



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
UNIVERSITY OF WEST ATTICA

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Τίτλος εργασίας

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΧΑΡΤΩΝ ΑΝΩΜΑΛΙΩΝ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ
ΑΤΤΙΚΗ

Αντωνόπουλος Χαράλαμπος

A.M. 11005

Επιβλέπων Καθηγητής: Ανδριτσάνος Βασίλειος

Μέλη εξεταστικής επιτροπής

Β. Παγούνης	Γ. Χλούπης
-------------	------------

Αθήνα, 2021

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Αντωνόπουλος Χαράλαμπος του Γεωργίου, με αριθμό μητρώου 11005 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανικών Τοπογραφίας και Γεωπληροφορικής, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής/διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών
ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΣ ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	6
1.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	6
1.2	ΣΤΟΧΟΙ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	8
1.3	ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	9
2	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	10
2.1	ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ	10
2.1.1	ΒΑΡΥΤΙΚΗ ΕΛΞΗ – ΠΕΔΙΟ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ	10
2.1.2	ΓΗΙΝΗ ΕΛΞΗ – ΓΗΙΝΟ ΠΕΔΙΟ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ	12
2.2	ΓΕΩΕΙΔΕΣ	14
2.3	ΥΨΟΜΕΤΡΑ	15
2.3.1	ΟΡΘΟΜΕΤΡΙΚΑ ΥΨΟΜΕΤΡΑ	15
2.3.2	ΚΑΝΟΝΙΚΑ ΥΨΟΜΕΤΡΑ	16
2.3.3	ΔΥΝΑΜΙΚΑ ΥΨΟΜΕΤΡΑ	18
2.4	ΓΕΩΕΙΔΕΣ – ΣΧΕΔΟΝ ΓΕΩΕΙΔΕΣ – ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΜΕΝΟ ΓΕΩΕΙΔΕΣ	18
2.5	Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΓΗΣ.	19
2.6	ΒΑΡΥΤΗΜΕΤΡΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ	22
2.6.1	ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΒΑΡΥΤΗΜΕΤΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	22
2.6.2	ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ	22
2.6.3	ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΒΑΡΥΤΗΜΕΤΡΩΝ	24
2.7	ΣΥΓΧΡΟΝΑ ΒΑΡΥΤΗΜΕΤΡΑ – ΤΡΟΠΟΣ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	38
2.7.1	ΒΑΡΥΤΗΜΕΤΡΑ LACOSTE-ROMBERG MODEL-G ΚΑΙ -D	38
2.7.2	SCINTREX CG5	42
2.7.3	ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	50
2.7.4	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	50
2.8	ΔΙΟΡΘΩΣΕΙΣ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ	52
2.8.1	ΥΛΙΚΟ ΠΑΡΕΜΒΟΛΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΣΗΜΕΙΟΥ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΣΗΜΕΙΟΥ ΑΝΑΦΟΡΑΣ	53
2.8.2	ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑ	54

2.9	ΑΝΩΜΑΛΙΕΣ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ	56
2.9.1	ΕΙΔΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΑΝΩΜΑΛΙΕΣ BOUGUER	57
3	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΥΣΤΗΜΑ GPS	58
3.1	ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ GPS	58
3.2	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑ ΤΩΝ GPS	58
3.3	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ	59
3.3.1	ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	61
3.3.2	ΣΧΕΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ	62
3.3.3	ΣΧΕΤΙΚΟΣ ΣΤΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ	62
4	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΠΕΔΙΟΥ	64
4.1	ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	64
4.2	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΕΔΙΟΥ	65
4.3	ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΕ	65
4.3.1	ΔΕΚΤΗΣ GPS	65
4.3.2	ΒΑΡΥΤΗΜΕΤΡΟ SCINTREX CG5	66
4.4	ΧΡΟΝΟΔΙΑΓΡΑΜΜΑ	68
5	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	70
5.1	ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ GPS ΚΑΙ ΕΠΙΛΥΣΗ	70
5.2	ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΒΑΡΥΤΗΜΕΤΡΟΥ ΚΑΙ ΕΠΙΛΥΣΗ	71
5.2.1	ΣΥΝΟΡΘΩΣΗ ΒΑΡΥΤΗΜΕΤΡΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ	71
5.2.2	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΝΩΜΑΛΙΩΝ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ	71
5.3	ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΧΑΡΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ SURFER	75
6	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	86
6.1	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	86
6.2	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	87
7	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	88
7.1	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΕΙΚΟΝΕΣ ΑΠΟ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΕΔΙΟΥ, ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕ ΟΝΟΜΑΣΙΕΣ ΤΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ ΤΟΥΣ ΚΑΙ ΟΔΟΙΠΟΡΙΚΑ ΠΡΟΣ ΤΑ ΣΗΜΕΙΑ ΑΥΤΑ.	88
8	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	100
8.1	ΙΣΤΟΤΟΠΟΙ	100

