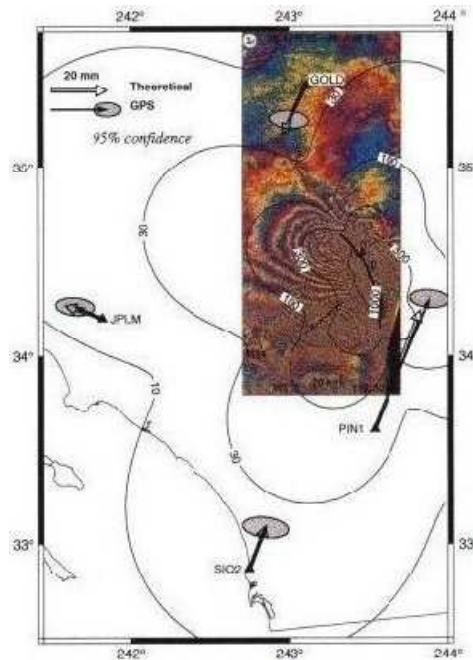




Διπλωματική Εργασία



**Εγκατάσταση δικτύου ελέγχου μετακινήσεων με
δορυφορικές μεθόδους**

**Εφαρμογή στον οικισμό Τριπόταμο των ορυχείων
Μεγαλόπολης**

ΚΑΨΑΣΚΗΣ ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Τσακίρη Μαρία

ΑΘΗΝΑ 2012

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	V
ABSTRACT	VI
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	VII
Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή	
1.1. Γενικά.....	1
1.2. Σκοπός.....	1
1.3. Δομή	2
Κεφάλαιο 2 - Το σύστημα GPS	
2.1. Γενικά.....	3
2.2. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα GPS	3
2.3. Λειτουργία	4
2.3.1. Μέθοδοι μετρήσεων	6
2.3.2. Σχετικός προσδιορισμός θέσης.....	7
2.4. Τεχνικές μετρήσεων	7
2.4.1. Σχετικός στατικός προσδιορισμός (static positioning).....	7
2.4.2. Σχετικός κινηματικός προσδιορισμός (kinematic positioning)	9
2.4.3. Γρήγορος στατικός προσδιορισμός (rapid static).....	10
2.5. Σφάλματα στο GPS.....	11
2.5.1. Το σφάλμα της τροχιάς των δορυφόρων.....	12
2.5.2. Σφάλμα του ρολογιού του δορυφόρου.....	12
2.5.3. Το σφάλμα του ρολογιού του δέκτη.....	12
2.5.4. Οι μεταβολές του κέντρου φάσης της κεραίας	13
2.5.5. Το σφάλμα αβεβαιότητας του γνωστού σημείου.....	13
2.5.6. Τα ατμοσφαιρικά σφάλματα	14
2.5.7. Το σφάλμα πολυανάκλασης.....	14
2.6. Παρεχόμενες ακρίβειες στο GPS.....	15
2.7. Άλλα συστήματα εντοπισμού θέσεως.....	16
2.7.1. Το Ρωσικό σύστημα GLONASS	16
2.7.2. Το ευρωπαϊκό σύστημα GALILEO	17
2.7.3. Το ελληνικό σύστημα HEPOS	18
2.8. Μικρομετακινήσεις και παραμορφώσεις τεχνικών έργων.....	19
2.8.1. Παραμορφώσεις τεχνικών έργων	20
2.8.2. Επίδραση των αργιλικών εδαφών στις μετακινήσεις.....	21

2.8.3.	Μετακινήσεις τεχνικών έργων σε περιοχές ορυχείων	23
2.9.	Μόνιμα δίκτυα σταθμών GPS.....	26
2.9.1.	Δίκτυο μόνιμων σταθμών GPS του φράγματος Pacoima.....	27
2.9.2.	Λειτουργία του συστήματος	30
2.10.	Δυναμική παρακολούθηση τεχνικών έργων	32
2.10.1.	Παρακολούθηση της Γέφυρας Forth Road, με Χρήση του GPS	32
2.10.2.	Παρακολούθηση παραμορφώσεων στη γέφυρα Rio Pelotas στη Βραζιλία, με χρήση Ρομποτικού Γεωδαιτικού Σταθμού (RTS).....	35
Κεφάλαιο 3 - Εργασίες Πεδίου		
3.1.	Περιοχή μελέτης.....	37
3.2.	Διαδικασία μετρήσεων.....	39
3.3.	Όργανα που χρησιμοποιήθηκαν.....	43
3.3.1.	Δέκτες Promark2 της Ashtech	43
3.3.2.	Δέκτες Trimble 5800.....	45
3.4.	Χρονοδιάγραμμα εργασιών	47
Κεφάλαιο 4 - Επεξεργασία των μετρήσεων		
4.1.	Αποθήκευση των δεδομένων και επίλυση των βάσεων.....	49
4.2.	Κλείσιμο βρόγχων	51
4.3.	Επίλυση δικτύου με το Trimble Geomatics Office (T.G.O.).....	52
4.4.	Επίλυση δικτύου με το GNSS Solutions	54
Κεφάλαιο 5 - Συμπεράσματα και προτάσεις		
5.1.	Συμπεράσματα.....	62
5.2.	Προτάσεις	63
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		65

Περιεχόμενα εικόνων

Εικόνα 2.1 Το σύστημα του GPS α) διαστημικό τμήμα, β) επίγειο και χρήστης.....	4
Εικόνα 2.2 Οι κινήσεις των δορυφόρων πέριξ της γης.....	5
Εικόνα 2.3 Στατικός προσδιορισμός θέσης φωτοσταθερού σημείου.....	9
Εικόνα 2.4 Κινηματικός προσδιορισμός θέσης σημείων.....	10
Εικόνα 2.5 Επίδραση της ατμόσφαιρας στο σήμα του GPS.....	14
Εικόνα 2.6 Το δίκτυο των 98 σταθμών αναφοράς του HEPOS.....	19
Εικόνα 2.7 Μετακίνηση πρηνούς αργιλώδους εδάφους προς το οδικό δίκτυο.....	22
Εικόνα 2.8 Εξόρυξη άλατος (τομή).....	23
Εικόνα 2.9 Χρωματική διαβάθμιση της καθίζησης από την εικόνα του IKONOS.....	24
Εικόνα 2.10 Γραφική αναπαράσταση του δικτύου που δημιουργήθηκε.....	25
Εικόνα 2.11 Τα σημεία του δικτύου που ιδρύθηκε και οι καθιζήσεις πέριξ αυτών.....	26
Εικόνα 2.12 Οι θέσεις των δύο δεκτών GPS στην κορυφή του φράγματος.....	28
Εικόνα 2.13 Η κεραία του δέκτη GPS στο εσωτερικό του χαλύβδινου πυλώνα.....	28
Εικόνα 2.14 Η θέση του σταθερού σημείου σε σύγκριση με τους δέκτες του φράγματος.....	29
Εικόνα 2.15 Το σύνολο των έξι σταθμών επεξεργασίας δεδομένων.....	30
Εικόνα 2.16 Θέσεις των επτά δεκτών GPS που τοποθετήθηκαν πάνω στη γέφυρα.....	32
Εικόνα 2.17 Οι δύο δέκτες Leica που χρησιμοποιήθηκαν ως σταθμοί αναφοράς.....	32
Εικόνα 2.18 Δέκτης τοποθετημένος επί της γέφυρας.....	33
Εικόνα 2.19 Βασική συχνότητα στη διέλευση του φορτηγού 100t.....	34
Εικόνα 2.20 Υψομετρικές μεταβολές στην κίνηση των δύο φορτηγών 40t.....	34
Εικόνα 2.21 Η γέφυρα Rio Pelotas.....	36
Εικόνα 3.1 Απόσπασμα περιοχής μελέτης.....	37
Εικόνα 3.2 Θέση σταθερού σημείου RA και τα υπόλοιπα σημεία του δικτύου.....	38
Εικόνα 3.3 Πράσινο χρώμα τα σημεία που μετρήθηκαν και με GPS ενώ με κόκκινο τα σημεία που μετρήθηκαν μόνο για το χωροσταθμικό δίκτυο.....	39
Εικόνα 3.4 Μέτρηση με τον δέκτη Promark 2 στο σημείο RA.....	40
Εικόνα 3.5 Συλλογή δορυφορικών δεδομένων από τον δέκτη Trimble 5800.....	41
Εικόνα 3.6 Σημείο του δικτύου επί βάθρου.....	42
Εικόνα 3.7 Σημείο του δικτύου επί τσιμέντου μέτρηση με τρίποδα.....	43
Εικόνα 3.8 Δέκτης GPS Promark 2 της Ashtech.....	44
Εικόνα 3.9 Δέκτης GPS Trimble 5800.....	45
Εικόνα 3.10 Η συσκευή της Trimble με παρελκόμενα.....	46
Εικόνα 3.11 Ο τρίποδας στερέωσης.....	46
Εικόνα 3.12 Κατά την προετοιμασία του δέκτη για τη λήψη μετρήσεων.....	47
Εικόνα 4.1 Οι στάσεις του δικτύου.....	51
Εικόνα 4.2 Ένδειξη διακύμανσης σήματος ως προς το χρόνο.....	53
Εικόνα 4.3 Εισαγωγή συστήματος συντεταγμένων.....	54
Εικόνα 4.4 Εισαγωγή ορίων σφαλμάτων.....	55
Εικόνα 4.5 Μεταφόρτωση των αρχείων Rinex στο λογισμικό.....	55
Εικόνα 4.6 Επίλυση των βάσεων του δικτύου.....	56
Εικόνα 4.7 Επίλυση του δικτύου με τα σημεία.....	56
Εικόνα 4.8 Εμφάνιση αποτελεσμάτων στο GNSS Solutions.....	57
Εικόνα 4.9 Οι στάσεις του κυρίως δικτύου συμβολίζονται με πράσινο χρώμα.....	60

Περιεχόμενα πινάκων

Πίνακας 3.1 Συντεταγμένες σταθερού σημείου RA	40
Πίνακας 3.2 Παρεχόμενες ακρίβειες Promark 2	44
Πίνακας 3.3 Παρεχόμενες ακρίβειες Trimble 5800.....	45
Πίνακας 4.1 Μήκη βάσεων επίλυσης.....	51
Πίνακας 4.2 Συντεταγμένες των σημείων από το δέκτη Trimble σε ΕΓΣΑ'87 και το υψόμετρο στο EGM'96.	54
Πίνακας 4.3 Συντεταγμένες των σημείων από το δέκτη Trimble σε ΕΓΣΑ'87 και το υψόμετρο στο EGM'96, επίλυση με το GNSS Solutions	57
Πίνακας 4.4 Συντεταγμένες των σημείων από το δέκτη Ashtech σε ΕΓΣΑ'87 και το υψόμετρο στο EGM'96, επίλυση με το GNSS Solutions	58
Πίνακας 4.5 Συντεταγμένες των σημείων με το δέκτη Trimble στο ελλειψοειδές WGS84, επίλυση με το GNSS Solutions	58
Πίνακας 4.6 Συντεταγμένες των σημείων με το δέκτη Promark2 στο ελλειψοειδές WGS84, επίλυση με το GNSS Solutions	59
Πίνακας 4.7 Οριζοντιογραφικές διαφορές στάσεων μεταξύ 1 ^{ου} και 2 ^{ου} κύκλου μετρήσεων	60
Πίνακας 4.8 Υψομετρικές διαφορές στάσεων μεταξύ 1 ^{ου} και 2 ^{ου} κύκλου μετρήσεων	61

Περιεχόμενα γραφημάτων

Γράφημα 3.1 Κατανομή εργασιών	48
Γράφημα 3.2 Κατανομή εργασιών πεδίου.....	48

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία που αφορά το δίκτυο GPS για την παρακολούθηση των μικρομετακινήσεων στην περιοχή Τριπόταμο Αρκαδίας, παρουσιάζεται ολοκληρωμένη ανάλυση σχετικά με την ίδρυση, τη μέτρηση των βάσεων μεταξύ των κορυφών του δικτύου, τη συνόρθωση των παρατηρήσεων και την επίλυση του δικτύου. Μετακινήσεις επιφανειακών μαζών εκδηλώνονται συνήθως σε εδάφη με «ύποπτο» γεωλογικό υπόβαθρο ή ακόμη ύστερα από ανθρωπογενή παρέμβαση όπως με την λειτουργία ορυχείων. Τέτοιες μετακινήσεις μπορούν να ανιχνευθούν και να προσδιοριστούν με χρήση δορυφορικών μεθόδων όπως οι μετρήσεις GPS. Το σύστημα GPS είναι ένα σύγχρονο και αξιόπιστο σύστημα προσδιορισμού θέσης με ακρίβεια, ανάλογη των μεθόδων που χρησιμοποιούνται, που φτάνει τα λίγα χιλιοστά. Για το λόγο αυτό αποτελεί αξιόπιστη μέθοδο παρακολούθησης τεχνικών έργων για μετακινήσεις. Ενδιαφέρουσες περιπτώσεις, οι οποίες και παρουσιάζονται στην εργασία, αποτελούν η δυναμική μέθοδος παρακολούθησης ενός μεγάλου τεχνικού έργου όπως μία γέφυρα και τα μόνιμα δίκτυα εγκατάστασης σταθμών GPS για την παρακολούθηση μετακινήσεων σε φράγματα. Η περιοχή που εξετάζεται εκτενώς στο θέμα της εργασίας παρουσιάζει αρκετές ιδιομορφίες λόγω της ιδιότητας του εδάφους και της ύπαρξης ορυχείων πλησίον της περιοχής μελέτης. Σκόπιμη ήταν η δημιουργία ενός μόνιμου δικτύου σταθερών στάσεων και η μέτρηση αυτού για την παρακολούθηση μετακινήσεων. Με τη χρήση δύο ειδών δεκτών, μονόσυχνων Promark2 και διπλόσυχνων Trimble 5800, διεξάγονται μετρήσεις και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μέσα από την ανάλυση και παρουσίαση δύο λογισμικών σχετικών με την επίλυση τέτοιων δικτύων το Trimble Geomatics Office και το GNSS Solutions. Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων δεν εξάγονται συμπεράσματα για μετακινήσεις, καθώς οι διαφορές εμφανίζονται στα πλαίσια κατασκευαστικής ακρίβειας των οργάνων, αλλά διακρίνονται σαφή συμπεράσματα για τη μέθοδο ίδρυσης ενός τέτοιου δικτύου GPS.

ABSTRACT

In this essay is presented the analysis for the establishment, the measurement of its elements and the adjustment of the GPS control network established in the area of Tripotamo Arkadias in case of monitoring micro-subsidences. Ground subsidences are usually detected above grounds with “suspect” geological background or after human activities like mine operations. Modern space-geodesy methodologies such as GPS are used in order to estimate the magnitude of the phenomenon is observed. The GPS system is a modern and reliable positioning system with accuracy value of a few millimeters, depended the using method. For this reason is a reliable method for monitoring deformation of human structures. In this work are presented interested cases such as the dynamic method of monitoring a large technical work as a bridge and the setup of a network of permanent GPS stations to monitor movements in dams. The area on the issue of the work presents several peculiarities because the status of the territory and the existence of coal mines nearby. The creation of a permanent network of fixed attitudes and its measurement for deformation monitoring was deliberate. By using two types of receivers a single frequency Promark2 and a dual frequency Trimble 5800, the measurements carried out and the results presented through the analysis and presentation of two software, Trimble Geomatics Office and GNSS Solutions, related to process such networks. The measurements can't conclude a result about movements, since the differences appeared in the construction of precision instruments, but they are inconclusive for the method of establishing such a network of GPS.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Μέσα από τις λίγες αυτές γραμμές θα ήθελα να ευχαριστήσω αρχικά την επιβλέπουσα καθηγήτρια κ. Τσακίρη Μαρία για την ανάθεση της παρούσης διπλωματικής εργασίας σχετικά με ένα θέμα εξελισσόμενο, το οποίο βρίσκει αρκετές εφαρμογές στην επαγγελματική πορεία του τοπογράφου μηχανικού καθώς και για το χρόνο που παρείχε για την βελτιστοποίηση του θέματος.

Επίσης ευχαριστώ τον κ. Ζαχαριάδη Χάρη, Αγρ. Τοπογράφο μηχανικό της Δ.Ε.Η. Μεγαλόπολης για την πολύτιμη βοήθεια που παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων και εργασιών πεδίου, την μετάδοση γνώσεων και εμπειριών σχετικά με το θέμα της εργασίας.

Ιδιαίτερα ευχαριστώ τον φίλο και συνάδελφο Σωτηρόπουλο Βασίλη για την άψογη και ευχάριστη συνεργασία που είχαμε για την περάτωση της διπλωματικής και την οικογένειά του για την ζεστή φιλοξενία που μου παρείχαν στην περιοχή. Επίσης τον φίλο και συνάδελφο Μπουρεξή Φώτη για την αμέριστη συμπαράσταση και βοήθειά του κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.

Τις ευχαριστίες μου θα ήθελα να εκφράσω στο εργαστήριο γεωδαισίας και συγκεκριμένα στους κ. Πηγιώτη Γιώργο, Πανταζή Γιώργο και Λάμπρου Ευαγγελία για την πολύτιμη βοήθειά τους σχετικά με τη μέθοδο και τα όργανα μετρήσεων.

Ευχαριστώ τον κ. Αθανασόπουλο Βασίλειο, Αγρ. Τοπογράφο μηχανικό Ε.Μ.Π. για την παροχή υλικοτεχνικού εξοπλισμού του επαγγελματικού του γραφείου.

Τέλος ευχαριστώ τους γονείς μου για όλα όσα μου έχουν προσφέρει μέχρι τώρα.

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1. Γενικά

Η μελέτη των μετακινήσεων της επιφάνειας του εδάφους δίνει τη δυνατότητα παρακολούθησης της κινηματικής συμπεριφοράς περιοχών και των τεχνικών έργων που έχουν κατασκευαστεί σε αυτές με αποτέλεσμα την πρόληψη δυσμενών καταστάσεων και την έγκαιρη αντιμετώπιση σοβαρών αστοχιών που θα επιφέρουν κοινωνικό και οικονομικό κόστος. Τα αποτελέσματα της διαχρονικής παρακολούθησης μπορούν να συσχετιστούν με θεωρητικά μοντέλα για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικών με την απόκριση της περιοχής. Σήμερα το παγκόσμιο δορυφορικό σύστημα προσδιορισμού θέσης GPS των Η.Π.Α. βρίσκει πολυάριθμες εφαρμογές, τόσο τοπογραφικές όσο και απλές υπολογισμού θέσης για πλοήγηση. Η δημοφιλής χρήση του συστήματος οδήγησε και άλλες χώρες να αναπτύξουν τα δικά τους δορυφορικά συστήματα προσδιορισμού θέσης όπως η Ρωσία με το GLONASS και προσεχώς η Ευρωπαϊκή Ένωση με το GALILEO. Τα συστήματα αυτά παρέχουν τρισδιάστατη πληροφορία για τον προσδιορισμό θέσης με μεγάλη οριζοντιογραφική ακρίβεια αλλά όχι και τόσο μεγάλη κατακόρυφη. Αν και τα γεωδαιτικά όργανα παρέχουν υψηλή ακρίβεια στην παρακολούθηση επιφανειακών κινήσεων ωστόσο η ταχύτητα και η αξιοπιστία των δορυφορικών συστημάτων τα καθιστούν εξίσου σημαντικά ανάλογα και με την έκταση της περιοχής μελέτης. Τέλος οι μελέτες μικρομετακινήσεων σε περιοχές με χαλαρά εδάφη και ύπαρξη ορυχείων έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τον πολεοδομικό σχεδιασμό, την αντισεισμική προστασία και την αποφυγή κατασκευών που επιβαρύνουν με επιπλέον κόστος την τοπική κοινωνία.

1.2. Σκοπός

Η διπλωματική εργασία έχει ως στόχο την εγκατάσταση ενός δικτύου σταθερών σημείων ελέγχου οριζόντιων και κατακόρυφων μετακινήσεων με δορυφορικές μεθόδους. Επιλέχθηκε η περιοχή στο Τριπόταμο Αρκαδίας που συνδυάζει διάφορες ποικιλομορφίες σχετικά με παράγοντες επιρροής μικρομετακινήσεων όπως χαλαρά εδάφη και ανθρωπογενείς παράγοντες (ορυχεία). Το περιεχόμενο αυτής ασχολείται με το σχεδιασμό, την εγκατάσταση σημείων ελέγχου και τη μέτρηση στοιχείων του δικτύου ελέγχου GPS (βάσεις). Στην περιοχή παρατηρήθηκαν κατά το παρελθόν

κατολισθήσεις ή μετακινήσεις εδαφικών μαζών που σε αρκετές περιπτώσεις προκάλεσαν και την μερική καταστροφή τεχνικών έργων ή κτιρίων στον οικισμό. Γενικά ιδρύθηκε δίκτυο 11 σημείων των οποίων προσδιορίστηκε η θέση και το γεωμετρικό υψόμετρο με δορυφορικές μετρήσεις στην ευρύτερη περιοχή από τα οποία τα 6 ήταν περιμετρικά και 5 εντός του οικισμού. Ο προσδιορισμός των γεωμετρικών υψόμετρων των σημείων, βάση μετρήσεων GPS, έγινε με διαφορετικά λογισμικά επεξεργασίας δεδομένων GPS, με σκοπό να διαπιστωθεί κατά πόσο οι λύσεις από εμπορικά λογισμικά διαφοροποιούνται. Για τη μέτρηση των στοιχείων του δικτύου χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του σχετικού στατικού εντοπισμού θέσης (Static GPS) με χρήση σύγχρονων δεκτών. Η επίλυση του δικτύου έγινε με χρήση των αντίστοιχων λογισμικών επεξεργασίας της κατασκευάστριας εταιρείας των δεκτών, το Trimble Geomatics Office και το GNSS Solutions τα οποία ελέγχουν εξίσου και την ολική αξιοπιστία της λύσης για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.

1.3. Δομή

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μία αναλυτική παρουσίαση του συστήματος GPS, της λειτουργίας, των μεθόδων μετρήσεων, τις δυνατότητες που παρέχει στον Τοπογράφο μηχανικό, καθώς και οι εφαρμογές του σχετικά με τη μελέτη μικρομετακινήσεων τεχνικών έργων. Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται οι εργασίες πεδίου που έγιναν στην περιοχή μελέτης για την ίδρυση δικτύου με την χρήση GPS και δορυφορικών δεδομένων. Αναλυτικά παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης, ο σχεδιασμός της θέσης των σημείων για την υλοποίηση του δικτύου και παρουσιάζονται τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν για την διεξαγωγή των μετρήσεων. Επίσης εμφανίζεται το χρονοδιάγραμμα όλων των εργασιών που έλαβαν χώρα για την περάτωση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας. Στο τέταρτο κεφάλαιο περιλαμβάνεται η επεξεργασία των μετρήσεων της υπαίθρου. Γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων και αναλυτική περιγραφή των λογισμικών επεξεργασίας που χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση του δικτύου. Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο δίνονται τα βασικά συμπεράσματα της εργασίας, καθώς και οι προτάσεις για την συνέχιση της εργασίας αλλά και την περαιτέρω αξιοποίηση του δικτύου που έχει δημιουργηθεί.

Κεφάλαιο 2

Το σύστημα GPS

2.1. Γενικά

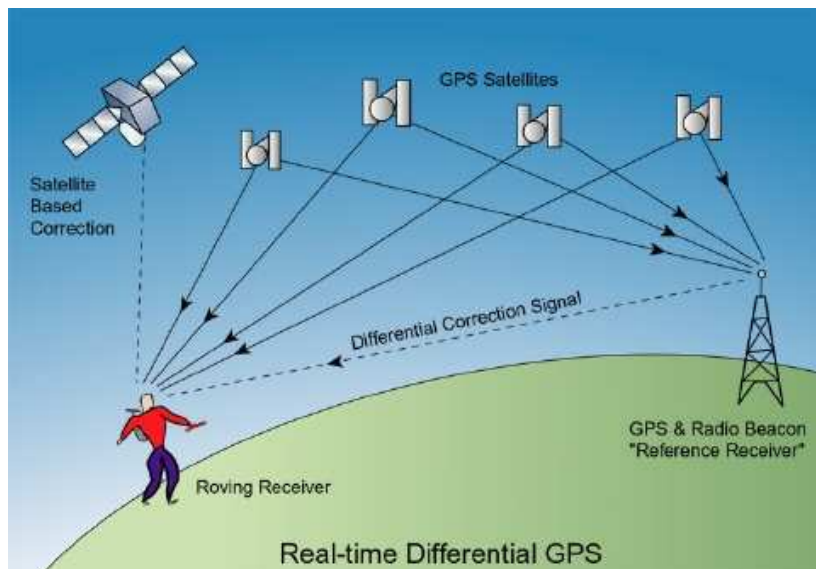
Το GPS (Global Positioning System, Παγκόσμιο Σύστημα Θέσεως) είναι ένα παγκόσμιο σύστημα, το οποίο συνδυάζει τρεις παράγοντες: α) το διαστημικό τμήμα, β) το επίγειο τμήμα ελέγχου και γ) τον χρήστη με σκοπό τον εντοπισμό θέσεως του τελευταίου όπως διακρίνονται στην εικόνα 2.1. Βασίζεται σε ένα πολυάριθμο δίκτυο δορυφόρων (32 σήμερα) που περιφέρονται γύρω από τη γη και οι οποίοι παρέχουν ακριβείς πληροφορίες για τη θέση ενός σημείου, το υψόμετρό του, την ταχύτητα και την κατεύθυνση της κίνησης του (διαστημικό τμήμα). Ρυθμίζεται καθημερινά από τη βάση πολεμικής αεροπορίας του Schriever στο Colorado με τη βοήθεια επίγειων κεραιών λήψης και αποστολής σημάτων με τους δορυφόρους έτσι ώστε να διορθώνονται και να ελέγχεται η σωστή λειτουργία τους (επίγειο τμήμα ελέγχου). Οι τοπογραφικές και υδρογραφικές αποτυπώσεις, οι απλοί τριγωνισμοί και τα δίκτυα πύκνωσης, τα εθνικά, ηπειρωτικά και παγκόσμια γεωδαιτικά δίκτυα, η μελέτη μικρομετακινήσεων κρίσιμων τεχνικών έργων καθώς επίσης και οι γεωδυναμικές εφαρμογές, όπως είναι η παρακολούθηση μικρομετακινήσεων του φλοιού της γης, αποτελούν μερικές χαρακτηριστικές εφαρμογές του GPS.

2.2. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα GPS

Το κυριότερο πλεονέκτημα του GPS έναντι παλαιότερων δορυφορικών και επίγειων μεθόδων μέτρησης είναι η ευκολία χρήσης του κάτω από όλες τις καιρικές συνθήκες χωρίς να επηρεάζεται από τη θερμοκρασία, την ώρα και τα καιρικά φαινόμενα. Για τον προσδιορισμό της θέσης δεν απαιτείται αμοιβαία ορατότητα μεταξύ των σημείων παρατήρησης (πχ μετρήσεις με Total Station), αρκεί να υπάρχει ορατότητα προς ικανοποιητικό αριθμό δορυφόρων στον ορίζοντα. Η θέση του σημείου παρέχεται απευθείας στην επιφάνεια της γης και έτσι μπορούμε να γνωρίζουμε αμέσως τις καρτεσιανές συντεταγμένες με καλή ακρίβεια και σε μικρότερο χρόνο μέτρησης. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα συνεργασίας με άλλα συστήματα και εφαρμογές όπως GIS, φωτογραμμετρία κ.ά.

