποθετήθηκε πάνω στον στρωτήρα στο μέσο ανοίγματος (RTS2). Όλα τα σημεία ελέγχου απεικονίζονται στο σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3: Σημεία ελέγχου της γέφυρας

Στην πρώτη φάση μετρήσεων, μετρήθηκαν οι μετακινήσεις δύο σημείων ελέγχου. Το ένα σημείο ελέγχου ήταν το μέσο του ανοίγματος III (βλ. σχήμα 3.3) όπου τοποθετήθηκε ένας ανακλαστήρας πάνω στον στρωτήρα της γέφυρας και το άλλο σημείο ελέγχου ήταν η αριστερή στήριξη του ανοίγματος II όπου πάνω σε ειδική μεταλλική βάση τοποθετήθηκε ανακλαστήρας και κεραία GPS. Το GPS βάσης βρισκόταν σε απόσταση 100m. Το RTS απείχε απόσταση 150m από το σημείο ελέγχου. Σε κάθε διέλευση συρμού, το RTS κατέγραφε την μετακίνηση ενός εκ των δύο σημείων ελέγχου κάθε φορά.

Στην δεύτερη φάση μετρήσεων, μετρήθηκαν πάλι οι μετακινήσεις δύο σημείων ελέγχου. Το ένα σημείο ελέγχου βρισκόταν στην αριστερή στήριξη του ανοίγματος II, όπου τοποθετήθηκε ανακλαστήρας και κεραία GPS. Το άλλο σημείου ελέγχου βρισκόταν στο μέσο του τέταρτου

ανοίγματος της γέφυρας όπου τοποθετήθηκε ένας ανακλαστήρας και μια κεραία GPS. Οι θέσεις του GPS βάσης και του RTS παρέμειναν ίδιες με την πρώτη φάση.

Η καταγραφή των μετρήσεων GPS γινόταν με συχνότητα 20Hz, ενώ η καταγραφή των μετρήσεων του RTS γινόταν με συχνότητα 10Hz. Στην πραγματικότητα όμως η καταγραφή των μετρήσεων του RTS ήταν 6-7Hz.

Στην πρώτη σειρά πειραμάτων, έγινε καταγραφή των μετακινήσεων των σημείων ελέγχου για τέσσερις εμπορικούς ή επιβατικούς συρμούς. Ο αριθμός των βαγονιών ήταν 5 έως 9. Στην δεύτερη σειρά πειραμάτων, έγινε καταγραφή των μετακινήσεων των σημείων ελέγχου για εμπορικούς συρμούς με 14 και 17 βαγόνια, 8 επιβατικούς με 5 έως 9 βαγόνια και ενός βοηθητικού συρμού που διέσχισε την γέφυρα 3 φορές. Οι εμπορικοί συρμοί έχον μεγαλύτερο βάρος από τους επιβατικούς και διασχίζουν την γέφυρα με μικρότερη ταχύτητα. Έτσι, η απόκριση της γέφυρας μεταβάλλεται ανάλογα με το είδος του εκάστοτε συρμού που τη διασχίζει. Επειδή κατά την διάρκεια των πειραμάτων παρουσιάστηκαν τεχνικά προβλήματα δεν καταγράφηκαν οι μετακινήσεις των σημείων ελέγχου και από τα δύο όργανα σε όλες τις περιπτώσεις διέλευσης συρμών. Στον πίνακα 3.1 παρουσιάζονται οι περιπτώσεις διέλευσης συρμών που καταγράφηκαν και από τα δύο όργανα και που στη συνέχεια αναλύθηκαν.

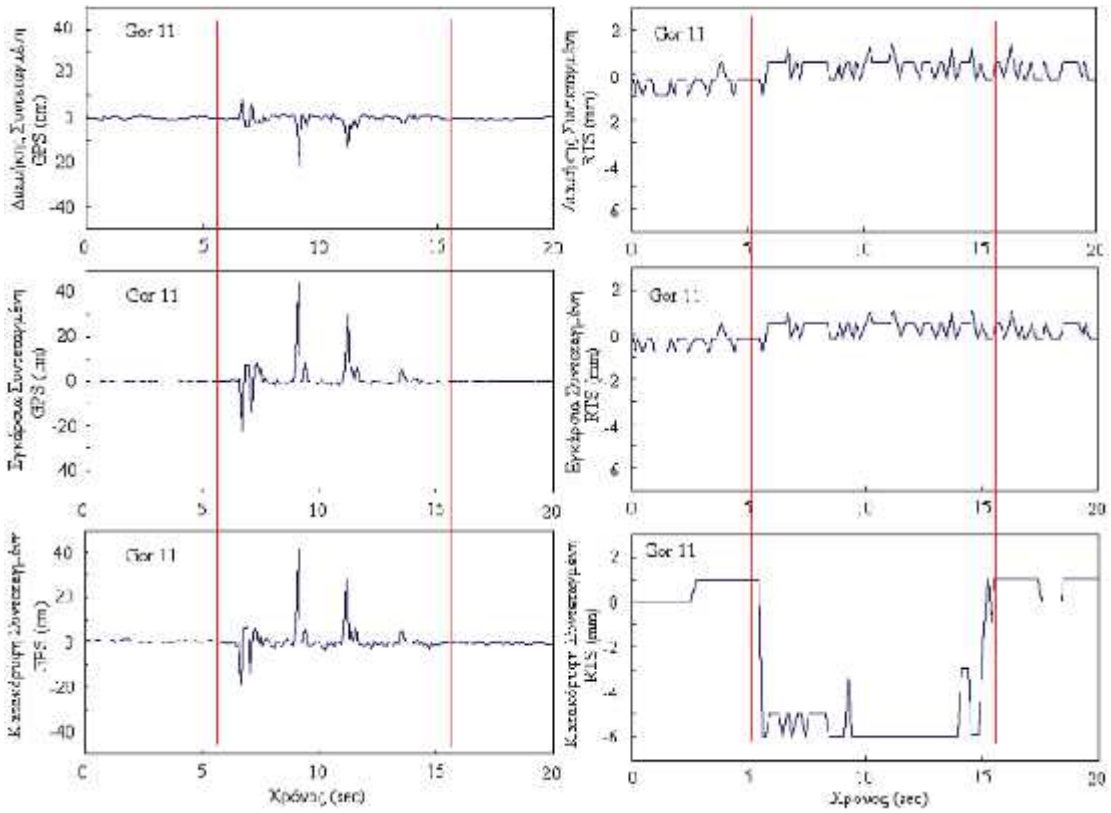
Πίνακας 3.1: Περιπτώσεις διέλευσης συρμών καταγεγραμμένες από GPS/RTS

α/α	**θέση σημείου ελέγχου**		**Αμαξοστοιχία**	**Βαγόνια**
	GPS	**RTS**		
Gor3	GPS1	RTS1	επιβατική	4
Gor8	GPS3	RTS1	εμπορική	14
Gor10	GPS3	RTS3		5
Gor12	GPS3	RTS3	εμπορική	9
Gor17	GPS3	RTS3	επιβατική	5
Gor18	GPS3	RTS3	επιβατική	6

3.1.4 Αποτελέσματα Αναλύσεων

Από την ανάλυση των δεδομένων προέκυψε ότι οι χρονοσειρές του GPS εμφάνιζαν φαινομενικές μεταβολές στις συντεταγμένες της τάξης δεκάδων ή εκατοντάδων cm σε κάποιες περιπτώσεις (βλ. σχήμα 3.4) με ανύψωση στον κατακόρυφο άξονα. Οι χρονοσειρές

του RTS παρουσίαζαν μεταβολές στις συντεταγμένες της τάξης των mm στον κατακόρυφο άξονα.



Σχήμα 3.4: Χρονοσειρές υπολογισμένων μετακινήσεων των μετρήσεων

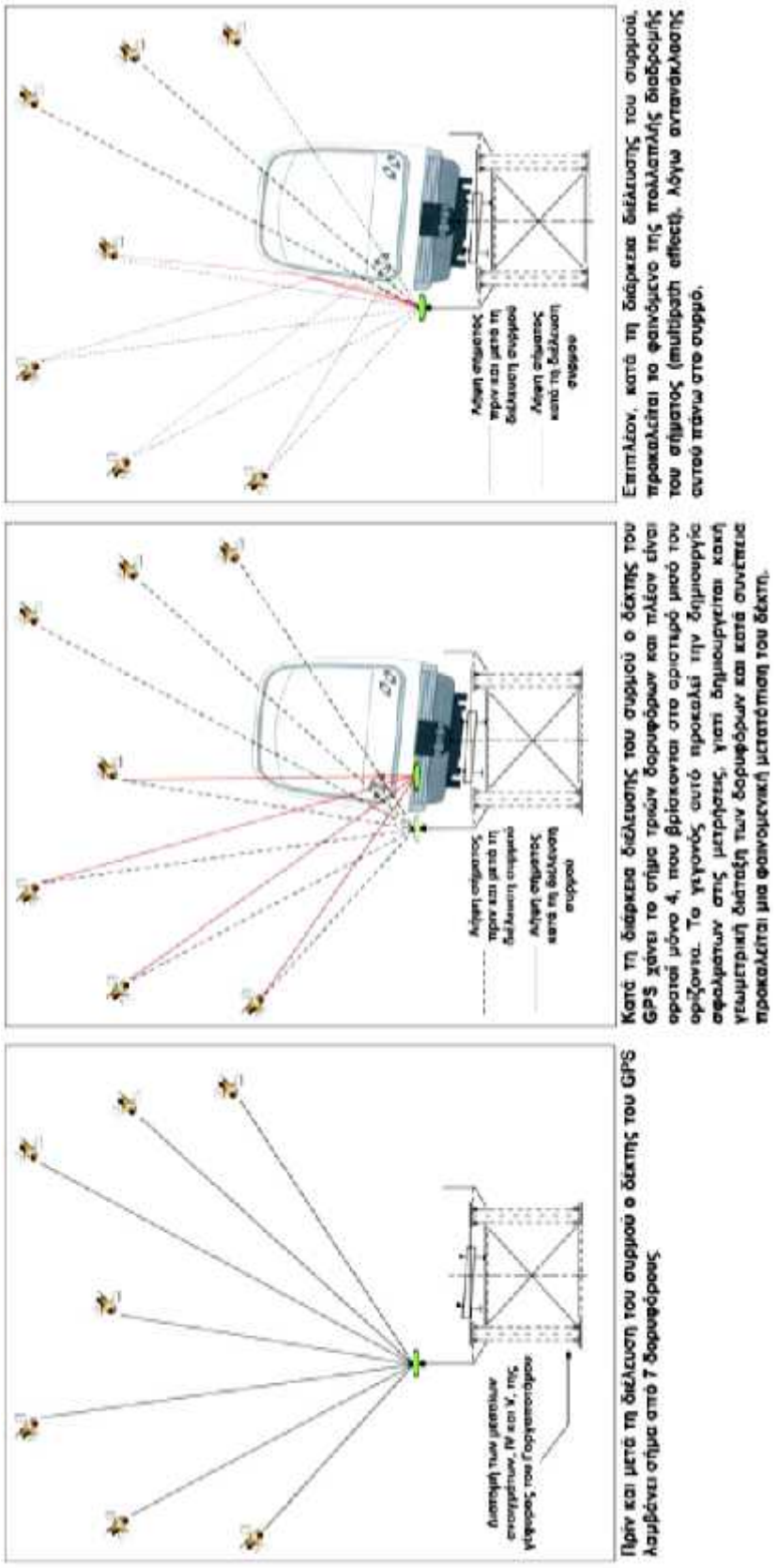
Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 3.1.2, εκτιμάται ότι η κατακόρυφη μετακίνηση της συγκεκριμένης γέφυρας είναι της τάξης των 10mm. Από το σχήμα 3.4 συμπεραίνεται ότι οι τιμές στις χρονοσειρές του GPS είναι υψηλές. Άρα, υπάρχει σφάλμα κλίμακας με θετικές και αρνητικές τιμές στις μετρήσεις του GPS. Τα σφάλματα αυτά (θόρυβος) παρουσιάζονταν συστηματικά σε όλες τις χρονοσειρές του GPS για όλες τις διελεύσεις συρμών. Αυτός ο θόρυβος έπρεπε να απαλοιφεί. Αφού εξετάστηκε λεπτομερώς το πρόβλημα, προέκυψε ότι αυτός ο θόρυβος προερχόταν από τον ίδιο τον συρμό. Ο συρμός βρισκόταν σε μεγαλύτερο ύψος σε σχέση με την κουπαστή της γέφυρας, όπου είχε τοποθετηθεί η κεραία του GPS, οπότε καλυπτόταν η ορατότητα της κεραίας του δέκτη, με αποτέλεσμα να γίνονται παρεμβολές στην πορεία των κυμάτων που εκπέμπονται από τους δορυφόρους και λαμβάνονται από τον δέκτη. Επομένως, υπήρχαν τα εξής προβλήματα:

