

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

**Ανάλυση δεδομένων ολοκληρωμένου συστήματος
παρακολούθησης παραμορφώσεων σε μεγάλες κατασκευές**

Μεταπτυχιακή διατριβή

Γιάννης Ε. Αρχοντάκης

Εξεταστική Επιτροπή

Μερτίκας Στυλιανός, Καθηγητής (επιβλέπων)

Αγιουτάντης Ζαχαρίας, Καθηγητής

Προβιδάκης Κωνσταντίνος, Αναπληρωτής Καθηγητής

Χανιά

Ιούνιος, 2004

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σύγχρονες μελέτες έχουν δείξει ότι οι μεγάλες κατασκευές όπως γέφυρες και ουρανοξύστες κάτω από συνθήκες εξωτερικής φόρτισης, είναι δυνατόν να παρουσιάζουν μικρομετακινήσεις με πλάτος από 10 έως 200 mm σε ένα εύρος συχνοτήτων από 0.1 έως 10 Hz. Η ποιοτική και ποσοτική παρακολούθηση των παραμορφώσεων κάτω από τέτοιες συνθήκες φόρτισης, μπορεί να δώσει χρήσιμα συμπεράσματα για την κατάσταση της κατασκευής.

Στην παρούσα διατριβή περιγράφεται ένα ολοκληρωμένο σύστημα παρακολούθησης παραμορφώσεων. Το σύστημα αυτό αποτελείται από δέκτες κινηματικού GPS (Real Time Kinematic GPS, RTK GPS), επιταχυνσιόμετρα και μετεωρολογικούς αισθητήρες. Η εγκατάσταση ενός τέτοιου συστήματος καθώς και οι παρατηρήσεις που εξάγονται από αυτό περιγράφονται εκτενώς.

Για την ανάλυση των παρατηρήσεων ενός ολοκληρωμένου συστήματος παρακολούθησης παραμορφώσεων προτείνονται μέθοδοι φασματικής ανάλυσης καθώς και ανάλυση διακυμάνσεων απαλλαγμένων από συστηματικές τάσεις (Detrended Fluctuations Analysis, DFA). Οι μέθοδοι αυτές εφαρμόστηκαν σε δεδομένα που προήλθαν από ανάλογο σύστημα το οποίο έχει εγκατασταθεί στον ουρανοξύστη Republic Plaza Building (RPB) στη Σιγκαπούρη.

Με την εφαρμογή φασματικών μεθόδων εντοπίστηκε η ιδιοσυχνότητα του κτηρίου. Η ανάλυση διακυμάνσεων έδειξε την ύπαρξη συσχετίσεων μακρινάς χρονικής εμβέλειας τόσο στις χρονοσειρές των μετατοπίσεων όσο και σε αυτές της ταχύτητας του ανέμου.

ABSTRACT

Recent studies have indicated that large structures such as bridges and high rise buildings, may exhibit displacements of the order of 10 to 200 mm at a band of 0.1 to 10 Hz. Detailed description of the deflections can help determine the condition of the structure.

In this thesis an integrated structural monitoring system is presented. It consists of GPS receivers working under Real Time Kinematic mode (RTK GPS), accelerometers and meteo sensors. The installation and the observations that are carried out from such a system are described thoroughly.

For the data analysis of the observations of an integrated monitoring system, Spectral methods and Detended Fluctuations Analysis (DFA) are proposed. These methods were applied to the data from a similar system installed at the Republic Plaza Building (RPB) Singapore.

The spectral analysis that was carried out indicated the fundamental frequency of the building. Long term correlations were detected in times series of displacements and wind speed.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για την εκπόνηση αυτής της διατριβής θα πρέπει να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που στάθηκαν πολύτιμοι αρωγοί στην προσπάθεια αυτή. Κατ' αρχάς να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κύριο Σ. Μερτίκα καθώς και τους καθηγητές που συμπληρώνουν την εξεταστική επιτροπή κυρίους Ζ. Αγιουτάντη και Κ. Προβιδάκη για τις πολύτιμες συμβουλές και διορθώσεις που μου παρείχαν. Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να δώσω στον αναπληρωτή καθηγητή κύριο Δ. Χριστόπουλο για την καθοδήγησή του και το χρόνο που πρόθυμα αφιέρωσε. Τέλος ευχαριστώ τον καθηγητή κύριο James Brownjohn από το πανεπιστήμιο της Σιγκαπούρης για τα δεδομένα που ευγενικά παραχώρησε.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<i>Περίληψη</i>	2
<i>Abstract</i>	3
<i>Ευχαριστίες</i>	4
<i>Πίνακας Περιεχομένων</i>	5
<i>Κατάλογος πινάκων και σχημάτων</i>	7
 <i>Κεφάλαιο 1</i>	
<i>Εισαγωγή</i>	9
 <i>Κεφάλαιο 2</i>	
<i>Ανάλυση φορτίων</i>	
2.1 Η δομοστατική ανάλυση στις κατασκευές	13
2.2 Ανάλυση φορτίων	15
2.3 Φορτία ανέμου	16
2.4 Σεισμικά φορτία	17
2.5 Παραμόρφωση δομικών στοιχείων κατασκευής	20
 <i>Κεφάλαιο 3</i>	
<i>Παρακολούθηση παραμορφώσεων</i>	
3.1 Εισαγωγή	22
3.2 Μεθοδολογία	23
3.3 Ολοκληρωμένο σύστημα παρακολούθησης παραμορφώσεων	25
 <i>Κεφάλαιο 4</i>	
<i>Περιγραφή παρατηρήσεων</i>	
4.1 Το Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού (GPS)	27
4.2 Παρατήρηση δυναμικών φαινομένων με χρήση GPS	33
4.3 Επιταχυνσιόμετρα	37
4.4 Μετεωρολογικοί αισθητήρες	38
4.5 Ολοκλήρωση συστήματος	39

Κεφάλαιο 5

Ανάλυση δεδομένων

5.1 Εισαγωγή	41
5.2 Φασματικές τεχνικές	41
5.3 Ανάλυση διακυμάνσεων	43
5.4 Ανάλυση πραγματικών δεδομένων	47
5.4.1 Εγκαταστάσεις συστήματος	47
5.4.2 Περιγραφή δεδομένων	49
5.5 Αποτελέσματα ανάλυσης	53

Κεφάλαιο 6

<i>Συμπεράσματα – Προτάσεις</i>	59
--	----

<i>Βιβλιογραφικές Αναφορές</i>	62
---	----

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ ΚΑΙ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Πίνακας 2.1 : Ενδεικτικές τιμές κινητών φορτίων.

Σχήμα 2.1 : Η πίεση του ανέμου σε κτήριο.

Σχήμα 2.2 : Προσομοίωση ταλάντωσης εξ' αιτίας φορτίων κρούσης.

Σχήμα 2.3: Τα δομικά στοιχεία μιας κατασκευής.

Σχήμα 2.4 : Παραμόρφωση τοιχίων και πλαισίων υπό οριζόντια φόρτιση για ελεύθερα τοιχώματα, αμιγή πλαίσια και μικτούς φορείς αντίστοιχα

Σχήμα 3.1 : Τα παρατηρούμενα μεγέθη σε μια γέφυρα με τη χρήση GPS.

Σχήμα 4.1 : Η Συνάρτηση Φασματικής Πυκνότητας για τις χρονοσειρές του πειράματος για ταλάντωση με συχνότητα 2,3 και 4,3 Hz αντίστοιχα.

Σχήμα 4.2 : Η διάταξη των δεκτών GPS στις γέφυρες Tsing Ma, Kap Shui Man, Ting Kau (Hong Kong) αντίστοιχα.

Σχήμα 4.3 : Βάση για την τοποθέτηση GPS – επιταχυνσιομέτρου.

Σχήμα 4.4 : Τυπικές μορφές επιταγχοσιομέτρων.

Σχήμα 4.5 : Σχηματική απεικόνιση της ροής των δεδομένων από το πεδίο παρατήρησης προς το κέντρο επεξεργασίας.

Σχήμα 5.1 : Η εκτίμηση της Φασματικής Πυκνότητας Ισχύος για συνθετικό σήμα με τη χρήση του Περιοδογράμματος Welch.

Σχήμα 5.2 : Ο ουρανοξύστης Republic Plaza Building

Σχήμα 5.3 : Οι κεραίες GPS και τα ανεμόμετρα στην ταράτσα του RPB

Σχήμα 5.4 : Η χρονοσειρά από την οποία προήλθε η πρώτη σειρά δεδομένων.

Σχήμα 5.5 : Το σήμα από το οποίο προήρθε η δεύτερη σειρά δεδομένων (Easting Northing Height).

Σχήμα 5.6 : Οι χρονοσειρές για την πρώτη σειρά δεδομένων.

Σχήμα 5.7 : Οι χρονοσειρές του GPS για το δεύτερο σύνολο δεδομένων

Σχήμα 5.8 : Η Φασματική Πυκνότητα για την ταχύτητα του ανέμου, την μετατόπιση και την επιτάχυνση.

Σχήμα 5.9 : Ο αλγόριθμος DFA για τις διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου.

Σχήμα 5.10 : Σύγκριση της κατανομής των ταχυτήτων του ανέμου σε σχέση με την κανονική κατανομή.

Σχήμα 5.11 : Ο αλγόριθμος DFA για τις διακυμάνσεις των μετατοπίσεων όπως αυτές μετρήθηκαν από τους δέκτες GPS

Σχήμα 5.12 : Η κατανομή των μετατοπίσεων σε σχέση με την κανονική κατανομή

Σχήμα 5.13 : Η Φασματική Πυκνότητα για τις τρεις συνιστώσες του GPS (E, N, h, αντίστοιχα).

Σχήμα 5.14 : Τα αποτελέσματα του αλγόριθμου DFA για τις μετατοπίσεις GPS (Easting)

Σχήμα 6.1 : Ασυνέχειες στις χρονοσειρές των δεδομένων λόγω διακοπής λειτουργίας του καταγραφικού συστήματος

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Σήμερα χάρη στη σύγχρονη τεχνογνωσία οι μεγάλες δομικές κατασκευές, όπως ψηλά κτήρια, γέφυρες κτλ, σχεδιάζονται έτσι ώστε να είναι πιο ανθεκτικές σε ισχυρούς ανέμους, μεγάλες αλλαγές της θερμοκρασίας, σεισμικές δονήσεις και εξωτερικά φορτία που οφείλονται σε ανθρώπινη δραστηριότητα. Μελέτες έχουν δείξει ότι κάτω από τέτοιες συνθήκες οι κατασκευές αυτές είναι δυνατόν να παρουσιάζουν μικρομετακινήσεις με πλάτος από 10 έως 200 mm σε ένα εύρος συχνοτήτων από 0.1 έως 10 Hz.

Αναλύοντας το σύνολο των φορτίσεων που δέχεται μια κατασκευή, δημιουργείται η ανάγκη της παρακολούθησης των παραμορφώσεων που προκαλούνται. Η ακριβής γνώση των μετατοπίσεων που παρατηρούνται στα διάφορα τμήματα ενός κτηρίου ή μιας γέφυρας μπορεί να δώσει συμπεράσματα τα οποία θα αποτελέσουν ένα χρήσιμο εργαλείο στα χέρια του Μηχανικού.

Το εύρος και η συχνότητα των παραμορφώσεων μπορεί να βοηθήσει στο να γίνει έλεγχος των αρχικών προβλέψεων που πραγματοποιήθηκαν στη φάση του σχεδιασμού για τη δυναμική συμπεριφορά της κατασκευής. Η μελέτη του τρόπου με τον οποίο παραμορφώθηκε μια κατασκευή κατά τη διάρκεια μιας έντονης φόρτισης (π.χ. σεισμική δόνηση) δίνει πληροφορίες για τον τρόπο επιδιόρθωσης αστοχιών που πιθανόν να παρατηρηθούν.

Ο έλεγχος των μικρομετακινήσεων εκτός του ενδιαφέροντος που παρουσιάζουν από τη σκοπιά της στατικής και της δυναμικής συμπεριφοράς του κτηρίου είναι χρήσιμος στον έλεγχο της φόρτισης που οφείλεται σε ανθρώπινη δραστηριότητα. Πρόκειται για μια μεθοδολογία που βρίσκει ιδιαίτερη εφαρμογή στην περίπτωση γεφυρών οι οποίες μπορεί να παραλαμβάνουν μεγαλύτερο κυκλοφοριακό φόρτο από αυτόν που είχε προβλεφθεί κατά το σχεδιασμό.

Για το σκοπό της παρακολούθησης των παραμορφώσεων, η χρήση ειδικευμένων οργάνων έχει εξυπηρετήσει μέχρι σήμερα τη διεθνή ερευνητική κοινότητα

ικανοποιητικά. Καθώς όμως οι δομικές κατασκευές αυξάνονται στις σύγχρονες κοινωνίες τόσο ως προς το μέγεθος τους όσο και προς τον αριθμό τους, ολοένα αυξάνεται και η ανάγκη στενότερης και συνεχούς παρακολούθησης των παραμορφώσεων τους κάτω από συνθήκες εξωτερικής φόρτισης.

Η ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς μιας κατασκευής κάτω από συνθήκες εξωτερικής φόρτισης είναι το ζήτημα που αντιμετωπίζεται στο δεύτερο κεφάλαιο της παρούσας διατριβής. Γίνεται μια σύντομη ανάλυση των φορτίων με ιδιαίτερο ενδιαφέρον σε αυτά που προέρχονται από ισχυρούς ανέμους και σεισμικές δονήσεις. Για την πλήρη κατανόηση του προβλήματος των παραμορφώσεων, περιγράφεται σχηματικά ο τρόπος με τον οποίο οι συγκεκριμένες φορτίσεις επιδρούν στα δομικά στοιχεία των κατασκευών.

Εκτός των μεθόδων που έχουν μέχρι σήμερα αναπτυχθεί, στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται ένα ολοκληρωμένο σύστημα παρακολούθησης παραμορφώσεων σε μεγάλες κατασκευές. Το σύστημα αυτό έχει τη δυνατότητα να παρακολουθεί τις παραμορφώσεις σε πραγματικό χρόνο, να αρχειοθετεί τις χρονοσειρές με τις παρατηρήσεις των διαφόρων οργάνων και να καθορίζει κάποιες ακραίες τιμές μετατοπίσεων οι οποίες θα αντιπροσωπεύουν τις οριακές ανεκτές παραμορφώσεις για την κατασκευή.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται εκτενής ανάλυση των οργάνων τα οποία αποτελούν το ολοκληρωμένο σύστημα και των παρατηρήσεων που λαμβάνουν χώρα. Πρόκειται για ένα συνδυασμό δεκτών GPS που εκτελούν εντοπισμό θέσης σε πραγματικό χρόνο με τη μέθοδο RTK (Real Time Kinematic), επιταχυνσιομέτρων και μετεωρολογικών αισθητήρων. Όλα τα δεδομένα εκπέμπονται μέσω τηλεπικοινωνιακής ζεύξης στο σταθμό παρακολούθησης όπου θα πραγματοποιείται η κυρίως επεξεργασία.

Το κυρίως μέρος της παρούσας διατριβής ολοκληρώνεται στο πέμπτο κεφάλαιο με την ανάπτυξη κάποιων μεθόδων ανάλυσης των παρατηρήσεων που προκύπτουν από τα συστήματα παρακολούθησης παραμορφώσεων. Πρόκειται για φασματική ανάλυση Fourier και ανάλυση διακυμάνσεων απαλλαγμένων από συστηματικές τάσεις. Οι μέθοδοι αυτοί εφαρμόζονται σε πραγματικά δεδομένα από τον ουρανοξύστη Republic Plaza Building στη Σιγκαπούρη

Αναφορικά με την ανάλυση πραγματικών δεδομένων που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα διατριβή, ιδιαίτερη βαρύτητα δόθηκε στον εντοπισμό της συχνότητας απόκρισης μιας κατασκευής (ιδιοσυχνότητα) με τη χρήση φασματικών τεχνικών ανάλυσης Fourier. Η συχνότητα αυτή έχει ιδιαίτερη σημασία στην παρακολούθηση στατικών κατασκευών καθώς ελέγχεται η πιθανότητα συντονισμού της κατασκευής. Εκτός από την ανίχνευση της συχνότητας απόκρισης έγινε και διερεύνηση ύπαρξης συσχετίσεων μακράς εμβέλειας στις χρονοσειρές με τη χρήση της ανάλυσης των διακυμάνσεων.

Η ύπαρξη συσχετίσεων με εκθετική μορφή (power law) σε χρονοσειρές κινηματικού GPS δεν έχει αναφερθεί μέχρι στιγμής στη διεθνή βιβλιογραφία και είναι ένα από τα συμπεράσματα της διατριβής που χρήζει περαιτέρω έρευνας. Δυστυχώς η παρούσα έρευνα δεν μπόρεσε να δικαιολογήσει επαρκώς τα αίτια ύπαρξης δυναμονομικών συσχετίσεων. Η μελέτη των συστηματικών σφαλμάτων του συστήματος εντοπισμού θα μπορούσε να απαντήσει στο ερώτημα αν η συσχέτισεις αυτές οφείλονται σε «θόρυβο» των χρονοσειρών ή σε πληροφορία σχετική με την απόκριση του κτιρίου.

Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω, η παρούσα μελέτη στοχεύει στα εξής:

- Μελέτη της συμπεριφοράς δομικών κατασκευών σε συνθήκες εξωτερικής φόρτισης και προσδιορισμός της φύσης των μικρομετακινήσεων
- Παρουσίαση των βασικών αρχών λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος. Ανάλυση των παρατηρήσεων που απαιτούνται. Ανάπτυξη του τρόπου εγκατάστασής του σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία
- Ανάπτυξη της κυρίως επεξεργασίας των δεδομένων που προκύπτουν από τις παρατηρήσεις ενός τέτοιου συστήματος και εφαρμογή αλγορίθμων φασματικής και στατιστικής ανάλυσης σε πραγματικά δεδομένα.

Για τους παραπάνω στόχους έγινε λεπτομερής έρευνα στην υπάρχουσα βιβλιογραφία καθώς και ανάλυση στα διαθέσιμα δεδομένα με διαφορετικές μεθόδους και παραλλαγές αυτών. Από το σύνολο των μεθόδων ανάλυσης που εφαρμόστηκαν παρουσιάζονται αυτές οι οποίες έδωσαν κάποιο αξιόλογο αποτέλεσμα

Η παρακολούθηση των παραμορφώσεων με ολοκληρωμένα συστήματα αποτελεί μια από τις πιο σύγχρονες εφαρμογές και η διεθνής επιστημονική κοινότητα βρίσκεται ακόμα στο στάδιο της έρευνας για την εφαρμογή κατάλληλων τεχνικών. Από τη διαπίστωση αυτή δεν θα μπορούσε να εξαιρεθεί ούτε η παρούσα εργασία η οποία εκπονήθηκε με την ευχή να συμβάλει έστω και στο ελάχιστο στη διεθνή έρευνα.

Κεφάλαιο 2

Ανάλυση Φορτίων

2.1. Η δομοστατική ανάλυση στις κατασκευές

Η δυναμική συμπεριφορά μιας κατασκευής εξαρτάται κυρίως από δύο παραμέτρους:

α) Τον τρόπο με τον οποίο σχεδιάστηκε και β) τις φορτίσεις που δέχεται μετά την ανέγερσή της. Ξεκινώντας, λοιπόν, τη διερεύνηση του αντικείμενου το οποίο πραγματεύεται η παρούσα διατριβή, θα πρέπει να αποκτηθεί μια αίσθηση για το πώς σχεδιάζονται οι κατασκευές από τους ειδικούς Μηχανικούς, αλλά και να περιγραφεί ποιοτικά και ποσοτικά η φύση των φορτίων που μπορούν αυτές να δεχτούν.

Στις περισσότερες περιπτώσεις η μελέτη των κατασκευών γίνεται με τη βοήθεια μεθόδων Στατικής. Ακόμα και σε χώρες με υψηλή σεισμικότητα, όπως η Ελλάδα όπου πρέπει να λαμβάνεται ιδιαίτερη μέριμνα για την αντιμετώπιση της καταπόνησης των κατασκευών, σε λίγες μόνο περιπτώσεις απαιτείται η εφαρμογή μεθόδων της Δυναμικής (Αβραμίδης, 1995). Εν τούτοις, τόσο κατά την αρχική φάση της μορφώσεως του φέροντος οργανισμού μιας κατασκευής όσο και κατά τον ακόλουθο στατικό υπολογισμό, λαμβάνονται υπόψη κανόνες και διενεργούνται έλεγχοι που υπαγορεύονται από τη γνώση της δυναμική συμπεριφοράς της κατασκευής υπό σεισμική διέγερση.

Προκειμένου να κατανοηθούν οι παραδοχές και τα πρότυπα με βάση τα οποία σχεδιάζεται και υλοποιείται μια κατασκευή συνοψίζονται παρακάτω τα βασικά στάδια που διατρέχει μια τυπική δομοστατική μελέτη. Ξεκινώντας από την αρχιτεκτονική σύλληψη της προς υλοποίηση κατασκευής, αναζητούνται σε μια πρώτη φάση (φάση σχεδιασμού και μόρφωσης φορέα) και συγκρίνονται μεταξύ τους περισσότερες προτάσεις για το βέλτιστο στατικό σύστημα. Με βάση γενικά κριτήρια (αρχιτεκτονικά, κατασκευαστικά, οργανωτικά, κανονισμούς, ασφάλειες κ.α.) ο μελετητής μηχανικός επιλέγει βασιζόμενος στις γνώσεις του και κυρίως στη συσσωρευμένη εμπειρία, ορισμένες από τις προτάσεις αυτές προς λεπτομερέστερη διερεύνηση.

Οι επιλεγείσες προτάσεις διερευνώνται σε βαθμό που να μπορούν να γίνουν συγκρίσεις των βασικών παραμέτρων που ενδιαφέρουν και ακολούθως επιλέγεται η προς υλοποίηση πρόταση.