Τα δύο ίσως και μοναδικά μειονεκτήματα του συστήματος που το καθιστούν ικανό αλλά όχι αναγκαίο για τοπογραφικές εργασίες είναι η απαίτηση για «ανοιχτό» ουρανό ώστε να υπάρχει οπτική επαφή με ικανό αριθμό δορυφόρων, γεγονός που

δυσκολεύει τη χρήση σε πόλεις και κατοικημένες περιοχές με έντονη δόμηση. Λόγω του στρατιωτικού χαρακτήρα του συστήματος η μείωση της ακρίβειας του συστήματος και η εισαγωγή σφαλμάτων από πλευρά των ΗΠΑ κατά χρονικά διαστήματα δεν εγγυώνται την απρόσκοπτη λειτουργία του.

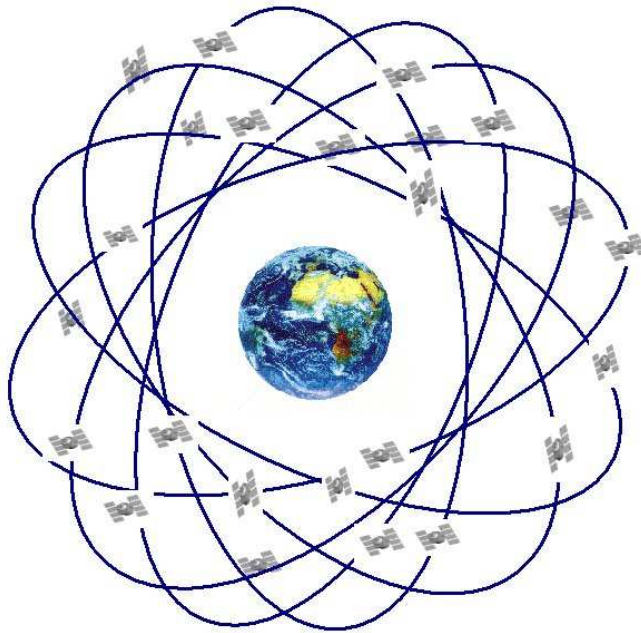


Εικόνα 2.1 Το σύστημα του GPS α) διαστημικό τμήμα, β) επίγειο και χρήστης

2.3. Λειτουργία

Το σύστημα GPS αποτελείται ουσιαστικά από «πομπούς σε τροχιά» που είναι οι δορυφόροι GPS (εικόνα 2.2) και από δέκτες GPS στη γήινη επιφάνεια. Τα δορυφορικά σήματα χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση μετρήσεων από το δέκτη, που ισοδυναμούν σε αποστάσεις μεταξύ δέκτη και δορυφόρων σε κάθε χρονική στιγμή. Οι παρατηρήσεις και άλλες πληροφορίες καταγράφονται στη μνήμη του δέκτη και επεξεργάζονται είτε εσωτερικά από το λογισμικό του δέκτη σε πραγματικό χρόνο είτε εκ των υστέρων, παρέχοντας τη θέση (συντεταγμένες), ή την ταχύτητα και τον χρόνο. Κάθε δορυφόρος διαθέτει τέσσερα ατομικά χρονόμετρα. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων ο δέκτης «διαβάζει» και ένα μήνυμα δεδομένων- πλοήγησης που περιλαμβάνει απαραίτητες πληροφορίες για τον υπολογισμό της θέσης σε πραγματικό χρόνο, όπως είναι τα στοιχεία τροχιάς των δορυφόρων, από τα οποία υπολογίζονται οι συντεταγμένες των δορυφόρων, οι παράμετροι διόρθωσης χρόνου και άλλα συστηματικά σφάλματα. Το σήμα που στέλνουν οι δορυφόροι του GPS περιέχει όλη την απαιτούμενη πληροφορία για τον εντοπισμό θέσης. Κάθε δορυφόρος στέλνει ένα μοναδικό σήμα το οποίο διαμορφώνεται σε μία από τις δύο συχνότητες στην περιοχή του L φάσματος. Για να αποκωδικοποιήσει ο δέκτης τις συχνότητες αυτές χρησιμοποιεί δύο κωδικούς διαίρεσης πολλαπλής πρόσβασης (Code Division Multiple Access, CDMA). Αυτοί είναι, ο γενικός κωδικός C/A (Coarse

Acquisition - χονδροειδούς απόκτησης) που είναι διαθέσιμος για πολιτική χρήση, και ο κωδικός ακριβείας P (precision), ο οποίος μπορεί να κρυπτογραφηθεί ως ένας P (Y) κωδικός διαθέσιμος μόνο για στρατιωτική χρήση. Η L1 συχνότητα διαμορφώνεται με τους C/A και P κωδικούς, ενώ η L2 χρησιμοποιούσε αρχικά μόνο τον P ενώ πλέον στους πιο σύγχρονους δορυφόρους από το 2005 και έπειτα προστέθηκε και ο L2C κωδικός για πολιτική χρήση.



Εικόνα 2.2 Οι κινήσεις των δορυφόρων πέριξ της γης

Ένας δέκτης GPS στη γη υπολογίζει τις καρτεσιανές συντεταγμένες (X,Y,Z) της θέσης του λαμβάνοντας σήματα από τους δορυφόρους. Κάθε δορυφόρος εκπέμπει διαρκώς σήματα που περιέχουν την ώρα αποστολής του σήματος, ακριβείς συντεταγμένες της θέσης του, και γενικές πληροφορίες κατάστασης και χονδρικής τροχιάς όλου του συστήματος δορυφόρων GPS. Ο δέκτης υπολογίζει, μέσω του χρόνου που χρειάζεται το σήμα να φτάσει σε αυτόν, την απόστασή του από κάθε δορυφόρο. Έτσι, με γνωστές τις συντεταγμένες του κάθε δορυφόρου και τις αποστάσεις τους από τον δέκτη, είναι δυνατό να υπολογιστούν γεωμετρικά οι συντεταγμένες του δέκτη. Θεωρητικά, θα επαρκούσαν τρεις δορυφόροι για να προσδιορισθούν οι συντεταγμένες X, Y και Z. Όμως επειδή υπάρχουν μικρές διαφορές στον συγχρονισμό των ρολογιών του δέκτη και του δορυφόρου, οι οποίες πολλαπλασιαζόμενες με την ταχύτητα του φωτός με την οποία κινείται το σήμα των δορυφόρων, δίνουν μία σημαντική διαφορά θέσης, χρειάζεται σήμα τουλάχιστον 4 δορυφόρων, ώστε ο δέκτης να επιλύσει ως προς X, Y, Z και ΔT .

2.3.1. Μέθοδοι μετρήσεων

Η μέθοδος που θα χρησιμοποιήσουμε για τον προσδιορισμό θέσης με το GPS εξαρτάται κυρίως από την ακρίβεια που απαιτείται σε κάθε εφαρμογή και από τον συνολικό χρόνο παρατήρησης. Γενικά στόχος είναι να επιτυγχάνουμε την μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια στον μικρότερο δυνατό χρόνο παρατήρησης. Γενικά οι τρόποι μέτρησης με το GPS μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με το αν ο δέκτης κινείται ή παραμένει ακίνητος στο σημείο μέτρησης, αν προσδιορίζουμε τις συντεταγμένες του σημείου απευθείας στο WGS84 ή έμμεσα ως προς ένα άλλο γνωστό σημείο ή αν υπολογίζουμε σε πραγματικό χρόνο τις συντεταγμένες του σημείου (κατά τη διάρκεια της μέτρησης) ή εκ των υστέρων στο γραφείο. Ανάλογα με το αν ο δέκτης παραμένει ακίνητος ή όχι στο σημείο παρατήρησης, έχουμε δυο βασικές κατηγορίες προσδιορισμού θέσης, τον στατικό και τον κινηματικό προσδιορισμό.

- Στον στατικό προσδιορισμό (Static Positioning) ο δέκτης ή οι δέκτες GPS παραμένουν ακίνητοι στα προσδιοριζόμενα σημεία σε όλη τη διάρκεια των μετρήσεων. Ο δέκτης δεν είναι απαραίτητο να έχει συνεχή επαφή με τους δορυφόρους όταν μεταφέρεται από σημείο σε σημείο.
- Στον κινηματικό προσδιορισμό (Kinematic Positioning) ο δέκτης ή οι δέκτες GPS κινούνται κατά μήκος μιας διαδρομής και ο δέκτης υπολογίζει συντεταγμένες σε “τυχαία σημεία” της διαδρομής ανά τακτά χρονικά διαστήματα που έχουμε ορίσει εμείς. Στον κινηματικό προσδιορισμό η επαφή του δέκτη με τους δορυφόρους θα πρέπει να είναι συνεχής κατά τη διάρκεια της κίνησης.

Ανάλογα με το αν ο προσδιορισμός του σημείου γίνεται απευθείας στο σύστημα αναφοράς του GPS ή αν προσδιορίζεται η σχετική του θέση ως προς ένα άλλο γνωστό σημείο, διακρίνουμε δυο μεθόδους προσδιορισμού, τον απόλυτο και τον σχετικό προσδιορισμό θέσης. Με τον όρο απόλυτο προσδιορισμό θέσης (absolute positioning), εννοούμε τον προσδιορισμό των καρτεσιανών συντεταγμένων (X,Y,Z) ενός δέκτη από τις δικές του παρατηρήσεις. Αν ο δέκτης παραμένει ακίνητος μπορούμε εκ των υστέρων να αξιοποιήσουμε όλες τις εποχές παρατήρησης και να οδηγηθούμε σε αποτελέσματα μεγαλύτερης ακρίβειας. Στον απόλυτο προσδιορισμό θέσης χρησιμοποιούνται συνήθως παρατηρήσεις ψευδοαποστάσεων από κώδικες.

$$\begin{aligned} P_{1A}^i &= p_A^i + c\delta_A - c\delta^i + I_A^i + T_A^i + e_A^i = \\ &= \sqrt{(X^i - X_A)^2 + (Y^i - Y_A)^2 + (Z^i - Z_A)^2} + c\delta_A - c\delta^i + I_A^i + T_A^i + e_A^i \end{aligned}$$

Όπου ο δείκτης 1 αναφέρεται στον φορέα L1 (ανάλογα ισχύει για τον φορέα L2). Η εξίσωση αυτή αποτελεί το βασικό μαθηματικό μοντέλο για τον απόλυτο προσδιορισμό θέσης.

2.3.2. Σχετικός προσδιορισμός θέσης

Με τον όρο σχετικό προσδιορισμό θέσης, εννοούμε τον προσδιορισμό του διανύσματος μεταξύ δυο σημείων, έστω A και B. Το διάνυσμα αυτό ονομάζεται βάση (baseline). Με άλλα λόγια με τον σχετικό προσδιορισμό, υπολογίζονται οι συντεταγμένες ενός ή και περισσότερων σημείων ως προς κάποιο άλλο σημείο που θεωρείται γνωστό. Ο σχετικός προσδιορισμός θέσης προϋποθέτει ταυτόχρονες μετρήσεις προς S δορυφόρους από δυο τουλάχιστον δέκτες. Αντί των πρωτογενών παρατηρήσεων GPS χρησιμοποιούνται συνήθως γραμμικοί συνδυασμοί τους με σημαντικά πλεονεκτήματα αλλά και κάποια μειονεκτήματα. Ο κυριότερος λόγος είναι ότι με αυτόν τον τρόπο, απαλείφονται ή ελαχιστοποιούνται τα περισσότερα από τα συστηματικά σφάλματα, μερικά από τα οποία είναι δύσκολο να περιγραφούν μαθηματικά πλήρως. Το ίδιο ισχύει και για τα σφάλματα της επιλεκτικής διαθεσιμότητας όταν η κατάσταση αυτή είναι ενεργή. Οι ψευδοαποστάσεις από κώδικες μπορούν να χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές σχετικού προσδιορισμού χωρίς αυξημένες απαιτήσεις ακρίβειας, της τάξης του 0.5 έως 1 m, για παράδειγμα σε πολλές εφαρμογές GIS.

2.4. Τεχνικές μετρήσεων

Οι διαφορετικές ανάγκες σε ακρίβεια και σε ταχύτητα που δημιουργούνται στις πρακτικές εφαρμογές οδήγησαν σε μια σειρά από τεχνικές μέτρησης που συνδυάζουν τις μεθόδους του διαφορικού GPS στον σχετικό προσδιορισμό θέσης. Οι δυο κλασσικές τεχνικές μέτρησης που χρησιμοποιούνται είναι ο *σχετικός στατικός προσδιορισμός* και ο *σχετικός κινηματικός προσδιορισμός*. Εκτός όμως από τις δυο αυτές τεχνικές, δημιουργήθηκαν και κάποιες ενδιάμεσες τεχνικές (παραλλαγές) που σκοπό έχουν να βελτιστοποιήσουν την απόδοση του GPS στις τοπογραφικές εφαρμογές. Οι ενδιάμεσες αυτές τεχνικές αφορούν τις συνήθεις γεωδαιτικές εργασίες, που οι αποστάσεις μεταξύ των σημείων δεν ξεπερνούν τα μερικά Km και ο χρόνος παρατήρησης αποτελεί σημαντικό παράγοντα κόστους. Οι τεχνικές αυτές είναι ο γρήγορος στατικός προσδιορισμός, ο ψευδο-κινηματικός και ο ημι-κινηματικός.

2.4.1. Σχετικός στατικός προσδιορισμός (static positioning)

Με τον όρο στατικό προσδιορισμό θέσης εννοούμε τον προσδιορισμό όπου οι δέκτες παραμένουν ακίνητοι στα σημεία καθόλη τη διάρκεια των μετρήσεων. Για να

προσδιοριστούν σωστά οι συνιστώσες μιας βάσης, αρκεί οι συντεταγμένες του σημείου που θεωρείται γνωστό να είναι γνωστές με ακρίβεια μερικών μέτρων, ενδεικτικά της τάξης των 10 m ως προς το WGS84. Στην ουσία, δηλαδή, η επίλυση μιας βάσης αναφέρεται σε ένα “ψευδο-WGS84”. Όταν έχουμε να επιλύσουμε πολλές βάσεις, που αποτελούν ένα δίκτυο GPS, αρκεί να είναι γνωστό ένα μόνο σημείο. Τα λογισμικά GPS έχουν τη δυνατότητα να επιλύουν τις βάσεις αυτόματα ή δίνουν και τη δυνατότητα να επιλέγει ο χρήστης ποιες βάσεις θα επιλύσει από το σύνολο των βάσεων σύμφωνα με κάποια κριτήρια. Στις συνήθεις γεωδαιτικές και τοπογραφικές εργασίες σχεδόν πάντα μας ενδιαφέρει η ένταξη του δικτύου GPS στο τοπικό σύστημα αναφοράς. Έτσι, για να ελεγχθεί η ένταξη, κάποια από τα σημεία του δικτύου που πρέπει να είναι τουλάχιστον τρία, πρέπει να είναι κοινά ώστε να χρησιμοποιηθούν για το μετασχηματισμό του δικτύου GPS στο τοπικό datum. Για να αξιοποιήσουμε τα σημαντικά πλεονεκτήματα που προσφέρει η τεχνική των διαφορών, οι παρατηρήσεις πρέπει να είναι ταυτόχρονες με ικανοποιητική ακρίβεια στα σημεία κάθε βάσης που επιλύεται. Ο χρόνος παραμονής σε κάθε σημείο μέτρησης για δέκτη μιας συχνότητας θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 20 λεπτά για αποστάσεις μέχρι 5 Km από το σημείο αναφοράς (Reference point), σημείο στο οποίο ο ένας από τους δυο δέκτες παραμένει καθόλη τη διάρκεια των μετρήσεων (συνήθως είναι κάποιο τριγωνομετρικό ή γενικά σημείο με γνωστές συντεταγμένες). Η βέλτιστη απαιτούμενη χρονική διάρκεια συλλογής παρατηρήσεων εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των σημείων, από τον αριθμό και τη γεωμετρία των δορυφόρων, όπου δείκτης της ακρίβειας των μετρήσεων είναι η τιμή του GDOP η οποία κατά τη διάρκεια των μετρήσεων δεν θα πρέπει να ξεπερνά το 8. Για αποστάσεις μεγαλύτερες των 5 Km και μέχρι 15 Km, ο δέκτης είναι καλό να παραμείνει για τουλάχιστον μια ώρα. Ο ρυθμός καταγραφής των παρατηρήσεων θα πρέπει να κυμαίνεται από 10 μέχρι 20 sec. Η γωνία αποκοπής (cut off angle) ορίζεται στις 15° μοίρες (είναι η γωνία κάτω από την οποία δεν καταγράφονται μετρήσεις). Συνήθως όταν απαιτείται μέγιστη ακρίβεια μετράμε όσο το δυνατόν περισσότερες βάσεις (baselines) μεταξύ των σημείων, με την απαίτηση να φτιάχνουμε κλειστά γεωμετρικά σχήματα π.χ. τρίγωνα ή τετράπλευρα με μια έστω διαγώνιο μετρημένη, έτσι ώστε να μπορούμε πάντοτε να έχουμε τον έλεγχο των σφαλμάτων στις μετρήσεις μας. Για τη μέτρηση ενός δικτύου GPS στην πιο απλή περίπτωση που διαθέτουμε δυο δέκτες, αρκεί ο ένας να τοποθετηθεί σε ένα γνωστό σημείο, όπως στην εικόνα 2.3 και ο άλλος ο δέκτης να περιφέρεται στα υπόλοιπα σημεία (ακτινική διάταξη). Κάθε φορά, δηλαδή, μετράμε στην ουσία μια βάση και στη συνέχεια συμπληρώνουμε τις παρατηρήσεις στο δίκτυό μας, μετρώντας τις υπόλοιπες βάσεις.



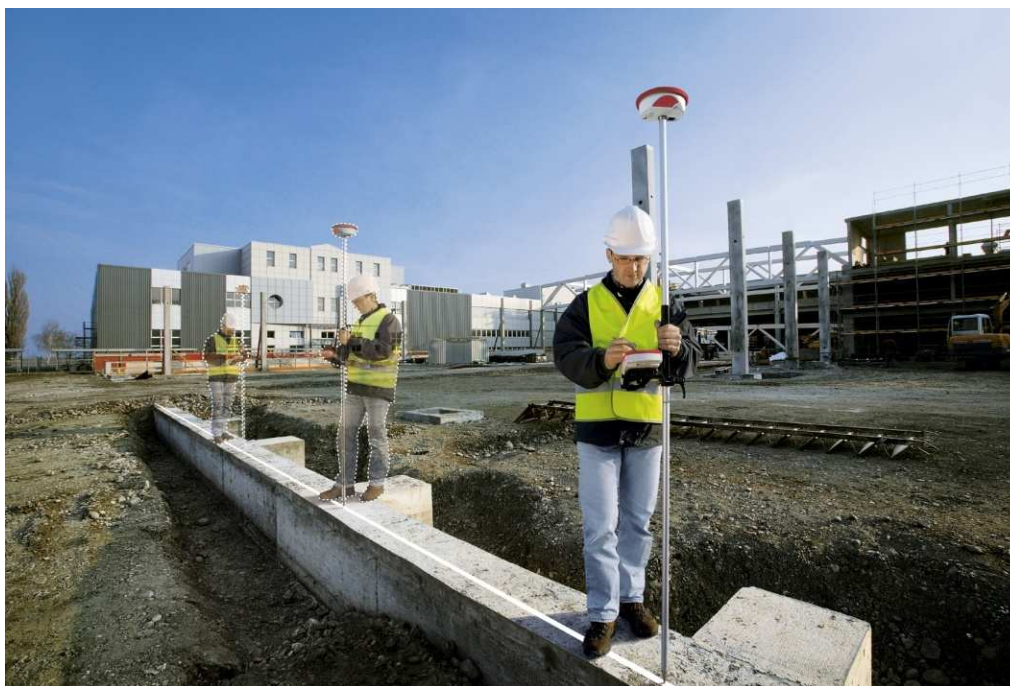
Εικόνα 2.3 Στατικός προσδιορισμός θέσης φωτοσταθερού σημείου

Για τη μέτρηση δικτύων με αυτή τη μέθοδο είναι καλύτερο να διαθέτουμε τρεις δέκτες έτσι ώστε να μετράμε κάθε φορά τρίγωνα από βάσεις και να μειώνουμε το χρόνο μετακίνησης. Σε κάθε ομάδα μετρήσεων θα πρέπει στο σύνολο των σημείων που προσδιορίζονται να υπάρχουν τουλάχιστον δυο γνωστά σημεία (όσο περισσότερα τόσο καλύτερα), από τα οποία το ένα θα είναι σίγουρα το σημείο αναφοράς, ώστε να μπορεί να γίνει έπειτα από την επίλυση ο μετασχηματισμός ομοιότητας των προσδιορισθέντων σημείων από το σύστημα GPS στο ανάλογο προβολικό σύστημα. Οι ακρίβειες που μπορούν να επιτευχθούν με αυτή τη διαδικασία είναι της τάξης των 1-2 cm \pm 1ppm της απόστασης μεταξύ των σημείων. Η διαδικασία αυτή είναι κατάλληλη για μετρήσεις δικτύων, μικρομετακινήσεων τεχνικών έργων κλπ. Και γενικά όπου απαιτείται υψηλή ακρίβεια στις συντεταγμένες των σημείων μας.

2.4.2. Σχετικός κινηματικός προσδιορισμός (*kinematic positioning*)

Ο σχετικός κινηματικός προσδιορισμός (relative kinematic) αφορά σε εφαρμογές για τον υπολογισμό της τροχιάς οχημάτων (πλοίων, αεροπλάνων κτλ.) και κάποιες άλλες, όπως οι μηκοτομές αξόνων δρόμων με πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια από τον αντίστοιχο απόλυτο κινηματικό. Στη διαδικασία αυτή, απαιτείται αρχικά να λυθεί το πρόβλημα της ασάφειας για όλους τους δορυφόρους με την έναρξη της διαδικασίας. Ο ακίνητος δέκτης μένει συνεχώς στο γνωστό σημείο και ο κινητός, στην αρχή, μένει ακίνητος για λίγα λεπτά μέχρι να συλλεχθούν ικανές μετρήσεις για την επίλυση των ασαφειών. Η αρχική θέση του κινούμενου δέκτη μπορεί να είναι ένα

άλλο γνωστό σημείο ή ένα τυχαίο σημείο κοντά στο μόνιμο σταθμό, ώστε να εφαρμοστεί η λεγόμενη τεχνική της εναλλαγής των κεραιών (antenna swapping) ή και ένα τυχαίο σημείο για εφαρμοστεί η τεχνική του στατικού σχετικού προσδιορισμού. Στη συνέχεια ο κινούμενος δέκτης λαμβάνει μετρήσεις (καθώς κινείται) ανά κάποια χρονικά διαστήματα π.χ. ανά 5 sec, και έτσι μπορούν να προσδιοριστούν οι σχετικές θέσεις του, με την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχει απώλεια δορυφορικού σήματος. Αν υπάρξει απώλεια σήματος ή οι δορυφόροι είναι λιγότεροι από 4, η επίλυση της ασάφειας πρέπει να επαναληφθεί, όπως και στην αρχή της διαδικασίας. Ο κινούμενος δέκτης δεν χρειάζεται να επιστρέψει στο αρχικό σημείο, αλλά να παραμείνει ακίνητος σε μια θέση μέχρι τη συλλογή ικανού αριθμού μετρήσεων. Οι ακρίβειες με μετρήσεις φάσεων είναι και εδώ πολύ υψηλές, λίγο μικρότερες από αυτές του σχετικού προσδιορισμού, της τάξης του 1 έως 10 ppm και ανάλογα με τις δυνατότητες του δέκτη, της τάξης του 1 m από μετρήσεις ψευδοαποστάσεων.



Εικόνα 2.4 Κινηματικός προσδιορισμός θέσης σημείων

2.4.3. Γρήγορος στατικός προσδιορισμός (rapid static)

Ο γρήγορος στατικός προσδιορισμός, είναι μια κλασσική στατική τεχνική και μοιάζει με τον σχετικό στατικό προσδιορισμό. Γενικά χρησιμοποιούμε μεγαλύτερο ρυθμό λήψης των παρατηρήσεων συνήθως 5-10 sec, και η διαφορά του από τον κλασσικό στατικό προσδιορισμό είναι ότι χρησιμοποιούμε μετρήσεις λίγων λεπτών για κάθε βάση, τόσες όσες να μπορεί να επιλυθεί ικανοποιητικά το πρόβλημα της ασάφειας φάσης. Στη μέθοδο αυτή ο ένας δέκτης παραμένει σταθερός σε γνωστό σημείο και ο άλλος περιφέρεται στα υπόλοιπα άγνωστα σημεία παραμένοντας σε

αυτά 5έως 20 λεπτά, ανάλογα με το μήκος της βάσης 5- 20 Km, αν είναι μέρα ή νύχτα (τη νύχτα χρειαζόμαστε λιγότερο χρόνο γιατί η ιονόσφαιρα είναι πιο ήπια και του αριθμού των δορυφόρων. Οι δέκτες πρέπει να είναι διπλής συχνότητας και με δυνατότητα μέτρησης κωδικών. Κατά τη μετακίνηση των δεκτών από σημείο σε σημείο, δε χρειάζεται η λήψη του δορυφορικού σήματος και οι δέκτες μπορούν να είναι κλειστές. Η ακρίβεια που επιτυγχάνεται εδώ είναι της τάξης του εκατοστού. Η τεχνική αυτή μπορεί να εφαρμοστεί σε δίκτυα κατώτερης τάξης, πυκνώσεις δικτύων, στη λήψη φωτοσταθερών και στην πολυγωνομετρία.

2.5. Σφάλματα στο GPS

Διακρίνουμε μια σειρά σφαλμάτων, συστηματικού κυρίως χαρακτήρα (systematic errors), που επηρεάζουν τον προσδιορισμό θέσης με παρατηρήσεις GPS. Τα τυχαία σφάλματα (random errors), που προφανώς είναι αναπόφευκτα, κατά την εκτέλεση των μετρήσεων, ονομάζονται συνήθως ως θόρυβος (noise). Τα σφάλματα GPS μπορούν να χωριστούν σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- σφάλματα που σχετίζονται με τους δορυφόρους: το σφάλμα της δορυφορικής εφημερίδας ή τροχιάς, το σφάλμα του ρολογιού του δορυφόρου και το σφάλμα της επιλεκτικής διαθεσιμότητας
- σφάλματα που σχετίζονται με τους δέκτες: το σφάλμα του ρολογιού του δέκτη, το σφάλμα της μεταβολής του κέντρου φάσης της κεραίας, το τυχαίο σφάλμα παρατήρησης ή ο θόρυβος, το σφάλμα εξαιτίας της αβεβαιότητας του γνωστού σημείου κατά την επίλυση μιας βάσης
- σφάλματα που σχετίζονται με τη διάδοση του σήματος: τα ατμοσφαιρικά σφάλματα (τροποσφαιρικό και ιονοσφαιρικό σφάλμα), το σφάλμα πολυανάκλασης, το σφάλμα της ολίσθησης των κύκλων.

Πραγματοποιήθηκε σημαντική προσπάθεια για τον έλεγχο και μοντελοποίηση των σφαλμάτων GPS. Η εκτίμησή τους πριν από τη συνόρθωση δεν μπορεί να γίνει πάντα με την ακρίβεια που απαιτείται για το σχετικό προσδιορισμό θέσης. Η μοντελοποίησή τους, αν και ικανοποιητική στις περισσότερες περιπτώσεις, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των άγνωστων παραμέτρων στα μοντέλα συνόρθωσης και τη μείωση της ισχύος της λύσης. Πέρα από τα παραπάνω σφάλματα, τον προσδιορισμό θέσης και χρόνου επηρεάζει και η γεωμετρική μορφή του δορυφορικού σχηματισμού.