- Η παρεμπόδιση λήψης σήματος από τους δορυφόρους είχε σαν αποτέλεσμα την αλλαγή της γεωμετρίας των παρατηρούμενων δορυφόρων και του συστήματος παρατήρησης

- Εξαιτίας της απότομης αλλαγής του συστήματος παρατήρησης ήταν αδύνατον το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε να λύσει με ακρίβεια το σύστημα παρατηρήσεων
- Επειδή η κεραία του GPS και η μεταλλική επιφάνεια του βαγονιού βρίσκονταν πολύ κοντά προκλήθηκε σφάλμα πολλαπλών διαδρομών του σήματος των δορυφόρων

Στη συνέχεια διερευνήθηκαν τα αίτια του προβλήματος και εξετάστηκαν τέσσερις πιθανές περιπτώσεις στις οποίες οφειλόταν το σφάλμα κλίμακας των χρονοσειρών του GPS:

1. Επίδραση μεταβολής γεωμετρίας δορυφόρων
2. Πιθανή αδυναμία επίλυσης αβεβαιοτήτων από το λογισμικό
3. Διερεύνηση με επίλυση των καταγραφών GPS με χρήση μόνο της συχνότητας L1
4. Πειραματική διερεύνηση για την εξακρίβωση του αιτίου μεγάλων φαινομενικών μετακινήσεων της κατακόρυφης συντεταγμένης.



Σχήμα 3.5: Φαινόμενο πολλαπλής διαδρομής του σήματος κατά τη διέλευση ενός συρμού

Έπειτα από την λεπτομερή εξέταση του προβλήματος προέκυψε ότι ο θόρυβος των χρονοσειρών της κατακόρυφης συντεταγμένης μειώνεται με την αφαίρεση των δορυφόρων των οποίων διακόπτεται το σήμα από τον διερχόμενο συρμό. Ο θόρυβος μειώνεται και με τη χρήση βελτιωμένου λογισμικού (GeoOffice) του οποίου ο αλγόριθμος κινηματικής επίλυσης μειώνει τα σφάλματα επίλυσης αβεβαιοτήτων. Η μετρούμενη μετακίνηση επηρεάζεται από σφάλμα κλίμακας το οποίο δεν μπορεί να εκτιμηθεί από τα δεδομένα GPS.

Μετά την ανάλυση των χρονοσειρών GPS και RTS συμπεραίνονταν τα εξής:

- Το RTS κατέγραψε την συνολική μετακίνηση του μέσου του ανοίγματος της γέφυρας 10mm. Υπήρξαν περιπτώσεις διελεύσεων στις οποίες προσδιορίστηκε και η δυναμική απόκριση της γέφυρας και αυτό έγινε όταν η συχνότητα καταγραφής ήταν ίση με 7Hz.
- Η μετακίνηση της γέφυρας κατά τη διέλευση συρμού είναι το άθροισμα μιας ημιστατικής μετακίνησης και μιας δυναμικής. Το GPS κατέγραψε την μορφή της υψίσυχνης κίνησης του σημείου ελέγχου (δυναμική μετακίνηση) όπως αποδείχθηκε και από τον προσδιορισμό της συχνότητας κίνησης του συρμού (0,39-0,6Hz) και της κύρια ιδιοσυχνότητας της γέφυρας (3,1-3,2Hz). Η διεγείρουσα συχνότητα του συρμού(0,39-0,6Hz) εξαρτάται από την ταχύτητά του.
- Από τα αποτελέσματα των δεδομένων του GPS και RTS εκτιμήθηκε η μετακίνηση του μέσου του ανοίγματος της γέφυρας (κουπαστή) στα 5-7mm, ενώ στον στρωτήρα η μετακίνηση ήταν 10mm. Η διαφορά αυτή οφείλεται στην άμεση διέγερση του στρωτήρα από τον συρμό σε σχέση με την κουπαστή.
- Από τις καταγραφές του RTS παρατηρήθηκε ότι οι επιβατικοί συρμοί προκαλούσαν μεγαλύτερη ημιστατική μετακίνηση, ενώ αντίθετα οι εμπορικοί προκαλούσαν μεγαλύτερη δυναμική μετακίνηση λόγω μικρότερης ταχύτητας και βάρους.

3.2 Μεταλλική Πεζογέφυρα Λεωφόρου Κηφισού

3.2.1 Κατασκευαστικά στοιχεία

Η γέφυρα αποτελείται από μεταλλικά χωροδικτυώματα (σχήμα 3.6). Ο φορέας της γέφυρας αποτελείται από τρία ανοίγματα με τέσσερις οκταγωνικούς πυλώνες οπλισμένου σκυροδέματος. Κάθε άνοιγμα λειτουργεί σαν αμφιαρθρωτή δοκός. Το κεντρικό άνοιγμα έχει μήκος 41,5m ενώ τα ακριανά 10,25m.

Σχήμα 3.6: Πεζογέφυρα στη Λεωφόρο Κηφισού

3.2.2 Δυναμικά Χαρακτηριστικά

Από τα διαθέσιμα στοιχεία του έργου, προέκυψε ότι η συχνότητα της γέφυρας ήταν 3Hz, επομένως η κατασκευή είναι δύσκαμπτη. Σύμφωνα με τους Bachmann et al, όταν η κύρια ιδιοσυχνότητα μιας κατασκευής είναι μεγαλύτερη του 1Hz τότε η κατασκευή θεωρείται δύσκαμπτη. Η μέγιστη μετακίνηση ήταν 3cm. Ο Ψιμούλης από στοιχεία των αρχιτεκτονικών σχεδίων και από επιτόπου καταμέτρηση των διαστάσεων των διατομών των μελών έκανε μια δυναμική ανάλυση της γέφυρας για να προσδιορίσει την ιδιοσυχνότητα και τις μετακινήσεις της γέφυρας με τη χρήση του προγράμματος sap. Από την ιδιομορφική ανάλυση του φορέα, προέκυψε ότι η κύρια ιδιοσυχνότητα ήταν 4,3Hz και η μέγιστη μετακίνηση 4,35mm. Αυτές οι τιμές είναι συμβατές με τις τιμές που είχαν δοθεί από τον κατασκευαστή αρχικά.

3.2.3 Σχεδιασμός και Διεξαγωγή Γεωδαιτικών μετρήσεων

Για την καταγραφή των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν πέντε δέκτες GPS(δύο τύπου Hiper-Pro, δύο τύπου GB-1000, ένα Javad). Οι δέκτες GPS ήταν διπλής συχνότητας (L1 και L2). Η συχνότητα καταγραφής ήταν 10Hz και 20Hz (Javad). Επομένως, υπήρχαν τέσσερα σημεία ελέγχου και ένα GPS βάσης. Ακόμη, χρησιμοποιήθηκαν δύο RTS με συχνότητα καταγραφής 10 Hz μαζί με δύο ανακλαστήρες τύπου AGA και ένας επιταχυνσιογράφος AC-23. Ο επιταχυνσιογράφος ρυθμίστηκε να καταγράφει στα 250Hz.

Με βάση τη δομή της γέφυρας, επιλέχθηκε το μέσο του μεσαίου ανοίγματος ως το καταλληλότερο σημείο ελέγχου, αφού εκεί παρουσιάζονται οι μεγαλύτερες μετακινήσεις. Έτσι, τοποθετήθηκαν στο μέσο του ανοίγματος, στο πάνω μέρος του δικτυώματος, ένας δέκτης GPS και ένας ανακλαστήρας. Σε απόσταση περίπου 1m, τοποθετήθηκε άλλο ένα ζεύγος GPS-ανακλαστήρα (σχήμα 3.7). Ο επιταχυνσιογράφος λόγω του μεγάλου μεγέθους δεν μπορούσε να τοποθετηθεί στο πάνω μέρος του μεταλλικού δικτυώματος. Τελικά, τοποθετήθηκε στην κουπαστή (σχήμα 3.7). Επειδή στην κουπαστή οι μετρήσεις είναι επηρεασμένες από δευτερεύουσες ταλαντώσεις, για τον έλεγχο των μετρήσεων του επιταχυνσιογράφου χρησιμοποιήθηκε και ένας ακόμα δέκτης GPS στην κουπαστή. Όλα τα σημεία ελέγχου βρίσκονταν στο μέσο του ανοίγματος και δημιουργούσαν ένα υπερστατικό δίκτυο καταγραφής με ανεξάρτητα όργανα, δηλαδή για κάθε σημείο ελέγχου, χρήση παραπάνω του ενός οργάνου. Τα όργανα ελέγχου τοποθετήθηκαν πάνω στο δικτύωμα και την κουπαστή πακτωμένα πάνω σε ειδικά κατασκευασμένες βάσεις. Όσων αφορά τα όργανα βάσης χρησιμοποιήθηκαν δύο RTS και δύο GPS σε απόσταση 60-80m από τη γέφυρα. Τα RTS στόχευαν περίπου κάθετα τους ανακλαστήρες. Στο σχήμα 3.8 φαίνονται οι θέσεις ελέγχου και τα όργανα βάσης των πειραμάτων.

