

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΑΚΡΙΒΗΣ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΟΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΜΙ-
ΚΡΟΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΒΑΛΣΑΜΙΩΤΗ ΣΤΗ ΔΥΤΙΚΗ
ΚΡΗΤΗ

Διπλωματική εργασία

Χαρδαλούπας Ι. Διονύσιος



Εξεταστική Επιτροπή

Μερτίκας Στυλιανός

Παρτσινέβελος Παναγιώτης

Τσουχλαράκη Ανδρονίκη

Χανιά

Σεπτέμβριος, 2018

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι ο ακριβής γεωδαιτικός εντοπισμός με την χρήση των παγκοσμίων συστημάτων δορυφορικού εντοπισμού (Global Navigation Satellite Systems, GNSS) για την παρακολούθηση μικρομετακινήσεων στο φράγμα Βαλσαμιώτη στα Χανιά Κρήτης, Ελλάδα. Ο εντοπισμός πραγματοποιήθηκε με το αμερικανικό δορυφορικό σύστημα GPS (Global Positioning System), δημιουργήθηκε ένα τοπικό γεωδαιτικό δίκτυο με παρατηρήσεις φάσεων και ψευδο-αποστάσεων το οποίο συνδέθηκε στη συνέχεια με απόλυτες τιμές ως προς το κέντρο μάζας της Γης.

Οι συντεταγμένες των γεωτεκτονικών παραμορφώσεων στην περιοχή του φράγματος ορίζονται με απόλυτο τρόπο ώστε να συγκρίνονται με αδιαμφισβήτητα και αντικειμενικά κριτήρια και να μην επηρεάζονται από τις τοπικές επιδράσεις της περιοχής με τις αντίστοιχες φορτίσεις και παραμορφώσεις. Όλες οι γεωδαιτικές μετρήσεις σε ένα τεχνικό έργο όπως ένα φράγμα θα πρέπει να οριστούν ως προς ένα σύστημα αναφοράς των συντεταγμένων, το οποίο να είναι συνδεδεμένο με το στερεό φλοιό της Γης (γεωκεντρικό). Οι μετακινήσεις στο φράγμα θα πρέπει να παρακολουθούνται διαχρονικά ανάλογα με την υφιστάμενη παραμόρφωση και ανεξάρτητα από τα γεωδαιτικά σημεία ελέγχου.

Για την υλοποίηση του παραπάνω έργου ιδρύθηκε δίκτυο από τέσσερα σημεία ελέγχου, έγιναν παρατηρήσεις με γεωδαιτικούς δορυφορικούς δέκτες GPS (Maggelan Promark 500, Smart 6200) για 2 ώρες, προσδιορίστηκαν οι συντεταγμένες τους ως προς θεμελιώδη παγκόσμια σημεία αναφοράς (TUC2 στο Πολυτεχνείο Κρήτης) και μετασχηματίστηκαν σε διάφορα συστήματα αναφοράς όπως το Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς του 1987 (ΕΓΣΑ-87), το δορυφορικό World Geodetic System 1984 (WGS-84) αλλά και το Ελληνικό Hellenic Terrestrial Reference System 2007 (HTRS-07).

Οι αποστάσεις των σημείων αναφοράς ήταν αρκετά μικρές σε μία ακτίνα 5km, με εξαίρεση το TUC2 το οποίο βρίσκεται σε απόσταση 25km και επέτρεψαν ακρίβεια στις προσδιοριζόμενες συντεταγμένες χαμηλότερη των 5cm. Πραγματοποιήθηκε έλεγχος των συντεταγμένων των τεσσάρων (4) σημείων ελέγχου για την ορθότητα των

μετρήσεων και διαπιστώθηκε απόκλιση της τάξης των 11 μέτρων του σημείου Α-ΣΠΟΣ με αποτέλεσμα να το αφαιρέσουμε από το σύστημα.

Τέλος πραγματοποιήθηκε κινηματικός εντοπισμός του φράγματος με χρήση του μόνιμου σταθμού TUC2 ως σημείο αναφοράς, στο Γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς ΕΓΣΑ-87. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις τριών ημερών με τον δέκτη Smart 6200 δύο συχνοτήτων που έδειξαν μετακινήσεις της τάξης χιλιοστού .

Abstract

The purpose of this diploma thesis is the precise geodetic detection with the use of Global Navigation Satellite Systems (GNSS) for the monitoring of micro-transfers in the Valsamiotis dam in Chania, Crete. The detection was carried out with the US Global Positioning System (GPS), a local geodetic network with phase and fake-distance observations was created, which was then linked in absolute values to the Earth's mass center.

The coordinates of the geotectonic deformations in the dam area are defined in an absolute way so they can be compared with undisputable and objective criteria and not to be influenced by the local effects of the area with the corresponding loads and deformations. All geodetic measurements in a technical project such as a dam should be defined to a coordinate reference system that is connected to the Earth's solid cortex (geocentric). Movements to the dam should be monitored over time depending on the existing deformation and regardless of the geodetic checkpoints.

For the implementation of the above project, a network of four control points was established, observations were made with GPS geodetic satellite receivers (Maggellan Promark 500, Smart 6200) for 2 hours, their coordinates were determined as fundamental global reference points (TUC2 at the Technical University of Crete) and transformed in various reference systems such as the 1987 Greek Geodetic Reference System (EGSA-87), the World Geodetic System 1984 (WGS-84) and the Greek Hellenic Terrestrial Reference System 2007 (HTRS-07).

The distances of the reference points were quite small over a radius of 5 km, with the exception of TUC2 located at a distance of 25 km and allowed accuracy at the specified coordinates of less than 5 cm. The coordinates of the four (4) checkpoints were checked for the correctness of the measurements and a deviation of the 11-meter point of the ASPOS point was found, resulting to its removal from the system.

Finally, kinematic detection of the dam was carried out using the TUC2 permanent station as a reference point in the EGSA-87 Geodetic Reference System. Three-day measurements were made with the Smart 6200 receiver of two frequencies showing movements in the order of millimeter.

Ευχαριστίες

Πριν την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας, επιθυμώ να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που συνεργάστηκαν μαζί μου και έπαιξαν πολύ σημαντικό ρόλο στην ολοκλήρωσή της.

Πρώτον από όλους θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Στυλιανό Μερτίκα, Διευθυντή του Εργαστηρίου Γεωδαισίας & Γεωπληροφορικής, για την πολύτιμη καθοδήγηση, εμπιστοσύνη και εκτίμηση που μου έδειξε.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω το εργαστηριακό διδακτικό προσωπικό και ιδιαίτερα τον κ. Ξενοφών Φραντζή που με υπομονή και επιμονή στάθηκε πολύτιμος αρωγός ώστε να ολοκληρωθεί η εργασία.

Τον συμφοιτητή μου Μαυρακάκη Αλέξανδρο για την βοήθεια του κατά την διεξαγωγή των μετρήσεων.

Τον εργοδηγό του φράγματος Βαλσαμιώτη κ. Χατζάκη που μου υπέδειξε όλα τα σημεία του φράγματος ώστε να χρησιμοποιηθούν στις μετρήσεις μου στο φράγμα.

Καθώς και τους μηχανικούς του Οργανισμού Ανάπτυξης Κρήτης κ. κ. Λαμπρινό Στυλιανό και Βουρβαχάκη Θεόδωρο για τις πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την τεχνική μελέτη του φράγματος.

Την αγαπημένη μου Δήμητρα που με υπομονή αφιέρωσε το χρόνο της και με συντρόφευε κατά την διάρκεια των μετρήσεων και τον αδερφό μου Ιάκωβο για την βοήθειά του κατά την συγγραφή της εργασίας.

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω τον παππού μου και τη γιαγιά μου Διονύσιο και Ευαγγελία Χαρδαλούπα, και του γονείς μου για την στήριξη και την φροντίδα τους όλα τα χρόνια των σπουδών μου στο Πολυτεχνείο.

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή	11
1.1 Δομή της εργασίας	11
Κεφάλαιο 2 Φράγματα.....	13
2.1 Ιστορική εξέλιξη φραγμάτων	14
2.2 Τύποι φραγμάτων.....	14
2.2.1 Φράγματα Βαρύτητας.....	15
2.2.2 Τοξωτά και Κελυφωτά Φράγματα.....	16
2.2.3 Αντηριδωτά Φράγματα.....	17
2.2.4 Εύκαμπτα (εδαφικά) Φράγματα	18
2.3 Λόγοι αστοχίας φραγμάτων	19
2.4 Αναγκαιότητα παρακολούθησης.....	20
Κεφάλαιο 3 Φράγμα Βαλσαμιώτη.....	22
3.1 Σχετικά με το φράγμα	22
3.2 Θεμελίωση του φράγματος	25
3.3 Σκληρό επίχωμα	26
3.4 Όργανα παρακολούθησης φράγματος και λοιπών έργων	27
3.4.1 Μετρήσεις μετατοπίσεων	27
3.4.2 Πιεζομετρικές μετρήσεις στη θεμελίωση.....	28
3.4.3 Σεισμογράφοι.....	30
3.4.4 Μέτρηση θερμοκρασίας στο σκληρό επίχωμα.....	30
Κεφάλαιο 4 Γεωδαιτικά συστήματα αναφοράς	31
4.1 Γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς WGS-84.....	35
4.2 Πλαίσια αναφοράς.....	35
4.3 Τοπικές Υλοποιήσεις (Datum)	38
4.3.1 Γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς ΕΓΣΑ-87	39
4.3.2 Γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς HTRS-07	40
Κεφάλαιο 5 Συστήματα Δορυφορικά Εντοπισμού	42
5.1 Ιστορική αναδρομή	42
5.2 GPS.....	43
5.2.1 Αρχές λειτουργίας GPS	46
5.2.2 Θεμελιώδεις μετρήσεις.....	49
5.2.3 Ατμοσφαιρικές επιδράσεις	50
5.2.4 Μέθοδοι προσδιορισμού θέσης	51

5.2.5 Γραμμικοί συνδυασμοί και διαφορές φάσης	53
5.3 GLONASS	56
5.4 GALILEO.....	58
5.5 COMPASS/BEIDOU	59
Κεφάλαιο 6 Το τοπικό γεωδαιτικό δίκτυο	61
6.1 Τριγωνομετρικά σημεία	61
6.2 Μόνιμος σταθμός GPS (TUC2)	63
Κεφάλαιο 7 Επεξεργασία Μετρήσεων	65
7.1 Προετοιμασία μετρήσεων	66
7.2 Διαδικασία μετρήσεων	66
7.3 Επεξεργασία Μετρήσεων-Αποτελέσματα.....	71
7.3.1 Επίλυση στο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς ΕΓΣΑ-87	73
7.3.2 Επίλυση στο παγκόσμιο σύστημα αναφοράς WGS-84	77
7.3.3 Επίλυση στο Ελληνικό σύστημα αναφοράς HTRS-07.....	82
7.4 Επίλυση με κινηματικό εντοπισμό	86
Κεφάλαιο 8 Συμπεράσματα – προτάσεις	89

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1:Φράγμα βαρύτητας στην περιοχή Καμπί, Λευκωσίας.(http://www.jandpcy.com/el/Palekhor-Kampi-Dam-gr)	16
Σχήμα 2.2:Τοξωτό φράγμα λίμνης Πλαστήρας.	17
Σχήμα 2.3:Αντηριδωτό φράγμα Wimbleball στη Σουηδία.	18
Σχήμα 2.4: Χωμάτινο φράγμα Μαυροματίου Σούρπης Μαγνησίας	19
Σχήμα 3.1:Η θέση του φράγματος Βαλσαμιώτη στην περιοχή των Χανίων.	22
Σχήμα 3.2: Το φράγμα Βαλσαμιώτη	23
Σχήμα 3.3: Τυπική διατομή φράγματος στη θέση του υπερχειλιστή.	24
Σχήμα 3.4: Κλισίμετρο	29
Σχήμα 3.5: Σεισμογράφος	30
Σχήμα 4.1:Σχηματική απεικόνισή ΦΓΕ, γεωειδούς, ελλειψοειδούς.	32
Σχήμα 4.2:Απόκλιση ελλειψοειδούς από γεωειδές	33
Σχήμα 4.3: Τρισδιάστατο σύστημα συντεταγμένων	34
Σχήμα 4.4:Διάγραμμα χρονοσειράς του σταθμού TUC2 στο ETRF2014.	37
Σχήμα 4.5: Διάγραμμα χρονοσειράς του σταθμού TUC2 στο ITRF2014.	38
Σχήμα 4.6:Τριγωνομετρικό δίκτυο 1 ^{ης} τάξης. (Βλάχος, 1987)	40
Σχήμα 5.1: Οι τροχιές των δορυφόρων GPS	44
Σχήμα 5.2: Τα τρία τμήματα του GPS	46
Σχήμα 5.3: Προσδιορισμός θέσης από την τομή τριών σφαιρών	48
Σχήμα 5.4: Σχετικός στατικός προσδιορισμός θέσης με GPS	52
Σχήμα 5.5: Απλές διαφορές	54
Σχήμα 5.6: Διπλές διαφορές	55
Σχήμα 5.7: Τριπλές διαφορές	55
Σχήμα 5.8:Τροχιές δορυφόρων Glonass	56
Σχήμα 5.9: Τροχιές δορυφόρων Galileo	58
Σχήμα 5.10: Τροχιές δορυφόρων Compass/Beidou	60
Σχήμα 6.1: Τριγωνομετρικό Σημείο	61
Σχήμα 6.2: Πληροφορίες τριγωνομετρικού σημείου	62
Σχήμα 6.3: Μόνιμος σταθμός GPS (TUC2)	64
Σχήμα 7.1: Το τοπικό γεωδαιτικό δίκτυο	65
Σχήμα 7.2: Η διακύμανση της ατμοσφαιρικής πίεσης κατά την διάρκεια των μετρήσεων.	67
Σχήμα 7.3: Διάγραμμα θερμοκρασίας κατά την διάρκεια των μετρήσεων	67
Σχήμα 7.4: Διάγραμμα υγρασίας κατά την διάρκεια των μετρήσεων	68
Σχήμα 7.5: Διάγραμμα διαφοράς πίεσης κατά την διάρκεια των μετρήσεων	68
Σχήμα 7.6: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας κατά την διάρκεια των μετρήσεων	69
Σχήμα 7.7: Διάγραμμα διαφοράς υγρασίας κατά την διάρκεια των μετρήσεων	69
Σχήμα 7.8: Τρικόχλιο	70
Σχήμα 7.9: Χρονολόγιο παρατηρήσεων στο λογισμικό επεξεργασίας.	71
Σχήμα 7.10: Επίλυση του φράγματος ξεχωριστά από κάθε σημείο του γεωδαιτικού δικτύου.	72
Σχήμα 7.11: Συνολική επίλυση γεωδαιτικού δικτύου.	72
Σχήμα 7.12: Έλεγχος κορυφών δικτύου από TUC2 στο ΕΓΣΑ-87	73
Σχήμα 7.13:Αποκλίσεις των τριγωνομετρικών σημείων από την επίλυση της Γ.Υ.Σ.	74
Σχήμα 7.14:Επίλυση του φράγματος από κάθε σημείο στο ΕΓΣΑ-87	75
Σχήμα 7.15:Επίλυση τριγωνομετρικών δικτύων στο ΕΓΣΑ-87.	76

Σχήμα 7.16: Επίλυση-υπολογισμός συντεταγμένων τριγωνομετρικών σημείων στο WGS-84 από TUC2.	78
Σχήμα 7.17: Επίλυση του φράγματος από κάθε σημείο στο WGS-84	79
Σχήμα 7.18: Επίλυση τριγωνομετρικών δικτύων στο WGS-84.	80
Σχήμα 7.19: Επίλυση του φράγματος από κάθε σημείο στο HTRS-07	82
Σχήμα 7.20: Επίλυση τριγωνομετρικών δικτύων στο HTRS-07	84
Σχήμα 7.21: Διευθύνσεις μετακίνησης X, Y.	86
Σχήμα 7.22: Μετατόπιση του φράγματος Βαλσαμιώτη στη X διεύθυνση.	87
Σχήμα 7.23: Μετατόπιση του φράγματος Βαλσαμιώτη κατά τον y άξονα.	87
Σχήμα 7.24: Μετατόπιση του φράγματος Βαλσαμιώτη στο υψόμετρο.	88
Σχήμα 8.1: Προτεινόμενη γεωμετρία βάθρων για την παρακολούθηση του φράγματος Βαλσαμιώτη.	90

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3-1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά φράγματος	24
Πίνακας 4-1: Στοιχεία ελλειψοειδών εκ περιστροφής που έχουν χρησιμοποιηθεί διαχρονικά.	33
Πίνακας 4-2: Παράμετροι WGS-84 και GRS-80.	35
Πίνακας 4-3: Υλοποιήσεις των πλαισίων αναφοράς ITRF και ETRF.	36
Πίνακας 7-1: Αποτελέσματα ελέγχου των τριγωνομετρικών σημείων στο ΕΓΣΑ-87 χρησιμοποιώντας ως σημείο αναφοράς το TUC2.	73
Πίνακας 7-2: Επίλυση του φράγματος από κάθε σημείο σε ΕΓΣΑ-87	75
Πίνακας 7-3: Μέσος όρος και τυπική απόκλιση συντεταγμένων φράγματος σε ΕΓΣΑ-87	76
Πίνακας 7-4: Αποτελέσματα επίλυσης τριγωνομετρικών δικτύων σε ΕΓΣΑ-87	76
Πίνακας 7-5: Μέσος όρος συντεταγμένων και τυπική απόκλιση φράγματος με επίλυση τριγωνομετρικών δικτύων σε ΕΓΣΑ-87	77
Πίνακας 7-6: Κλείσιμο Βρόγχου.	77
Πίνακας 7-7: Προσδιορισμός των καρτεσιανών συντεταγμένων του TUC2 στο WGS-84 για την περίοδο μετρήσεων.	78
Πίνακας 7-8: Μετατροπή των καρτεσιανών συντεταγμένων σε γεωδαιτικές	78
Πίνακας 7-9: Επίλυση-υπολογισμός των τριγωνομετρικών σημείων στο WGS-84	79
Πίνακας 7-10: Επίλυση του φράγματος από κάθε σημείο στο WGS-84	79
Πίνακας 7-11: Μέσος όρος και τυπική απόκλιση συντεταγμένων φράγματος σε WGS-84	80
Πίνακας 7-12: Επίλυση του φράγματος με τρίγωνο από το TUC2 και κάθε τριγωνομετρικό σημείο σε WGS-84	81
Πίνακας 7-13: Μέσος όρος συντεταγμένων και τυπική απόκλιση φράγματος με επίλυση τριγωνομετρικών δικτύων σε WGS-84	81
Πίνακας 7-14: Κλείσιμο Βρόγχου.	81
Πίνακας 7-15: Μετασχηματισμός από το ΕΓΣΑ-87 στο HTRS-07	82
Πίνακας 7-16: Επίλυση του φράγματος από κάθε σημείο στο HTRS-07	83
Πίνακας 7-17: Μέσος όρος και τυπική απόκλιση συντεταγμένων φράγματος σε HTRS-07	83

Πίνακας 7-18: Επίλυση του φράγματος με τρίγωνο από το TUC2 και κάθε τριγωνομετρικό σημείο στο HTRS-07	84
Πίνακας 7-19: Μέσος όρος συντεταγμένων και τυπική απόκλιση φράγματος με επίλυση τριγωνομετρικών δικτύων σε HTRS-07	84
Πίνακας 7-20: Κλείσιμο Βρόγχου.....	85

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας σε όλους τους τομείς κατά το δεύτερο μισό του εικοστού αιώνα οδήγησε στην κατασκευή μεγάλων τεχνικών και βιομηχανικών έργων με υψηλές απαιτήσεις σε ακρίβεια σχεδιασμού και εκτέλεσης. Μεγάλα σε μέγεθος και έκταση τεχνικά έργα (πχ μεγάλες γέφυρες, σιλό, φράγματα) με ειδικές απαιτήσεις χάραξης στη φάση της κατασκευής, αλλά και παρακολούθησης της συμπεριφοράς τους κατά τη φάση λειτουργίας απαιτούν βελτιωμένες μεθοδολογίες γεωδαιτικών μετρήσεων.

Επίσης η εξέλιξη της τεχνολογίας οδήγησε στη βελτίωση των γεωδαιτικών οργάνων μέτρησης, με αποτέλεσμα η επιστήμη της γεωδαισίας να μπορεί πλέον να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις ακριβείας των έργων αυτών.

Ένα ιδιαίτερο κεφάλαιο στις εφαρμογές της παρακολούθησης παραμορφώσεων έχει εισάγει η χρήση του δορυφορικού συστήματος εντοπισμού. Χρησιμοποιώντας δορυφορικούς δέκτες εντοπισμού GNSS (Global Navigation Satellite Systems) με τη μέθοδο του σχετικού στατικού εντοπισμού επιτυγχάνεται πλέον ακρίβεια κάτω του ενός εκατοστού, γεγονός που καθιστά το σύστημα αυτό κατάλληλο για ένα ευρύ φάσμα γεωδαιτικών εφαρμογών.

1.1 Δομή της εργασίας

Αρχικά γίνεται αναφορά στα φράγματα και το σκοπό κατασκευής τους. Παραθέτονται τα είδη φραγμάτων και η χρησιμότητά τους, καθώς και οι λόγοι αστοχίας τους, που μας αναγκάζουν να τα παρακολουθούμε συστηματικά.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται πληροφορίες σχετικά με το φράγμα Βαλσαμιώτη. Δίνεται έμφαση στον τρόπο κατασκευής της θεμελίωσής του, στην τεχνική του σκληρού επιχώματος που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του καθώς και στα τα συστήματα παρακολούθησης που εξασφαλίζουν την ακεραιότητά του.

Κατόπιν αναλύονται οι αρχές και τα χαρακτηριστικά των γεωδαιτικών συστημάτων αναφοράς που χρησιμοποιούνται σε παγκόσμια κλίμακα καθώς και στην ελληνική επικράτεια. Συγκεκριμένα γίνεται αναφορά στο παγκόσμιο σύστημα αναφοράς WGS-

84, το ελληνικό γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς ΕΓΣΑ-87 και το Ελληνικό γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς HTRS-07.

Έπειτα αναλύονται τα δορυφορικά συστήματα εντοπισμού (GNSS) Galileo, Beidou, Glonass, δίνοντας έμφαση στο GPS. Αναφέρονται οι αρχές λειτουργίες του, η χρησιμότητά του, οι ατμοσφαιρικές επιδράσεις που επηρεάζουν την ακρίβεια των μετρήσεων και οι τεχνικές προσδιορισμού θέσης.

Στη συνέχεια γίνεται λόγος για τα τριγωνομετρικά σημεία της ΓΥΣ που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της εργασίας και στο μόνιμο σταθμό GPS TUC2 του Πολυτεχνείου Κρήτης που χρησιμοποιήθηκε ως σημείο εξάρτησης για το τοπικό γεωδαιτικό δίκτυο.

Στο επόμενο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τον ακριβή γεωδαιτικό προσδιορισμό στο φράγμα Βαλσαμιώτη.

Τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επεξεργασίας για τον σχετικό στατικό εντοπισμό και τον κινηματικό εντοπισμό καθώς και τα συμπεράσματα που προκύπτουν ενώ γίνονται προτάσεις για την βελτίωση και περαιτέρω διερεύνηση της μεθόδου παρακολούθησης φραγμάτων που χρησιμοποιήθηκε.

Κεφάλαιο 2

Φράγματα

Τα φράγματα είναι τεχνικά έργα που κατασκευάζονται κάθετα στην κοίτη ενός φυσικού ρεύματος για να ανακόψουν τη συνέχεια της ροής του ύδατος με σκοπό την αποθήκευσή του για μελλοντική χρήση.

Σκοπός της κατασκευής ενός φράγματος μπορεί να είναι :

- η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- η άρδευση καλλιεργούμενων εδαφών
- η ύδρευση πόλεων, οικισμών ή βιομηχανικών μονάδων
- η διαμόρφωση πλωτών διωρύγων
- η ρύθμιση της παροχής φυσικών ρευμάτων

Συχνά τα φράγματα εξυπηρετούν περισσότερους από έναν σκοπούς (φράγματα πολλαπλής σκοπιμότητας). Στον ελληνικό χώρο, τα γνωστότερα φράγματα είναι αυτά που σχετίζονται:

- Με υδροηλεκτρική χρήση, όπως του Λούρου (1954), του Λάδωνα (1955), του Ταυρωπού (1959), των Κρεμαστών (1965), του Καστρακίου (1969), του Πολυφύτου (1974), του Πουρναρίου (1981), της Σφηκιάς και των Ασωμάτων (1985), του Στράτου (1988) κ.ά..
- Με υδρευτική χρήση, όπως του Μαραθώνα που ξεκίνησε το έτος 1926 και ολοκληρώθηκε το 1931, του Μόρνου που ολοκληρώθηκε το έτος 1979 κ.ά..
- Με αρδευτική χρήση, όπως της Λευκόγειας Δράμας (1972), της Απολακκιάς Ρόδου (1978), του Λειβαδιού Αστυπάλαιας (1978), της Φανερωμένης και της Πλακιώτισσας στην περιοχή Μεσαράς Ηρακλείου (1980), του Δοξά στην περιοχή του Φενεού Κορινθίας (1982), της Φωλιάς Καβάλας (1983), του Κατάφυτου Δράμας (1984) κ.ά..

Γενικά τα φράγματα χρησιμοποιούνται για αρδευτικούς σκοπούς (37%), για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (16%), για παροχή πόσιμου νερού (12%), για αντιπλημμυρικό έλεγχο (6%), για σκοπούς αναψυχής (3%) και για λοιπούς σκοπούς (4%). (ΕΕΜΦ, 2013)

2.1 Ιστορική εξέλιξη φραγμάτων

Η κατασκευή φραγμάτων ξεκίνησε πριν από 6000 χρόνια περίπου, όταν ο άνθρωπος στην προσπάθειά του να καλύψει τις ανάγκες του για νερό κατασκεύασε τα πρώτα χωμάτινα φράγματα. Το αρχαιότερο γνωστό χωμάτινο φράγμα στον κόσμο χτίστηκε το 4000 π.Χ. περίπου στην πόλη Jawa της Ιορδανίας. Από τα αρχαιότερα θεωρείται επίσης το φράγμα Sadd el-Kafara που κατασκευάστηκε στην Αίγυπτο την περίοδο 2950-2750 π. Χ.. Στην Ελλάδα το αρχαιότερο γνωστό φράγμα είναι της Τίρυνθας στην Μυκηναϊκή Αργολίδα που κατασκευάστηκε πριν από 3000 χρόνια περίπου.

Με την πάροδο των ετών οι διαστάσεις των φραγμάτων γίνονταν μεγαλύτερες και οι τεχνικές κατασκευής τους συνεχώς βελτιώνονταν κυρίως λόγω της καλύτερης κατανόησης των ιδιοτήτων των υλικών κατασκευής. Η συμβολή της γεωλογίας στο σχεδιασμό φραγμάτων είναι εξαιρετικά σημαντική, ενώ η ανάπτυξη της γεωτεχνικής μηχανικής στο πρώτο μισό του 20^{ου} αιώνα αποδείχθηκε σταθμός στην κατανόηση της συμπεριφοράς των φραγμάτων. (Terzaghi, 1925)

2.2 Τύποι φραγμάτων

Τα φράγματα είναι έργα με μεγάλο κόστος, που παρουσιάζουν όμως μακροπρόθεσμα μεγάλα οικονομικά οφέλη και για τον λόγο αυτό επιδιώκεται η κατασκευή τους. Ανάλογα με τον σκοπό που πρόκειται να εξυπηρετήσει ένα φράγμα, μελετάται και επιλέγεται ο καταλληλότερος τύπος καθώς και οι απαιτούμενες διαστάσεις του. Είναι έργα ιδιόμορφα που δεν είναι δυνατόν να τυποποιηθούν γιατί το καθένα έχει συγκεκριμένο σκοπό, τους δικούς του φυσικούς παράγοντες και το δικό του ιδιαίτερο φυσικό περιβάλλον. Οι παράμετροι που παίζουν σπουδαίο ρόλο για την θεμελίωσή του μπορούν να ταξινομηθούν σε διάφορες κατηγορίες όπως παρουσιάζονται παρακάτω :

Ανάλογα με το σκοπό που εξυπηρετούν :

- Φράγματα συγκέντρωσης νερού (επιφανειακοί ταμιευτήρες)
- Φράγματα εκτροπής
- Φράγματα ανάσχεσης της ορμής είτε για περιορισμό της διάβρωσης είτε για τεχνητό εμπλουτισμό
- Φράγματα ρύθμισης για τον έλεγχο και την πρόληψη πλημμυρών

Ανάλογα με το σκοπό εκμετάλλευσης μπορεί να είναι:

- Υδροηλεκτρικά
- Αρδευτικά

- Υδρευτικά
- Αντιπλημμυρικά
- Εμπλουτισμού υδροφόρων

Να σημειωθεί ότι τα φράγματα μπορεί να είναι διπλής ή/και πολλαπλής σκοπιμότητας με συνδυασμό των παραπάνω κατηγοριών ανά δύο ή/και περισσότερων.

Ανάλογα με το μέγεθός τους κατηγοριοποιούνται σε :

- Πολύ μεγάλα φράγματα ύψους $>150\text{m}$
- Μεγάλα φράγματα ύψους $>15\text{m}$ ή $5-15\text{m}$ με χωρητικότητα ταμιευτήρα $>3.000.000\text{ m}^3$
- Μικρά φράγματα ύψους $<15\text{m}$

Οι βασικές κατηγορίες φραγμάτων ανάλογα με την κατασκευή και τη γεωμετρία τους είναι:

i. Ακαμπτα

- Φράγματα βαρύτητας
- Αντηριδωτά φράγματα
- Τοξωτά και κελυφοειδή φράγματα

ii. Εύκαμπτα

- Χωμάτινα φράγματα
- Λιθόρριπτα φράγματα

Στη συνέχεια θα αναλυθούν οι προηγούμενες κατηγορίες φραγμάτων ώστε να δοθούν τα βασικά χαρακτηριστικά και κάποιες τεχνικές λεπτομέρειες τους.

2.2.1 Φράγματα Βαρύτητας

Τα φράγματα βαρύτητας κατασκευάζονται από σκυρόδεμα σε περιοχές με βραχώδες υπόβαθρο και με αντοχή πετρωμάτων 800 έως 1100kPa. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε κατασκευές υπερχειλίσης, αφού το σκυρόδεμα παραμένει ανεπηρέαστο από τη ροή του νερού. Το σχήμα τους είναι ευθύγραμμο ή καμπύλο, ανάλογα με το κόστος και την απαιτούμενη ασφάλεια της κατασκευής, ενώ η καμπύλωση του φράγματος είναι

μεγαλύτερη όταν στο υψηλότερο σημείο έχουμε σταθερότερο υπόβαθρο.



Σχήμα 2.1: Φράγμα βαρύτητας στην περιοχή Καμπί, Λευκωσίας. (<http://www.jandpcy.com/el/Palekhori-Kampi-Dam-gr>)

Η διατομή τους είναι τριγωνική ή τραπεζοειδής και με μεγάλο πλάτος, περίπου τα $2/3$ του ύψους τους. Αυτού του είδους τα φράγματα απαιτούν μεγάλη ποσότητα σκυροδέματος και το βάρος τους δημιουργεί την τριβή που τα κάνει ικανά να αντιστέκονται στις τεράστιες υδροστατικές πιέσεις. Εφόσον η μελέτη και η κατασκευή τους είναι ορθή, κυρίως στην θεμελίωσή τους, τότε έχουν τη δυνατότητα να είναι ασφαλή ώστε να μην υπάρξουν αστοχίες σε μεγάλο βάθος χρόνου. Η ενδεδειγμένη θέση για την κατασκευή τους είναι στην περιοχή που το βραχώδες υπόβαθρο εμφανίζεται κοντά στην επιφάνεια, τόσο στη θέση θεμελίωσης, όσο και στα πρανή του φράγματος. Η κατασκευή των φραγμάτων βαρύτητας, από οικονομικής σκοπιάς, είναι συμφέρουσα όταν ο λόγος χορδής τόξου του φράγματος προς το ύψος του φράγματος κυμαίνεται από 3 έως 6.

2.2.2 Τοξωτά και Κελυφωτά Φράγματα

Τα τοξωτά και κελυφωτά φράγματα είναι κατασκευασμένα από σκυρόδεμα, από τα οποία τα τοξωτά είναι κυρτά ως προς το κατακόρυφο επίπεδο, ενώ τα κελυφωτά ως προς το οριζόντιο επίπεδο.