2.5.1. Το σφάλμα της τροχιάς των δορυφόρων

Η ποιότητα των παραμέτρων της τροχιάς των δορυφόρων επηρεάζει άμεσα την ποιότητα των αποτελεσμάτων σε κάθε εφαρμογή GPS. Το σφάλμα της τροχιάς είναι η συστηματική παρέκκλιση της θέσης και της ταχύτητας του δορυφόρου από την πραγματική θέση, την θέση με βάση τις παρατηρήσεις για τον υπολογισμό των τροχιών και των μαθηματικών μοντέλων που χρησιμοποιούνται. Αν δε πολλαπλασιαστεί με τον συντελεστή PDOP δίνει την επίδραση στο σφάλμα θέσης του δέκτη. Όπως είναι φυσικό, μιας και δεν υπάρχει μέτρηση που να μην περιέχει σφάλματα, οι μεταδιδόμενες εφημερίδες των δορυφόρων για την τροχιά τους δεν παρέχουν την πραγματική θέση του δορυφόρου, αλλά κάποια διαφορετική που προσεγγίζει την αληθή με κάποιο σφάλμα. Στο σχετικό προσδιορισμό θέσης, για παράδειγμα, αν μετράμε μια βάση 20 Km, τότε ένα σφάλμα της τάξης των 20 m στην τροχιά ενός δορυφόρου (σύνηθες όταν η επιλεκτική διαθεσιμότητα δεν είναι ενεργοποιημένη) που βρίσκεται σε απόσταση 20.000 Km, μεταφράζεται σε ένα σφάλμα 2 cm στη θέση του δέκτη. Αυτό σημαίνει ότι έχουμε ένα σφάλμα 1 ppm για κάθε 20 m σφάλματος στην τροχιά του δορυφόρου.

2.5.2. Σφάλμα του ρολογιού του δορυφόρου

Το σφάλμα αυτό οφείλεται στο μη συγχρονισμό του ατομικού ρολογιού του κάθε δορυφόρου ως προς το χρόνο GPS που αποτελεί την κλίμακα χρόνου του συστήματος. Αντί να γίνει διόρθωση του χρόνου στο ατομικό ρολόι του κάθε δορυφόρου, έγινε η επιλογή της ελεύθερης ροής χρόνου, με αποτέλεσμα την απόκλιση των ονομαστικών κλιμάκων των δορυφόρων από την κλίμακα του GPS και τον υπολογισμό των αντίστοιχων σφαλμάτων με πρόγνωση για χρήση σε πραγματικό χρόνο. Στο σχετικό προσδιορισμό θέσης, το σφάλμα αυτό απαλείφεται από τις παρατηρήσεις. Αυτό δεν σημαίνει ότι στη διαδικασία του σχετικού προσδιορισμού θέσης δεν μας απασχολεί. Στον απόλυτο προσδιορισμό θέσης σε πραγματικό χρόνο το σφάλμα μετά τη διόρθωση αγνοείται.

2.5.3. Το σφάλμα του ρολογιού του δέκτη

Για την παραγωγή των σημάτων-αντιγράφων και τη διατήρηση της ονομαστικής του κλίμακας χρόνου, ο δέκτης χρησιμοποιεί έναν συνηθισμένο ταλαντωτή ή ρολόι τύπου κρυστάλλου χαλαζία, προφανώς λιγότερο ακριβές από τα ατομικά χρονόμετρα, καθώς αυτό θα σήμαινε την κατακόρυφη αύξηση του κόστους τους. Αρκεί να αναφερθεί ότι τα ατομικά χρονόμετρα ακριβείας με τα οποία εξοπλίζονται οι δορυφόροι, ζυγίζουν περισσότερο από 20 κιλά, κοστίζουν περίπου \$50.000 και απαιτούν εκτεταμένη φροντίδα. Ο μη συγχρονισμός του ρολογιού του

δέκτη με την κλίμακα χρόνου του GPS εκφράζεται από το αντίστοιχο σφάλμα που είναι σημαντικό και δεν μπορεί να αγνοηθεί. Από την τυπική λύση πλοήγησης ο δέκτης υπολογίζει το σφάλμα του ρολογιού του με ακρίβεια καλύτερη από 1 μ s (δεκάδες μέτρα) και διορθώνει το χρόνο του ως προς το χρόνο GPS. Το σφάλμα αυτό είναι συνάρτηση του χρόνου, μπορεί να υπολογίζεται σε κάθε εποχή παρατήρησης και σχεδόν απαλείφεται από τις παρατηρήσεις στο σχετικό προσδιορισμό θέσης. Στον απόλυτο προσδιορισμό θέσης σε πραγματικό χρόνο υπολογίζεται ταυτόχρονα με τη θέση.

2.5.4. Οι μεταβολές του κέντρου φάσης της κεραίας

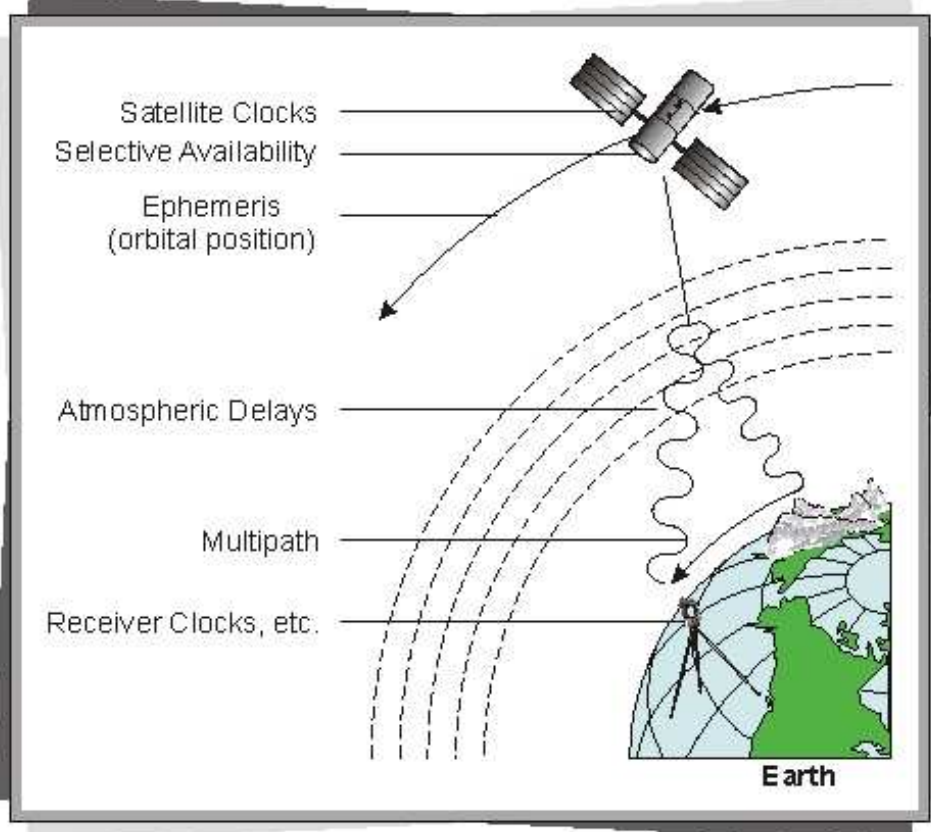
Το μηχανικό ή γεωμετρικό ή φυσικό κέντρο της κεραίας ενός δέκτη GPS είναι το σημείο αναφοράς ως προς το οποίο προσδιορίζεται το ύψος της κεραίας από το σημείο εδάφους, συνήθως κατά την κατακόρυφο, παρόμοια με τη μέτρηση του ύψους οργάνου ή πρίσματος σε ένα EDM. Το ηλεκτρικό κέντρο της κεραίας ή αλλιώς το κέντρο φάσης είναι το σημείο όπου γίνεται η λήψη των δορυφορικών σημάτων και στο οποίο αναφέρονται οι μετρήσεις GPS. Τα άκρα μιας βάσης GPS ορίζονται αρχικά από τα αντίστοιχα κέντρα φάσης των κεραιών. Οι μεταβολές των κέντρων φάσης γύρω από μια μέση θέση είναι της τάξης των λίγων χιλιοστών και αποκτούν κρίσιμο χαρακτήρα στις εφαρμογές υψηλής ακρίβειας. Αν δεν ληφθούν υπόψη, το σφάλμα μπορεί να φτάσει και τα 10 cm στην υψομετρική διαφορά, ανεξάρτητα από το μήκος της βάσης. Για τις συνήθεις εφαρμογές και για μικρές βάσεις η επίδραση της μεταβολής των κέντρων φάσης απαλείφεται αν χρησιμοποιηθούν ίδιες κεραίες στα άκρα της βάσης GPS και με τον ίδιο προσανατολισμό. Π.χ. με το ίδιο μαγνητικό αζιμούθιο με τη βοήθεια μιας πυξίδας (οι κεραίες φέρουν ενδεικτικό σημείο, ώστε η κεραία να στραφεί προς το Βορρά).

2.5.5. Το σφάλμα αβεβαιότητας του γνωστού σημείου

Οποιοδήποτε σφάλμα στη θέση του σημείου που διατηρείται σταθερό κατά την επίλυση μιας βάσης (σχετικός προσδιορισμός) επηρεάζει συστηματικά τις εκτιμήσεις των συνιστωσών (ΔX , ΔY , ΔZ). Γενικά, η ακρίβεια των προσεγγιστικών συντεταγμένων του σημείου αναφοράς (λαμβάνόμενου ως σταθερού) δεν πρέπει να ξεπερνά τα περίπου 10 m για τις συνήθεις γεωδαιτικές και τοπογραφικές εφαρμογές. Στις εργασίες υψηλής ακρίβειας επιδιώκεται ακρίβεια των συντεταγμένων του σταθερού σημείου όσο γίνεται μεγαλύτερη. Η επίδραση του σφάλματος αυτού στη σχετική θέση είναι παρόμοια με την επίδραση του σφάλματος τροχιάς.

2.5.6. Τα ατμοσφαιρικά σφάλματα

Η γήινη ατμόσφαιρα διακρίνεται σε ομόκεντρα, σχεδόν σφαιρικά στρώματα τα οποία χωρίζονται από στενές ζώνες μεταβίβασης από το ένα στο άλλο. Διακρίνουμε δυο ειδών ατμοσφαιρικά σφάλματα, το ιονοσφαιρικό και το τροποσφαιρικό σφάλμα. Τα τμήματα αυτά της ατμόσφαιρας επηρεάζουν ουσιαστικά και κατά διαφορετικό τρόπο τη διαδρομή του δορυφορικού (ηλεκτρομαγνητικού) σήματος όπως στην εικόνα 2.5, με αποτέλεσμα χρονικές καθυστερήσεις λόγω της επιβράδυνσης της ταχύτητας διάδοσης και την καμπυλότητα της τροχιάς λόγω αλλαγής κατεύθυνσης σε σχέση με την ευθύγραμμη διαδρομή στο κενό. Για τη μείωση των σφαλμάτων της ατμόσφαιρας λαμβάνουμε ή χρησιμοποιούμε κατά την επεξεργασία μετρήσεις προς δορυφόρους που έχουν γωνία ύψους πάνω από ένα όριο, συνήθως πάνω από 15°. Η γωνία αυτή, γνωστή και ως γωνία αποκοπής (cut off angle, elevation mask) είναι συνήθως 10° ή 15°.



Εικόνα 2.5 Επίδραση της ατμόσφαιρας στο σήμα του GPS

2.5.7. Το σφάλμα πολυανάκλασης

Πολυανάκλαση είναι το φαινόμενο, όπου το δορυφορικό σήμα λαμβάνεται και από άλλη ή άλλες έμμεσες διαδρομές εκτός από την κανονική του πορεία εξαιτίας της ανάκλασής του σε γειτονικές επιφάνειες, π.χ. επιφάνειες κτιρίων. Με αυτόν τον

τρόπο, το σήμα ακολουθεί μεγαλύτερη διαδρομή από την κανονική και η άφιξη του σήματος στην κεραία του δέκτη γίνεται ύστερα από πολλές ανακλάσεις. Η επίδραση αυτή ονομάζεται σφάλμα πολυανάκλασης (multipath error). Είναι φανερό ότι το σφάλμα πολυανάκλασης του δέκτη είναι συνάρτηση του περιβάλλοντος χώρου. Έτσι οι μετρήσεις χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερο θόρυβο και είναι συστηματικά επηρεασμένες από κάποιο σφάλμα. Το σφάλμα πολυανάκλασης εξαρτάται από την γωνία ύψους του δορυφόρου. Όσο πιο μικρή η γωνία ύψους, τόσο μεγαλύτερο το σφάλμα πολυανάκλασης. Τιμές της τάξης των μερικών εκατοστών για τις φάσεις, των μερικών μέτρων για τον κώδικα P και των μερικών δεκάδων μέτρων για τον κώδικα C/A είναι πολύ πιθανές. Κάτω από άσχημες συνθήκες η ανάκλαση μπορεί να επιφέρει μέχρι και χάσιμο του σήματος (loss of lock). Ο πιο ασφαλής τρόπος για την ελαχιστοποίηση του σφάλματος πολυανάκλασης είναι η κατάλληλη επιλογή της θέσης του δέκτη για τις στατικές εφαρμογές (όχι κοντά σε ψηλά γειτονικά κτίρια και γενικά κοντά σε εμπόδια). Η επίδραση του συγκεκριμένου σφάλματος στις κινηματικές εφαρμογές είναι μεγαλύτερη από ότι στις εφαρμογές στατικού τύπου. Στις τελευταίες, οι επιδράσεις του σφάλματος πολυανάκλασης τείνουν να εξουδετερωθούν λόγω της μεταβολής της γεωμετρίας δέκτη- δορυφόρου κατά τη διάρκεια μιας μετρητικής περιόδου που διαρκεί περισσότερο χρόνο, ενδεικτικά πάνω από μια ώρα.

2.6. Παρεχόμενες ακρίβειες στο GPS

Τα σφάλματα επιδρούν σημαντικά στην ακρίβεια του τρισδιάστατου προσδιορισμού της θέσης ενός σημείου στη φυσική γήινη επιφάνεια με το σύστημα GPS. Από αυτά, η επίδραση της γεωμετρίας των δορυφόρων και των δεκτών αποτελεί ίσως, το σημαντικότερο παράγοντα για τον προσδιορισμό της θέσης και εκφράζεται από τον δείκτη ποιότητας των παρατηρήσεων DOP (Dilution of Precision). Ο δείκτης αυτός ορίζεται ως ο λόγος της ακρίβειας εντοπισμού (σ) προς την ακρίβεια των μετρήσεων (σ_0), δηλαδή $\sigma = DOP \cdot \sigma_0$. Όταν γίνεται αναφορά μόνο στις τρεις συντεταγμένες (X,Y,Z) το μέτρο ακρίβειας ονομάζεται PDOP (Position Dilution of Precision) ενώ μόνο για τον ορίζοντα ή κατακόρυφη θέση ισχύουν αντίστοιχα HDOP (Horizontal DOP) και VDOP (Vertical DOP). Το μέτρο για την εκτίμηση του σφάλματος χρονομέτρου του δέκτη ονομάζεται TDOP (Time Dilution of Precision) και το συνολικό μέτρο που δίνει τη γεωμετρία της εκτίμησης δίνεται από το GDOP (Geometric Dilution of Precision), ως ακολούθως:

$$GDOP = \sqrt{PDOP^2 + TDOP^2}$$

Οι τιμές DOP προσδιορίζονται σήμερα, από τα προγράμματα που συνοδεύουν τους εκάστοτε δέκτες GPS χωρίς τη χρήση μετρήσεων, παρά μόνο με τις θέσεις των δορυφόρων από τις εκπεμπόμενες εφημερίδες και την προσεγγιστική τιμή της θέσης του δέκτη. Γενικά οι τιμές DOP μεταβάλλονται ανάλογα με τον αριθμό δορυφόρων που παρατηρούνται στον ουρανό τη χρονική στιγμή των μετρήσεων καθώς, και με τις παραμέτρους που σχετίζονται με αυτούς όπως, η γωνία ανύψωσης και ο αριθμός δορυφόρων που παρεμβάλλονται στην τελική επίλυση των βάσεων. Ειδικά για τον αριθμό GDOP αξίζει να αναφερθεί ότι εξαρτάται από το πλήθος των παρατηρούμενων δορυφόρων και τη θέση τους στον ουρανό και σε σχέση με τη θέση του δέκτη. Μπορεί να ερμηνευθεί ως το αντίστροφο του όγκου ενός τετράεδρου που σχηματίζεται από τέσσερις δορυφόρους και το δέκτη. Επομένως η καλύτερη γεωμετρία θα είναι όταν ο όγκος είναι μέγιστος και άρα η τιμή του GDOP ελάχιστη. Μία μεγάλη γωνία μεταξύ των δορυφόρων μειώνει την τιμή του GDOP και παρέχει καλύτερης ακρίβειας μετρήσεις ενώ αντίθετα μία μικρή γωνία μεταξύ των δορυφόρων αυξάνει την τιμή του GDOP και παρέχει χειρότερης ακρίβειας μετρήσεις.

2.7. Άλλα συστήματα εντοπισμού θέσεως

Στα συστήματα των παγκόσμιων δορυφορικών συστημάτων πλοήγησης ανήκουν πέρα από το GPS, το παρόμοιο Ρωσικό σύστημα **GLONASS** (GLObal NAVigation Satellite System), καθώς και το πολιτικό ευρωπαϊκό σύστημα **GALILEO**. Το GLONASS δεν έγινε μέχρι σήμερα πλήρως επιχειρησιακό και συνεπώς δεν έτυχε της ευρείας αποδοχής και χρήσης όπως το GPS. Το GALILEO είναι τεχνολογικά περισσότερο προηγμένο, καλύτερων επιδόσεων, ασφαλέστερο και με μεγαλύτερο εύρος εφαρμογών σε συνδυασμό με την κινητή τηλεφωνία και το διαδίκτυο. Πάντως υπάρχουν αρκετές ομοιότητες μεταξύ των τριών συστημάτων.

2.7.1. Το Ρωσικό σύστημα GLONASS

Παράλληλα με το GPS η πρώτη Σοβιετική Ένωση προχώρησε στη δημιουργία ενός παρόμοιου συστήματος παγκόσμιου προσδιορισμού θέσης σύμφωνα με το σχεδιασμό του, ο αστερισμός του θα περιλαμβάνει 24 δορυφόρους (21+3 εφεδρικούς) σε τροχιά, ισοκατανεμημένους σε τρία τροχιακά επίπεδα με οκτώ δορυφόρους στο καθένα. Σε αντίθεση με το GPS, ο κάθε δορυφόρος εκπέμπει τις δικές του συχνότητες βάσει του αριθμού PRN που έχει στο σύστημα. Όλες οι συχνότητες εκπομπής προκύπτουν από δυο βασικές συχνότητες L1 και L2 προσθέτοντας τον αριθμό PRN του κάθε δορυφόρου. Η κάλυψη που προσφέρει το GLONASS (όταν ο αστερισμός των δορυφόρων ολοκληρωθεί) είναι παγκόσμια και

προσφέρει ακρίβεια στον απόλυτο προσδιορισμό θέσης μεταξύ 57-70 m για οριζόντιες συντεταγμένες και 70 m για την κάθετη. Επίσης, στο σύστημα GLONASS δεν έχει εφαρμοστεί και ούτε προβλέπεται να εφαρμοστεί η κατάσταση της επιλεκτικής διαθεσιμότητας. Το σύστημα GLONASS ξεκίνησε με φιλόδοξους στόχους αντίστοιχους με αυτούς του GPS και κατάφερε να διατηρήσει υψηλά επίπεδα εξυπηρέτησης και διαθεσιμότητας δορυφόρων μέχρι και το 1995 περίπου οπότε και οι δορυφόροι που είχαν εκτοξευθεί μέχρι το 1991 άρχισαν να μην λειτουργούν. Από το σημείο αυτό μέχρι σήμερα, η δυσμενής οικονομική κατάσταση που επικρατεί στη Ρωσική Ομοσπονδία δεν επιτρέπει τη χρηματοδότηση τέτοιων προγραμμάτων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα σήμερα να βρίσκονται σε λειτουργία μόνο οκτώ δορυφόροι από τον αστερισμό του GLONASS. Στα πλαίσια ενός πιλοτικού προγράμματος έγινε προσπάθεια για τον υπολογισμό ακριβέστερων τροχιών του συστήματος GLONASS και για τη σύνδεση του συστήματος με το GPS.

2.7.2. Το ευρωπαϊκό σύστημα GALILEO

Το σημαντικότερο ίσως γεγονός στον τομέα των συστημάτων προσδιορισμού θέσης αποτελεί η προσπάθεια της Ευρωπαϊκής Ένωσης να προχωρήσει στη δημιουργία ενός νέου παγκόσμιου συστήματος προσδιορισμού θέσης, του GALILEO. Το νέο σύστημα θα έχει πολιτικό χαρακτήρα και θα καλύπτει με ακρίβεια σχεδόν το 99% της γήινης επιφάνειας. Θα εγγυάται τη διαθεσιμότητα κάτω και από τις πιο ακραίες καταστάσεις παρατήρησης και θα μπορεί να στέλνει τις απαραίτητες πληροφορίες στους χρήστες μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα. Προβλέπεται ότι στις περισσότερες περιοχές θα είναι πάντοτε ορατοί τουλάχιστον έξι έως οκτώ δορυφόροι. Αναπτύσσεται λοιπόν από την Ε.Ε. και την ευρωπαϊκή διαστημική Υπηρεσία (ESA) το σύστημα GALILEO με στόχο την δημιουργία ενός πολιτικού παγκόσμιου συστήματος προσδιορισμού θέσης, χρόνου και ταχύτητας με πλήθος εφαρμογών: στην πλοήγηση κάθε οχήματος και πεζοπόρου, στον έλεγχο των μεταφορών, συγκοινωνιών και τη διαχείριση στόλου οχημάτων κ.ά. Το σύστημα θα αποτελείται συνολικά από 30 δορυφόρους (27+3 εφεδρικούς) τοποθετημένους σε τρία τροχιακά επίπεδα σε μέση γήινη τροχιά, ενώ το ύψος της τροχιάς των δορυφόρων θα είναι περίπου 23.600 km. Το σύστημα GALILEO, θα έχει το δικό του σύστημα ελέγχου και το δικό του πλαίσιο αναφοράς (GTRF: Galileo Terrestrial Reference Frame) το οποίο θα είναι μια υλοποίηση του συστήματος ITRS της IERS. Η διαφορά από το WGS84 και τα άλλα ITRF πλαίσια θα είναι της τάξης των μερικών εκατοστών του μέτρου, πρακτικά αμελητέα για τις μαζικές εφαρμογές πλοήγησης.

2.7.3. Το ελληνικό σύστημα HEPOS

Ο εντοπισμός θέσης μέσω δικτύων μόνιμων σταθμών αναφοράς GPS έχει εξελιχθεί και στον ελληνικό χώρο μέσω ενός νέου ελληνικού συστήματος εντοπισμού θέσης, του **HEPOS**. Το Ελληνικό Σύστημα Εντοπισμού (HEPOS: **H**ellenic **P**ositioning **S**ystem) είναι ένα σύγχρονο σύστημα το οποίο επιτρέπει τον προσδιορισμό θέσης με υψηλή ακρίβεια αξιοποιώντας το υφιστάμενο παγκόσμιο δορυφορικό σύστημα εντοπισμού GPS. Βρίσκεται σε λειτουργία εδώ και περίπου τρία έτη και το μεγαλύτερο μέρος της τοπογραφικής κοινότητας έχει αναγνωρίσει τις δυνατότητες του συστήματος και τα οφέλη από τη χρήση του. Το παρόν Ελληνικό Σύστημα Εντοπισμού αποτελείται από ένα δίκτυο 98 μόνιμων δορυφορικών σταθμών αναφοράς GPS (εικόνα 2.6), 87 δικτυακής λύσης (VRS-FKP-MAC) και 11 μεμονωμένους, ένα Κέντρο Ελέγχου (ΚΕ) που βρίσκεται στις εγκαταστάσεις της ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε. στο Χολαργό Αττικής και ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο που συνδέει αμφίδρομα τους ΣΑ με το ΚΕ. Οι δέκτες GPS των σταθμών αναφοράς βρίσκονται σε συνεχή λειτουργία και αποστέλλουν ανά δευτερόλεπτο τις μετρήσεις τους μέσω του τηλεπικοινωνιακού δικτύου στο κέντρο ελέγχου. Αυτό με τη σειρά του συγκεντρώνει τα στοιχεία των σταθμών αναφοράς, τα επεξεργάζεται σε πραγματικό χρόνο και αποστέλλει στους χρήστες τα δεδομένα που χρειάζονται για τον ακριβή προσδιορισμό θέσης. Έτσι, η εξυπηρέτηση των χρηστών γίνεται πάντοτε μέσω του Κέντρου Ελέγχου. Το HEPOS λειτουργεί εξ' ορισμού σε ένα γεωκεντρικό (ή περίπου γεωκεντρικό) 3D Καρτεσιανό σύστημα αναφοράς, προσφέροντας δυνατότητα προσδιορισμού αντίστοιχων 3D Καρτεσιανών συντεταγμένων για οποιοδήποτε σημείο του Ελλαδικού χώρου. Το σύστημα αυτό αναφοράς των συντεταγμένων του HEPOS ονομάζεται HTRS07 (Hellenic Terrestrial Reference System of 2007) και βασίζεται στο Ευρωπαϊκό Επίγειο Σύστημα Αναφοράς (European Terrestrial Reference System, ETRS89) το οποίο έχει υιοθετηθεί επίσημα από την επιτροπή EUREF της Διεθνούς Ένωσης Γεωδαισίας. Το ETRS89 με τη σειρά του βασίζεται στο Παγκόσμιο Επίγειο Σύστημα Αναφοράς (International Terrestrial Reference System, ITRS) που ελέγχεται από τη διεθνή διεπιστημονική υπηρεσία IERS και αποτελεί το αρτιότερο θεωρητικό υπόβαθρο για όλες τις σύγχρονες εφαρμογές δορυφορικής γεωδαισίας.



Εικόνα 2.6 Το δίκτυο των 98 σταθμών αναφοράς του HEPOS

2.8. Μικρομετακινήσεις και παραμορφώσεις τεχνικών έργων

Κάθε τεχνικό έργο, υπόκειται σε στατική ή και δυναμική φόρτιση. Το ίδιο βάρος ενός τεχνικού έργου αποτελεί στατικό φορτίο, ενώ η σεισμική δράση και η επίδραση του ανέμου, χαρακτηρίζονται ως δυναμικά φορτία. Η φόρτιση ενός τεχνικού έργου έχει ως αποτέλεσμα τη γένεση παραμορφώσεων με ελαστικά ή και μόνιμα χαρακτηριστικά. Σε περίπτωση που οι αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις υπερβούν συγκεκριμένα όρια, τότε το τεχνικό έργο οδηγείται σε αστοχία, με σοβαρές επιπτώσεις που αφορούν στη λειτουργία του φορέα και ενδεχομένως σε ανθρώπινες ζωές. Οι καθιζήσεις τμημάτων του εδάφους οφείλονται ακόμη στις διαβρώσεις και τις υποσκαφές, που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό της εδαφικής μάζας, προερχόμενες είτε από τα υπόγεια ύδατα είτε από τα υπόγεια έργα (π.χ. μεταλλευτικές εργασίες, σήραγγες συγκοινωνιακών έργων). Εκτός όμως από τα παραπάνω, μία ακόμη αιτία των καθιζήσεων είναι το είδος του υπεδάφους. Έτσι, η κοκκώδης σύσταση και η παρουσία μεγάλου ποσοστού αργίλου προκαλούν διόγκωσή του, εξαιτίας της απορρόφησης νερού τους χειμερινούς μήνες και καθίζηση το καλοκαίρι, λόγω της απομάκρυνσης της υγρασίας και τη μετατροπή της αργίλου σε λεπτόκοκκο υλικό. Οι εναλλαγές αυτές προκαλούν αυξομειώσεις του όγκου της αργίλου, με αποτέλεσμα την αποσάθρωση του εδάφους θεμελίωσης. Αξίζει να σημειωθεί, ότι η παραμόρφωση ενός εδαφικού αργιλικού στρώματος, κάτω από την επενέργεια της φόρτισης ενός έργου, εξαρτάται κυρίως, από την προφόρτιση του

εδαφικού υλικού, από την προϋπάρχουσα της φόρτισης εντατική κατάσταση μέσα στο εδαφικό στρώμα καθώς, και από την εντατική κατάσταση που προκαλεί η φόρτιση από το έργο. Σήμερα η πρόοδος των μετρήσεων μέσω GPS και σε συνδυασμό με άλλες τοπογραφικές μεθόδους επιτρέπουν την παρακολούθηση των παραπάνω παραμορφώσεων ώστε να εξαγονται ασφαλή συμπεράσματα για την εξέλιξη ενός τεχνικού έργου που υπόκεινται μικρομετακινήσεις.