Σχήμα 3.7: Θέσεις ελέγχου στο πάνω μέρος του μεταλλικού δικτυώματος και στην κουπαστή

Σχήμα 3.8: Θέσεις σημείων ελέγχου και όργανα βάσης

Στα πλαίσια των πειραμάτων, η διέγερση της γέφυρας προερχόταν είτε από συγχρονισμένα άλματα και είτε από βηματισμούς ομάδας πεζών. Οι πεζοί είχαν συνολική μάζα 400kg(4KN). Συνολικά, πραγματοποιήθηκαν εφτά διεγέρσεις διάρκειας 60 δευτερολέπτων.

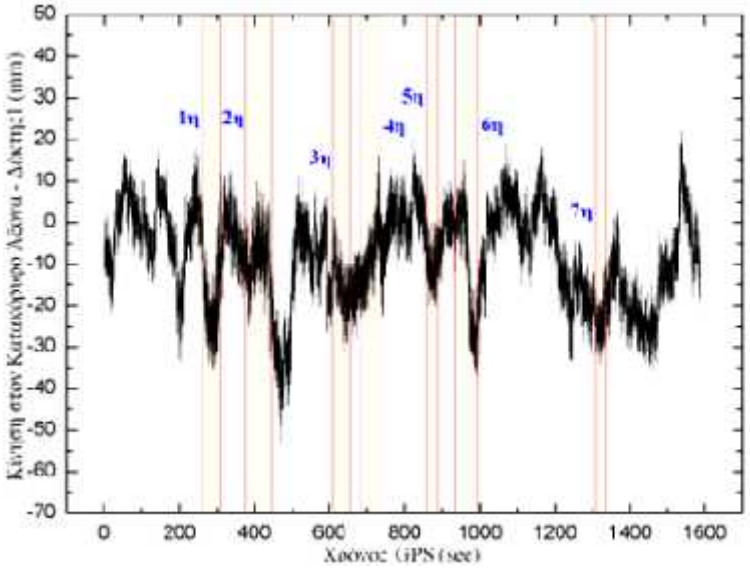
3.2.4 Αποτελέσματα Αναλύσεων

Από την διεξαγωγή των πειραμάτων βγήκαν τα εξής αποτελέσματα:

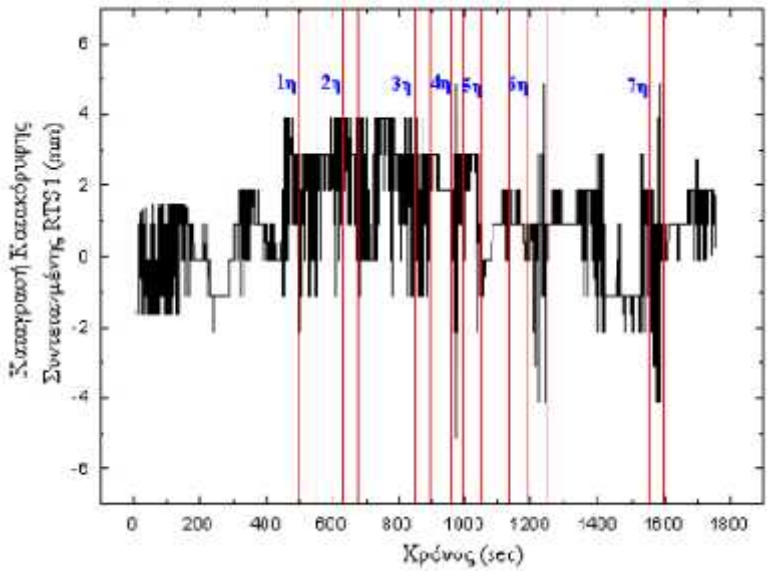
- Με βάση τις εκτιμήσεις των ευρών των χαμηλόσυχνων-ημιστατικών χρονοσειρών του GPS προέκυψε ότι μπορεί να εκτιμηθεί η ημιστατική και η δυναμική μετακίνηση. Οι δέκτες GPS κατέγραψαν την μορφή της κίνησης, παρόλο που οι μετρήσεις περιείχαν θόρυβο και προέκυψε η κύρια ιδιοσυχνότητα στα 4,3Hz. Γενικά, η ημιστατική μετακίνηση προκαλείται από σταθερές ή χαμηλόσυχνες διεγέρσεις που η συχνότητα εφαρμογής τους είναι εκτός του πεδίου των κύριων ιδιοσυχνοτήτων της κατασκευής. Μια δυναμική μετακίνηση προκαλείται από υψίσυχνες διεγέρσεις που έχουν συχνότητα εφαρμογής εντός του πεδίου των κύριων ιδιοσυχνοτήτων της κατασκευής.
- Από τις μετρήσεις των RTS, προέκυψε η ημιστατική μετακίνηση ίση με 2mm και η δυναμική μετακίνηση ίση με 4mm. Λόγω της απώλειας κύκλων της υψίσυχνης κίνησης της γέφυρας κατά τη διέγερσή της τα RTS δεν μπορούσαν να καταγράψουν τη μορφή της ταλάντωσης και να προσδιορίσουν τις συχνότητες κίνησης.

- Με τη χρήση ενός υπερστατικού συστήματος οργάνων καταγραφής με διαφορετική λειτουργία, είναι δυνατών να προσδιοριστούν οι μετακινήσεις και οι ιδιοσυχνότητες των διεγέρσεων.

Στα σχήματα 3.9 και 3.10 παρουσιάζονται οι χρονοσειρές που περιγράφουν την απόκριση της γέφυρας του Κηφισού στον κατακόρυφο άξονα με βάση τις καταγραφές των GPS και RTS. Παρατηρούνται κυρίως στο διάγραμμα του GPS έντονες ψευδοδιακυμάνσεις (θόρυβος). Δηλαδή οι χρονοσειρές που προέκυψαν είναι το άθροισμα του σήματος της μετακίνησης και του θορύβου.



Σχήμα 3.9: Χρονοσειρά κατακόρυφων μεταβολών με βάση τις μετρήσεις του GPS



Σχήμα 3.10: Χρονοσειρά κατακόρυφων μεταβολών με βάση τις μετρήσεις του RTS.

3.3 Γέφυρα Forth Road

3.3.1 Κατασκευαστικά στοιχεία

Η γέφυρα Forth Road (σχήμα 3.11) κατασκευάστηκε το 1964 και συνδέει το Εδιμβούργο με το Φίφε της Σκωτίας. Η γέφυρα ακόμα και σήμερα θεωρείται ένα θαύμα της μηχανικής.

Σχήμα 3.11: Γέφυρα Forth Road στη Σκωτία

Το συνολικό της μήκος είναι 2528m και το συνολικό ύψος είναι περίπου 156m. Ο φορέας της γέφυρας αποτελείται από δύο κύρια ανοίγματα 521,3 μέτρων, δύο πλευρικά ανοίγματα των 207,3 μέτρων και 15 ανοίγματα προσέγγισης των 51,2 μέτρων. Κάθε κύριο άνοιγμα αποτελείται από δύο βραχίονες του προβόλου, οι οποίοι έχουν μήκος 207,3 μέτρων, που στηρίζουν ένα κεντρικό κομμάτι 106,7 μέτρων. Οι τρεις μεγάλες υπερδομές του προβόλου έχουν ύψος 100,6 μέτρα και αποτελούνται από τέσσερις πύργους με διάμετρο 21 μέτρα και ακουμπούν ο καθένας σε ένα ξεχωριστό θεμέλιο.

3.3.2 Διεξαγωγή πειραμάτων

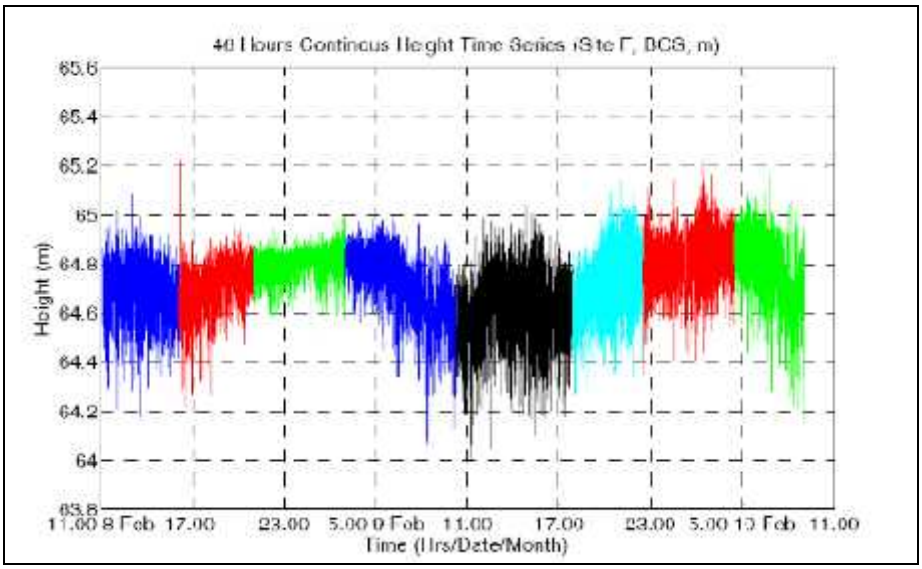
Τα πανεπιστήμια Nottingham και Brunel του Λονδίνου πραγματοποίησαν το πείραμα τον Φεβρουάριο του 2005. Ο στόχος του συγκεκριμένου πειράματος ήταν η παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς του καταστρώματος της γέφυρας σε πραγματικής συνθήκες κυκλοφοριακού φόρτου.

Χρησιμοποιήθηκαν εφτά δέκτες GPS δύο συχνοτήτων και οι οποίοι τοποθετήθηκαν πάνω στο κατάστρωμα της γέφυρας. Επιπλέον, δύο GPS τοποθετήθηκαν πάνω σε ένα διπλανό κτίριο και λειτουργούσαν σαν όργανα αναφοράς.