Σε μια δεύτερη φάση επιλέγεται αρχικά το υπολογιστικό προσομοίωμα (στατικό μοντέλο) του φέροντα οργανισμού. Αυτό γίνεται μέσα από μια σειρά εξιδανικεύσεων, απλοποιήσεων και παραδοχών, για την καταλληλότητα των οποίων και πάλι επιστρατεύονται οι γνώσεις, η πείρα και η κρίση του μελετητή μηχανικού. Ακολουθεί ο υπολογισμός (ανάλυση) του προσομοιώματος και η διαστασιολόγηση των οπλισμών των δομικών στοιχείων που το αποτελούν. Ενδεχομένως, βάσει της αξιολόγησης των αποτελεσμάτων γίνονται τροποποιήσεις των αρχικών δεδομένων με αντίστοιχες επανεπιλύσεις, με στόχο τη βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων αυτών.

Αφού γίνουν οριστικώς αποδεκτά τα αποτελέσματα της ανάλυσης ακολουθεί η τελευταία φάση, που περιλαμβάνει τον λεπτομερή σχεδιασμό όλων των επί μέρους δομικών στοιχείων π.χ. ακριβείς θέσεις των ράβδων οπλισμού σε ένα στύλο οπλισμένου σκυροδέματος και τη σχεδίαση των τελικών κατασκευαστικών σχεδίων εφαρμογής.

Από τη σύντομη αυτή περιγραφή προκύπτουν τα στάδια εκείνα, στα οποία όλες οι επιλογές και οι αποφάσεις στηρίζονται κατά κύριο λόγο στη συσσωρευμένη εμπειρία του μελετητή: Το στάδιο της μόρφωσης του φέροντος οργανισμού, της επιλογή του υπολογιστικού προσομοιώματος (για κτήριο, έδαφος και φορτία), το στάδιο της αξιολόγησης των αποτελεσμάτων της ανάλυσης και το στάδιο του λεπτομερούς σχεδιασμού των δομικών στοιχείων.

Επειδή η στατική πολυπλοκότητα μιας κατασκευής είναι ανάλογη του μεγέθους της, σε περιπτώσεις μεγάλων κατασκευών, όπως γέφυρες ή ουρανοξύστες, οι παραδοχές και τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη φάση του σχεδιασμού οφείλουν να ελέγχονται και μετά την ανέγερσή τους.

Σε χώρες με υψηλή σεισμικότητα όπως η Ελλάδα μια κατασκευή είναι δυνατόν να φορτιστεί επανειλημμένα κατά τη διάρκεια ζωής της. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να ελέγχεται η συμπεριφορά της για επιβεβαίωση των επιλογών που έγιναν στη φάση

του σχεδιασμού, πρόβλεψη πιθανών αστοχιών και έγκαιρη αποκατάσταση τους. Ο έλεγχος αυτός απαιτεί αφενός ποσοτική και ποιοτική ανάλυση των εξωτερικών φορτίσεων που πιθανόν να δεχτεί η κατασκευή και αφετέρου στενή παρακολούθηση της κατασκευής κάτω από συνθήκες φόρτισης.

2.2. Ανάλυση φορτίων

Τα φορτία που επιδρούν σε μια κατασκευή μπορούν γενικά να διαχωριστούν σε δυο κατηγορίες, σε νεκρά (dead loads) και κινητά (live loads). Νεκρά φορτία είναι αυτά που οφείλονται στο βάρος των επιμέρους τμημάτων που αποτελούν την κατασκευή (φέρων οργανισμός, τοιχοποιία, κτλ). Κάθε άλλη μορφή φόρτισης όπως το εσωτερικό περιεχόμενο ενός κτηρίου, ή τα διερχόμενα οχήματα μιας γέφυρας, κατατάσσεται στα κινητά φορτία. Ο ακριβής προσδιορισμός των τελευταίων προκειμένου να γίνει ανάλυση και σχεδιασμός μιας κατασκευής, δεν είναι πάντα εφικτός. Στις περισσότερες περιπτώσεις η επιστημονική κοινότητα αντλεί σχετικές πληροφορίες από αναφορές, νομογραφήματα και προδιαγραφές δομικού σχεδιασμού. Χαρακτηριστικός είναι ο Πίνακας 2.1 για την ποσοτικοποίηση των φορτίων σε ένα κτήριο ανάλογα με τη χρήση του (International Conference of Building, 1991).

Πίνακας 2.1: Ενδεικτικές τιμές κινητών φορτίων (International Conference of Building, 1991)

Χρήση Χώρων			
Κατηγορία	Περιγραφή	Κατανεμημένο φορτίο (lbs/ft ²)	Συγκεντρωμένο φορτίο (lbs/ft ²)
1. Χώροι δημοσίων συναθροίσεων	Με σταθερά καθίσματα	50	0
	Με κινούμενα καθίσματα	100	0
	Με πίστα ή πλατφόρμα	125	0
2. Νοσοκομεία	Θάλαμοι και δωμάτια	40	1000
3. Βιβλιοθήκες	Αναγνωστήρια	60	1000
	Χώροι με προθήκες	125	1500
4. Βιομηχανία	Ελαφριά	75	2000
	Βαριά	125	1500
5. Σχολεία	Τάξεις	40	1000

Προκειμένου να γίνει η προσέγγιση του φαινομένου των παραμορφώσεων μιας κατασκευής θα πρέπει αρχικά να ερευνηθούν τα αίτια τα οποία προκαλούν μικρομετακινήσεις. Η μελέτη των κινητών φορτίων και κυρίως αυτών που οφείλονται σε ισχυρούς ανέμους και σεισμικές δονήσεις, θα οδηγήσει σε μια εποπτικότερη

εικόνα για την συμπεριφορά των κατασκευών κάτω από συνθήκες εξωτερικής φόρτισης.

2.3. Φορτία ανέμου

Η μελέτη της συμπεριφοράς μιας κατασκευής κάτω από την επίδραση ισχυρών ανέμων είναι κυρίως ένα πρόβλημα αεροδυναμικής. Οι τιμές της στατικής πίεσης που δέχεται η κατασκευή από τον άνεμο μπορούν να εκτιμηθούν με βάση τη γενική σχέση που δίνει τη δυναμική q πίεση σε συνάρτηση με την ταχύτητα του ανέμου (Laursen, 1988):

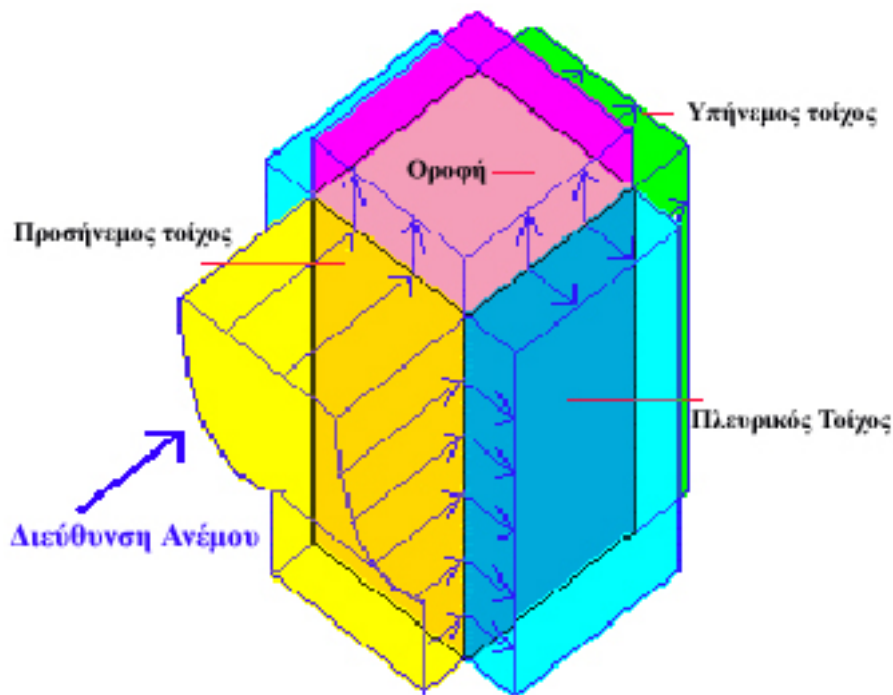
$$q = \frac{1}{2} \frac{w}{g} V^2 \quad (2.1)$$

όπου w είναι το ειδικό βάρος του αέρα και V η ταχύτητα του ανέμου, ενώ g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Από την παραπάνω εξίσωση μπορεί να υπολογιστεί η πίεση που ασκείται στο κτίριο αν είναι γνωστή η ταχύτητα V του ανέμου. Στη σχέση αυτή η δυναμική πίεση μεταβάλλεται ανάλογα με το ανάγλυφο του περιβάλλοντα χώρου και εξαρτάται από το ύψος της κατασκευής. Το Ινστιτούτο Προδιαγραφών της Αμερικής (American National Standard Institute, ANSI) ορίζει την πίεση του αέρα q_z σε ύψος z πάνω από το έδαφος ως συνάρτηση της ταχύτητάς του με τη βοήθεια της σχέσης (ANSI, 1982):

$$q_z = 0.00256 K_z (I \cdot V)^2 \quad (2.2)$$

Η παραπάνω έκφραση δίνει την πίεση που δέχεται το σώμα της κατασκευής εξ αιτίας της ταχύτητας του ανέμου. Ο συντελεστής K_z ονομάζεται **σταθερά έκθεσης** (velocity pressure exposure coefficient) και αναφέρεται στο ύψος z , ενώ ο συντελεστής I εξαρτάται από τον περιβάλλοντα χώρο του κτηρίου. Εύκολα αντιλαμβάνεται κανείς ότι αυξανόμενου του ύψους αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου συνεπώς και η πίεση που ασκείται από αυτόν στο κτήριο (Σχήμα 2.1)



Σχήμα 2.1: Η πίεση του ανέμου σε κτήριο (Kijewski and Kareem, 1998)

2.4. Σεισμικά φορτία

Μια άλλη μορφή δυναμικής φόρτισης είναι αυτή που προκαλείται από μια σεισμική δόνηση. Η αδράνεια του κτηρίου αντιστέκεται στις απότομες κινήσεις του εδάφους στο οποίο είναι θεμελιωμένο και προκαλεί την παραμόρφωση του. Από την ταλάντωση που προκαλείται αναπτύσσονται διατμητικές δυνάμεις (shear forces), δηλαδή δυνάμεις με αντίθετη φορά που έχουν την τάση να αποκόψουν τα διαφορετικά δομικά στοιχεία μεταξύ τους.

Διατμητικές δυνάμεις είναι δυνατόν να εμφανιστούν τόσο στην ίδια την κατασκευή όσο και μεταξύ αυτής και του εδάφους. Οι δυνάμεις αυτές εξαρτώνται κυρίως από τη μορφή του σκελετού της κατασκευής, το μέγεθος των νεκρών φορτίων καθώς και από τη θεμελιώδη περίοδο ταλάντωσης της κατασκευής T .

Για ένα πολυόροφο κτήριο, η θεμελιώδης περίοδος δίδεται από την εμπειρική σχέση:

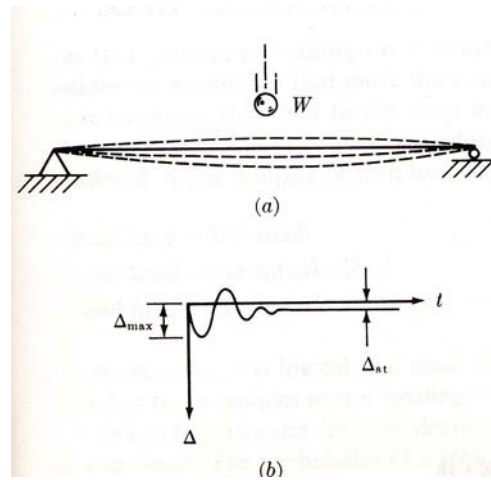
$$T = aN_s \quad (2.3)$$

όπου N_s είναι ο αριθμός των ορόφων ενώ ο συντελεστής a μπορεί να κυμαίνεται από 0,05 έως 0,15 ανάλογα με την ελαστικότητα του κτηρίου. Η περίοδος αυτή δεν αποτελεί τη μοναδική περίοδο ταλάντωσης για την κατασκευή σε περίπτωση φόρτισης καθώς αυτή δεν συμπεριφέρεται σαν συνεχές και ομοιογενές μέσο. Αντίθετα είναι η τιμή στην οποία συγκλίνουν όλες οι επιμέρους ιδιοσυχνότητες ταλάντωσης των επιμέρους δομικών στοιχείων (Celebi et al, 1998).

Η τιμή της κύριας συχνότητας με την οποία ταλαντώνεται η κατασκευή είναι ανεξάρτητη από το μέγεθος της φόρτισης και τη συχνότητα του φαινομένου (π.χ συχνότητα σεισμικών κυμάτων). Αν η συχνότητα φόρτισης πλησιάζει τη θεμελιώδη συχνότητα παρατηρείται το φαινόμενο του συντονισμού. Κατά το φαινόμενο αυτό παρατηρείται μεγιστοποίηση του πλάτους ταλάντωσης και παράλληλα αύξηση της πιθανότητας εμφάνισης αστοχιών. Για τη σεισμική προστασία των κτηρίων έχουν αναπτυχθεί κώδικες και νομογραφήματα που επιβάλλουν τις ελάχιστες τιμές των αντοχών με βάση τις οποίες σχεδιάζεται μια κατασκευή.

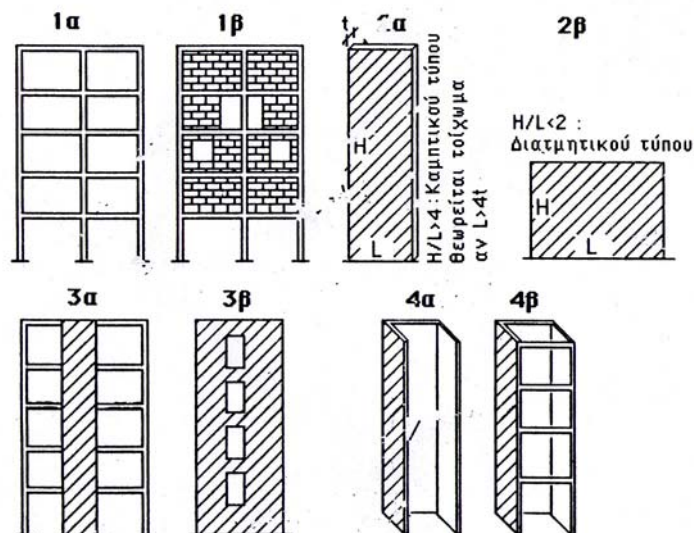
Στην ανάλυση φορτίων εκτός των φορτίσεων που οφείλονται σε φυσικά φαινόμενα (άνεμος, χιόνι, σεισμός) εξετάζονται και τα **φορτία κρούσης** (impact loads) και συνδέονται άμεσα με την ανθρώπινη δραστηριότητα που αναπτύσσεται στην κατασκευή. Αντίθετα από την ερμηνεία του όρου (καθώς οι μακροσκοπικές κρούσεις θεωρούνται σπάνιες) τα αίτια αυτών των φορτίσεων οφείλονται στην επαφή και την κίνηση ενός σώματος κατά μήκος της κατασκευής, όπως για παράδειγμα την κίνηση ενός φορτηγού πάνω σε μια γέφυρα. Η μετατόπιση Δ των κυρίων δοκών της κατασκευής κατά την κίνηση του οχήματος είναι ανάλογη με αυτή του Σχήματος 2.2.

Ξεκινώντας κανείς να μελετήσει τις παραμορφώσεις μιας δεδομένης κατασκευής δεν μπορεί εκ των προτέρων να είναι βέβαιος για το πλάτος και τη συχνότητα των ταλαντώσεων που αναμένονται. Η μαθηματική περιγραφή του φαινομένου επιβάλλει εκτενή μελέτη διαφόρων παραμέτρων, όπως ο στατικός σχεδιασμός, ο περιβάλλον χώρος, η ανθρώπινη δραστηριότητα που αναπτύσσεται και οι μετεωρολογικές συνθήκες της περιοχής.



Σχήμα 2.2: Προσομοίωση ταλάντωσης εξ' αιτίας φορτίων κρούσης. (α) Η χορδή του σχήματος εξομοιώνει την συμπεριφορά μιας δοκού ενώ το σώμα W αντικαθιστά τα φορτία κρούσης. (β) Τα φορτία κρούσης προκαλούν δυναμική μετατόπιση Δ στα δομικά στοιχεία της κατασκευής (Laurssen, 1988)

Μελέτες έχουν δείξει ότι κάτω από συνθήκες εξωτερικής φόρτισης οι κατασκευές αυτές είναι δυνατόν να παρουσιάζουν μικρομετακινήσεις με πλάτος από 10 έως 200 mm και με συχνότητα από 0,1 έως 10 Hz. Παρακολουθώντας τις κινήσεις αυτές γίνεται έλεγχος κατά πόσο οι αντιδράσεις της κατασκευής είναι εντός των ορίων αντοχής του φέροντα οργανισμού ενώ επιπλέον, μετά από μακροχρόνια παρατήρηση, είναι δυνατόν να εντοπιστούν περιπτώσεις εξωτερικής υπερφόρτισης που θα ήταν δυνατόν να προκαλέσουν αστοχία των στατικών φορέων.



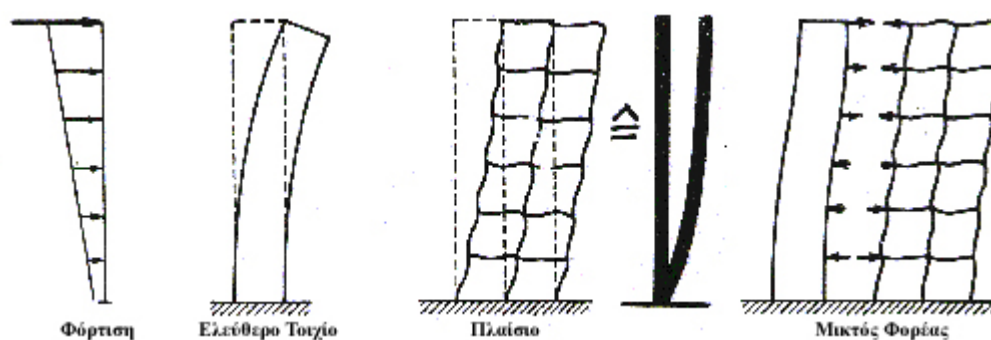
Σχήμα 2.3: Τα δομικά στοιχεία μιας κατασκευής (Αβραμίδης, 1995)

2.5. Παραμόρφωση δομικών στοιχείων κατασκευής

Οι υποφορές μιας κατασκευής οπλισμένου σκυροδέματος που παραλαμβάνουν τα κατακόρυφα στατικά και τα οριζόντια κινητά φορτία μπορούν να ταξινομηθούν με βάση τη μηχανική συμπεριφορά τους ως εξής (Αβραμίδης, 1995):

- Αμιγή πλαίσια με ή χωρίς τοιχοπληρώσεις (Σχήμα 2.3, 1α και 1β αντίστοιχα)
- Απλά επίπεδα τοιχώματα καμπτικού και διατμητικού τύπου (Σχήμα 2.3, 2α-2β)
- Μικτά πλαίσια, δηλαδή σύζευξη αμιγών πλαισίων με τοιχία (Σχ. 2.3, 3α) ή σύζευξη περισσοτέρων τοιχίων μεταξύ τους με δοκούς σύζευξης (Σχ. 2.2, 3β) με ή χωρίς τοιχοπληρώσεις
- Σύνθετα τοιχία του χώρου και πυρήνες ανοικτοί (Σχ. 2.3, 4α) ή ημι-ανοικτοί (Σχ. 1.2, 4β)

Τα αμιγή πλαίσια είναι ευκολότερα στην πρόβλεψη της συμπεριφοράς τους καθώς για αυτά υπάρχει μια αρκετά αξιόπιστη υπολογιστική προσομοίωση παρουσιάζουν όμως σχετικά μεγάλη ευκαμψία εκτελώντας κατά τη φόρτισή τους μεγάλη οριζόντια μετακίνηση. Αντιθέτως τα μικτά πλαίσια ενώ διαθέτουν απαιτητικότερα υπολογιστικά προσομοιώματα για τον υπολογισμό τους, διαθέτουν σχετική δυσκαμψία περιορίζοντας έτσι διαφορικού τύπου (ελαστικές) μετακινήσεις.



Σχήμα 2.4: Παραμόρφωση τοιχίων και πλαισίων υπό οριζόντια φόρτιση για ελεύθερα τοιχώματα, αμιγή πλαίσια και μικτούς φορείς αντίστοιχα (Αβραμίδης, 1995)

Μετά από όσα αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο αυτό αντιλαμβάνεται κανείς ότι η ανάγκη παρακολούθησης των παραμορφώσεων σε μια μεγάλη κατασκευή θεωρείται επιτακτική. Στη συνέχεια αναλύονται α) οι τρόποι με τους οποίους γίνεται μέχρι σήμερα αυτή καθώς και β) η μέθοδος η οποία χρησιμοποιείται για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής.