2.8.1. Παραμορφώσεις τεχνικών έργων

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται βασικές παραμορφώσεις κύριων τεχνικών έργων όπως γέφυρες, φράγματα και κτίρια. Οι παραμορφώσεις που υφίστανται οι γέφυρες, κατά μείζονα λόγο χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τις μόνιμες και τις δυναμικές (παροδικού χαρακτήρα). Οι μόνιμες παραμορφώσεις οφείλονται στην “κόπωση” του καταστρώματος της γέφυρας λόγω παλαιότητας, στην χαλάρωση των στοιχείων του φορέα (καλώδια, δοκοί) κτλ. Στις δυναμικές κατατάσσονται οι παραμορφώσεις λόγω ανέμου, σεισμικής δράσης, κίνησης των αυτοκινήτων, παλίρροιας, κτλ. Τα φράγματα καλούνται να ανταπεξέλθουν στην πίεση των δυνάμεων που ασκούνται σε αυτά, ενώ θα πρέπει από τον σχεδιασμό τους να έχει προβλεφθεί η επίδραση καταπονήσεων λόγω σεισμικής δράσης, θερμοκρασιακών μεταβολών κτλ. Οι κυριότερες μορφές παραμορφώσεων ενός φράγματος είναι:

- Θραύση ή/και ολίσθηση της θεμελίωσης,
- Εσωτερικές διαβρώσεις και ανάπτυξη υποπίεσης στο πέλμα του φράγματος,
- Εξασθένηση της θεμελίωσης λόγω διαβροχής και αποσάθρωση,
- Μετακίνηση και ερπυσμός πάνω σε επιφάνειες ρηγμάτων,
- Ολισθήσεις, μετακινήσεις ή παραμορφώσεις στα αντερίσματα,
- Διάβρωση-υποσκαφή από πλημμύρες,
- Υπερβολικές παραμορφώσεις στη θεμελίωση του φράγματος,
- Υπερβολικές παραμορφώσεις στο σώμα του φράγματος.

Μεταξύ των κυριότερων αιτίων που προκαλούν παραμορφώσεις σε ένα φράγμα είναι η πίεση που ασκείται μετωπικά στο φράγμα και στο υπέδαφος από τις αυξημένες ποσότητες νερού, οι οποίες δημιουργούν προβλήματα διαβρώσεων, διαρροών ή ακόμα και κατολισθήσεων στην περιοχή του φράγματος.

Τα κτήρια κατασκευάζονται από οπλισμένο σκυρόδεμα, από χάλυβα ή ξύλο, ενώ υπάρχουν και περιπτώσεις εφαρμογής συνθετικών υλικών (π.χ. ανθρακονήματα) και κραμάτων άλλων μετάλλων (π.χ. αλουμίνιο) ή συνδυασμός τους. Τα κτήρια μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε κτήρια για κατοικία, κτήρια για

εργασιακή χρήση, βιομηχανικά κτήρια, καθώς και ειδικά κτήρια (π.χ. πύργοι ελέγχου αεροδρομίων). Μια κτηριακή κατασκευή υπόκειται σε πλήθος διαφορετικών τύπων παραμορφώσεων, εκ των οποίων αναφέρονται:

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

Τα τεχνικά έργα είναι αποδέκτες δυναμικών φορτίσεων που προκαλούν παραμορφώσεις των οποίων οι πηγές ανάλογα τον τύπο και το μέγεθος του έργου πρέπει να μελετηθούν πριν την κατασκευή τους, έτσι ώστε να γίνει ποσοτική περιγραφή των φαινομένων αυτών και των επιπτώσεων που θα έχουν στην κατασκευή σε όλη την διάρκεια της ζωής της.

2.8.2. Επίδραση των αργιλικών εδαφών στις μετακινήσεις

Οι άργιλοι ως λεπτόκοκκα συμπιεστά, συνεκτικά υλικά, με πολύ μικρή διαπερατότητα έχουν ως αποτέλεσμα οι ιδιότητές τους εξαρτώνται από την ορυκτολογική τους σύσταση. Η παραμόρφωση ενός εδαφικού αργιλικού στρώματος, κάτω από την επίδραση της φόρτισης ενός τεχνικού έργου, εξαρτάται κυρίως από την προϊστορία των φορτίσεων του εδαφικού υλικού, από την εντατική κατάσταση μέσα στο εδαφικό στρώμα, καθώς και από την εντατική κατάσταση που προκαλεί η φόρτιση του τεχνικού έργου. Η καθίζηση που προκαλείται από τα φορτία μιας κατασκευής σε στρώμα κορεσμένης αργίλου, εξελίσσεται σύμφωνα με την ακόλουθη διαδικασία. Πριν από την επιβολή του φορτίου του τεχνικού έργου στο έδαφος, εξαιτίας της εκσκαφής μέχρι τη στάθμη θεμελίωσης, παρατηρείται ότι το έδαφος αποτονώνεται προς τα άνω, σαν συνέπεια της αποφόρτισής του από τα φορτία των υπερκειμένων (της στάθμης θεμελίωσης) γαιών. Με την έναρξη της κατασκευής του

τεχνικού έργου, το έδαφος καθιζάνει, εξαιτίας της επιβολής των φορτίσεων, μέχρις ότου η πρόσθετη πίεση γίνει ίση προς το φορτίο των γαιών της εκσκαφής, δηλαδή η πρόσθετος κατακόρυφη πίεση να μηδενισθεί. Όσο εξελίσσεται η κατασκευή του τεχνικού έργου, τα φορτία αυξάνουν, επομένως αυξάνεται η πρόσθετη κατακόρυφη πίεση και η καθίζηση συνεχίζεται. Εάν η κατασκευή ολοκληρωθεί αρκετά γρήγορα, η καθίζηση που εμφανίζεται με την ολοκλήρωση της κατασκευής, οφείλεται κυρίως στη διαμητική παραμορφωσιμότητα της αργίλου, γίνεται ουσιαστικά υπό αστραγγιστες συνθήκες και ονομάζεται «άμεση» ή «ελαστική» καθίζηση. Με την επιβολή των φορτίων της κατασκευής, η πίεση του νερού των πόρων αυξάνεται και στη συνέχεια αρχίζει να αποτονώνεται. Η διαδικασία αυτή έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή του όγκου του υπεδάφους, κι έτσι η κατασκευή υπόκειται σε περαιτέρω καθίζηση, που ονομάζεται καθίζηση λόγω στερεοποίησης. Το μέγεθός της αυξάνει με την πάροδο του χρόνου, αλλά ο ρυθμός μεταβολής της μειώνεται σταδιακά μέχρι το μηδενισμό της, σε χρονικό διάστημα που εξαρτάται από το συντελεστή στερεοποίησης της αργίλου και τις συνθήκες στραγγίσεως.



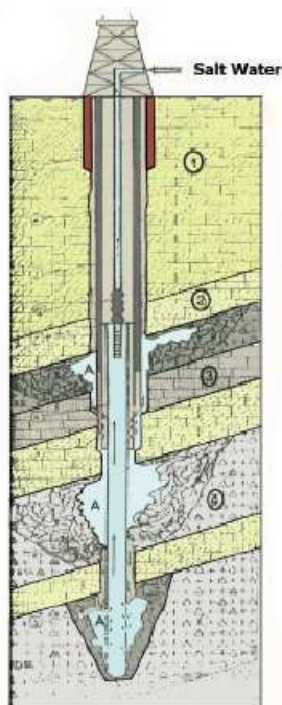
Εικόνα 2.7 Μετακίνηση πρηνούς αργιλώδους εδάφους προς το οδικό δίκτυο

Η συνολική καθίζηση μετά το μηδενισμό της πίεσης των πόρων ονομάζεται «πρωτογενής καθίζηση» και ισούται με το άθροισμα της άμεσης καθίζησης και της καθίζησης λόγω στερεοποίησης. Σε μερικές όμως αργίλους, η καθίζηση συνεχίζεται και μετά την ολοκλήρωση της στερεοποίησης, και παρατηρείται μια μακράς διάρκειας

καθίζηση υπό τύπο ερπυσμού. Η καθίζηση αυτή, υπό ουσιαστικά σταθερές ενεργές πιέσεις, μπορεί να συνεχίζεται επί πολλά χρόνια και είναι γνωστή με τον όρο «δευτερεύουσα» ή «δευτερογενής» καθίζηση. Έτσι, τελικά, η συνολική καθίζηση, σε ένα αργιλικό έδαφος θεμελίωσης, αποτελείται από τρεις συνιστώσες, από τις οποίες οι δύο αποτελούν την πρωτογενή καθίζηση και η τρίτη τη δευτερεύουσα ή δευτερογενή καθίζηση.

2.8.3. Μετακινήσεις τεχνικών έργων σε περιοχές ορυχείων

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω η μετακίνηση των εδαφών που συντελούν και στην μετακίνηση των τεχνικών έργων συντελείται και από ανθρώπινους παράγοντες και μάλιστα από τη λειτουργία ορυχείων στην περιοχή. Αναφέρεται ως παράδειγμα η περιοχή στην πόλη Tuzla στη Βοσνία-Ερζεγοβίνη όπου από τις αρχές του περασμένου αιώνα ξεκίνησε η εξόρυξη άλατος χάρη στην πλειονότητα κοιτασμάτων που είχαν ανακαλυφθεί ακόμη από τον 15^ο αιώνα επί κυριαρχίας Οθωμανών, μάλιστα στην τουρκική η λέξη Tuz σημαίνει αλάτι. Τα κοιτάσματα εκτεινόταν σε μία ελλειψοειδής έκταση περίπου δύο τετραγωνικών χιλιομέτρων κάτω από την πόλη.

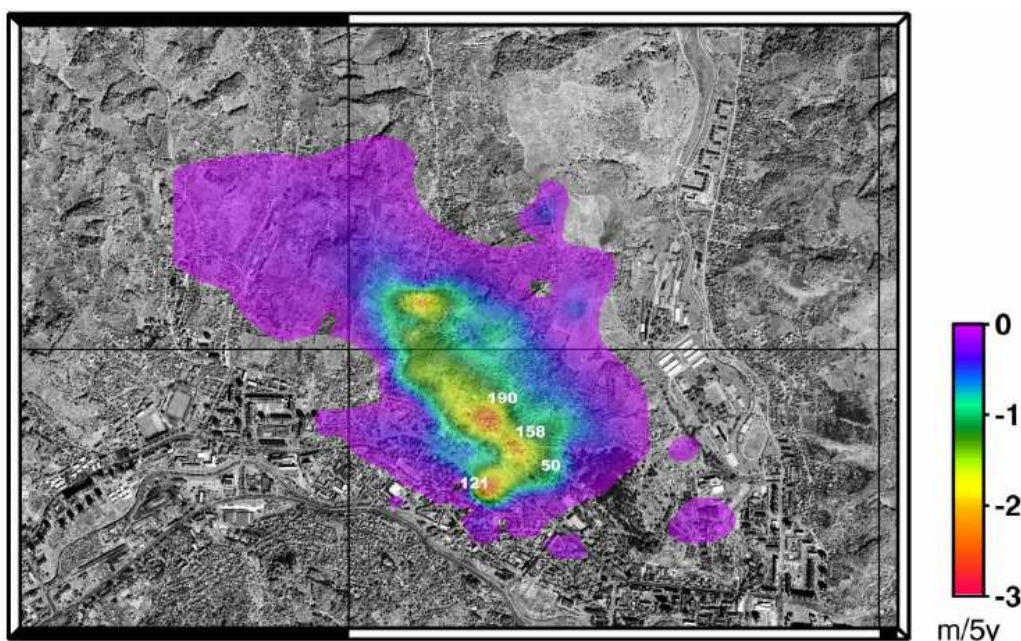


Εικόνα 2.8 Εξόρυξη άλατος (τομή)

Τα πρώτα χρόνια πραγματοποιούνταν μία ανεξέλεγκτη εξόρυξη με τη μέθοδο των γεωτρήσεων, εκσκαφών και άλλων τεχνικών πηγαδιών, κάτι που δημιούργησε σημαντικές κοιλότητες στο υπέδαφος και αντίστοιχα σε παραμορφώσεις στην περιοχή. Αν και οι πρώτες τοπογραφικές μετρήσεις έλαβαν χώρα το 1914, ωστόσο η συστηματική μελέτη για τον καθορισμό του ποσοστού καθίζησης ξεκίνησε το 1956 με

1500 σταθερά σημεία, ενώ το ενδιαμέσο διάστημα οι τοπογραφικές μετρήσεις είχαν αναφέρει μέγιστη καθίζηση 10 μέτρα προκαλώντας καταστροφές στα υπόγεια δίκτυα ύδρευσης και άρδευσης, στο κυκλοφοριακό δίκτυο και ακόμη σε αστικά κτίρια. Τα τελευταία χρόνια γίνονται προσπάθειες περιορισμού της εξόρυξης άλατος με σκοπό την εκβάθυνση της έρευνας μέσω νέων τεχνολογικών μεθόδων. Από το 2002 υπάρχει συνεργασία του CIRSA (Διατμηματικό κέντρο για τις περιβαλλοντικές επιστήμες, Ravenna, Italy) με την πόλη της Tuzla για την παρακολούθηση των μετακινήσεων συνδυάζοντας δορυφορικές εικόνες και επίγειου δικτύου με σχετικό στατικό εντοπισμό θέσης έτσι ώστε να εκτιμηθεί η ζώνη κινδύνου από τις καθιζήσεις γύρω από την αστική περιοχή.

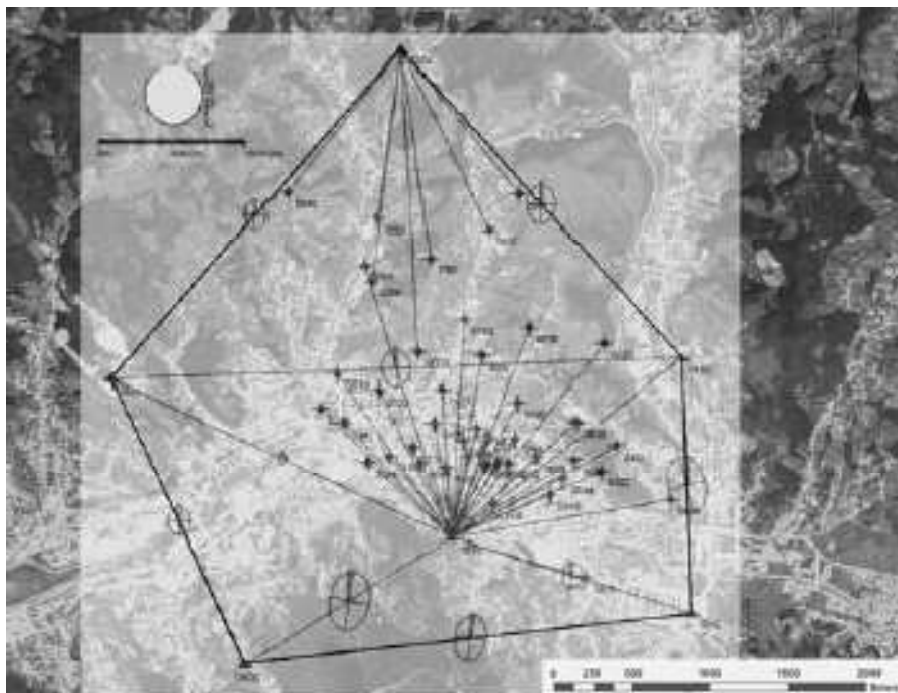
Τον Ιούνιο του 2000 αποκτήθηκε μία εικόνα υψηλής ανάλυσης (διακριτικής ικανότητας 1μ.) από τον δορυφόρο IKONOS η οποία ήταν χρήσιμη για τον διαχωρισμό αστικής περιοχής και βλάστησης και άλλων γεωμετρικών χαρακτηριστικών χάρη στην παγχρωματικά δεδομένα του δορυφόρου. Η εικόνα χρησιμοποιήθηκε επίσης για να αναδείξει το μέχρι τότε ιστορικό καθιζήσεων μέσω φωτογραμμετρικών μεθόδων. Η έντονη καθίζηση που διακρίνεται σε ένα ελλειψοειδές σχήμα επιβεβαιώνει το λόγο της καθιζήσης που είναι η εξόρυξη αλατιού, το μέγεθος της οποίας φαίνεται στην εικόνα 2.9.



Εικόνα 2.9 Χρωματική διαβάθμιση της καθιζήσης από την εικόνα του IKONOS

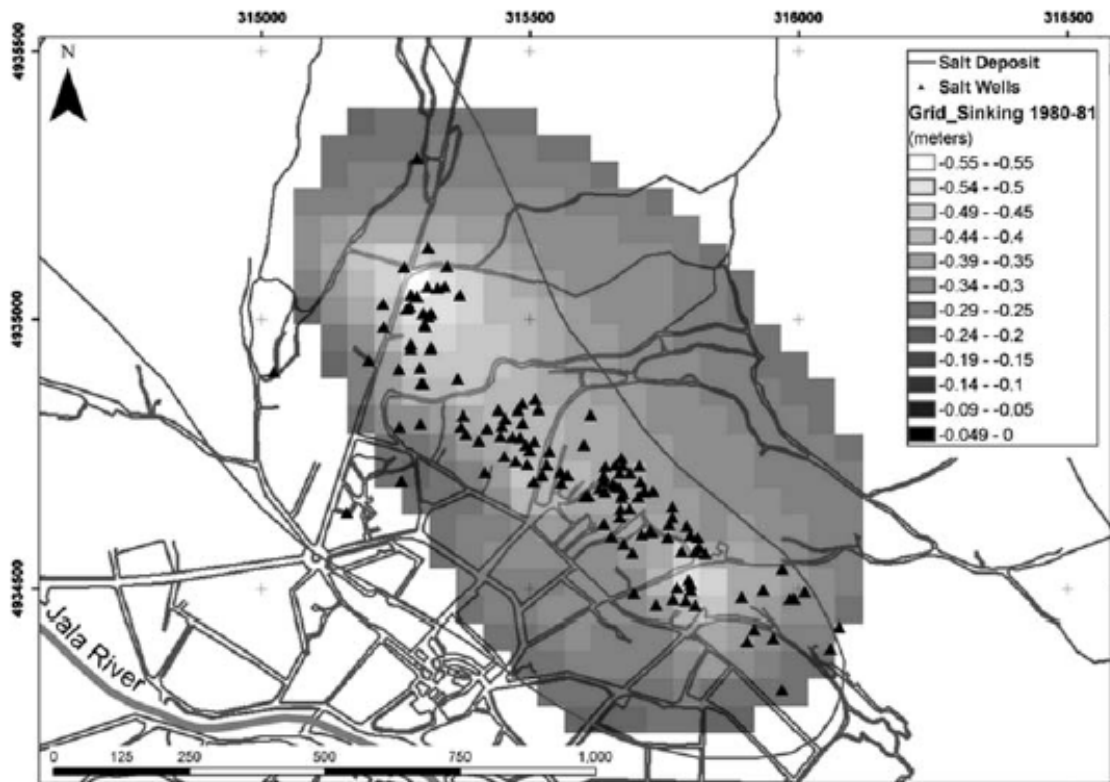
Από τον πόλεμο στην Γιουγκοσλαβία μέχρι το 2001 δεν υπήρχαν τοπογραφικά δεδομένα για την περιοχή, γι' αυτό αποφασίστηκε το 2004 να εφαρμοστεί μία παραγωγική και πιο σύγχρονη διαδικασία προσδιορισμού θέσεως των σημείων του δικτύου με δορυφορικές μετρήσεις. Οι νέες πληροφορίες και τα νέα ποσοστά

καθίζησης θα βοηθούσαν στην μελλοντική πολεοδομική ανάπτυξη της περιοχής ενώ με το σωστό σχεδιασμό του δικτύου θα παρέχονταν ακρίβεια της τάξης 3-4mm το χρόνο. Έτσι ιδρύεται ένα δίκτυο σταθερών σημείων, των οποίων η θέση προσδιορίζεται με τη μέθοδο του στατικού εντοπισμού. Έξι σημεία τοποθετούνται γύρω και σε μακρινή απόσταση από την υπό μελέτη περιοχή που δεν επηρεάζονται από τις καθιζήσεις και χρησιμοποιούνται ως σημεία αναφοράς, ενώ άλλα εξήντα σημεία καλύπτουν, κατά το δυνατό ομοιόμορφα, την περιοχή που παρατηρούνται οι καθιζήσεις, όπως στην εικόνα 2.10.



Εικόνα 2.10 Γραφική αναπαράσταση του δικτύου που δημιουργήθηκε

Το δίκτυο εντάχθηκε στο διεθνές σύστημα αναφοράς ITRF (2000) με πρώτη μέτρηση των 6 σημείων αναφοράς και ύστερα από ένα χρόνο ξαναμετρήθηκε το δίκτυο ώστε να διασφαλιστεί η ποιότητα των 6 αυτών σημείων. Τα 60 σημεία που αφορούν την περιοχή καθίζησης προσδιορίζονται ως προς τα 6 εξωτερικά σημεία. Έτσι μετρήσεις των σημείων το 2004 και 2005 έδειξαν μέση μετακίνηση των 60 σημείων κατά 14cm ενώ μέγιστη 22cm. Παρατηρήθηκε μείωση της καθίζησης που εξαρτάται από την μείωση του ρυθμού εξόρυξης, επίσης με τη μέθοδο του GPS θα μπορέσει να προσδιοριστεί η καθίζηση που έλαβε χώρα εάν αντιστοιχεί με τα 730000m³ αλατιού που εξορύχθησαν όλα τα χρόνια. Ο συνδυασμός των μετρήσεων GPS με δορυφορικές εικόνες επιτρέπει στην ομάδα μελέτης σήμερα να προσδιορίσει ότι τα επόμενα 1-2 χρόνια 835 κτίρια θα πληγούν από την καθίζηση σε συγκεκριμένες θέσης της πόλης.



Εικόνα 2.11 Τα σημεία του δικτύου που ιδρύθηκε και οι καθιζήσεις πέριξ αυτών

2.9. Μόνιμα δίκτυα σταθμών GPS

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα τα τεχνικά έργα είναι ευαίσθητα σε κινήσεις, οι οποίες μπορεί να είναι εντός των προδιαγραφών της κατασκευής ή εκτός από αυτές. Από τα μεγάλα τεχνικά έργα που επηρεάζονται από τέτοιες κινήσεις είναι τα φράγματα. Η παρακολούθηση των φραγμάτων αρχίζει από τα πρώτα στάδια κατασκευής τους ώστε να διαπιστωθεί αν η πορεία κατασκευής συμβαδίζει με τον ανάλογο σχεδιασμό που έχει γίνει. Με την ολοκλήρωση της κατασκευής η παρακολούθηση συνεχίζεται για την αξιολόγηση της σταθερότητας και της συμπεριφοράς του φράγματος ώστε να ανταποκρίνεται πλήρως η λειτουργικότητά του. Βασικό μειονέκτημα των γεωτεχνικών συστημάτων μέτρησης του φράγματος είναι ότι οι παρατηρήσεις περιορίζονται στις περιοχές εκείνες που έχει σχεδιασθεί να τοποθετηθούν τα όργανα μέτρησης. Εκτός από τα φράγματα, τα άλλα είδη των τεχνητών κατασκευών, όπως αυτοκινητόδρομοι, γέφυρες, καθώς και πολυώροφα κτίρια είναι εφικτό να παρακολουθούνται με μόνιμα δίκτυα GPS. Ακόμη, η συνεχής καταγραφή δεδομένων από τους δορυφόρους, χρησιμοποιώντας επίγεια μεθόδους μέτρησης δύναται να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση της υγείας των τεχνητών κατασκευών και έτσι παρέχουν αξιόπιστες πληροφορίες για θέματα της δημόσιας ασφάλειας και την κατασκευή αντισεισμικών κατασκευών. Η παρακολούθηση της ακεραιότητας των τεχνητών κατασκευών, απαιτεί μετρήσεις

υψηλής ακριβείας από ένα ισχυρό σύστημα, όσο το δυνατόν πλησιέστερα στον πραγματικό χρόνο. Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιαστεί η περίπτωση εγκατάστασης μόνιμου δικτύου ελέγχου του φράγματος της Pacoima στην Καλιφόρνια των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής (Η.Π.Α.).

2.9.1. Δίκτυο μόνιμων σταθμών GPS του φράγματος Pacoima

Το φράγμα Pacoima βρίσκεται στην Καλιφόρνια των Η.Π.Α. κατασκευάστηκε το 1928 και έχει ύψος 113μ., όταν κατασκευάστηκε ήταν το υψηλότερο τοξωτό φράγμα στις Η.Π.Α. Το φράγμα αν και άντεξε δύο μεγάλους σεισμούς το 1971 και 1994, ωστόσο υπέστη μεγάλες ζημιές και λόγω των ανησυχιών των τοπικών αρχών για τη σταθερότητα του και την ανταπόκρισή του σε μελλοντικούς σεισμούς, ξεκίνησε η συνεχής παρακολούθηση της κατασκευής με τη χρήση του GPS. Τον Σεπτέμβριο του 1995, αναπτύχθηκε ένα σύστημα συνεχούς λειτουργίας δεκτών GPS για την παρακολούθηση των μετακινήσεων του φράγματος Pacoima συναρτήσει ενός σταθερού σταθμού στον τοπικό σταθμό πυροσβεστικής 2,5 χλμ. μακριά από το φράγμα. Για τον συγκεκριμένο τύπο φράγματος πέρα από τα σημεία ελέγχου που βρίσκονται οι κεραιές των δεκτών για την παρακολούθηση μετακινήσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλες τεχνικές συλλογής δεδομένων όπως η φωτογραμμετρία και η σάρωση με λέιζερ. Οι δύο δέκτες συνεχούς λειτουργίας DAM1 και DAM2 εγκαταστάθηκαν στην κορυφή του φράγματος όπως φαίνονται στην παρακάτω εικόνα 2.12. Οι κεραιές των δεκτών είναι τοποθετημένες σε έναν χαλύβδινο πυλώνα με την κορυφή να τη σκεπάζει ένα κωνικό κάλυμμα όπως διακρίνεται στην εικόνα 2.13.