Σχήμα 2.2: Τοξωτό φράγμα λίμνης Πλαστήρα.
(<http://www.cretewoman.gr/el/200.php>)

Τα τοξωτά φράγματα έχουν λεπτή διατομή, η βάση του φράγματος είναι πολύ πιο μικρή από το ύψος του, της τάξης του 10%-20% του ύψους τους και απαραίτητη προϋπόθεση για την κατασκευή αυτού του είδους φραγμάτων, είναι η ύπαρξη σταθερού βραχώδους υπόβαθρου, που μπορεί να αντέξει την ασκούμενη πίεση χωρίς σημαντικές καθιζήσεις. Οι δυνάμεις του νερού στον ταμιευτήρα ασκούνται πλευρικά στις συναρμολογίες των τοξοτών φραγμάτων, συνεπώς τα πετρώματα στα πρανή πρέπει να είναι υψηλών αντοχών. Η κατασκευή τους αποτελείται από μία σειρά από κατακόρυφα τμήματα που ενώνονται μεταξύ τους, με σκοπό να εμποδίζεται η ροή του νερού μεταξύ των τμημάτων. Από οικονομικής πλευράς τα τοξωτά φράγματα αποτελούν μία συμφέρουσα λύση, όταν ο λόγος χορδής τόξου φράγματος προς το ύψος φράγματος είναι μικρότερος του 3 και τα πετρώματα έχουν επαρκείς μηχανικές αντοχές.

2.2.3 Αντηριδωτά Φράγματα

Τα αντηριδωτά φράγματα προήλθαν από τη δυσκολία κατασκευής τοξωτών φραγμάτων σε κοιλάδες, αλλά και από την ανάγκη αποφυγής των φραγμάτων βαρύτητας λόγω κόστους κατασκευής και ανάγκης για πετρώματα στα πρανή με μεγάλες μηχανικές αντοχές. Ουσιαστικά πρόκειται για φράγματα βαρύτητας, στα οποία μειώνεται η μάζα του σκυροδέματος που απαιτείται και οι δυνάμεις μεταφέρονται στα θεμέλια του φράγματος μέσω κατακόρυφων στηριγμάτων. Ένα φράγμα αυτού του είδους έχει παράλληλες αντηρίδες με άξονες παράλληλους στον άξονα της κοιλάδας και ημικυλιν-

δρικά τμήματα μεταξύ των αντηρίδων. Στα αντηριδωτά φράγματα το πέτρωμα θα πρέπει να έχει αντοχές μεταξύ 2200-3200 kPa.



Σχήμα 2.3:Αντηριδωτό φράγμα Wimbleball στη Σουηδία.
(<https://digitalnewsroom.media/uncategorized/wimbleball-dam-maintenance-project/>)

2.2.4 Εύκαμπτα (εδαφικά) Φράγματα

Τα εδαφικά φράγματα ή φράγματα αναχώματος αποτελούν τον πιο συνηθισμένο τύπο φραγμάτων, καθώς η κατασκευή τους βασίζεται στη χρήση γεωυλικών, στην φυσική τους κατάσταση χωρίς περαιτέρω επεξεργασία. Η κατασκευή τους γίνεται σε περιοχές που τα πετρώματα στη θεμελίωση και στα πρανή έχουν χαμηλές τιμές μηχανικών αντοχών καθώς δεν ασκούν μεγάλες τάσεις - πιέσεις. Η διάκριση τους σε χωμάτινα ή σε λιθόρριπτα γίνεται ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους, δηλαδή από το αν το σώμα του φράγματος αποτελείται από συμπιεσμένο έδαφος ή συμπιεσμένο βράχο. Επιπλέον, συνήθως τα φράγματα αυτά έχουν έναν πυρήνα, ο οποίος είναι κατασκευασμένος από αργιλικά υλικά που είναι υδατοστεγή.

Τα εδαφικά φράγματα (ή γεωφράγματα) κατασκευάζονται από αργιλικό πυρήνα, ο οποίος λειτουργεί και ως υπόγειο διάφραγμα καθώς επεκτείνεται συνήθως σε μεγάλο βάθος. Ένα λεπτόκοκκο φίλτρο στα ανάντη του πυρήνα του φράγματος, με στόχο την προστασία του από το νερό του ταμιευτήρα και την αποφυγή εμφάνισης τυχόν προβλημάτων από τη συνεχή και άμεση επαφή του με το νερό. Ένα λεπτόκοκκο φίλτρο στα κατάντη του πυρήνα, για την αποφυγή της εσωτερικής διάβρωσης του πυρήνα,

καθώς με το φίλτρο επιτυγχάνεται η αποστράγγιση του. Ένα σώμα στήριξης αποτελούμενο από χονδρόκοκκα υλικά για την καλύτερη στήριξη και σταθεροποίηση του πυρήνα και των φίλτρων και από αδρομερή υλικά για την προστασία του πρανούς στα ανάντη του φράγματος από κυματισμούς που μπορεί να επιφέρουν βλάβη στο φράγμα.



Σχήμα 2.4: Χωμάτινο φράγμα Μαυροματίου Σούρης Μαγνησίας

Τα πλεονεκτήματα τους έναντι των άλλων τύπων φραγμάτων είναι ότι έχουν σχετικά χαμηλό κόστος κατασκευής, λόγω της χρησιμοποίησης διαθέσιμων υλικών που βρίσκονται στο τόπο κατασκευής τους. Επίσης μπορούν να κατασκευασθούν σε εδάφη θεμελίωσης και αντερεισμάτων χαμηλών απαιτήσεων αντοχής, με κίνδυνο την παραμόρφωσή του λόγω μεγάλου εύρους βάσης και ως εύκαμπτες κατασκευές έχουν μεγάλες ανοχές καθιζήσεων (ακόμα και διαφορικών καθιζήσεων), ιδίως αν κατασκευασθούν με μεγάλων διαστάσεων αργιλικό πυρήνα, το υλικό του οποίου έχει συμπυκνωθεί με σχετικά υψηλή υγρασία, και εάν έχουν επαρκή φίλτρα.

2.3 Λόγοι αστοχίας φραγμάτων

Τα φράγματα αποτελούν μεγάλα τεχνικά έργα που υποβάλλονται από την στιγμή της κατασκευής τους σε καταπονήσεις με αποτέλεσμα να ελλοχεύει πιθανότητα αστοχίας την οποία οι μηχανικοί προσπαθούν να ελαχιστοποιήσουν. Οι κυριότερες αιτίες αστοχίας είναι:

- θραύση θεμελίωσης
- υποπιέσεις, διαβρώσεις, υδραυλικές υποσκαφές
- μετακινήσεις ρηγμάτων λόγω σεισμού
- κατολισθήσεις αντερεισμάτων
- μεγάλες παραμορφώσεις τόσο στη θεμελίωση όσο και στο σώμα του φράγματος

Ένας ορθός ορισμός της αστοχίας, σύμφωνα με τη Διεθνή Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων (ICOLD,1985) είναι η «κατάρρευση ή μετακίνηση μέρους του φράγματος ή της θεμελίωσής του με αποτέλεσμα το φράγμα να αδυνατεί να συγκρατήσει το νερό, οδηγώντας έτσι στην απελευθέρωση μεγάλων ποσοτήτων ύδατος με αποτέλεσμα να υπάρξει κίνδυνος για τις ανθρώπινες ζωές αλλά και για τις περιουσίες και γενικότερα για ό,τι βρίσκεται στα κατάντη του φράγματος.

2.4 Αναγκαιότητα παρακολούθησης

Τα μεγάλα σε μέγεθος και έκταση τεχνικά έργα τυγχάνουν ιδιαίτερης προσοχής κατά το στάδιο κατασκευής τους από τον ανάδοχο του έργου, αλλά και στην παρακολούθηση της κινηματικής, μηχανικής και υδραυλικής συμπεριφοράς τους κατά τη φάση λειτουργίας τους. Η σωστή λειτουργία των φραγμάτων εξασφαλίζεται με τη σωστή συντήρηση και τη συστηματική παρακολούθησή τους. Η παρακολούθηση των φραγμάτων ξεκινά ήδη από την περίοδο της κατασκευής. Στη φάση αυτή πρωταρχικός ρόλος της παρακολούθησης είναι η ασφάλεια και στη συνέχεια η επιβεβαίωση των παραδοχών που έγιναν κατά το σχεδιασμό. Μετά το πέρας της κατασκευής η παρακολούθηση εφαρμόζεται με στόχο τον έλεγχο της σταθερότητας του φράγματος, κυρίως κατά τη διάρκεια της πρώτης πλήρωσης αλλά και μετέπειτα, μακροχρόνια, για τη διασφάλιση της σωστής λειτουργίας του. Η παρακολούθηση γίνεται με τη χρήση ειδικού εξοπλισμού. Μεταξύ των παραμέτρων που μετρούνται από τα σύστημα παρακολούθησης όπως μετακινήσεις, υδροστατικές πιέσεις, θερμοκρασία και σεισμική δραστηριότητα, οι μετακινήσεις αποτελούν τη μόνη παράμετρο που επηρεάζεται από το σύνολο των φορτίων αλλά και από μεταβολές της θερμοκρασίας που δρουν πάνω στην κατασκευή. Η παρακολούθηση της χρονικής εξέλιξης των μετακινήσεων είναι πολύ σημαντική και εξυπηρετεί δύο βασικούς σκοπούς:

- ο την πρόβλεψη των μελλοντικών μετακινήσεων για την αποφυγή πιθανής αστοχίας

- ο την συγκέντρωση πληροφοριών και τον καθορισμό της ανάγκης για έγκαιρη συντήρηση ή επέμβαση στην κατασκευή

Για τη μέτρηση των μετακινήσεων χρησιμοποιούνται γεωτεχνικά όργανα π.χ. κλισίμετρα, μηκυνσιόμετρα κτλ. (μέτρηση πιθανής κλίσης της κατασκευής και μετακίνησης της θεμελίωσης) καθώς επίσης γεωδαιτικά όργανα (GPS, ολοκληρωμένοι γεωδαιτικοί σταθμοί, χωροβάτες κτλ.) για τη μέτρηση οριζόντιων και κατακόρυφων μετακινήσεων σημείων σε επιλεγμένες θέσεις στην επιφάνεια του φράγματος ως προς τα σημεία αναφοράς (τα οποία θεωρούνται a priori σταθερά) εγκατεστημένα σε σταθερό έδαφος, καθώς επίσης εκκρεμή απλά και ανεστραμμένα για την μέτρηση σχετικών μετατοπίσεων στη στέψη και τη θεμελίωση.

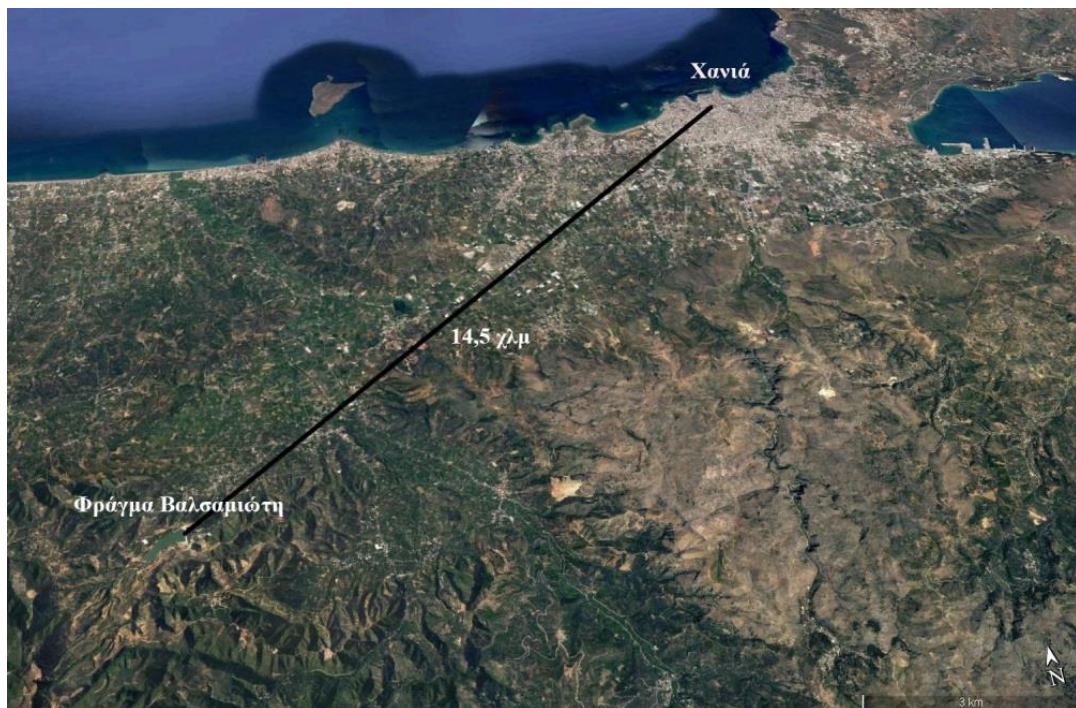
Στη συνέχεια θα γίνει λεπτομερής περιγραφή του φράγματος Βαλσαμιώτη καθώς και των συστημάτων παρακολούθησης που διαθέτει για την διασφάλιση της ομαλής και απροβλημάτιστης λειτουργίας του.

Κεφάλαιο 3

Φράγμα Βαλσαμιώτη

3.1 Σχετικά με το φράγμα

Το φράγμα Βαλσαμιώτη προγραμματίστηκε και σχεδιάστηκε από τον Ο.Α.ΔΥ.Κ. (Οργανισμός Ανάπτυξης Δυτικής Κρήτης) στο πλαίσιο του γενικότερου έργου της αξιοποίησης του υδάτινου δυναμικού της Δυτικής Κρήτης και ολοκληρώθηκε από τον ενιαίο πλέον οργανισμό Ο.Α.Κ. (Οργανισμός Ανάπτυξης Κρήτης). Βρίσκεται στο βορειοανατολικό άκρο του ρέματος Βαλσαμιώτη σε απόσταση 14,5 χλμ. από τα Χανιά Κρήτης (Σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1: Η θέση του φράγματος Βαλσαμιώτη στην περιοχή των Χανίων.

Πρόκειται για το μεγαλύτερο φράγμα του είδους του στην Ελλάδα και το μοναδικό στην Κρήτη, ενώ είναι το υψηλότερο φράγμα στην κατηγορία του στην Ελλάδα. Από το 2014 το φράγμα Βαλσαμιώτη λειτουργεί με αγωγό παρέχοντας νερό στους οικισμούς Αλικιανό, Φουρνέ και Βατόλακκο, ενώ τέθηκε σε πλήρη λειτουργία το 2015 με τη σύνδεση μέσω αγωγού και με το Κολυμπάρι.



Σχήμα 3.2: Το φράγμα Βαλσαμιώτη

Η μορφολογία της ζώνης εδράσεως του φράγματος, όπως και όλη η περιοχή της λεκάνης κατάκλισης, είναι λοφώδης με μεγάλες κλίσεις των φυσικών πρανών. Το φράγμα είναι συμμετρικό από σκληρό επίχωμα με σχεδιασμό υπερχείλισης επάνω από το επίχωμα. Συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των φραγμάτων από επίχωμα σε ότι αφορά την προσαρμογή του έργου σε εδάφη θεμελιώσεως με μέτρια μηχανικά χαρακτηριστικά και των φραγμάτων από σκυρόδεμα λόγω της ευκολίας ενσωματώσεως των υδραυλικών έργων.



Σχήμα 3.3: Τυπική διατομή φράγματος στη θέση του υπερχειλιστή.

Η χωρητικότητα του φράγματος είναι έξι εκατομμύρια κυβικά μέτρα ($6.000.000 \text{ m}^3$), η στέψη του φράγματος είναι τριακόσια μέτρα (300m) περίπου και το μέγιστο βάθος είναι εξήντα δύο μέτρα (62m). (ΟΑΔΥΚ,1993)

Τα κυριότερα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της τυπικής διατομής του φράγματος παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 3-1:Γεωμετρικά χαρακτηριστικά φράγματος (ΟΑΔΥΚ,1993)

Διαστάσεις φράγματος	Μέγεθος
Μήκος φράγματος στη στέψη (m)	335
Ύψος φράγματος από φυσικό έδαφος (m)	67,2
Ανώτατη στάθμη αποθήκευσης(m)	190
Στάθμη στέψης (m)	190,2
Πλάτος πυθμένα στο φυσικό έδαφος (m)	80
Όγκος φράγματος (m^3)	600.000
Όγκος νερού ταμιευτήρα (m^3)	6.000.000
Εκμεταλλεύσιμος όγκος νερού (m^3)	5.900.000

3.2 Θεμελίωση του φράγματος

Σύμφωνα με τη τεχνική έκθεση για την δημιουργία του φράγματος πραγματοποιήθηκαν γεωλογικές, γεωφυσικές και γεωτεχνικές έρευνες υπαίθρου και εργαστηρίου.

Εξετάστηκαν τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του εδάφους θεμελίωσης, για να οριστικοποιηθούν οι ιδιότητες και οι μηχανικές παράμετροι των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του.

Οι γεωτεχνικές έρευνες, που έλαβαν μέρος από τους κατασκευαστές, περιλάμβαναν γεωτρήσεις δειγματοληψίας για τον προσδιορισμό υπόγειου ύδατος, γεωλογική περιγραφή των σχηματισμών, εκτίμηση βαθμού αποσαθρώσεως του εδάφους, καθώς και δείγματα από διάφορα σημεία της περιοχής για εργαστηριακές μελέτες που θα εξακρίβωναν τα κατάλληλα αδρανή υλικά και το μείγμα σκληρού επιχώματος που χρησιμοποιήθηκε .

Επίσης, πραγματοποίησαν ερευνητικές γεωτρήσεις για την οριστικοποίηση των βαθών των απαιτούμενων εκσκαφών ή/και των κλίσεων στις διάφορες περιοχές του έργου. Αυτό βοήθησε στην αποφυγή υπερεσκαφών και στην ευστάθεια του εδάφους για να αποφευχθούν προβλήματα αποστράγγισης. Η συντήρηση των πρανών και η αφαίρεση χαλαρού βράχου εξετάστηκε από τους υπευθύνους σχολαστικά προς αποφυγή ρωγμών, κοιλοτήτων και ζωνών χαλαρού και αποσαθρωμένου βράχου.

Τα διαδοχικά στάδια εκσκαφών που ακολούθησαν, αποσκοπούσαν στην απομάκρυνση της φυτικής γης και του επιφανειακού εδάφους κατά ελάχιστο πάχους ενός μέτρου στην περιοχή των αντρεισμάτων και 0,60 μέτρα στην περιοχή του αμμοχάλικου. Η απομάκρυνση των χαλαρών υλικών ξεκίνησε από τα πρανά και τις εκσκαφές στα αντρείσματα του φράγματος από τη στάθμη στέψης και προς τα κάτω για την αφαίρεση ακατάλληλων υλικών. Η εκσκαφή σε βραχώδεις σχηματισμούς στην περιοχή θεμελίωσης περιλάμβανε την απομάκρυνση του αποσαθρωμένου βράχου και των υλικών που θα μπορούσαν να εμποδίσουν τη σωστή συμπύκνωση του επιχώματος με σκοπό την κατάλληλη επιφάνεια θεμελίωσης. Κεκλιμένα μέτωπα διαμορφώθηκαν με τελικό πρανές όχι πιο απότομο από δύο (2) κατακόρυφα προς ένα (1) οριζόντιο ή εξομαλύνθηκαν με σκυρόδεμα ή εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. (ΟΑΔΥΚ,1993)

Μετά την ολοκλήρωση των εκσκαφών πραγματοποιήθηκαν έλεγχοι για την πιθανή αποκατάσταση ασθενών ζωνών με την χρησιμοποίηση σκυροδέματος ή/και εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Από την τεχνική έκθεση φαίνεται ότι δόθηκε μεγάλη έμφαση στις επιφάνειες που τοποθετήθηκε μόνιμο σκληρό επίχωμα. Η τελική μορφή των επιφανειών που θα δέχονταν το επίχωμα διαμορφώθηκαν με εργαλεία χειρός ή από εγκεκριμένα ελαφρά μηχανικά μέσα για να επιτευχθεί στιβάδα πάχους της τάξεως των 30 εκ.. Η διάστρωση του επιχώματος έγινε αμέσως μετά την προπαρασκευή της αντίστοιχης επιφάνειας και τον έλεγχο της από τον κατασκευαστή του έργου. (ΟΑΔΥΚ,1993)

Η τοποθέτηση του σκληρού επιχώματος έγινε μετά τον κατάλληλο καθαρισμό των επιφανειών έδρασης από χαλαρά γαιώδη υλικά, φυτικές γαίες κ.λπ., συμπτύκνωση στην περιοχή της κοίτης του ποταμού και επιφανειακή εκτράχυνση, με αυλακώσεις παράλληλες προς τον άξονα του φράγματος για καλύτερη πρόσφυση με την πρώτη στρώση του σκληρού επιχώματος. Για την αποφυγή δημιουργίας αναβαθμών οροθετήθηκαν οι κλίσεις βραχωδών εξάρσεων ώστε να μην υπερβαίνουν την αναλογία 1:1 και να μην έχουν απόκλιση μεγαλύτερη των 300 μέτρων από την επιφάνεια του αντερείσματος. (ΟΑΔΥΚ,1993)

3.3 Σκληρό επίχωμα

Σύμφωνα με την σύγχρονη τεχνολογία “σκληρό επίχωμα” είναι το ισχνό, ύφυγρο κυλινδρούμενο σκυρόδεμα από το οποίο κατασκευάστηκε το σώμα του υπερπηδητού φράγματος και αποτελείται από μικρή ποσότητα τσιμέντου και ελάχιστο νερό στο μίγμα που συμπτκνώνεται με κυλίνδρωση κατά στρώσεις. Η μικρή αναλογία τσιμέντου και η ελαχιστοποίηση της αναπτυσσόμενης θερμοκρασίας πήξεως (προς αποφυγή ρωγματώσεων) σε συνδυασμό με την ελάχιστη ποσότητα νερού επιτυγχάνουν την ικανοποιητική αντοχή του.

Το συμμετρικό φράγμα από σκληρό επίχωμα προέκυψε από τον συνδυασμό μιας τυπικής διατομής φράγματος του συμμετρικού φράγματος με ανάντη μανδύα στεγανότητας και ενός υλικού του σκληρού επιχώματος.

Τα κύρια στοιχεία του είναι:

- ένα συμμετρικό σώμα, που έχει προορισμό την εξασφάλιση της ευστάθειας του έργου (οι κλίσεις των πρανών είναι ίσες προς 0,9 (οριζόντιο) :1 (κατακόρυφο) και το πλάτος στέψης είναι 6 μέτρα) (ΟΑΔΥΚ,1993)
- ένας ανάντη μανδύας από οπλισμένο σκυρόδεμα, που κατασκευάστηκε σύμφωνα με την τεχνική των επενδύσεων σε λιθόρριπτα φράγματα (Concrete

Faced Rockfill Dams) για να εξασφαλίσει την στεγανοποίηση του σώματος (μία αποστραγγιστική διάταξη, μεγάλης ικανότητας εξασφαλίζει τη διατήρηση του φράγματος εκτός ύδατος).

Ο τρόπος διαμόρφωσης της διατομής επιτρέπει το συνδυασμό των πλεονεκτημάτων του φράγματος από επίχωμα και του φράγματος από σκυρόδεμα και ειδικότερα τη δυνατότητα τοποθέτησης του εκχειλιστή επί του φράγματος. Η στεγανοποίηση επεκτείνεται στην θεμελίωση, με διάφραγμα στεγανότητας, το οποίο κατασκευάζεται με τσιμεντενέσεις από την περιμετρική στοά του μανδύα και από ένα δίκτυο σιηράγγων στο βράχο. Η θεμελίωση αποστραγγίζεται με δίκτυο στοών που διατάσσονται στον πυθμένα του φράγματος και στα αντερείσματα.

Το σκληρό επίχωμα κατασκευάστηκε από μίγμα αδρανών υλικών (χαλαζιτικά και φυλλιτικά, που προήλθαν από λατομείο κοντά στο φράγμα, μέσα στη λεκάνη κατακλύσεως), ελληνικό τσιμέντο και νερό του ποταμού Δερριανού. Διαστρώθηκε σε οριζόντιες στρώσεις και συμπυκνώθηκε αποτελεσματικά με βαρύ δυνητικό οδοστρωτήρα για να είναι ταυτόχρονα εύθρυπτο αλλά και με συνοχή. Ανήκει στην οικογένεια των κυλινδρούμενων σκυροδεμάτων και οι προδιαγραφές του υλικού είναι προσαρμοσμένες σε μέτριες απαιτήσεις που αντιστοιχούν σε φράγμα με συμμετρική διατομή.

3.4 Όργανα παρακολούθησης φράγματος και λοιπών έργων

Στο φράγμα υπάρχουν διατάξεις και συστήματα παρακολούθησης για τις μετρήσεις μετατοπίσεων, τις πιεζομετρικές μετρήσεις στη θεμελίωση για παροχή διαρροών, σειсмоγράφοι, μέτρηση θερμοκρασίας στο σκληρό επίχωμα και κέντρο ελέγχου μετρήσεων.

3.4.1 Μετρήσεις μετατοπίσεων

Χρησιμοποιούνται απλά και ανεστραμμένα εκκρεμή που μετρούν σχετικές μετατοπίσεις του φράγματος στη στέψη και στην επαφή του σκληρού επιχώματος με το βράχο σε τρεις συνιστώσες X,Y,Z ως προς τη πινακίδα μέτρησης. Ακόμα υπάρχουν συσκευές μέτρησης των καθιζήσεων εγκατεστημένων στη θεμελίωση που αποτελούνται από μηχανοσκόπετρα με δυνατότητα μέτρησης ανά 10 μέτρα από τη στέψη του φράγματος έως βάθος 50 μέτρα μέσα στη θεμελίωση. (ΟΑΔΥΚ,1993)

Επίσης έχουν εγκατασταθεί κατάλληλα βάθρα για χωροστάθμιση ακριβείας στη στέψη και τις στοές προσπέλασης, η οποία πραγματοποιείται με μετρήσεις από μία χωροσταθμική αφετηρία αναφοράς εγκατεστημένη στο κατάντη του φράγματος, σε μια επαρκώς απομακρυσμένη ζώνη, ώστε να μην επηρεάζεται από την κατασκευή και την εκμετάλλευση του φράγματος. Τα βάθρα είναι διατεταγμένα ανά 10 μέτρα στη στέψη του φράγματος και στις στοές προσπέλασης. Στη περιμετρική στοά είναι μειωμένη ώστε να πραγματοποιείται μία όδευση.

Επιπρόσθετα, πραγματοποιείται επιτήρηση των πρανών βράχου που βρίσκονται πάνω από την ανάντη κεφαλή (είσοδο) του έργου εκκένωσης που γίνεται με χρήση μηκυσιόμετρου σε γεώτρηση.

Μέτρηση παραμορφώσεων της περιμετρικής στοάς στο εσωτερικό της με τοποθέτηση μηχανικών τρισδιάστατων οργάνων μετρήσεως ρωγμών στους αρμούς της.

Μέτρηση μετακινήσεων του περιμετρικού αρμού και των κατακόρυφων αρμών του ανάντη μανδύα με όργανα μέτρησης ανοίγματος αρμών τοποθετημένα στον περιμετρικό αρμό και φορητό ομοαξονικό όργανο από το φορείο επιτήρησης της ανάντη παρειάς, στον ανάντη μανδύα.

3.4.2 Πιεζομετρικές μετρήσεις στη θεμελίωση

Η παρακολούθηση της πιεζομετρικής στάθμης γίνεται μέσω σημειακών πιεζομέτρων με δονούμενη χορδή, τα οποία είναι τοποθετημένα μέσα στη θεμελίωση του φράγματος, του σκληρού επιχώματος και στις βραχώδεις όχθες. Στις βραχώδεις όχθες είναι τοποθετημένα στα κατάντη του φράγματος. Η πιεζομετρική γραμμή σε όλη τη κοιλάδα του φράγματος συμπληρώνεται με δύο εξωτερικά πιεζόμετρα.



Σχήμα 3.4: Πιεζόμετρο

Η πίεση μέσα στον αρμό μεταξύ της περιμετρικής στοάς και του ανάντη μανδύα μετρείται με δύο μανόμετρα.

Η μέτρηση της στάθμης ύδατος γίνεται με όργανα ηλεκτρικού σήματος που επιτρέπουν ακρίβεια ενός εκατοστού (1cm) στα δέκα ανώτερα μέτρα (10 m.) του ταμιευτήρα και πέντε εκατοστά (5cm) στο υπόλοιπο βάθος έως το πυθμένα του ταμιευτήρα.

Η παροχή διαρροών πραγματοποιείται με κατώφλια μετρήσεως εγκατεστημένα στους αύλακες απομάκρυνσης των υδάτων αποστραγγίσεων, στη περιμετρική στοά μέσα στις στοές αποστραγγίσεων και στις στοές προσπελάσεως. Στη περιμετρική στοά του ανάντη μανδύα, στις στοές τσιμεντώσεων και αποστραγγίσεως έχουν τοποθετηθεί σε σειρά από ένα κατώφλιο αντίστοιχα. Επίσης από ένα κατώφλιο έχει εγκατασταθεί στην έξοδο κάθε μίας από τις έξι στοές αποστραγγίσεως. Τα παραπάνω κατώφλια μετρήσεως είναι εξοπλισμένα με ρυθμιζόμενους βαθμονομημένους τριγωνικούς εκχειλιστές σχήματος V, για να προσαρμόζονται σε διάφορες τιμές παροχής. Με αυτό το τρόπο εξασφαλίζεται ότι σε συνθήκες μεταβαλλόμενης παροχής οι μετρήσεις γίνονται με υψηλή ακρίβεια.

Στα ανάντη έχει τοποθετηθεί λεκάνη ηρεμίας ώστε να ρυθμίζεται η ταχύτητα προσπελάσεως του κατωφλίου. (ΟΑΔΥΚ, 1993)



Σχήμα 3.5: Κλισίμετρο

3.4.3 Σεισμογράφοι

Το φράγμα διαθέτει 4 διασυνδεδεμένους σεισμογράφους. Οι δύο είναι εγκατεστημένοι στη στέψη του φράγματος, ο τρίτος βρίσκεται στο θάλαμο μέτρησης των εκκρεμών της στοάς προσπέλασης της δεξιάς όχθης και ο τέταρτος στο άκρο μίας εκ των σηράγγων αποστραγγίσεως του βραχώδους αντερείσματος. (ΟΑΔΥΚ,1993)



Σχήμα 3.6: Σεισμογράφος

3.4.4 Μέτρηση θερμοκρασίας στο σκληρό επίχωμα

Η διατομή στο μεγαλύτερο ύψος του φράγματος είναι εφοδιασμένη με ανιχνευτές θερμοκρασίας ώστε να παρακολουθείται η κατανομή των θερμοκρασιών στο σώμα του φράγματος.

Με την ανάπτυξη της δορυφορικής γεωδαισίας μπορούν να πραγματοποιηθούν παρατηρήσεις σχετικά με την συμπεριφορά ενός τεχνικού έργου όπως ένα φράγμα με την χρήση συστημάτων δορυφορικού εντοπισμού GNSS. Στο επόμενο κεφάλαιο θα γίνει αναφορά στο παγκόσμιο πλαίσιο αναφοράς ITRF, το ευρωπαϊκό πλαίσιο αναφοράς ETRF και στα γεωδαιτικά συστήματα αναφοράς WGS-84, ΕΓΣΑ-87, HTRS_07 που χρησιμοποιήθηκαν στις μετρήσεις.