Κεφάλαιο 3

Παρακολούθηση Παραμορφώσεων

3.1. Εισαγωγή

Από την ανάλυση των φορτίων που επιδρούν σε μια κατασκευή δημιουργείται η ανάγκη της παρακολούθησης των παραμορφώσεων που προκαλούν. Η ακριβής γνώση των μετατοπίσεων που παρατηρούνται στα διάφορα τμήματα ενός κτηρίου ή μιας γέφυρας μπορεί να δώσει χρήσιμα συμπεράσματα:

- Γίνεται έλεγχος των αρχικών προβλέψεων που πραγματοποιήθηκαν στη φάση του σχεδιασμού για τη δυναμική συμπεριφορά της κατασκευής.
- Με βάση τις παραμορφώσεις ελέγχεται η φόρτιση που οφείλεται σε ανθρώπινη δραστηριότητα. Η πληροφορία αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στην περίπτωση γεφυρών οι οποίες μπορεί να παραλαμβάνουν μεγαλύτερο κυκλοφοριακό φόρτο από αυτόν που είχε προβλεφθεί κατά το σχεδιασμό.
- Όταν οι παρατηρήσεις γίνονται σε πραγματικό χρόνο (On line Structural Monitoring) υπάρχει η δυνατότητα ορισμού ενός επιπέδου ασφαλείας, προλαμβάνοντας έτσι περιπτώσεις υπερφόρτισης που μπορούν να οδηγήσουν σε αστοχία των δομικών στοιχείων.
- Η γνώση του τρόπου με τον οποίο παραμορφώθηκε μια κατασκευή κατά τη διάρκεια μιας έντονης φόρτισης (π.χ. σεισμική δόνηση) μας δίνει πληροφορία για τον τρόπο επιδιόρθωσης αστοχιών που πιθανών να παρατηρηθούν.

Για την παρακολούθηση των παραμορφώσεων η διεθνής κοινότητα των μηχανικών έχει αναπτύξει κατά καιρούς διάφορες μεθόδους οι οποίες διαφέρουν μεταξύ τους ως προς τα παρατηρούμενα μεγέθη αλλά και τον χρόνο παρατήρησης τους. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν, εν συντομία, κάποιες μεθοδολογίες που αναπτύχθηκαν κατά το παρελθόν, καθώς και η μέθοδος που προτείνεται στην παρούσα διατριβή.

3.2. Μεθοδολογία

Η παρακολούθηση των παραμορφώσεων δεν αποτελεί μια καινούργια πρόκληση για τη διεθνή επιστημονική κοινότητα. Εδώ και αρκετά χρόνια εφαρμόζονται διάφορες μέθοδοι για τη συλλογή δεδομένων που θα οδηγήσουν στη μοντελοποίηση της δυναμικής συμπεριφοράς των κατασκευών. Συνοπτικά οι μέθοδοι που εφαρμόστηκαν έως σήμερα ταξινομούνται σε αυτές που απαιτούν εγκατάσταση μόνιμου εξοπλισμού και σε αυτές που υλοποιούνται με την πραγματοποίηση περιοδικών μετρήσεων στο πεδίο.

Μια κατασκευή μπορεί να παρακολουθείται με μόνιμο και συστηματικό τρόπο με την χρήση ειδικών οργάνων, όπως επιταχυνσιόμετρα, κλισίμετρα, εντασιόμετρα κλπ. Τα όργανα αυτά πραγματοποιούν στιγμιαίες παρατηρήσεις από τη συλλογή και επεξεργασία των οποίων προκύπτουν συμπεράσματα κυρίως για παραμορφώσεις μικρής περιόδου και μη μόνιμου χαρακτήρα. Αντιθέτως για την ποσοτικοποίηση μόνιμων ή πολύ μεγάλης περιόδου φαινομένων (π.χ., $T=1$ έτος) πραγματοποιούνται εποχιακές μετρήσεις εξειδικευμένου χαρακτήρα. Αναφορικά με τις τελευταίες, κυριότερες σε σχέση με την προτίμηση τους από την επιστημονική κοινότητα, είναι οι παρακάτω:

- **Τοπογραφικές μέθοδοι:** Στηρίζονται στην περιοδική παρατήρηση επιλεγμένων σημείων της κατασκευής με σκοπό τον προσδιορισμό των οριζοντιογραφικών συντεταγμένων θέσης καθώς και του σχετικού υψομέτρου τους. Εφαρμόζονται τεχνικές όπως μικροτριγωνισμοί και χωροσταθμίσεις ακριβείας, ενώ το τελικό αποτέλεσμα αγγίζει την ακρίβεια του χιλιοστού. Η μέθοδος αυτή μπορεί να εντοπίσει μόνο μόνιμες παραμορφώσεις ενώ για την επίτευξη της επιθυμητής ακριβείας θα πρέπει στις μετρήσεις πεδίου να σχολαστικές τηρώντας αυστηρά τις ανάλογες προδιαγραφές.
- **Φωτογραμμετρικές μέθοδοι:** Η κατασκευή φωτογραφίζεται με φωτογραμμετρική κάμερα ή με σαρωτή λέιζερ και στη συνέχεια γίνεται η συσχέτιση φωτοσταθερών σημείων προκειμένου να εξαχθεί η μετρητική πληροφορία από την εικόνα.

Επειδή η ανάγκη μόνιμης παρακολούθησης είναι μεγάλη, οι παραπάνω μέθοδοι τείνουν να εγκαταλειφθούν και τη θέση τους έχουν πάρει αυτές που απαιτούν συνεχείς παρατηρήσεις μεγεθών, όπως επιταχύνσεις, τάσεις, κλίσεις, μετατοπίσεις κλπ. Η στρατηγική που ακολουθείται σε αυτές τις περιπτώσεις είναι η εξής: Αισθητήρες καταγράφουν την αιτία που παραμορφώνει την κατασκευή (ταχύτητα ανέμου, θερμοκρασία, ταχύτητα σεισμικών κυμάτων, κλπ) ενώ ταυτόχρονα καταγράφονται οι επιπτώσεις της φόρτισης με τη βοήθεια ειδικών οργάνων (GPS, επιταχυνσιόμετρα, κλισίμετρα κλπ). Τα δεδομένα αναλύονται με στόχο να προσδιοριστεί ένα μαθηματικό μοντέλο που να επιτρέπει συσχετισμό του αιτίου (φόρτιση) με το αποτέλεσμα (παραμόρφωση).

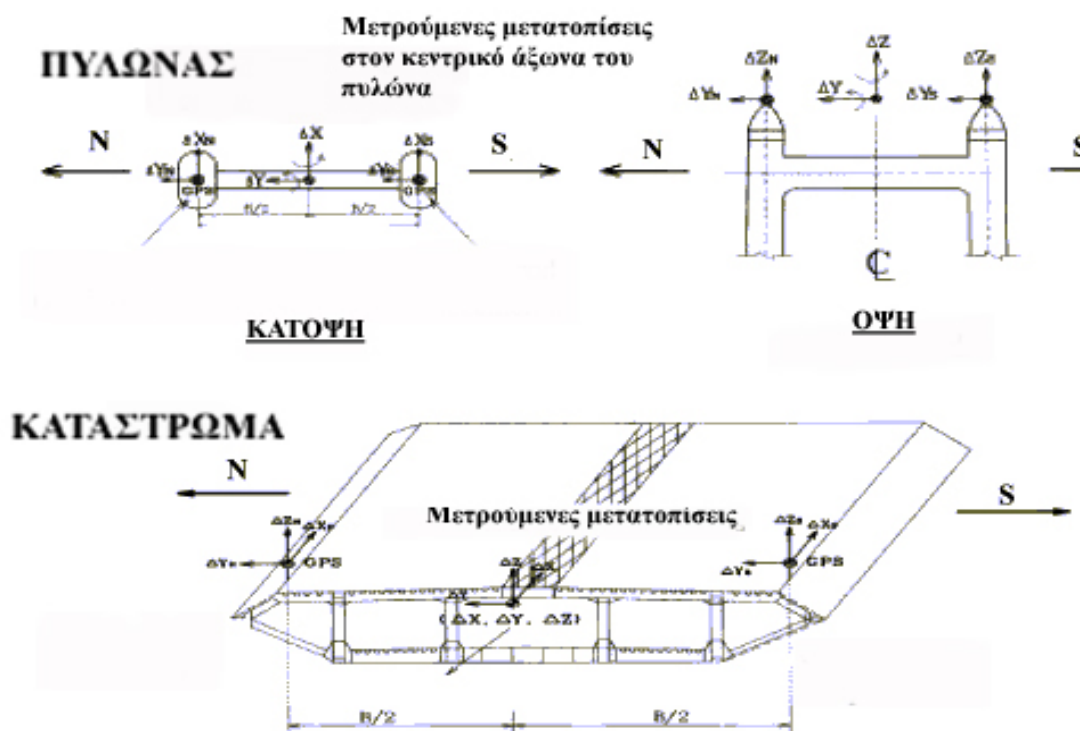
Για μεγάλο χρονικό διάστημα η διεθνής επιστημονική κοινότητα είχε στρέψει το ενδιαφέρον της στη χρήση επιταχυνσιομέτρων σε μόνιμη βάση, προκειμένου να παρατηρούνται οι ταλαντώσεις στα διάφορα σημεία της κατασκευής. Η μέθοδος αυτή παρόλο που έδωσε αρκετά καλά αποτελέσματα, σήμερα θεωρείται ανεπαρκής.

Τα (τρισεδιάστατα) επιταχυνσιόμετρα δεν μετρούν άμεσα τις μετατοπίσεις αλλά αντιθέτως τις τρεις συνιστώσες της επιτάχυνσης που εμφανίζονται στο σημείο όπου έχει υλοποιηθεί. Αυτό σημαίνει ότι παρακολουθούν τις ταλαντώσεις των επιμέρους τμημάτων μιας κατασκευής (δοκάρια, κολώνες, κλπ) αδυνατούν όμως να δώσουν μια άμεση εικόνα για την γεωμετρία της σε κάποια δεδομένη χρονική στιγμή. Αν, για παράδειγμα, ένας άνεμος παραμορφώνει την κατασκευή σταθερά προς μία κατεύθυνση, τα επιταχυνσιόμετρα αδυνατούν να δώσουν ακριβή εικόνα για την συμπεριφορά της κατασκευής κάτω από τέτοιου είδους φόρτιση.

Παρατηρώντας τις συνιστώσες επιτάχυνσης στα δομικά στοιχεία μιας κατασκευής είναι αδύνατη η άμεση παρακολούθηση των μετατοπίσεων που υφίστανται κάτω από δεδομένες συνθήκες φόρτισης. Για να συμβεί αυτό θα πρέπει τα πρωτογενή δεδομένα να ολοκληρωθούν αριθμητικά δύο φορές προκειμένου από την παράμετρο της επιτάχυνσης να υπολογιστεί η μετατόπιση.

Εξαιτίας της φύσης του σήματος που προκύπτει από τις καταγραφές των επιταχυνσιομέτρων μια τέτοια αριθμητική ολοκλήρωση είναι αρκετά λεπτή διαδικασία και μπορεί εύκολα να οδηγήσει σε εσφαλμένα συμπεράσματα. Η σωστή

επιλογή φίλτρων, συχνοτήτων αποκοπής καθώς και αρχικών τιμών ολοκλήρωσης (σταθερές) επιβάλλεται προκειμένου οι εξαγόμενες μετατοπίσεις να θεωρηθούν αποδεκτές.



Σχήμα 3.1: Τα παρατηρούμενα μεγέθη σε μια γέφυρα με τη χρήση GPS. Με τη μέτρηση των μετατοπίσεων ΔX , ΔY , ΔZ είναι δυνατή η παρακολούθηση των γωνιών στροφής της γέφυρας (Kai-yuen et al, 2001)

3.3. Ολοκληρωμένο σύστημα παρακολούθησης παραμορφώσεων

Για τον σκοπό της παρακολούθησης των παραμορφώσεων, η χρήση ειδικευμένων οργάνων έχει εξυπηρετήσει μέχρι σήμερα τη διεθνή ερευνητική κοινότητα ικανοποιητικά. Καθώς όμως οι δομικές κατασκευές αυξάνονται στις σύγχρονες κοινωνίες τόσο ως προς το μέγεθος τους όσο και προς τον αριθμό τους, αυξάνεται ολοένα και η ανάγκη συνεχούς παρακολούθησης των παραμορφώσεων τους κάτω από συνθήκες εξωτερικής φόρτισης.

Στην παρούσα διατριβή προτείνεται ένα ολοκληρωμένο σύστημα παρακολούθησης παραμορφώσεων σε μεγάλες κατασκευές. Το σύστημα αυτό έχει τη δυνατότητα να παρακολουθεί τις παραμορφώσεις σε πραγματικό χρόνο, να αρχειοθετεί τις

χρονοσειρές με τις παρατηρήσεις των διαφόρων οργάνων και να καθορίζει κάποιες ακραίες τιμές μετατοπίσεων οι οποίες θα αντιπροσωπεύουν τις οριακές ανεκτές παραμορφώσεις για την κατασκευή. Η υπέρβαση αυτών των τιμών θα σημαίνει φόρτιση της κατασκευής πέρα από τα επιτρεπτά όρια. Στη συνέχεια περιγράφονται όλες οι πρωτογενείς παρατηρήσεις που θα φτάνουν στο κέντρο επεξεργασίας για την περαιτέρω ανάλυση.

Κεφάλαιο 4

Περιγραφή Παρατηρήσεων

4.1. Το Παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού GPS

Το Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού (Global Positioning System, GPS) θεωρείται σήμερα το πιο προηγμένο σύστημα δορυφορικού εντοπισμού. Αναπτύχθηκε και λειτουργεί μέσω του Υπουργείου Εθνικής Αμύνης των ΗΠΑ ενώ τέθηκε σε πλήρη λειτουργία το 1994. Τα πλεονεκτήματα του συστήματος αυτού σε σχέση με τα προϋπάρχοντα συστήματα δορυφορικού εντοπισμού είναι (Δερμάνης, 1999):

1. Η σχετική ακρίβεια του εντοπισμού είναι της τάξης των μερικών χιλιοστών.
2. Είναι διαθέσιμο σε χρήστες σε όλη την υφήλιο από αέρα, θάλασσα ή ξηρά.
3. Το σύστημα λειτουργεί όλο το 24ωρο με οποιεσδήποτε καιρικές συνθήκες.
4. Υπάρχει η δυνατότητα στιγμιαίου εντοπισμού.
5. Δεν υπάρχουν τέλη για τον χρήστη, ενώ το κόστος των δεκτών GPS συνεχώς μειώνεται.

Παρ' όλα τα παραπάνω χωρίς προηγούμενο πλεονεκτήματα, το σήμα των δορυφόρων του GPS υπόκειται σε μια σειρά από συστηματικά και τυχαία σφάλματα, που υποβαθμίζουν σημαντικά την ακρίβεια του εντοπισμού. Τέτοια σφάλματα είναι: σφάλματα στον υπολογισμό της τροχιάς των δορυφόρων, σφάλματα των χρονομέτρων του δέκτη και των δορυφόρων, καθυστερήσεις στην ιονόσφαιρα και στην τροπόσφαιρα, η απροσδιοριστία ακέραιων κύκλων και οι πολυκλαδικές παρεμβολές (multipath).

Τα σφάλματα στον υπολογισμό της τροχιάς των δορυφόρων και τα σφάλματα των χρονομέτρων μπορούν να εξαλειφθούν χρησιμοποιώντας τις διαφορές των μετρήσεων από διαφορετικούς δέκτες ή/ και από διαφορετικούς δορυφόρους. Οι καθυστερήσεις στην ιονόσφαιρα και στην τροπόσφαιρα και η αδυναμία προσδιορισμού των ακεραίων κύκλων στις μετρήσεις φάσης, μπορούν να διορθωθούν με κάποια μοντέλα προσομοίωσης, με συνδυασμό των μετρήσεων στις δύο συχνότητες εκπομπής, ή με την χρήση των τριπλών διαφορών των μετρήσεων (Δερμάνης, 1999).

Το σύστημα στην πλήρη εξέλιξή του αποτελείται από 21 δορυφόρους με τρεις αναπληρωματικούς σε έξι τροχιακά επίπεδα σε ύψος 20.000 km πάνω από την επιφάνεια της γης. Η πρώτη γενιά δορυφόρων GPS αναφερόταν ως *BLOCK-I* και αντιστοιχεί στους δορυφόρους με αριθμούς από PRN=1-11. Οι δορυφόροι αυτοί εκτοξεύτηκαν από τον Φεβρουάριο 1978 μέχρι και τον Οκτώβριο 1985. Η δεύτερη γενιά δορυφόρων που ονομάζονται *BLOCK-II* έχουν αριθμούς από PRN=13-21 και είναι οι σημερινοί δορυφόροι του GPS. Επίσης υπάρχουν και οι δορυφόροι *BLOCK-IIA* (αριθμοί 22-40) και οι δορυφόροι *BLOCK-IIR* (αριθμοί PRN=41-60, με εκτόξευση μετά το 1995).

Κάθε δορυφόρος μεταφέρει 4 ατομικά χρονόμετρα συγχρονισμένα σε μια *θεμελιώδη συχνότητα*, $f_0 = 10,23 \text{ MHz}$. Με βάση τη θεμελιώδη συχνότητα δημιουργούνται δύο νέα ηλεκτρομαγνητικά σήματα: η κύρια συχνότητα L1 ($=154 \times f_0 = 1575,42 \text{ MHz}$) και η δευτερεύουσα L2 ($= 120 \times f_0 = 1227,60 \text{ MHz}$). Αυτές είναι οι φέρουσες συχνότητες και είναι απλά ημιτονοειδή κύματα.

Η συχνότητα L1 διαμορφώνεται από δύο κώδικες ψευδοτυχαίου θορύβου (PRN codes) , τον P και τον κώδικα C/A, καθώς και από ένα μήνυμα ναυσιπλοΐας, το οποίο περιλαμβάνει δεδομένα (δορυφορικές εφημερίδες) για τον δορυφόρο που εκπέμπει το σήμα, για τον ακριβή χρόνο εκπομπής του σήματος, για τη θέση των δορυφόρων την κάθε χρονική στιγμή και άλλες παραμέτρους που περιγράφουν την γενική κατάσταση του GPS. Η συχνότητα L2 διαμορφώνεται από τον κώδικα P και το μήνυμα ναυσιπλοΐας. Κάθε κώδικας αποτελείται από μια σειρά αριθμών σε δυαδική μορφή, η οποία αν και φαίνεται τυχαία, είναι στην πραγματικότητα αιτιοκρατική και επαναλαμβάνεται έπειτα από μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο.

Ο κώδικας C/A (Coarse/Acquisition) αποτελείται από μια διαδοχική σειρά 1,023 δυαδικών στοιχείων και έχει περίοδο 1 ms. Έτσι, έχει ένα μήκος κύματος περίπου 300 m. Ο κώδικας P έχει μήκος κύματος μόνο 30 m, ενώ η αλλαγή των bits γίνεται με ταχύτητα 10,23 Mbits/s, ο οποίος υπερτίθενται στις φέρουσες συχνότητες L1 και L2. Αντίθετα ο κώδικας C/A διαμορφώνεται μόνο στην L1 συχνότητα.

Τα δυαδικά στοιχεία (0) και (1) (ή ισοδύναμα +1 και -1) υλοποιούνται με την αλλαγή της φάσης του φέροντος κύματος κατά 180 μοίρες στο σημείο παρεμβολής τους. Αυτό επιτυγχάνεται με τον πολλαπλασιασμό του σήματος με (-1) κάθε φορά που γίνεται αλλαγή φάσης κατά 180 μοίρες. Αφού μόνο ο κώδικας P είναι διαμορφωμένος και στη συχνότητα L2 η διαδικασία είναι απλή. Αντίθετα στην συχνότητα L1 διαμορφώνεται τόσο ο κώδικας P όσο και ο κώδικας C/A. Για αυτόν τον λόγο από την L1 δημιουργείται μια δεύτερη φέρουσα συχνότητα, στην οποία έχει διαμορφωθεί ο κώδικας C/A, η οποία έχει περιστραφεί κατά 90 μοίρες σε φάση εγκάρσια σε σχέση με το επίπεδο πόλωσης του κώδικα P.

Οι Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής που διαχειρίζονται το σύστημα GPS ανακοίνωσαν το 1999 την πρόθεσή τους να παρέχουν ακόμα ένα σήμα σε μία νέα φέρουσα συχνότητα την L5 (Macabiau et al., 2003). Η συχνότητα αυτή θα εντοπίζεται στα 1176.45 MHz ($L5=115 \times f_0$) και έχει στόχο να χρησιμοποιηθεί αποκλειστικά για σκοπούς πολιτικής αεροπλοΐας. Η συχνότητα αυτή θα υλοποιηθεί στους νέας γενιάς δορυφόρους *BLOCK-IIF* που θα μουν σε τροχιά το 2005. Με τη νέα αυτή εξέλιξη το σύστημα GPS θα μπορεί να παρέχει πιο σταθερές υπηρεσίες πλοήγησης καθώς και πολλαπλές εφαρμογές που αφορούν σε μη στρατιωτικές εφαρμογές.

Το μήνυμα ναυσιπλοΐας, ή αλλιώς κώδικας D των δεδομένων διαμορφώνεται και στις δυο συχνότητες εκπομπής L1 και L2. Έχει αλλαγής πληροφορίας 50 bits/s και το συνολικό του μήκος είναι 1500 bits. Δηλαδή, η διάρκεια για την λήψη όλου του πλαισίου του κώδικα δεδομένων είναι 30s ενώ αποτελείται από 5 υπο-πλαίσια με διαφορετική ναυτιλιακή πληροφορία το καθένα. Κάθε υποπλαίσιο περιέχει 300 bits και η διάρκειά του είναι $300 \text{ bits}/(50 \text{ bits/s})=6\text{s}$.

Όπως ήδη περιγράφηκε, οι δορυφόροι του GPS εκπέμπουν δύο συνθετικά σήματα σε διαφορετικές συχνότητες. Οι δέκτες του GPS έχουν την ικανότητα παρατήρησης ενός ή και των δύο κωδίκων (P, C/A) οπότε παρέχουν το πρώτο είδος μέτρησης, την ψευδοαπόσταση, ή μετρούν τη φάση του φέροντος κύματος παρέχοντας ένα δεύτερο είδος μέτρησης.