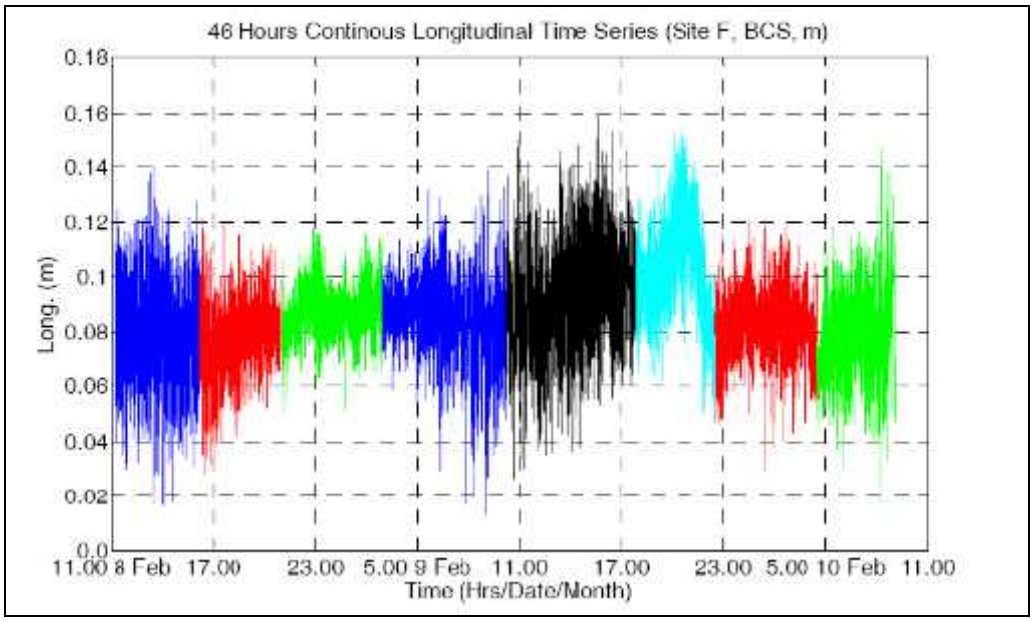
Η διάρκεια του πειράματος ήταν 46 ώρες και η συχνότητα καταγραφής 10Hz. Οι τελικές συντεταγμένες υπολογίστηκαν στο σύστημα αναφοράς WGS84. Από μετεωρολογικό σταθμό και με συχνότητα καταγραφής 15 δευτερόλεπτα, κατεγράφησαν την θερμοκρασία, την πίεση, την ταχύτητα και την κατεύθυνση του ανέμου.

3.3.3 Αποτελέσματα Αναλύσεων

Η γέφυρα κατά τον διαμήκη, τον εγκάρσιο και τον κατακόρυφο άξονά της έχει υποστεί παραμορφώσεις. Στα σχήματα 3.12 και 3.13 παρουσιάζονται οι μεταβολές αυτές. Από τα διαγράμματα φαίνεται ότι οι μετακινήσεις του καταστρώματος της γέφυρας είναι της τάξης των δεκατόμετρων.

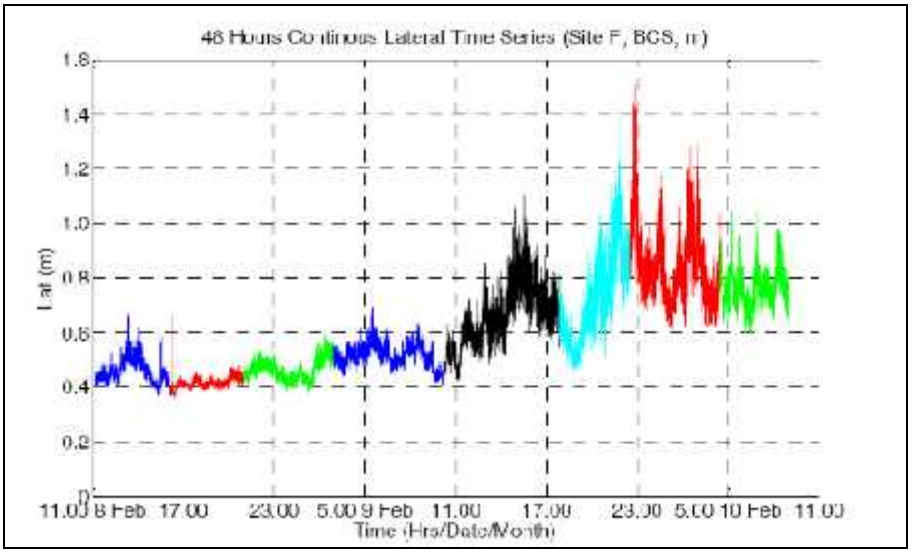


Σχήμα 3.12: Καθ ύψος παραμορφώσεις της γέφυρας στο μέσο του ανοίγματος

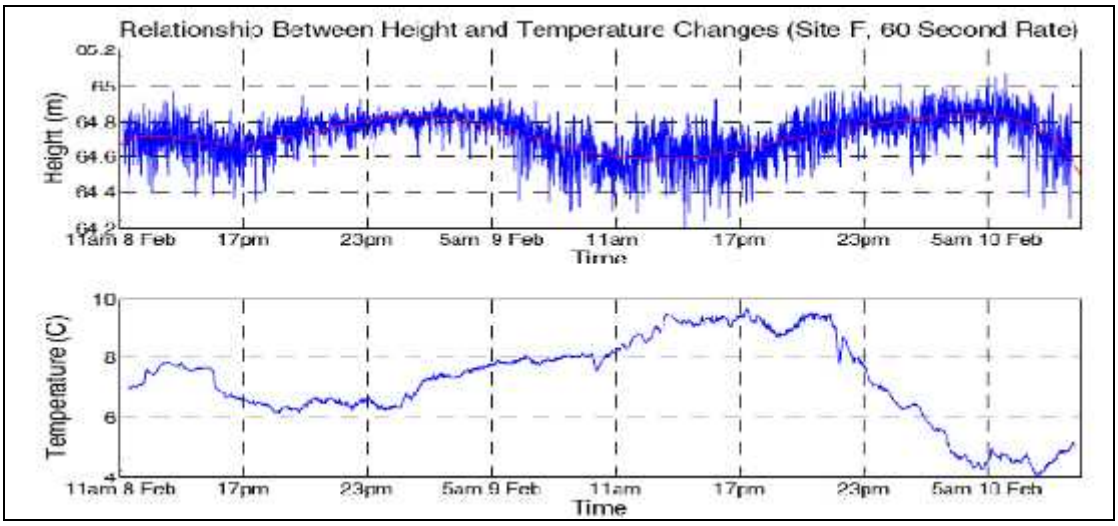


Σχήμα 3.13: Κατά μήκος παραμορφώσεις της γέφυρας στο μέσο του ανοίγματος

Κατά τη διάρκεια της δεύτερης νύχτας, όπως φαίνεται από το σχήμα 3.14, οι παραμορφώσεις ήταν μεγαλύτερες από την πρώτη. Αυτό οφείλεται στην ύπαρξη ισχυρών ανέμων στην περιοχή, οι οποίοι επηρέαζαν την μετακίνηση του καταστρώματος. Είναι γνωστό ότι η αύξηση ή η μείωση της θερμοκρασίας προκαλεί διαστολή ή συστολή σε ένα υλικό. Έγινε λοιπόν σύγκριση της μεταβολής της θερμοκρασίας, η οποία έφτασε, με την μεταβολή του ύψους του καταστρώματος της γέφυρας (σχήμα 3.15). Η αλλαγή στο ύψος της γέφυρας σχετίζεται με το φαινόμενο συστολής-διαστολής των καλωδίων υποστήριξης της γέφυρας.