Κεφάλαιο 4

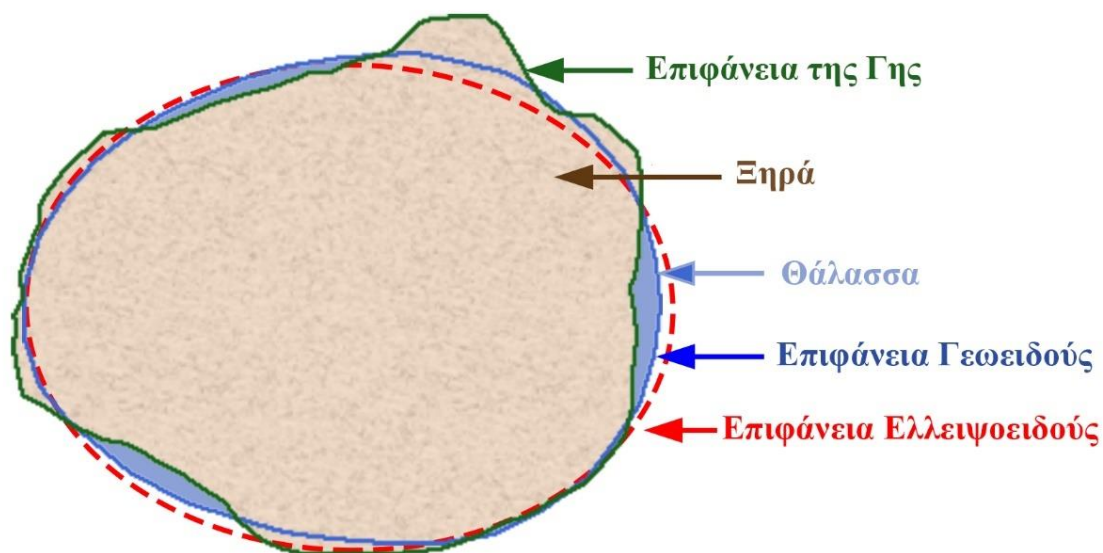
Γεωδαιτικά συστήματα αναφοράς

Όταν κάποιος αναφέρει ότι γνωρίζει τη θέση του πάνω στη γη, συνήθως αναφέρεται στο ότι ξέρει το γεωγραφικό μήκος και το γεωγραφικό πλάτος, έννοιες αρκετά γνωστές. Ακόμα θα μπορούσαμε να αναλογιστούμε πως αποφασίστηκε ότι το μηδενικό γεωγραφικό μήκος είναι στον μεσημβρινό του Greenwich και γιατί όταν ορίζεται ένα καρτεσιανό σύστημα αναφοράς ο άξονας Z διέρχεται από τον βόρειο πόλο και όχι από το νότιο.

Πρόκειται για συμβάσεις που έχουν αποφασιστεί και χρησιμοποιούνται από την επιστήμη της γεωδαισίας, την επιστήμη που ο κύριος σκοπός της είναι ο προσδιορισμός του σχήματος και του μεγέθους της γης.

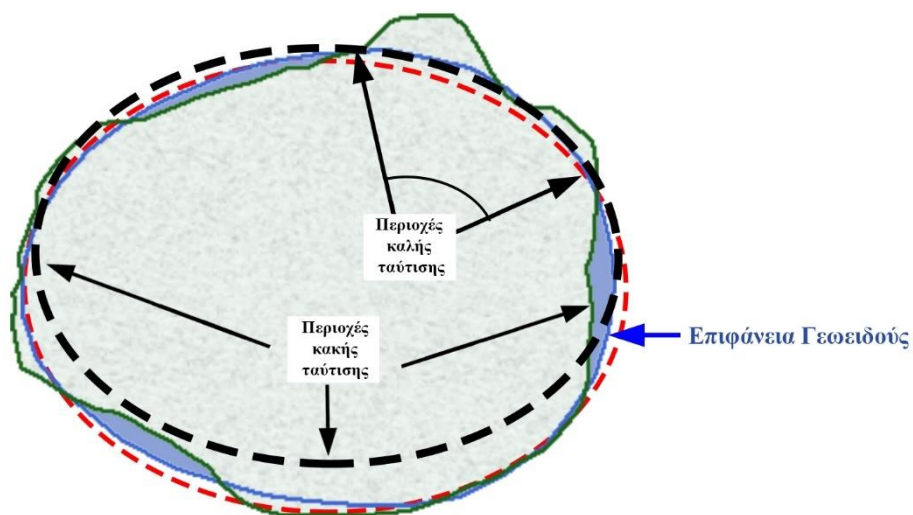
Το σύστημα αναφοράς είναι ένα σύστημα συντεταγμένων οι οποίες αναφέρονται σε ένα σταθερό σημείο και οριοθετούνται με συγκεκριμένες παραδοχές που επιτρέπουν την υλοποίησή του. Ένα γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς θα πρέπει να περιγράφει και να προσαρμόζεται όσο καλύτερα γίνεται στο σχήμα και το μέγεθος της γης, επομένως θα πρέπει να είναι ένα τρισδιάστατο σύστημα.

Οι βασικές επιφάνειες αναφοράς που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν καλύτερα το σχήμα και μέγεθος της Γης είναι το γεωειδές και το ελλειψοειδές εκ περιστροφής. Γεωειδές ονομάζεται η ισοδυναμική επιφάνεια του πραγματικού γήινου πεδίου βαρύτητας που πλησιάζει καλύτερα το πραγματικό σχήμα και μέγεθος της Γης. Ουσιαστικά είναι η επιφάνεια αναφοράς όλων των γεωδαιτικών μετρήσεων που γίνονται πάνω στη γη, αλλά χρησιμοποιείται μόνο ως επιφάνεια αναφοράς των υψομέτρων. Η χρήση του γεωειδούς ως επιφάνεια αναφοράς για τον προσδιορισμό απόλυτων και σχετικών θέσεων οριζοντιογραφικά είναι ιδιαίτερα δύσκολη καθώς η επιφάνεια αυτή δεν είναι γεωμετρική και δεν εκφράζεται με απλές μαθηματικές σχέσεις.



Σχήμα 4.1: Σχηματική απεικόνισή ΦΓΕ, γεωειδούς, ελλειψοειδούς.

Μία επιφάνεια η οποία εκφράζεται με απλές μαθηματικές σχέσεις είναι το ελλειψοειδές εκ περιστροφής. Πρόκειται για μία μαθηματική επιφάνεια η οποία δημιουργείται από την περιστροφή μιας έλλειψης γύρω από τον μικρό της άξονα και ορίζεται από τον μεγάλο ημιάξονα του a και την επιπλάτυνση του f ή από τον μικρό ημιάξονα b και την εκκεντρότητα του e . Ένα ελλειψοειδές εκ περιστροφής πρέπει να προσαρμόζεται καλύτερα στο σχήμα της Γης, δηλαδή να έχει μικρές αποκλίσεις από την επιφάνεια του γεωειδούς σε κάθε σημείο της. Έτσι μπορούμε να έχουμε ένα ενιαίο παγκόσμιο σύστημα αναφοράς και συντεταγμένων που να καλύπτει ολόκληρη την Γη. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα στοιχεία ορισμένων ελλειψοειδών εκ περιστροφής που έχουν χρησιμοποιηθεί μέχρι σήμερα ως επιφάνειες αναφοράς.

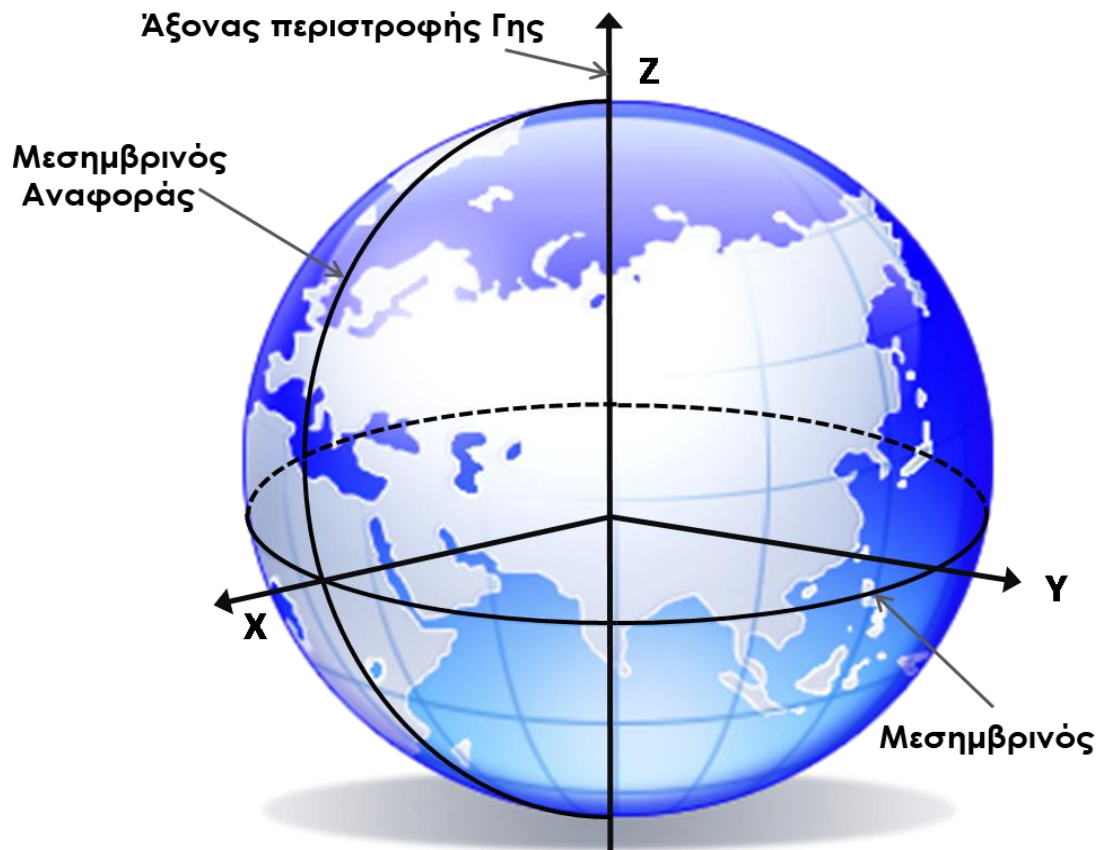


Σχήμα 4.2: Απόκλιση ελλειψοειδούς από γεωειδές

Πίνακας 4-1: Στοιχεία ελλειψοειδών εκ περιστροφής που έχουν χρησιμοποιηθεί διαχρονικά. (https://en.wikipedia.org/wiki/Earth_ellipsoid)

Ελλειψοειδές	Έτος	a(m)	f
Everest	1830	6377276	1/300
Bessel	1841	6377397	1/299.15
Clarke	1880	6378249	1/293
Hayford	1910	6378388	1/297
Krassovsky	1940	6378245	1/298.3
WGS66	1966	6378145	1/298.25
GRS 67	1967	6378160	1/298.25
WGS 72	1972	6378135	1/298.26
GRS 80	1980	6378137	1/298.26
WGS 84	1984	6378137	1/298.26
IERS	1989	6378136	1/298.26

Τα συμβατικά Γεωδαιτικά Συστήματα Αναφοράς ορίζονται με τις γεωδαιτικές συντεταγμένες στην αφετηρία (αρχικό σημείο) του συστήματος ($\varphi_0, \lambda_0, h_0$) και τις παραμέτρους του ελλειψοειδούς αναφοράς (a, f). Τα συστήματα αυτά υλοποιούνται με τις συντεταγμένες των τριγωνομετρικών σημείων.



Σχήμα 4.3: Τρισδιάστατο σύστημα συντεταγμένων

Κάθε Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς εκφράζεται τόσο με ελλειψοειδείς (φ, λ, h) όσο και με καρτεσιανές συντεταγμένες (X, Y, Z). Πρέπει να τονιστεί όμως, ότι οι συντεταγμένες αυτές εκφράζουν την ίδια ακριβώς φυσική κατάσταση και διαφέρουν μόνο στη μαθηματική τους έκφραση. Επίσης είναι δυνατή η μετατροπή τους από το ένα σύστημα στο άλλο χωρίς κανένα σφάλμα.

Ένα Καρτεσιανό Σύστημα Αναφοράς έχει ως κέντρο του το κέντρο μάζας της γης, ο άξονας Z είναι ο μέσος άξονας περιστροφής της γης και ο άξονας X περνάει από τον μεσημβρινό του Greenwich. Τέλος ο άξονας Y συμπληρώνει το δεξιόστροφο σύστημα.

4.1 Γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς WGS-84

Το WGS '84 είναι ένα γήινο σύστημα αναφοράς, το οποίο έχει ορισθεί με βάση τις μηχανικές ιδιότητες της γης και η υλοποίηση του έχει επιτευχθεί σαν αποτέλεσμα παρατηρήσεων διαφόρων δορυφόρων με τη μέθοδο μετρήσεων Doppler, με το σύστημα GPS, τηλεμετρία laser (SLR) και συμβολομετρία μεγάλων αποστάσεων (VLBI). Συγκεκριμένα, η αρχή του συστήματος των καρτεσιανών συντεταγμένων είναι το κέντρο της Γης και το WGS '84 ορίζεται σε τρεις άξονες X, Y, Z. Οι άξονες (X, Y, Z) έχουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Ο άξονας X ορίζεται σαν η τομή του μεσημβρινού Greenwich και του ισημερινού που αντιστοιχεί στο μέσο γήινο πόλο
- Ο άξονας Y ορίζεται ώστε να συμπληρώνει ένα δεξιόστροφο ορθογώνιο σύστημα.
- Ο άξονας Z είναι παράλληλος προς την διεύθυνση του μέσου (συμβατικού) γήινου πόλου (όπως ορίζεται από το Bureau International de l'Heure, BIH (βάση δορυφορικών μετρήσεων από συγκεκριμένους σταθμούς).

Το ελλειψοειδές WGS-84 είναι πανομοιότυπο με το διεθνώς αποδεκτό, ελλειψοειδές GRS-80 (Geodetic Reference System 1980) όπως φαίνεται και από τις βασικές τους παραμέτρους τους:

Πίνακας 4-2: Παράμετροι WGS-84 και GRS-80. (Μερτίκας, 2016)

Παράμετρος	Συμβολισμός	WGS-84	GRS-80
Ημιάξονας ισημερινού	a (m)	6378137,0	6378137,0
Γεωμετρική επιπλάτυνση	$1/f$	298,2572236	298,2572221
Γεωκεντρική βαρυτομετρική σταθερά	GM ($m^2 s^{-2}$)	$3986004,418 \times 10^8$	3986005×10^8
Δυναμικός παράγοντας επιπλάτυνσης	J_2	108263×10^{-8}	108263×10^{-8}
Μέση γωνιακή ταχύτητα	Ω ($rad s^{-1}$)	7292115×10^{-11}	7292115×10^{-11}

4.2 Πλαίσια αναφοράς

Για τον ακριβή προσδιορισμό της θέσης ενός σημείου πάνω στη Γη απαιτούνται τέσσερις συντεταγμένες: τρεις χωρικές, ώστε να οριστεί η γεωμετρική θέση του σημείου σε σχέση με τους άξονες αναφοράς (X, Y, Z) και μια χρονική συντεταγμένη, για να αποτυπώσει τον χρόνο κατά τον οποίο προσδιορίστηκαν οι τρεις προαναφερθείσες. Ο

προσδιορισμός συντεταγμένων σημείων πάνω σε ένα τρισδιάστατο σύστημα αναφοράς συναρτήσει του χρόνου είναι η υλοποίηση του συστήματος αναφοράς και καλείται πλαίσιο αναφοράς (reference frame).

Τα πλαίσια αναφοράς ITRF και ETRF είναι οι υλοποιήσεις του Διεθνούς Γήινου Συστήματος Αναφοράς (ITRS) και του Ευρωπαϊκού Γήινου Συστήματος Αναφοράς (ETRS) αντίστοιχα. Τα ITRS και ITRF αποτελούν ευθύνη της IERS (International Rotation and Reference Systems Service) ενώ τα ETRS και ETRF της EUREF (Regional Reference Frame Sub-Commission for Europe) .

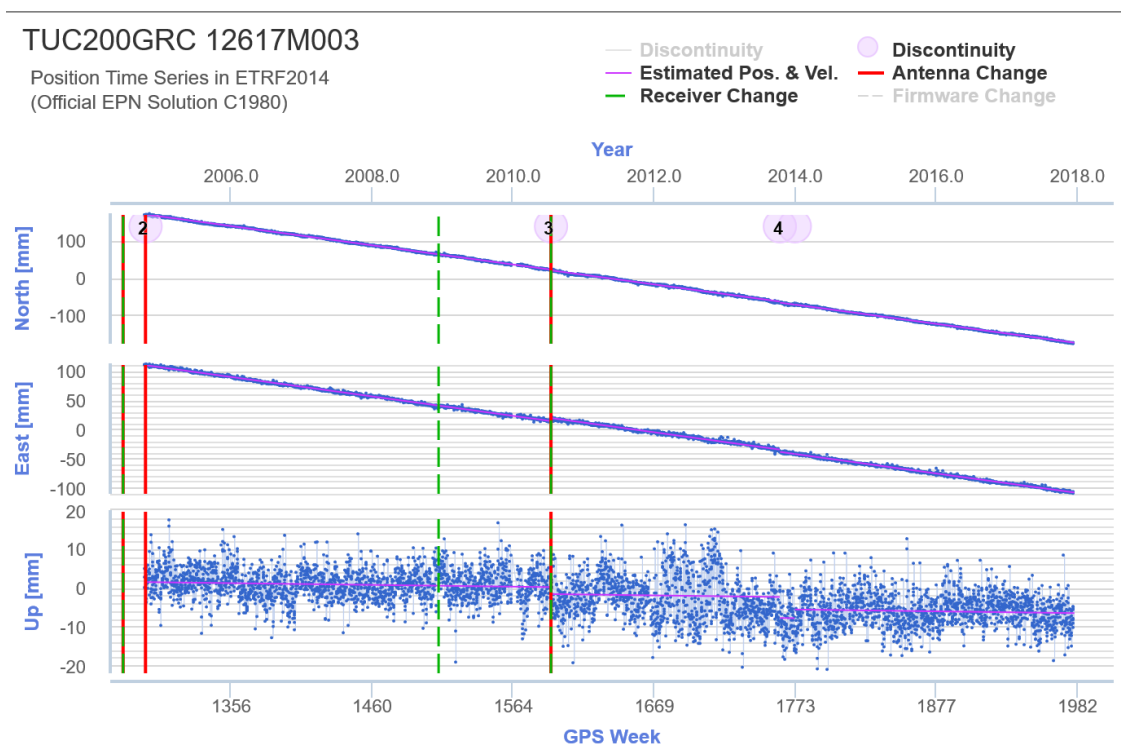
Το ITRF (International Terrestrial Reference Frame) υλοποιείται με τις γεωδαιτικές συντεταγμένες ενός μεγάλου αριθμού σταθμών (1500) σε ολόκληρη τη γη, που συμμετέχουν στις παρατηρήσεις με διαστημική ή/και δορυφορική τεχνολογία (VLBI, SLR και GPS) και το ETRF από περίπου 200 μόνιμους σταθμούς σε όλη την Ευρώπη. Λόγω των κινήσεων των σταθμών που συμμετέχουν σε κάθε πλαίσιο αναφοράς που οφείλονται σε μετακινήσεις των τεκτονικών πλακών της Γης, εκτός από τις συντεταγμένες των σταθμών προσδιορίζονται και οι ταχύτητές τους για κάθε υλοποίηση του πλαισίου αναφοράς όπως ITRF_{yy} (yy είναι το έτος αναφοράς). Κάθε νέα υλοποίηση αποτελεί βελτίωση της προηγούμενης καθώς χρησιμοποιεί περισσότερους σταθμούς και μετρήσεις για μεγαλύτερες περιόδους , έτσι ώστε να επιτυγχάνονται πιο αξιόπιστες συντεταγμένες και ταχύτητες. Στην συνέχεια θα γίνει παρουσίαση των επικαιροποιήσεων που έχουν γίνει στα πλαίσια αναφοράς ITRF και ETRF.(Γιώργος Πανταζής, Ευαγγελία Λάμπρου, 2010)

Πίνακας 4-3:Υλοποιήσεις των πλαισίων αναφοράς ITRF και ETRF.
(<https://confluence.gps.nl/qinsy/en/european-terrestrial-reference-system-89-ets89-29858197.html>)

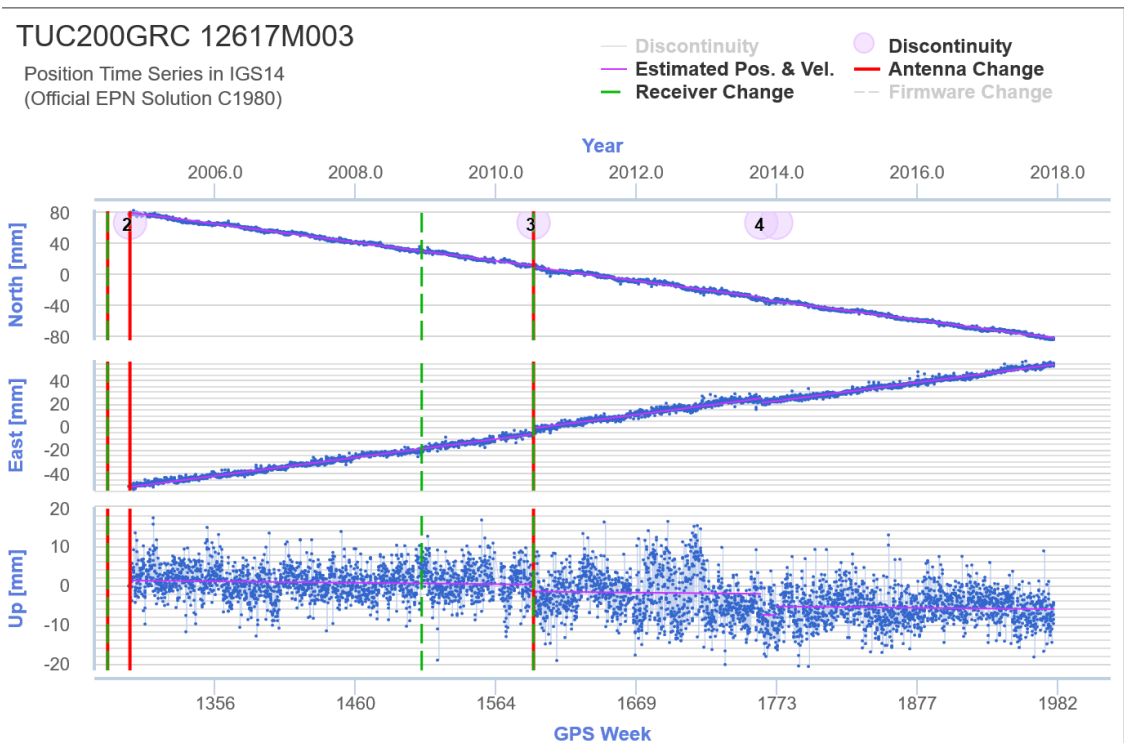
ITRF	Έτος αναφοράς	ETRF	Έτος αναφοράς
WGS84	1984.0	ETRF89	1989.0
ITRF88	1984.0	ETRF90	1989.0
ITRF89	1984.0	ETRF91	1989.0
ITRF90	1984.0	ETRF92	1989.0
ITRF91	1984.0	ETRF93	1989.0

ITRF93	1984.0	ETRF94	1989.0
ITRF94	1984.0	ETRF96	1989.0
ITRF96	1984.0	ETRF97	1989.0
ITRF97	1984.0	ETRF2000	1989.0
ITRF2000	1997.0	ETRF2005	2000.0
ITRF2005	2000.0	ETRF2014	2010,0
ITRF2008	2005.0		
ITRF2014	2010.0		

Στα σχήματα 4.2 και 4.3 παρουσιάζονται οι μετατοπίσεις του μόνιμου σταθμού GPS TUC2 για κάθε εβδομάδα GPS από το 2006 μέχρι και σήμερα στο ευρωπαϊκό σύστημα αναφοράς ETRS2014 και το Παγκόσμιο σύστημα αναφοράς ITRS2014.



Σχήμα 4.4: Διάγραμμα χρονοσειράς του σταθμού TUC2 στο ETRF2014.
(http://www.epncb.oma.be/_productsservices/timeseries/)



Σχήμα 4.5: Διάγραμμα χρονοσειράς του σταθμού TUC2 στο ITRF2014.
(http://www.epncb.oma.be/_productsservices/timeseries/)

4.3 Τοπικές Υλοποιήσεις (Datum)

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η φυσική γήινη επιφάνεια μπορεί να αποδοθεί προσεγγιστικά από την μαθηματική επιφάνεια του ελλειψοειδούς εκ περιστροφής. Όμως επειδή η επιφάνεια του δεν ταυτίζεται με το γεωειδές σε όλα τα σημεία, λόγω ανώμαλης κατανομής μαζών με διαφορετικές πυκνότητες στο στερεό φλοιό της γης, ένα παγκόσμιο γήινο ελλειψοειδές δεν μπορεί να έχει το ίδιο καλή εφαρμογή σε κάθε περιοχή πάνω στη γη. Έτσι κάθε χώρα ή ήπειρος μπορεί για τις δικές της ανάγκες να χρησιμοποιεί είτε ένα δικό της ελλειψοειδές εκ περιστροφής, είτε ένα παγκόσμιο γεωκεντρικό ελλειψοειδές μετατοπισμένο τόσο ώστε να ελαχιστοποιούνται οι αποκλίσεις από το τοπικό γεωειδές της περιοχής.

Το ελλειψοειδές που προσεγγίζει το γεωειδές σε μια περιορισμένη περιοχή της Γης, έχοντας συγκεκριμένη μετατόπιση ή/και στροφή σε σχέση με ένα παγκόσμιο ελλειψοειδές αποτελεί ένα τοπικό γεωδαιτικό Datum.

4.3.1 Γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς ΕΓΣΑ-87

Το Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987 (ΕΓΣΑ-87), είναι ένα τοπικό γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς, που έχει βασικό σημείο αναφοράς το δορυφορικό σταθμό του Διονύσου. Το ΕΓΣΑ-87 ορίζει ένα νέο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς για τη χώρα, το οποίο είναι καλύτερα προσαρμοσμένο στο γεωειδές του ελληνικού χώρου, με ελλειψοειδές αναφοράς το σύστημα GRS-80 προσανατολισμένο παράλληλα με το (γεωκεντρικό) International Terrestrial Reference System 1989 (ITRS-89). Οι παράμετροι μετάθεσης του ελλειψοειδούς του ΕΓΣΑ-87 σε σχέση με το παγκόσμιο γεωκεντρικό ελλειψοειδές είναι:

$$\Delta X = +199,723 \text{ m}$$

$$\Delta Y = -74,030 \text{ m}$$

$$\Delta Z = -246,018 \text{ m}$$

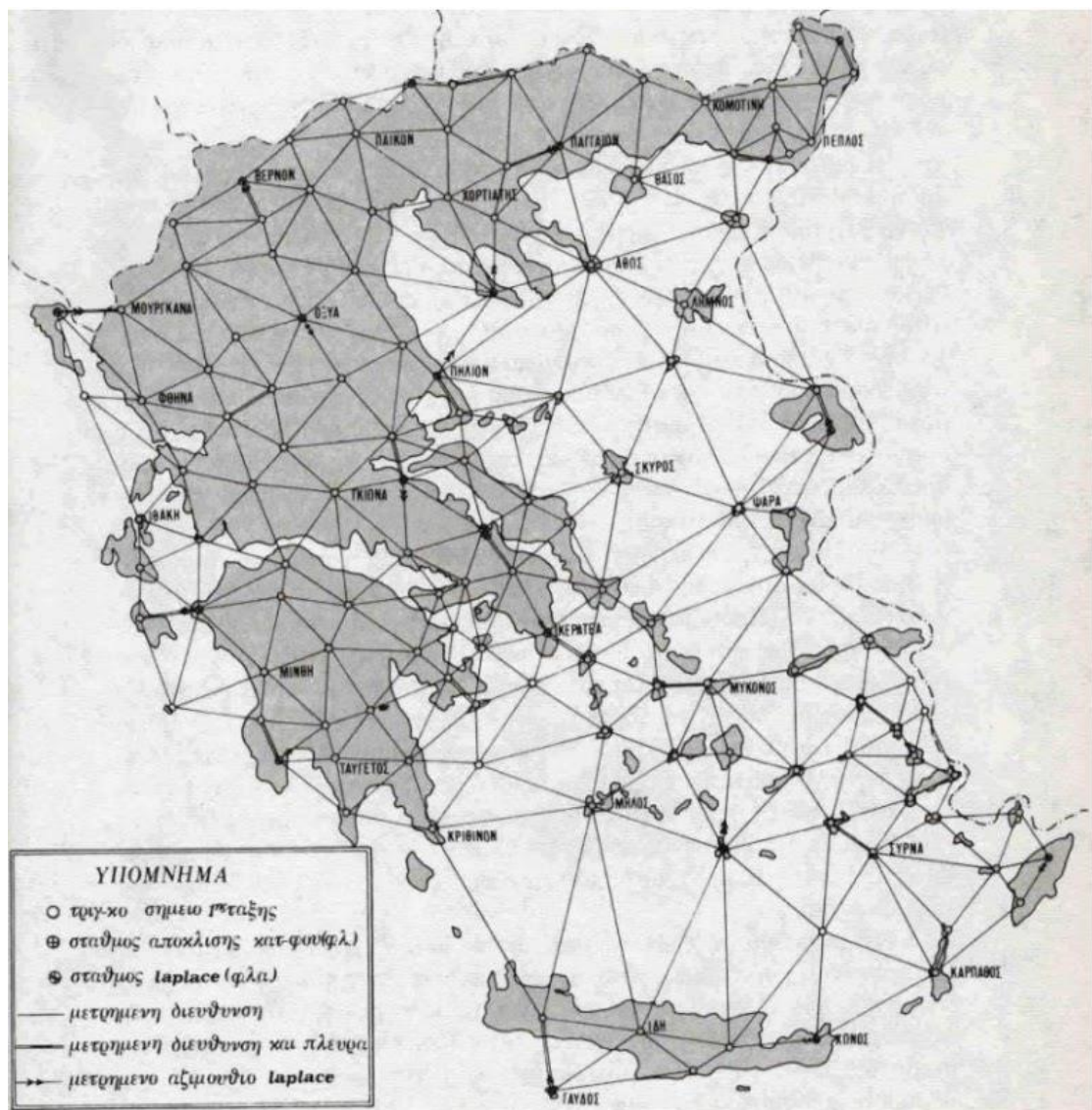
Οι ελλειψοειδείς συντεταγμένες του δορυφορικού σταθμού στο Διόνυσο είναι:

$$\varphi = 38^\circ 04' 33''.81070$$

$$\lambda = 23^\circ 55' 51''.00950$$

$$N = 7 \text{ m}$$

Το σύστημα αναφοράς υλοποιήθηκε αρχικά από 25 σημεία που ανήκουν στο δίκτυο 1^{ης} τάξης της ΓΥΣ. Η κλίμακα και ο προσανατολισμός του συστήματος προσδιορίστηκαν με αβεβαιότητα της τάξης του 0.1 ppm. Συνολικά το δίκτυο 1^{ης} τάξης (μεγαλύτερης ακρίβειας) αποτελείται από 137 σημεία και μαζί με τα δίκτυα 2^{ης}, 3^{ης}, 4^{ης} το κρατικό τριγωνομετρικό δίκτυο έχει περίπου 30.000 σημεία στον ελλαδικό χώρο.



Σχήμα 4.6:Τριγωνομετρικό δίκτυο 1^{ης} τάξης. (Βλάχος, 1987)

Για την χαρτογραφική απεικόνιση του ΕΓΣΑ '87 χρησιμοποιείται η εγκάρσια Μερκατορική προβολή με πλάτος ζώνης 12 μοίρες. Ο κεντρικός μεσημβρινός έχει γεωδαιτικό μήκος $\lambda_0 = E24^0$ και ο συντελεστής παραμόρφωσης $m_0 = 0,999600$. Αρχή των αξόνων θεωρείται η τομή του ισημερινού με τον κεντρικό μεσημβρινό και ο άξονας των τετμημένων έχει αρχική τιμή $x_0 = 500.000$ m (False Easting). (Γιώργος Πανταζής, Ευαγγελία Λάμπρου, 2010)

4.3.2 Γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς HTRS-07

Το Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς, (ΓΣΑ), του HEPOS ονομάζεται HTRS07, (Hellenic Terrestrial Reference System 07), και αποτελεί υλοποίηση του Ευρωπαϊκού E-

πίγειου Συστήματος Αναφοράς (ETRS-89 European Terrestrial Reference System) στον Ελλάδα. Χρησιμοποιεί το πλαίσιο αναφοράς ETRF-05, (European Terrestrial Reference Frame), το οποίο είναι η πιο πρόσφατη και επίσημη υλοποίηση του ETRS-89, στην μέση εποχή των μετρήσεων του HEPOS (εποχή 2007.5). Ως ελλειψοειδές αναφοράς, χρησιμοποιεί το GRS-80, (Geodetic Reference System 1980) όπως και το ΕΓΣΑ-87. Το κέντρο του ελλειψοειδούς αναφοράς βρίσκεται στο γεώκεντρο και ταυτίζεται με το κέντρο του ETRS89. Τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα της επιλογής του παραπάνω συστήματος είναι τα εξής:

- οι γεωδαιτικές εφαρμογές στον Ελλαδικό χώρο μπορούν πλέον να γίνονται σε 3 διαστάσεις.
- επιτρέπει ακρίβειες του 1cm σε όλη την Ελληνική επικράτεια με χρήση των συστημάτων εντοπισμού θέσης GNSS.