Αν θεωρηθεί ότι δεν υπάρχουν σφάλματα, ο χρόνος διαδρομής του ηλεκτρομαγνητικού σήματος μπορεί να υπολογιστεί συσχετίζοντας τον κώδικα του λαμβανομένου σήματος με το ακριβές αντίγραφο που παράγεται από τον δέκτη του GPS. Αφού και οι δύο "εκδόσεις" του κώδικα αναφέρονται στο ίδιο χρονικό σύστημα αναφοράς, η απαιτούμενη χρονική καθυστέρηση για τη μέγιστη συσχέτιση είναι ένα μέτρο του χρόνου διαδρομής του σήματος από τον δορυφόρο στο δέκτη. Πολλαπλασιάζοντάς τον χρόνο αυτό, με την ταχύτητα του φωτός στο κενό δίνει την απόσταση του δορυφόρου από τον δέκτη.

Δυστυχώς τα χρονόμετρα τόσο στον δορυφόρο όσο και στον δέκτη παρουσιάζουν μια μετάθεση σε σχέση με τον ακριβή χρόνο αναφοράς του GPS. Τούτο έχει ως αποτέλεσμα ένα σφάλμα στη μέτρηση της απόστασης, γι' αυτό και αναφέρεται ως ψευδοαπόσταση. Η εξίσωση που συνδέει την μέτρηση της ψευδοαπόστασης με τις υπόλοιπες άγνωστες παραμέτρους είναι (Δερμάνης, 1999):

$$p = \rho + d\rho + c(dt - dT) + d_{ion} + d_{trop} + m_p + \varepsilon_p \quad (4.1)$$

όπου

p	Είναι η μετρούμενη ψευδοαπόσταση (m)
ρ	είναι η γεωμετρική απόσταση δορυφόρου-δέκτη (m)
$d\rho$	είναι το σφάλμα στην απόσταση λόγω ανακριβών δορυφορικών εφημερίδων (m)
c	είναι η ταχύτητα διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο κενό (m/sec)
dt	είναι το σφάλμα του χρονομέτρου του δορυφόρου (s)
dT	είναι το σφάλμα του χρονομέτρου του δέκτη (s)
d_{ion}	είναι το σφάλμα λόγω ιονοσφαιρικών καθυστερήσεων (m)
d_{trop}	είναι το σφάλμα λόγω τροποσφαιρικών καθυστερήσεων (m)
m_p	είναι το σφάλμα λόγω πολυκλαδικών παρεμβολών (m)
ε_p	είναι τα τυχαία σφάλματα στην μέτρηση (m).

Η γεωμετρική απόσταση δορυφόρου-δέκτη υπολογίζεται ως εξής:

$$\rho = \|\mathbf{r}_i - \mathbf{R}_i\| = \sqrt{(x_i - X)^2 + (y_i - Y)^2 + (z_i - Z)^2} \quad (4.2)$$

όπου $\mathbf{r}_i = (x_i, y_i, z_i)$ είναι οι συντεταγμένες του δορυφόρου και $\mathbf{R}_i = (X, Y, Z)$ είναι οι συντεταγμένες του δέκτη.

Εκτός από τον προσδιορισμό θέσης με παρατήρηση ψευδοαποστάσεων υπάρχει η δυνατότητα εντοπισμού και με παρατηρήσεις της φέρουσας φάσης. Αυτός ο τύπος μέτρησης γίνεται μετρώντας τη διαφορά φάσης μεταξύ του φέροντος κύματος, που παράγεται από τον ταλαντωτή του δέκτη, και του λαμβανόμενου δορυφορικού σήματος. Η μέτρηση της φάσης γίνεται συνήθως αφού η διαμόρφωση (κώδικας) έχει εξαλειφθεί από το φέρον κύμα. Η εξίσωση παρατήρησης της φάσης είναι (Δερμάνης, 1999):

$$L_{\varphi} = \rho + d\rho + c(dt - dT) - d_{ion} + d_{trop} + N + m_{\varphi} + \varepsilon_{\varphi} \quad (4.3)$$

όπου:

N	είναι η αβεβαιότητα κύκλων (m)
m_{φ}	είναι οι πολυκλαδικές παρεμβολές στη φάση (m)
ε_{φ}	είναι τα τυχαία σφάλματα στην μέτρηση (m)

Οι μετρήσεις φάσεις είναι ένα μέτρο του αριθμού των κύκλων (ακέραιων και δεκαδικών) που έχει περάσει από τη στιγμή που ο δέκτης ‘κλείδωσε’ στο δορυφορικό σήμα συν κάποιο τυχαίο ακέραιο αριθμό κύκλων. Έτσι η εξίσωση (4.3) είναι παρόμοια με την (4.1) εκτός από τον όρο N που αντιπροσωπεύει την παράμετρο απροσδιοριστίας ακέραιων κύκλων. Ο N είναι ο άγνωστος ακέραιος αριθμός των κύκλων μεταξύ του δορυφόρου και του δέκτη τη στιγμή που ο δέκτης ‘κλείδωσε’ το σήμα πολλαπλασιασμένος με το μήκος κύματος. Παρά το ότι ο όρος αυτός έχει διαστάσεις απόστασης και είναι πραγματικός αριθμός, παίρνει συγκεκριμένες τιμές, δηλαδή ακέραια πολλαπλάσια του μήκους κύματος.

Ο θόρυβος ε_{φ} αυτών των μετρήσεων για αναλογικούς δέκτες είναι συνήθως της τάξης των 2 mm και 3 mm για τις συχνότητες L1 και L2 αντίστοιχα. Οι μετρήσεις φάσεις είναι πιο ακριβείς από τις μετρήσεις ψευδοαπόστασης, αλλά αν δεν προσδιοριστεί ο ακέραιος αριθμός των κύκλων, μπορούν να θεωρηθούν μόνο ως σχετικά μεγέθη για την γεωμετρική απόσταση δορυφόρου-δέκτη.

Από τα παραπάνω είναι φανερό ότι οι παρατηρήσεις, τόσο στη φάση όσο και στον κώδικα και στις δύο φέρουσες συχνότητες, καταλήγουν τελικά σε μετρήσεις ‘ψευδοαποστάσεων’ λόγω των εμπεριεχόμενων σφαλμάτων. Αυτό το πρόβλημα

μπορεί να λυθεί χρησιμοποιώντας διάφορους γραμμικούς συνδυασμούς των μετρήσεων αντί των αρχικών παρατηρήσεων προκειμένου να γίνει με ακρίβεια ο προσδιορισμός θέσης.

Απαραίτητη προϋπόθεση για να συμβεί αυτό είναι η πραγματοποίηση ταυτόχρονων παρατηρήσεων από δύο τουλάχιστον διαφορετικούς δέκτες που βρίσκονται σε δύο διαφορετικά σημεία A και B. Στην περίπτωση αυτή το προσδιοριζόμενο μέγεθος είναι το διάνυσμα βάσης $\Delta\mathbf{X}$ μεταξύ των δύο σημείων A και B

$$\Delta\mathbf{X} = [X_A - X_B, \quad Y_A - Y_B, \quad Z_A - Z_B]^T \quad (4.4)$$

και για τον λόγο αυτό ο προσδιορισμός θέσης ονομάζεται σχετικός καθώς προσδιορίζεται η θέση ενός σημείου B με τη βοήθεια κάποιου άλλου A το οποίο θεωρείται γνωστό.

Οι συνδυασμοί που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι (Δερμάνης, 1999):

- Διαφορές παρατηρήσεων για διαφορετικούς σταθμούς
- Διαφορές παρατηρήσεων για διαφορετικούς δορυφόρους
- Διαφορές παρατηρήσεων για διαφορετικές χρονικές στιγμές
- Διαφορές παρατηρήσεων του ίδιου τύπου
- Διαφορές παρατηρήσεων διαφορετικού τύπου

Ένα μειονέκτημα της χρήσης γραμμικών συνδυασμών είναι ότι κατά κανόνα αυξάνεται το επίπεδο του θορύβου στις προκύπτουσες παρατηρήσεις. Γι' αυτόν τον λόγο η χρήση τους πρέπει να γίνεται με μεγάλη προσοχή.

Με την εξέλιξη της τεχνολογίας των δεκτών GPS αναπτύχθηκε μια νέα μεθοδολογία η οποία ονομάζεται Κινηματικός Εντοπισμός σε Πραγματικό Χρόνο (Real Time Kinematic, RTK). Κατά τη μέθοδο αυτή ο ένας δέκτης τοποθετείται σε σημείο το οποίο θεωρείται απολύτως γνωστό και ονομάζεται «σταθερός», ενώ ο άλλος τοποθετείται στα σημεία στα οποία θα γίνει ο εντοπισμός και ονομάζεται «κινούμενος» (rover). Οι δύο δέκτες επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω ασύρματης επικοινωνίας (π.χ UHF) ή καλωδιακής γραμμής. Με τον τρόπο αυτό ο σταθερός δέκτης στέλνει συνεχώς τα αρχεία παρατηρήσεων τα οποία καταγράφει. Χάρη στον ειδικό σχεδιασμό των δεκτών που υποστηρίζουν τη λειτουργία RTK η επεξεργασία

των αρχείων αυτών μπορεί να γίνει σε πραγματικό χρόνο και να υπολογίζονται οι συντεταγμένες του κινούμενου δέκτη με ακρίβεια 2 –5 cm.

Πριν ξεκινήσει η διαδικασία εντοπισμού σε πραγματικό χρόνο θα πρέπει κινούμενος δέκτης να παραμείνει σε σημείο γνωστών συντεταγμένων για κάποιο χρονικό διάστημα (μερικά λεπτά) προκειμένου να επιλύσει στατικά την απροσδιοριστία των ακέραιων κύκλων (initializing). Στη συνέχεια μπορεί να προχωρήσει στο εντοπισμό σε πραγματικό χρόνο με δύο προϋποθέσεις: Πρώτον ότι κανείς από τους δύο δέκτες δεν θα χάσει την επαφή με του με τα δορυφορικά σήματα τα οποία λαμβάνει, και δεύτερον ότι οι δύο δέκτες θα πρέπει να επικοινωνούν μεταξύ τους αδιάκοπα. Σε αντίθετη περίπτωση θα πρέπει να γίνει ξανά ο υπολογισμός της απροσδιοριστίας ακέραιων κύκλων.

4.2. Παρατήρηση δυναμικών φαινομένων με χρήση GPS

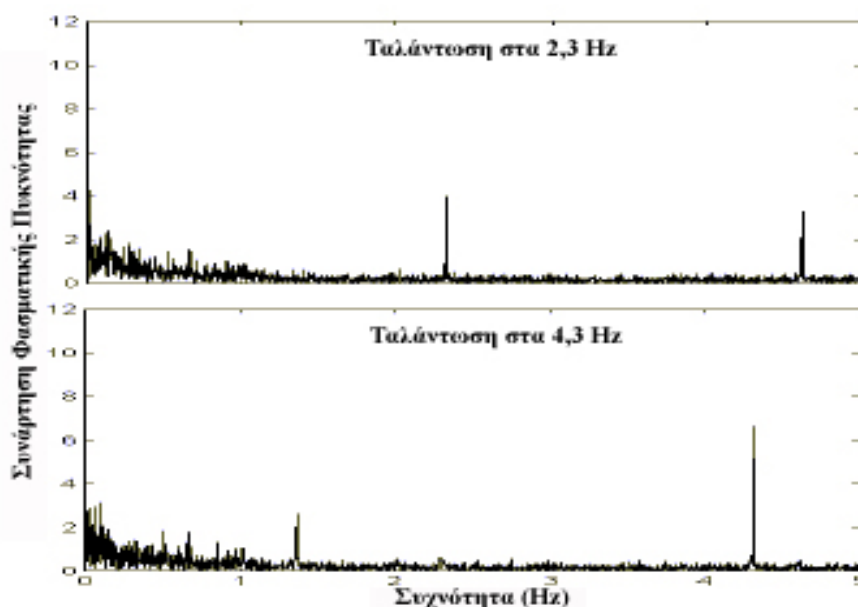
Η ακρίβεια στον εντοπισμό θέσης που παρέχει το Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού σε συνδυασμό με την δυνατότητα των σύγχρονων δεκτών GPS για υψηλή συχνότητα υπολογισμού συντεταγμένων θέσης άνοιξε στην διεθνή επιστημονική κοινότητα νέους ορίζοντες τόσο στην παρακολούθηση δυναμικών φαινομένων με πολύ μεγάλη περίοδο εξέλιξης, όπως οι τεκτονικές παραμορφώσεις όσο και σε δυναμικά φαινόμενα υψηλής συχνότητας όπως οι ταλαντώσεις γεφυρών και πολύ υψηλών κτηρίων (Ge et al, 1999).

Στα πρώτα στάδια της έρευνας για τις δυνατότητες του GPS στην παρακολούθηση δυναμικών φαινομένων, χρησιμοποιήθηκαν ευρέως διατάξεις που εξομοίωναν τις ταλαντώσεις που εκτελούν τα επιμέρους τμήματα μεγάλων κατασκευών. Στην ουσία πρόκειται για μια γεννήτρια που παράγει ένα ημιτονοειδές σήμα συγκεκριμένου πλάτους και συχνότητας. Το σήμα αυτό περνάει από ένα ενισχυτή ισχύος και καταλήγει σε ένα μοτέρ το οποίο εκτελεί την ανάλογη ταλάντωση.

Μια τέτοια διάταξη χρησιμοποιήθηκε από την Ομάδα Δορυφορικού Εντοπισμού και Ναυσιπλοΐας (SNAP) του Πανεπιστημίου της Νέας Νοτίου Ουαλίας (UNSW) στην Αυστραλία. Πάνω στο μοτέρ προσαρμόστηκε δέκτης GPS με συχνότητα

παρατήρησης 10Hz καθώς και επιταχυνσιόμετρο. Οι παρατηρήσεις που έγιναν αφορούσαν ταλαντώσεις πλάτους 12,7 mm με συχνότητες 2,3 και 4,3 Hz. Η φασματική ανάλυση των χρονοσειρών που προέκυψαν έδειξαν ότι οι συχνότητες ταλάντωσης του εξομοιωτή μπορούν να εντοπιστούν με τη βοήθεια της Συνάρτησης Φασματικής Πυκνότητας που προκύπτει από τον Ταχύ Μετασχηματισμό Fourier (σχήμα 3.1). Τα δεδομένα παρουσιάζουν μεγάλο θόρυβο στις χαμηλές συχνότητες εξαιτίας των πηγών σφαλμάτων του GPS. Κάποιες ενδεικτικές τιμές των σφαλμάτων στο πεδίο των συχνοτήτων δίνονται από τη βιβλιογραφία (Han & Rizos, 1997)

- Ατμοσφαιρική Καθυστέρηση: 0,00005-0,0008 Hz (T=1250-20000sec)
- Πολυκλαδικές Ανακλάσεις: 0,0008-0,01 Hz (T=100-1250sec)
- Θόρυβος στο δέκτη: 0,0008-0,02 (T=50-1250sec)



Σχήμα 4.1: Η Συνάρτηση Φασματικής Πυκνότητας για τις χρονοσειρές του πειράματος για ταλάντωση με συχνότητα 2,3 και 4,3 Hz αντίστοιχα (Ogaja, 2002).

Στην περίπτωση της ταλάντωσης στα 2,3 Hz, η κορυφή που παρουσιάζεται στη Συνάρτηση Φασματικής Πυκνότητας για συχνότητα 4,6 Hz οφείλεται στο ότι η γεννήτρια σήματος δεν παράγει τέλειο ημιτονοειδές σήμα. Για τον λόγο αυτό η διάταξη θα πρέπει αρχικά να ελέγχεται σε ψηφιακό παλμογράφο. Για την ταλάντωση των 4,3 Hz, αξίζει κανείς να προσέξει την δευτερεύουσα κορυφή που παρουσιάζεται στα 1,4 Hz.

Σύμφωνα με το «Θεώρημα Nyquist» (Press et al., 1992) όταν η συχνότητα δειγματοληψίας των παρατηρήσεων είναι f_s , τότε με τη Συνάρτηση Φασματικής Πυκνότητας ανιχνεύονται στο σήμα συχνότητες από 0Hz έως $f_N = f_s/2$ Hz. Σε περίπτωση που το σήμα περιέχει υψηλότερες συχνότητες που δεν μπορούν να εντοπιστούν εξαιτίας της χαμηλής συχνότητας δειγματοληψίας, τότε στο διάγραμμα της Συνάρτησης Φασματικής Πυκνότητας οι συχνότητες αυτές αναδιπλώνονται εντός του παρατηρήσιμου φάσματος σαν αντικατοπτρισμοί. Αυτό συμβαίνει και σε αυτή την περίπτωση όπου υπάρχει αναδίπλωση της αρμονικής των 8,6Hz ($=2 \times 4,3\text{Hz}$) καθώς αυτή υπερβαίνει το όριο του Nyquist $f_N = 10/2$ Hz.

Αντιλαμβάνεται κανείς ότι για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων θα πρέπει να υπάρξει κατ' αρχάς διαχωρισμός στο σήμα έτσι ώστε να απαλειφθούν όλοι οι παράγοντες που προσθέτουν θόρυβο προκειμένου να αναλυθεί μόνο το κομμάτι που αφορά στην εξέλιξη του δυναμικού φαινομένου. Στη βιβλιογραφία αυτό συνήθως γίνεται είτε με Πεπερασμένα Φίλτρα Απόκρισης σε Ώθηση (Finite Impulse Response Filter) (Ogaja, 2001) είτε με Προσαρμοζόμενο Φιλτράρισμα (Adaptive Filtering). Ο σχεδιασμός ενός φίλτρου προϋποθέτει πολύ καλή μοντελοποίηση του φαινομένου το οποίο προσθέτει θόρυβο στο σήμα μας (πολυκλαδικές ανακλάσεις, ατμοσφαιρικές επιδράσεις κ.τ.λ.). Λανθασμένη εκτίμηση για τις ιδιότητες του θορύβου μπορεί να προκαλέσει απώλεια χρήσιμων συνιστωσών από το σήμα μας μετά την εφαρμογή του φίλτρου.

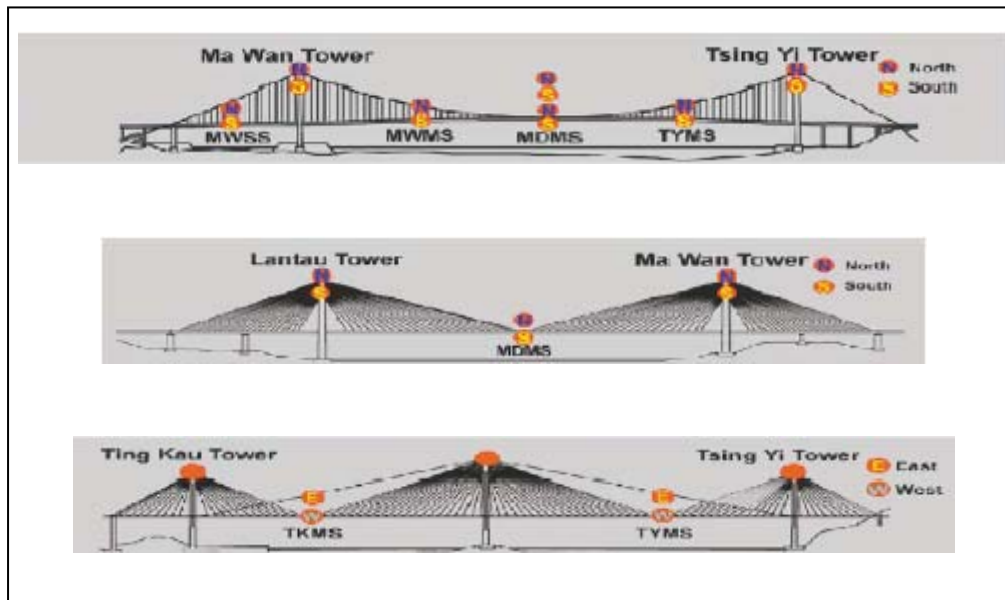
Για τον λόγο αυτό στην παρούσα διατριβή απεφεύχθη η εφαρμογή φίλτρων αλλά αντιθέτως έγινε προσπάθεια για τη μελέτη της συμπεριφοράς του θορύβου σε χρονοσειρές μετατοπίσεων της μορφής

$$[dE(t) \quad dN(t) \quad dh(t)] \quad (4.5)$$

οι οποίες μετρήθηκαν με GPS όπου $dE(t)$, $dN(t)$ είναι τα διανύσματα με τις μεταβολές των συντεταγμένων X, Y αντίστοιχα (Easting, Northing) ως συνάρτηση του χρόνου ενώ $dh(t)$ το αντίστοιχο διάνυσμα με τις μεταβολές του υψομέτρου.

Στην περίπτωση παρακολούθησης παραμορφώσεων, σύγχρονοι δέκτες GPS τοποθετούνται στα σημεία ενδιαφέροντος της κατασκευής (Σχήμα 4.2). Οι κεραίες

πρέπει να είναι εγκατεστημένες πάνω σε σταθερά σημεία και όσο το δυνατόν πιο μακριά από αντικείμενα που μπορεί να προκαλέσουν πολυκλαδικές ανακλάσεις (συρματόσχοινα, μεταλλικές επιφάνειες, κλπ). Οι δέκτες τοποθετούνται συνήθως όλοι μαζί σε κατάλληλα προστατευμένο μέρος. Όλοι οι δέκτες που βρίσκονται στην κατασκευή λειτουργούν ως «μετακινούμενοι» (rover). Τόσο οι κινούμενοι όσο και οι δέκτες αναφοράς που βρίσκονται στο κέντρο επεξεργασίας μετρούν κώδικα και φάση και στις δύο συχνότητες (L1, L2). Ο προσδιορισμός της θέσης της κεραίας σε πραγματικό χρόνο επιτυγχάνεται με τη βοήθεια των διορθώσεων που στέλνουν οι βασικοί δέκτες στους κινούμενους.