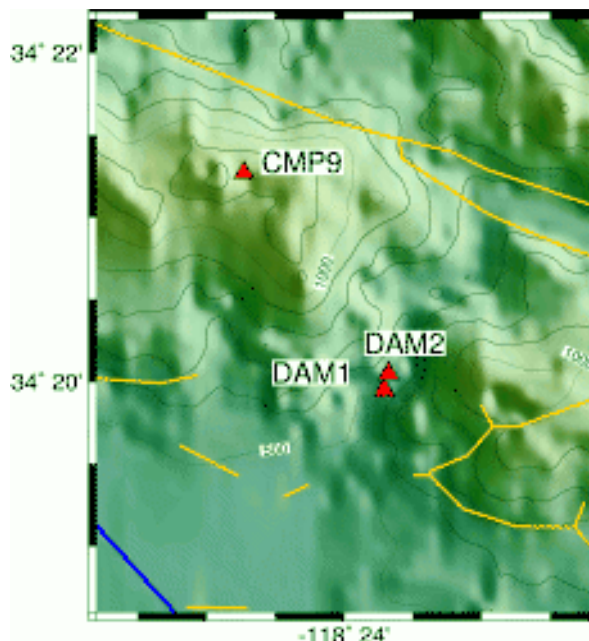
Εικόνα 2.12 Οι θέσεις των δύο δεκτών GPS στην κορυφή του φράγματος



Εικόνα 2.13 Η κεραία του δέκτη GPS στο εσωτερικό του χαλύβδινου πυλώνα

Ο δέκτης GPS και ο τηλεπικοινωνιακός εξοπλισμός βρίσκονται εντός του σιδερένιου ηλεκτρικού κουτιού επί του συρματοπλέγματος που διασχίζει το φράγμα. Το σημείο αναφοράς με τον σχετικό δέκτη αναφοράς (σημείο CMP9) εγκαταστάθηκαν 2,5 χλμ.

σε σταθερό βράχο μακριά και έξω από το απότομο φαράγγι που βρίσκεται το φράγμα, όπως διακρίνεται στην εικόνα 2.14.

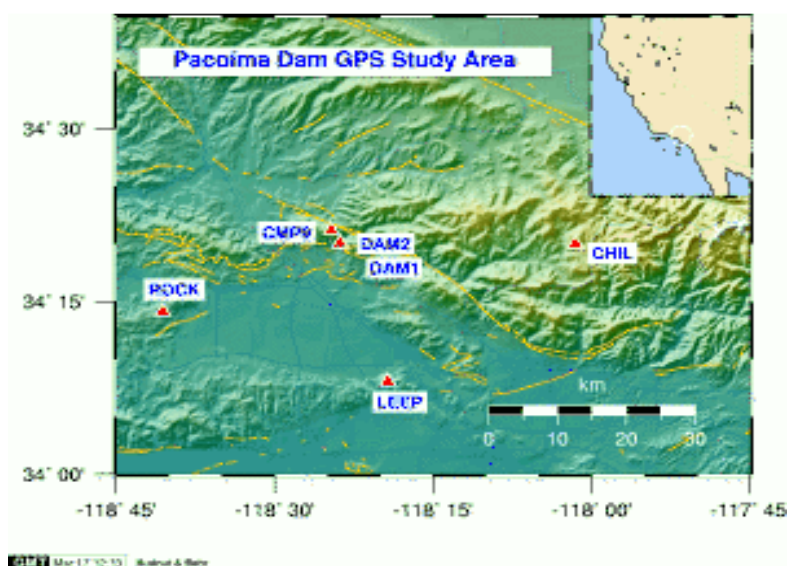


Εικόνα 2.14 Η θέση του σταθερού σημείου σε σύγκριση με τους δέκτες του φράγματος

Επίσης τρεις ακόμη σταθμοί GPS, σε απόσταση μέχρι τριάντα χιλιομέτρων του δικτύου GPS της Νότιας Καλιφόρνιας, παρείχαν δεδομένα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη μέθοδος παρακολούθησης είναι ιδιαίτερα δαπανηρή καθώς κάθε σταθμός του μόνιμου δικτύου κοστολογείται περί τα είκοσι χιλιάδες δολάρια συμπεριλαμβανομένων του δέκτη, της κεραίας και μιας αξιόπιστης σύνδεσης επικοινωνίας. Παρόλο που το σύστημα GPS που αναφέρεται δεν είναι κατάλληλο για τη μέτρηση των μετακινήσεων κατά τη διάρκεια μιας σεισμικής δραστηριότητας, καθώς οι δέκτες λαμβάνουν μετρήσεις κάθε τριάντα δευτερόλεπτα (χρόνος που μπορεί να έχει ολοκληρωθεί ένας σεισμός), είναι κατάλληλο για τη μέτρηση των στατικών μετατοπίσεων μιας ολοκληρωμένης δομής μερικές ώρες μετά το σεισμό. Η εγκατάσταση και η μελέτη του παρόντος δικτύου είναι ένα ολοκληρωμένο σύστημα ικανό να προσδιορίσει το δυναμικό εύρος της συμπεριφοράς μιας κατασκευής μετά από έναν μεγάλο σεισμό. Ακόμη ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξεταστεί η συμπεριφορά της κατασκευής στην επιρροή άλλων δυνάμεων όπως η πίεση του νερού, επιδράσεις από την αλλαγή θερμοκρασίας και τον άνεμο ή και δομικές αλλαγές των υλικών στην πάροδο του χρόνου.

2.9.2. Λειτουργία του συστήματος

Το ισχύον σύστημα στο φράγμα Pacoima χρησιμοποιεί δέκτες διπλής συχνότητας κώδικα P. Τα δεδομένα λαμβάνονται με ρυθμό 30 δευτερολέπτων αν και οι συγκεκριμένοι δέκτες παρέχουν τη δυνατότητα συχνότερων μετρήσεων. Η αποθήκευση των δεδομένων πραγματοποιείται στην εσωτερική μνήμη των δεκτών και η λήψη διεξάγεται μέσω τηλεφωνικής γραμμής και συσκευών μόντεμ μία φορά την ημέρα. Μόλις τα αρχεία ανακτηθούν από το τοπικό επιχειρησιακό κέντρο μεταφέρονται άμεσα στο διαδίκτυο για την αρχειοθέτησή τους στο Ινστιτούτο Ωκεανογραφίας Scripps (SIO). Από τις αρχές του 1996 όλα τα δεδομένα του συστήματος αναλύονται και μελετώνται καθημερινά στο Αμερικάνικο Ινστιτούτο Γεωλογίας και Τοπογραφίας (USGS) ως υποσύνολο του μόνιμου δικτύου της Νότιας Καλιφόρνιας. Κάθε σταθμός χρησιμοποιούσε δέκτη Ashtech Z-12 και σχετική κεραία λήψης αν και χρειάστηκε μία αλλαγή κεραίας τον Οκτώβριο του 1996 στο σταθμό DAM2. Τα ημερήσια αρχεία δεδομένων από τους τρεις σταθμούς συνεχούς καταγραφής του φράγματος μαζί με άλλους τρεις κοντινούς σταθμούς του δικτύου της Καλιφόρνια, που διακρίνονται στην παρακάτω εικόνα, επεξεργάστηκαν για το χρονικό διάστημα 1 Σεπτεμβρίου του 1995 έως και 9 Νοεμβρίου του 1997 λαμβάνοντας υπ' όψιν τις μετρήσεις κάθε 120 δευτερολέπτων και όχι των 30 που πραγματοποιούταν η λήψη.



Εικόνα 2.15 Το σύνολο των έξι σταθμών επεξεργασίας δεδομένων

Αν και οι σταθμοί καταγράφουν δεδομένα από δορυφόρους που βρίσκονται σε γωνία 10deg υψηλότερα από τον ορίζοντα για την επεξεργασία χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα δεδομένα από τα 15deg και άνω για να εξασφαλιστεί καλύτερη γεωμετρία των δορυφόρων. Λόγω της απότομης κλίσης στο φαράγγι οι σταθμοί DAM1 και

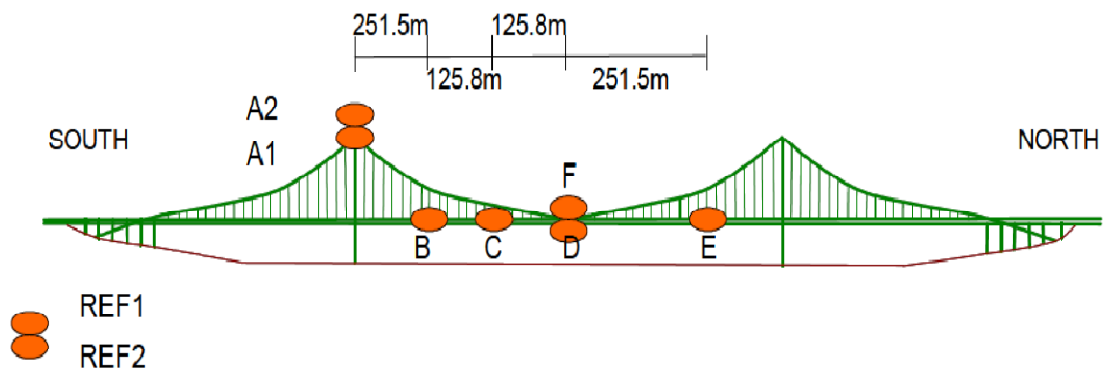
DAM2 συνήθως λαμβάνουν δεδομένα σε κλίση 30deg και άνω. Έτσι οι υπόλοιποι σταθμοί παρέχουν περίπου 4800 παρατηρήσεις ημερησίως οι δύο προαναφερθέντες σταθμοί παρέχουν περί τις 4000 παρατηρήσεις λόγω του περιορισμού των 30deg. Το γεγονός αυτό ωστόσο δεν διαπιστώθηκε ότι μειώνει την ακρίβεια των λύσεων για τις συγκεκριμένες θέσεις. Με τη συλλογή των δεδομένων και την επίλυση του δικτύου των έξι σταθμών χρησιμοποιήθηκαν και οι δύο συχνότητες L1 και L2 και το συνολικό σφάλμα του δικτύου περιορίζεται στα 5cm οριζοντιογραφικά και 12cm υψομετρικά. Δοκιμάστηκε ακόμη να χρησιμοποιηθούν και άλλες αναλύσεις όπως ξεχωριστή λύση για την L1 και L2 συχνότητα και η διαδικασία απέδωσε φτωχά αποτελέσματα. Λύσεις που προέρχονται από παρατηρήσεις στη μία μόνο συχνότητα είναι σκόπιμο να εφαρμόζονται σε μικρές βάσεις <5χλμ. για να αποφεύγεται το σφάλμα από την ιονόσφαιρα, το οποίο είναι αμελητέο σε τέτοιες αποστάσεις. Κατά την επίλυση του δικτύου των 4 περιφερειακών σταθμών πλην των DAM1 και DAM2 ξεχωριστά αυξάνεται η ακρίβεια στα 1cm οριζοντιογραφικά και 5cm υψομετρικά.

Κατά την επίλυση του δικτύου εξετάστηκαν οι βάσεις μεταξύ των τριών σημείων του φράγματος (CMP9-DAM1, CMP9-DAM2, DAM1-DAM2), πραγματοποιήθηκε τριγωνισμός. Μετά την λειτουργία του συστήματος παρακολούθησης παρατηρήθηκε μετακίνηση προς τα δυτικά του κέντρου του φράγματος κατά τη διάρκεια του φθινοπώρου και του χειμώνα ενώ αντίθετη παραμόρφωση κατά τη διάρκεια της άνοιξης και του καλοκαιριού. Κάτι τέτοιο οφείλεται στην θερμοελαστική παραμόρφωση των υλικών και είναι αρκετά συχνά αποτέλεσμα των εποχικών επιπτώσεων. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, λόγω μεταβολών στη θερμοκρασία ή στις διακυμάνσεις του υδραυλικού φορτίου εντός του ταμιευτήρα. Σημειώνεται ότι αν ερμηνευτούν τα αποτελέσματα ως θερμοελαστική παραμόρφωση του φράγματος, πρέπει να σημειωθεί ότι το φράγμα, ανταποκρίνεται και στις περιφερειακές θερμοελαστικές επιπτώσεις στο βραχώδες υπόστρωμα στο οποίο εδράζεται. Όπως το θεμέλιο θερμαίνεται όλο το χρόνο, με συνέπεια τη διαστολή και συστολή του, έτσι θα δημιουργήσει κίνηση στην ελεύθερης επιφάνεια των τοίχων στο φράγμα. Λογικό συμπέρασμα είναι ότι το φράγμα Ρακοίμα ανταποκρίνεται κυρίως στις μεταβολές της θερμοκρασίας του αέρα, τόσο σε ετήσια όσο και σε μικρότερα χρονικά διαστήματα. Η τοποθέτηση ενός πλήρους μετεωρολογικού εξοπλισμού θα έδινε καλύτερα δεδομένα για τη θερμοκρασία του αέρα και έτσι να δημιουργηθεί ένα μοντέλο που θα επιτρέψει την αφαίρεση της θερμοελαστικής παραμόρφωσης από τα δεδομένα του δικτύου. Κάτι τέτοιο επιτρέπει μια πιο λεπτότερη εξέταση στην μετατόπιση του φράγματος και βελτιώνει την ικανότητα να επιλύονται σήματα που ενδέχεται να προκαλούν ανησυχίες για τη δομική ακεραιότητα.

2.10. Δυναμική παρακολούθηση τεχνικών έργων

2.10.1. Παρακολούθηση της Γέφυρας Forth Road, με Χρήση του GPS

Το πείραμα διεξήχθη από τα πανεπιστήμια Nottingham και Brunel του Λονδίνου, στην γέφυρα Forth road της Σκωτίας, τον Φεβρουάριο του 2005. Σκοπός του πειράματος ήταν η παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς της γέφυρας προκειμένου να υπολογιστούν οι μετατοπίσεις του καταστρώματος σε πραγματικές συνθήκες κυκλοφοριακού φόρτου. Η παρακολούθηση του καταστρώματος της γέφυρας έγινε με την βοήθεια επτά δεκτών GPS δύο συχνοτήτων (εικόνα 2.16) , οι οποίοι τοποθετήθηκαν κατά μήκος του καταστρώματος καθώς και δυο δεκτών οι οποίοι λειτούργησαν ως σταθμοί αναφοράς και είχαν τοποθετηθεί σε κοντινό κτίριο όπως φαίνονται στις εικόνες 2.17 και 2.18.



Εικόνα 2.16 Θέσεις των επτά δεκτών GPS που τοποθετήθηκαν πάνω στη γέφυρα



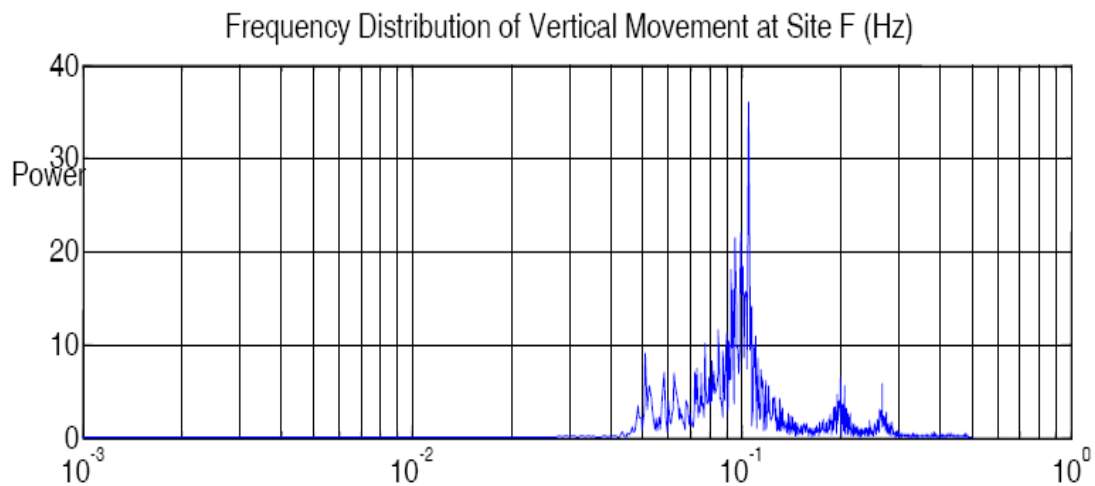
Εικόνα 2.17 Οι δύο δέκτες Leica που χρησιμοποιήθηκαν ως σταθμοί αναφοράς



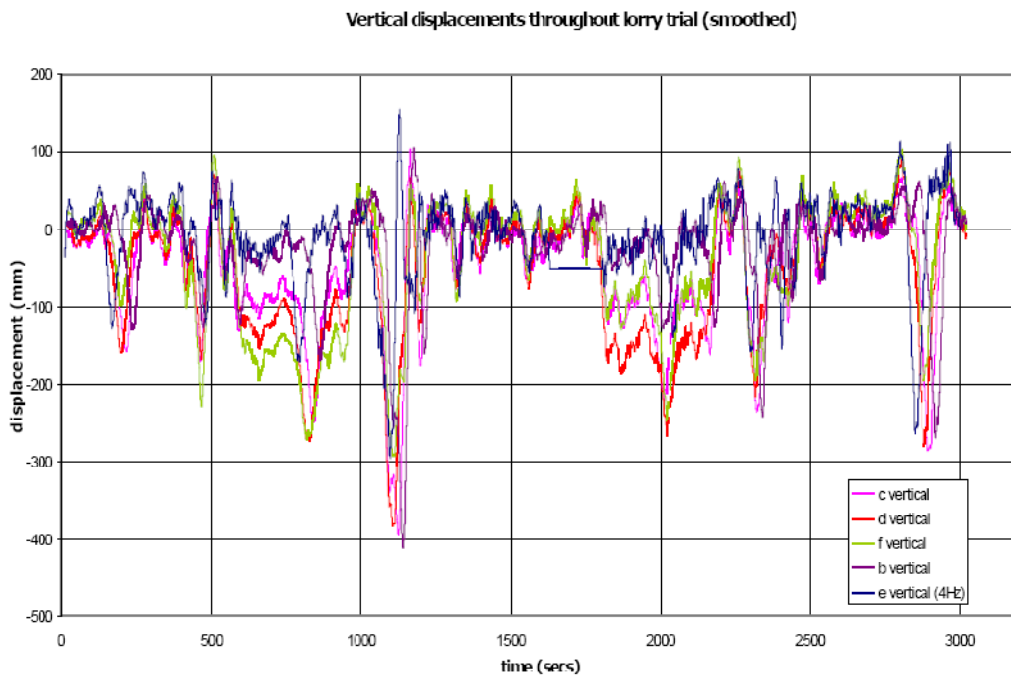
Εικόνα 2.18 Δέκτης τοποθετημένος επί της γέφυρας

Το πείραμα διήρκησε συνολικά 46 ώρες και τα δεδομένα συλλέχθηκαν με ρυθμό καταγραφής τα 10 Hz. Η επίλυση έγινε με την “Εν κινήσει επίλυση ασαφειών” (On The Fly), ενώ οι συντεταγμένες υπολογίστηκαν στο σύστημα αναφοράς WGS84. Επίσης κατεγράφησαν και δεδομένα θερμοκρασίας, πίεσης, ταχύτητας, σχετικής υγρασίας, καθώς και κατεύθυνσης ανέμου με την βοήθεια του μετεωρολογικού σταθμού Omni Instrument και ρυθμό καταγραφής δεδομένων ανά 15 sec. Το κατάστρωμα της γέφυρας υπέστη μεταβολή κατά τον διαμήκη, τον εγκάρσιο και τον κατακόρυφο άξονα της σε όλη την 46ωρη διάρκεια του πειράματος κάτι της τάξεων των δεκατόμετρων. Επίσης, κατά τη διάρκεια της δεύτερης νύχτας, οι παραμορφώσεις ήταν εντονότερες από την πρώτη, γεγονός που οφείλεται στην ύπαρξη ισχυρών ανέμων που έπνεαν στην περιοχή. Σε σύγκριση της μεταβολής του ύψους του καταστρώματος της γέφυρας, συναρτήσει της θερμοκρασιακής μεταβολής, η μεταβολή στο ύψος της γέφυρας σχετίζεται με το φαινόμενο συστολής-διαστολής των καλωδίων υποστήριξης του καταστρώματος. Επιπλέον πειράματα διεξήχθησαν με την τοποθέτηση ελεγχόμενου φορτίου στο κατάστρωμα της γέφυρας και συγκεκριμένα ενός φορτηγού 100t και δύο φορτηγών 40t έκαστο τα οποία διέσχισαν τη γέφυρα χωρίς άλλο κυκλοφοριακό φόρτο, και εκτελώντας διάφορους

ελιγμούς επάνω στο κατάρωμα αυτής. Σκοπός αυτής της διαδικασίας ήταν να υπολογιστεί η σχέση μεταξύ των ταλαντώσεων του καταστρώματος της γέφυρας και του φορτίου που την διασχίζει, κάτι το οποίο δεν ήταν εφικτό να υπολογιστεί σε συνθήκες πραγματικής κυκλοφορίας οχημάτων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συνοπτικά για το όχημα των 100 t στην εικόνα 2.19, ενώ για τα οχήματα των 40 t, στην εικόνα 2.20.



Εικόνα 2.19 Βασική συχνότητα στη διέλευση του φορτηγού 100t



Εικόνα 2.20 Υψομετρικές μεταβολές στην κίνηση των δύο φορτηγών 40t

2.10.2. Παρακολούθηση παραμορφώσεων στη γέφυρα Rio Pelotas στη Βραζιλία, με χρήση Ρομποτικού Γεωδαιτικού Σταθμού (RTS)

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο LAIG (Geodetic Instrumentation Laboratory) του Federal University of Paraná και περιελάμβανε δύο σκέλη: Το πρώτο σκέλος αφορά στην παρακολούθηση ενός ελεγχόμενα κινούμενου στόχου από το όργανο σε εργαστηριακό επίπεδο περιλαμβάνοντας μετρήσεις σε εσωτερικό και εξωτερικό χώρο, ενώ το δεύτερο σκέλος περιελάμβανε τη δυναμική παρακολούθηση σε πραγματικές συνθήκες της γέφυρας Rio Pelotas με το ίδιο όργανο. Σκοπός του εγχειρήματος είναι η εφαρμογή ρομποτικού γεωδαιτικού σταθμού προκειμένου να γίνει μια εκτίμηση της ακρίβειας προσδιορισμού των δυναμικών παραμορφώσεων που μπορεί να υποστεί μια κατασκευή και κυρίως μια γέφυρα. Τα όργανα και τα παρελκόμενα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν:

- ρομποτικός Γεωδαιτικός Σταθμός Leica TCRA 1205,
- γεωδαιτικός Σταθμός Leica TC2002,
- πρίσμα 360°,
- κυκλικό πρίσμα,
- συσκευή ελεγχόμενης ταλάντωσης του στόχου κατά τον κατακόρυφο άξονα

Η συσκευή ταλάντωσης του στόχου παρείχε την δυνατότητα ταλάντωσης του στόχου κατά τον κατακόρυφο άξονα με μέγιστο πλάτος ταλάντωσης τα 1.4 m και περίοδο ταλάντωσης από 1 sec έως 25 sec (1 Hz - 0.04 Hz).

Στον χώρο του εργαστηρίου, τοποθετήθηκε το πρίσμα επάνω στην συσκευή ταλάντωσης, της οποίας το μέγιστο πλάτος περιορίστηκε στα 0.6 m, ενώ ο ρομποτικός γεωδαιτικός σταθμός, τοποθετήθηκε σε απόσταση 3.45 m από τον στόχο, λόγω φυσικών περιορισμών στις διαστάσεις του εργαστηρίου. Αφού έγινε μια σειρά μετρήσεων με ρυθμούς καταγραφής τα 0.5 Hz και τα 2 Hz, μετρήθηκε εν συνεχεία η κεκλιμένη απόσταση στο ανώτερο και κατώτερο σημείο ταλάντωσης με τον γεωδαιτικό σταθμό TC2002, του οποίου τα αποτελέσματα θεωρήθηκαν σαν σημεία αναφοράς, εφόσον είναι ακριβέστερος από τον TCRA 1205. Επίσης πραγματοποιήθηκαν και μετρήσεις σε εξωτερικό χώρο και συγκεκριμένα στο προαύλιο του Πανεπιστημίου. Σε αυτή την περίπτωση το πείραμα περιελάμβανε μετρήσεις με το όργανο TCRA 1205, με δύο διαφορετικά πρίσματα (κυκλικό και περίοπτο) με ρυθμούς καταγραφής 1 Hz, 2 Hz και 10 Hz, ενώ το όργανο τοποθετήθηκε σε τρεις διαφορετικές αποστάσεις από τον στόχο (40.574 m, 100.773 m και 146.435 m) και η παρακολούθηση του στόχου για την κάθε ομάδα μετρήσεων διήρκεσε περίπου 150 δευτερόλεπτα. Ως σταθερά μεγέθη θεωρήθηκαν και σε αυτήν

την περίπτωση οι μετρήσεις μηκών και γωνιών από τον γεωδαιτικό σταθμό TC2002 λόγω της υψηλής, ακρίβειας και απόδοσης του.

Η γέφυρα Rio Pelotas συνδέει τις πολιτείες Rio Grande και Santa Catarina στην Νότια Βραζιλία (εικόνα 2.21). Η γέφυρα είναι κατασκευασμένη από προεντεταμένο σκυρόδεμα, και έχει συνολικό μήκος 250 m. Το κατάστρωμά της, έχει μήκος 189 m και πλάτος 7.5 m.



Εικόνα 2.21 Η γέφυρα Rio Pelotas

Για το πείραμα εγκαταστάθηκαν δύο κυκλικά πρίσματα P1 και P2 στα κιγκλιδώματα της γέφυρας στο μέσο του καταστρώματος της. Το πείραμα περιελάμβανε μετρήσεις 85 sec προς κάθε πρίσμα με συχνότητα καταγραφής περίπου 7 Hz. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων, δείχνουν ότι υπάρχει μια σημαντική διαφορά ανάμεσα στα αποτελέσματα από το πρίσμα P1 και από το P2, όσον αφορά το εύρος της ταλάντωσης και στους τρεις άξονες, πράγμα που οφείλεται στα διαφορετικού τύπου δυναμικά φορτία που υπέστη η γέφυρα κατά την διάρκεια των μετρήσεων, όπου στην πρώτη περίπτωση τα φορτία προέρχονταν από επιβατηγά, ενώ στην δεύτερη από φορτηγά αυτοκίνητα. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από το πείραμα αυτό είναι ότι οι ρομποτικοί γεωδαιτικοί σταθμοί με αυτόματη αναγνώριση στόχου όπως το TCRA 1205 της εταιρείας Leica, μπορούν να συνεισφέρουν για τη μέτρηση της δυναμικής συμπεριφοράς των κατασκευών.