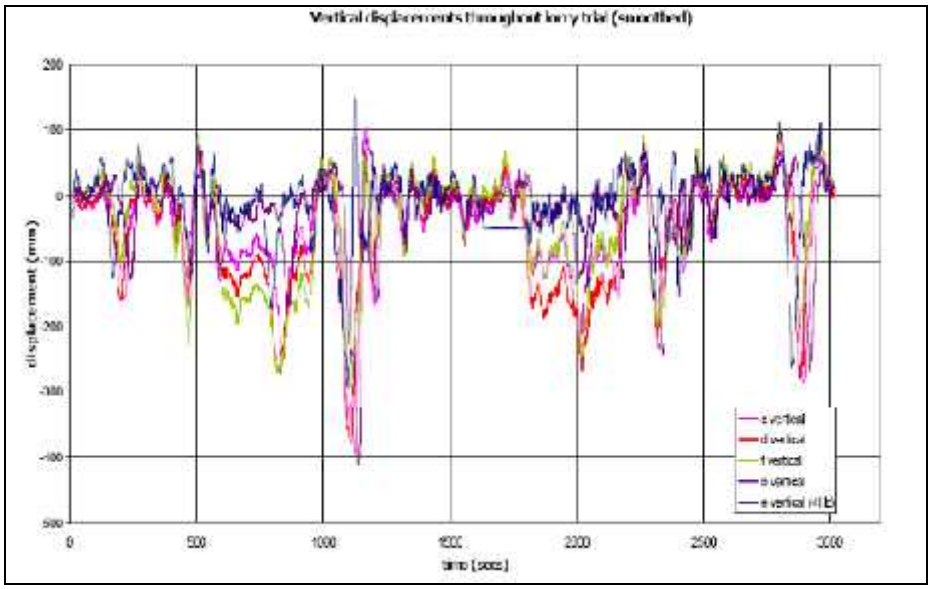


Σχήμα 3.14: Εγκάρσιες παραμορφώσεις της γέφυρας στο μέσο του ανοίγματος

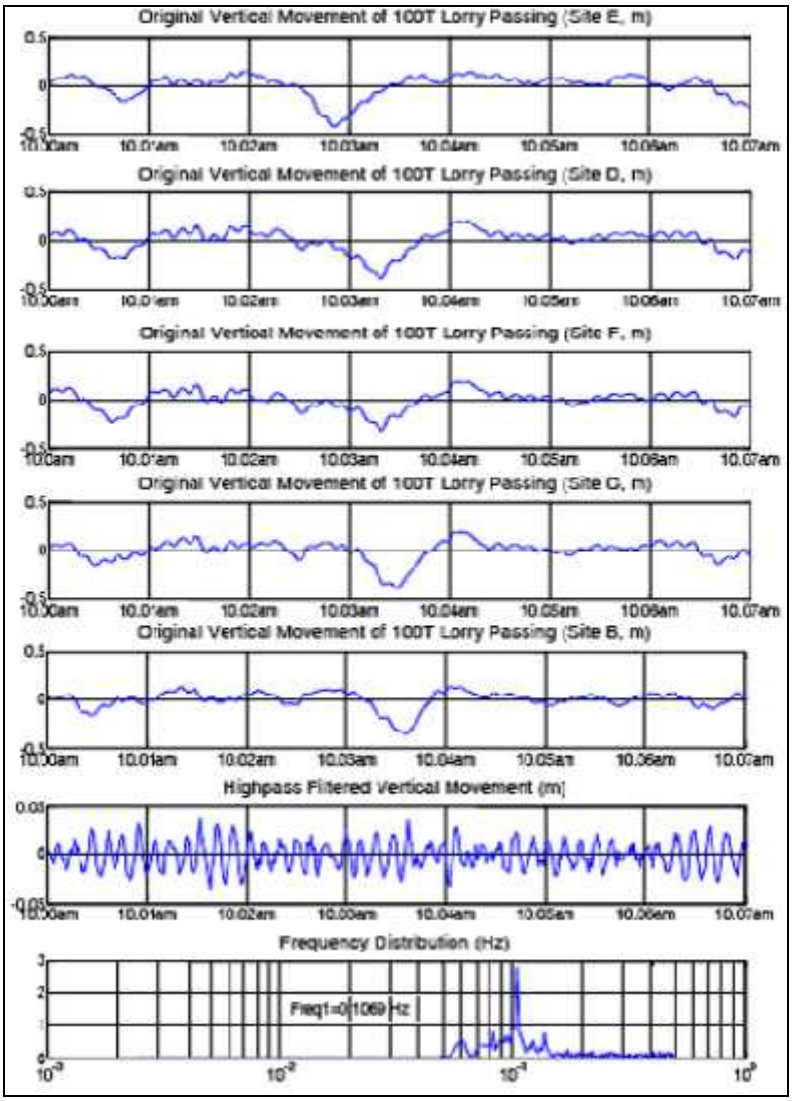


Σχήμα 3.15: Κατά μήκος παραμορφώσεις της γέφυρας στο μέσο του ανοίγματος

Ακόμη, πραγματοποιήθηκαν πειράματα με ένα φορτηγό 100 τόνων να διασχίζει το κατάστρωμα της γέφυρας. Πραγματοποιήθηκαν πειράματα με δύο φορτηγά 40 τόνων έκαστο τα οποία διέσχιζαν τη γέφυρα χωρίς άλλο κυκλοφοριακό φόρτο, κάνοντας ελιγμούς πάνω στο κατάστρωμά της. Ο σκοπός αυτών των πειραμάτων ήταν να βρεθεί η σχέση των ταλαντώσεων του καταστρώματος της γέφυρας με τα φορτία που τη διασχίζουν. Αυτό δεν μπορούσε να πραγματοποιηθεί με συνθήκες πραγματικού κυκλοφοριακού φόρτου. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα σχήματα 3.16 και 3.17.



Σχήμα 3.16: Υψομετρικές διαφορές κατά τη διέλευση φορτηγών 40 τόνων



Σχήμα 3.17: Υψομετρικές διαφορές κατά τη διέλευση φορτηγού 100 τόνων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ MATLAB

4.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο με τη βοήθεια του λογισμικού Matlab μελετάμε ταλαντώσεις κατασκευών και κτιρίων που έχουν καταγραφεί σε βίντεο. Υπάρχουν πολλά βίντεο που δείχνουν κατασκευές να ταλαντώνονται ενώ δεν υπάρχουν αντίστοιχες μετρήσεις. Με τη χρήση αυτού του λογισμικού μας δίνεται η δυνατότητα να διερευνήσουμε ταλαντώσεις όταν δεν έχουμε άλλες πηγές δεδομένων.

Το όνομα του λογισμικού MATLAB προέρχεται από τις λέξεις MATrix LABoratory. Είναι ένα σύγχρονο μαθηματικό πακέτο για υψηλής απόδοσης αριθμητικούς υπολογισμούς και κατασκευή γραφημάτων. Επίσης παρέχει τη δυνατότητα προγραμματισμού. Η γλώσσα προγραμματισμού του Matlab, η Matlab, δίνει επίσης τη δυνατότητα στο χρήστη να το επεκτείνει με δικά του προγράμματα. Χρησιμοποιείται σε διάφορους τομείς της επιστήμης αλλά και της πράξης, π.χ στη μηχανική, στην ιατρική, στα μαθηματικά, στη φυσική, στην οικονομία και στη βιομηχανία. Όλα αυτά το κάνουν ένα χρήσιμο εργαλείο.

Τα κύρια χαρακτηριστικά και οι δυνατότητες του προγράμματος είναι τα εξής:

- Υπολογισμοί (γραμμική άλγεβρα, επεξεργασία σημάτων, πολυώνυμα, παράγωγοι, ολοκληρώματα)
- Γραφικά (2D γραφικά, 3D γραφικά, χρωματισμοί, σκιάσεις, ήχος, βίντεο, animation)
- Επικοινωνία (Fortran, VB.Net, Java, C)
- Εργαλειοθήκες (επεξεργασία εικόνας, συμβολικά μαθηματικά, συστήματα ελέγχου, οικονομικά, επικοινωνία)

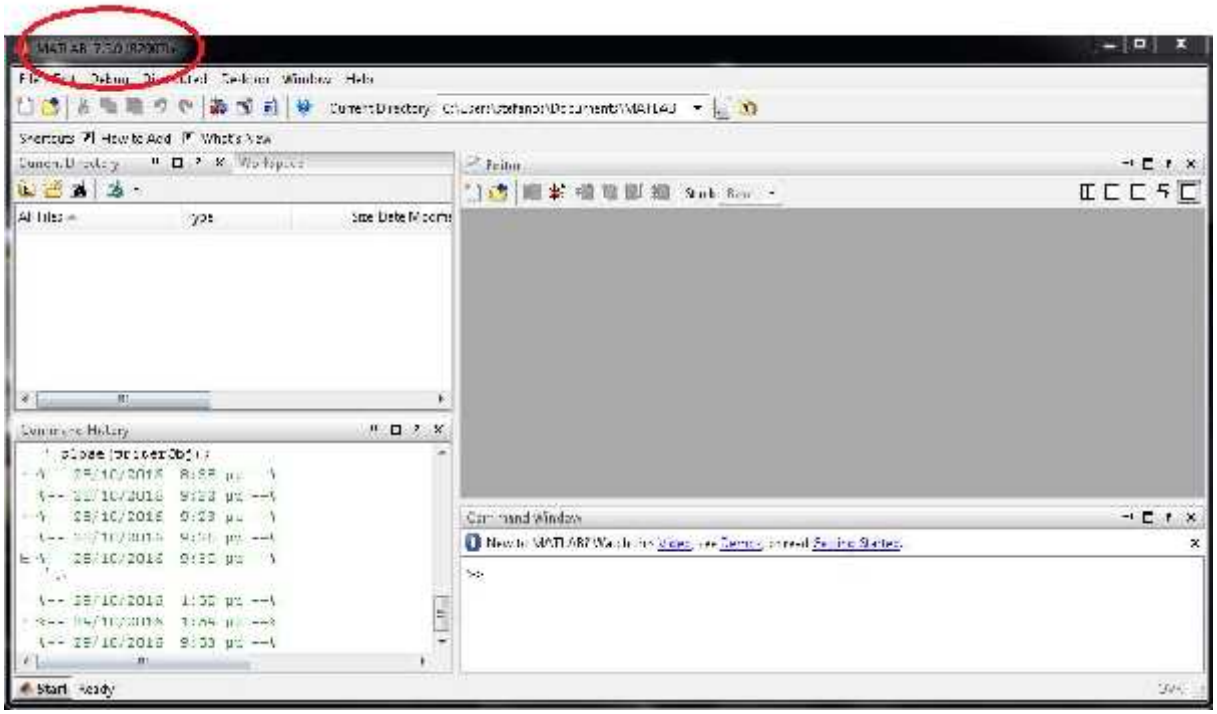
Το matlab είναι ένα πρόγραμμα σχεδιασμένο για την αριθμητική επίλυση προβλημάτων σε αριθμητική πεπερασμένης ακρίβειας, δηλαδή δε βρίσκει την ακριβή λύση αλλά μια προσεγγιστική λύση ενός προβλήματος.

4.2 Το λογισμικό matlab

Με διπλό αριστερό κλίκ στο εικονίδιο του Matlab πετυχαίνουμε την εκκίνηση του προγράμματος.

Εικόνα 4.1: Εικονίδιο προγράμματος

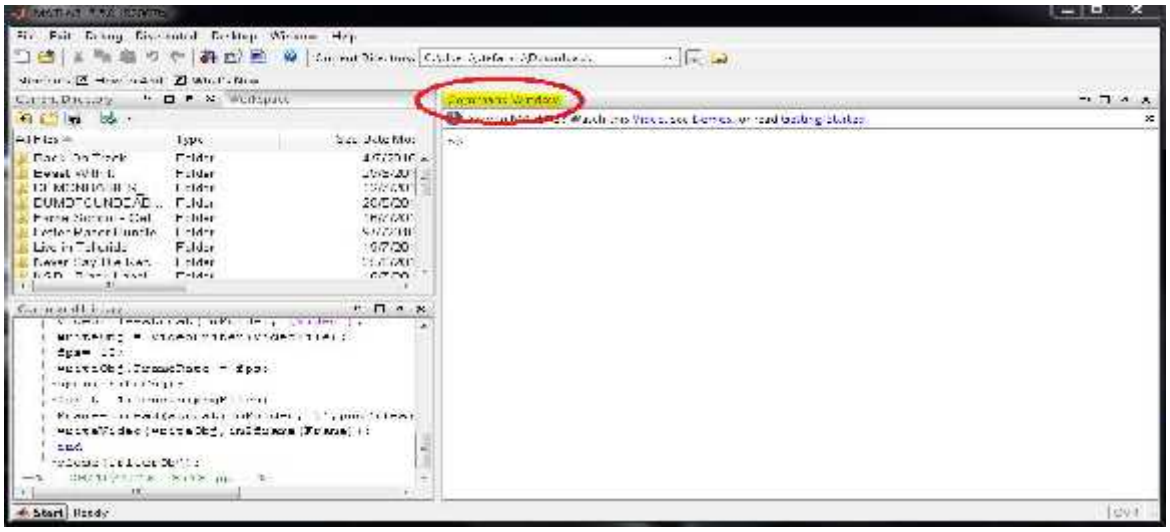
Μετά από λίγο ο χρήστης αντικρίζει την επιφάνεια εργασίας του που αποτελείται από υπο-παράθυρα.