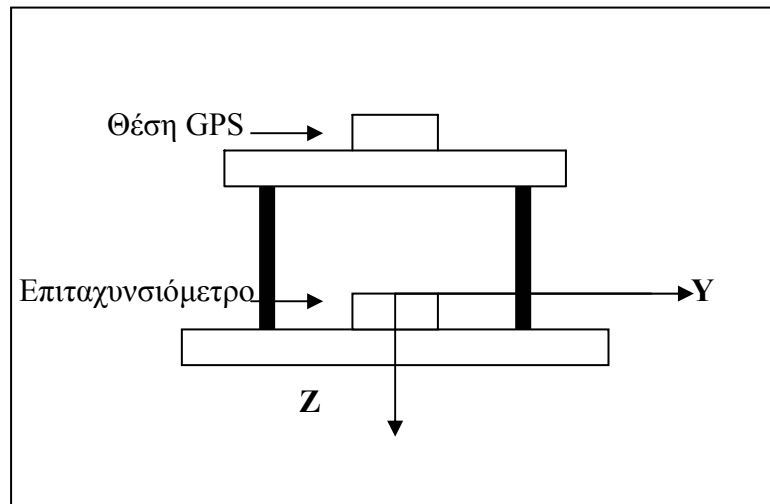


Σχήμα 4.2: Η διάταξη των δεκτών GPS στις γέφυρες Tsing Ma, Kap Shui Man, Ting Kau (Hong Kong) αντίστοιχα. (Kai-yuen et al., 2001)

Για την ομαλή λειτουργία του συστήματος απαιτούνται τουλάχιστον δύο βασικοί δέκτες. Η δειγματοληψία των GPS θα πρέπει να ακολουθεί το θεώρημα Nyquist το οποία επιβάλει να είναι διπλάσια από τη συχνότητα που επιθυμούμε να εντοπιστεί στο τελικό σήμα. Επειδή οι συχνότητες στις ταλαντώσεις των κατασκευών κυμαίνονται από 0,1-5 Hz η ελάχιστη δειγματοληψία του δέκτη θα πρέπει να είναι 10 Hz (συχνότητα Nyquist= $\frac{10}{2}$ Hz =5Hz).

Από τις παρατηρήσεις φάσης των κινούμενων δεκτών προκύπτουν τα μήκη βάσεων (ΔX , ΔY , ΔZ) σε σχέση πάντα με τους σταθμούς αναφοράς και κατ' επέκταση τη

γεωμετρική θέση των κινούμενων δεκτών μεταξύ τους. Ταυτόχρονα με την εγκατάσταση των GPS, προσδιορίζεται η σχετική θέση του κύριου άξονα της κατασκευής και οι θέσεις των κεραιών σε κάποιο προβολικό σύστημα αναφοράς. Με τον τρόπο αυτό υπάρχει η δυνατότητα μετατροπής των μετακινήσεων που παρατηρούνται στις θέσεις των κεραιών σε μετατοπίσεις του κύριου άξονα και ουσιαστικά η παρακολούθηση των τριών γωνιών στρέψης του (pitch, roll, yaw).



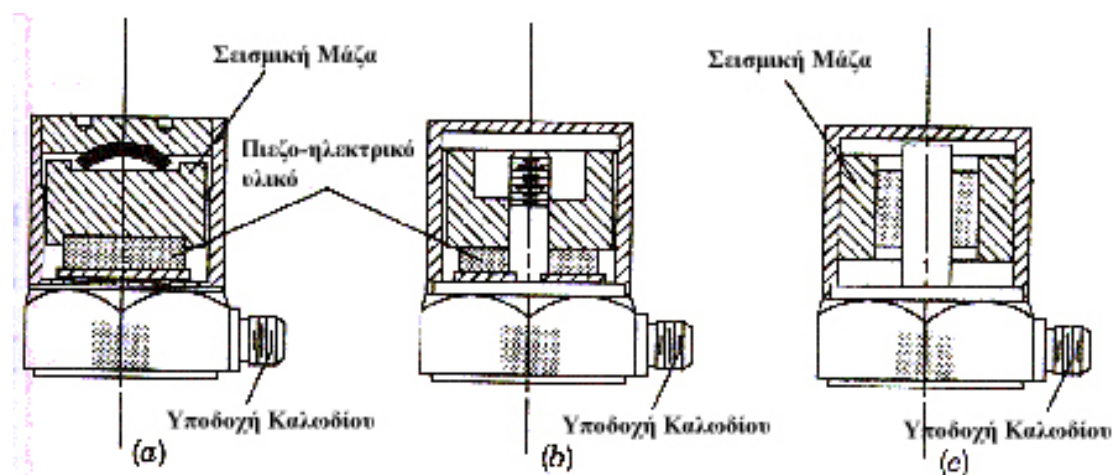
Σχήμα 4.3 : Βάση για την τοποθέτηση GPS – επιταχυνσιομέτρου.

4.3 Επιταχυνσιόμετρα

Τα επιταχυνσιόμετρα είναι διατάξεις παρόμοιες με αυτές του Σχήματος 4.4. Κάθε επιταχυνσιόμετρο διαθέτει μέσα του ένα σώμα που ονομάζεται **σεισμική μάζα** (seismic mass) και το οποίο μπορεί να εκτελεί ταλάντωση εξ αιτίας κάποιου εξωτερικού αιτίου.

Η αρχή λειτουργίας του οργάνου αυτού στηρίζεται στην μετατροπή της στιγμιαίας επιτάχυνσης της σεισμικής μάζας σε ηλεκτρικό ρεύμα μέσω ειδικού υλικού που χαρακτηρίζεται ως **πιεζο-ηλεκτρικό** (McConnell, 1995). Με τον τρόπο αυτό μπορεί να παρατηρήσει κανείς με πολύ μεγάλη συχνότητα δειγματοληψίας (συνήθως 200 - 1200 Hz) τις τρεις συνιστώσες επιταχύνσεις, όπως αυτές καταγράφονται στο σημείο υλοποίησης του οργάνου.

Σε εφαρμογές παρόμοιες με αυτήν που αναπτύσσεται στην παρούσα εργασία, τα επιταχυνσιόμετρα χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με τα GPS και οι θέσεις παρατήρησης της επιτάχυνσης ταυτίζονται με τις θέσεις στις οποίες παρατηρούμε άμεσα τις μετατοπίσεις (Σχήμα 4.3). Αυτό επιτυγχάνεται τοποθετώντας τα επιταχυνσιόμετρα ακριβώς κάτω από τις κεραίες, ενώ με ένα ταχύμετρο ευθυγραμμίζονται έτσι ώστε η μία οριζόντια συνιστώσα παρατήρησης να ταυτίζεται με τον κύριο άξονα της κατασκευής ενώ η άλλη να είναι κάθετη προς αυτόν. Προκειμένου να μπορούν τα δεδομένα που προκύπτουν να συγκριθούν με αυτά του GPS θα πρέπει να ολοκληρωθούν αριθμητικά προκειμένου από επιτάχυνση να περάσουμε σε μετατόπιση. Η διαδικασία αυτή είναι εξαιρετικά δύσκολη καθώς πρέπει να καθοριστούν κάποιες συχνότητες αποκοπής στο σήμα που προκύπτει ενώ οι σταθερές ολοκλήρωσης (αρχικές τιμές) δίνονται με βάση τις παρατηρήσεις των GPS (ταχύτητα, μετατόπιση).



Σχήμα 4.4 : Τυπικές μορφές επιταχυνσιομέτρων (McConell,1995)

4.4. Μετεωρολογικοί αισθητήρες

Ο ρόλος των μετεωρολογικών δεδομένων στην παρακολούθηση των παραμορφώσεων είναι πολλαπλός. Κατ' αρχάς δίνουν μια εικόνα για τα πιθανά αίτια που μπορούν να προκαλέσουν μετατοπίσεις στα επιμέρους τμήματα μιας κατασκευής. Όπως εξετάζεται και παρακάτω, ταλαντώσεις που προέρχονται από δυνατούς ανέμους ή μεταβολές της θερμοκρασίας μπορούν να εντοπιστούν στις χρονοσειρές που προκύπτουν από τις παρατηρήσεις GPS και με τα μετεωρολογικά δεδομένα να

συσχετιστούν μεταξύ τους προκειμένου να προκύψει το μοντέλο που θα ανταποκρίνεται στην ελαστική συμπεριφορά της κατασκευής.

Επιπλέον δεδομένα θερμοκρασίας και υγρασίας θεωρούνται εξαιρετικά χρήσιμα για την επεξεργασία των παρατηρήσεων GPS και την επίλυση των γεωδαιτικών βάσεων. Οι αισθητήρες τοποθετούνται είτε στην περιοχή της κατασκευής είτε στο κέντρο επεξεργασίας, με την προϋπόθεση ότι τα καιρικά φαινόμενα παραμένουν αμετάβλητα. Απαραίτητος εξοπλισμός για αυτές τις εφαρμογές θεωρείται ένα ανεμόμετρο (ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου), ένα ψηφιακό θερμόμετρο ακριβείας καθώς και ένα υγρόμετρο.

4.5. Ολοκλήρωση συστήματος

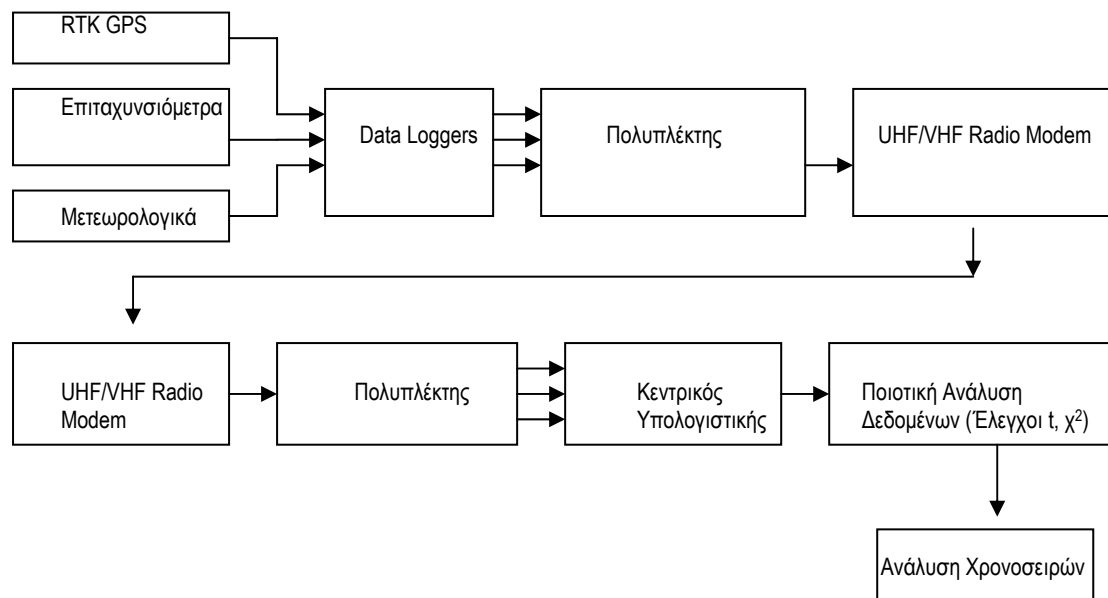
Όλα τα δεδομένα από τα όργανα που περιγράφονται παραπάνω καταλήγουν μέσω σειριακών εξόδων σε ένα καταγραφικό δεδομένων (data logger). Η συσκευή αυτή αφενός αρχειοθετεί προσωρινά τα δεδομένα και αφετέρου επιτυγχάνει τον συγχρονισμό τους καθώς τα δεδομένα θα πρέπει με ακρίβεια να έχουν ένα κοινό χρόνο αναφοράς για να μπορεί να γίνει η επεξεργασία τους. Το καταγραφικό δεδομένων διαθέτει έναν αυτόνομο χρονόμετρο από τον οποίο δίδει αναγνώσεις χρόνου σε κάθε παρατήρηση που φτάνει στις σειριακές του εισόδους.

Αφού τα δεδομένα συγχρονιστούν θα πρέπει να γίνει η εκπομπή τους στο κέντρο επεξεργασίας. Αν για την εφαρμογή χρησιμοποιείται ένα μόνο καταγραφικό δεδομένων, τότε μέσω της σειριακής του εξόδου τα δεδομένα οδηγούνται σε ένα κατάλληλο radio modem το οποίο διαμορφώνει σήμα εκπομπής σε συχνότητες UHF ή VHF. Σε περιπτώσεις όπου χρησιμοποιούνται παραπάνω από ένα καταγραφικά, οι σειριακές έξοδοι θα πρέπει πρώτα να περάσουν το στάδιο της πολύπλεξης (multiplexing).

Κατά τη διαδικασία αυτή, τα διαφορετικά σήματα που φτάνουν στον πολυπλέκτη διαμορφώνονται ως ένα τελικό σήμα σειριακής εξόδου για να οδηγηθούν στο radio modem. Τα δεδομένα μεταδίδονται στο κέντρο επεξεργασίας μέσω τηλεπικοινωνιακής ζεύξης. Καθώς οι παρατηρήσεις φτάνουν με σταθερό ρυθμό,

εισέρχονται σε αλγόριθμους στατιστικών ελέγχων για την εξακρίβωση της ποιότητας τους με στόχο να απομακρυνθούν παρατηρήσεις που περιέχουν χονδροειδή σφάλματα.

Στην ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου συστήματος εκτός από το σωστό σχεδιασμό του και την εγκατάσταση των οργάνων, εξίσου μείζονος σημασίας είναι και η ανάλυση που ακολουθεί στις παρατηρήσεις που γίνονται. Η εφαρμογή των κατάλληλων τεχνικών μπορεί να μας οδηγήσει στα σωστά και λογικά συμπεράσματα αναφορικά με την κατάσταση της κατασκευής. Στο Κεφάλαιο που ακολουθεί περιγράφονται αναλυτικά οι μέθοδοι ανάλυσης δεδομένων.



Σχήμα 4.5 : Σχηματική απεικόνιση της ροής των δεδομένων από το πεδίο παρατήρησης προς το κέντρο επεξεργασίας.

Κεφάλαιο 5

Ανάλυση Δεδομένων

5.1 Εισαγωγή

Η ανάλυση δεδομένων αποτελεί το βασικό κομμάτι της επεξεργασίας σημάτων τα οποία προέρχονται από ένα ολοκληρωμένο σύστημα παρακολούθησης παραμορφώσεων. Εφαρμόζοντας τις κατάλληλες τεχνικές, είναι δυνατός ο προσδιορισμός και η ποσοτική περιγραφή δυναμικών φαινομένων. Επειδή όπως έχει αναφερθεί ήδη, ειδικά οι μετρήσεις με GPS υποφέρουν από τον παράγοντα του θορύβου στις μετρήσεις, οι τεχνικές που εφαρμόζονται στα σήματα θα πρέπει να είναι κατάλληλα επιλεγμένες έτσι ώστε είτε να μην επηρεάζονται από αυτόν, είτε να τον αφαιρούν στα πρώιμα στάδια της ανάλυσης.

Στην παρούσα διατριβή επελέγησαν δύο διαφορετικές τεχνικές για την ανάλυση δεδομένων που ακολούθησε. Αφενός εφαρμόστηκαν διάφορες φασματικές τεχνικές στο πεδίο των συχνοτήτων για τον εντοπισμό συμπεριφορών που δείχνουν με σαφήνεια την ύπαρξη περιοδικών φαινομένων. Με τη χρήση μετασχηματισμών Fourier είναι δυνατός ο προσδιορισμός της ιδιοσυχνότητας ενός κτηρίου όταν σε αυτό αναπτύσσονται εξωτερικά φορτία (Brownjohn et al., 2000). Εκτός από τους μετασχηματισμούς, αναλύθηκαν οι διακυμάνσεις των χρονοσειρών GPS και ανεμομέτρου, για να μελετηθεί η συμπεριφορά και οι ιδιότητες τόσο του θορύβου των παρατηρήσεων όσο και της πληροφορίας που περιλαμβάνεται στο σήμα και αφορά στη συμπεριφορά του κτηρίου.

5.2. Φασματικές τεχνικές

Στην ανάλυση χρονοσειρών, δυναμικά φαινόμενα μπορούν εύκολα να προσδιοριστούν με τον μετασχηματισμό των αρχικών δεδομένων από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο των συχνοτήτων με τη χρήση του Διακριτού Μετασχηματισμού Fourier. Με βάση τον μετασχηματισμό αυτόν μια χρονοσειρά $x(t)$ μετασχηματίζεται σε άθροισμα k όρων με διακριτές τιμές συχνοτήτων f_k σύμφωνα με τη σχέση (Press et al., 1992)

$$\tilde{X}(f_k) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(t_k) e^{-i2\pi f t_k} \quad (5.1)$$

όπου $\tilde{X}(f_k)$ ο μετασχηματισμός Fourier της αρχικής χρονοσειρας στο πεδίο των συχνοτήτων.

Ο χαρακτηρισμός ενός χρονικά μη-στάσιμου φαινομένου γίνεται με τη βοήθεια της Φασματικής του Υπογραφής στον πεδίο των συχνοτήτων. Με τον όρο Φασματική Υπογραφή περιγράφεται η συνιστώσα με την οποία συνεισφέρει (φασματική συνεισφορά) ένα δυναμικό φαινόμενο σε ένα σήμα το οποίο έχει μετασχηματιστεί στο πεδίο των συχνοτήτων.

Προκειμένου να εντοπιστούν οι κύριες συχνότητες ενός σήματος χρησιμοποιείται η Συνάρτηση Φασματικής Πυκνότητας $P_X(f)$. Η συνάρτηση αυτή μετράει ουσιαστικά την κανονικοποιημένη τιμή της φασματικής πυκνότητας που περιέχεται στο σήμα ανά μονάδα συχνότητας και δίνεται από τη σχέση

$$P_X(f) = \|\tilde{X}(f)\|^2 \quad (5.2)$$

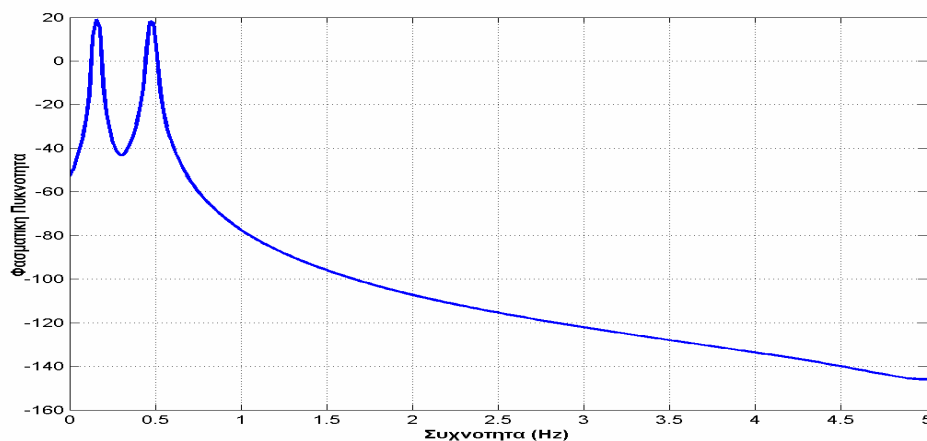
ισούται δηλαδή με το τετράγωνο του μέτρου του μετασχηματισμού Fourier.

Στην περίπτωση του διακριτού μετασχηματισμού Fourier που αφορά δεδομένα με ένα σταθερό διάστημα δειγματοληψίας, μπορεί να γίνει μόνο μια εκτίμηση της Συνάρτησης Φασματικής Πυκνότητας. Αφορά δε, ένα εύρος συχνοτήτων οι οποίες σύμφωνα με το θεώρημα Nyquist εκτείνονται από τη μηδενική συχνότητα (DC) μέχρι το μισό της συχνότητας δειγματοληψίας. Η εκτίμηση αυτή της συνάρτησης ονομάζεται Περιοδόγραμμα.

Στην παρούσα διατριβή η εκτίμηση της Συνάρτησης Φασματικής Ισχύος έγινε σύμφωνα με την Μέθοδο Welch η οποία υλοποιείται ως εξής: Χρησιμοποιούνται επικαλυπτόμενα παράθυρα στο πεδίο του χρόνου και το δείγμα τεμαχίζεται σε τμήματα. Κατόπιν το περιοδόγραμμα υπολογίζεται ξεχωριστά σε κάθε τμήματα. Ο προσδιορισμός τη φασματικής πυκνότητας δίνεται από τη μέση τιμή των τμηματικών περιοδογραμμάτων. Η χρήση της μέσης τιμής ελαττώνει την αβεβαιότητα της εκτίμησης. Τα σήματα που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη φάση της ανάλυσης δεδομένων χαρακτηρίζονταν ως στατιστικά μη στάσιμα καθώς οι διακυμάνσεις τους

είχαν μη μηδενικό μέσο όρο. Για το λόγο αυτό στον αλγόριθμο που εφαρμόστηκε, το αρχικό σήμα χωρίστηκε σε μη επικαλυπτόμενα παράθυρα ενώ από τα επί μέρους τμήματα αφαιρέθηκαν οι τοπικές τάσεις προκειμένου το σήμα να αναχθεί σε στατιστικά στάσιμο.