Κεφάλαιο 3

Εργασίες Πεδίου

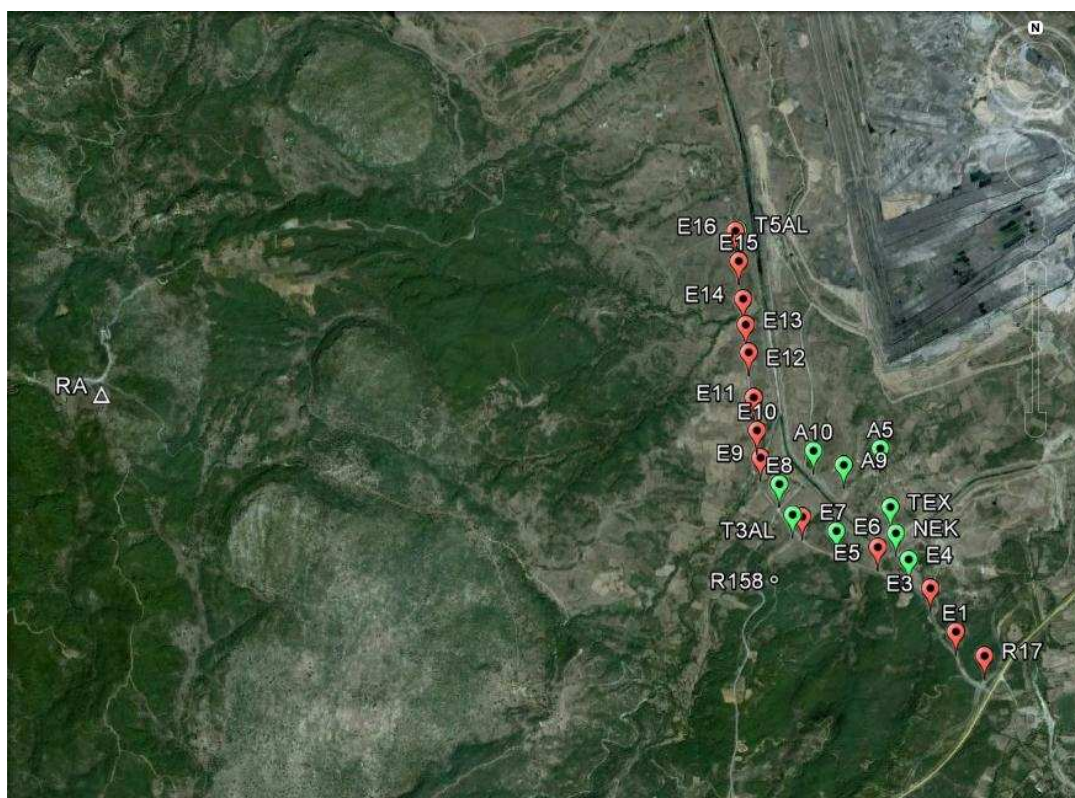
3.1. Περιοχή μελέτης

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται νοτιοδυτικά της Μεγαλόπολης στο νομό Αρκαδίας και περιλαμβάνει τον οικισμό Τριπόταμο και την γύρω περιοχή νότια από αυτόν. Συγκεκριμένα ο ευρύτερος χώρος της ορίζεται νότια από τον επαρχιακό δρόμο που διασταυρώνεται με το 7^ο χλμ Π.Ε.Ο. Μεγαλόπολης – Καλαμάτας με κατεύθυνση το χωριό Χωρέμη και εκτείνεται νότια του Τριποτάμου σε ακτίνα 500μ. Βόρεια του οικισμού βρίσκονται τα ορυχεία της Δ.Ε.Η. σε απόσταση περίπου 900 μέτρων από το κέντρο του οικισμού. Τα εδάφη της περιοχής είναι αργιλώδη ενώ κάτω από αυτά βρίσκονται αξιοποιήσιμα μεγέθη λιγνίτη. Μεταξύ του Τριποτάμου και του δρόμου που έχει κατεύθυνση τον Χωρέμη διέρχεται ο ποταμός Αλφειός όπως διακρίνεται στην παρακάτω εικόνα 3.1. Γενικά η περιοχή δεν είναι αστική και περιλαμβάνει στο μεγαλύτερο μέρος της αγρούς και τον αραιοδομημένο οικισμό, κάτι που διευκόλυνε τις μετρήσεις με GPS λόγω της ορατότητας σε μεγάλο μέρος του ουρανού.



Εικόνα 3.1 Απόσπασμα περιοχής μελέτης

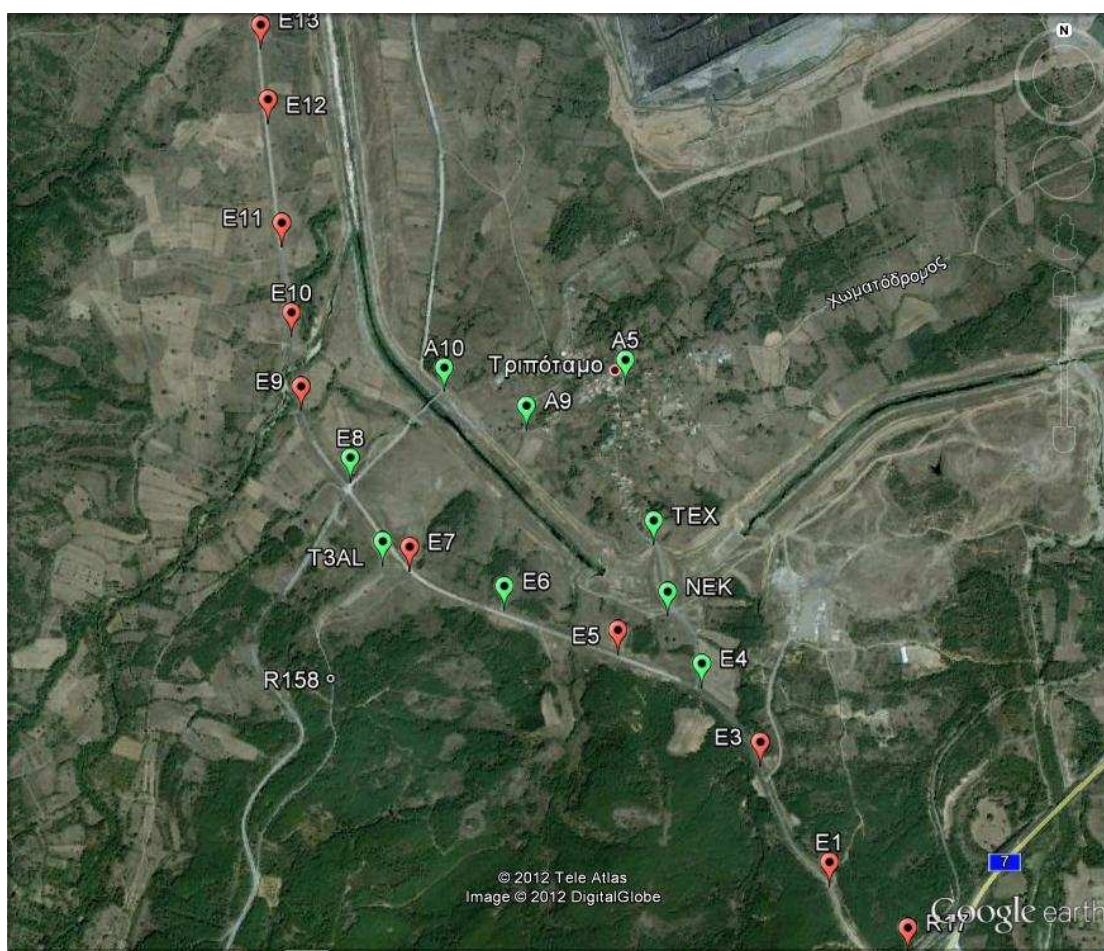
Ο εντοπισμός και η σήμανση των κορυφών του δικτύου GPS έγινε ταυτόχρονα με τον εντοπισμό των σημείων του χωροσταθμικού δικτύου, όπως διακρίνονται στην παρακάτω εικόνα με πράσινο τα σημεία του GPS, αρχικά με το τριγωνομετρικό της Γεωγραφικής Υπηρεσίας (ΓΥΣ) «Ράχη» (RA) το οποίο θα αποτελέσει αφετηρία για το δίκτυο GPS και βρίσκεται περί τα 5km δυτικά από το άκρο της περιοχής μελέτης (εικόνα 3.2).



Εικόνα 3.2 Θέση σταθερού σημείου RA και τα υπόλοιπα σημεία του δικτύου

Παράλληλα έγινε και ο εντοπισμός ορισμένων τριγωνομετρικών σημείων σε βάθος της περιοχής των ορυχείων τα οποία ιδρύθηκαν κατά τη διάρκεια παλαιότερων εργασιών, όλα μέρος του δικτύου GPS και κάποια από αυτά είναι κοινά με το χωροσταθμικό δίκτυο. Όσον αφορά στη σήμανση των επιλεγέντων σημείων στο έδαφος, αυτή έγινε με ασφαλόπροκες και σπρέι ώστε να είναι όσο το δυνατόν ευκρινή σε όλη τη διάρκεια των μετρήσεων αλλά και για μελλοντικές μετρήσεις. Το σύνολο των σημείων που είτε ιδρύθηκαν είτε εντοπίστηκαν είναι 34 (μαζί με τις κορυφές που ιδρύθηκαν για τις ανάγκες χωροσταθμικού ελέγχου) όμως οι κορυφές του δικτύου που εξετάζουμε είναι οι 11 από αυτές. Η υλοποίηση των σημείων ξεκίνησε από την υψομετρική αφετηρία R17 (επί του παλαιού σιδηροδρομικού σταθμού Τριποτάμου) προς το σημείο T5AL βόρεια του οικισμού με κορυφές ανά 200-250 μέτρα (σημεία E1-E16) επί της οδού σε τσιμεντένιες κατασκευές ώστε να προστατεύονται από

μελλοντική ασφαλτόστρωση. Στο σημείο E4 βρίσκεται η πρώτη είσοδος προς το χωριό Τριπόταμο και είναι η αφετηρία κλάδου που διέρχεται εντός του οικισμού και καταλήγει στον κεντρικό άξονα σημείων και στο σημείο E8. Κατά την αναγνώριση της περιοχής τοποθετήθηκαν 11 ενδιάμεσα σημεία ξεκινώντας από το E4 προς το E8 με αρίθμηση A1 έως A11. Ο κλάδος των σημείων «A1-11» προσεγγίζει σε κοντινή απόσταση δύο τριγωνομετρικά σημεία υλοποιημένα από τη ΔΕΗ με ονομασίες «Τεχνικό» (TEX) και «Νεκροταφείο» (NEK) στην αρχή και το πέρας της γέφυρας που διέρχεται τον Αλφειό ποταμό και πλησίον τοπικής εκκλησίας το δεύτερο.



Εικόνα 3.3 Πράσινο χρώμα τα σημεία που μετρήθηκαν και με GPS ενώ με κόκκινο τα σημεία που μετρήθηκαν μόνο για το χωροσταθμικό δίκτυο

3.2. Διαδικασία μετρήσεων

Ύστερα από τον καθορισμό των σημείων ελέγχου, πραγματοποιήθηκε η μέτρησή τους ώστε να εντοπισθεί η θέση τους και να πραγματοποιηθούν οι απαραίτητες συγκρίσεις μεταξύ των συντεταγμένων που μετρήθηκαν στον 1^ο κύκλο μετρήσεων και των αντίστοιχων 2^{ου} κύκλου με διαφορά περίπου έξι μηνών. Η μέθοδος με την οποία μετρήθηκαν τα 11 σημεία ελέγχου είναι αυτή του στατικού

εντοπισμού. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως περί σχετικού στατικού εντοπισμού, με τη μέθοδο αυτή επιτυγχάνεται ο προσδιορισμός θέσης σημείων με τους δέκτες να παραμένουν ακίνητοι στα σημεία σε κάθε μετρητική περίοδο. Επιπλέον, για τον προσδιορισμό των συντεταγμένων ενός σημείου (A) αρκεί η γνώση ενός άλλου (B) για τον υπολογισμό μέσω ταυτόχρονων μετρήσεων των (ΔX_{AB} , ΔY_{AB} , ΔZ_{AB}) της βάσης AB. Έτσι, για την εφαρμογή του στατικού εντοπισμού στα παραπάνω 11 σημεία χρησιμοποιήθηκε ένα τριγωνομετρικό σημείο που βρίσκεται κοντά στην περιοχή μελέτης σε απόσταση περίπου 5,3km από το κοντινότερο σημείο. Το τριγωνομετρικό αυτό έχει καθιερωθεί από τη Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού (ΓΥΣ) να ονομάζεται «Ράχη» και βρίσκεται επί τσιμεντένιου βάθρου σε βουνοκορφή με υπέδαφος ασβεστόλιθου όπως διακρίνεται στην παρακάτω εικόνα 3.4.



Εικόνα 3.4 Μέτρηση με τον δέκτη Promark 2 στο σημείο RA

Ο λόγος που επιλέχθηκε το συγκεκριμένο τριγωνομετρικό είναι αφενός η πρόσβαση, καθώς το επόμενο κοντινότερο υλοποιημένο τριγωνομετρικό στην περιοχή μας ήταν στα 20km και αφετέρου ο ασβεστόλιθος είναι ιζηματογενές πέτρωμα η μεταμόρφωση του οποίου δίνει στο πέτρωμα εντονότερο κρυσταλλικό χαρακτήρα, ενώ η δυσκαμψία του αποτρέπει τις μετακινήσεις μεγάλων όγκων ακόμη και μετά από σεισμική δραστηριότητα. Οι συντεταγμένες του στο σύστημα αναφοράς ΕΓΣΑ87, οι οποίες αποκομίσθηκαν από τη ΓΥΣ, είναι:

PAXH (RA)	X=325633,429m	Y=4137186,200m	h=622,518m
-----------	---------------	----------------	------------

Πίνακας 3.1 Συντεταγμένες σταθερού σημείου RA

Κατά τη διαδικασία του στατικού εντοπισμού της θέσης των σημείων τοποθετήθηκε, επί του βάθρου του τριγωνομετρικού σημείου το τρικόχλιο, πάνω στο οποίο πακτώθηκε μία άλλη βάση οργάνου και σε αυτή, στη συνέχεια, τοποθετήθηκε ο δέκτης GPS. Τέλος, ενεργοποιήθηκε ο δέκτης ώστε να λαμβάνει δορυφορικό σήμα. Να σημειωθεί ότι κατά την διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκαν και οι απαραίτητες οριζοντιώσεις της βάσης του τριγωνομετρικού και του τρικόχλιου. Έπειτα από την τοποθέτηση του δέκτη επί του γνωστού σημείου, ξεκίνησε η διαδικασία των μετρήσεων καθενός από τα υπόλοιπα σημεία με τη σειρά. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν ένας ακόμη δέκτης GPS, ένας τρίποδας και μία βάση οργάνου και ένα τρικόχλιο όμοια με προηγουμένως. Το όργανο και τα παρελκόμενα τοποθετήθηκαν διαδοχικά στα σημεία ελέγχου προκειμένου να γίνει ο προσδιορισμός των συντεταγμένων τους με τη μέθοδο του στατικού προσδιορισμού θέσης. Για την συλλογή μετρήσεων από τα υπόλοιπα σημεία ελέγχου με τη μέθοδο του σχετικού στατικού προσδιορισμού, το όργανο παρέμεινε σε κάθε σημείο τουλάχιστον 10 λεπτά για κάθε χιλιόμετρο επί του μήκους βάσης του ζεύγους σημείων. Υπολογίστηκε αρχικά μία προσεγγιστική απόσταση των βάσεων από το πρόγραμμα Google Earth, στρογγυλοποιήθηκε στο ανώτερο ακέραιο και έτσι είχαμε μία πρώτη εικόνα του μήκους βάσης μεταξύ των σημείων. Να σημειωθεί ότι το χρονικό διάστημα των 10 λεπτών ήταν αρκετό για τις μετρήσεις στη συγκεκριμένη περιοχή, αφού υπήρχε ικανοποιητική ορατότητα προς τους δορυφόρους και, επιπλέον, η περιοχή δεν έχει πυκνή βλάστηση ούτε είναι ιδιαίτερα πυκνοκατοικημένη ώστε να εμποδίζεται το σήμα κάτι που διακρίνεται στην παρακάτω εικόνα 3.5.



Εικόνα 3.5 Συλλογή δορυφορικών δεδομένων από τον δέκτη Trimble 5800

Επομένως, όσο πιο πυκνοκατοικημένη ή με πυκνή βλάστηση είναι μία περιοχή κι ακόμη, όσο πιο μακρινές είναι οι αποστάσεις μεταξύ του γνωστού σημείου και των προς μέτρηση άγνωστων σημείων, τόσο μεγαλύτερο διάστημα παραμονής απαιτείται για κάθε σημείο. Επίσης με τη χρήση του χειριστηρίου Mobilex των δεκτών ήταν δυνατή η προβολή της ακτίνας επίλυσης γύρω από το σημείο που ήταν ο δέκτης. Παρέχεται ακόμη η δυνατότητα στο χρήστη να έχει πρόσβαση σε λεπτομέρειες σχετικά με τις συνθήκες που επικρατούσαν σε κάθε σημείο κατά τη διάρκεια της μέτρησής του όπως το πλήθος των δορυφόρων από τους οποίους λαμβάνει σήμα ο δέκτης στο εκάστοτε σημείο κατά το δεδομένο χρονικό διάστημα, στο χρόνο έναρξης και λήξης της μέτρησης ή ακόμα και στη γεωμετρία των δορυφόρων κατά τη διάρκεια αυτής.



Εικόνα 3.6 Σημείο του δικτύου επί βάρου



Εικόνα 3.7 Σημείο του δικτύου επί τσιμέντου μέτρηση με τρίποδα

3.3. Όργανα που χρησιμοποιήθηκαν

Οι περισσότεροι δέκτες που διατίθενται στην αγορά σήμερα προσφέρουν ιδανικό συνδυασμό κόστους και απόδοσης, ενώ ο μεγάλος αριθμός διαθέσιμων τύπων και μοντέλων επιτρέπει πολλά περιθώρια επιλογής, ανάλογα με τις ανάγκες εφαρμογών και τις απαιτήσεις του κάθε χρήστη. Η επιλογή των δεκτών που χρησιμοποιήθηκαν για τη διεκπεραίωση των μετρήσεων του δικτύου GPS έγινε με βάση τη διαθεσιμότητα δεκτών, έτσι χρησιμοποιήθηκαν για τον 1^ο κύκλο μετρήσεων δέκτες της Ashtech (παρεχόμενες από την τοπογραφική υπηρεσία της ΔΕΗ Μεγαλόπολης) και δέκτες Trimble (Ε.Μ.Π.) για τον 2^ο κύκλο μετρήσεων χωρίς να επηρεάζεται η ακρίβεια αλλαγής δεκτών προκειμένου να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα.

3.3.1. Δέκτες Promark2 της Ashtech

Το ProMark2 είναι ένα ολοκληρωμένο σύστημα GPS που παρέχει δυνατότητα πλοήγησης και ακρίβεια εκατοστού για τοπογραφικές εφαρμογές. Το σύστημα ProMark2 περιέχει δύο ή περισσότερους ProMark2 GPS δέκτες, 10 καναλιών μονής συχνότητας (L1), και τον αντίστοιχο αριθμό γεωδαιτικών κεραιών και όλα τα παρελκόμενα που απαιτούνται, για να μπορεί να εξασφαλίζει υψηλής ποιότητας

τοπογραφικά δεδομένα στον ελάχιστο χρόνο (ProMark2 Survey System User's Guide for Survey, 2002). Το ProMark2 χρησιμοποιεί ένα τρίποδα για να κεντρώσει την κεραία πάνω από το σημείο αναφοράς. Ο δέκτης ProMark2 (εικόνα 3.8) συλλέγει σήματα από GPS δορυφόρους και αποθηκεύει αυτές τις πληροφορίες στην εσωτερική του μνήμη. Η εκ των υστέρων επεξεργασία (post processing) των πρωτογενών δεδομένων γίνεται στο γραφείο, αφού συνδεθεί ο δέκτης με έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω καλωδίου και με την χρήση κατάλληλου λογισμικού. Ενώ για την πλοήγηση επαρκεί η εσωτερική κεραία, η εξωτερική κεραία είναι αναγκαία για τοπογραφικές εργασίες προκειμένου να εξασφαλιστεί η καλύτερη δυνατή ακρίβεια. Η εξωτερική κεραία συλλέγει τα πρωτογενή δεδομένα των δορυφόρων. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να τοποθετείται ακριβώς πάνω (κατακόρυφα) από το σημείο του οποίου θέλουμε να υπολογίσουμε τις συντεταγμένες. Παρακάτω στον πίνακα 3.2 δίνονται οι προδιαγραφές ακρίβειας του συστήματος όπως αναφέρονται από τον κατασκευαστή.

Promark 2		
	οριζοντιογραφικά	υψομετρικά
Στατικός εντοπισμός (Static)	5mm + 1ppm	10mm + 2ppm
Κινηματικός εντοπισμός (RTK)	12mm + 2.5ppm	15mm + 2.5 ppm

Πίνακας 3.2 Παρεχόμενες ακρίβειες Promark 2



Εικόνα 3.8 Δέκτης GPS Promark 2 της Ashtech

3.3.2. Δέκτες Trimble 5800

Το σύστημα Trimble 5800 έχει δυνατότητα μέτρησης στις συχνότητες L1 και L2 του συστήματος GPS και ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του είναι ότι ενσωματώνει το δέκτη GPS, το σύστημα ασύρματης επικοινωνίας και τις κεραίες αυτών σε μία συμπαγή και ελαφριά συσκευή βάρους 1,21 kgf, όπως διακρίνεται στην εικόνα 3.9. Ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε εργασίας το σύστημα της Trimble μπορεί να διαμορφωθεί ως σταθερός (base) ή ως κινητός (rover) δέκτης GPS. Κάθε δέκτης διαθέτει εσωτερική μνήμη 2mb, παρέχοντας εύκολη και επαρκή συλλογή δεδομένων τόσο στο σχετικό όσο και τον κινηματικό εντοπισμό. Επίσης, παρέχει συνολικά 24 ηλεκτρονικά κυκλώματα (κανάλια) διπλής συχνότητας, που το καθένα μπορεί να παρακολουθεί αδιάλειπτα το σήμα από ένα συγκεκριμένο δορυφόρο και υποστηρίζει τη δυνατότητα επικοινωνίας μέσω UHF, GSM και GPRS για τη λήψη διορθώσεων κινηματικού εντοπισμού πραγματικού χρόνου (RTK). Οι δέκτες Trimble 5800 έχουν τη δυνατότητα ταυτόχρονης λήψης σημάτων από το σύστημα εντοπισμού θέσης GLONASS, κάτι που υποδηλώνει ότι υπάρχει πλεονασμός μετρήσεων, αφού ο συνολικός αριθμός των δορυφόρων που είναι ορατοί από τα σημεία μέτρησης είναι μεγαλύτερος από ότι αν παρατηρούσε μόνο GPS δορυφόρους, με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγαλύτερη ακρίβεια και αξιοπιστία στην τελική λύση. Οι παραπάνω μέθοδοι εντοπισμού παρέχονται με τις εξής ακρίβειες:

Trimble 5800		
	οριζοντιογραφικά	υψομετρικά
Στατικός εντοπισμός (Static)	5mm + 0.5ppm	5mm + 1ppm
Κινηματικός εντοπισμός (RTK)	10mm + 1ppm	20mm + 1ppm

Πίνακας 3.3 Παρεχόμενες ακρίβειες Trimble 5800



Εικόνα 3.9 Δέκτης GPS Trimble 5800



Εικόνα 3.10 Η συσκευή της Trimble με παρελκόμενα

Ταυτόχρονα με τους παραπάνω δέκτες χρησιμοποιήθηκαν δύο τρίποδες βαριάς κατασκευής με επίπεδη κεφαλή, μεταλλική βάση στήριξης σε τριγωνομετρικό σημείο, δύο τρικόχλια με οπτική κέντρωση, δύο μεταλλικοί σύνδεσμοι για τοποθέτηση στο τρικόχλιο, μεταλλικές μετροταινίες και μπαταρίες λιθίου (Li-Ion) για τους δέκτες.



Εικόνα 3.11 Ο τρίποδας στερέωσης

Στα μειονεκτήματα των παραπάνω δεκτών όπως και του συστήματος GPS καταγράφεται η αδυναμία λειτουργίας τους αν οποιοδήποτε φυσικό ή τεχνητό αντικείμενο (π.χ. δέντρο, κτίριο, γέφυρα) εμποδίζει, έστω και μερικά, το οπτικό πεδίο του δέκτη προς τους δορυφόρους, γεγονός που μπορεί να επιδράσει αρνητικά στην ακρίβεια προσδιορισμού της θέσης ενός σημείου. Η μείωση ακρίβειας του δορυφορικού σήματος, χωρίς προειδοποίηση, και η εισαγωγή σφαλμάτων αποτελούν

παράγοντες που δεν εγγυώνται την απρόσκοπτη λειτουργία του συστήματος GPS, ενώ η άμεση πρόσβαση σε κάθε σημείο του δικτύου που πρέπει να μετρηθεί θεωρείται αναγκαία. Τέλος συγκριτικά με τους επίγειους εξοπλισμούς, τα παραπάνω συστήματα απαιτούν υψηλό κόστος αγοράς εφόσον αποτελούνται από τουλάχιστον δύο δέκτες.



Εικόνα 3.12 Κατά την προετοιμασία του δέκτη για τη λήψη μετρήσεων

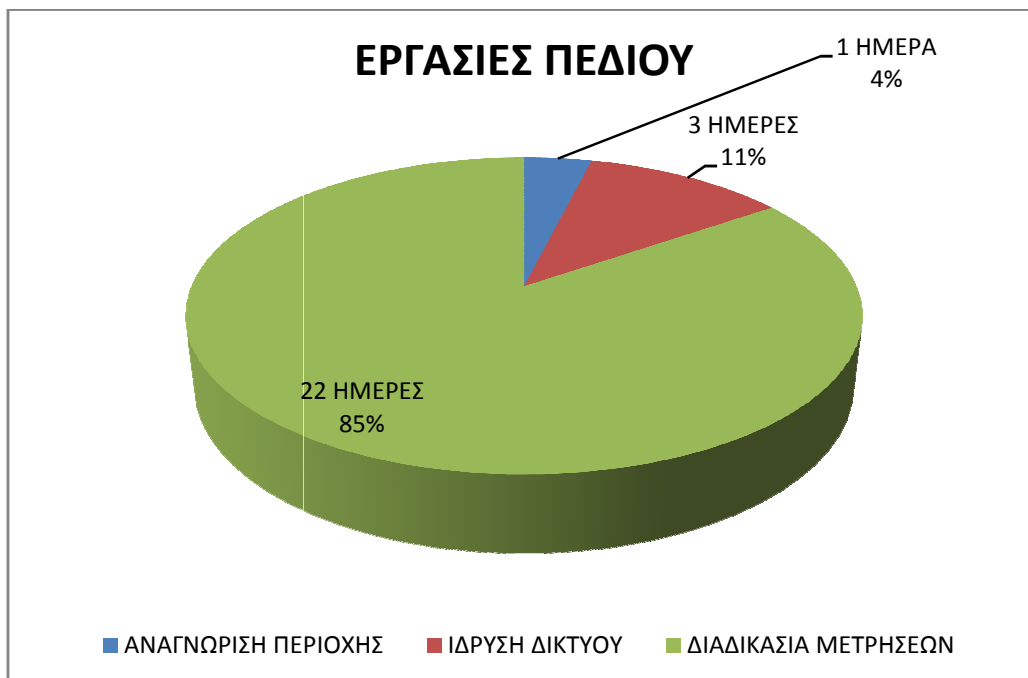
3.4. Χρονοδιάγραμμα εργασιών

Αρχικά, πριν από την έναρξη των μετρήσεων, έγιναν κάποιες εργασίες, οι οποίες αφορούν στην αναγνώριση της περιοχής μελέτης, την εύρεση του Τριγωνομετρικού της Γ.Υ.Σ. «Ράχη», των παλιών υψομετρικών αφετηριών, την εγκατάσταση νέων υψομετρικών αφετηριών και έναν τελικό επανέλεγχο του όλου δικτύου. Η αναζήτηση και ο εντοπισμός των υπαρχόντων σημείων αλλά και η υλοποίηση των νέων πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του κ. Ζαχαριάδη ο οποίος έχει ιδρύσει μερικά τριγωνομετρικά στην περιοχή στα πλαίσια παλαιότερων εργασιών. Η εν λόγω διαδικασία διήρκησε συνολικά 4 ημέρες (26/3 – 29/3). Ακολούθησαν οι εργασίες πεδίου με τη διαδικασία μετρήσεων του δικτύου οριζόντιου και κατακόρυφου ελέγχου. Συνολικά απαιτήθηκαν 22 ημέρες: 1/5 – 12/5 για την πρώτη φάση μετρήσεων και 10/12 – 19/12 για την δεύτερη. Οι μετρήσεις εκτελούνταν από τις 8 το πρωί μέχρι τις 5 περίπου το απόγευμα. Η επεξεργασία των μετρήσεων διήρκησε 12 ημέρες. Συγκεκριμένα χρειάστηκαν 2 ημέρες μετά από κάθε φάση μετρήσεων για την

μεταφορά όλων των μετρήσεων από το χαρτί, όπου καταγράφονταν χειρόγραφα στο ύπαιθρο, σε περιβάλλον Excel. Έπειτα απαιτήθηκαν 7 ημέρες για την επεξεργασία των μετρήσεων από τα αντίστοιχα λογισμικά. Για τις εργασίες γραφείου συνολικά απαιτήθηκαν περίπου 42 ημέρες, στη διάρκεια των οποίων πραγματοποιήθηκαν, εκτός από την επεξεργασία των μετρήσεων, η σύγκριση των υψομέτρων και η ανίχνευση των επιφανειακών μετακινήσεων καθώς και η σύνταξη του τεύχους της διπλωματικής εργασίας (28 μέρες).