Για την χαρτογραφική απεικόνιση του HTRS-07 χρησιμοποιείται η εγκάρσια Μερκατορική προβολή. Ο κεντρικός μεσημβρινός έχει γεωδαιτικό μήκος $\lambda_0 = E\ 24^0$ και ο συντελεστής παραμόρφωσης είναι $m_0 = 0,999600$. Το πλάτος αναφοράς είναι $\varphi_0 = 0^0$ και οι άξονες των τετμημένων και τεταγμένων έχουν αρχικές τιμές $x_0 = 500.000\text{ m}$ (False Easting) και $y_0 = -2.000.000\text{ m}$ (False Northing) αντίστοιχα.

Στη συνέχεια αναφέρονται τα σημαντικότερα συστήματα δορυφορικού εντοπισμού (GLONASS, GALILEO, COMPASS-BEIDOU, GPS) δίνοντας έμφαση στο GPS που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της εργασίας.

Κεφάλαιο 5

Συστήματα Δορυφορικά Εντοπισμού

Ένα Παγκόσμιο Δορυφορικό Σύστημα Εντοπισμού και Πλοήγησης (GNSS) χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της θέσης ενός σημείου στην ξηρά, τη θάλασσα ή το διάστημα, μέσω ενός συστήματος τεχνητών δορυφόρων. Όλες οι πληροφορίες απόστασης και χρόνου που χρειάζονται για τον προσδιορισμό της θέσης ενός σημείου πάνω στη Γη (δηλαδή το γεωγραφικό πλάτος, μήκος και γεωμετρικό υψόμετρο) εκπέμπονται από το σύστημα δορυφόρων. Στη συνέχεια οι δέκτες χρησιμοποιούν τις πληροφορίες αυτές για τον προσδιορισμό της θέσης. Παραδείγματα Παγκόσμιων Δορυφορικών Συστημάτων Εντοπισμού και Πλοήγησης αποτελούν το Compass/Beidou της Κίνας, το Galileo της Ευρώπης, το NAVSTAR /GPS των ΗΠΑ, το GLONASS της Ρωσίας με μόλις τα δύο τελευταία να είναι σε πλήρη λειτουργία.

5.1 Ιστορική αναδρομή

Ο πρώτος τεχνητός δορυφόρος, ο Sputnik, τέθηκε σε τροχιά γύρω από τη Γη το 1957. Το 1969 μέσω του προγράμματος Apollo της NASA, ο άνθρωπος πάτησε στο φεγγάρι. Η εξέλιξη της δορυφορικής τεχνολογίας υπήρξε ραγδαία αν αναλογιστούμε ότι από τότε μέχρι σήμερα έχουν τεθεί σε τροχιά γύρω από τη Γη περίπου 26,000 αντικείμενα (δορυφόροι, πύραυλοι εκτόξευσης, διαστημικοί σταθμοί κ.λπ.). Σήμερα βρίσκονται σε τροχιά περίπου 8.000 αντικείμενα, από τα οποία περισσότερα από 500 είναι δορυφόροι που βρίσκονται σε κατάσταση λειτουργίας. Οι δορυφόροι αυτοί, ανάλογα με τις εφαρμογές που εξυπηρετούν μπορούν να είναι τηλεπικοινωνιακοί, μετεωρολογικοί, στρατιωτικοί, περιβαλλοντικής παρατήρησης, πλοήγησης, επιστημονικής έρευνας κ.α. Αμέσως μετά την εκτόξευση του πρώτου τεχνητού δορυφόρου το 1957, αρχίζουν να υλοποιούνται τα πρώτα δορυφορικά συστήματα πλοήγησης. Η αρχή γίνεται με το σύστημα TRANSIT. Ο πρώτος δοκιμαστικός δορυφόρος (satellite prototype) του συστήματος TRANSIT τίθεται σε τροχιά το 1960. Τη δεκαετία του 1970 ξεκινά ο σχεδιασμός των πρώτων Παγκόσμιων Δορυφορικών Συστημάτων Εντοπισμού του Αμερικάνικου συστήματος GPS και του Σοβιετικού συστήματος GLONASS. Από τότε μέχρι σήμερα έχουν αναπτυχθεί ή βρίσκονται στο στάδιο της

ανάπτυξης και άλλα συστήματα εντοπισμού όπως το ευρωπαϊκό σύστημα GALILEO και το Κινέζικο COMPASS/BEIDOU.(Parkinson, 1995)

5.2 GPS

Το NAVSTAR/G.P.S. (NAVigation Satellite Timing and Ranging – Global Positioning System) ή απλά GPS είναι ένα παγκόσμιο δορυφορικό σύστημα προσδιορισμού θέσης (συντεταγμένες), χρόνου και ταχύτητας, οπουδήποτε στην επιφάνεια της γης ή και κάτω από αυτήν, σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή και ανεξάρτητα από καιρικές συνθήκες. Το σύστημα σχεδιάστηκε στη δεκαετία του 1970, αναπτύχθηκε στη δεκαετία του 1980 και βρίσκεται συνεχώς υπό τον έλεγχο του Υπουργείου Άμυνας των ΗΠΑ (Department of Defence). (Hofmann,2008).

Αρχικά σχεδιάστηκε για την κάλυψη των αναγκών της ναυσιπλοΐας και για στρατιωτικούς σκοπούς με στόχο να είναι δυνατός ο προσδιορισμός θέσης ενός αντικειμένου σε πραγματικό χρόνο με ακρίβεια $\pm 10-15$ m. Γρήγορα έγινε αντιληπτή η δυνατότητα χρήσης του συστήματος και για την κάλυψη πολιτικών αναγκών πλοήγησης. Η πολιτική χρήση του GPS, όπως είναι οι τοπογραφικές και γεωδαιτικές εφαρμογές υψηλής ακρίβειας ή οι χαμηλότερης ακρίβειας εφαρμογές GIS, οι εφαρμογές πλοήγησης και διαχείρισης στόλου οχημάτων, έγινε δυνατή ύστερα από απόφαση των ΗΠΑ (1983), με αφορμή κάποιο αεροπορικό δυστύχημα), σχεδόν από τα πρώτα βήματα, με πρόβλεψη για περαιτέρω βελτίωση.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα του GPS έναντι των άλλων παλαιότερων επίγειων και δορυφορικών μεθόδων είναι:

- Δίνει απευθείας τη θέση ενός σημείου στην επιφάνεια της γης, συνεπώς γνωρίζουμε κάθε στιγμή τη θέση μας σε καρτεσιανές συντεταγμένες X,Y,Z.
- Είναι ένα σύστημα «παντός καιρού», δηλαδή μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάτω από όλες τις καιρικές συνθήκες.
- Για τον προσδιορισμό θέσης δεν απαιτεί αμοιβαία ορατότητα μεταξύ των σημείων της παρατήρησης. Απαιτείται μόνο ορατότητα προς ικανοποιητικό αριθμό δορυφόρων (ανοιχτός ορίζοντας στα σημεία στάσης).

- Μπορεί να συνεργαστεί με άλλα συστήματα προσδιορισμού θέσης (LORAN-C, Αδρανειακά συστήματα, κ.α.) καθώς και με άλλες σύγχρονες εφαρμογές και συστήματα (GIS, Φωτογραμμετρία, κ.α.).
- Η διαδικασία των μετρήσεων είναι αρκετά απλή και απαιτείται μικρός χρόνος μέτρησης. Η εκτέλεση των μετρήσεων είναι δυνατή όλο το 24ωρο με μικρό αριθμό προσωπικού (ένα άτομο ανά σημείο παρατήρησης ή και ένα άτομο σε πολλά σημεία παρατήρησης μιας και ο δέκτης αφού ξεκινήσει τις μετρήσεις δεν χρειάζεται επιπλέον επίβλεψη ή χειρισμό).
- Δίνει καλή ακρίβεια προσδιορισμού θέσης με πολύ μικρότερο χρόνο μέτρησης σε σχέση με άλλες μεθόδους.

Αντίθετα τα μόνο μειονεκτήματα του GPS έναντι των άλλων μεθόδων είναι ότι:

- Απαιτεί ανοιχτό ορίζοντα για να έχει οπτική επαφή με δορυφόρους, γεγονός που κάνει δύσκολη τη χρήση του μέσα σε πόλεις και πυκνοκατοικημένες περιοχές
- Η μείωση της ακρίβειας του συστήματος και η εισαγωγή σφαλμάτων από πλευρά των ΗΠΑ κατά χρονικά διαστήματα λόγω του στρατιωτικού χαρακτήρα του συστήματος δεν εγγυώνται την απρόσκοπτη λειτουργία του.

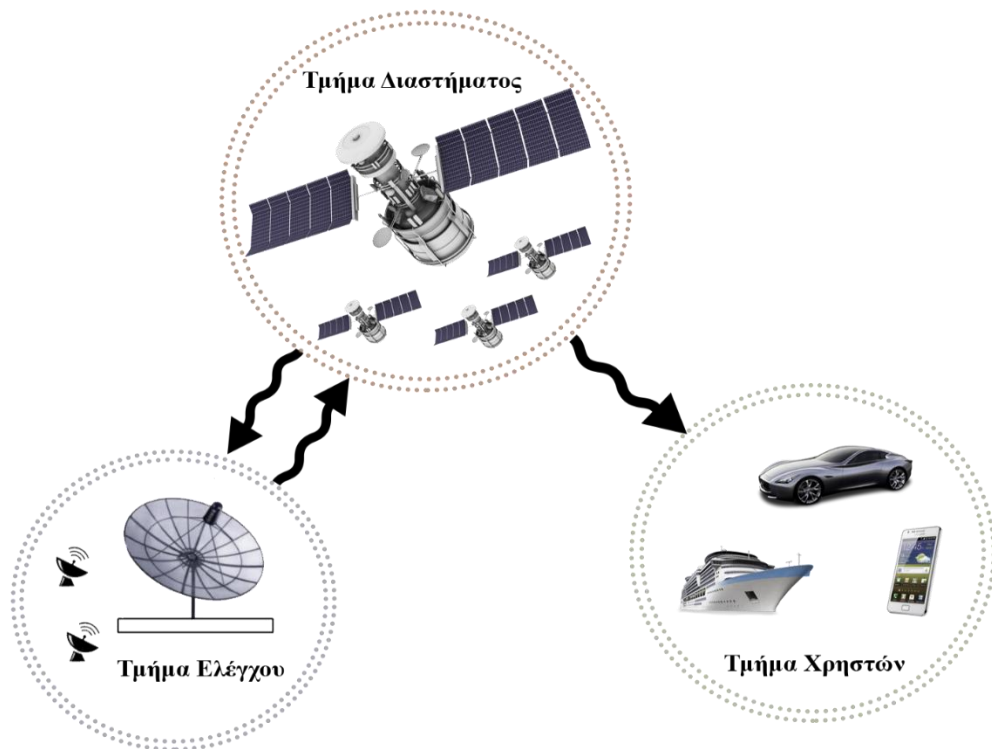


Σχήμα 5.1: Οι τροχιές των δορυφόρων GPS

Αποτελείται από είκοσι τέσσερις (24) δορυφόρους (με επιπλέον ενεργούς εφεδρικούς) σε έξη (6) τροχιακά επίπεδα σε ύψος 20.200km και έχει τη δυνατότητα να ελέγχει μέχρι και τριάντα (30) δορυφόρους στο διάστημα. Οι δορυφόροι είναι κατανεμημένοι σε έξη (6) τροχιακά επίπεδα και κάθε τροχιακό επίπεδο σχηματίζει με το ε-
πόμενο γωνία 60^0 μοιρών με τον Ισημερινό.

Κάθε τροχιακό επίπεδο περιέχει 4 δορυφόρους και η κλίση της κάθε τροχιάς είναι 55ο μοίρες ως προς το επίπεδο του Ισημερινού. Η περίοδος περιστροφής των δορυφόρων είναι 12H περίπου (11h & 58m σε ατομικό χρόνο) και εμφανίζονται πάνω στο ορίζοντα ενός τόπου περίπου 4 min νωρίτερα κάθε ημέρα. Κάθε μήνα λοιπόν η κάλυψη κάθε δορυφόρου μετατοπίζεται κατά δύο ώρες ($2h = 4min \times 30$ ημέρες) περίπου σε σχέση με τον ηλιακό χρόνο κάθε τόπου. Οι τροχιές του δορυφόρων είναι σχεδόν κυκλικές με μέγιστη εκκεντρότητα $e=0,015$ και κάθε δορυφόρος έχει διάρκεια ζωής 7,5 έτη. Ο παραπάνω τροχιακός σχηματισμός παρέχει πλήρη κάλυψη (6 τουλάχιστον δορυφόρους) 24 ώρες την ημέρα σε όλο τον κόσμο.(Μερτίκας, 2016)

Το σύστημα δορυφορικού σχηματισμού GPS αποτελείται από 3 μεγάλα τμήματα (Εικόνα 5.2). Το δορυφορικό, το τμήμα ελέγχου και το τμήμα χρήσης. Το δορυφορικό τμήμα αποτελείται από τους δορυφόρους και τις τροχιές τους. Το τμήμα ελέγχου αποτελείται από ένα δίκτυο σταθμών παρακολούθησης που είναι υπεύθυνοι για τον έλεγχο, την παρακολούθηση και τη συντήρηση των δορυφόρων. Ο κεντρικός σταθμός ελέγχου (master control segment), ο οποίος βρίσκεται στην πολιτεία του Κολοράντο, συλλέγει τα δεδομένα από κάθε έναν από τους σταθμούς παρακολούθησης που είναι κατανεμημένοι σε όλο τον κόσμο και προσδιορίζει τόσο τα δεδομένα που πρόκειται να μεταφορτωθούν όσο και 70 τους σταθμούς εδάφους που θα διαβιβάσουν αυτά τα δεδομένα ελέγχου στους δορυφόρους. Το τμήμα χρηστών αποτελείται από συσκευές ραδιο-δεκτών που λαμβάνουν σήματα από τους διαθέσιμους δορυφόρους GPS. Στην πραγματικότητα, υπάρχουν εκατομμύρια δέκτες που χρησιμοποιούνται σήμερα, συμπεριλαμβανομένων των εκατοντάδων εκατομμυρίων δεκτών σε συσκευές κινητής τηλεφωνίας.



Σχήμα 5.2: Τα τρία τμήματα του GPS

5.2.1 Αρχές λειτουργίας GPS

Οι δορυφόροι GPS εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα σε δύο συχνότητες, η μία συχνότητα ονομάζεται κύρια L1 στα 1575,42 MHz και η άλλη ονομάζεται δευτερεύουσα L2 στα 1227,60 MHz. Τα παραπάνω σήματα καθορίζονται με τρεις κώδικες:

- Ο πρώτος κώδικας καλείται «κώδικας P» (Precision code) δίνοντας ακριβή μέτρηση του χρόνου μετάδοσης του σήματος από τον δορυφόρο μέχρι τον δέκτη. Ο κώδικας P είναι αδύνατον να μετρηθεί αυτόματα χωρίς να ληφθούν πληροφορίες από τον κώδικα C/A ο οποίος αναφέρεται στη συνέχεια.
- Ο δεύτερος κώδικας, ο οποίος καλείται «κώδικας C/A» (Coarse / Acquisition code), μας δίνει μία πρώτη μέτρηση της απόστασης από τον δορυφόρο μέχρι τον δέκτη καθώς και πληροφορίες για την λήψη και την μέτρηση του κώδικα ακριβείας P από τον δέκτη.
- Ο τρίτος κώδικας καλείται «κώδικας δεδομένων» (κώδικας D ή Data code ή μήνυμα ναυσιπλοΐας) και μας δίνει πληροφορίες σχετικά με τη θέση των δορυφόρων που είναι σε τροχιά κάθε χρονική στιγμή, τον χρόνο εκπομπής του σήματος από τον

δορυφόρο αλλά και άλλες παραμέτρους που μας ενημερώνουν για τη γενική κατάσταση του GPS.

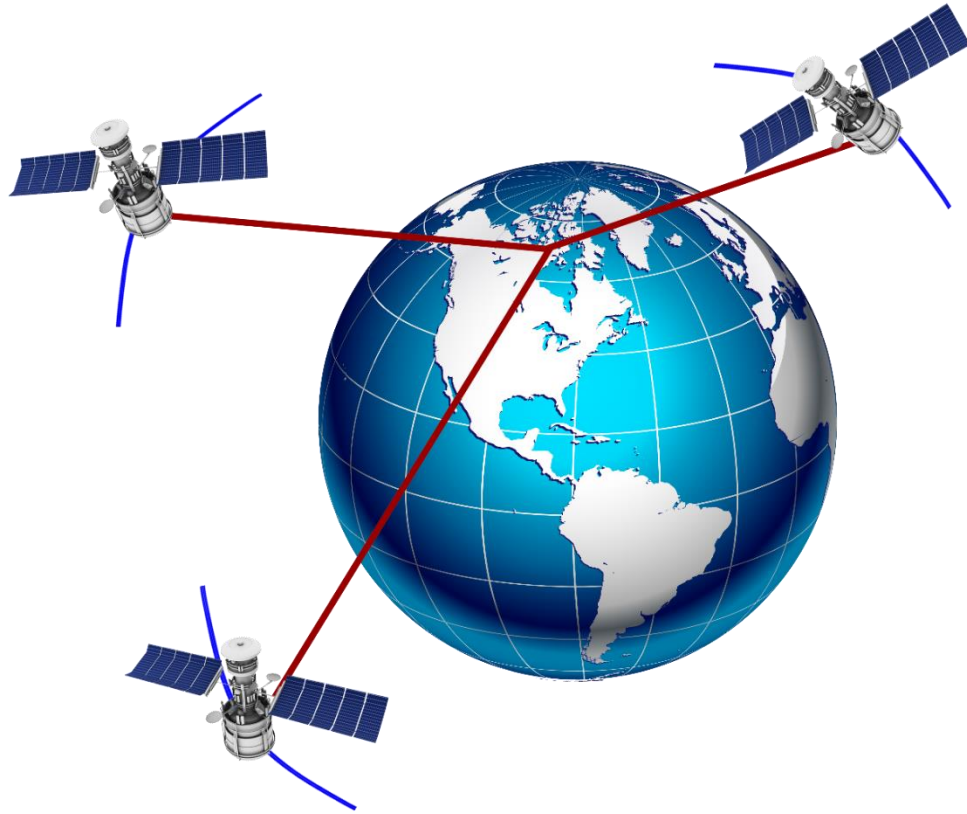
Εκσυγχρονίζεται συνέχεια με νέες συχνότητες, η νέα συχνότητα L2C (1227,60MHz) για πολιτικές εφαρμογές, επιτρέπει διορθώσεις σε δέκτες μη στρατιωτικούς για τις καθυστερήσεις του σήματος λόγω ιονόσφαιρας.

Επίσης η συχνότητα L5 (=1176,45MHz) συμπληρώνει την L1, εφαρμόζεται για την ασφάλεια της ανθρώπινης ζωής και αποσκοπεί στην εξασφάλιση συνεχούς και αδιάλειπτου εντοπισμού για πολιτικές χρήσεις. Οι νέες συχνότητες L2C και L5 συνεργάζονται με 24 δορυφόρους.

Ο χρήστης με έναν δέκτη λαμβάνει δορυφορικά σήματα. Μετά την αποκωδικοποίηση των δορυφορικών σημάτων καθορίζεται η απόσταση δορυφόρου - δέκτη και η ταχύτητα μεταβολής της (μέτρηση με μεγάλη ακρίβεια του χρόνου μετάδοσης σήματος από δορυφόρο σε δέκτη). Πολλαπλασιάζοντας το χρόνο με την ταχύτητα διάδοσης του σήματος (ταχύτητα φωτός) καθορίζεται η απόσταση δορυφόρου - δέκτη. Η διαδικασία αυτή μπορεί να γίνει ή με τον κώδικα P ή με τον κώδικα C/A ή με την μέτρηση φάσης του φέροντος σήματος.

Γνωρίζοντας τις θέσεις των δορυφόρων τη στιγμή της παρατήρησης (κώδικας D) και μετρώντας την απόσταση δορυφόρου - δέκτη, συμπεραίνουμε ότι η θέση του δέκτη θα βρίσκεται πάνω στην επιφάνεια σφαίρας με κέντρο τον δορυφόρο και ακτίνα την απόσταση δορυφόρου - δέκτη.

Μετρώντας τρεις (3) αποστάσεις από τρεις (3) δορυφόρους (εικόνα 5.3) προσδιορίζεται η θέση από την τομή των τριών (3) σφαιρών με κέντρο τις γνωστές θέσεις των δορυφόρων στο διάστημα.



Σχήμα 5.3: Προσδιορισμός θέσης από την τομή τριών σφαιρών

Στην πράξη απαιτούνται τουλάχιστον τέσσερις (4) ταυτόχρονες παρατηρήσεις για τον υπολογισμό μαζί με το στίγμα του δέκτη και η απόκλιση του χρονομέτρου του δέκτη από την κλίμακα συγχρονισμού των χρονομέτρων των δορυφόρων.

Ανάλογη διαδικασία ακολουθείται όταν ο προσδιορισμός θέσης γίνεται χρησιμοποιώντας την ταχύτητα μεταβολής της απόστασης δορυφόρου - δέκτη ως βασική μέτρηση. Η θέση εδώ όμως προκύπτει από την τομή τριών (3) υπερβολοειδών εκ περιστροφής και όχι σφαιρών.

Οι απαιτήσεις για καλή χρονομέτρηση καλύπτονται με πολύ καλά χρονόμετρα σε δορυφόρους και δέκτες καθώς και στον σωστό συγχρονισμό τους σε σχέση με το χρόνο αναφοράς του συστήματος GPS.

Οι δέκτες δεν έχουν συνήθως ατομικά χρονόμετρα αλλά χρησιμοποιούνται φθηνοί κρύσταλλοι χαλαζία, έτσι εκτός από τις συντεταγμένες (X, Y, Z) του δέκτη έχουμε και την χρονική καθυστέρηση dT του χρονομέτρου του δέκτη σε σχέση με το χρόνο αναφοράς. Η απόλυτη προσδιοριζόμενη θέση του δέκτη μπορεί να αναφερθεί σε οποιοδήποτε κατάλληλο σύστημα αναφοράς. Η βασική μέτρηση του GPS δεν είναι η

γεωμετρική απόσταση δορυφόρου - δέκτη αλλά μία διάσταση που προσδιορίζεται από R ηλεκτρονικά κυκλώματα του δέκτη και περιλαμβάνει καθυστερήσεις λόγω ατμόσφαιρας (ιονόσφαιρα, τροπόσφαιρα), πολυκλαδικές παρεμβολές και χρονικές καθυστερήσεις γι' αυτό και ονομάζεται ψευδο-απόσταση.

5.2.2 Θεμελιώδεις μετρήσεις

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο κάθε δορυφόρος εκπέμπει ένα μοναδικό σήμα, στο οποίο περιέχονται οι κώδικες P και C/A. Κάθε δέκτης GPS έχει τη δυνατότητα να φτιάχνει ακριβή αντίτυπα αυτών των κωδικών. Λαμβάνοντας λοιπόν το δορυφορικό σήμα, ο δέκτης συγκρίνει το κώδικα που παράχθηκε στον δορυφόρο με αυτό που παράγει ο ίδιος και υπολογίζει τη χρονική απόκλιση μεταξύ συγκεκριμένων κομματιών του. Η απόκλιση αυτή είναι ο χρόνος που χρειάστηκε το σήμα για να φτάσει από τον δορυφόρο στον δέκτη. Η συγκεκριμένη μέτρηση πολλαπλασιάζεται με την ταχύτητα μετάδοσης του σήματος (δηλαδή την ταχύτητα του φωτός) ονομάζεται ψευδο-απόσταση.

Η ψευδο-απόσταση μπορεί να διαφέρει αρκετά από την πραγματική απόσταση δορυφόρου-δέκτη, καθώς επηρεάζεται σημαντικά από τον μη συγχρονισμό των χρονομέτρων τους (κάθε σφάλμα ή απόκλιση μεταξύ των χρονομέτρων του δέκτη και του δορυφόρου πολλαπλασιάζεται με την ταχύτητα του φωτός, συνεπώς ακόμη και πολύ μικρές αποκλίσεις στη χρονομέτρηση επιφέρουν πολύ μεγάλα σφάλματα στην απόσταση). Η βασική εξίσωση που συνδέει την ψευδο-απόσταση με τις παρατηρήσεις και τα σφάλματα που επηρεάζουν τη μέτρηση είναι:

$$p = \rho + c(dt - dT) + d_{orb} + d_{ion} + d_{trop} + \epsilon$$

Όπου το p είναι η ψευδο-απόσταση, ρ είναι η γεωμετρική απόσταση δορυφόρου - δέκτη, c η ταχύτητα διάδοσης του φωτός, dt η απόκλιση του χρονομέτρου του δορυφόρου από τον χρόνο GPS, dT η απόκλιση του χρονομέτρου του δέκτη από τον χρόνο GPS, d_{orb} τα σφάλματα των τροχιών, d_{ion} η καθυστέρηση (του σήματος) κατά την διαδρομή του στην ιονόσφαιρα, d_{trop} η καθυστέρηση (του σήματος) κατά την διαδρομή του στην τροπόσφαιρα και ϵ τα τυχαία σφάλματα μέτρησης.

Ακόμα έχουμε μετρήσεις φάσης φέροντος κύματος, οι οποίες στηρίζονται στη δυνατότητα μέτρησης της απόστασης μεταξύ δορυφόρου - δέκτη, σαν συνάρτηση των με-

τρούμενων κύκλων φάσης μήκους κύματος λ του χρησιμοποιούμενου δορυφορικού σήματος, όπου $\lambda = \lambda_1 = 19,04\text{cm}$ για τη συχνότητα L1 και $\lambda = \lambda_2 = 24,44\text{cm}$ για τη συχνότητα L2. Η τεχνική αυτή είναι παρόμοια με εκείνη που χρησιμοποιείται από τα ηλεκτρονικά αποστασιόμετρα (EDM) που βρίσκονται προσαρμοσμένα στους ολικούς γεωδαιτικούς σταθμούς, με σκοπό τη μέτρηση της απόστασης. Η μέτρηση της φάσης του φέροντος κύματος γίνεται συνήθως με μια ακρίβεια της τάξης του 1% του αντιστοίχου μήκους κύματος λ του φέροντος σήματος, προσεγγιστικά η απόκλιση είναι της τάξης των 0,19cm για τη συχνότητα L1 και 0,25cm για τη συχνότητα L2. Οι μετρήσεις φάσης φέροντος κύματος είναι ακριβέστερες από τις μετρήσεις ψευδοαπόστασης κατά δύο τάξεις μεγέθους. (Hofmann, 2008).

5.2.3 Ατμοσφαιρικές επιδράσεις

Τα ραδιοσήματα (μικροκύματα) του GPS διαθλώνται από την τροπόσφαιρα και την ιονόσφαιρα. Αυτό σημαίνει ότι το δορυφορικό σήμα που λαμβάνεται από κάποιο δέκτη φθάνει λίγο αργότερα σε σχέση με εκείνο το σήμα που θα ταξίδευε σε κενό χώρο. Άρα τα σήματα του GPS καθυστερούν να φθάσουν στους δέκτες από τους δορυφόρους. Η καθυστέρηση οφείλεται στην τροπόσφαιρα και την ιονόσφαιρα.

Οι ιονοσφαιρικές καθυστερήσεις των ραδιοσημάτων εξαρτώνται από δύο βασικούς παράγοντες. Ο πρώτος είναι ο χαρακτήρας της δομής της ιονόσφαιρας κατά μήκος της κατακορύφου στο τόπο παρατήρησης, και ο δεύτερος, η γωνία ύψους του δορυφόρου πάνω από τον ορίζοντα.

Η διάδοση των σημάτων του GPS μέσω της ιονόσφαιρας επηρεάζεται με τους ακόλουθους τρόπους:

- Πρώτον, η φάση του φέροντος σήματος και ο κώδικας διαδίδονται με διαφορετικές ταχύτητες, με αποτέλεσμα ο κώδικας να αργοπορεί ενώ η φάση του φέροντος σήματος να προπορεύεται με το ίδιο ακριβώς μέγεθος.
- Δεύτερον, η προπόρευση της φάσης και η καθυστέρηση κώδικα, εξαρτώνται άμεσα από την πυκνότητα του αριθμού των ηλεκτρονίων, κατά την κατεύθυνση διάδοσης του σήματος και
- Τρίτον, το μήκος της διαδρομής του σήματος διαμέσου της ιονόσφαιρας εξαρτάται από τη γωνία ύψους του δορυφόρου και αντιμετωπίζεται με τον συντελεστή λοξότητας.

Η τροπόσφαιρα είναι το χαμηλότερο τμήμα της ατμόσφαιρας και εκτείνεται από τη γήινη επιφάνεια μέχρι το υψόμετρο των 20km. Η μετάδοση του σήματος εξαρτάται κυρίως από τη θερμοκρασία, την πίεση και την περιεκτικότητα σε υδρατμούς των ατμοσφαιρικών στρωμάτων. Η τροπόσφαιρα έχει μικρότερη επίδραση στα σήματα μικρού μήκους κύματος ενώ έχει μεγαλύτερη επίδραση στα οπτικά μήκη κύματος.

Η τροποσφαιρική διάθλαση είναι η καθυστέρηση στη διαδρομή του σήματος που προκαλείται από το ουδέτερο, μη-ιονισμένο τμήμα της ατμόσφαιρας της γης, της τροπόσφαιρας. Σύμφωνα με το μοντέλο Hopfield η τροποσφαιρική διάθλαση είναι δυνατόν να χωριστεί σε δύο συνιστώσες, την ξηρή (dry) και την υγρή (wet), όπου το ξηρό μέρος οφείλεται στο υδροστατικό μέρος ενώ η υγρή συνιστώσα οφείλεται στο μη υδροστατικό μέρος της ατμόσφαιρας. Περίπου το 90% της τροποσφαιρικής καθυστέρησης οφείλεται στη ξηρή συνιστώσα που υπολογίζεται από τον τύπο:

$$ZHD = 1,552 * 10^{-5} * \frac{P}{T} * (40136 + 148,72 * T) \text{ σε (m)}$$

όπου P:Πίεση (mbar) και T:Θερμοκρασία (Kelvin)

Από την άλλη πλευρά το μέρος της καθυστέρησης που οφείλεται στην υγρή συνιστώσα παρουσιάζει μεγαλύτερη μεταβλητότητα. Για την εκτίμηση της τροποσφαιρικής διάθλασης έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες τεχνικές και μοντέλα. Σήμερα, στην ανάλυση δεδομένων GPS συνήθως χρησιμοποιείται η διαδικασία χαρτογράφησης της τροποσφαιρικής καθυστέρησης όπως αναπτύχθηκε από τον (Niell, 1996).