Παράδειγμα εκτίμησης περιοδογράμματος για συνθετικό σήμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.1. Το σήμα που κατασκευάστηκε είναι της μορφής $y(t) = \sin(t) + \cos(3t)$ και η συχνότητα δειγματοληψίας καθορίστηκε στα 10 Hz. Οι δύο κορυφές στα 0,16 και 0,47Hz περίπου αντιστοιχούν στις δύο συχνότητες των σημάτων από την υπέρθεση των οποίων προέκυψε το σήμα του παραδείγματος



Σχήμα 5.1 : Η εκτίμηση της Φασματικής Πυκνότητας Ισχύος για συνθετικό σήμα με τη χρήση του Περιοδογράμματος Welch. Οι δύο κορυφές που παρατηρούνται στη Συνάρτηση Φασματικής Πυκνότητας και στις συχνότητες 0,16Hz και 0,47Hz υποδεικνύουν τις δύο κύριες συχνότητες του σήματος

5.3 Ανάλυση διακυμάνσεων

Πολλά φυσικά και βιολογικά συστήματα παρουσιάζουν σύνθετη συμπεριφορά που χαρακτηρίζεται από μεγάλης εμβέλειας συσχετίσεις με δυναμονομική (power law) συμπεριφορά (Peng et al., 1995) (Peng et al., 1994). Παραδοσιακές προσεγγίσεις όπως οι φασματικές τεχνικές και η ανάλυση συσχετίσεων αδυνατούν να δώσουν με ακρίβεια ποσοτική πληροφορία για τη συσχέτιση σε στατιστικώς μη στάσιμα σήματα (π.χ. για σήματα τα οποία διακυμαίνονται γύρω από πολυωνυμικές τάσεις). Ανάλογα σήματα με μη στάσιμη συμπεριφορά συναντώνται σε χρονοσειρές των μετατοπίσεων

που έχουν μετρηθεί με δέκτες GPS σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα. Όπως θα φανεί και στη συνέχεια σε τέτοιου είδους σήματα συμβαίνει ουσιαστικά υπέρθεση επίσης περιοδικού φαινομένου (π.χ. η ταλάντωση επίσης κτηρίου κάτω από συνθήκες φόρτισης) και θορύβου ο οποίος εξαρτάται από τον τόπο και τον χρόνο παρατήρησης.

Η μέθοδος ανάλυσης διακυμάνσεων απαλλαγμένων από συστηματικές τάσεις (Detrended Fluctuation Analysis, DFA) χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό συσχετίσεων μακράς εμβέλειας με δυναμονομική μορφή. Κύριο χαρακτηριστικό επίσης είναι ότι παρουσιάζουν κλιμάκωση στον χρόνο (time scaling). Η φυσική σημασία επίσης κλιμάκωσης στον χρόνο είναι η εξής: Η δυναμονομική συσχέτιση αρχίζει να εμφανίζεται για μικρά παράθυρα χρόνου επίσης χαρακτηρίζεται ως δυναμονομική μόνο αν το ίδιο ισχύει και σε πολύ μεγαλύτερα παράθυρα (π.χ. μήκος παραθύρου όσο το μισό του αρχικού σήματος).

Αναλυτικότερα ο αλγόριθμος, ο οποίος στη συνέχεια για χάριν συντομίας θα ονομάζεται αλγόριθμος DFA υλοποιείται ως εξής (Peng et al, 1995):

- Έστω σήμα $D(t)$ μήκους N τιμών (εδώ για λόγους απλότητας θεωρείται ότι ο χρόνος παίρνει μόνο ακέραιες τιμές $t=0,1,2,3,...,N$). Η αρχική χρονοσειρά ολοκληρώνεται με τη βοήθεια επίσης συναρτησιακής σειράς Συσσωρευμένου Αθροίσματος (Cumulative Sum), $y(k) = \sum_{i=1}^k [D(i) - D_{MEAN}]$ όπου $y(k)$ είναι η τιμή του ολοκληρώματος (αθροίσματος) k τιμές του αρχικού σήματος, $D(i)$ είναι η στιγμιαία τιμή του αρχικού σήματος για χρόνο $t=i$ και D_{MEAN} είναι η μέση τιμή ολόκληρου του σήματος διαστάσεων N .
- Το νέο σήμα, επίσης μήκους N , που προκύπτει μετά την ολοκλήρωση χωρίζεται σε N/ℓ μη επικαλυπτόμενα παράθυρα το καθένα από τα οποία έχει ℓ στοιχεία. Με μία γραμμική παλινδρόμηση υπολογίζεται η τοπική γραμμική συστηματική τάση $y_\ell(k)$. Στη συνέχεια αφαιρείται από το ολοκληρωμένο σήμα $y(k)$ και προκύπτει το σήμα:

$$y'(k) = y(k) - y_\ell(k), \quad k = 1, 2, 3, \dots, N \quad (5.3)$$

- Κατόπιν υπολογίζεται το μέσο τετραγωνικό σφάλμα

$$F(\ell) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [y(k) - y_\ell(k)]^2} \quad (5.4)$$

για το απαλλαγμένο από συστηματικές τάσεις σήμα σε κάθε παράθυρο μήκους ℓ .

- Ο παραπάνω υπολογισμός επαναλαμβάνεται για όλες τις κλίμακες του χρόνου (ελάχιστα – μέγιστα μεγέθη παραθύρων που καθορίζει ο χρήστης ℓ_{\min}, ℓ_{\max}) με στόχο τη δημιουργία κάποιας σχέσης που θα συνδέει το μέσο τετραγωνικό σφάλμα $F(\ell)$ με το μεγέθους του παραθύρου ℓ .

Είναι αναμενόμενο, ότι το μέσο σφάλμα $F(\ell)$ θα αυξάνεται καθώς μεγαλώνει η διάσταση του παραθύρου ℓ . Αν η αύξηση αυτή ακολουθεί μια σχέση της μορφής:

$$\log[F(\ell)] = a \cdot \log(\ell) \quad (5.5)$$

τότε στο αρχικό σήμα $D(t)$ υπάρχουν εκθετικού τύπου συσχετίσεις μεγάλης χρονικής εμβέλειας. Κάτω από τέτοιες συνθήκες οι διακυμάνσεις μπορούν να χαρακτηριστούν από τον εκθέτη κλίμακας a ο οποίος δεν είναι άλλος από την κλίση της ευθείας σε ένα λογαριθμικό διάγραμμα το οποίο θα παριστά από τη μια τη διάσταση του παραθύρου ℓ και από την άλλη το μέσο σφάλμα του σήματος $F(\ell)$ (Σχήμα 5.9, Σχ. 5.11, Σχ 5.14).

Η συνάρτηση συσχέτισης c_x , δύο σημείων του σήματος που απέχουν μεταξύ τους απόσταση (διαφορά χρόνου) ℓ είναι δυναμονομικής μορφής (power law) όταν ισχύει η σχέση (Χριστόπουλος, 2003):

$$c_x(\ell) \propto \ell^{-a} \quad (5.6)$$

η συσχέτιση δηλαδή αυξάνεται όσο αυξάνεται και η απόσταση των δύο σημείων. Για το λόγο αυτό χαρακτηρίζονται ως συσχετίσεις μεγάλης χρονικής εμβέλειας.

Ανάλογα με την τιμή της κλίσης a εξάγονται στατιστικά συμπεράσματα για το αρχικό σήμα. Αν $a=0,5$ το ολοκληρωμένο σήμα έχει ιδιότητες με αυτό που στη στατιστική ονομάζεται «τυχαίος περίπατος» (random walk). Στην περίπτωση αυτή ο μέσος όρος των σφαλμάτων $F(\ell)$ παραμένει σταθερός ενώ η απόσταση των τιμών από αυτόν αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου. Στην περίπτωση όπου $0,5 < a < 1$ υπάρχουν στο σήμα συσχετίσεις σε μεγάλο χρονικό εύρος. Αντίθετα αν $0 < a < 0,5$, υπάρχει η ένδειξη για δυναμονομικές συσχετίσεις, όπου τιμές με μεγάλη και μικρή απόσταση από την μέση τιμή εναλλάσσονται διαδοχικά (Peng et al, 1995).

Στην ειδική περίπτωση όπου $a=1$ το σήμα έχει χαρακτηριστικά θορύβου κατά Gauss. Καθώς η κλίση μεγαλώνει το σήμα τείνει να έχει χαρακτηριστικά Κλασματικής Κίνησης Brown (Fractional Brownian Motion) ειδική περίπτωση της οποίας θεωρείται ο «τυχαίος περίπατος». Γενικά ο συντελεστής a θεωρείται ως ένας δείκτης «τραχύτητας» της αρχικής χρονοσειράς: Όσο μικρότερος γίνεται ο συντελεστής τόσο «τραχύτερα» είναι τα δεδομένα (μεγάλη διακύμανση) (Peng et al, 1995):.

Στην περίπτωση των ολοκληρωμένων συστημάτων που προτείνονται σε αυτή τη διατριβή, η κυριότερη πηγή θορύβου που λαμβάνεται υπ' όψιν κατά τη φάση την ανάλυσης χρονοσειρών είναι οι πολυκλαδικές ανακλάσεις στο σήμα του GPS. Επειδή σε τέτοιου είδους εφαρμογές η κεραία του δέκτη έχει σταθερή θέση σε σχέση με τον περιβάλλοντα χώρο, γίνεται η υπόθεση ότι το μέγεθος του σφάλματος μεταβάλλεται ως συνάρτηση της θέσης των παρατηρούμενων δορυφόρων (χρονικά μεταβαλλόμενο).

Έρευνες έχουν δείξει η επίδραση των πολυκλαδικών ανακλάσεων μπορεί να προσεγγιστεί με ένα καθαρά αιτιοκρατικό τρόπο. Μια σειρά ημιτόνων με περιόδους από 6 έως 10 min (0,001-0,003 Hz) σύμφωνα με τον Qui (Qui, 1993) μπορεί να δώσει ένα ικανοποιητικό μοντέλο, ενώ ο Ogaja (Ogaja, 2002) περιγράφει τις πολυκλαδικές ανακλάσεις ως μια πολυωνυμική καμπύλη.

Με την παραδοχή αυτή, οι πολυκλαδικές ανακλάσεις, για παράθυρα διάστασης ℓ κατά πολύ μικρότερη από την περίοδο του φαινομένου μπορούν τοπικά να θεωρηθούν ως γραμμικές συστηματικές τάσεις. Εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο DFA στις χρονοσειρές με τις στιγμιαίες λύσεις που δίνει το κινηματικό GPS, γίνεται η παραδοχή ότι ο θόρυβος των πολυκλαδικών ανακλάσεων αφαιρείται μαζί με τις τοπικές τάσεις οπότε κάθε μορφής συσχέτισης που μπορεί να προκύψει μετά την ανάλυση αφορά είτε άλλες πηγές θορύβου είτε την συμπεριφορά του κτηρίου κάτω από συνθήκες φόρτισης.

5.4. Ανάλυση πραγματικών δεδομένων

5.4.1. Εγκαταστάσεις συστήματος

Οι τεχνικές ανάλυσης δεδομένων που περιγράφηκαν παραπάνω εφαρμόστηκαν πάνω σε πραγματικά δεδομένα που συλλέχθηκαν από ένα Ολοκληρωμένο Σύστημα Παρακολούθησης Παραμορφώσεων που έχει υλοποιηθεί στο κτήριο Republic Plaza Building (RPB) στη Σιγκαπούρη.

Το κλίμα της χώρας χαρακτηρίζεται από τους σύντομους σε διάρκεια ανέμους με χαμηλή μέση ταχύτητα και μεγάλο στροβιλισμό. Βασικό κίνητρο για την παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφορά του κτηρίου ήταν ο έλεγχος του Κώδικα Δόμησης της Σιγκαπούρης. Ο Βρετανικός κώδικας ο οποίος και χρησιμοποιείται, δέχεται ταχύτητες ανέμων από 29m/s έως 35m/s ως μέγιστες τιμές χωρίς να επιβάλει επιπλέον μελέτη για τη δυναμική συμπεριφορά των κτηρίων κάτω από αυτές τις συνθήκες. Αντιλαμβάνεται, λοιπόν, κανείς ότι με τη συλλογή δεδομένων για τις ταχύτητες των ανέμων που εμφανίζονται και τη μέτρηση των παραμορφώσεων που προκαλούν θα είναι δυνατόν ο κώδικας αυτός να ελεγχθεί αλλά και ακόμα να τροποποιηθεί.

Με στόχο την παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς ενός ψηλού κτηρίου και την τροποποίηση του κώδικα δόμησης αναπτύχθηκε ένα ολοκληρωμένο σύστημα ανάλογο με αυτό που περιγράφεται στην παρούσα διατριβή.

Το Republic Plaza Building με συνολικά 66 ορόφους και φυσική συχνότητα περίπου 0,2Hz αποτέλεσε το κατάλληλο κτήριο για την πραγματοποίηση αυτού του ερευνητικού έργου. Ο εξοπλισμός του κτηρίου με τα κατάλληλα όργανα αποσκοπεί στο να προσδιοριστεί με απευθείας μετρήσεις το απόλυτο μέγεθος των παραμορφώσεων που οφείλονται σε φορτία ανέμου. Στο RPB προϋπήρχε εξοπλισμός ο οποίος αποτελείτο από επιταχυνσιόμετρα και ανεμόμετρα. Στα όργανα αυτά πρόσφατα προστέθηκαν δύο δέκτες GPS διπλής συχνότητας οι οποίοι μπορούν να κάνουν εντοπισμό σε πραγματικό χρόνο. Αναλυτικότερα ο εξοπλισμός του ολοκληρωμένου αυτό συστήματος αποτελείται από:



Σχήμα 5.2 : Ο ουρανοξύστης Republic Plaza Building

- Ένα δέκτη αναφοράς με ικανότητα εντοπισμού και στις δύο συχνότητες (L1, L2), τύπου Leica SR530 ο οποίος είναι εγκατεστημένος στις κεντρικές εγκαταστάσεις της εταιρίας Leica στη Σιγκαπούρη. Οι εγκαταστάσεις της εταιρίας απέχουν περίπου δέκα χιλιόμετρα από το RPB.
- Δύο κεραίες GPS τύπου AT502 (διπλής συχνότητας) τοποθετημένες σε κατάλληλα πακτωμένους ιστούς στην ταράτσα του κτηρίου (Σχήμα 5.3)
- Δύο «κινούμενοι» δέκτες διπλής συχνότητας τύπου Leica SR530 τοποθετημένοι σε κατάλληλα διαμορφωμένο χώρο μαζί με ένα υπολογιστή ο οποίος διαχειρίζεται το λογισμικό ελέγχου των δεκτών.
- Ένας μετατροπέας που αλλάζει το σήμα εξόδου των δεκτών από το οποίο παρέχονται οι στιγμιαίες λύσεις, από ψηφιακό σε αναλογικό, για να μπορεί να οδηγηθεί στον καταγραφικό δεδομένων (data logger). Οι δέκτες συνδέονται με τον μετατροπέα με τη χρήση σειριακών καλωδίων τύπου RS-232.
- Μια μισθωμένη τηλεπικοινωνιακή γραμμή μέσω της οποίας διαβιβάζονται οι διορθώσεις από το δέκτη αναφοράς στους κινούμενους.

- Δύο ανεμόμετρα τοποθετημένα σε ιστούς στην ταράτσα του RPB (Σχήμα 5.3) τα οποία παρέχουν τις ταχύτητες του ανέμου σε ένα τρισσορθογώνιο σύστημα αξόνων.
- Τέσσερα επιταχυνσιόμετρα τοποθετημένα στο υπόγειο και στον 65^ο όροφο του κτηρίου.

Όλα τα δεδομένα οδηγούνται με τη μορφή αναλογικού σήματος σε καταγραφικό δεδομένων το οποίο είναι ρυθμισμένο έτσι ώστε να καταγράφει παρατηρήσεις μόνο όταν αυτές υπερβούν κάποιο όριο, για παράδειγμα όταν η ταχύτητα του ανέμου υπερβεί κάποια τιμή.

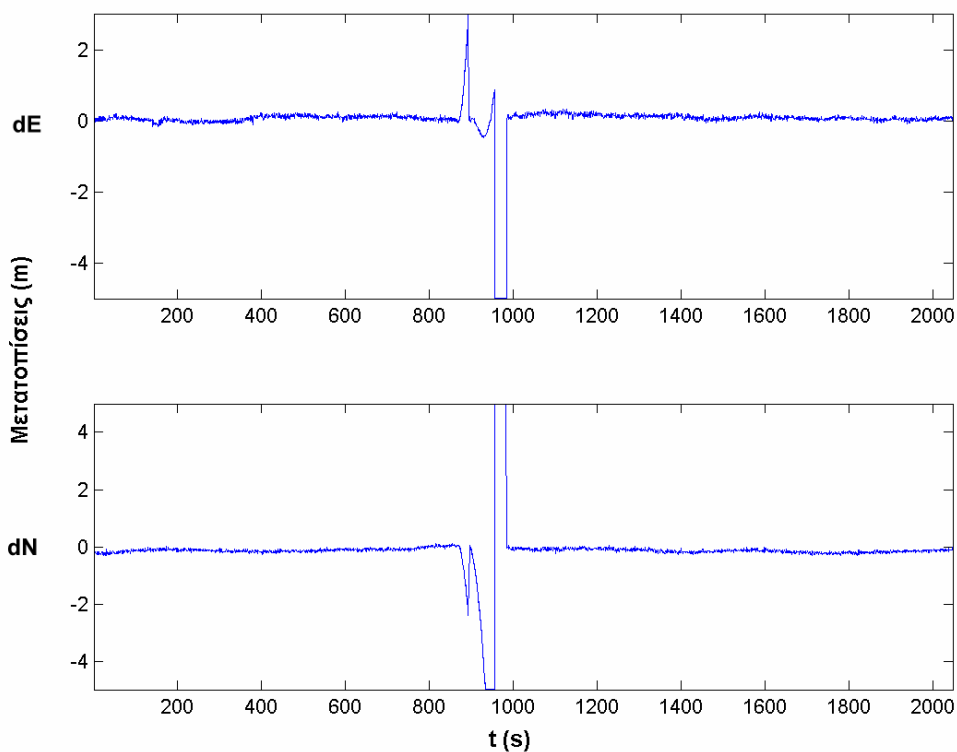


Σχήμα 5.3: Οι κεραίες GPS και τα ανεμόμετρα στην ταράτσα του RPB

5.4.2 Περιγραφή δεδομένων

Για τις ανάγκες τις παρούσας διατριβής χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές σειρές δεδομένων προκειμένου να υπάρχει σύγκριση των μεταξύ τους αποτελεσμάτων. Οι σειρές αυτές αποτελούν τμήματα σημάτων μεγάλης διάρκειας τα οποία δεν μπορούσαν να αξιοποιηθούν εξαιτίας των προβλημάτων που είχαν.

Στην πρώτη περίπτωση οι δέκτες GPS έχασαν την μεταξύ τους επικοινωνία με αποτέλεσμα να χρειαστεί να υπολογίσουν ξανά τον αριθμό των ακέραιων κύκλων στις μετρήσεις φάσης (Σχήμα 5.4). Στην περίπτωση αυτή το σήμα μοιράστηκε σε δύο τμήματα ενώ οι τεχνικές που περιγράφονται εφαρμόστηκαν και στα δυο από αυτά. Τα αποτελέσματα ήταν παρόμοια και για το λόγο αυτό στη διατριβή αυτή παρουσιάζεται η ανάλυση του ενός μόνο τμήματος.



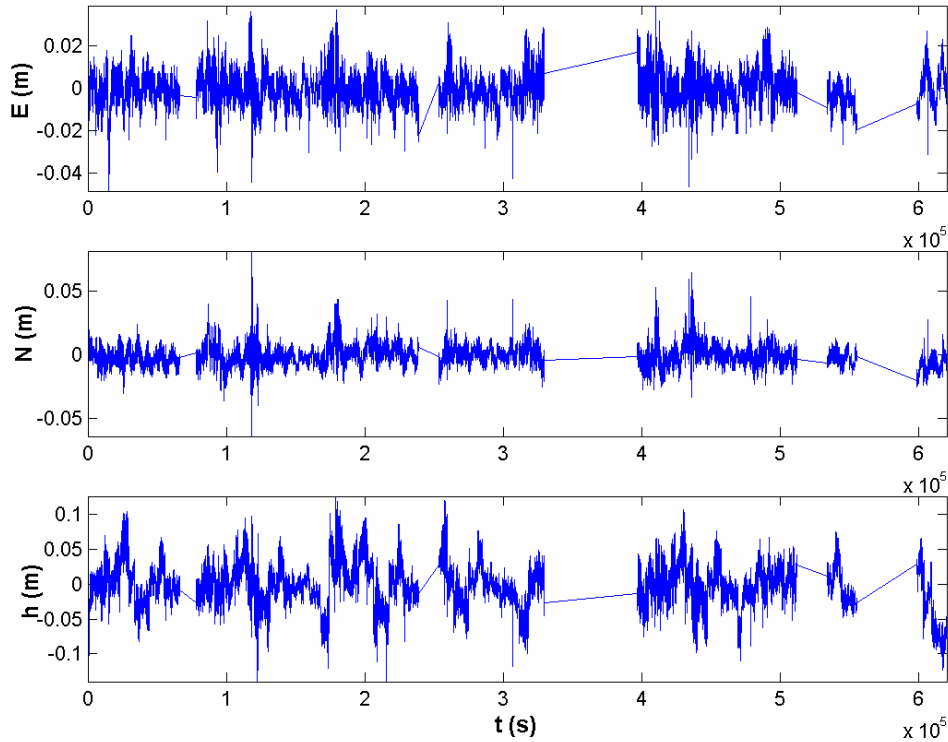
Σχήμα 5.4 : Η χρονοσειρά από την οποία προήλθε η πρώτη σειρά δεδομένων. Τα μεγάλα άλματα τα οποία εμφανίζονται οφείλονται σε απώλεια επικοινωνίας των δύο δεκτών. Εδώ παρουσιάζονται οι χρονοσειρές με τις συντεταγμένες οριζόντιας θέσης του ενός από τους δύο κινούμενους δέκτες.