Γράφημα 3.1 Κατανομή εργασιών



Γράφημα 3.2 Κατανομή εργασιών πεδίου

Κεφάλαιο 4

Επεξεργασία των μετρήσεων

4.1. Αποθήκευση των δεδομένων και επίλυση των βάσεων

Το πρώτο στάδιο επεξεργασίας των μετρήσεων είναι η επεξεργασία των βάσεων. Αρχικά τα δεδομένα μεταφέρονται από τον δέκτη στον υπολογιστή μέσω του λογισμικού μεταφοράς αρχείων και δεδομένων που παρέχεται από την εταιρεία. Ο κάθε δέκτης έχει καταγεγραμμένες τις μετρήσεις και την ώρα των μετρήσεων από τα σημεία που τοποθετήθηκε και από τα οποία πραγματοποίησε τις μετρήσεις. Έτσι αν ο χρήστης καταγράψει στο πεδίο σωστά τα στοιχεία που αντιστοιχούν στα αρχεία των μετρήσεων, τα οποία και αναγράφουν σε ποια σημεία τοποθετήθηκαν οι δέκτες Rover και Base και ποιες ώρες μέτρησε ο καθένας από αυτούς μπορεί να χρησιμοποιήσει σωστά τα αρχεία των μετρήσεων που κατέγραψαν οι δέκτες. Κατά την επεξεργασία των δεδομένων στο πρόγραμμα δηλώνουμε το ύψος στο οποίο θα αναφέρεται το κάθε σημείο του. Στην περίπτωση μας μετρήθηκε ως ύψος οργάνου το ύψος από την «κεφαλή» του gps ως τη βάση του.

Αφού πλέον εισαχθούν όλα τα δεδομένα στο πρόγραμμα, ακολουθεί η επίλυση των βάσεων. Το αρχικό προϊόν από την επίλυση πρωτογενών δεδομένων GPS μεταξύ δύο σημείων είναι ένα διάνυσμα (βάση) που ορίζει τη σχέση μεταξύ αυτών των δύο σημείων. Οι συντεταγμένες των σημείων είναι προϊόντα της επιλυμένης βάσης. Όταν γίνεται η επίλυση μιας βάσης, οι συντεταγμένες του ενός σημείου θεωρούνται σταθερές (fixed), δηλαδή χωρίς σφάλμα. Από την επιλυμένη βάση ορίζονται και οι συντεταγμένες του άλλου, αγνώστου σημείου. Πριν τη συνόρθωση, οι συντεταγμένες του σημείου προκύπτουν αποκλειστικά από τις επιλυμένες βάσεις προς αυτό το σημείο. Για σημεία που περιέχονται σε πολλές βάσεις, οι συντεταγμένες του προκύπτουν από τη βάση με τη χαμηλότερη αβεβαιότητα. Η συνόρθωση των δεδομένων έχει ως αποτέλεσμα ακριβέστερες συντεταγμένες. Τα δύο λογισμικά πακέτα που χρησιμοποιήθηκαν, έχουν δείκτες που καθορίζουν την ποιότητα των επιλυμένων βάσεων και των υπολογισμένων συντεταγμένων. Οι αβεβαιότητες των βάσεων δίνουν μία εκτίμηση για την ποιότητα της επιλυμένης βάσης. Γενικά, οι αβεβαιότητες θα πρέπει να κυμαίνονται σε επίπεδα όμοια με αυτά των προδιαγραφών του δέκτη. Βέβαια η ποσότητα διαθέσιμης πληροφορίας για την επίλυση μιας βάσης προφανώς επηρεάζει την αβεβαιότητα του

αποτελέσματος. Αν ο όγκος των μετρήσεων είναι πολύ μικρός τότε οι τιμές αβεβαιότητας θα είναι αυξημένες και η μέτρηση πρέπει να επαναληφθεί. Η απαραίτητη ποσότητα δεδομένων για την επίτευξη καλών αποτελεσμάτων, αναφέρεται από την κατασκευάστρια εταιρία του κάθε δέκτη στο εγχειρίδιο χρήσης του. Ο τύπος επίλυσης δείχνει αν η επίλυση της ασάφειας φάσης για κάθε δορυφόρο έγινε με επιτυχία για κάθε βάση. Για παράδειγμα, σε μεγάλες βάσεις (πάνω από 20Km), συνήθως είναι δύσκολο να επιτευχθεί fixed λύση, εξαιτίας του αυξημένου θορύβου που οφείλεται στο μήκος της βάσης. Τέλος, μία βάση με λύση float σημαίνει πως λιγότερο από το 50% των ασαφειών έχει προσδιοριστεί. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η float λύση δεν είναι αξιόπιστη. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν με στατικό εντοπισμό αφορούν στις βάσεις μεταξύ γνωστού και αγνώστων σημείων τα μήκη τους διακρίνονται στον πίνακα 4.1, από τις οποίες προκύπτουν έπειτα από επίλυση οι συντεταγμένες των μετρημένων, με τη μέθοδο αυτή, σημείων του δικτύου της παρακάτω εικόνας 4.1.

Base	Rover	Μήκος βάσης (m)	PDOP
RA--	T5AL	4986.031	1.6
RA--	NEK-	6209.358	1.5
RA--	T3AL	5385.445	1.8
TEX-	NEK-	206.754	1.9
TEX-	E6--	465.131	1.6
TEX-	A5--	461.507	2.0
TEX-	E8--	886.290	1.9
TEX-	E4--	429.062	1.7
TEX-	A9--	489.158	1.5
TEX-	A10-	743.138	1.6
T5AL	A9--	2009.808	1.7
T5AL	A10-	1820.025	1.4
T5AL	A6--	2032.945	1.8
T5AL	TECH	2464.796	1.8
T5AL	E8--	2006.678	2.4
T3AL	TEX-	773.337	1.8
T3AL	E4--	973.194	1.8
T3AL	A10-	525.873	1.7

T3AL	E8--	258.436	2.3
T3AL	A9--	561.859	1.8
T3AL	NEKR	824.276	1.7
T3AL	T5AL	2257.499	1.7

Πίνακας 4.1 Μήκη βάσεων επίλυσης



Εικόνα 4.1 Οι στάσεις του δικτύου

4.2. Κλείσιμο βρόγχων

Για να επιλυθεί σε ικανοποιητικό βαθμό ένα γεωδαιτικό δίκτυο, πρέπει να υπάρχει ένας αριθμός κλειστών βρόγχων, που δημιουργήθηκαν από βάσεις μετρημένες με GPS. Αν όλες οι παρατηρήσεις περιείχαν μηδενικά σφάλματα, το κλείσιμο των βρόγχων θα ήταν απόλυτα μηδενικό. Όμως αυτό που συμβαίνει πραγματικά είναι ότι οι απολύτως τέλει γεωδαιτικές παρατηρήσεις είναι αδύνατες και άρα οι βρόχοι θα έχουν κάποιο σφάλμα κλεισίματος. Αν αυτό οφείλεται σε τυχαία σφάλματα στις παρατηρήσεις, τότε έχει προβλέψιμο μέγεθος (από τις προδιαγραφές του οργάνου). Το σφάλμα κλεισίματος που οφείλεται σε χονδροειδές σφάλμα δεν είναι προβλέψιμο και είναι ανάλογο του μεγέθους του χονδροειδούς σφάλματος. Όταν υπάρχουν τέτοια σφάλματα, πολλές φορές είναι δύσκολο να εντοπιστούν από την ανάλυση του αποτελέσματος της συνόρθωσης. Κι αυτό, γιατί η M.E.T. επιχειρεί να διαμοιράσει αυτό το σφάλμα σε όλο το δίκτυο. Πραγματοποιώντας πολλαπλές αναλύσεις κλεισίματος βρόγχων σε μία περιοχή για χονδροειδή σφάλματα, οι βάσεις που τα προκαλούν μπορούν κανονικά να απομονωθούν. Αφού απομονωθεί η προβληματική βάση, μπορεί να εξεταστεί και να διορθωθεί ή να αφαιρεθεί. Αν το σφάλμα κλεισίματος είναι μικρότερο από το επιτρεπόμενο σφάλμα που έχει καθοριστεί, τότε το τεστ επιτυγχάνει. Αυτό μπορεί να είναι ένδειξη ότι δεν υπάρχουν

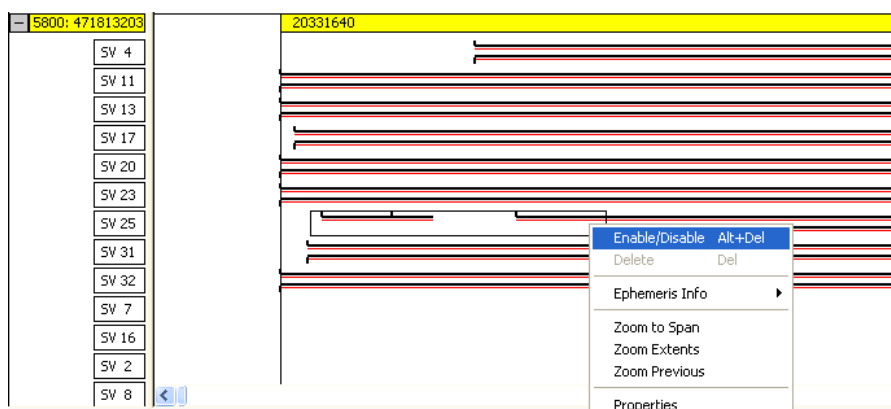
χονδροειδή σφάλματα στις βάσεις που χρησιμοποιήθηκαν σε έναν συγκεκριμένο βρόχο. Αυτό θα μπορούσε να μην είναι αληθές, αν το χονδροειδές σφάλμα δεν βρίσκεται στο βρόχο που εξετάζεται. Αν το σφάλμα κλεισίματος είναι μεγαλύτερο από το επιτρεπόμενο, το τεστ θα αποτύχει. Οι βρόχοι που σημειώνονται τότε από το πρόγραμμα πρέπει να εξεταστούν διεξοδικά για να διαπιστωθεί αν υπάρχουν χονδροειδή σφάλματα σε κάποια από τις βάσεις που χρησιμοποιήθηκαν στο βρόχο.

4.3. Επίλυση δικτύου με το Trimble Geomatics Office (T.G.O.)

Αρχικά πραγματοποιήθηκε η μεταφορά των αρχείων από τους δέκτες στον υπολογιστή μέσω του λογισμικού Trimble Data Transfer. Τα δεδομένα προβάλλονται σε μορφή .dat και κάθε αρχείο συνοδεύεται από ένα αρχείο .txt με πληροφορίες που αφορούν τις μετρήσεις όπως ημερομηνία διεξαγωγής, ο τύπος κεραίας και η διάρκεια μέτρησης. Κατά την εκκίνηση του TGO πρέπει να ορίσουμε σύστημα αναφοράς που θα πραγματοποιηθεί η επίλυση και επιλέγουμε το ΕΓΣΑ'87, με προβολή Εγκάρσια Μερκατορική και ελλειψοειδές αναφοράς το GRS80 του ΕΓΣΑ'87. Ακόμη ορίζονται τα dX, dY, dZ της μετάθεσης μεταξύ των δύο συστημάτων WGS'84 που έγιναν οι μετρήσεις και του νέου συστήματος ΕΓΣΑ'87. Τέλος δίνεται ονομασία στο αρχείο και αποθηκεύεται με τιμές κεντρικού μεσημβρινού $\lambda=24^\circ$, κλίμακα παραμόρφωσης $K_0=0,9996$, False Northing=0 και False Easting=500.000.

Μετά την αποθήκευση του αρχείου των μετρήσεων πραγματοποιούμε την επίλυση των βάσεων μεταξύ του γνωστού σημείου και των αγνώστων μέσω της εντολής «Process GPS Baselines» και έτσι εμφανίζονται οι βάσεις κίτρινο ή κόκκινο χρώμα. Αυτές με το κίτρινο χρώμα υποδηλώνουν ότι το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) της επίλυσης της συγκεκριμένης βάσης είναι μικρό οπότε μπορεί να γίνει αποδεκτή. Αντιθέτως, οι βάσεις με το κόκκινο χρώμα δε γίνονται αποδεκτές ως έχουν καθώς φέρουν μεγάλο σφάλμα RMS. Το αποτέλεσμα κάθε βάσης εξαρτάται κι από δύο ακόμα αριθμούς (εκτός του RMS), τον Ratio (που πρέπει να είναι όσο γίνεται πιο μεγάλος) και τον Refvar (πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στη μονάδα και λιγότερο από 4). Το Reference Variance είναι ένας δείκτης για το πόσο καλά προσαρμόζονται οι παρατηρήσεις για μία συγκεκριμένη βάση στην υπολογισμένη λύση. Πρόκειται για το λόγο της μεταβλητότητας που έχει υπολογίσει το λογισμικό πριν την επίλυση της βάσης, στηριζόμενος σε παραδοχές σχετικά με τον αναμενόμενο θόρυβο ή την ακρίβεια των μετρήσεων προς τη μεταβλητότητα της λύσης. Για τη διόρθωση των βάσεων που φέρουν μεγάλα σφάλματα δύναται να πραγματοποιηθούν ορισμένες διαδικασίες όπως η εντολή «View-> Timeline», η

οποία δίνει τη δυνατότητα βελτίωσης του σήματος κάθε βάσης από οποιοδήποτε δορυφόρο (εικόνα 4.2), αφαιρώντας κομμάτια ασυνεχούς σήματος. Ένα συνεχές δορυφορικό σήμα παρουσιάζεται με συνεχή διπλή γραμμή, ενώ ένα ασυνεχές με διακεκομμένη γραμμή. Έτσι επιλέχθηκαν και αφαιρέθηκαν τα κομμάτια ασυνεχούς σήματος με την εντολή «Enable/Disable» (δεξί κλικ στην αντίστοιχη μπάρα) και έγινε ξανά η επίλυση των βάσεων (Process GPS Baselines), ώστε αυτή να μην συμπεριλαμβάνει πλέον τα κομμάτια ασυνεχούς σήματος.



Εικόνα 4.2 Ένδειξη διακύμανσης σήματος ως προς το χρόνο

Έπειτα από την επίλυση των βάσεων πραγματοποιήθηκε η αυτόματη συνόρθωση των μετρήσεων με στόχο τον υπολογισμό των συντεταγμένων των 11 σημείων ελέγχου, όπως αυτές προκύπτουν από τη μέθοδο του στατικού εντοπισμού θέσης. Η συνόρθωση έλαβε χώρα μέσω της εντολής «Adjust», ενώ τα αποτελέσματα των συντεταγμένων εμφανίζονται με την εντολή «Adjustment Report». Αυτά παρουσιάζονται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα 4.2 σε ΕΓΣΑ'87 και τα υψόμετρα στο EGM'96:

TRIMBLE 5800

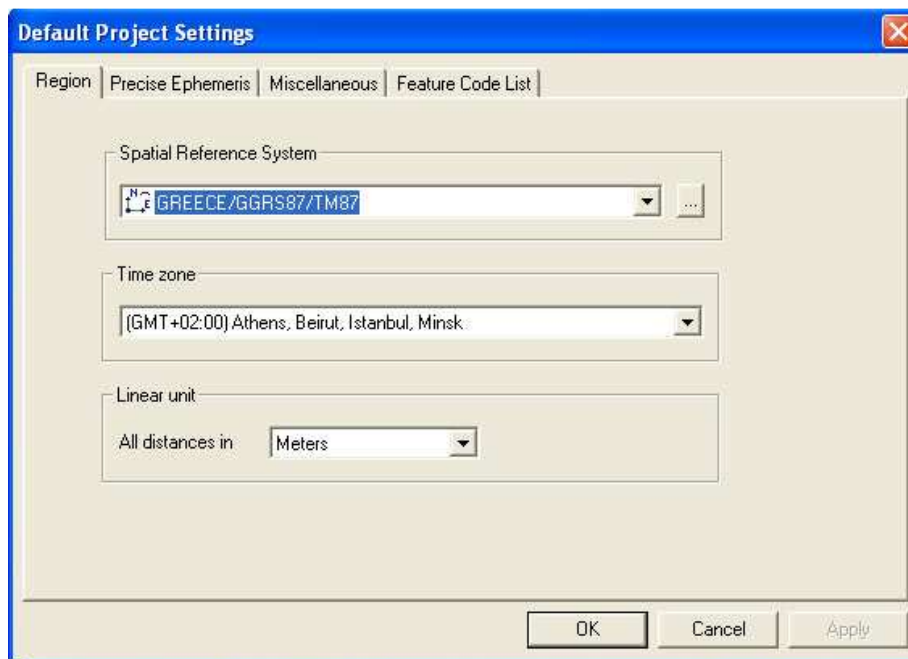
Name	Description	X (m)	Y (m)	H (m)
A10	STATION	331058,626	4136473,581	380,423
A5	STATION	331577,859	4136480,218	407,526
A9	STATION	331293,174	4136358,346	386,562
E4	STATION	331779,142	4135615,532	394,915
E6	STATION	331219,944	4135847,287	400,316
E8	STATION	330785,939	4136220,862	391,170
NEK	TRIG LOCAL	331686,174	4135820,949	404,866
RA	TRIG LOCAL	325633,429	4137186,200	622,518
T3AL	TRIG LOCAL	330878,045	4135981,682	424,087

T5AL	TRIG LOCAL	330507,131	4138207,834	381,197
TEX	TRIG LOCAL	331649,936	4136024,427	407,654

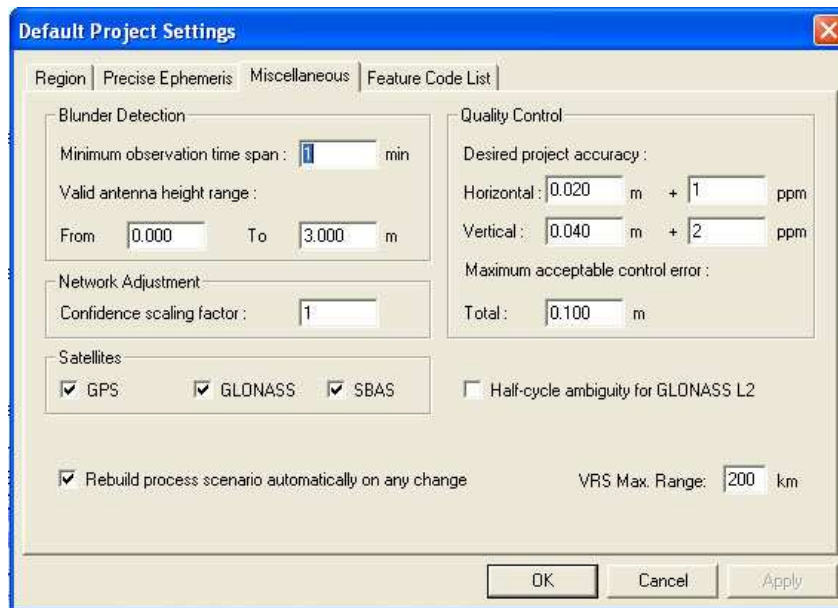
Πίνακας 4.2 Συντεταγμένες των σημείων από το δέκτη Trimble σε ΕΓΣΑ'87 και το υψόμετρο στο EGM'96.

4.4. Επίλυση δικτύου με το GNSS Solutions

Το πακέτο της εταιρείας Magellan (πρώην Thales) δεν έχει την δυνατότητα συνδυασμού μετρήσεων GPS και συμβατικών τοπογραφικών οργάνων. Είναι όμως ένα ολοκληρωμένο και εύχρηστο πακέτο λογισμικού το οποίο παρέχει στον χρήστη όλα τα απαραίτητα εργαλεία για την επεξεργασία GPS και GPS + GLONASS πρωτογενή δεδομένα. Χρησιμοποιεί δυνατούς αλγόριθμους για τον εντοπισμό λαθών και για την ποιοτική ανάλυση των δεδομένων για να εξασφαλίσει ακριβή και αξιόπιστα αποτελέσματα. Τέλος, παράγει τις τελικές συντεταγμένες των σημείων και παρουσιάζει τα αποτελέσματα με ευκολονόητο τρόπο. Κατά την εκκίνηση του προγράμματος δημιουργείται ένα νέο «project» και εισάγονται οι παράμετροι όπως η επιφάνεια αναφοράς, οι μονάδες μέτρησης κ.ά όπως διακρίνονται στην εικόνα 4.3. Αρχικά πραγματοποιείται η μεταφόρτωση των αρχείων από τον δέκτη στον υπολογιστή μέσω απλού λογισμικού και ανοίγουμε το GNSS Solutions. Δημιουργείται «New project» το οποίο ονομάζεται με ένα συμβολικό τίτλο και επίσης εισάγονται οι παράμετροι του έργου που θα επεξεργαστεί όπως το σύστημα αναφοράς, τις ανοχές σφαλμάτων κ.ά.

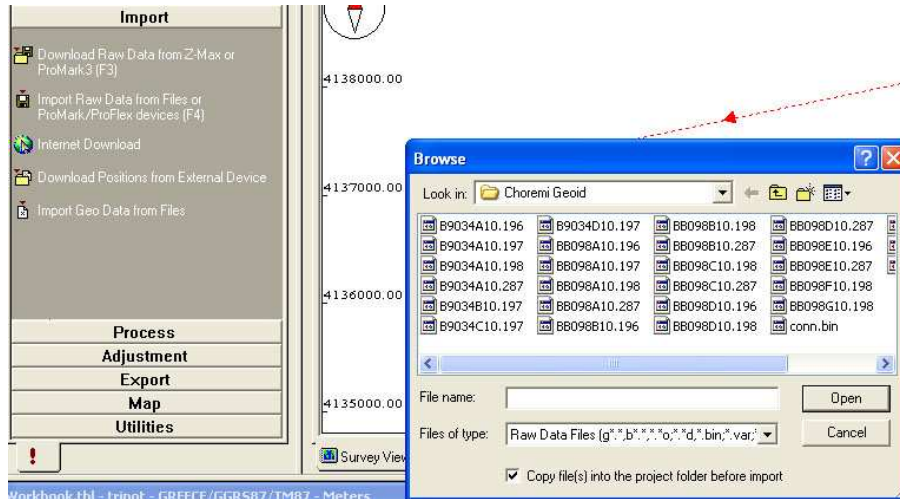


Εικόνα 4.3 Εισαγωγή συστήματος συντεταγμένων



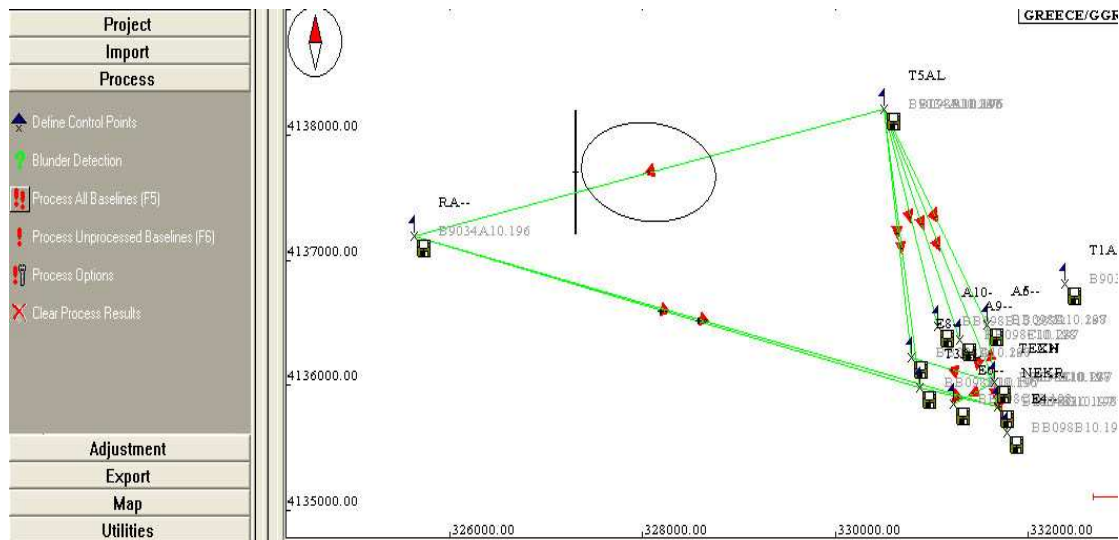
Εικόνα 4.4 Εισαγωγή ορίων σφαλμάτων

Αφού εισαχθούν όλες οι παράμετροι όπως το επίπεδο εμπιστοσύνης και οι ανοχές (εικόνα 4.4) αριστερά στην επιλογή «Import» επιλέγουμε «Import Raw data from files» και αντίστοιχα εντοπίζεται η θέση των αρχείων που έχουν μεταφορτωθεί από τον δέκτη (εικόνα 4.5), παρατηρείται ότι το πρόγραμμα εισάγει τα «σημεία», που έχουν μετρηθεί, στο παράθυρο με σωστό προσανατολισμό.



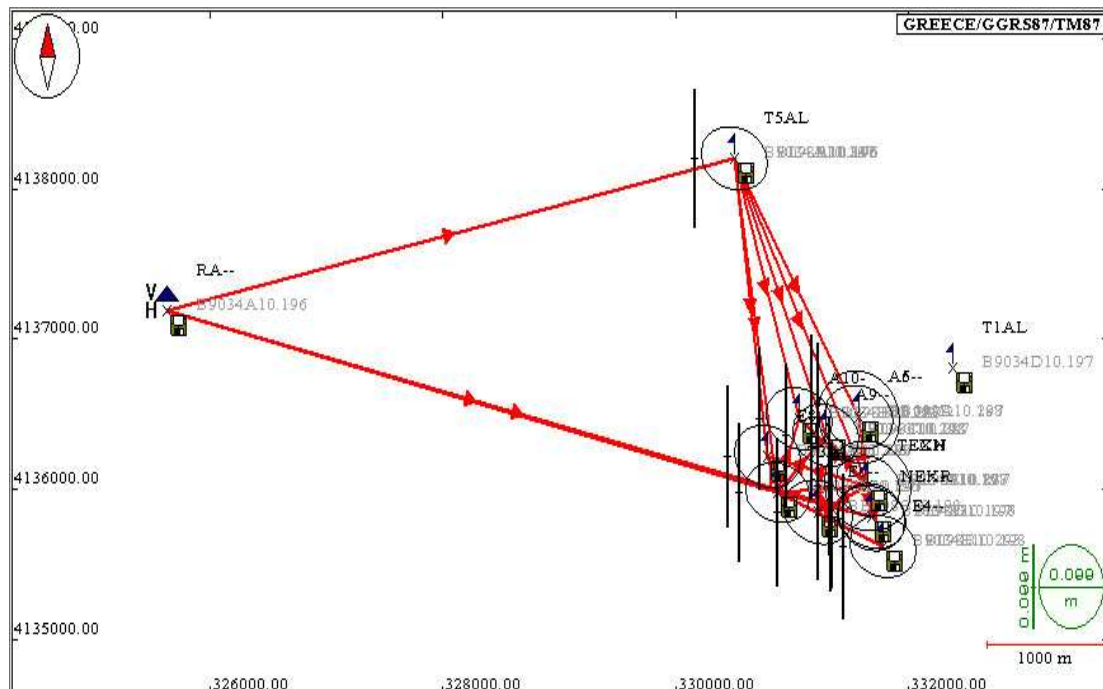
Εικόνα 4.5 Μεταφόρτωση των αρχείων Rinex στο λογισμικό

Παράλληλα ζητείται να εισαχθούν οι συντεταγμένες των «Control points» δηλαδή των σημείων με γνωστές σταθερές συντεταγμένες το οποίο στην περίπτωση αυτή είναι το RA. Στη συνέχεια ακολουθεί η επίλυση των βάσεων από την επιλογή Process-> Process all baselines.