Οι παράμετροι εκτίμησης της καθυστέρησης δίνονται ξεχωριστά για την ξηρή και την υγρή συνιστώσα. Οι συντελεστές της υδροστατικής χαρτογράφησης εξαρτώνται από το γεωγραφικό πλάτος και το υψόμετρο του τόπου παρατήρησης και την ημέρα του έτους. Η υγρή συνιστώσα εξαρτάται μόνο από το γεωγραφικό πλάτος της τοποθεσίας

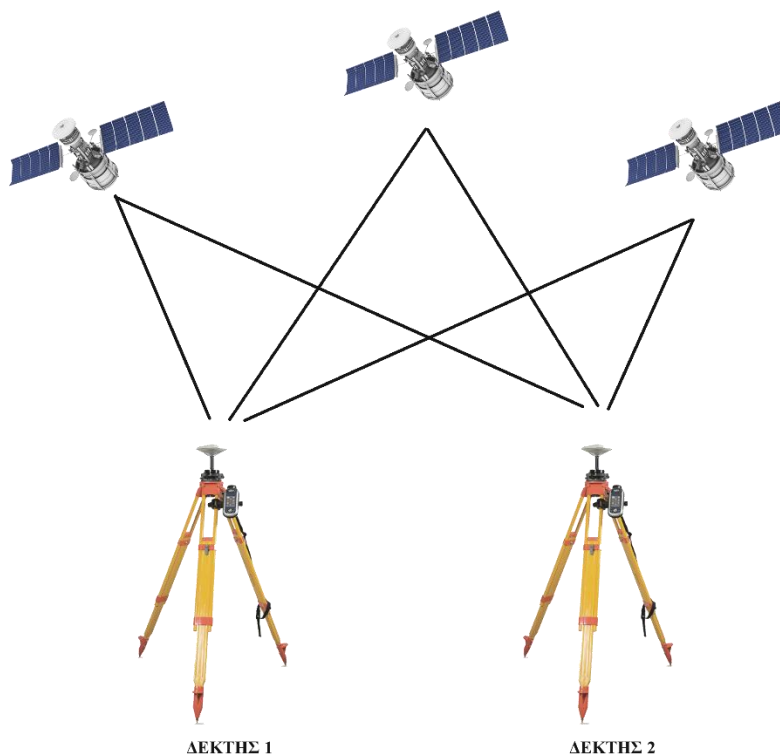
5.2.4 Μέθοδοι προσδιορισμού θέσης

Οι πιο σημαντικοί παράγοντες που καθορίζουν τη μέθοδο που θα χρησιμοποιήσουμε για τον προσδιορισμό θέσης με το GPS είναι η ακρίβεια και ο συνολικός χρόνος παρατήρησης. Στόχος μας είναι να επιτύχουμε τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια στο μικρότερο χρόνο παρατήρησης.

Οι κύριοι τρόποι προσδιορισμού θέσης είναι στατικός και κινηματικός εντοπισμός. Στον στατικό προσδιορισμό θέσης ο δέκτης είναι στάσιμος. Στον κινηματικό ο δέκτης βρίσκεται σε κίνηση π.χ. πλοίο

Εκτός από τους παραπάνω τύπους προσδιορισμού θέσης υπάρχουν και ο απόλυτος, ο σχετικός και ο διαφορικός εντοπισμός. Στον απόλυτο, έχουμε εντοπισμό σε ένα γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς συντεταγμένων όπως το WGS84.

Στο σχετικό, η θέση του δέκτη προσδιορίζεται ως προς κάποιον άλλο δέκτη που είναι στάσιμος σε γνωστή θέση και έχουμε τη δυνατότητα προκειμένου να εξαλείψουμε κοινά σφάλματα πχ δεκτών, δορυφόρων, ατμόσφαιρας και να βελτιώσουμε την ακρίβεια του δορυφορικού συστήματος να χρησιμοποιήσουμε διαφορές παρατηρήσεων, που μπορεί να είναι απλές, διπλές ή και τριπλές.



Σχήμα 5.4: Σχετικός στατικός προσδιορισμός θέσης με GPS

Πιο συγκεκριμένα ο σχετικός στατικός προσδιορισμός θέσης στηρίζεται σε μετρήσεις της φάσης του φέροντος κύματος. Χρησιμοποιεί δύο (ή περισσότερους) δέκτες οι οποίοι λαμβάνουν παρατηρήσεις ταυτόχρονα από του ίδιους δορυφόρους (εικόνα 5.4). Ο ένας δέκτης είναι τοποθετημένος σε σημείο που γνωρίζουμε με μεγάλη ακρίβεια τις συντεταγμένες του και ονομάζεται βάση (Base) ή γνωστό σημείο. Ο άλλος δέκτης βρίσκεται στο σημείο που θέλουμε να προσδιορίσουμε τις συντεταγμένες του

και ονομάζεται απρόσιτο ή άγνωστο σημείο (Rover) .Μέσω του δέκτη γνωστών συντεταγμένων μπορούμε να προσδιορίσουμε περισσότερους του ενός απομακρυσμένους δέκτες με την προϋπόθεση ότι υπάρχουν τουλάχιστον τέσσερις δορυφόροι αμοιβαία ορατοί από όλα τα σημεία. Η μέθοδος βασίζεται στην ταυτόχρονη συλλογή μετρήσεων από όλους τους δέκτες για μία ορισμένη χρονική περίοδος οι οποίες μετά από επεξεργασία δίνουν τις συντεταγμένες του σημείου ή των σημείων που ψάχνουμε. Ο χρόνος παρατήρησης κυμαίνεται από 20 λεπτά έως μερικές ώρες, ανάλογα με την απόσταση (baseline) της βάσης και των απομακρυσμένων δεκτών. Ο ρυθμός δειγματοληψίας των μετρήσεων συνήθως είναι ανά 15 με 20 δευτερόλεπτα. Μετά την ολοκλήρωση των μετρήσεων τα δεδομένα συλλέγονται από τους δέκτες ώστε να επεξεργαστούν σε κατάλληλό πρόγραμμα.

5.2.5 Γραμμικοί συνδυασμοί και διαφορές φάσης

Κατά την επεξεργασία του σήματος του GPS, πολύ συχνά χρησιμοποιούνται γραμμικοί συνδυασμοί των παρατηρούμενων ψευδο-αποστάσεων και παρατηρήσεων φάσης στις δυο συχνότητες. Ένας γραμμικός συνδυασμός έχει την γενική έκφανση (π.χ. για την ψευδο-απόσταση):

$$RLC = a * RL1 + \beta * RL2$$

όπου RL1 και RL2 οι παρατηρούμενες ψευδο-αποστάσεις στην L1 και L2 συχνότητα αντίστοιχα, και τα a και β είναι κατάλληλα επιλεγμένοι συντελεστές.

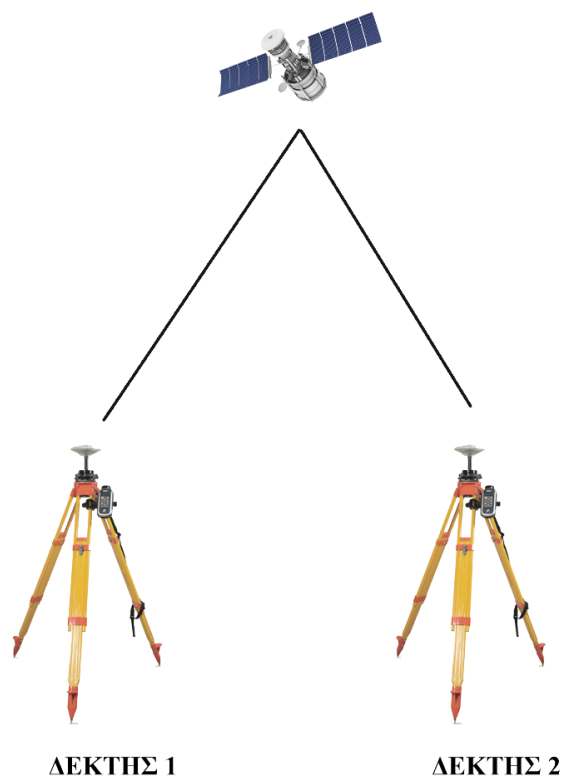
Επιλέγοντας τους κατάλληλους κάθε φορά όρους, μπορούμε να απαλλαγούμε από διάφορα σφάλματα (π.χ. την επίδραση της ιονόσφαιρας που εξαρτάται από το μήκος κύματος) ή να μεγεθύνουμε ή αντίθετα να σμικρύνουμε το τελικό μήκος κύματος της παραγόμενης παρατήρησης.

Μια ακόμη ευρέως χρησιμοποιημένη τεχνική, είναι ο συνδυασμός παρατηρήσεων μεταξύ δεκτών η/και δορυφόρων. Με τον τρόπο αυτό παράγονται διαφορές των παρατηρούμενων μεγεθών, με βασικό πλεονέκτημα την εξάλειψη κοινών σφαλμάτων. Ειδικά για ένα ζεύγος δεκτών με μικρή μεταξύ τους απόσταση (βάση), η τεχνική αυτή μπορεί να μας απαλλάξει σε πολύ μεγάλο βαθμό από διάφορες πηγές σφαλμάτων.

Πιο αναλυτικά έχουμε:

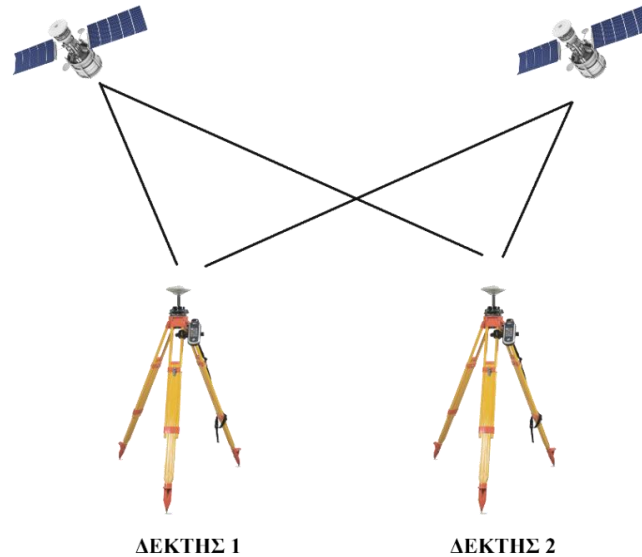
Απλές διαφορές (μεταξύ δεκτών): είναι η στιγμιαία διαφορά στις μετρήσεις που γίνονται από δύο δέκτες που παρακολουθούν ταυτόχρονα το ίδιο σήμα (ίδιο δορυφόρο,

ίδια συχνότητα). Η παραγόμενη παρατήρηση είναι απαλλαγμένη (τόσο περισσότερο όσο μικρότερη η βάση) από το σφάλμα του χρονομέτρου του δορυφόρου, της τροχιάς και της ατμόσφαιρας. Το μειονέκτημα είναι ότι η μέθοδος περιορίζει τις μετρήσεις στο 1/2 των πρωτογενών και ταυτόχρονα αυξάνει το επίπεδο του θορύβου. Αντίστοιχα μπορούμε να σχηματίσουμε την ίδια διαφορά ως προς δορυφόρους, η οποία είναι η διαφορά στις μετρήσεις που γίνονται από τον ίδιο δέκτη, που παρακολουθεί δύο σήματα δορυφόρων ταυτόχρονα (στην ίδια συχνότητα). Αυτή η μέτρηση είναι απαλλαγμένη από το σφάλμα του χρονομέτρου του δέκτη, ενώ μειώνονται σημαντικά και οι ατμοσφαιρικές επιδράσεις.



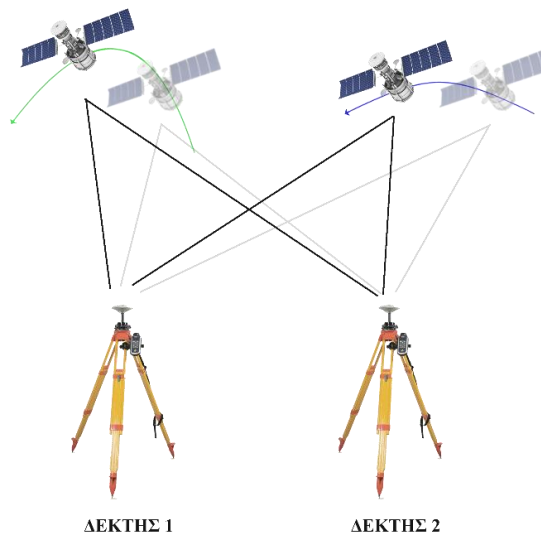
Σχήμα 5.5: Απλές διαφορές

Διπλές διαφορές: είναι η διαφορά μεταξύ μιας απλής διαφοράς ως προς δέκτης και μιας απλής διαφοράς ως προς δορυφόρους. Όπως και στις απλές διαφορές, αυτή η διαφορά εξαλείφει ή μειώνει τα σφάλματα που σχετίζονται με τους δορυφόρους (χρονοόμετρα, τροχιά, επίδραση ατμόσφαιρας) και εξαλείφει τα σφάλματα λόγω των χρονομέτρων των δεκτών. Παραμένει βέβαια προς επεξεργασία μόνο το 1/4 των αρχικών μετρήσεων, ενώ αυξάνει και ο θόρυβος.



Σχήμα 5.6: Διπλές διαφορές

Τριπλές διαφορές: είναι η διαφορά δύο διπλών διαφορών ως προς δύο διαδοχικές χρονικές στιγμές. Εκτός από τα σφάλματα που μειώνονται ή εξαλείφονται που είναι τα ίδια με αυτά των διπλών διαφορών), η παραγόμενη μέτρηση δεν περιέχει ως επιπλέον αγνώστους τον αρχικό αριθμό άγνωστων κύκλων. Δυστυχώς όμως, παραμένει προς επεξεργασία μόνο το 1/8 των αρχικά διαθέσιμων μετρήσεων ενώ και το επίπεδο θορύβου αυξάνει σημαντικά.

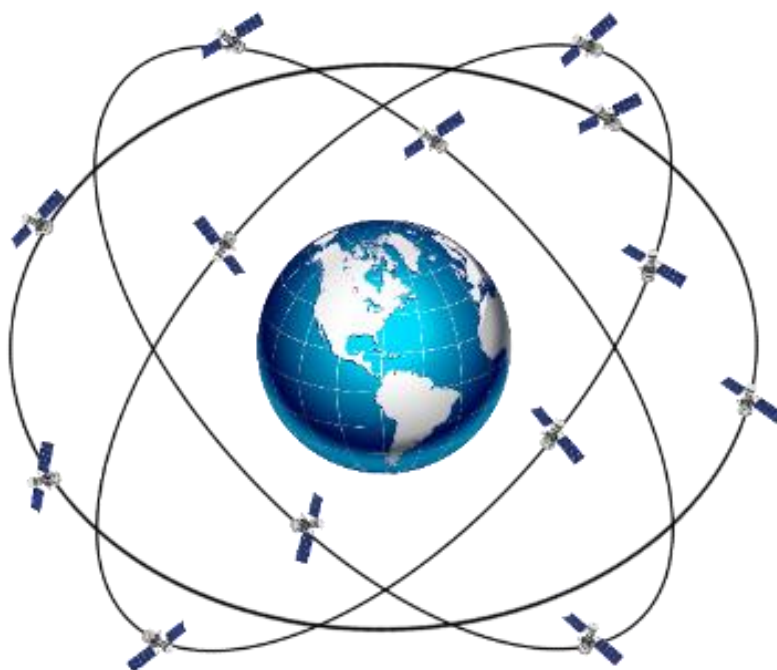


Σχήμα 5.7: Τριπλές διαφορές

5.3 GLONASS

Το σύστημα GLONASS (Global'naya Navigatsionnaya Sputnikowaya Sistema) έχει αναπτυχθεί και συντηρείται από τη Ρωσική Ομοσπονδιακή Υπηρεσία Διαστήματος και το Υπουργείο Άμυνας της Ρωσίας, από το 1970. Ο πρώτος δορυφόρος GLONASS μπήκε σε τροχιά και λειτούργησε επιτυχώς το 1984, ενώ μέχρι το 1993 ο σχηματισμός είχε φτάσει τους 12 εν λειτουργία δορυφόρους. Το 1996, το GLONASS άρχισε να λειτουργεί πλήρως με έναν ολοκληρωμένο σχηματισμό 24 δορυφόρων.

Μεταξύ 1996 και 1998 όμως, ο αριθμός των διαθέσιμων δορυφόρων μειωνόταν λόγω οικονομικών προβλημάτων. Το 2001, ο αριθμός των διαθέσιμων δορυφόρων ήταν μόνο 6 έως 8. Μετά το 2000, η ρωσική οικονομία ανέκαμψε και το σύστημα GLONASS έγινε μία από τις σημαντικότερες προτεραιότητες της κυβέρνησης. Το 2009 ορίστηκε ένα σχέδιο για την αποκατάσταση και πλήρη λειτουργία του συστήματος. Ωστόσο, υπήρχε καθυστέρηση στο σχέδιο, που οφείλεται σε κάποιες επιπλοκές και αποτυχίες στη δρομολόγηση ορισμένων δορυφόρων. Τον Δεκέμβριο του 2010, η ρωσική διαστημική υπηρεσία απέτυχε να στείλει τρεις δορυφόρους πλοήγησης GLONASS σε τροχιά, με τους δορυφόρους να χάνονται στον Ειρηνικό Ωκεανό.



Σχήμα 5.8:Τροχιές δορυφόρων Glonass

Τον Δεκέμβριο του 2011, ανακοινώθηκε ότι το δορυφορικό σύστημα GLONASS έχει φτάσει τον αριθμό των 24 εν λειτουργία δορυφόρων σε τροχιά, μετά την εκτόξευση και του 24ου δορυφόρου, από το Διαστημικό Κέντρο Μπαϊκονούρ (Baikonur Cosmodrome), το Νοέμβριο του 2011. Το σύστημα GLONASS αναπτύχθηκε κυρίως για στρατιωτικούς σκοπούς. Ωστόσο, μετά την επίτευξη της πλήρους λειτουργίας του, το GLONASS γίνεται διαθέσιμο, χωρίς χρέωση, για πολιτική χρήση.

Οι συντεταγμένες στο σύστημα GLONASS εκφράζονταν χρησιμοποιώντας το Σοβιετικό Γεωδαιτικό Σύστημα 1985 (Soviet Geodetic System – SGS-85). Το 1994, το σύστημα αναφοράς συντεταγμένων άλλαξε σε SGS-90. Το SGS-90 είναι γνωστό στις μέρες μας ως Parametry Zemli 1990 – PZ90 ή αλλιώς PE-90 (Parameters of Earth - 1990).

Το GLONASS έχει τη δική του κλίμακα χρόνου που ονομάζεται χρόνος Glonass, συγχρονισμένος στην κλίμακα του 1 second με τον χρόνο UTC. Το μήνυμα πλοήγησης διαθέτει τα απαραίτητα δεδομένα για τη μετατροπή μεταξύ του χρόνου GLONASS και του UTC. Το μήνυμα πλοήγησης περιλαμβάνει πληροφορίες σχετικά με τις δορυφορικές τροχιές, την κατάσταση υγείας των δορυφόρων, τα δεδομένα διόρθωσης, και τα ημερολογιακά δεδομένα για όλους τους δορυφόρους του σχηματισμού. Επιπλέον, περιλαμβάνει τη διόρθωση του χρόνου Glonass σε σχέση με το UTC και τη διαφορά στο χρόνο μεταξύ του συστήματος Glonass και του συστήματος GPS.

Όπως στο GPS έτσι και στο Glonass εκπέμπονται κώδικες C/A στη συχνότητα L1 και τύπου P στις συχνότητες L1 και L2. Οι κώδικες στο Glonass έχουν διαφορετική δομή από εκείνους του GPS. Η συχνότητα των κωδικών στο Glonass είναι περίπου το μισό της συχνότητας του GPS, οπότε και η ακρίβεια στη μέτρηση των αποστάσεων είναι χαμηλότερη ακρίβεια από το GPS. Το εκπεμπόμενο εύρος των συχνοτήτων για την L1 είναι (1598,0625 – 1604,25 MHz) και για την L2 είναι (1242,9375 – 1247,75 MHz).

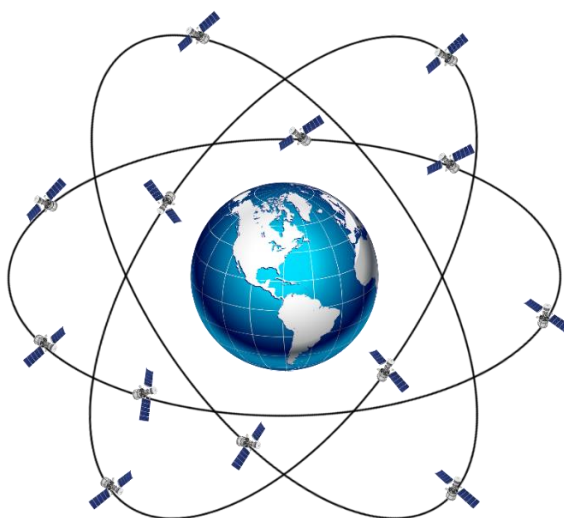
Το σύστημα GLONASS αποτελείται από 24 δορυφόρους, σε τρία τροχιακά επίπεδα και σε καθένα από τα οποία ο ανιών δεσμός απέχει 120° από τον επόμενο. Μεταξύ αυτών των δορυφόρων υπάρχουν 21 ενεργοί, ενώ οι άλλοι τρεις χρησιμοποιούνται ως εφεδρικοί, καλύπτοντας έτσι το 97-99% της επιφάνειας της Γης. Οι τροχιές των δορυφόρων είναι σχεδόν κυκλικές, με πολύ μικρή εκκεντρότητα, μεγάλο ημιάξονα στα

25440km και γωνία κλίσης στις $64,8^\circ$. Οι δορυφόροι κατανέμονται ομοιόμορφα στις τροχιές, δηλαδή η μεταξύ τους γωνία είναι 45 μοίρες.

5.4 GALILEO

Από τα τέλη της δεκαετίας του 1990, η Ευρωπαϊκή Ένωση και η Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος (ESA) έχουν προωθήσει την ανάπτυξη ενός ανεξάρτητου GNSS συστήματος για πολιτική χρήση, με το όνομα GALILEO. Το έργο, αρχικού προϋπολογισμού € 5 000 000 000, πήρε το όνομά του από τον Ιταλό αστρονόμο Galileo Galilei. Ένας από τους στόχους του GALILEO είναι να παρέχει ένα σύστημα εντοπισμού θέσης υψηλής ακρίβειας κατά την οποία τα ευρωπαϊκά έθνη μπορούν να χρησιμοποιούν, ανεξάρτητα από το ρωσικό GLONASS, το GPS των ΗΠΑ και το κινεζικό σύστημα COMPASS-BEIDOU, τα οποία μπορεί να απενεργοποιηθούν σε περιόδους πολέμου ή συγκρούσεων.

Το δορυφορικό σύστημα πλοήγησης Galileo, έχει σήμερα 14 δορυφόρους σε τροχιά. Η ολοκλήρωση του συστήματος έχει προγραμματιστεί για το 2020. Το πλήρως αναπτυγμένο δορυφορικό τμήμα του συστήματος Galileo θα αποτελείται από 24 εν λειτουργία δορυφόρους, συν έξι εφεδρικούς σε τροχιά, τοποθετημένους σε τρία κυκλικά MEO επίπεδα, σε υψόμετρο 23222 km πάνω από τη Γη, και με κλίση των τροχιακών επιπέδων 56 μοίρες ως προς τον ισημερινό με περίοδο 14 h 4 min, δηλαδή τα ίχνη των δορυφόρων θα επαναλαμβάνονται κάθε 10 μέρες.



Σχήμα 5.9: Τροχιές δορυφόρων Galileo

Το σύστημα ελέγχου θα αποτελείται από 30 σταθμούς παρατήρησης σε όλο τον κόσμο. Τα δεδομένα θα συλλέγονται σε δύο κεντρικούς σταθμούς ελέγχου GCC (Galileo Control Centers) με στόχο τη τροφοδοσία των δορυφόρων με δεδομένα κυρίως για τις εφημερίδες και για την τήρηση του χρόνου ακριβείας του Galileo, καθώς και για τον πλήρη έλεγχο του συστήματος.

Κάθε δορυφόρος θα είναι εφοδιασμένος με έναν αναμεταδότη, που θα έχει τη δυνατότητα εκπομπής σημάτων έκτακτης ανάγκης σε κεντρικό σταθμό άμεσης επέμβασης (Rescue Center).

Οι δορυφόροι του Galileo θα εκπέμπουν ραδιοσήματα σε 10 συχνότητες. Οι έξι από αυτές θα εξυπηρετούν υπηρεσίες σχετικά με την ασφάλεια της ανθρώπινης ζωής, δύο θα είναι για εμπορικούς σκοπούς και οι υπόλοιπες δύο για δημόσιες χρήσεις σε θέματα εθνικής ασφάλειας. Οι συχνότητες που εκπέμπονται θα είναι οι E5A-E5B (1164-1215 MHz), E6 (1260-1300 MHz) και E2-L1-E1 (1559-1591 MHz).

Η χρήση των βασικών (χαμηλής ακρίβειας) υπηρεσιών Galileo θα είναι ελεύθερη και ανοικτή για το καθένα. Οι δυνατότητες υψηλής ακρίβειας θα είναι διαθέσιμες επί πληρωμή για τους εμπορικούς χρήστες και φυσικά για στρατιωτική χρήση.

5.5 COMPASS/BEIDOU

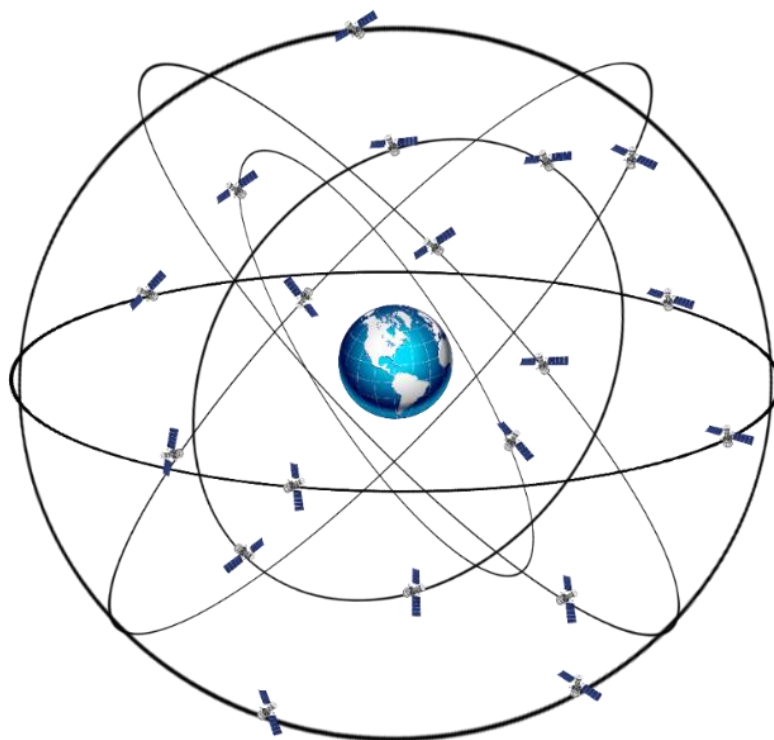
Το COMPASS/BEIDOU είναι το δορυφορικό σύστημα πλοήγησης της Κίνας. Αναπτύχθηκε αρχικά σαν ένα περιορισμένο σύστημα δοκιμής που ονομάζεται BEIDOU-1 και βρίσκεται σε λειτουργία από το 2000. Αποτελείται από τρεις δορυφόρους και πρόσφερε περιορισμένη κάλυψη και εφαρμογές.

Στη συνέχεια αναπτύχθηκε το BEIDOU-2 ή COMPASS το οποίο στην αρχή πρόσφερε κάλυψη μόνο στην περιοχή της Κίνας και των γύρω κρατών με 10 δορυφόρους σε τροχιά και άρχισε να προσφέρει τις υπηρεσίες του σε χρήστες τον Δεκέμβριο του 2012. Το σύστημα σε πλήρη ανάπτυξη θα είναι έτοιμο στο τέλος του 2020 και θα έχει παγκόσμια κάλυψη. Το COMPASS/BEIDOU-2 σχεδιάστηκε ώστε να είναι συμβατό και διαλειτουργικό με τα άλλα δορυφορικά συστήματα πλοήγησης (GPS, GALILEO, GLONASS) και ο ίδιος δέκτης να μπορεί να αναγνωρίσει τα σήματα από τα υπόλοιπα συστήματα πλοήγησης. Θα αποτελείται από 35 δορυφόρους, οι πέντε είναι σε γεωστατική τροχιά (Geostationary Earth Orbit

Satellites) για να είναι συμβατή με το BEIDOU-1, και 30 δορυφόρους σε μη γεωστατική τροχιά (NON GEO Satellites) και θα προσφέρει κάλυψη σε όλο τον πλανήτη σε οποιοδήποτε συνθήκες.

Οι δορυφόροι βρίσκονται σε υψόμετρο 21.150 Km και με κλίση $55,5^\circ$ ως προς το Ισημερινό επίπεδο. Οι συχνότητες λειτουργίας για το σύστημα βρίσκονται σε τρεις διαύλους, την B1 (1575.42 MHz), B2 (1191,79 MHz) και B3 (1268,52 MHz). Επίσης το COMPASS/BEIDOU-2 έχει το δικό του σύστημα αναφοράς CGS2000 (China Geodetic Coordinate System 2000), ενώ το σύστημα αναφοράς χρόνου ταυτίστηκε με το χρόνο UTC 00:00 στην 1 Ιανουαρίου 2006.

Το σύστημα COMPASS/BEIDOU-2 παρέχει δύο επίπεδα υπηρεσιών. Το ένα επίπεδο είναι ελεύθερο για δωρεάν χρήση και έχει μία ακρίβεια εντοπισμού θέσης της τάξεως των 10 μέτρων και συγχρονίζει τα ρολόγια με μία ακρίβεια των 10 nsec. Και υπάρχει και μία περιορισμένη παρεχόμενη υπηρεσία μόνο προς την Κινεζική κυβέρνηση και τον στρατό, που παρέχει μία ακρίβεια της τάξεως των 10 cm και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για επικοινωνίες, καθώς και θα παρέχει πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση του συστήματος στο χρήστη.



Σχήμα 5.10: Τροχιές δορυφόρων Compass/Beidou

Κεφάλαιο 6

Το τοπικό γεωδαιτικό δίκτυο

Το κρατικό γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς υλοποιείται από συγκεκριμένα τριγωνομετρικά σημεία σε όλη την Ελλάδα. Η Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού (ΓΥΣ) έχει εγκαταστήσει βάθρα σε χαρακτηριστικά σημεία ώστε να είναι εύκολα ορατά από μεγάλες αποστάσεις και τις περισσότερες φορές προσβάσιμα. Για τον ακριβή γεωδαιτικό προσδιορισμό του φράγματος Βαλσαμιώτη δημιουργήθηκε με βάση τα τριγωνομετρικά σημεία της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (ΓΥΣ) ένα τοπικό γεωδαιτικό δίκτυο, άμεσα συνδεδεμένο με την περιοχή μελέτης και ελεγμένο από τον μόνιμο σταθμό GPS (TUC2) του Πολυτεχνείου Κρήτης για να πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις.

6.1 Τριγωνομετρικά σημεία

Σε αρκετές κορυφές των βουνών της Ελλάδος, υπάρχουν τσιμεντένια βάθρα, ύψους συνήθως από 1 έως 1,20 μέτρα (Εικόνα 6.1). Έχουν διατομή είτε κυκλική είτε τετράγωνη και επάνω τους υπάρχει μια μεταλλική πλακέτα (Εικόνα 6.2) διαμέτρου περίπου 0,40 μέτρα που αναγράφει το όνομα της υπηρεσίας και το έτος εγκατάστασης. Η διαδικασία τοποθέτησής τους ονομάζεται σήμανση των σημείων. Η κατασκευή του βάθρου και η υπερύψωση του σημείου στο ύψος του βάθρου ονομάζεται επισήμανση και έχει ως σκοπό, τα σημεία να είναι ορατά από πολύ μακριά. Οι κατασκευές αυτές ονομάζονται Τριγωνομετρικά Σημεία και τα έχει κατασκευάσει η Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού (Γ.Υ.Σ.).



Σχήμα 6.1: Τριγωνομετρικό Σημείο

Τα τριγωνομετρικά σημεία, υλοποιούν το εκάστοτε κρατικό σύστημα αναφοράς και χρησιμοποιούνται για την εξάρτηση σχεδίων από αυτό, με εφαρμογές σε τοπογραφικές εργασίες όπως χάραξη τεχνικών έργων, έλεγχος μικρομετακινήσεων κ.α.

Ουσιαστικά αποτελούν σημεία εξάρτησης και ελέγχου, που για να προσδιοριστούν οι συντεταγμένες τους στον χώρο χρησιμοποιούνται μέθοδοι τριγωνομετρικής υψομετρίας ή γεωμετρικής χωροστάθμησης.

Τα σημεία αυτά είναι μόνιμα τοποθετημένα στο έδαφος και σκοπός των μετρήσεων είναι να γίνουν γνωστές οι συντεταγμένες τους (X,Y) ως προς ένα ορισμένο σύστημα αναφοράς, και να καθοριστεί το υψόμετρο τους ως προς μια ορισμένη επιφάνεια αναφοράς. Όταν τα σημεία αυτά αποκτήσουν συντεταγμένες σε κάποιο Σύστημα Αναφοράς και υψόμετρο ως προς τη Μέση Στάθμη της Θάλασσας (ΜΣΘ), όπως αυτή έχει προσδιορισθεί για τη κάθε χώρα, τότε καλούνται και χωροσταθμικά σημεία.