Εικόνα 4.2: παράθυρο έναρξης του προγράμματος

Παράθυρο Εντολών (Command Window)

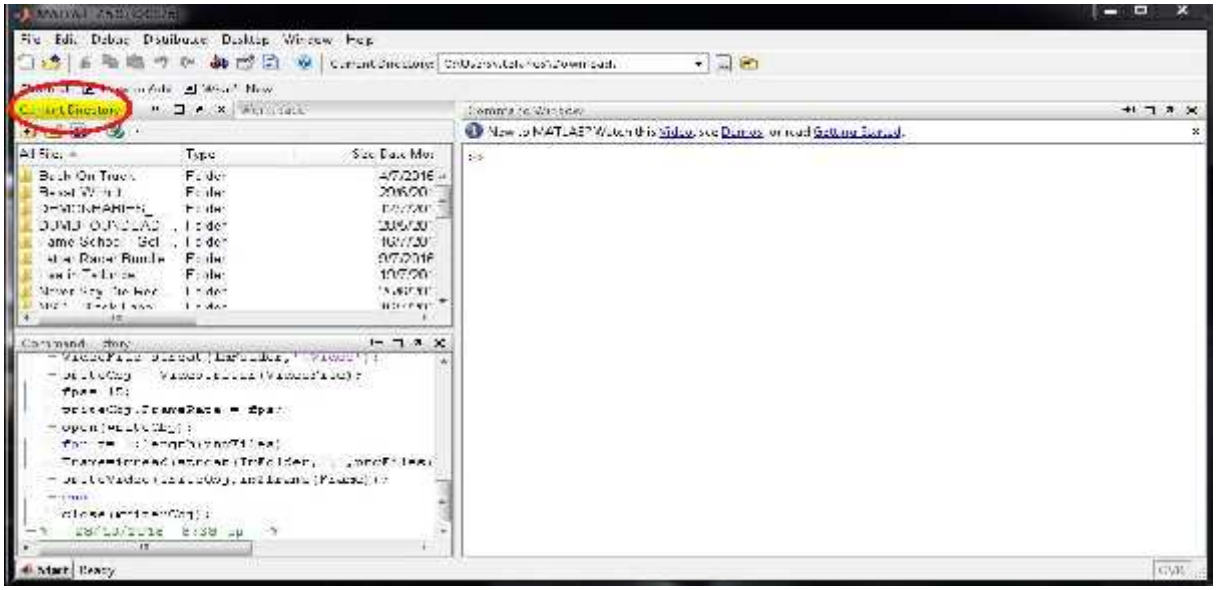
Είναι το βασικό παράθυρο, βρίσκεται στα δεξιά και εισάγονται οι εντολές του matlab, συμπεριλαμβανομένων και των εντολών που αναπτύσσει ο ίδιος ο χρήστης. Χαρακτηριστικό στοιχείο του είναι το σύμβολο προτροπής (>>). Το σύνολο των εντολών πληκτρολογούνται στο παράθυρο εντολών πάντα με τη χρήση του συμβόλου της προτροπής μπροστά από κάθε εντολή. Σε αυτό το παράθυρο γίνεται εισαγωγή των απαραίτητων δεδομένων για μια εφαρμογή και τα αποτελέσματα τυπώνονται εδώ.



Εικόνα 4.3: Παράθυρο εντολών

Παράθυρο τρέχοντος καταλόγου (Current directory)

Είναι το σημείο που αναγράφονται το σύνολο των αρχείων που είναι αποθηκευμένα στο τρέχον κατάλογο του συστήματος (directory). Υπάρχει η δυνατότητα πλοήγησης μέσα σε αυτό, με τη χρήση του ποντικιού μπορεί ο χρήστης να κάνει διάφορες επιλογές.

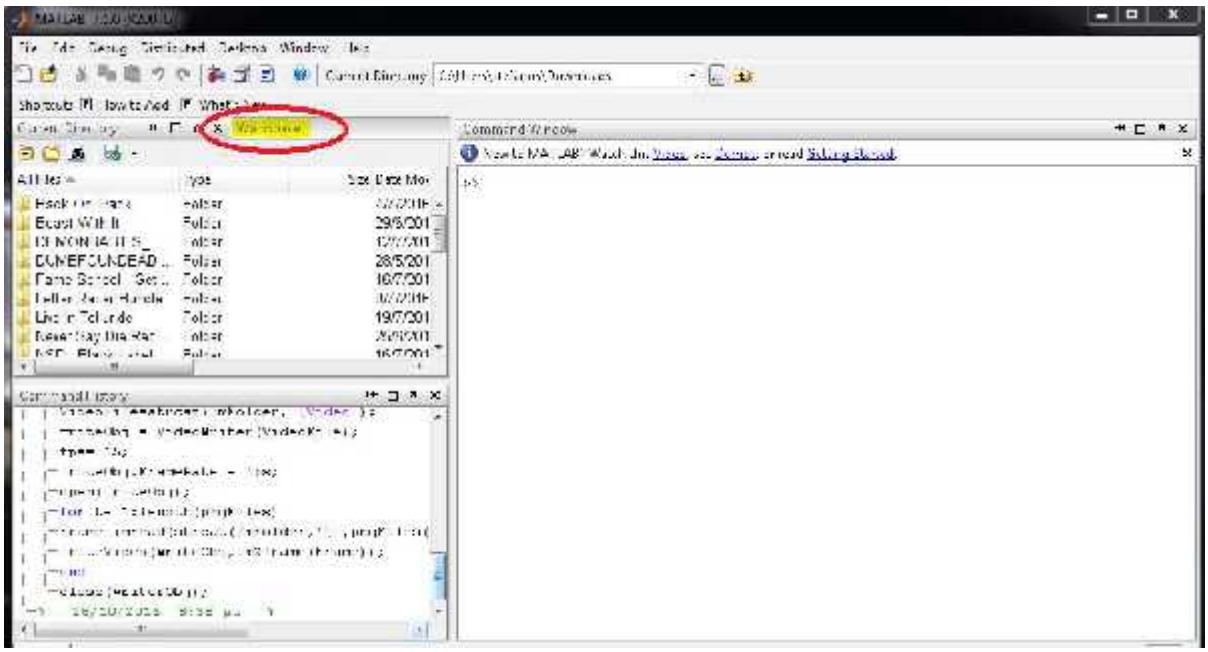


Εικόνα 4.4: Παράθυρο τρέχοντος καταλόγου

Παράθυρο χώρου εργασίας (Workspace)

Εδώ απεικονίζονται όλες οι μεταβλητές που εισάγονται και χρησιμοποιούνται στο παράθυρο εντολών. Σ’ αυτό το παράθυρο παρέχονται πληροφορίες για το τύπο και το μέγεθος κάθε

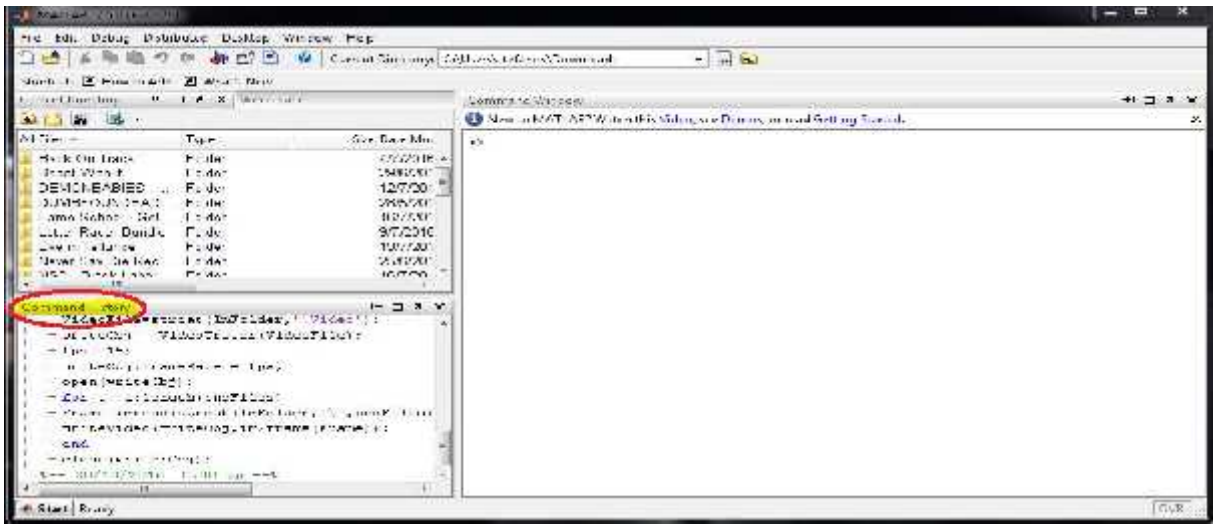
μεταβλητή. Ο χρήστης μπορεί να ανακαλέσει τη μεταβλητή αυτή στο παράθυρο εντολών, πληκτρολογώντας το όνομα της.



Εικόνα 4.5: Παράθυρο χώρου εργασίας.

Παράθυρο ιστορικού εντολών (Command History)

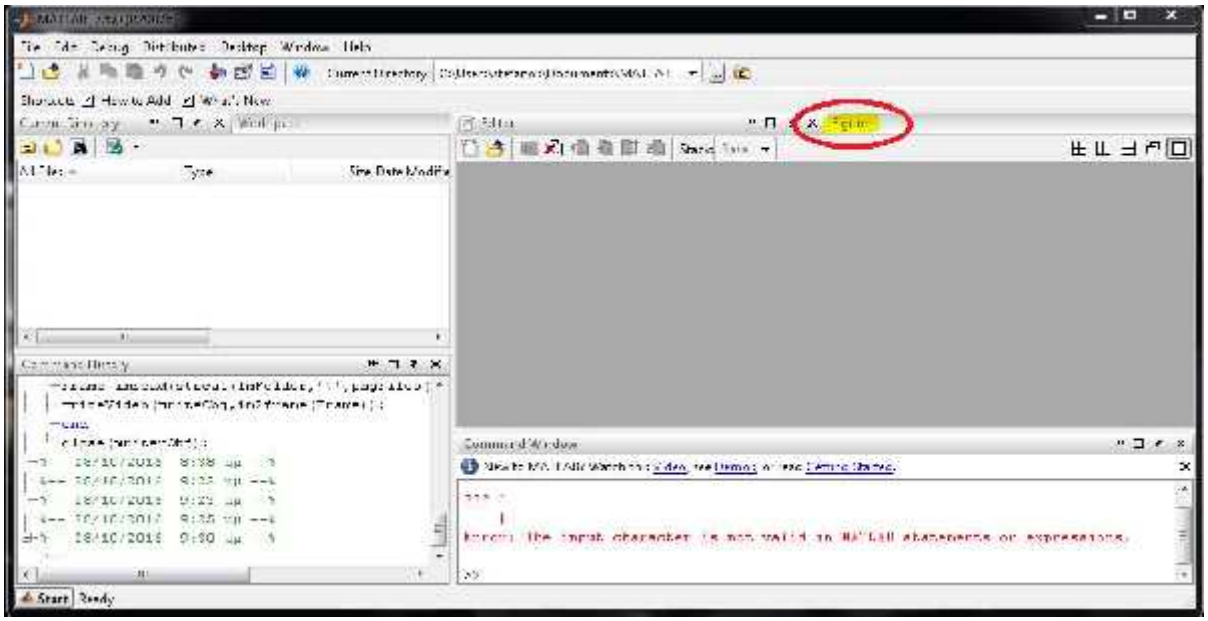
Οι εντολές που πληκτρολογούνται στο παράθυρο εντολών μετά από κάθε σύμβολο προτροπής (>>) καταγράφονται στο παράθυρο ιστορικού εντολών. Εδώ υπάρχουν εντολές ακόμα και από προηγούμενες εισαγωγές στο σύστημα. Σε αυτό το παράθυρο δίνεται η δυνατότητα να επιλέγει μια επιθυμητή εντολή και να εκτελεστεί στο παράθυρο εντολών, αυτό γίνεται κάνοντας διπλό αριστερό κλικ στην εντολή αυτή.