Εικόνα 4.6 Επίλυση των βάσεων του δικτύου

Η πετυχημένη επίλυση των βάσεων εντός των ορίων που θέσαμε διακρίνεται από την αλλαγή χρώματος της βάσης (από κόκκινο σε πράσινο, εικόνα 4.6). Τέλος πραγματοποιούμε την επίλυση του δικτύου από την επιλογή «Adjust network» και τα σημεία μας εμφανίζονται με τις γεωδαιτικές τους συντεταγμένες και άλλες πληροφορίες με τη μορφή πίνακα όπως φαίνεται στην εικόνα 4.8. Επίσης το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα να εξαχθούν τα δεδομένα σε αρχείο ή απ' ευθείας σε κάποια άλλη συσκευή π.χ. άλλον δέκτη.



Εικόνα 4.7 Επίλυση του δικτύου με τα σημεία

	Name	Description	East	North	Ellips height	Status	Constraints	Surv_Horz_Conf	Surv_Height_Conf	Type	Warni
1	RA--	TRIG LOCAL	325633.429	4137186.200	622.518	Adjusted	Horizontal & Vertical Fixed (0.000	0.000	Control Point	
2	T5AL	TRIG LOCAL	330507.145	4138207.843	381.686	Adjusted	No constraints	0.158	0.162	Logged Point	
3	TEX-	TRIG LOCAL	331649.939	4136024.436	408.256	Adjusted	No constraints	0.154	0.164	Logged Point	
4	NEKR	TRIG LOCAL	331686.180	4135820.958	405.462	Adjusted	No constraints	0.160	0.173	Logged Point	
5	TEKN	TRIG LOCAL	331649.760	4136025.012	419.079	Estimated	No constraints	34.648	19.600	Logged Point	
6	T1AL	TRIG LOCAL	332378.605	4136808.898	412.122	Estimated	No constraints	34.648	19.600	Logged Point	
7	T3AL	TRIG-LOCAL	330878.050	4135981.691	424.639	Adjusted	No constraints	0.152	0.163	Logged Point	
8	A5--	STATION	331577.874	4136480.227	409.466	Adjusted	No constraints	0.161	0.174	Logged Point	
9	E8--	STATION	330785.949	4136220.870	391.717	Adjusted	No constraints	0.157	0.165	Logged Point	
10	E4--	STATION	331779.152	4135615.544	395.514	Adjusted	No constraints	0.157	0.169	Logged Point	
11	A10-	STATION	331058.633	4136473.590	380.996	Adjusted	No constraints	0.156	0.165	Logged Point	
12	E6--	STATION	331219.959	4135847.295	402.235	Adjusted	No constraints	0.162	0.173	Logged Point	
13	A9--	STATION	331293.178	4136358.353	387.142	Adjusted	No constraints	0.156	0.165	Logged Point	
14	NEK-	TRIG-LOCAL	331686.192	4135820.945	404.471	Adjusted	No constraints	0.163	0.167	Logged Point	
15	A6--	STATION	331577.874	4136480.207	409.434	Adjusted	No constraints	0.206	0.193	Logged Point	
16	TECH	TRIG-LOCAL	331649.939	4136024.436	406.886	Adjusted	No constraints	0.213	0.218	Logged Point	

Εικόνα 4.8 Εμφάνιση αποτελεσμάτων στο GNSS Solutions

Στους παρακάτω πίνακες 4.3 και 4.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επίλυσης και των δύο κύκλων (1^{ος} Promark2 και 2^{ος} Trimble 5800) με τις οριζοντιογραφικές συντεταγμένες των στάσεων στο σύστημα ΕΓΣΑ'87 και το υψόμετρο στο μοντέλο γεωειδούς EGM'96.

TRIMBLE 5800

Στάση	Περιγραφή	EGSA87		EGM96
		X (m)	Y (m)	H (m)
A10	STATION	331058,626	4136473,581	380,423
A5	STATION	331577,859	4136480,218	407,526
A9	STATION	331293,174	4136358,346	386,562
E4	STATION	331779,142	4135615,532	394,915
E6	STATION	331219,944	4135847,287	400,316
E8	STATION	330785,939	4136220,862	391,170
NEK	TRIG LOCAL	331686,174	4135820,949	404,866
RA	TRIG LOCAL	325633,429	4137186,200	622,518
T3AL	TRIG LOCAL	330878,045	4135981,682	424,087
T5AL	TRIG LOCAL	330507,131	4138207,834	381,197
TEX	TRIG LOCAL	331649,936	4136024,427	407,654

Πίνακας 4.3 Συντεταγμένες των σημείων από το δέκτη Trimble σε ΕΓΣΑ'87 και το υψόμετρο στο EGM'96, επίλυση με το GNSS Solutions

Promark2 ASHTECH

Στάση	Περιγραφή	EGSA87		EGM96
		X (m)	Y (m)	H (m)
A10	STATION	331058,626	4136473,582	380,424
A5	STATION	331577,860	4136480,214	407,527
A9	STATION	331293,174	4136358,347	386,562
E4	STATION	331779,142	4135615,532	394,915
E6	STATION	331219,944	4135847,287	400,315
E8	STATION	330785,939	4136220,861	391,169
NEK	TRIG LOCAL	331686,182	4135820,937	404,814
RA	TRIG LOCAL	325633,429	4137186,200	622,518
T3AL	TRIG-LOCAL	330878,045	4135981,682	424,087
T5AL	TRIG LOCAL	330507,131	4138207,834	381,196
TEX	TRIG LOCAL	331649,936	4136024,427	407,654

Πίνακας 4.4 Συντεταγμένες των σημείων από το δέκτη Ashtech σε ΕΓΣΑ'87 και το υψόμετρο στο EGM'96, επίλυση με το GNSS Solutions

TRIMBLE 5800 WGS84

Στάση	Περιγραφή	φ	λ	h (m)
		(Γεωγραφ. μήκος)	(Γεωγραφ. πλάτος)	(Ellips height)
A10	STATION	22° 05' 38.27654"E	37° 21' 44.04245"N	4 09,510
A5	STATION	22° 05' 59.36822"E	37° 21' 44.59721"N	43 6,654
A9	STATION	22° 05' 47.90096"E	37° 21' 40.45865"N	41 5,662
E4	STATION	22° 06' 08.25301"E	37° 21' 16.68507"N	42 4,018
E6	STATION	22° 05' 45.34440"E	37° 21' 23.83613"N	42 9,386
E8	STATION	22° 05' 27.40462"E	37° 21' 35.66755"N	42 0,224
NEK	TRIG LOCAL	22° 06' 04.30809"E	37° 21' 23.28652" N	433,971
RA	TRIG LOCAL	22° 01' 57.24565"E	37° 22' 03.54261"N	651,208
T3AL	TRIG LOCAL	22° 05' 31.34327"E	37° 21' 27.97088 "N	453,137
T5AL	TRIG LOCAL	22° 05' 14.44049"E	37° 22' 39.92535 "N	410,297
TEX	TRIG LOCAL	22° 06' 02.66947"E	37° 21' 29.86207" N	436,766

Πίνακας 4.5 Συντεταγμένες των σημείων με το δέκτη Trimble στο ελλειψοειδές WGS84, επίλυση με το GNSS Solutions

Promark2 ASHTECH WGS84

Στάση	Περιγραφή	φ (Γεωγραφ. μήκος)	λ (Γεωγραφ. πλάτος)	h (m) (Ellips height)
A10	STATION	22° 05' 38.27654"E	37° 21' 44.04246"N	4 09,511
A5	STATION	22° 05' 59.36821"E	37° 21' 44.59720"N	43 6,655
A9	STATION	22° 05' 47.90095"E	37° 21' 40.45864"N	41 5,662
E4	STATION	22° 06' 08.25301"E	37° 21' 16.68506"N	42 4,018
E6	STATION	22° 05' 45.34440"E	37° 21' 23.83612"N	42 9,385
E8	STATION	22° 05' 27.40462"E	37° 21' 35.66755"N	42 0,223
NEK	TRIG LOCAL	22° 06' 04.30841"E	37° 21' 23.28613" N	433,919
RA	TRIG LOCAL	22° 01' 57.24565"E	37° 22' 03.54261"N	651,208
T3AL	TRIG-LOCAL	22° 05' 31.34327"E	37° 21' 27.97088 "N	453,137
T5AL	TRIG LOCAL	22° 05' 14.44048"E	37° 22' 39.92534 "N	410,296
TEX	TRIG LOCAL	22° 06' 02.66947"E	37° 21' 29.86207" N	436,766

Πίνακας 4.6 Συντεταγμένες των σημείων με το δέκτη Promark2 στο ελλειψοειδές WGS84, επίλυση με το GNSS Solutions

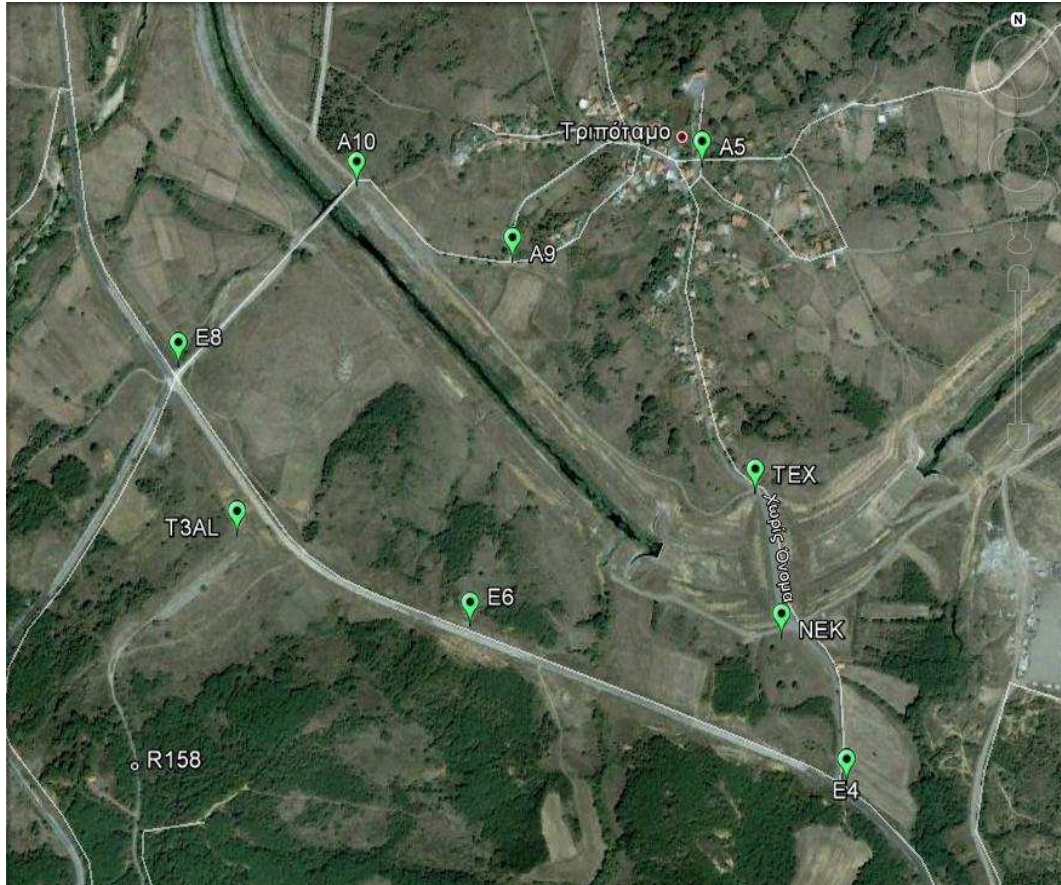
Στους παραπάνω πίνακες 4.5 και 4.6 εμφανίζονται οι συντεταγμένες των στάσεων κατόπιν της επίλυσης με το GNSS Solutions στο ελλειψοειδές WGS'84. Από τη σύγκριση των παραπάνω δεδομένων προκύπτουν οι παρακάτω πίνακες 4.7 και 4.8 όπου διακρίνονται οι διαφορές οριζοντιογραφικά (EGΣA86) και υψομετρικά (EGM96) μεταξύ του πρώτου και δεύτερου κύκλου μετρήσεων.

Στάση	1 ^{ος} κύκλος		2 ^{ος} κύκλος		Διαφορά (m)	
	x (m)	y (m)	x (m)	y (m)	Δx	Δy
A10	331058,626	4136473,582	331058,626	4136473,581	0	-0,001
A5	331577,860	4136480,214	331577,859	4136480,218	-0,001	0,004
A9	331293,174	4136358,347	331293,174	4136358,346	0	-0,001
E4	331779,142	4135615,532	331779,142	4135615,532	0	0
E6	331219,944	4135847,287	331219,944	4135847,287	0	0
E8	330785,939	4136220,861	330785,939	4136220,862	0	0,001
NEK	331686,182	4135820,937	331686,174	4135820,949	-0,008	0,012
RA	325633,429	4137186,200	325633,429	4137186,200	0	0
T3AL	330878,045	4135981,682	330878,045	4135981,682	0	0
T5AL	330507,131	4138207,834	330507,131	4138207,834	0	0

TEX	331649,936	4136024,427	331649,936	4136024,427	0	0
-----	------------	-------------	------------	-------------	---	---

Πίνακας 4.7 Οριζοντιογραφικές διαφορές στάσεων μεταξύ 1^{ου} και 2^{ου} κύκλου μετρήσεων

Το κυρίως δίκτυο το οποίο αποτελείται από εννέα στάσεις όπως διακρίνεται στην εικόνα 4.9 επιλύθηκε και αυτόνομα με εκτίμηση σφάλματος τα 5mm συνολικά.



Εικόνα 4.9 Οι στάσεις του κυρίως δικτύου συμβολίζονται με πράσινο χρώμα

Στάση	1 ^{ος} κύκλος	2 ^{ος} κύκλος	Διαφορά
	H (m)	H (m)	mm
A10	380,424	380,423	-0,001
A5	407,527	407,526	-0,001
A9	386,562	386,562	0
E4	394,915	394,915	0
E6	400,315	400,316	0,001
E8	391,169	391,170	0,001
NEK	404,814	404,866	0,052
RA	622,518	622,518	0

T3AL	424,087	424,087	0
T5AL	381,196	381,197	0,001
TEX	407,654	407,654	0

Πίνακας 4.8 Υψομετρικές διαφορές στάσεων μεταξύ 1^{ου} και 2^{ου} κύκλου μετρήσεων

Τα υψόμετρα που παρέχει το GPS αναφέρονται στο ελλειψοειδές WGS'84 και ονομάζονται γεωμετρικά ενώ η γεωμετρική χωροστάθμηση παρέχει ορθομετρικά υψόμετρα τα οποία έχουν μια φυσική σημασία και είναι η κάθετη απόσταση του σημείου από το τοπικό γεωειδές. Η βασική σχέση που συνδέει τα δύο αυτά υψόμετρα είναι: $h = H + N$ όπου h είναι το γεωμετρικό υψόμετρο, H είναι το ορθομετρικό υψόμετρο και N η αποχή του γεωειδούς. Το μοντέλο που χρησιμοποιείται συνήθως για την αναγωγή των γεωμετρικών υψομέτρων σε ορθομετρικά είναι το παγκόσμιο μοντέλο γεωειδούς EGM96. Λόγω όμως του τρόπου υλοποίησής του μοντέλου δεν είναι δυνατόν να παρέχει την απαιτούμενη ακρίβεια που χρειάζεται για γεωδαιτικές εφαρμογές σε κάθε περιοχή της γης. Για τον λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι και τεχνικές για τον ακριβή προσδιορισμό ορθομετρικών υψομέτρων με την χρήση GPS που να ικανοποιούν τις απαιτήσεις ακριβείας που χρειάζονται.

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα και προτάσεις

5.1. Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία ιδρύθηκε δίκτυο σταθερών σημείων και μετρήθηκε με τη μέθοδο στατικού εντοπισμού μέσω GPS. Από τις εργασίες και τα αποτελέσματα που προέκυψαν μπορούν να εξαχθούν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Ένα από τα σημεία εμφανίζει μεγαλύτερο σφάλμα από τα υπόλοιπα μεταξύ των δύο κύκλων μετρήσεων (NEK) τόσο οριζοντιογραφικά, 8 και 12mm, όσο και υψομετρικά 52mm. Το γεγονός τράβηξε την προσοχή για περαιτέρω έλεγχο του σημείου και διαπιστώθηκε ότι στον πρώτο κύκλο μετρήσεων η γεωμετρία των δορυφόρων και ο αριθμός τους δεν ήταν κατάλληλα. Όσον αφορά τη γεωμετρία ήταν από τη μία πλευρά οι δορυφόροι και μικρότερος ο αριθμός τους από τις υπόλοιπες στάσεις. Αν και το σημείο βρίσκεται κοντά σε εκκλησία (περιορισμός στο οπτικό πεδίο προς τον ουρανό) στο δεύτερο κύκλο η συλλογή των δεδομένων έγινε ορθά και έτσι οι συντεταγμένες για το NEK σκόπιμο είναι να ληφθούν ως από τον 2^ο κύκλο.
- Σημαντική είναι η σήμανση και τοποθέτηση των σημείων, εφόσον δεν είναι δυνατό να τοποθετηθούν επί βάρους, να είναι εμφανή και σε θέσεις που θα τους δίνουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν για μελλοντικές μετρήσεις. Μεταξύ των δύο κύκλων μετρήσεων διεξήχθησαν εργασίες ασφαλτόστρωσης, με τον κίνδυνο απώλειας των στάσεων εάν είχαν τοποθετηθεί επί του οδοστρώματος. Κάτι τέτοιο αποφεύχθηκε με την τοποθέτηση των στάσεων σε πλευρικά ερείσματα σκυροδέματος.
- Τα αποτελέσματα των επιλύσεων του δικτύου που εξήχθησαν από τα λογισμικά επεξεργασίας δεδομένων GPS, όσον αφορά την οριζοντιογραφική θέση των σημείων, δεν παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές με μέγιστη τα 4mm σε ένα σημείο και στα υπόλοιπα σημεία από 0-1mm. Υψομετρικά παρατηρήθηκαν διαφορές της τάξης του 1mm και 52mm για το σημείο NEK το οποίο αποδείχθηκε σε όχι και τόσο ακριβή μέτρηση στον πρώτο κύκλο. Οι παραπάνω διαφορές βρίσκονται εντός των ακριβειών των οργάνων και έτσι δεν μπορούμε να εξαγάγουμε ασφαλές συμπέρασμα για μετακίνηση των στάσεων.

- Αν και οι υψομετρικές διαφορές βρίσκονται εντός των ακριβειών των οργάνων και δεν μπορούμε να εξάγουμε ασφαλή συμπεράσματα μετακινήσεων, διακρίνεται μία τάση υπερύψωσης και όχι καθίζησης που θα ήταν το αναμενόμενο, στον 2^ο κύκλο μετρήσεων, σε τρία από τα σημεία. Κάτι τέτοιο είναι δυνατό καθώς ο 2^{ος} κύκλος πραγματοποιήθηκε τη χειμερινή περίοδο μετά από βροχοπτώσεις, οι οποίες δίνουν τη δυνατότητα βραχυπρόθεσμης διόγκωσης της αργυλικής μάζας που βρίσκεται στο υπέδαφος.
- Ο πρώτος κύκλος μετρήσεων πραγματοποιήθηκε με μονόσυχνους (L1) δέκτες και ο δεύτερος κύκλος με διπλόσυχνους (L1 και L2). Κατά την επίλυση δεν διαπιστώθηκαν διαφορές στις θέσεις των στάσεων τόσο μεταξύ των δύο κύκλων στην μία συχνότητα (απομονώθηκε η L2 στον δεύτερο κύκλο) όσο και σε όλες τις συχνότητες που ήταν διαθέσιμες (L1 για τον πρώτο και L1-L2 για τον δεύτερο κύκλο). Έτσι οι μονόσυχνοι δέκτες είναι επαρκείς για τέτοιου μεγέθους βάσεις περί τα 5km και δίνουν εξίσου ικανοποιητικά αποτελέσματα με διπλόσυχνους δέκτες.
- Η διάρκεια των μετρήσεων είναι μεγαλύτερη με τους μονόσυχνους δέκτες καθώς για να έχουμε επαρκή και ασφαλή αποτελέσματα θα πρέπει να παραμείνουν ταυτόχρονα σε λειτουργία για περίπου 10 λεπτά ανά χιλιόμετρο μήκους βάσης σε αντίθεση με τους διπλόσυχνους, στους οποίους επαρκεί ο μισός χρόνος ανά χιλιόμετρο βάσης για επαρκή αποτελέσματα.

5.2. Προτάσεις

- Εξαιτίας του γεωλογικού και γεωτεχνικού υποβάθρου της περιοχής μελέτης, προτείνεται η περιοδική μέτρηση του δικτύου, προκειμένου να παρακολουθείται η ταχύτητα εξέλιξης των επιφανειακών μετακινήσεων (καθιζήσεις – μετακινήσεις) στο πέρασμα του χρόνου. Με αυτό τον τρόπο εξάγονται συμπεράσματα τόσο για την κινηματική συμπεριφορά όσο και για την απόκριση του εδάφους κάτω από τις γεωτεχνικές επιδράσεις, όπως είναι τα στατικά φορτία και τα δυναμικά φορτία, την επίδραση των επιχωματώσεων που έχουν γίνει λόγω των έργων διευθέτησης του ποταμού Αλφειού καθώς, και των εργασιών εξόρυξη λιγνίτη από τη Δ.Ε.Η. αφού γίνονται εκσκαφές πολλών δεκάδων αλλά και εκατοντάδων μέτρων σε βάθος σε πολύ κοντινή απόσταση από το δίκτυο που ιδρύσαμε στην περιοχή.
- Λόγω της έλλειψης σταθερών σημείων αναφοράς γύρω από την περιοχή μας χρησιμοποιήθηκε μόνο ένα σημείο αναφοράς και έτσι δεν υπήρχε η δυνατότητα διασφάλισης ότι το συγκεκριμένο σημείο δεν θα μετακινηθεί.

Προτείνεται η τοποθέτηση σταθερών βάθρων (3-4) σε περίπου ίση απόσταση όσο απέχει το σταθερό σημείο από το κέντρο της περιοχής μας σε αντίρροπες διεύθυνσης με σκοπό να «αγκαλιάσουν» το δίκτυο της περιοχής μας.

- Επίσης μπορούν να γίνουν μετρήσεις και με τη μέθοδο RTK στην περιοχή στα ήδη υπάρχοντα σημεία ώστε να ελεγχθεί η ακρίβεια της συγκεκριμένης μεθόδου στον οριζοντιογραφικό και υψομετρικό έλεγχο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική βιβλιογραφία

Φωτίου Α., Λιβιεράτος Ε. (2000). *Γεωμετρική γεωδαισία και δίκτυα*, εκδ. Ζήτη, Θεσσαλονίκη.

Βέης Γ., Μπιλλήρης Χ., Παπαζήση Κ. (2006). *Κεφάλαια ανώτερης γεωδαισίας*, ΕΜΠ, Αθήνα.

Α.Μ. Αγατζά- Μπαλοδήμου (2005). *Θεωρία σφαλμάτων και συνορθώσεις Ι*, ΕΜΠ, Αθήνα.

Δ.- Δ. Μπαλοδήμος, Δ. Σταθάς, Ο. Αραμπατζή (2006). *Γεωδαισία, δίκτυα, αποτυπώσεις, χαράξεις*, ΕΜΠ, Αθήνα.

Μπαλοδήμος Δ., Ο. Αραπατζή (2004). *Υψομετρία*, Ε.Μ.Π., Αθήνα

Παραδείσης Δ. (2000). *Σημειώσεις δορυφορικής γεωδαισίας, κέντρο δορυφόρων Διονύσου*, Ε.Μ.Π., Αθήνα.

Τσακίρη Μ. (2004). *Εισαγωγή στο GPS*, Εργαστήριο γενικής γεωδαισίας, Ε.Μ.Π., Αθήνα.

Μ. Μελετίου (2008). *Προσδιορισμός ορθομετρικών υψομέτρων με τη χρήση GPS- Εφαρμογή στο ανοικτό ορυχείο Μαραθούσα στη Μεγαλόπολη*, διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα.

Καραθανάση Φ. (2009). *Επέκταση δικτύου GPS για τον έλεγχο μετακινήσεων στην περιοχή Ν. Φάληρο- Μοσχάτο- Καλλιθέα*, διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα.

Σωτηρόπουλος Β. (2012). *Εγκατάσταση υψομετρικού δικτύου ελέγχου μετακινήσεων στον οικισμό Τριπόταμο των ορυχείων Μεγαλόπολης*, διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα.

Διεθνής βιβλιογραφία

Mike Stewart and Maria Tsakiri (2001). *Long-term dam surface monitoring using the global positioning system*, paper.

F. Mancini, F. Stecchi, M. Zanni, G. Gabbianelli (2008). *Monitoring ground subsidence induced by salt mining in the city of Tuzla (Bosnia and Herzegovina)*, Springer-Verlag, Italy.

F. Mancini, F. Stecchi, G. Gabbianelli, A. Dzindo (2008). *Ground collapsing in the City of Tuzla (Bosnia & Herzegovina)*, paper.

Gethin Wyn Roberts, Chris Brown, Xiaolin Meng (2006). *Deflection monitoring and frequency analysis of the Forth Road bridge using GPS*, 3rd IAG / 12th FIG Symposium, Baden.

Xiufeng He, Guang Yang, Xiaoli Ding and Yongqi Chen (2004). *Application and evaluation of a GPS multi-antenna system for dam deformation monitoring*, paper, Hong Kong.

Kenneth W. Hudnut and Jeffrey A. Behr (1998). *Continuous GPS monitoring of Structural Deformation at Pacoima Dam*, article at seismological research letters.

Mine subsidence board (1997). *Guidelines for coal mines and roads with respect to subsidence*, Newcastle West.

Διαδίκτυο

- www.gps.gov
- <http://www.trimble.com/>
- <http://www.ashtech.com>
- www.geometh-data.ethz.ch
- www.academicjournals.org
- www.hepos.gr/
- <http://www.geospatialworld.net>
- <http://www.gmat.unsw.edu.au>
- http://pasadena.wr.usgs.gov/scign/group/pacoima_dam/dam.html
- <http://en.wikipedia.org>
- <http://www.geospatialworld.net>
- <http://teknologimalaysia.academia.edu>