Σχήμα 6.2: Πληροφορίες τριγωνομετρικού σημείου

6.2 Μόνιμος σταθμός GPS (TUC2)

Ο μόνιμος δορυφορικός σταθμός TUC2 (Εικόνα 6.3) είναι εγκατεστημένος σε περιφραγμένο χώρο στο τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης και παρέχει δεδομένα GNSS (GPS και GLONASS) από τον Ιούλιο του 2004. Ο σταθμός TUC2 ακολουθεί τις προδιαγραφές και τα διεθνή πρότυπα των μόνιμων σταθμών GPS της International GPS Service. Από τον Οκτώβριο του 2004 ο σταθμός έχει συνδεθεί με το πανευρωπαϊκό δίκτυο μόνιμων δορυφορικών παρατηρήσεων GPS της υπηρεσίας European Reference Frame Permanent Network (EUREF). Όλα τα δεδομένα για τον μόνιμο σταθμό GPS TUC2 είναι διαθέσιμα και διατίθενται δωρεάν στην ιστοσελίδα της EUREF (<http://gnss.bev.gv.at/pub/obs/2017/>).

Σύμφωνα με δεδομένα της EUREF οι συντεταγμένες του TUC2 στο παγκόσμιο σύστημα αναφοράς ITRF2014 και στο ευρωπαϊκό σύστημα αναφοράς ETRF2000 είναι:

ETRF2000(R14)	Εποχή t_0	Συντεταγμένες (m)			Ταχύτητα (m/y)		
		X	Y	Z	V _x	V _y	V _z
288/2004 - 196/2010	001/2010	4744544,210 ± 0,001	2119411,587 ± 0,001	3686258,508 ± 0,001	0,0204 ± 0,0001	-0,0093 ± 0,0001	-0,0215 ± 0,0001

ITRF2014	Εποχή t_0	Συντεταγμένες (m)			Ταχύτητα (m/y)		
		X	Y	Z	V _X	V _Y	V _Z
288/2004 - 196/2010	001/2010	4744543,790 ± 0,001	2119411,943 ± 0,001	3686258,794 ± 0,001	0,0029 ± 0,0001	0,0100 ± 0,0001	-0,0096 ± 0,0001



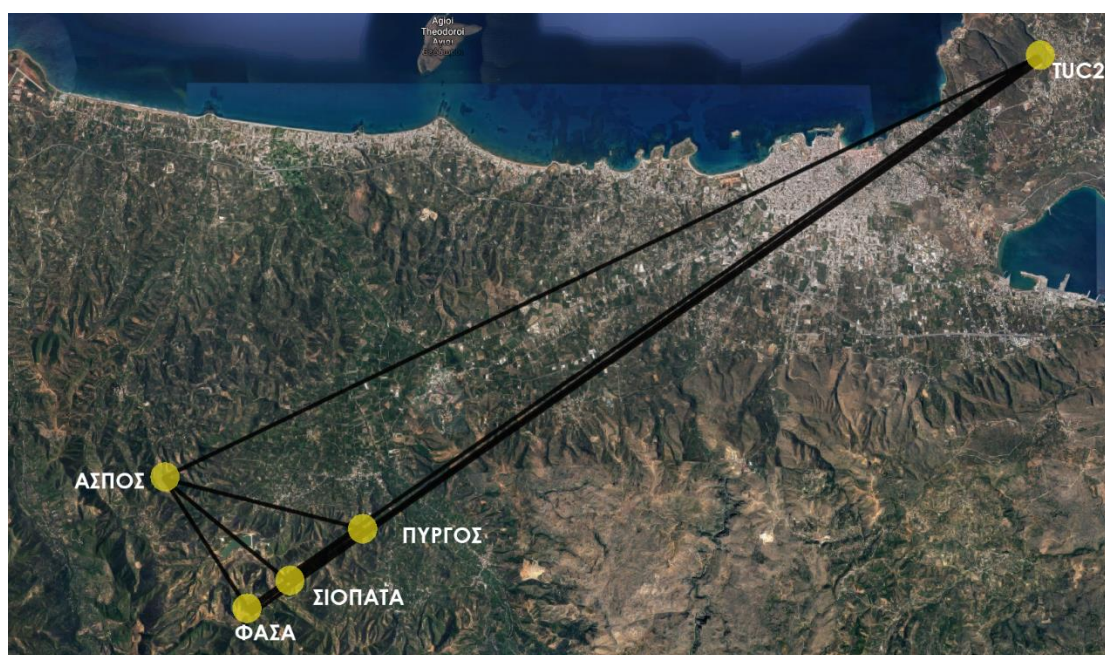
Σχήμα 6.3: Μόνιμος σταθμός GPS (TUC2)

Στα προηγούμενα κεφάλαια αναφέρθηκαν όλες οι απαραίτητες πληροφορίες για την κατανόηση των αποτελεσμάτων της εργασίας, στο επόμενο κεφάλαιο θα γίνει η παρουσίασή τους. Πιο συγκεκριμένα θα ακολουθήσει ανάλυση των αποτελεσμάτων από την επίλυση του φράγματος με σχετικό στατικό εντοπισμό στα γεωδαιτικά συστήματα εντοπισμού ΕΓΣΑ-87, HTRS-07, WGS-84 καθώς και η επίλυση μέσω κινηματικού εντοπισμού με GPS στο γεωδαιτικό σύστημα ΕΓΣΑ-87.

Κεφάλαιο 7

Επεξεργασία Μετρήσεων

Βασικός στόχος της εργασίας είναι ο ακριβής γεωδαιτικός προσδιορισμός του τριγωνομετρικού σημείου ελέγχου στο φράγμα του Βαλσαμιώτη με χρήση του Παγκόσμιου Γεωδαιτικού Συστήματος Εντοπισμού (GPS). Δημιουργήθηκε τοπικό γεωδαιτικό δίκτυο με γνωστές συντεταγμένες από τριγωνομετρικά σημεία της περιοχής Βατόλακος στα Χανιά Κρήτης και θεμελιώδη παγκόσμια σημεία αναφοράς όπως ο μόνιμος σταθμός GPS του Πολυτεχνείου Κρήτης (TUC2).



Σχήμα 7.1: Το τοπικό γεωδαιτικό δίκτυο

Ο προσδιορισμός των συντεταγμένων έγινε ως προς το κέντρο μάζας της γης και συνδέθηκαν με τον στερεό φλοιό της γης χρησιμοποιώντας γεωδαιτικά συστήματα αναφοράς όπως το Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς του 1987 (ΕΓΣΑ-87), το παγκόσμιο σύστημα αναφοράς World Geodetic System 1984 (WGS-84) αλλά και το Ελληνικό Hellenic Terrestrial Reference System 2007. Χρησιμοποιήθηκαν γεωδαιτικοί δέκτες GPS μονής και διπλής συχνότητας υψηλής ακρίβειας (Maggellan Promark-2, Smart 6200).

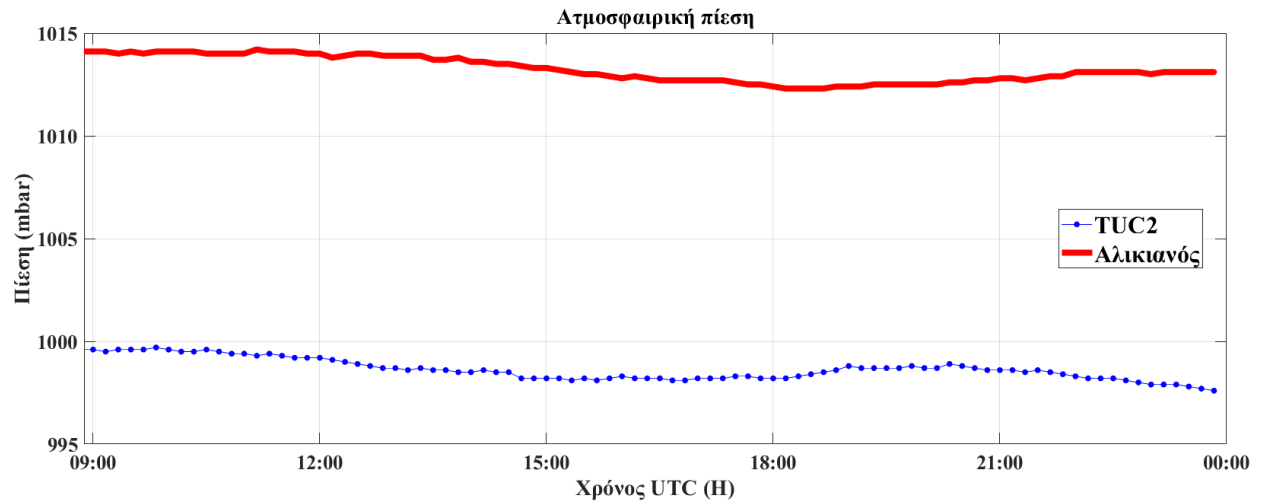
7.1 Προετοιμασία μετρήσεων

Πριν την επίσκεψη στο πεδίο έγινε ο απαραίτητος έλεγχος των δεκτών. Ελέγχθηκαν οι μπαταρίες των δεκτών, καθώς οι μετρήσεις στο πεδίο θα ήταν πολύωρες. Έγινε έλεγχος αν μπορούν να καταγραφούν δεδομένα σε αρχείο RINEX για να μπορεί να γίνει αργότερα η κατάλληλη επεξεργασία των μετρήσεων. Η αποθήκευση των δεδομένων σε μορφή RINEX (Receiver Independent Exchange Format) είναι πολύ σημαντική καθώς είναι το διεθνώς αποδεκτό πρότυπο παρατηρήσεων GNSS και δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να κάνει την επεξεργασία των δεδομένων σε οποιοδήποτε λογισμικό GPS. Για την ελάττωση των επιδράσεων της τροπόσφαιρας χρησιμοποιήθηκε γωνία αποκοπής δέκα μοιρών καθώς οι μετρήσεις από δορυφόρους που βρίσκονται κοντά στον ορίζοντα δημιουργούν μεγάλα σφάλματα λόγω τροπόσφαιρας. Στη συνέχεια έγινε ο κατάλληλος προγραμματισμός των δεκτών ώστε να καταγράφουν σε σχετικό στατικό εντοπισμό και οι μετρήσεις τους να καταγράφονται στην μνήμη των δεκτών. Αυτό έγινε για την εύρυθμη λειτουργία τους και για να μην υπάρχουν προβλήματα και καθυστερήσεις στο πεδίο. Αφού ολοκληρώθηκαν οι έλεγχοι των δεκτών, ακολούθησε έλεγχος των βαλιτσών των δεκτών αν έχουν όλα τα απαραίτητα όργανα όπως το δέκτη, την κεραία, τις μπαταρίες, την κάρτα μνήμης, τα τρικόχλια, το μέτρο κ.α. Τέλος έγινε η συμπλήρωση των εντύπων για τις δορυφορικές μετρήσεις ώστε να σημειώνονται στο πεδίο τα απαραίτητα βοηθητικά στοιχεία για κάθε στάση του δικτύου.

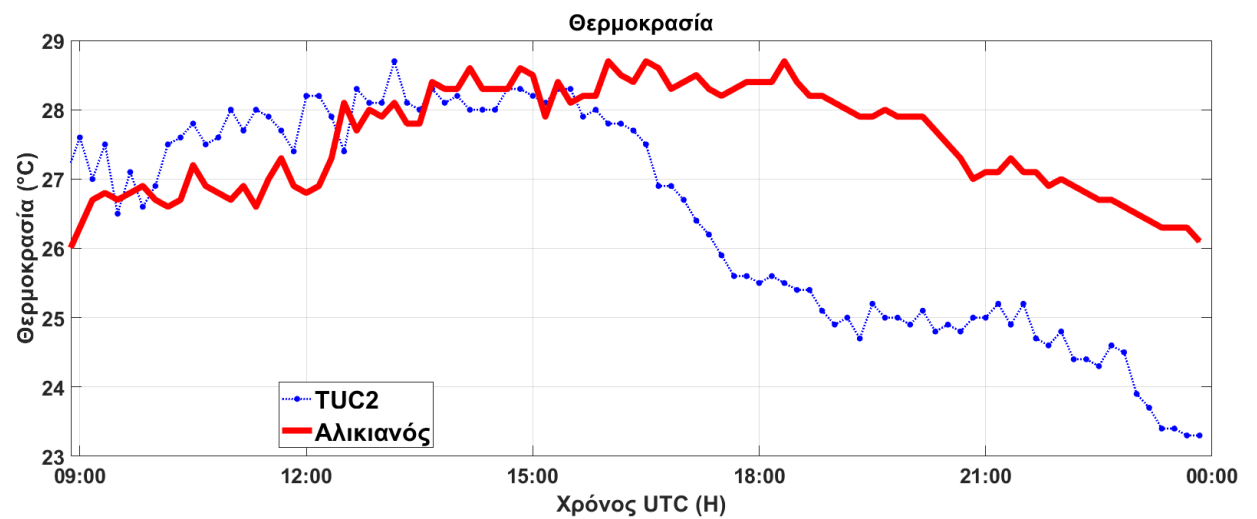
7.2 Διαδικασία μετρήσεων

Οι μετρήσεις του δικτύου πραγματοποιήθηκαν στις 7 Ιουλίου του 2017. Ο καιρός ήταν κυρίως αίθριος με λίγα σύννεφα κατά τις πρωινές ώρες. Οι μετρήσεις στο φράγμα ξεκίνησαν στις 12:00 το μεσημέρι και τελείωσαν τις 11:00 το βράδυ. Η χαμηλότερη θερμοκρασία ήταν 26 βαθμοί Κελσίου στις 17:00 το απόγευμα, η ψηλότερη ήταν 28,8 βαθμοί Κελσίου κατά τις μεσημεριανές ώρες, ενώ οι άνεμοι κυμαίνονταν από 4-5 Bf και η υγρασία στην ατμόσφαιρα ήταν 45%-61% όπως προκύπτει από τα μετεωρολογικά δεδομένα που συλλέχθηκαν από τον μετεωρολογικό σταθμό της περιοχής Αλικιανός. Στη συνέχεια θα γίνει παρουσίαση και σύγκριση των δεδομένων πίεσης, θερμοκρασίας και υγρασίας που επικρατούσαν στις περιοχές του Αλικιανού και του TUC2 στα Κουνουπιδιανά κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Οι ατμοσφαιρικές επιδράσεις σε σημεία που απέχουν αρκετά μεταξύ τους, παίζουν πολύ μεγάλο ρόλο στην

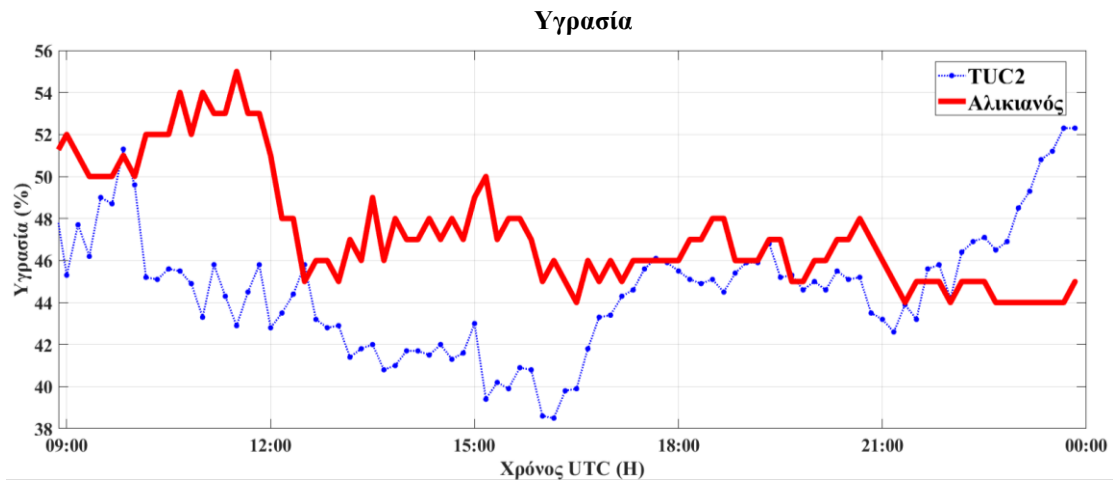
ακρίβεια των μετρήσεων, καθώς το γεωδαιτικό σημείο ελέγχου TUC2 αποτελεί το βασικό σημείο εξάρτησης για το τοπικό γεωδαιτικό δίκτυο. Στα διαγράμματα, η πίεση είναι μετρημένη σε hPa, η θερμοκρασία σε βαθμούς κελσίου, η υγρασία σε ποσοστό υγρασίας επί τις εκατό και ο χρόνος σε χρόνο UTC (Coordinated Universal Time).



Σχήμα 7.2: Η διακύμανση της ατμοσφαιρικής πίεσης κατά την διάρκεια των μετρήσεων.

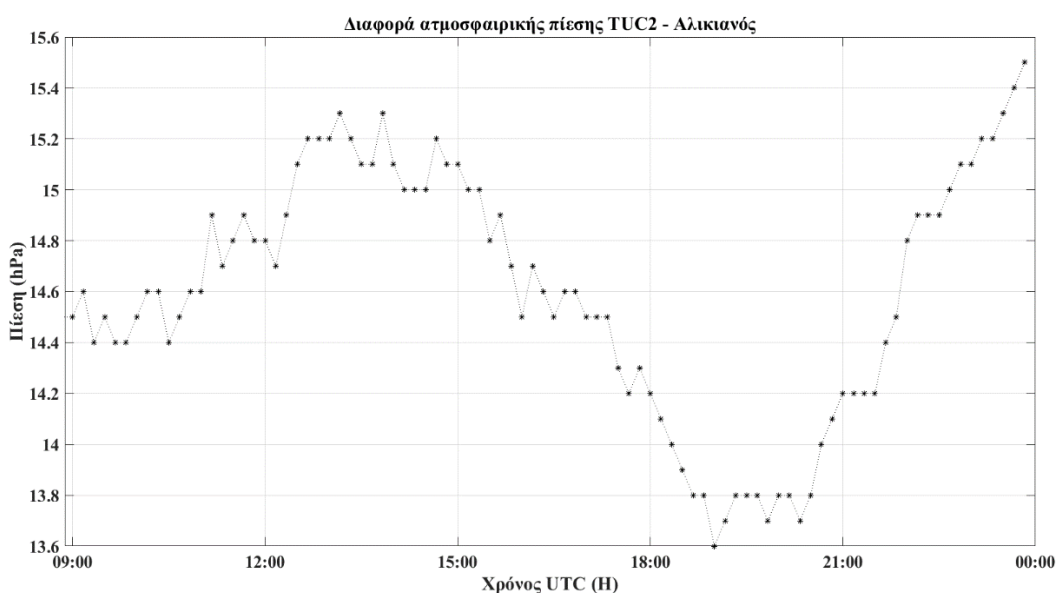


Σχήμα 7.3: Διάγραμμα θερμοκρασίας κατά την διάρκεια των μετρήσεων

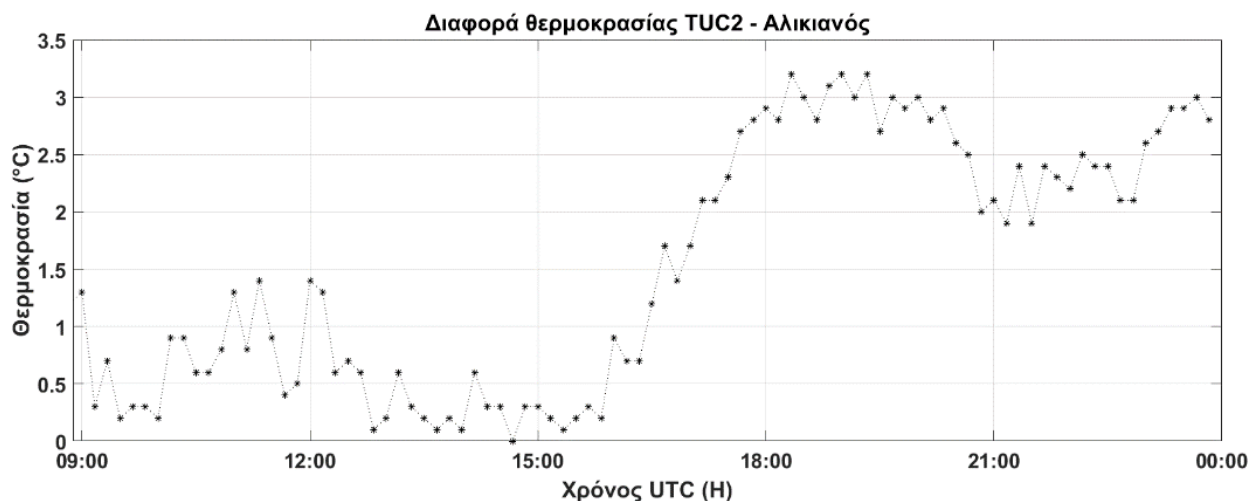


Σχήμα 7.4: Διάγραμμα υγρασίας κατά την διάρκεια των μετρήσεων

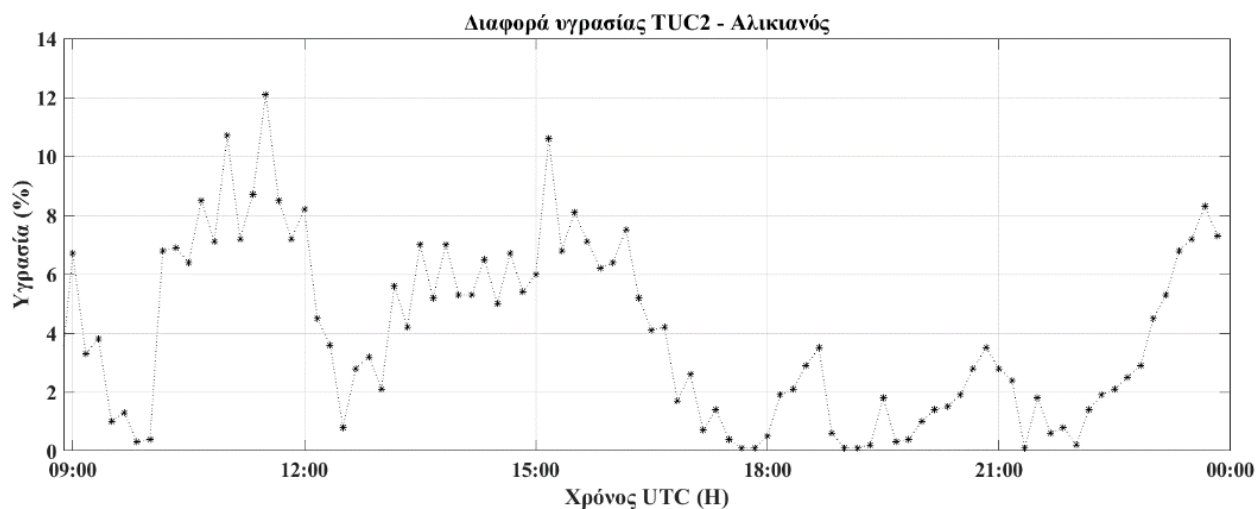
Όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα αλλά και από αυτά που θα παρουσιαστούν στην συνέχεια και αποτελούν διαγράμματα διαφορών οι ατμοσφαιρικές συνθήκες κατά την διάρκεια των μετρήσεων είχαν ελάχιστη διαφορά οπότε δεν κρίνεται απαραίτητη η εφαρμογή μοντέλου για την τροπόσφαιρα. Γενικά όταν γίνονται μετρήσεις με το GPS των δεδομένων δύο σημείων είναι πολύ σημαντικό οι ατμοσφαιρικές συνθήκες να είναι παρόμοιες καθώς οποιαδήποτε αλλαγή στην υγρή ή ξηρή συνιστώσα της ατμόσφαιρας συνεπάγεται καθυστέρηση στο σήμα και μείωση της ακρίβειας επίλυσης. Στην μετεπεξεργασία των δεδομένων και την χρήση των απλών ή διπλών διαφορών μπορούν να ελαχιστοποιηθούν κάποια συστηματικά σφάλματα αλλά όχι και τα σφάλματα που προέρχονται από ατμοσφαιρικές επιδράσεις.



Σχήμα 7.5: Διάγραμμα διαφοράς πίεσης κατά την διάρκεια των μετρήσεων



Σχήμα 7.6: Διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας κατά την διάρκεια των μετρήσεων



Σχήμα 7.7: Διάγραμμα διαφοράς υγρασίας κατά την διάρκεια των μετρήσεων

Όπως προαναφέρθηκε και φάνηκε ακόμα καλύτερα από τα διαγράμματα διαφορών, οι ατμοσφαιρικές συνθήκες δεν είχαν μεγάλες αποκλίσεις και για την πίεση υπήρξαν διαφορές από μηδέν μέχρι και 12,5 (hPa) στις 15:00, για την θερμοκρασία από μηδέν μέχρι και 3,5 °C στις 19:00 και για την υγρασία από μηδέν μέχρι και 11% στις 15:00.

Για τις μετρήσεις πεδίου εφαρμόστηκε η μέθοδος του σχετικού στατικού εντοπισμού με GPS. Χρησιμοποιήθηκαν δύο δέκτες GPS:

- Δέκτης GPS Magellan Promark 2, μονής συχνότητας (L1)
- Δέκτης GPS Smart 6200, δύο συχνοτήτων (L1/L2)

Η επιλογή των κορυφών του δικτύου έγινε με τρόπο ώστε να έχουν καλή γεωμετρία μεταξύ τους, να έχουν μικρή απόσταση από το φράγμα και να είναι εύκολα προσβάσιμες. Ο μόνιμος σταθμός GPS (TUC2) χρησιμοποιήθηκε ως σταθμός αναφοράς για τις μετρήσεις αλλά και για τον έλεγχο των συνταγμένων των τριγωνομετρικών σημείων που αποτέλεσαν τις άλλες κορυφές του δικτύου. Ο δέκτης Smart 6200 τοποθετήθηκε στο χωροσταθμικό βάθρο ελέγχου του φράγματος για 11 ώρες περίπου και ο Magellan Promark 2 χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις (περίπου δύο ώρες ανά σημείο) στα υπόλοιπα σημεία. Το βήμα καταγραφής των μετρήσεων για όλους τους δέκτες ορίστηκε στα δύο δευτερόλεπτα. Σε όλα τα σημεία που πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις, η τοποθέτηση της κεραίας του δέκτη έγινε με ιδιαίτερη προσοχή, ώστε να είναι απόλυτα οριζόντια και σωστά κεντρωμένη πάνω από το σημείο.

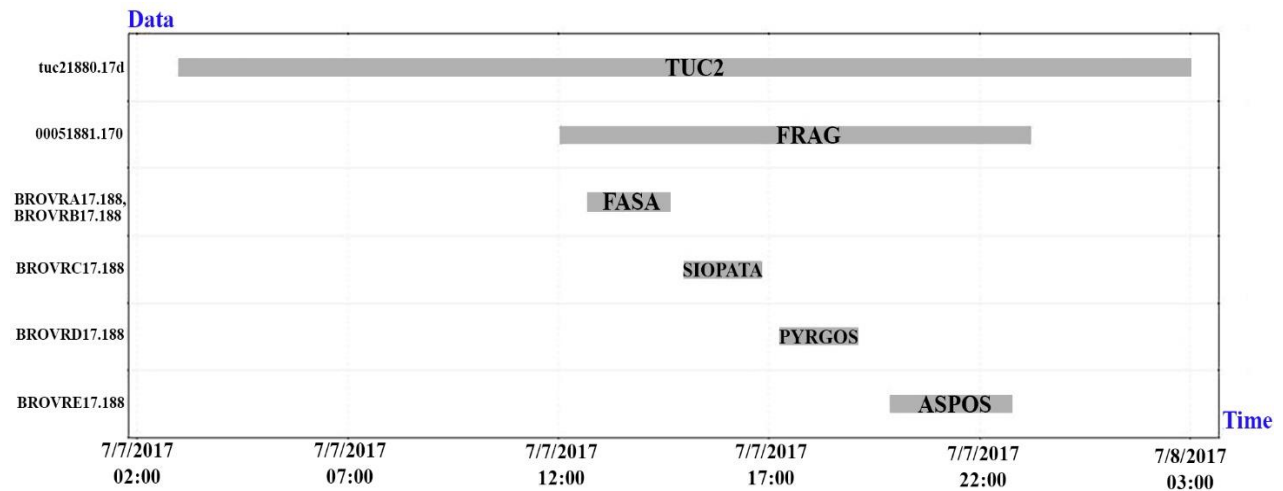


Σχήμα 7.8: Τρικόχλιο

Στη συνέχεια συμπληρωνόταν το έντυπο πεδίου στο οποίο καταγράφονται οι πληροφορίες του σταθμού, οι πληροφορίες της εργασίας, οι πληροφορίες της μέτρησης δηλαδή η ώρα έναρξης και λήξης, τα στοιχεία του παρατηρητή και του δέκτη για κάθε στάση του δικτύου.

Οι μετρήσεις του βασικού βάθρου στο φράγμα του Βαλσαμιώτη διήρκεσαν 11 ώρες (12:00 – 23:00). Τα υπόλοιπα σημεία μετρήθηκαν διαδοχικά ξεκινώντας από το

σημείο ΦΑΣΑ, (12:42 – 14:41), στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στα σημεία ΣΙΟΠΑΤΑ (14:59 – 14:50), ΠΥΡΓΟΣ (15:14 – 19:06) και ΑΣΠΟΣ (19:52 – 22:46) (εικόνα 7.9).



Σχήμα 7.9: Χρονολόγιο παρατηρήσεων στο λογισμικό επεξεργασίας.

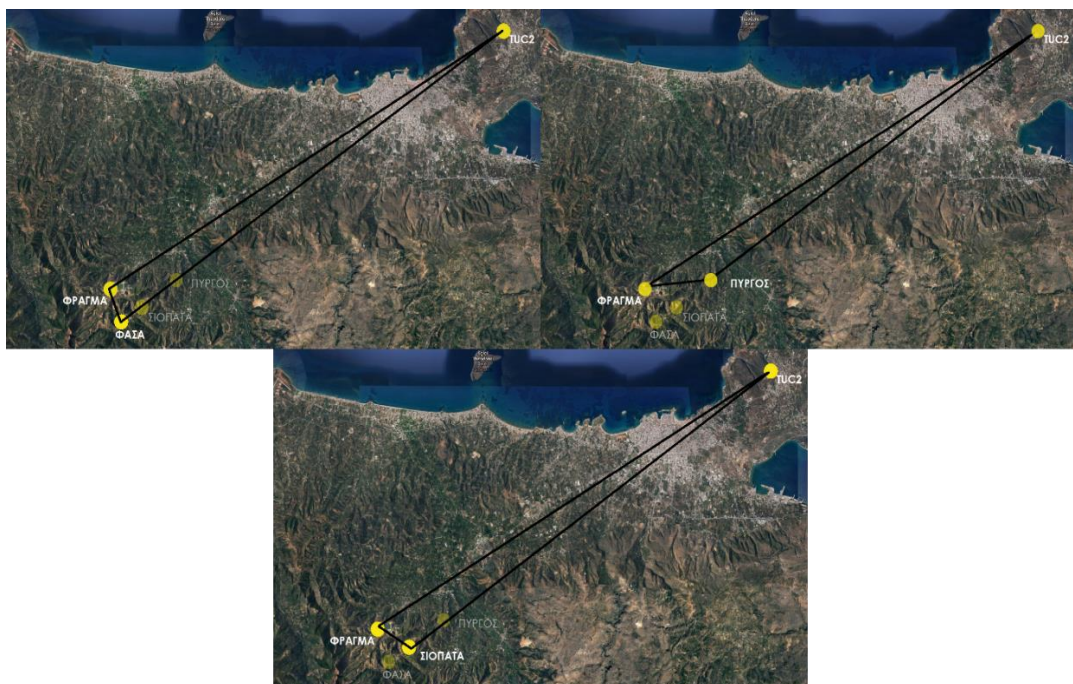
7.3 Επεξεργασία Μετρήσεων-Αποτελέσματα

Η επεξεργασία των μετρήσεων έγινε με τρόπο ώστε όλα τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν να μπορούν να ελέγχονται για την αρτιότητά τους και να είναι άμεσα εξαρτημένα από τον μόνιμο σταθμό GPS (TUC2) του Πολυτεχνείου Κρήτης που αποτελεί θεμελιώδες παγκόσμιο σημείο αναφοράς. Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν το GNSS solutions και ο προσδιορισμός των συντεταγμένων του φράγματος στα γεωδαιτικά συστήματα αναφοράς ΕΓΣΑ-87, WGS-84 και HTRS-07 έγινε με δύο μεθοδολογίες. Η πρώτη (σχήμα 7.10) πραγματοποιήθηκε με την επίλυση της κάθε γεωδαιτικής βάσης μεμονωμένα από το σημείο αναφοράς (TUC2) και η δεύτερη (σχήμα 7.11) με την επίλυση του γεωδαιτικού δικτύου τριών σημείων. Ακόμα πραγματοποιείται έλεγχος κλεισίματος (loop closure) του γεωδαιτικού δικτύου. Η συγκεκριμένη τεχνική αθροίζει τις μετατοπίσεις (DX, DY, DZ) των γεωδαιτικών βάσεων ενός κλειστού βρόγχου ώστε μέσα από την χρήση όδευσης να γίνει ανίχνευση σφαλμάτων και εντοπισμός διανυσμάτων με μεγάλες αποκλίσεις. Τέλος γίνεται προσδιορισμός των τελικών συντεταγμένων του φράγματος με χρήση κάθε γεωδαιτικής βάσης μεμονωμένα καθώς και με επίλυση του γεωδαιτικού δικτύου τριών σημείων στα γεωδαιτικά συστήματα που προαναφέρθηκαν. Οι τελικές συντεταγμένες προκύπτουν χρησιμοποιώντας βάρη ώστε να έχουν μικρότερη επίδραση σημεία του τοπικού γεωδαιτι-

κού δικτύου με μεγαλύτερη απόσταση από το TUC2 καθώς στον σχετικό στατικό εντοπισμό η ακρίβεια στον εντοπισμό είναι αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης μεταξύ βάσης και απρόσιτου σημείου.