Η δεύτερη σειρά δεδομένων προήλθε επίσης από σήμα μεγάλης διάρκειας το οποίο παρουσίαζε όμως κενά στην καταγραφή των παρατηρήσεων. Εκτός από τα κενά που εμφανώς παρατηρούνται στο Σχήμα 5.5 υπάρχουν και πάρα πολλά μικρότερα της τάξης των μερικών δευτερολέπτων. Από το σήμα αυτό εντοπίστηκε το μεγαλύτερο σε χρονική διάρκεια τμήμα στο οποίο η καταγραφή των παρατηρήσεων είναι σταθερή και αποτέλεσε την δεύτερη σειρά δεδομένων.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικότερα σε τι αφορούν οι σειρές που προέκυψαν από τα δύο αυτά αρχικά σήματα. Το πρώτο αφορά μετρήσεις οι οποίες έγιναν όταν το σύστημα βρισκόταν σε πλήρη ανάπτυξη. Πρόκειται για καταγραφές ταχύτητας ανέμου, επιτάχυνσης και μετατοπίσεων με συχνότητα δειγματοληψίας 8 Hz. Οι μετατοπίσεις που μετρήθηκαν με τους δύο δέκτες GPS αναφέρονται σε ένα τοπικό προβολικό σύστημα συντεταγμένων και αφορούν μόνο τη διακύμανση της οριζόντιας θέσης σε χιλιοστά χωρίς να περιλαμβάνεται η τρίτη διάσταση (υψόμετρο). Είναι δηλαδή της μορφής

$$\mathbf{V} = [\mathbf{E}_A(t) \quad \mathbf{N}_A(t) \quad \mathbf{E}_B(t) \quad \mathbf{N}_B(t)] \quad (5.7)$$

όπου τα $\mathbf{E}(t)$ και $\mathbf{N}(t)$ συμβολίζουν τα διανύσματα με τις οριζόντιες συντεταγμένες (Easting – Northing) και οι δείκτες A και B αντιστοιχούν στους δύο δέκτες. Έτσι λαμβάνονται συνολικά τέσσερις χρονοσειρές

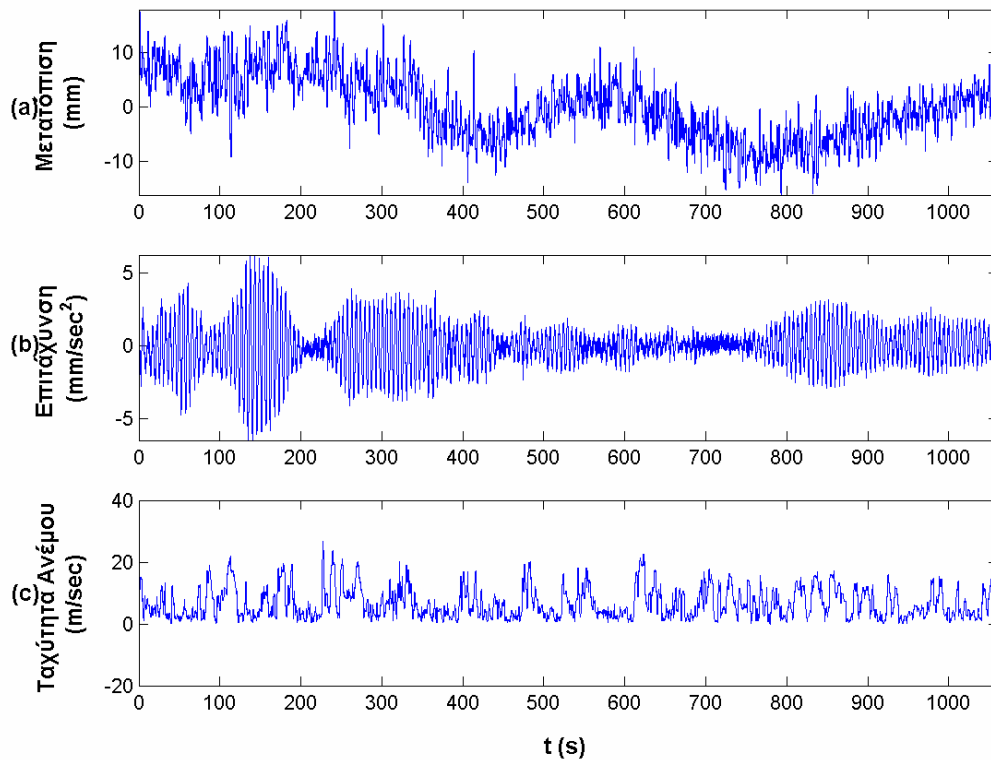


Σχήμα 5.5 : Το σήμα από το οποίο προήρθε η δεύτερη σειρά δεδομένων (Easting Northing Height).

Η επιτάχυνση \mathbf{a} μετρήθηκε από τα δύο επιταχυνσιόμετρα που βρίσκονται στο 65^ο όροφο του κτηρίου. Συνολικά, προέκυψαν δύο χρονοσειρές, με μονάδες τα mm/sec^2 και είναι της μορφής:

$$\mathbf{a} = [\mathbf{a}_1(t) \quad \mathbf{a}_2(t)] \quad (5.8)$$

Τέλος υπάρχει και μια χρονοσειρά που αφορά στη ταχύτητα του ανέμου εκφρασμένη σε m/s (Σχήμα 5.6). Τα δεδομένα αυτά έχουν συνολική διάρκεια 1060 seconds (17,6 minutes). Οι μέθοδοι ανάλυσης που περιγράφηκαν παραπάνω εφαρμόστηκαν και για της επτά συνολικά χρονοσειρές.

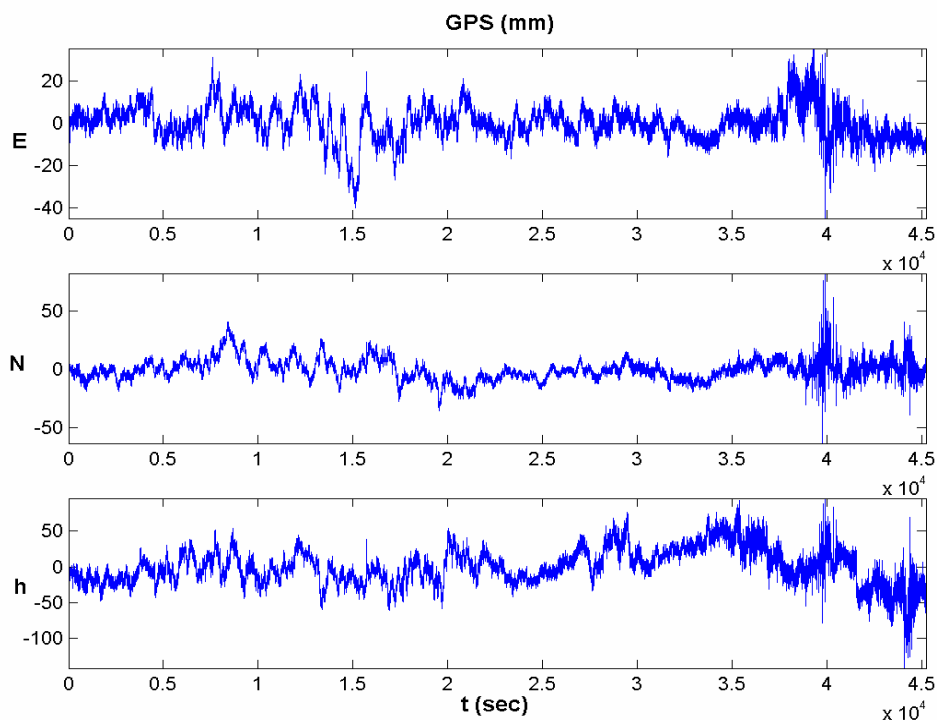


Σχήμα 5.6 : Οι χρονοσειρές για την πρώτη σειρά δεδομένων. Περιλαμβάνει μετατοπίσεις (a) επιταχύνσεις (b) και ταχύτητα ανέμου (c). Για λόγους απλότητας και οργάνωσης στο Σχήμα παρουσιάζεται μόνο μια χρονοσειρά μετατόπισης και επιτάχυνσης αντίστοιχα.

Εκτός από αυτές της σειρές των δεδομένων, για να είναι δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων, αναλύθηκαν και δεδομένα τα οποία αφορούσαν στο πειραματικό στάδιο εφαρμογής του συστήματος. Τα δεδομένα αυτό αφορούν μόνο της μετατοπίσεις. Οι συντεταγμένες και εδώ αναφέρονται σε τοπικό προβολικό σύστημα με τη διαφορά ότι αυτή τη φορά περιλαμβάνεται και το υψόμετρο h , είναι δηλαδή της μορφής

$$V = [E(t) \quad N(t) \quad h(t)] \quad (5.9)$$

Η συχνότητα δειγματοληψίας είναι μία μέτρηση κάθε δευτερόλεπτο (1 Hz) και η συνολική διάρκεια των παρατηρήσεων είναι 45221 seconds (12,56 hours) (Σχήμα 5.7). Στα δεδομένα αυτά εφαρμόστηκαν φασματική ανάλυση καθώς και ο αλγόριθμος DFA και για τις τρεις χρονοσειρές.



Σχήμα 5.7 : Οι χρονοσειρές του GPS για το δεύτερο σύνολο δεδομένων

5.5. Αποτελέσματα ανάλυσης

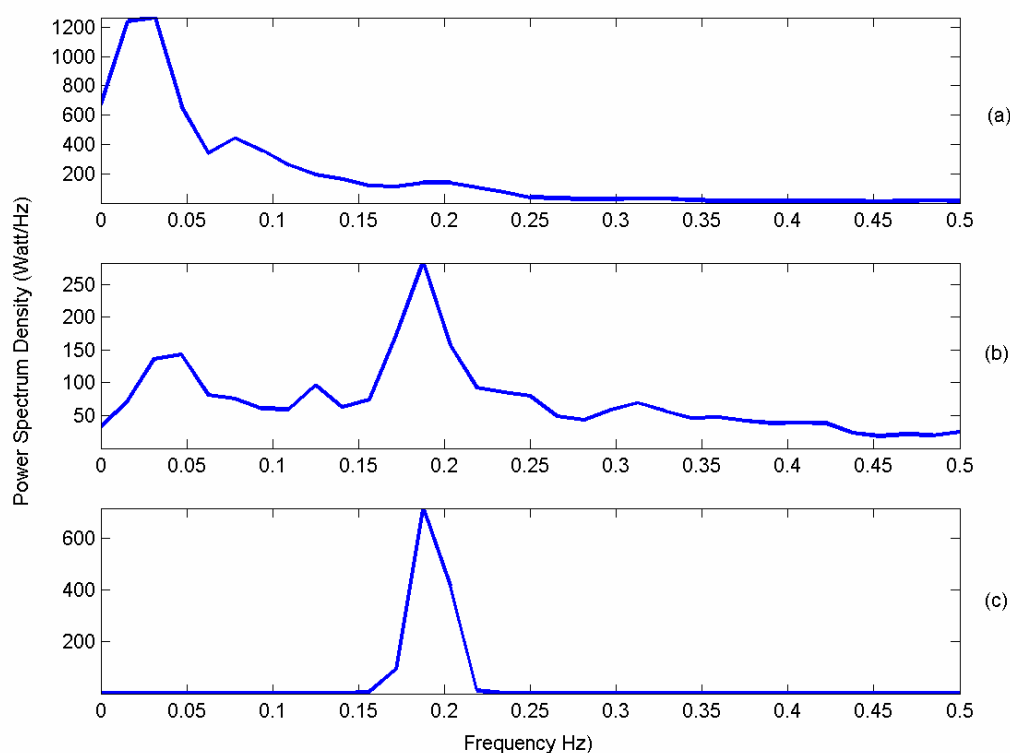
Με βάση τις μεθόδους που αναπτύχθηκαν παραπάνω έγινε η ανάλυση των δεδομένων από το κτήριο RPB. Για την πρώτη σειρά δεδομένων η οποία περιλαμβάνει μετατοπίσεις, επιταχύνσεις και ταχύτητα ανέμου (Σχήμα 5.6), αρχικά υπολογίστηκε η Συνάρτηση Φασματικής Πυκνότητας. Καθώς η συχνότητα δειγματοληψίας είναι 8 Hz, σύμφωνα με το «Θεώρημα Nyquist», η Συνάρτηση Φασματικής Πυκνότητας μπορεί να υπολογίζεται για συχνότητες μέχρι 4 Hz ($\frac{8\text{Hz}}{2}$). Παρόλα αυτά η μελέτη επικεντρώθηκε για συχνότητες μέχρι 0,5 Hz καθώς από τα πρώτα στάδια της ανάλυσης δεν παρατηρήθηκε δραστηριότητα για τιμές μεγαλύτερες από 0,5Hz. Για τον λόγο αυτό τα διαγράμματα μεγεθύνθηκαν έτσι ώστε να περιλαμβάνουν αυτό το εύρος συχνοτήτων.

Οι δύο εμφανείς κορυφές του φάσματος της επιτάχυνσης και των μετατοπίσεων στη συχνότητα των 0,19 Hz, καταδεικνύουν ότι υπάρχει δυναμική απόκριση του κτηρίου

(Σχήμα 4.8). Η συχνότητα αυτή αποτελεί την ιδιοσυχνότητα του κτηρίου και είναι ίδια με αυτή που υπολογίζεται από τη σχέση (2.3).

Η έντονη κορυφή που παρατηρείται στο φάσμα του ανέμου στα 0,025 Hz θεωρείται ως η βασική συχνότητα του ανέμου. Αυτό σημαίνει ότι η ταχύτητα του ανέμου μεταβάλλεται σε ένα εύρος συχνοτήτων με κεντρική τιμή τα 0,025Hz. Το γεγονός ότι η συχνότητα αυτή δεν συμπίπτει με τη συχνότητα απόκρισης του κτηρίου θεωρείται αποτέλεσμα του δομικού σχεδιασμού.

Ψηλά κτήρια όπως το RPB κατασκευάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε η ιδιοσυχνότητα τους σε καμία περίπτωση να μη συμπίπτει με συχνότητες σεισμικών κυμάτων ή ανέμων. Σε αντίθετη περίπτωση θα εμφανιζόταν το φαινόμενο του συντονισμού που οδηγεί σε μεγιστοποίηση του πλάτους της ταλάντωσης του κτηρίου. Το γεγονός αυτός θα είχε καταστροφικές συνέπειες για την κατάσταση της κατασκευής.



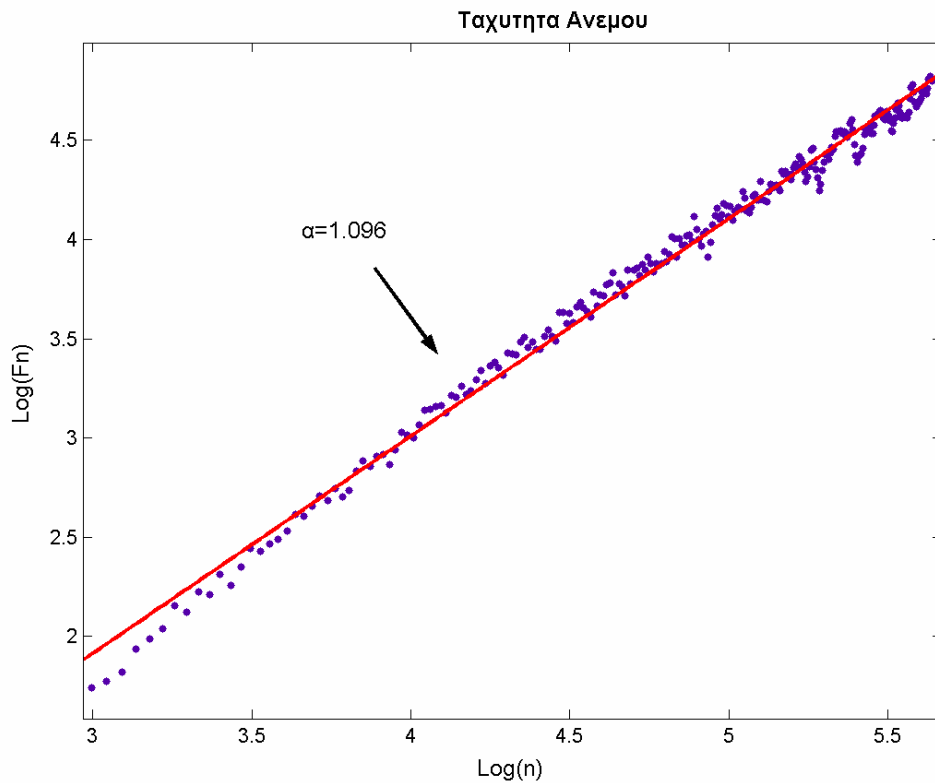
Σχήμα 5.8 : Η Φασματική Πυκνότητα για την ταχύτητα του ανέμου, την μετατόπιση και την επιτάχυνση. Διακρίνονται καθαρά οι δύο κορυφές του φάσματος στα 0.19 Hz περίπου, η οποία είναι και η θεμελιώδης ιδιοσυχνότητα του κτηρίου. Τα διαγράμματα έχουν μεγεθυνθεί έτσι ώστε να περιλαμβάνουν συχνότητες μέχρι τα 0,5 Hz.

Εκτός από την φασματική ανάλυση στα δεδομένα εφαρμόστηκε και ο αλγόριθμος DFA. Το σήμα μοιράστηκε σε παράθυρα ξεκινώντας από το μέγιστο διάστημα των $\ell = 530$ seconds και καταλήγοντας στο ελάχιστο με διάρκεια $\ell = 2.5$ seconds, δηλαδή από $530 \cdot 8 = 4240$ μέχρι 20 τιμές παρατήρησης αντιστοίχως.

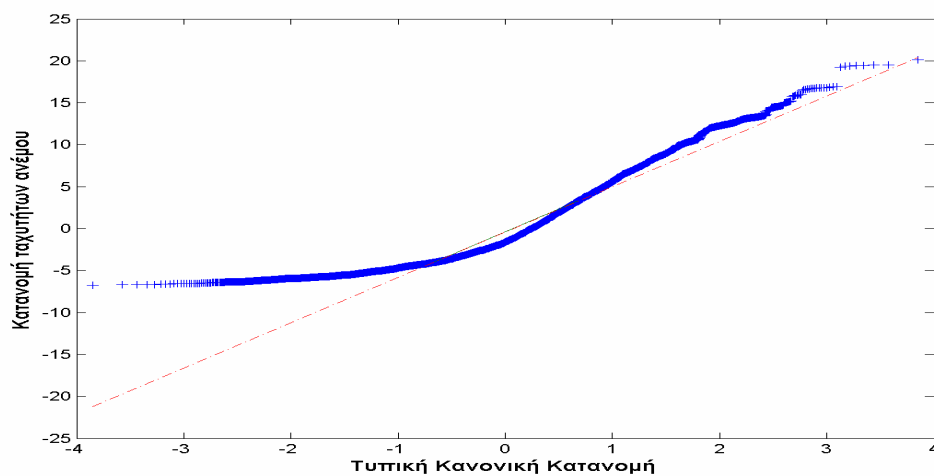
Οι χρονοσειρές της επιτάχυνσης $\mathbf{a}(t)$ δεν φανερώνουν να έχουν κάποια συσχέτιση η οποία να κλιμακώνεται χρονικά. Αντιθέτως οι διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου δείχνουν να έχουν μια σαφή δυναμονομική συσχέτιση (Σχήμα 5.9). Η κλίση της ευθείας ($\alpha=1,1$) που προέκυψε από τη γραμμική παλινδρόμηση παραπέμπει σε στατιστικές ιδιότητες του σήματος ανάλογες με αυτές της Κλασματικής Κίνησης Brown. Για να ισχύει κάτι τέτοιο θα πρέπει τα αρχικά δεδομένα να έχουν κατανομή που θα πλησιάζει πολύ την Κανονική.

Για τον λόγο αυτό έγινε έλεγχος κανονικότητας με τη χρήση διαγραμμάτων Q-Q (q-q plots). Για κάθε τιμή (απόσταση από το μέσο όρο) υπολογίζεται το πλήθος των τιμών που είναι μικρότερες ή ίσες με αυτή. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αντίστοιχα της Κανονικής Κατανομής (Σχήμα 5.10). Αν τα υπό εξέταση δεδομένα έχουν κατανομή που είναι πολύ κοντά στην κανονική το διάγραμμα Q-Q θα έχει τη μορφή ευθείας.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.10 αποδεικνύουν ότι οι διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου δεν έχουν τελικά συμπεριφορά Κλασματικής Κίνησης Brown λόγω της υψηλής συχνότητας εμφάνισης τιμών που απέχουν πολύ από τη μέση τιμή.



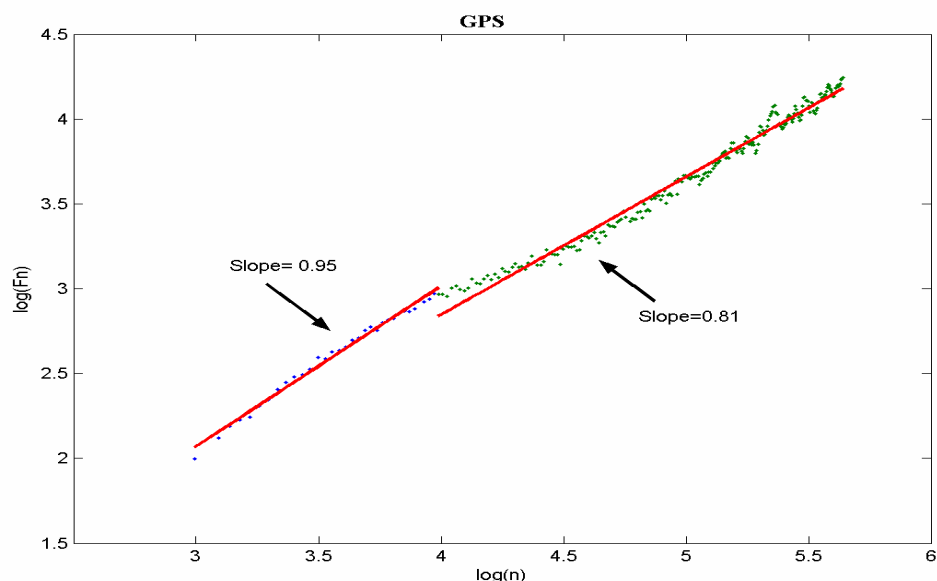
Σχήμα 5.9 : Ο αλγόριθμος DFA για τις διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου.