Εικόνα 4.6: Παράθυρο ιστορικού εντολών

Παράθυρο γραφημάτων (Figure Window)

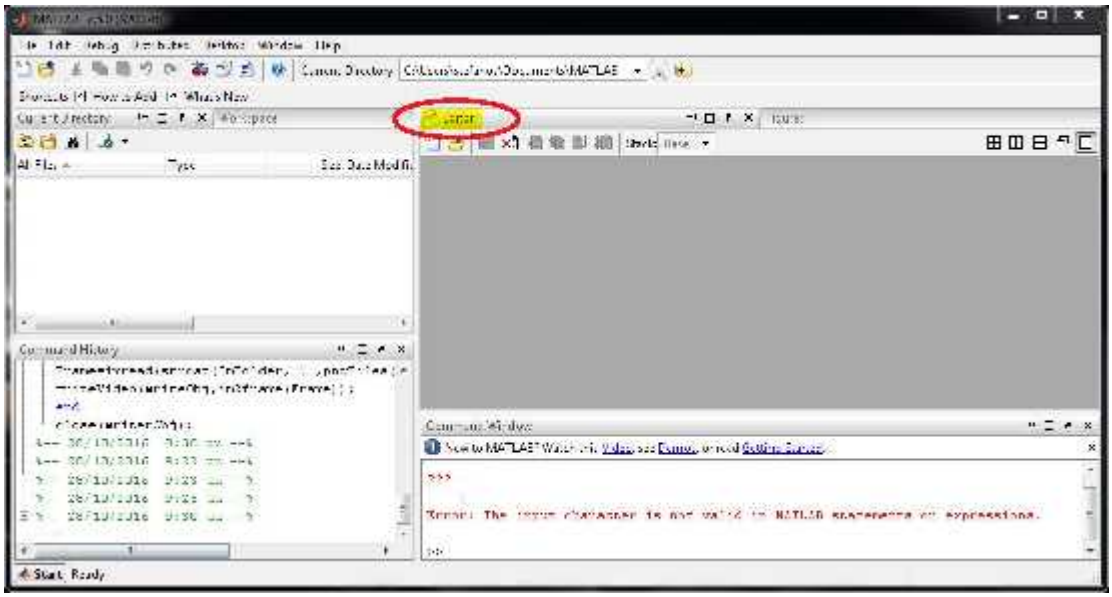
Στο παράθυρο των γραφημάτων εμφανίζονται τα αποτελέσματα των εντολών με τα γραφήματα. Από εδώ γίνεται επεξεργασία και χειρισμός γραφημάτων, από τις πρόσφατες εκδόσεις του προγράμματος.



Εικόνα 4.7: Παράθυρο γραφημάτων

Παράθυρο σύνταξης (Editor Window)

Σε αυτό το παράθυρο ο κάθε χρήστης μπορεί να αναπτύξει, να επεξεργαστεί και να αποθηκεύσει δικά του αρχεία εντολών που απαρτίζονται από M-Files.



Εικόνα 4.8: Παράθυρο σύνταξης

Έναρξη (start) το πλήκτρο αυτό χρησιμοποιείται για τη χρήση εργαλειοθηκών του προγράμματος.

4.3 Ιδιότητες

4.3.1 Τύπο δεδομένων

Η εισαγωγή δεδομένων στο πρόγραμμα γίνεται με τη μορφή πίνακα ή διανύσματος. Οι πίνακες μπορεί να έχουν πολλά δεδομένα, όπως για παράδειγμα ακέραιους, πραγματικούς, μιγαδικούς αριθμούς και γράμματα. Χρησιμοποιούμε το σύμβολο της ισότητας "=" για να καταχωρήσουμε τα δεδομένα σε μια μεταβλητή. Οι τετραγωνικές παρενθέσεις "[ ]" περιέχουν τα στοιχεία του διανύσματος, που διαχωρίζονται με κενό ή με κόμμα. Σε περίπτωση διανύσματος στήλης τα στοιχεία διανύσματος διαχωρίζονται με ερωτηματικό και όχι με κόμμα. Ο ορισμός πίνακα μοιάζει με τον ορισμό διανύσματος. Ορίζουμε το πίνακα γραμμή με γραμμή, ξεχωρίζουμε τη κάθε γραμμή με ερωτηματικό. Ο ορισμός γραμμής είναι ίδιος με του διανύσματος, μεταξύ των στοιχείων γραμμής βάζουμε κενό ή κόμμα

4.3.2 Ονοματολογία δεδομένων

Το πρόγραμμα Matlab έχει δικούς του κανόνες για την ονοματολογία μεταβλητών. Βασικός κανόνας είναι ότι τα ονόματα μεταβλητών ξεκινούν μόνο με γράμμα. Ύστερα από το γράμμα μπορεί να μπει σύμβολο, αριθμός και γράμμα χωρίς κανένα κενό. Στην ονοματολογία δεν πρέπει να μπουν κάποια σύμβολα (+, -, /, \, *, ^, =, ~, <, >, &, |, :, (,) ,[,], ., % ,!), καθώς έχουν ειδική σημασία για το λογισμικό του προγράμματος. Ακόμη στην ονοματολογία ο χρήστης πρέπει να προσέξει ιδιαίτερα τα ονόματα των μεταβλητών να μην είναι ίδια με ονόματα των μεταβλητών των σταθερών τιμών ή των συναρτήσεων του προγράμματος.

Πίνακας 4.1: Σύμβολα της Matlab

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΧΡΗΣΗ
+	Πρόσθεση
-	Αφαίρεση
/ ή \	Διαίρεση
*	Πολλαπλασιασμός

^	Ύψωση σε δύναμη
=	Ίσο
~	Λογικό όχι
<	Μικρότερο
>	Μεγαλύτερο
< =	Μικρότερο ή ίσο
> =	Μεγαλύτερο ή ίσο
= =	Ίσο
~ =	Όχι ίσο
&	Λογικό ναι
|	Λογικό ή
%	Σχόλια και παρατηρήσεις

4.3.3 Ευαισθησία κατά περίπτωση

Το Matlab κάνει διαχωρισμό μεταξύ κεφαλαίων και πεζών γραμμάτων. Δηλαδή το a+b είναι διαφορετικό από το A+b.

4.3.4 Εμφάνιση αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα των εντολών φαίνονται στο παράθυρο των εντολών ή των γραφημάτων. Αν ο χρήστης μετά από κάθε εντολή βάζει ερωτηματικό τότε το πρόγραμμα δεν εμφανίζει τα αποτελέσματα στην οθόνη

4.4 Γραφήματα στο Matlab

Τα γραφήματα που μπορούμε να δημιουργήσουμε με την βοήθεια του matlab ποικίλουν. Όπως για παράδειγμα τυπικά γραφήματα δύο διαστάσεων ή τριών διαστάσεων, διαγράμματα ακόμα και animation. Το λογισμικό αυτό παρέχει ιδιαίτερους χρωματισμούς, σκιάσεις και δυνατότητα επεξεργασίας γραφημάτων και εικόνων. Αυτό πραγματοποιείται με εύκολο τρόπο είτε χρησιμοποιώντας κώδικα είτε από το διαδραστικό περιβάλλον επεξεργασίας γραφημάτων.

Η κατασκευή γραφημάτων επιτυγχάνεται με την εντολή plot. Με τη χρήση της εντολής αυτής δημιουργούνται γραφικές παραστάσεις γραμμών ευθειών και καμπυλών, είναι η βασική εντολή για τη κατασκευή δισδιάστατων γραφημάτων. Πληκτρολογώντας help plot ο χρήστης μπορεί να δει τις δυνατότητες της εντολής.

Πίνακας 4.2: Ιδιότητες της Matlab

Style option/Color	Style option/Line style	Style option/Marker style
y yellow	- dashdot	. point
m magenta	-- dashes	o circle
c cyan	: dotted	x x-mark
r red		+ plus
g green		- solid
b blue		* star
w white		
k black		

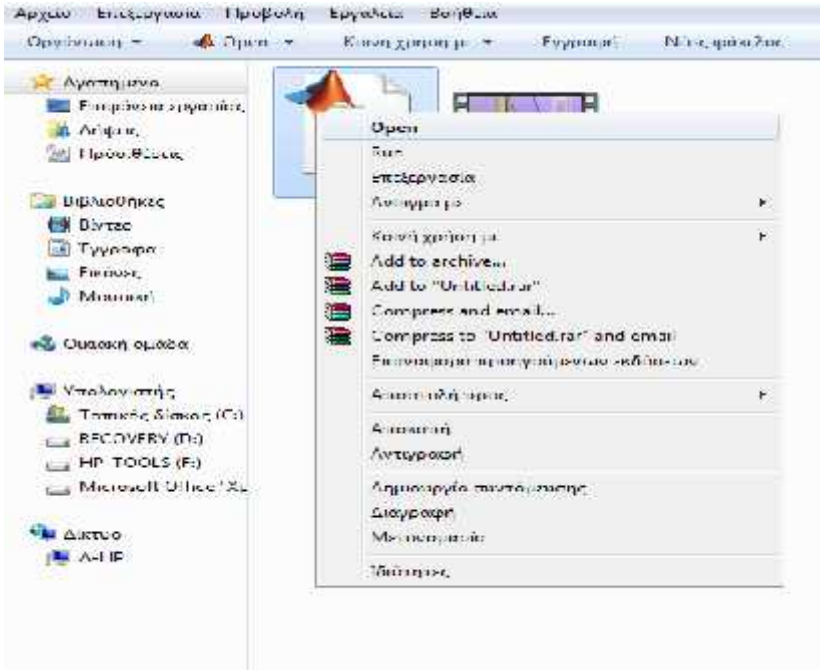
4.5 Προγραμματισμός Matlab

Μια από τις ιδιότητες του προγράμματος είναι να γράφουμε δικές μας εντολές. Αυτό επιτυγχάνεται με τα αρχεία “m-files”. Έχουν αυτή την ονομασία γιατί πρέπει να έχουν επίθεμα (extension) στο όνομα τους “.m”, όπως για παράδειγμα untitled.m.