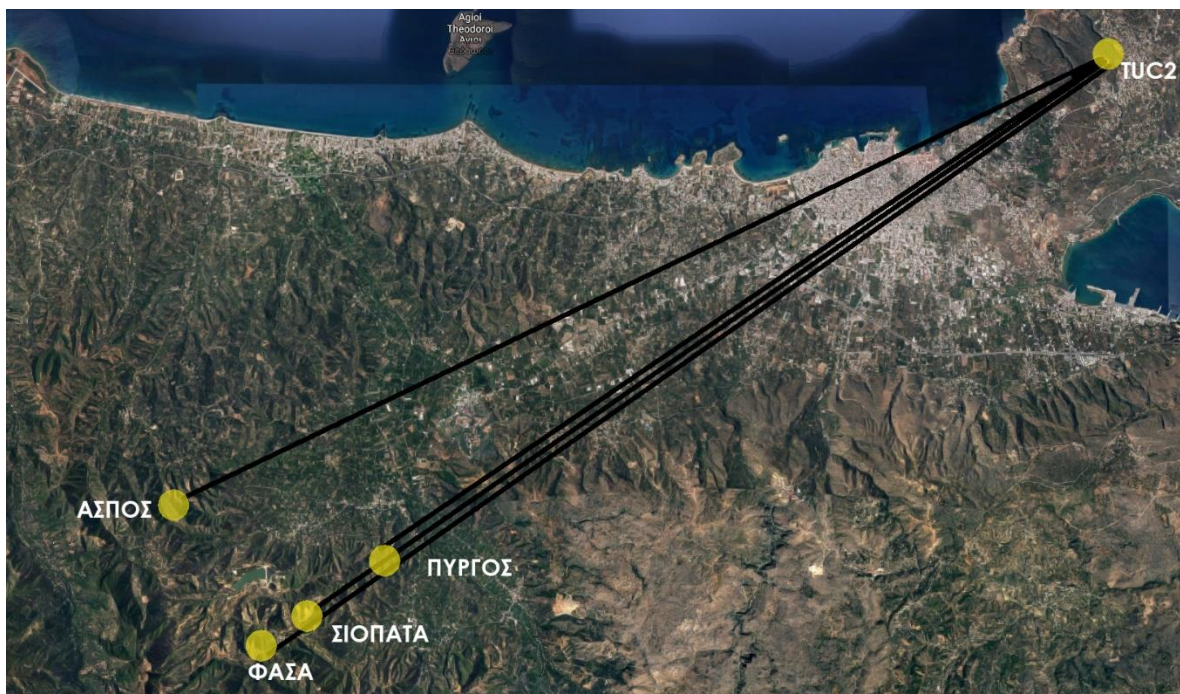
Σχήμα 7.10: Επίλυση του φράγματος ξεχωριστά από κάθε σημείο του γεωδαιτικού δικτύου.



Σχήμα 7.11: Συνολική επίλυση γεωδαιτικού δικτύου.

7.3.1 Επίλυση στο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς ΕΓΣΑ-87

Αρχικά πραγματοποιήθηκε έλεγχος των επίσημων συντεταγμένων της Γ.Υ.Σ. των τριγωνομετρικών σημείων στο ΕΓΣΑ-87 με την χρήση σχετικού στατικού εντοπισμού με GPS, χρησιμοποιώντας ως σημείο αναφοράς το TUC2 (εικόνα 7.12). Η συγκεκριμένη διαδικασία αποσκοπεί (1) στην ανίχνευση σφαλμάτων στις επίσημες συντεταγμένες των σημείων όπως έχουν εκδοθεί από την ΓΥΣ, καθώς και (2) την πιθανή μετακίνηση τους από την αρχική θέση εγκατάστασης.

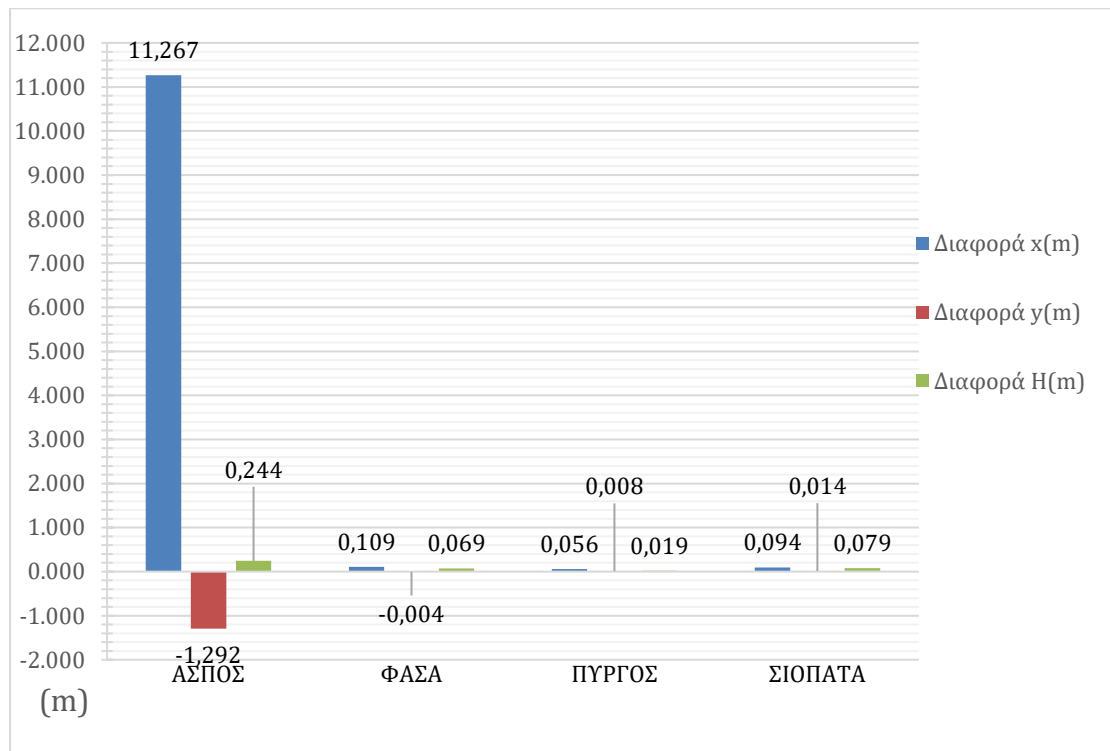


Σχήμα 7.12: Έλεγχος κορυφών δικτύου από TUC2 στο ΕΓΣΑ-87

Πίνακας 7-1: Αποτελέσματα ελέγχου των τριγωνομετρικών σημείων στο ΕΓΣΑ-87 χρησιμοποιώντας ως σημείο αναφοράς το TUC2.

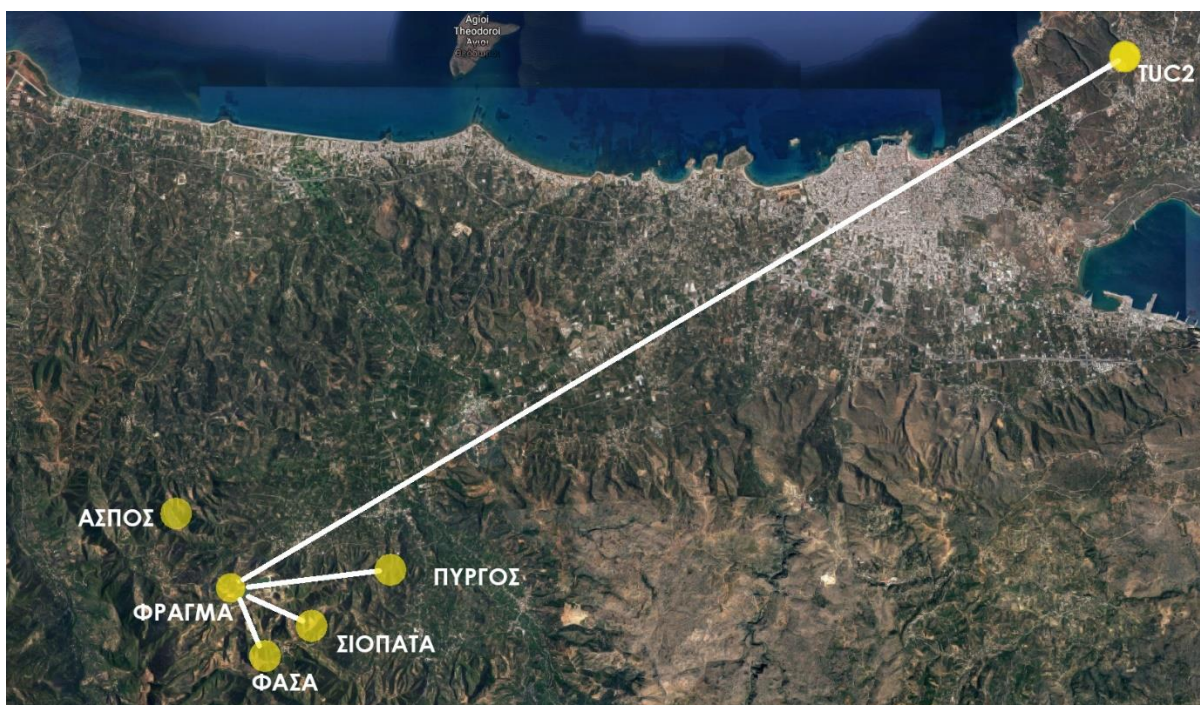
Σημείο	Αποτελέσματα επίλυσης			Αβεβαιότητα επίλυσης			Επίσημες Συντεταγμένες Γ.Υ.Σ		
	x (m)	y (m)	H (m) Ορθομετρικό υψόμετρο	Σx (m)	Σy (m)	ΣH (m)	x	y	H (m) Ορθομετρικό υψόμετρο
TUC2	506247,029	3931888,977	137,944						
ΑΙΣΠΟΣ	487798,934	3923009,191	354,988	0,028	0,025	0,046	487810,201	3923007,899	355,232
ΦΑΣΙΑ	489621,272	3920249,028	385,454	0,027	0,025	0,045	489621,381	3920249,024	385,523
ΠΥΡΓΟΣ	491992,639	3921896,827	189,245	0,028	0,025	0,046	491992,695	3921896,835	189,264
ΣΙΟΠΑΤΑ	490421,655	3920865,373	317,600	0,027	0,025	0,045	490421,749	3920865,387	317,679
ΦΡΑΓΜΑ	489608,047	3921508,944	207,074	0,027	0,025	0,045			

Όπως φαίνεται στα αποτελέσματα του ελέγχου (Σχήμα 7.13), καθώς και στο διάγραμμα που ακολουθεί το σημείο ΑΣΠΟΣ είχε μεγάλη απόκλιση λόγω προφανούς μετακίνησης του βάθρου και δεν χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό των συντεταγμένων του φράγματος. Τα υπόλοιπα σημεία δεν εμφάνισαν κάποια σημαντική απόκλιση και βρίσκονται μέσα στα αποδεκτά πλαίσια του σχετικού στατικού εντοπισμού.



Σχήμα 7.13:Αποκλίσεις των τριγωνομετρικών σημείων από την επίλυση της Γ.Υ.Σ.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την επίλυση του φράγματος χρησιμοποιώντας ως σημεία αναφοράς τα ελεγμένα τριγωνομετρικά σημεία Φάσα, Πύργος, Σιόπατα και έχοντας αποκλείσει το σημείο ΑΣΠΟΣ .



Σχήμα 7.14:Επίλυση του φράγματος από κάθε σημείο στο ΕΓΣΑ-87

Πίνακας 7-2: Επίλυση του φράγματος από κάθε σημείο σε ΕΓΣΑ-87

Σημεία	Αποτελέσματα επίλυσης			Αβεβαιότητα επίλυσης		
	x (m)	y (m)	H (m) Ορθομετρικό υψόμετρο	Σx (m)	Σy (m)	ΣH (m)
ΦΑΣΑ-ΦΡΑΓΜΑ	489608,156	3921508,939	207,143	0,007	0,008	0,011
ΠΥΡΓΟΣ-ΦΡΑΓΜΑ	489608,103	3921508,953	207,096	0,004	0,003	0,007
ΣΙΟΠΑΤΑ-ΦΡΑΓΜΑ	489608,141	3921508,958	207,153	0,002	0,002	0,003
TUC2-ΦΡΑΓΜΑ	489608,059	3921508,947	207,087	0,032	0,024	0,054

Οι επιλύσεις έχουν μικρές αποκλίσεις σαν απόλυτες διαφορές με την μέση τιμή της τάξης των τεσσάρων εκατοστών στο οριζόντιο και κατακόρυφο επίπεδο. Από την στατιστική ανάλυση και συγκεκριμένα από την τυπική απόκλιση έχουν αποκλίσεις την τάξη του εκατοστού.

Πίνακας 7-3: Μέσος όρος και τυπική απόκλιση συντεταγμένων φράγματος σε ΕΓΣΑ-87.

Σημείο	x (m)	y (m)	H (m) Ορθο- μετρικό υψόμετρο	$\sigma(x)$	$\sigma(y)$	$\sigma(H)$
ΦΡΑΓΜΑ	489608,128	3921508,950	207,127	0,046	0,008	0.034

Το επόμενο βήμα είναι να χρησιμοποιηθούν δύο σημεία εξάρτησης πραγματοποιώντας επίλυση γεωδαιτικού δικτύου, για την επίτευξη καλύτερης ακρίβειας στην επίλυση. Όπως προκύπτει και από τον πίνακα 7-4 χρησιμοποιήθηκαν τρία τρίγωνα τα οποία είχαν ως κοινό σημείο το φράγμα.



Σχήμα 7.15: Επίλυση τριγωνομετρικών δικτύων στο ΕΓΣΑ-87.

Πίνακας 7-4: Αποτελέσματα επίλυσης τριγωνομετρικών δικτύων σε ΕΓΣΑ-87.

Τρίγωνο	x (m)	y (m)	H (m) Ορθο- μετρικό υψόμε- τρο	Σx (m)	Σy (m)	ΣH (m)
ΦΑΣΑ-ΦΡΑΓΜΑ-TUC2	489608,153	3921508,932	207,135	0,006	0,006	0,012
ΠΥΡΓΟΣ-ΦΡΑΓΜΑ-TUC2	489608,111	3921508,950	207,098	0,002	0,002	0,004
ΣΙΟΠΑΤΑ-ΦΡΑΓΜΑ-TUC2	489608,142	3921508,953	207,158	0,002	0,002	0,003

Όπως στην επίλυση από κάθε σημείο του τριγωνομετρικού δικτύου έτσι και στην επίλυση με τρίγωνα οι τυπικές αποκλίσεις δείχνουν μικρές διαφορές από την μέση τιμή (πίνακας 7-5).

Πίνακας 7-5: Μέσος όρος συντεταγμένων και τυπική απόκλιση φράγματος με επίλυση τριγωνομετρικών δικτύων σε ΕΓΣΑ-87

Σημείο	x (m)	y (m)	H (m) Ορθο- μετρικό υψόμετρο	$\sigma(x)$	$\sigma(y)$	$\sigma(H)$
ΦΡΑΓΜΑ	489608,135	3921508,945	207,130	0,022	0,011	0,030

Στο τέλος της επεξεργασίας για το τοπικό γεωδαιτικό σύστημα ΕΓΣΑ-87 ελέγχθηκαν τα σφάλματα κλεισίματος (loop closure) των γεωδαιτικών δικτύων με αποκλίσεις ό-πως φαίνεται στον πίνακα 7-6 στο μήκος του τριγώνου κατά μέσο όρο 3 χιλιοστά.

Πίνακας 7-6:Κλείσιμο Βρόγχου.

Τρίγωνο	Μήκος τρι- γώνου (m)	Απόκλιση x (m)	Απόκλιση y (m)	Απόκλιση z (m)	Απόκλιση στο μήκος τριγώ- νου (m)
ΦΑΣΑ-ΦΡΑΓΜΑ-TUC2	41198,7135	0,002	0,0135	0,017	0,0225
ΠΥΡΓΟΣ-ΦΡΑΓΜΑ-TUC2	39452,031	0,001	-0,014	-0,004	0,015
ΣΙΟΠΑΤΑ-ΦΡΑΓΜΑ-TUC2	39958,998	-0,01	-0,026	-0,019	0,033

7.3.2 Επίλυση στο παγκόσμιο σύστημα αναφοράς WGS-84

Για την επίλυση του φράγματος στο παγκόσμιο γεωδαιτικό σύστημα WGS-84 αρχικά έγινε προσδιορισμός των καρτεσιανών συντεταγμένων του TUC2 για την περίοδο των μετρήσεων χρησιμοποιώντας τις συντεταγμένες καθώς και τις ταχύτητες μετακίνησης του σημείου σε ITRF2008 (πίνακας 7-7).

Πίνακας 7-7: Προσδιορισμός των καρτεσιανών συντεταγμένων του TUC2 στο ITRF-08 (WGS-84) για την περίοδο μετρήσεων.

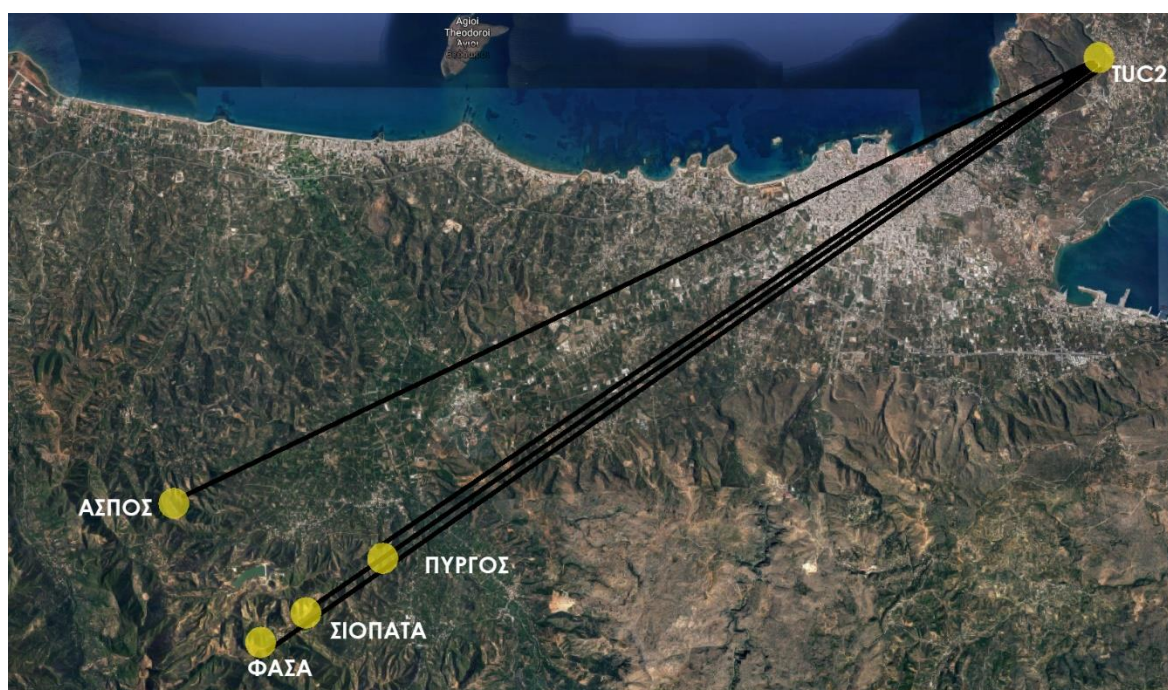
Σημείο	X (m)	Y (m)	Z (m)	VX (m/έτος)	VY (m/έτος)	VZ (m/έτος)	ΕΠΟΧΗ
TUC2	4744543,799	2119411,977	3686258,757	0,0030	0,0096	-0,0103	2013,5
	4744543,811	2119412,015	3686258,716				2017,5

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε μετατροπή των καρτεσιανών συντεταγμένων σε γεωδαιτικές συντεταγμένες.

Πίνακας 7-8: Μετατροπή των καρτεσιανών συντεταγμένων σε γεωδαιτικές

φ	λ	h (m) Γεωμετρικό υψόμετρο
24° 04' 14,01622"	35° 31' 59,48113"	160,920

Στην συνέχεια όπως και στο ΕΓΣΑ-87 έγινε επίλυση-προσδιορισμός των συντεταγμένων των τριγωνομετρικών σημείων στο WGS-84 χρησιμοποιώντας ως σημείο αναφοράς το TUC2 και υπολογισμός των συντεταγμένων του φράγματος με αρκετά καλές ακρίβειες στην επίλυση (πίνακας 7-9).



Σχήμα 7.16: Επίλυση-υπολογισμός συντεταγμένων τριγωνομετρικών σημείων στο WGS-84 από TUC2.

Πίνακας 7-9: Επίλυση-υπολογισμός των τριγωνομετρικών σημείων στο WGS-84

Σημείο	Αποτελέσματα επίλυσης				Ακρίβεια επίλυσης		
	φ	λ	h (m)	Γεωμετρικό υψόμετρο	Σx (m)	Σy (m)	Σh (m)
ΦΑΣΑ	23° 53' 14,32609"	35° 25' 41,53173"	406,773		0,027	0,025	0,045
ΠΥΡΓΟΣ	23° 54' 48,31484"	35° 26' 35,09765"	210,774		0,028	0,025	0,046
ΣΙΟΠΑΤΑ	23° 53' 46,04282"	35° 26' 01,56701"	338,995		0,027	0,025	0,045
ΦΡΑΓΜΑ	23° 53' 13,74477"	35° 26' 22,42873"	228,429		0,027	0,025	0,045

Μετά τον υπολογισμό των συντεταγμένων του τοπικού γεωδαιτικού δικτύου πραγματοποιήθηκε προσδιορισμός των συντεταγμένων του φράγματος τέσσερις φορές χρησιμοποιώντας ως σημεία αναφοράς τις κορυφές του δικτύου πίνακας 7-10.



Σχήμα 7.17: Επίλυση του φράγματος από κάθε σημείο στο WGS-84

Πίνακας 7-10: Επίλυση του φράγματος από κάθε σημείο στο WGS-84

Σημεία	Αποτελέσματα επίλυσης			Ακρίβεια επίλυσης		
	φ	λ	h (m) Γεω-μετρικό υψόμετρο	Σx (m)	Σy (m)	Σh (m)
ΦΑΣΑ-ΦΡΑΓΜΑ	23° 53' 13,74475"	35° 26' 22,42870"	228,393	0,007	0,008	0,012
ΠΥΡΓΟΣ-ΦΡΑΓΜΑ	23° 53' 13,74477"	35° 26' 22,42875"	228,430	0,004	0,003	0,007
ΣΙΟΠΑΤΑ-ΦΡΑΓΜΑ	23° 53' 13,74477"	35° 26' 22,42871"	228,396	0,002	0,002	0,003
TUC2-ΦΡΑΓΜΑ	23° 53' 13,74520"	35° 26' 22,42884"	228,408	0,032	0,024	0,054

Οι ακρίβειες που προέκυψαν ιδιαίτερα στο οριζόντιο επίπεδο ήταν πολύ καλές δεδομένου ότι όλες οι συντεταγμένες προέκυψαν άμεσα ή έμμεσα από τον μόνιμο σταθμό GPS TUC2. Αυτό φαίνεται και από τον πίνακα 7-11 όπου η τυπική απόκλιση πολύ μικρή στο οριζόντιο και κατακόρυφο επίπεδο. Γενικά λόγω του τρόπου προσδιορισμού της θέσης ενός σημείου από το GPS όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 5.2.4 οι οριζοντιογραφικές συντεταγμένες έχουν συνήθως καλύτερη ακρίβεια από το υψόμετρο.

Πίνακας 7-11: Μέσος όρος και τυπική απόκλιση συντεταγμένων φράγματος σε WGS-84

Σημείο	φ	λ	h (m) Γεωμετρικό υψόμετρο	$\sigma(\varphi)$	$\sigma(\lambda)$	$\sigma(h)$
ΦΡΑΓΜΑ	23° 53' 13,74479"	35° 26' 22,42873"	228,407	0,00024"	0,00007"	0,018"

Στην επίλυση με χρήση δύο σημείων αναφοράς οι συντεταγμένες για το φράγμα έχουν αποκλίσεις χιλιοστού ακόμα και στο υψόμετρο ως αποτέλεσμα της χρήσης σημείων με συντεταγμένες υψηλής ακρίβειας (πίνακας 7-12).



Σχήμα 7.18: Επίλυση τριγωνομετρικών δικτύων στο WGS-84.

Πίνακας 7-12: Επίλυση του φράγματος με τρίγωνο από το TUC2 και κάθε τριγωνομετρικό σημείο σε WGS-84

Τρίγωνο	Αποτελέσματα επίλυσης		Αβεβαιότητα επίλυσης			
	φ	λ	h (m) Γεωμετρικό υψόμετρο	Σx (m)	Σy (m)	Σh (m)
ΦΑΣΑ-ΦΡΑΓΜΑ-TUC2	23° 53' 13,74482"	35° 26' 22,42868"	228,395	0,006	0,006	0,007
ΠΥΡΓΟΣ-ΦΡΑΓΜΑ-TUC2	23° 53' 13,74475"	35° 26' 22,42874"	228,396	0,002	0,002	0,004
ΣΙΟΠΑΤΑ-ΦΡΑΓΜΑ-TUC2	23° 53' 13,74477"	35° 26' 22,42871"	228,396	0,002	0,002	0,003

Όπως φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί η επίλυση με τρίγωνα είναι ο καλύτερος τρόπος για την περαιτέρω αύξηση της ακρίβειας των μετρήσεων τόσο οριζοντιογραφικά όσο και υψομετρικά με την απόκλιση στο υψόμετρο έχει πέσει στην τάξη του χιλιοστού.

Πίνακας 7-13 Μέσος όρος συντεταγμένων και τυπική απόκλιση φράγματος με επίλυση τριγωνομετρικών δικτύων σε WGS-84

Σημείο	φ	λ	h (m) Γεωμετρικό υψόμετρο	$\sigma(\varphi)$	$\sigma(\lambda)$	$\sigma(h)$
ΦΡΑΓΜΑ	23° 53' 13,74479	35° 26' 22,42870	228,396	0,00004	0,00003	0,00058

Στο τέλος της επεξεργασίας για το Παγκόσμιο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς WGS-84 ελέγχθηκε το κλείσιμο των τριγώνων χωρίς να παρουσιάζεται κάποιο χονδροειδές σφάλμα ή μεγάλες αποκλίσεις στο μήκος των τριγώνων (πίνακας 7-14).

Πίνακας 7-14: Κλείσιμο Βρόγχου.

Τρίγωνο	Μήκος τριγώνου (m)	Απόκλιση x (m)	Απόκλιση y (m)	Απόκλιση z (m)	Απόκλιση στο μήκος τριγώνου (m)
ΦΑΣΑ-ΦΡΑΓΜΑ-TUC2	41198,714	-0,003	-0,014	-0,018	0,024
ΠΥΡΓΟΣ-ΦΡΑΓΜΑ-TUC2	39452,032	0,001	-0,014	-0,003	0,014
ΣΙΟΠΑΤΑ-ΦΡΑΓΜΑ-TUC2	39958,998	-0,01	-0,026	-0,02	0,034

7.3.3 Επίλυση στο Ελληνικό σύστημα αναφοράς HTRS-07

Για το HTRS-07 έγινε μετασχηματισμός των συντεταγμένων των τριγωνομετρικών σημείων και του TUC2 από το ΕΓΣΑ-87 (όπως έχουν προσδιοριστεί παραπάνω) με χρήση λογισμικού το οποίο διατίθεται ελεύθερα από τον Οργανισμό κτηματολογίου & χαρτογραφίσεων Ελλάδος (ΕΚΧΕ) (<http://www.hepos.gr/?Lang=GR>) και προέκυψαν οι συντεταγμένες του πίνακα 7-15.

Πίνακας 7-15: Μετασχηματισμός από το ΕΓΣΑ-87 στο HTRS-07

Σημείο	x (m)	y (m)	H (m) Ορθομετρικό υψόμετρο
TUC2	506396,198	1932176,300	137,944
ASPOS	487959,326	1923295,365	355,232
FASA	489770,497	1920536,491	385,523
PYRGOS	492141,810	1922184,305	189,264
SIOPATA	490570,863	1921152,855	317,679

Στη συνέχεια όπως για υπόλοιπα συστήματα έτσι και για το Ελληνικό γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς HTRS-07 πραγματοποιήθηκε επίλυση του φράγματος από κάθε σημείο του δικτύου ξεχωριστά (πίνακας 7-16).



Σχήμα 7.19: Επίλυση του φράγματος από κάθε σημείο στο HTRS-07

Πίνακας 7-16: Επίλυση του φράγματος από κάθε σημείο στο HTRS-07

Αποτελέσματα επίλυσης				Ακρίβεια επίλυσης		
Σημεία	x (m)	y (m)	H (m)	σ (x)	σ (y)	σ (H)
			Ορθομετρικό υψόμετρο			
ΦΑΣΑ-ΦΡΑΓΜΑ	489757,278	1921796,410	207,144	0,007	0,009	0,010
ΠΥΡΓΟΣ-ΦΡΑΓΜΑ	489757,225	1921796,423	207,095	0,004	0,003	0,007
ΣΙΟΠΑΤΑ-ΦΡΑΓΜΑ	489757,260	1921796,429	207,128	0,002	0,002	0,003
TUC2-ΦΡΑΓΜΑ	489757,275	1921796,298	207,086	0,032	0,024	0,053

Λόγο ότι οι συντεταγμένες του HTRS-07 έχουν προκύψει από μετατροπή των ΕΓΣΑ-87 είναι προφανές ότι θα έχουμε μεταφέρει και περίπου τις ίδιες αποκλίσεις όπως φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 7-17: Μέσος όρος και τυπική απόκλιση συντεταγμένων φράγματος σε HTRS-07

Σημείο	x (m)	y (m)	H (m) Ορθομε- τρικό υψόμε- τρο	σ (x)	σ (y)	σ (H)
ΦΡΑΓΜΑ	489757,255	1921796,413	207,120	0,025	0,067	0,028

Στη συνέχεια για την απόκτηση συντεταγμένων μεγαλύτερης ακρίβειας χρησιμοποιήθηκαν δύο σημεία αναφοράς με το ένα να είναι πάντα το TUC2 και το δεύτερο τα Φάσα, Πύργος και Σιόπατα αντίστοιχα. Οι ακρίβειες και σε αυτή την επίλυση ήταν τάξης του εκατοστού (πίνακας 7-18). Επίσης δεν υπήρξε μεγάλη διαφορά στην ακρίβεια με την χρήση δύο σημείων εξάρτησης σε σχέση με το ένα σημείο.