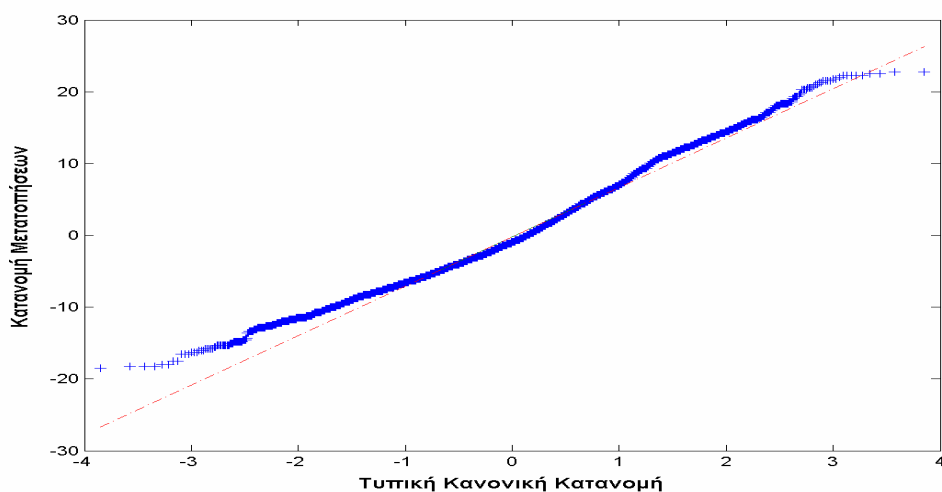
Σχήμα 5.10 : Σύγκριση της κατανομής των ταχυτήτων του ανέμου σε σχέση με την κανονική κατανομή.

Ο ίδιος αλγόριθμος εφαρμόστηκε και στις χρονοσειρές του GPS. Και σε αυτή την περίπτωση η προσαρμογή της βέλτιστης ευθείας δείχνει ότι τα δεδομένα έχουν δυναμονομική εξάρτηση μεταξύ τους. Η διαφορά στην περίπτωση αυτή είναι ότι η κλίση δείχνει να αλλάζει από 0,95 σε 0,81 για παράθυρα διαστάσεως μεγαλύτερη από 6,75 sec ή περίπου $\ell = 54$ τιμές αντίστοιχα (Σχήμα 5.11). Και σε αυτή την περίπτωση

ο έλεγχος που έγινε έδειξε ότι τα δεδομένα δεν ακολουθούν κανονική κατανομή και επομένως δεν μοιάζουν με θόρυβο κατά Gauss ή Κίνηση Brown (Σχήμα 5.12).

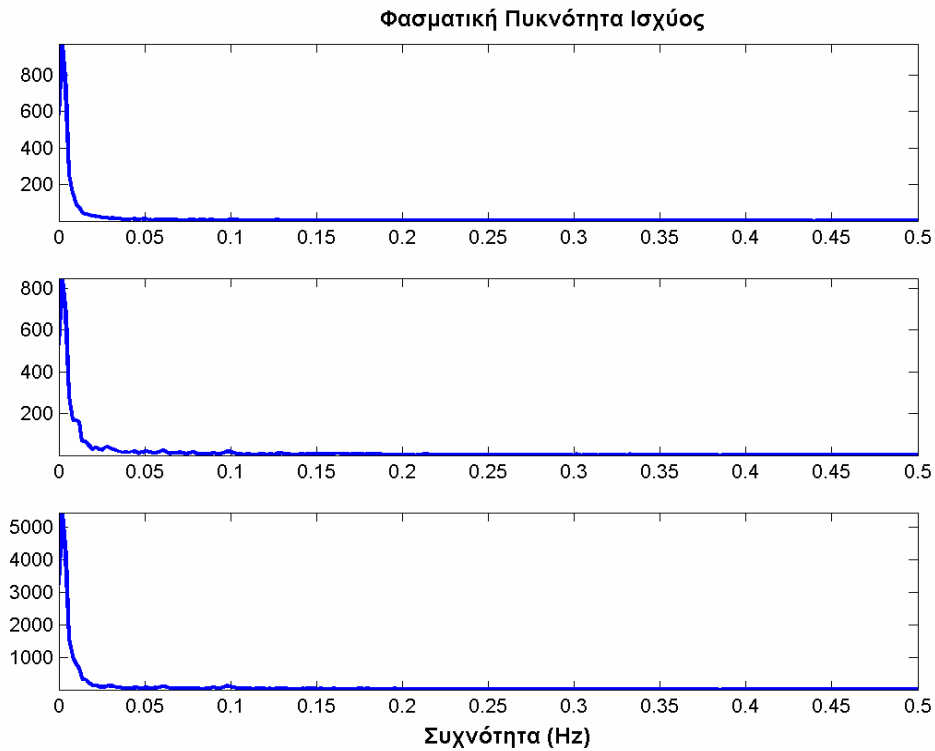


Σχήμα 5.11 : Ο αλγόριθμος DFA για τις διακυμάνσεις των μετατοπίσεων όπως αυτές μετρήθηκαν από τους δέκτες GPS

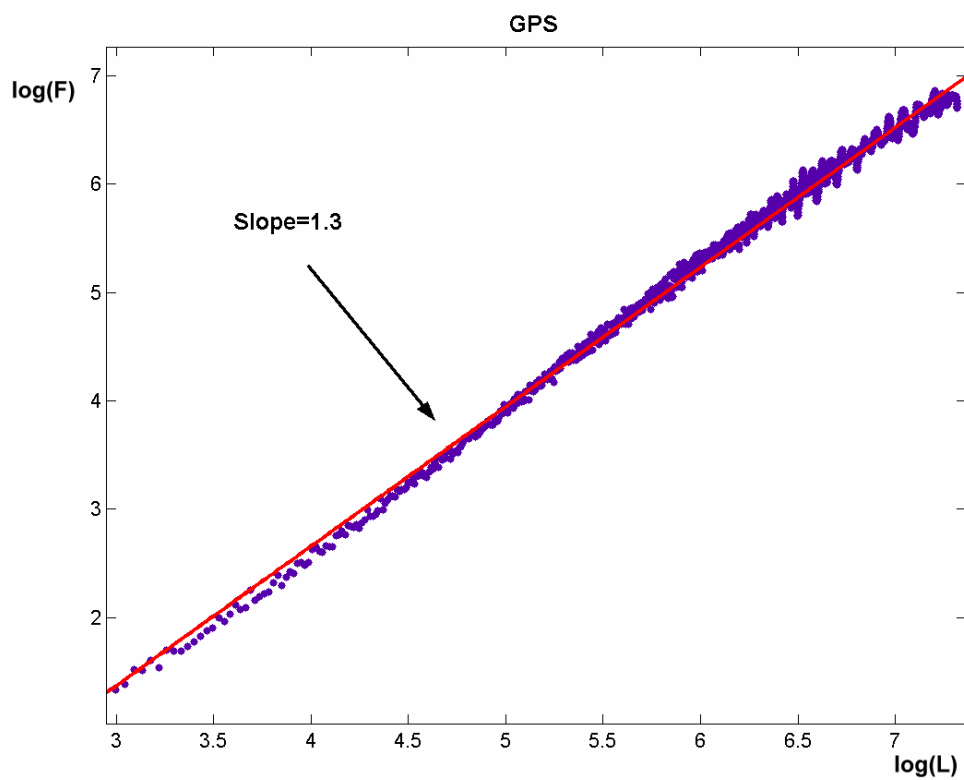


Σχήμα 5.12 : Η κατανομή των μετατοπίσεων σε σχέση με την κανονική κατανομή

Προκειμένου να γίνει ή σύγκριση των αποτελεσμάτων της πρώτης ανάλυσης έγινε επεξεργασία σε μια ακόμα σειρά δεδομένων GPS. Στα δεδομένα αυτά όπως έδειξε η φασματική ανάλυση δεν καταγράφεται συχνότητα απόκρισης κτηρίου (Σχήμα 5.13). Θεωρείται, λοιπόν, ότι πρόκειται ουσιαστικά για παρατηρήσεις θορύβου. Το πιο αξιόλογο αποτέλεσμα όμως προέκυψε από την ανάλυση των διακυμάνσεων όπου τα δεδομένα παρουσιάζουν μια σαφή συσχέτιση δυναμονομικού χαρακτήρα.



Σχήμα 5.13 : Η Φασματική Πυκνότητα για τις τρεις συνιστώσες του GPS (E, N, h, αντίστοιχα).



Σχήμα 5.14 : Τα αποτελέσματα του αλγόριθμου DFA για τις μετατοπίσεις GPS (Easting)

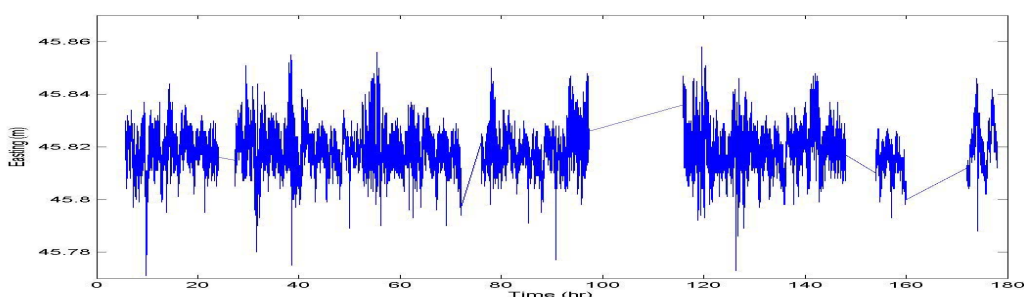
Κεφάλαιο 6

Αποτελέσματα – Προτάσεις

Μελετώντας τα αποτελέσματα της ανάλυσης των παρατηρήσεων που έγιναν στο Republic Piazza Building και με βάση την περιγραφή ενός Ολοκληρωμένου Συστήματος Παρακολούθησης Παραμορφώσεων που δόθηκε στα πρώτα κεφάλαια αυτής της διατριβής δίνονται παρακάτω κάποια συμπεράσματα τα οποία αβίαστα προκύπτουν.

Ξεκινώντας από την εγκατάσταση και την υλοποίηση του συστήματος, μεγάλη βαρύτητα πρέπει να δοθεί στα όργανα παρατήρησης που θα χρησιμοποιηθούν σε σχέση με τη συμβατότητα που θα έχουν με όλες τις περιφερειακές συσκευές (PC, data loggers, κ.τ.λ.). Οι μετρήσεις θα πρέπει να καταγράφονται σωστά και συγχρονισμένα χωρίς κενά. Σε κάθε άλλη περίπτωση τα δεδομένα δεν μπορούν να αξιοποιηθούν σε πραγματικό χρόνο και θα πρέπει να εφαρμοστούν άλλες τεχνικές για την εκτίμηση των δεδομένων που λείπουν.

Ιδιαίτερη σημασία πρέπει να δίνεται στη σταθερότητα της συχνότητας δειγματοληψίας και καταγραφής των παρατηρήσεων ούτως ώστε οι χρονοσειρές που προκύπτουν να μην έχουν ασυνέχειες (Σχήμα 6.1). Όλα τα όργανα θα πρέπει να εγκατασταθούν σωστά και να βαθμονομηθούν προσεκτικά πριν το σύστημα αρχίσει να λειτουργεί αποτελεσματικά.



Σχήμα 6.1 : Ασυνέχειες στις χρονοσειρές των δεδομένων λόγω διακοπής λειτουργίας του καταγραφικού συστήματος

Η επικοινωνία μεταξύ του σταθερού δέκτη GPS με τους «κινούμενους» δέκτες θα πρέπει να είναι απερίσπαστη. Ανεξάρτητα από το αν χρησιμοποιείται ασύρματο ή

καλωδιακό μέσο (UHF / ISDN), η αδιάλειπτη επικοινωνία «κρατάει» τους κινούμενους δέκτες σε υψηλή ακρίβεια. Σε αντίθετη περίπτωση, παρατηρούνται στις χρονοσειρές κορυφές της τάξεως του μέτρου οι οποίες εξαφανίζονται καθώς υπολογίζονται ξανά ο αριθμός των ακέραιων κύκλων στις παρατηρήσεις φάσεως.

Οι προβληματικές σειρές δεδομένων (άλματα, κενά, κτλ.) που αναφέρθηκαν παραπάνω θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν με μια κατάλληλη προεπεξεργασία. Στην περίπτωση των μεγάλων αλμάτων, για παράδειγμα, θα μπορούσαν να αφαιρεθούν οι τιμές που απέχουν από τον μέσο όρο περισσότερο από τέσσερις τυπικές αποκλίσεις (πχ., 4σ) και τις θέσεις τους να πάρουν οι αμέσως επόμενες στη χρονοσειρά τιμές. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι το σήμα που προκύπτει να διατηρεί τις ίδιες στατιστικές ιδιότητες με το αρχικό.

Τα επιταχυνσιόμετρα μπορούν να εντοπίζουν με επιτυχία την απόκριση μίας κατασκευής σε συνθήκες εξωτερικής φόρτισης με βάση το διάνυσμα της επιτάχυνσης. Η απλή σχετικά μεθοδολογία που αναπτύχθηκε σε προηγούμενο Κεφάλαιο μπορεί να μας δώσει σαφή εικόνα για την ύπαρξη «ισχυρών» συχνοτήτων στις παρατηρήσεις της επιτάχυνσης. Καταλήγοντας, η Φασματική Πυκνότητα της επιτάχυνσης θα πρέπει να είναι ένα από τα «υπό παρακολούθηση» μεγέθη σε περίπτωση που το σύστημα θα πρέπει να κάνει ανάλυση σε πραγματικό χρόνο.

Όπως έχει αναφερθεί κατά την ανάπτυξη της παρούσας διατριβής, το διάνυσμα της επιτάχυνσης είναι ουσιαστικά η μοναδική πληροφορία που μπορούν να μας δώσουν τα επιταχυνσιόμετρα. Εκτός από τις συχνότητες απόκρισης της κατασκευής μεγάλο ενδιαφέρον όμως παρουσιάζει και το απόλυτο πλάτος της παραμόρφωσης.

Την εικόνα για το εύρος της κίνησης αναλαμβάνει σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα να τη δώσει το GPS. Με βάση την εμπειρία που αποκτήθηκε από τα δεδομένα του RPB αυτό δεν ήταν εφικτό. Παρά το ότι και στις χρονοσειρές των μετατοπίσεων παρατηρήθηκε η συχνότητα απόκρισης του κτηρίου, το πλάτος της κίνησης φαίνεται να παραμένει «θαμμένο» από το θόρυβο των παρατηρήσεων. Το γεγονός όμως ότι εντοπίστηκαν δυναμικομικού τύπου συσχετίσεις στα σήματα των μετατοπίσεων τόσο κατά τη διάρκεια εξέλιξης δυναμικών φαινομένων στο κτήριο, όσο και κατά τη διάρκεια περιόδου «ησυχίας» θεωρείται σημαντική διαπίστωση.

Αναφορικά με τη σημασία που μπορούν να έχουν οι μακράς χρονικής εμβέλειας συσχετίσεις που παρατηρήθηκαν, δεν υπάρχει ακόμα μια σαφή απάντηση. Γίνεται η υπόθεση ότι δεν αφορά τις πολυκλαδικές ανακλάσεις, με την παραδοχή ότι αυτές έχουν απαλειφθεί από το αρχικό σήμα κατά τη φάση της απαλοιφής των συστηματικών τάσεων, εξ αιτίας της μεγάλης σχετικής περιόδου που έχει το φαινόμενο. Η διαπίστωση αυτή δίνει το έναυσμα για περαιτέρω έρευνα προκειμένου να εξακριβωθεί αν αυτού του τύπου οι συσχετίσεις αφορούν μόνο τη συγκεκριμένη εφαρμογή ή αν πρόκειται για μια ιδιότητα που αφορά γενικά την παρατήρηση μετατοπίσεων με τη χρήση του RTK-GPS.

Η απαλοιφή των πολυκλαδικών ανακλάσεων από τις χρονοσειρές είναι ένα θέμα που θα πρέπει να προσεγγιστεί εκ νέου προκειμένου να καταλήξει κανείς σε ασφαλέστερα συμπεράσματα σχετικά με τις συσχετίσεις μακράς εμβέλειας. Ενδεχομένως η απαλοιφή να πρέπει να γίνει στο πρωτογενές σήμα πριν αυτό εισέλθει στον αλγόριθμο ανάλυσης διακυμάνσεων. Αυτό θα μπορούσε να γίνει τεμαχίζοντας το αρχικό σήμα σε παράθυρα με μήκος μικρότερο από το 0,1 της ενδεικτικής τιμής που έχει δοθεί ως περίοδο του φαινομένου των πολυκλαδικών ανακλάσεων. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, για τόσο μικρά χρονικά διαστήματα, το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται στο σήμα σαν μια γραμμική συστηματική τάση. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά που παρουσιάζονται στην παρούσα διατριβή θα είχε μεγάλο ενδιαφέρον

Ανεξάρτητα από τα αποτελέσματα της επεξεργασίας που έγινε, το αντικείμενο της παρακολούθησης παραμορφώσεων με GPS, και επιταχυνσιόμετρα παραμένει ανοικτό. Πρόκειται για μια από τις πιο σύγχρονες εφαρμογές και η διεθνής επιστημονική κοινότητα βρίσκεται ακόμα στο στάδιο της έρευνας για την εφαρμογή κατάλληλων τεχνικών που θα αξιοποιούν τις δυνατότητες που παρέχει το Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού. Μέσα στο πλαίσιο αυτό κινήθηκε και η εκπόνηση της παρούσας διατριβής.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

Αβραμίδης Ι (1995). *Πανεπιστημιακές Σημειώσεις για το μάθημα Στατική ΙΙΙ*, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.

Δερμάνης Α., (1999): “Διαστημική Γεωδαισία και Γεωδυναμική”. Εκδόσεις Ζήτη. Θεσσαλονίκη

Χριστόπουλος Δ (2003). «*Ανάλυση Δεδομένων*» Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης

American National Standards Institute, (1982). *American National Standard Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, American Society of Civil Engineers, New York.

Behr A., Hudnut K., King N., (1999). *Monitoring Structural Deformation at Pacoima Dam, California Using Continuous GPS*, Seismology Research Letters Vol. 69, No. 4, pp. 299-308.

Brownjohn, J. M.W., Pan, T. C. and Deng, X. Y., (2000). *Correlating dynamic characteristics from field measurements and numerical analysis of a high-rise building*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics 29 No.4, pp 523-543.

Celebi, M., Prescott W, Stein R., Hudnut K., Behr J. and Wilson S. (1998). *Structural monitoring using GPS*, 11th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the U.S. Inst. of Navigation, Nashville, Tennessee, 15-18 September, 929-935.

Ge, L., Han, S., and Rizos, C., (1999). *GPS-RTK applications for assisting the engineering design of large structures*, Measurement for a Sustainable Future, Metrology Society of Australia, Sydney, Australia, 22-24 September, pp 287-291.

Han S. & Rizos C., (1997). *Multipath effects on GPS in mine environments*, Proc Xth International Congress on the International Society for Mine Surveying, Fremantle, Australia 2-6 November, pp 447-457.

International Conference of Building (1991). *Officials Uniform Building Code*, 5360 South Workman Mill Road Whittier, CA 90601

Kai-yuen W., King-leung M. and Wai-yee C. (2001). *Monitoring Hong Kong's Bridges, Real-Time Kinematic Spans the Gap*. GPS World, 12(7), pp10 – 18.

Kijewski, T. and Kareem, A., (1998). *Dynamic Wind Effects: A Comparative Study of Provisions in Codes and Standards with Wind Tunnel Data*. Wind & Structures, Vol. 1, No. 1, pp. 77-109.

Laursen H, (1988). *Structural Analysis*. McGrawth-Hill International Editions, New York.

Macabiau C., Ries L., Issler J.L., (2003). *GPS L5 Receiver Implementation* www.recherche.enac.fr/ltst/papers/ion_gps_03_L5rec.pdf

McConnell K., (1995). *Vibration Testing Theory and Practice*, Wiley Interscience Publication, New York

Ogaja, C. (2001). *On-line GPS integrity monitoring and deformation analysis for structural monitoring applications*, Pres. 14th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the U.S. Inst. of Navigation, Salt Lake City, Utah, 11-14 September pp 989-999.

Ogaja C. (2002) *A Framework in Support of Structural Monitoring by Real Time Kinematic GPS and Multi-Sensor Data*. Ph.D Thesis. School of Surveying and Spatial Information Systems, The University of New South Wales, pp 53-59.

Peng, C.-K., Havlin, S., Stanley, H.E., Goldberger A.L (1995). *Quantification of scaling exponents and crossover phenomena in nonstationary heartbeat time series*, CHAOS, Vol. 5, No. 1, pp 82-87.

Peng C., Buldyrev S. V., Halvin S., Simons M., Stanley H.E., Goldberger A.L. (1994). *Mosaic organization of DNA nucleotides*. Physical Review E, Vol. 49, No 2, pp. 1685 – 1689.

Press W. H., Flannery B. P., Teukolsky S. A. and Vetterling W. T. (1992). *Numerical Recipes in Fortran: The Art of Scientific Computing*. Second Edition, Cambridge University Press, Cambridge.

Qui W. (1993). *An Analysis of Some Critical Error Sources in Static GPS Surveying*, UCVE Report Number 20054, The University of Calgary, pp 102.