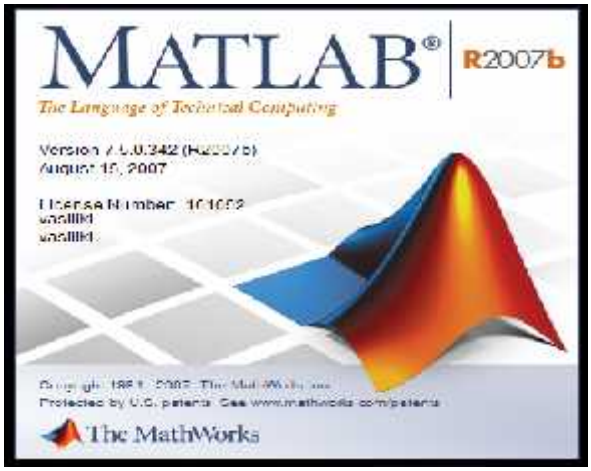
- Το πρώτο στάδιο είναι η αποθήκευση του βίντεο που ενδιαφέρει το χρήστη στον υπολογιστή. Το βίντεο θα είναι από σταθερή κάμερα για μεγαλύτερη ακρίβεια.
- Στη συνέχεια το βίντεο πρέπει να κοπεί και να μετατραπεί σε αρχείο avi.

- Δημιουργείται ένας φάκελος “Untitled” με το ήδη μετατρεμμένο βίντεο και τον κώδικα της Matlab. Το αρχείο του κώδικα πρέπει να ανήκει στη κατηγορία M-files για να ανοίγει κατευθείαν το πρόγραμμα Matlab.
- Ανοίγοντας το φάκελο, κάνοντας διπλό αριστερό κλικ στο αρχείο του κώδικα ανοίγει το παράθυρο Editor της Matlab. Σε αυτό το παράθυρο πατώντας το εικονίδιο “Run Untitled” (πράσινο) ξεκινά η διαδικασία τρεξίματος του βίντεο.

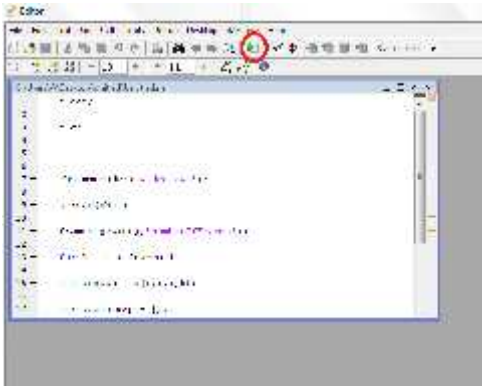
Η διαδικασία σε εικόνες:



Εικόνα 4.9: Όταν ανοίγει ένας φάκελος που έχει M-files



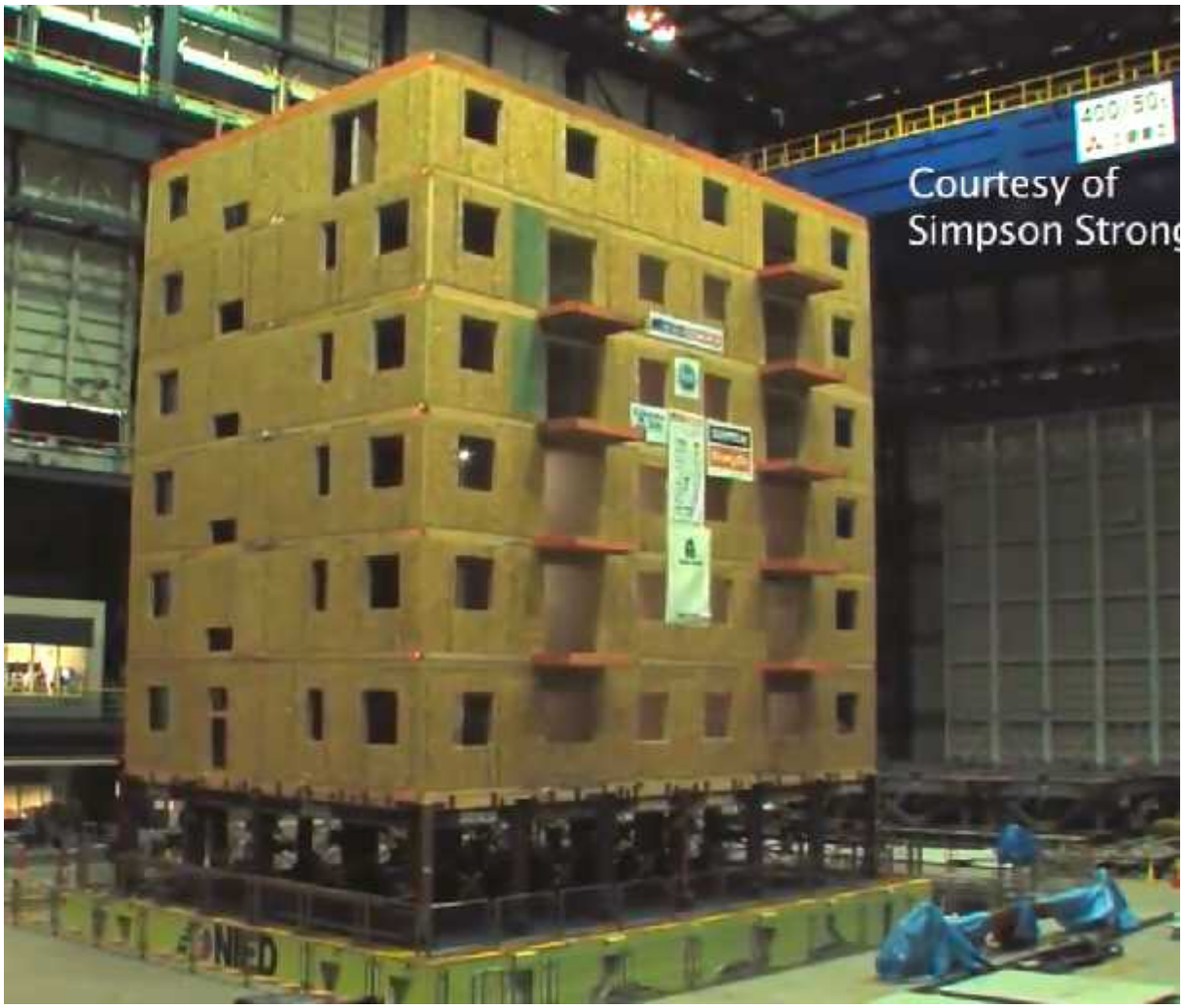
Εικόνα 4.9: Το εικονίδιο εκκίνησης της Matlab



Εικόνα 4.10: Ο κώδικας που τρέχει βίντεο

Εικόνα 4.11: Στιγμιότυπο από το βίντεο ταλάντωσης γέφυρας ενώ τρέχει στη Matlab

Εικόνα 4.12: Στιγμιότυπο από το βίντεο ταλάντωσης γέφυρας ενώ τρέχει στη Matlab



Εικόνα 4.13: Στιγμιότυπο από το βίντεο ταλάντωσης κτιρίου ενώ τρέχει στη Matlab

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια της παρούσας πτυχιακής μελετήθηκε η εφαρμογή δύο γεωδαιτικών οργάνων για την αποτύπωση ταλαντώσεων κατασκευών (GPS και RTS). Στη συλλογή μετρήσεων και στην επεξεργασία τους εντοπίστηκαν προβλήματα στις καταγραφές των μετακινήσεων και από τα δύο όργανα.

Για την ελαχιστοποίηση των προβλημάτων στο μέλλον θα χρειαστεί να γίνουν τα εξής:

- Συστηματική και συνεχόμενη παρακολούθηση των κατασκευών με τον ίδιο τρόπο αλλά με παραπάνω όργανα, για να γίνονται παραπάνω καταγραφές.
- Η λήψη των μετρήσεων να γίνεται όλο το χρόνο. Επηρεάζουν οι καιρικές συνθήκες στα αποτελέσματα. Για αυτό οι μετρήσεις πρέπει να γίνονται τόσο τους καλοκαιρινούς μήνες που το έδαφος είναι ξερό όσο και εποχές με βροχοπτώσεις που το έδαφος είναι κορεσμένο.
- Επιλογή οργάνων που θα έχουν μεγαλύτερη ακρίβεια.
- Μπορεί να γίνει σύγκριση των μετρήσεων των δύο οργάνων για να ελεγχθεί η ορθότητα των αποτελεσμάτων αλλά και της διαδικασίας.

Τέλος, γνωρίσαμε το λογισμικό Matlab που χρησιμοποιείται από μηχανικούς για τη μελέτη ταλαντώσεων κατασκευών και κτιρίων που έχουν καταγραφεί σε βίντεο. Υπάρχουν πολλά βίντεο που δείχνουν κατασκευές να ταλαντώνονται ενώ δεν υπάρχουν αντίστοιχες μετρήσεις. Με τη βοήθεια αυτού του προγράμματος μπορούμε να βρούμε τις τιμές.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Γραικούσης Γ. και Λαγός Α. (2011) Αρχές τοπογραφίας και γεωδαιτικής, Αθήνα, ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΕΚΔΟΤΙΚΗ
- Λάμπρου Ε. και Πανταζής Γ. (2011), Εφαρμοσμένη Γεωδαισία, Θεσσαλονίκη, ΕΚΔΌΣΕΙΣ ΖΗΤΗ
- http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/2111/1/PhD%20Panos%20Psimoulis.pdf
- http://www.leica-geosystems.com/en/index.htm
- http://www.trimble.com/
- http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/556/1/MSc_Kokkinou.pdf
- https://el.wikipedia.org/
- http://www.mathworks.com
- http://www.unc.edu/~thedrick/software1.html
- Τεχνική περιγραφή έργου «Επιθεώρηση και συντήρηση καλωδιωτής γέφυρας Ευρίπου» ΥΠΕΧΩΔΕ 2009
- Psimoulis P., Stiros E. " Measurement of deflections and of oscillation frequencies of engineering structures using Robotic Theodolites", Engineering Structures, 2007
- Σακελλαρίου Μιχαήλ, « Γεωτεχνική Μηχανική», Αθήνα 2008
- Φωτίου Α., Πικριδάς Χ., « GPS και Γεωδαιτικές εφαρμογές», 2006
- Cosser, E., Roberts, G.Q, Meng, X., Dodson, A., «Measuring dynamic deformaion of bridges using a total station», Proc. of 11th International Symposium on Deformation measuements, Santorini, Greece,2006