Σχήμα 7.20: Επίλυση τριγωνομετρικών δικτύων στο HTRS-07

Πίνακας 7-18: Επίλυση του φράγματος με τρίγωνο από το TUC2 και κάθε τριγωνομετρικό σημείο στο HTRS-07

Τρίγωνο	Αποτελέσματα επίλυσης				Αβεβαιότητα επίλυσης		
	x (m)	y (m)	H (m)	Ορθομετρικό υψόμετρο	Σx (m)	Σy (m)	ΣH (m)
ΦΑΣΑ-ΦΡΑΓΜΑ-TUC2	489757,283	1921796,404		207,134	0,005	0,006	0,012
ΠΥΡΓΟΣ-ΦΡΑΓΜΑ-TUC2	489757,227	1921796,441		207,097	0,002	0,002	0,004
ΣΙΟΠΑΤΑ-ΦΡΑΓΜΑ-TUC2	489757,266	1921796,431		207,157	0,002	0,002	0,003

Πίνακας 7-19: Μέσος όρος συντεταγμένων και τυπική απόκλιση φράγματος με επίλυση τριγωνομετρικών δικτύων σε HTRS-07

Σημείο	x (m)	y (m)	H (m)	Ορθο-	σ (x)	σ (y)	σ (H)
			μετρικό υψόμετρο				
ΦΡΑΓΜΑ	489757,259	1921796,425	207,130		0,029	0,019	0,030

Τέλος η χρήση της εντολής κλείσιμο βρόγχου δεν έδειξε κάποια σημαντική απόκλιση (πίνακας 7-20) στην επίλυση με τριγωνισμό που πραγματοποιήθηκε στο προηγούμενο βήμα.

Πίνακας 7-20: Κλείσιμο Βρόγχου.

Τρίγωνο	Μήκος τριγώνου (m)	Απόκλιση x (m)	Απόκλιση y (m)	Απόκλιση z (m)	Απόκλιση στο μήκος τριγώ- νου (m)
ΦΑΣΑ-ΦΡΑΓΜΑ-TUC2	41198,71	0,0035	0,014	0,0185	0,024
ΠΥΡΓΟΣ-ΦΡΑΓΜΑ-TUC2	39452,03	0,001	-0,014	-0,003	0,014
ΣΙΟΠΑΤΑ-ΦΡΑΓΜΑ-TUC2	39958,998	-0,01	-0,026	-0,019	0,033

Από την επεξεργασία των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στο φράγμα Βαλσαμιώτη προσδιορίστηκαν οι συντεταγμένες του με δύο μεθοδολογίες για κάθε ένα από τα γεωδαιτικά συστήματα αναφοράς όπως παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Προκυμμένου η παρούσα διπλωματική να εκπληρώσει τον σκοπό της θα πρέπει να δοθούν οι τελικές συντεταγμένες για το φράγμα σε κάθε σύστημα. Έτσι επιλέχθηκε οι τελικές συντεταγμένες να είναι ο μέσος όρος από τις δύο μεθοδολογίες και προέκυψαν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

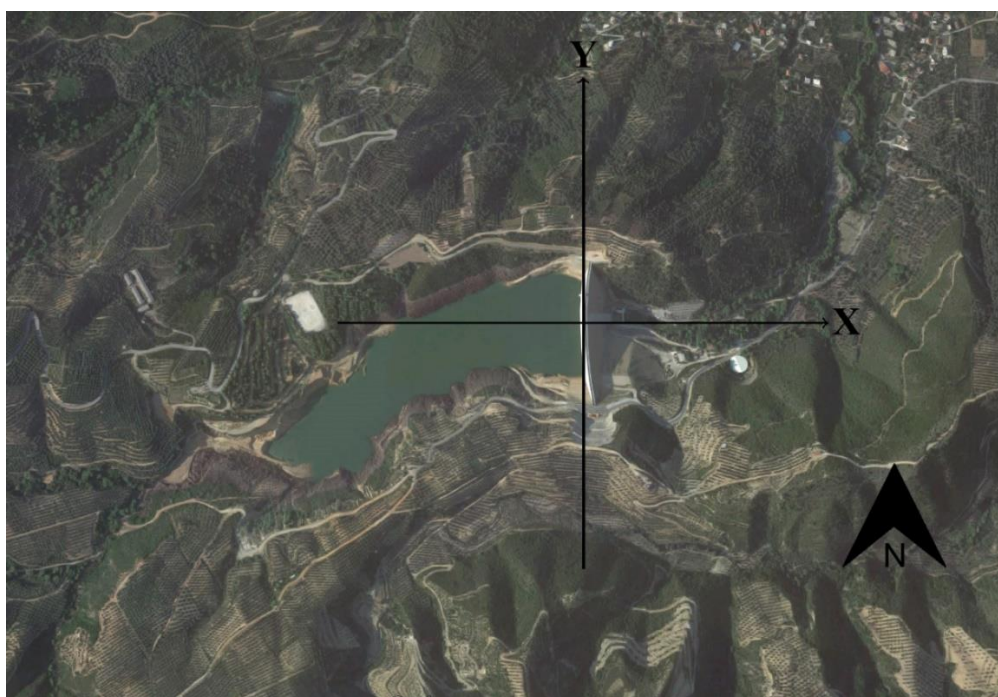
Πίνακας 7-21: Τελικές συντεταγμένες φράγματος Βαλσαμιώτη.

ΕΓΣΑ-87			
Σημείο	x(m)	y(m)	H(m) Ορθομετρικό υψόμετρο
Φράγμα	489608,132	3921508,948	207,129
WGS-84			
Σημείο	φ	λ	h(m) Γεωμετρικό υψόμετρο
Φράγμα	23° 53' 13,74479"	35° 26' 22,42872"	228,402
HTRS-07			
Σημείο	x(m)	y(m)	H(m) Ορθομετρικό υψόμετρο
Φράγμα	489757,257	1921796,419	207,125

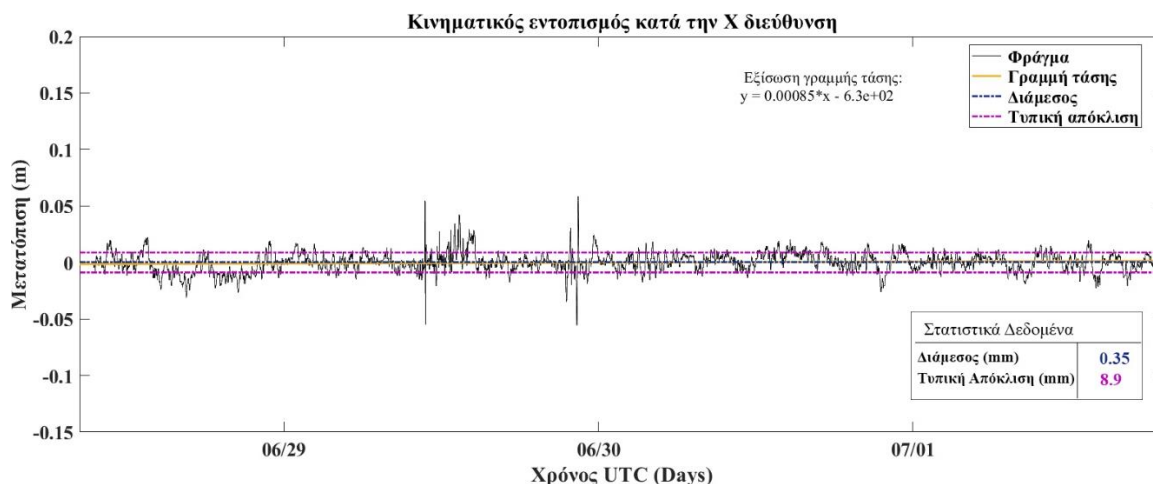
7.4 Επίλυση με κινηματικό εντοπισμό

Εκτός από την επίλυση με σχετικό στατικό προσδιορισμό έγινε και κινηματικός εντοπισμός του φράγματος Βαλσαμιώτη. Η χρήση κινηματικού εντοπισμού είναι πολύ σημαντική και ιδιαίτερα σε ένα τεχνικό έργο όπως το φράγμα καθώς μας δίνει τη δυνατότητα να παρακολουθούμε σε πραγματικό ή σχεδόν πραγματικό χρόνο την κινηματική του συμπεριφορά με οριζοντιογραφική ακρίβεια $1\text{cm} + 2\text{ppm}$ και κατακόρυφη $2\text{cm} + 2\text{ppm}$. Η προτεινόμενη απόσταση για καλύτερη ακρίβεια στις μετρήσεις είναι περίπου 10 χιλιόμετρα με μέγιστη τα 40 χιλιόμετρα. Στην παρούσα εργασία προτείνεται ένα τέτοιο σύστημα συνεχούς παρακολούθησης οπότε η παρουσίασή του κρίνεται απαραίτητη.

Οι μετρήσεις ξεκίνησαν στις 28 Ιουνίου 2017 και διήρκησαν τρεις ημέρες μέχρι τη 1 Ιουλίου 2017. Χρησιμοποιήθηκε ο δέκτης GPS Smart 6200 δύο συχνοτήτων με διάστημα δειγματοληψίας 30 δευτερόλεπτα και η επίλυση έγινε χρησιμοποιώντας ως σημείο αναφοράς τον μόνιμο σταθμό GPS TUC2. Το σύστημα αναφοράς που χρησιμοποιήθηκε είναι το ΕΓΣΑ-87. Στη συνέχεια θα γίνει παρουσίαση σχημάτων με τις μετατοπίσεις όπως προέκυψαν από τον κινηματικό εντοπισμό κατά τις X, Y διευθύνσεις και στο υψόμετρο με χρήση φίλτρου διαμέσου τιμής με σκοπό την μείωση θορύβου και τυχαίων σφαλμάτων.

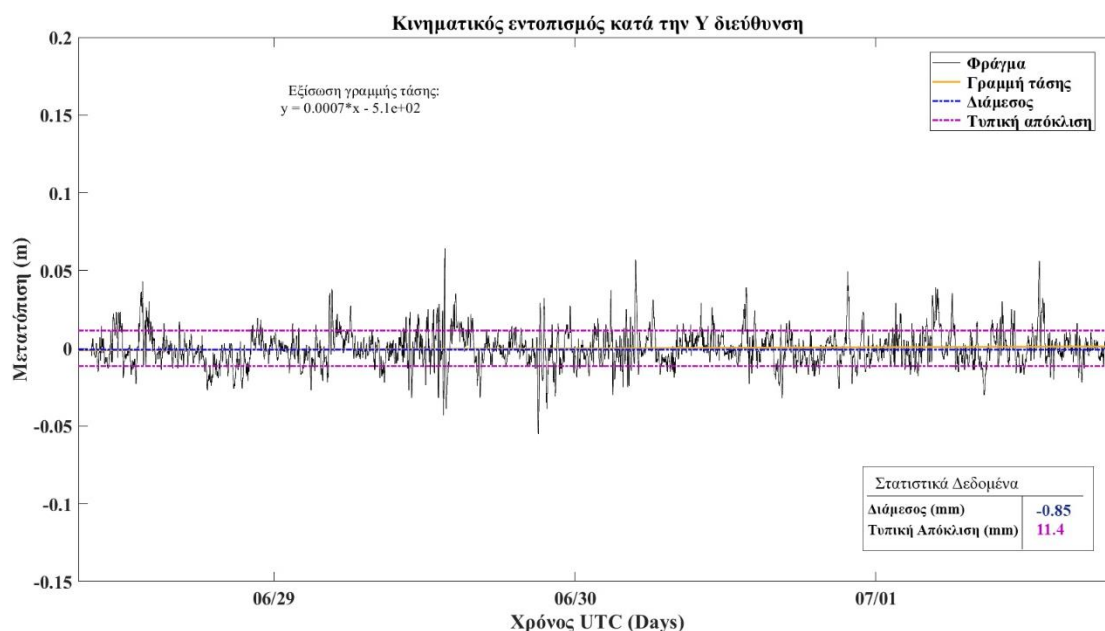


Σχήμα 7.21: Διευθύνσεις μετακίνησης X, Y.



Σχήμα 7.22: Μετατόπιση του φράγματος Βαλσαμιώτη στη Χ διεύθυνση.

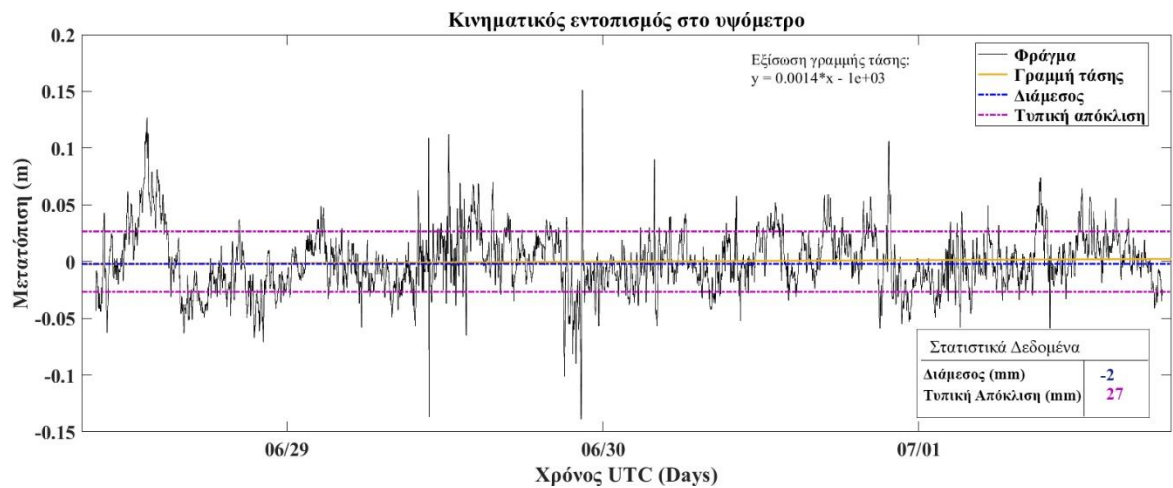
Η μετατόπιση που παρουσίασε το σώμα του φράγματος στην Χ διεύθυνση κατά την διάρκεια των μετρήσεων ήταν πολύ μικρές με την μέση τιμή να φτάνει τα 0,35 χιλιοστά, τυπική απόκλιση 8,9 χιλιοστά και η γραμμή τάσης σχεδόν ευθεία. Δεν αναμένονται να φανούν μεγάλες μετατοπίσεις στην στέψη λόγω της φύσης του φράγματος που όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3 δεν παρουσιάζουν τα φράγματα από σκληρό επίχωμα παραμορφώσεις στην στέψη.



Σχήμα 7.23: Μετατόπιση του φράγματος Βαλσαμιώτη κατά τον y άξονα.

Στο σχήμα 7.23 η μετατόπιση κατά την y διεύθυνση όπως και κατά την x είναι κατά μέσο όρο 0,85 χιλιοστά και τυπική απόκλιση 11,4 χιλιοστά. Ενώ στο σχήμα 7.24 το υψόμετρο εμφανίζεται να έχει μεγαλύτερη διακύμανση με μέσο όρο τα δύο χιλιοστά

και τυπική απόκλιση 27 χιλιοστά. Μπορούμε να υποθέσουμε πως για τη μεγαλύτερη διακύμανση να ευθύνεται η ακρίβεια του συστήματος GPS για τα υψόμετρα.



Σχήμα 7.24: Μετατόπιση του φράγματος Βαλσαμιώτη στο υψόμετρο.

Κεφάλαιο 8

Συμπεράσματα – προτάσεις

Οι γεωδαιτικές μέθοδοι παρακολούθησης φράγμάτων χρησιμοποιούνται στη μελέτη της κινηματικής συμπεριφοράς τόσο για το ίδιο το σώμα του φράγματος όσο και για την ευρύτερη περιοχή, έτσι ώστε να εκτιμώνται συνολικά οι γεωλογικές και τεκτονικές μεταβολές. Οι μέθοδοι αυτές είναι αξιόπιστες, γρήγορες και ακριβείς.

Κατά την διάρκεια της επεξεργασίας και τον έλεγχο των σημείων του τοπικού γεωδαιτικού δικτύου το σημείο Ασπός έδειξε μεγάλη μετατόπιση με σχέση με τα επίσημα στοιχεία της Γ.Υ.Σ με αποτέλεσμα να μην συμπεριληφθεί στο δίκτυο.

Οι ακρίβεια στον υπολογισμό των συντεταγμένων του φράγματος ήταν αρκετά καλές και έφταναν στα όρια της ακρίβειας της μεθόδου του σχετικού στατικού εντοπισμού.

Πραγματοποιήθηκε προσδιορισμός των συντεταγμένων του κύριου βάθρου στο φράγμα με απόλυτες συντεταγμένες ως προς το κέντρο μάζας της Γης.

Όπως προέκυψε από τα αποτελέσματα του κινηματικού εντοπισμού το κύριο βάθρο παρακολούθησης του φράγματος δεν παρουσιάζει μετακινήσεις.

Το αντικείμενο και τα αποτελέσματα της διπλωματικής αφορούν άμεσα τον ανάδοχο του έργου. Ο Οργανισμός Ανάπτυξης Κρήτης μπορεί με τη χρήση των αποτελεσμάτων να γνωρίζει με αμερόληπτα και αδιαμφισβήτητα στοιχεία ότι οποιεσδήποτε μετρήσεις – παρατηρήσεις γίνονται στο φράγμα είναι ανεξάρτητες από οποιαδήποτε άλλη γεωφυσική και γεωτεκτονική διεργασία που συνδέεται με την περιοχή.

Για την βελτίωση της ακρίβειας των μετρήσεων θα μπορούσε να δημιουργηθεί ένα δίκτυο με περισσότερα σημεία και γεωμετρία κατάλληλη ώστε να ανιχνεύει μετακινήσεις του φράγματος κατά την κάθετη και την παράλληλη διεύθυνση όπως παρουσιάζονται στο σχήμα 8.1.



Σχήμα 8.1:Προτεινόμενη γεωμετρία βάθρων για την παρακολούθηση του φράγματος Βαλσαμιώτη.

Η διπλωματική δεν κατάφερε να δημιουργήσει ένα σύστημα για την συνεχή και αυτόματη παρακολούθηση των μικρο-μετακινήσεων του φράγματος. Τα στοιχεία όμως που προέκυψαν και αναλύθηκαν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βάση για την ανάπτυξη ενός συστήματος, το οποίο σε πραγματικό χρόνο θα λαμβάνει μετρήσεις, θα τις επεξεργάζεται και θα έχει τη δυνατότητα για αυτόματη ειδοποίηση για μετακινήσεις μεγαλύτερες των επιτρεπόμενων ορίων.

Στον Οργανισμό Ανάπτυξης Κρήτης (ΟΑΚ) προτείνεται να ακολουθεί τακτικούς ελέγχους των συντεταγμένων των γεωτεκτονικών παραμορφώσεων στην περιοχή του φράγματος, προκειμένου όλες οι γεωδαιτικές μετρήσεις που γίνονται να έχουν ως θεμέλιο ένα σημείο αναφοράς που θα είναι ανεξάρτητο από τις τοπικές συνθήκες της περιοχής και του ίδιου του φράγματος.

Για την βελτίωση της ακρίβειας και μεθοδολογίας παρακολούθησης των παραμορφώσεων του φράγματος μπορεί να γίνει χρήση των συστημάτων επίγειας σάρωσης (Terrestrial Laser scanners) και επίγειας Συμβολομετρίας radar (GBInSAR)

Βιβλιογραφία

- Αραμπατζής Γαρ. - Πολύζος Σ. (2008) Φυσικοί Πόροι, Περιβάλλον & Ανάπτυξη
- Βέης, Γ. (1989) "Ελληνικό γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς 1987 (ΕΓΣΑ 1987)", Έκθεση προς τον Οργανισμό κτηματολογίου και Χαρτογραφίσεων Ελλάδας
- Δερμάνης, Α., (1999). Διαστημική Γεωδαισία και Γεωδυναμική -GPS. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο ΕΜΠ (2007) Εισαγωγή στη Γεωδαισία
- Ελληνική Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων http://www.eeft.gr/Fragmata_Elladas_201311.pdf
- Μαραγκός Χρ., (1997), Τεχνικά Έργα Υποδομής – Κατασκευές στην επιφάνεια του βράχου, Υπόγειες κατασκευές Φράγματα
- Μερτίκας Σ., Π. (2016), Εισαγωγή στη Γεωδαισία τον Δορυφορικό Εντοπισμό και την Αλτιμετρία, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, ISBN 978-960-461-721-0.
- Μερτίκας Σ., Π. (2002), Εισαγωγή στη Γεωδαισία και τον Δορυφορικό Εντοπισμό, Πολυτεχνείο Κρήτης, Εργαστήριο Γεωδαισίας και Γεωπληροφορικής, 5 Οκτωβρίου 2012.
- Οριστική μελέτη φραγμάτων Αλικιανού-Βαλσαμιώτη νομού Χανίων, Τεχνικές Προδιαγραφές (1993)
- Πανταζής Γ., Ευαγγελία Λάμπρου (2010), Εφαρμοσμένη γεωδαισία, Εκδόσεις Ζήτη, ISBN 9604562053
- Ρόζος Δημ., (2007), Τεχνική Γεωλογία II, Τομέας Γεωλογικών Επιστημών, Σχολή Μηχ. Μεταλλείων - Μεταλλουργών, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- Τσόγκας Ε. Χ., Τσόγκα Χ. Ε. (2009), Υδροδυναμικά Έργα – ΦΡΑΓΜΑΤΑ, Εκδόσεις ΙΩΝ EUREF Permanent Network (EPN) <http://www.epncb.oma.be>
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Collins, J. (2008). Global Positioning System Theory and Practice. Springer-Verlag Wien 2008.
- International Earth Rotation and Reference Systems Service. <https://www.iers.org>
- Katsampalos Konstantinos-Vasileios, Kotsakis Christoforos, Gianniou M (2009). Hellenic Terrestrial Reference System 2007 (HTRS07): a regional realization of ETRS89 over Greece in support of HEPOS. 2009 EUREF Symposium, Presentation. Florence.
- Niell, A. E. (1996), Global Mapping Functions for the Atmosphere Delay at Radio Wavelengths, Journal of Geophysical Research, 101(B2), pp. 3227–3246.
- Parkinson B., T. Stansell, R. Beard, K. Gromov 1995. «A History of Satellite Navigation. NAVIGATION: Journal of Institute of Navigation», Vol. 42, No 1 Special Issue, pp. 109-164.
- Terzaghi C. (1925), Principles of Soil Mechanics: IV – Settlement and Consolidation of Clay. https://en.wikipedia.org/wiki/BeiDou_Navigation_Satellite_System
- <https://www.gsa.europa.eu>
- Spectra precision** <http://www.spectraprecision.com/eng/gnss-solutions.html>
- USGS** <https://water.usgs.gov/osw/gps/>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Έντυπα πεδίου



ΦΥΛΛΟ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΠΕΔΙΟΥ GPS

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 28/06/2017-01/7/2017	ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΤΡΗΣΗΣ: ΦΡΑΓΜΑ
ΟΝΟΜΑ ΣΤΑΘΜΟΥ: FRAGMA	ΚΩΔΙΚΟΣ (4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΕΣ): FRAG
ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΣ: Δ. ΧΑΡΔΑΛΟΥΠΑΣ	S/N: 0330005
ΔΕΚΤΗΣ: SMART 6200	S/N ΚΕΡΑΙΑΣ: 01017575
ΚΕΡΑΙΑ: LEICA AX 1202 GG	ΥΨΟΣ ΚΕΡΑΙΑΣ (m): 0.078
ΕΝΑΡΞΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ (UTC TIME): 06:30	ΤΕΛΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ (UTC TIME): 20:00
ΔΙΑΣΤΗΜΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ (sec): 30	ΟΝΟΜΑ ΑΡΧΕΙΟΥ:

Χάρτες



Φωτογραφία σημείου



ΦΥΛΛΟ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΠΕΔΙΟΥ GPS

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 07/07/2017	ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΤΡΗΣΗΣ: ΦΡΑΓΜΑ
ΟΝΟΜΑ ΣΤΑΘΜΟΥ: FRAGMA	ΚΩΔΙΚΟΣ (4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΕΣ): FRAG
ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΣ: Δ. ΧΑΡΔΑΛΟΥΠΑΣ	S/N: 0330005
ΔΕΚΤΗΣ: SMART 6200	S/N ΚΕΡΑΙΑΣ: 01017575
ΚΕΡΑΙΑ: LEICA AX 1202 GG	ΥΨΟΣ ΚΕΡΑΙΑΣ (m): 0.079
ΕΝΑΡΞΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ (UTC TIME): 09:02	ΤΕΛΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ (UTC TIME): 20:15
ΔΙΑΣΤΗΜΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ (sec): 2	ΟΝΟΜΑ ΑΡΧΕΙΟΥ:

Χάρτες



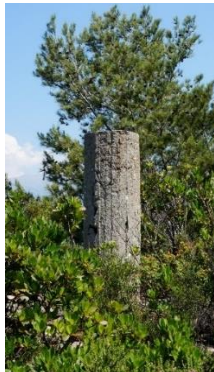
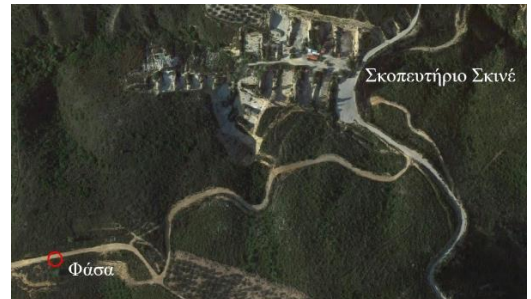
Φωτογραφία σημείου



ΦΥΛΛΟ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΠΕΔΙΟΥ GPS

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 07/07/2017	ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΤΡΗΣΗΣ: ΒΑΤΟΛΑΚΚΟΣ
ΟΝΟΜΑ ΣΤΑΘΜΟΥ: ΦΑΣΑ	ΚΩΔΙΚΟΣ (4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΕΣ): FASA
ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΣ: Δ. ΧΑΡΔΑΛΟΥΠΙΑΣ	S/N: 004704
ΔΕΚΤΗΣ: Magellan Promark 500	S/N ΚΕΡΑΙΑΣ: 16296
ΚΕΡΑΙΑ: NOV600	ΥΨΟΣ ΚΕΡΑΙΑΣ (m): 0,0328
ΕΝΑΡΞΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ (UTC TIME): 09:43	ΤΕΛΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ (UTC TIME): 11:41
ΔΙΑΣΤΗΜΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ (sec): 2	ΟΝΟΜΑ ΑΡΧΕΙΟΥ: AA01

Χάρτες



Φωτογραφία σημείου



Συντεταγμένες
τριγωνομετρικού
σημείου
(35.4282,23.8873)



ΦΥΛΛΟ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΠΕΔΙΟΥ GPS

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 07/07/2017	ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΤΡΗΣΗΣ: ΒΑΤΟΛΑΚΚΟΣ
ΟΝΟΜΑ ΣΤΑΘΜΟΥ: ΣΙΟΠΑΤΑ	ΚΩΔΙΚΟΣ (4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΕΣ): ΣΙΟΡ
ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΣ: Δ. ΧΑΡΔΑΛΟΥΠΙΑΣ	S/N: 004704
ΔΕΚΤΗΣ: Magellan Promark 500	S/N ΚΕΡΑΙΑΣ: 16296
ΚΕΡΑΙΑ: NOV600	ΥΨΟΣ ΚΕΡΑΙΑΣ (m): 0,0328
ΕΝΑΡΞΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ (UTC TIME): 11:58	ΤΕΛΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ (UTC TIME): 13:50
ΔΙΑΣΤΗΜΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ (sec): 2	ΟΝΟΜΑ ΑΡΧΕΙΟΥ: AA02

Χάρτες



Φωτογραφία σημείου

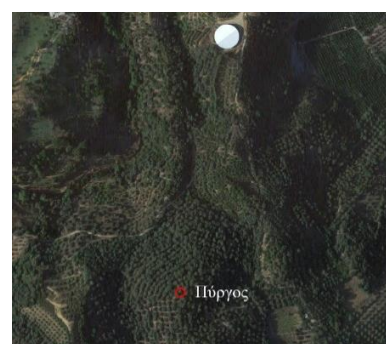
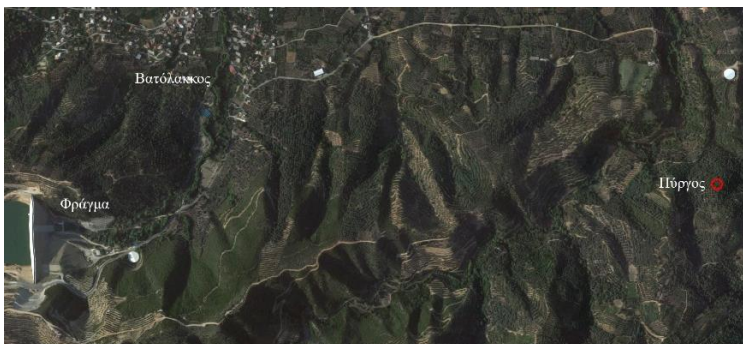
Συντεταγμένες
τριγωνομετρικού
σημείου (35.4338,23.8961)



ΦΥΛΛΟ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΠΕΔΙΟΥ GPS

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 07/07/2017	ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΤΡΗΣΗΣ: ΒΑΤΟΛΑΚΚΟΣ
ΟΝΟΜΑ ΣΤΑΘΜΟΥ: ΠΥΡΓΟΣ	ΚΩΔΙΚΟΣ (4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΕΣ): PYRG
ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΣ: Δ. ΧΑΡΔΑΛΟΥΠΙΑΣ	S/N: 004704
ΔΕΚΤΗΣ: Magellan Promark 500	S/N ΚΕΡΑΙΑΣ: 16296
ΚΕΡΑΙΑ: NOV600	ΥΨΟΣ ΚΕΡΑΙΑΣ (m): 0,0328
ΕΝΑΡΞΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ (UTC TIME): 14:14	ΤΕΛΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ (UTC TIME): 16:07
ΔΙΑΣΤΗΜΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ (sec): 2	ΟΝΟΜΑ ΑΡΧΕΙΟΥ: AA03

Χάρτες



Φωτογραφία σημείου



Θέα από το σημείο

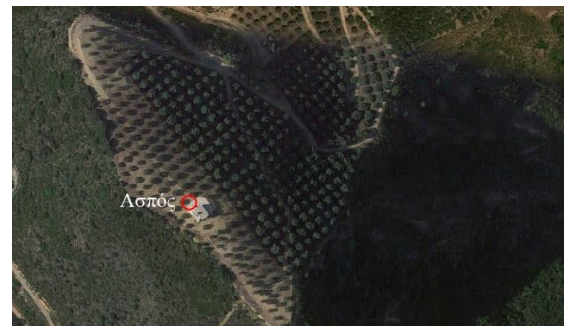
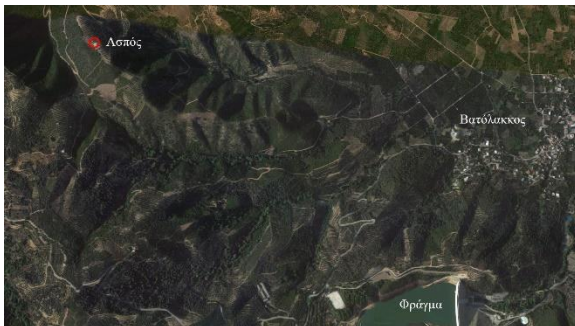
Συντεταγμένες
τριγωνομετρικού
σημείου
(35.4431,23.9134)



ΦΥΛΛΟ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΠΕΔΙΟΥ GPS

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 07/07/2017	ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΤΡΗΣΗΣ: ΒΑΤΟΛΑΚΚΟΣ
ΟΝΟΜΑ ΣΤΑΘΜΟΥ: ΑΣΠΟΣ	ΚΩΔΙΚΟΣ (4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΕΣ): ASPO
ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΣ: Δ. ΧΑΡΔΑΛΟΥΠΙΑΣ	S/N: 004704
ΔΕΚΤΗΣ: Magellan Promark 500	S/N ΚΕΡΑΙΑΣ: 16296
ΚΕΡΑΙΑ: NOV600	ΥΨΟΣ ΚΕΡΑΙΑΣ (m): 0.0328
ΕΝΑΡΞΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ (UTC TIME): 16:52	ΤΕΛΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ (UTC TIME): 19:46
ΔΙΑΣΤΗΜΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ (sec): 2	ΟΝΟΜΑ ΑΡΧΕΙΟΥ: AA04

Χάρτες



Φωτογραφία σημείου



Συντεταγμένες
τριγωνομετρικού
σημείου
(35.4531, 23.8673)