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου κ. Ανδριτσάνο Βασίλειο, κυρίως για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και την υπομονή που έκανε κατά τη διάρκεια υλοποίησης της πτυχιακής εργασίας, διότι υπήρξαν πολλές δυσκολίες λόγω των πολλών ωρών εργασίας. Όπως επίσης και για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση του, για την επίλυση διάφορων θεμάτων.

Ακόμη, θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στο Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής για την παροχή του εξοπλισμού που ήταν απαραίτητος για την υλοποίηση αυτής της εργασίας και για την εμπιστοσύνη του προς το πρόσωπό μου και τον υπολοίπων συμφοιτητών μου.

Τέλος, θα ήθελα να απευθυνθώ στους γονείς μου, οι οποίοι στήριξαν τις σπουδές μου με διάφορους τρόπους, φροντίζοντας για την καλύτερη δυνατή μόρφωση μου όλα αυτά τα χρόνια.

**ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΧΑΡΤΩΝ ΑΝΩΜΑΛΙΩΝ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ
ΑΤΤΙΚΗ**

Αντωνόπουλος Χαράλαμπος (Επιβλέπων: Ανδριτσάνος. Β. Δ.)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αρχικά, η πτυχιακή εργασία δόθηκε σε εμένα και τον Μακρή Γεώργιο με τον οποίο έγιναν από κοινού οι εργασίες πεδίου και η επεξεργασία των μετρήσεων στο γραφείο.

Τα βήματα που ακολουθήσαμε ήταν τα εξής:

Πρώτον, η επιλογή των σημείων τα οποία θα αποτελούσαν το βαρυτημετρικό δίκτυο. Δεύτερον, η αναζήτηση και η εξακρίβωση αν όντως υπάρχουν τα σημεία αυτά και αν η πρόσβαση σε αυτά ήταν εφικτή. Έπειτα, προχωρήσαμε στις μετρήσεις που χρειάστηκαν για να γίνει η επίλυση του δικτύου βαρύτητας. Για την υλοποίηση των μετρήσεων χρησιμοποιήσαμε τα κατάλληλα όργανα τα οποία ήταν κυρίως το βαρυτήμετρο στο οποίο επικεντρώνεται η συγκεκριμένη εργασία και το GPS για τον ακριβή προσδιορισμό της θέσης των σημείων.

Στη συνέχεια, τελειώνοντας τις μετρήσεις των σημείων στο πεδίο ξεκινήσαμε την επεξεργασία τους χρησιμοποιώντας συγκεκριμένα προγράμματα που μας παρείχε το εργαστήριο Γεωδαισίας – Τοπογραφίας όπου φτάσαμε στην τελική τους μορφή.

Τέλος, προχωρήσαμε στην κατασκευή ορισμένων χαρτών χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα surfer. Το τελικό αποτέλεσμα της εργασίας είναι η κατασκευή χαρτών τιμής της έντασης της βαρύτητας και ανωμαλιών της βαρύτητας χρησιμοποιώντας τα σημεία των μετρήσεων στο πεδίο. Οι ανωμαλίες της βαρύτητας που υπολογίζονται αποτελούν τα δεδομένα εισαγωγής στον βαρυτημετρικό προσδιορισμό του γεωειδούς σε τοπική κλίμακα. Το γεωειδές αποτελεί βασικό στοιχείο, τόσο στις τοπογραφικές αναγωγές των μετρήσεων από την φυσική επιφάνεια στην επιφάνεια αναφοράς, όσο και στη σύνδεση της υψομετρικής πληροφορίας από το GPS με τα ορθομετρικά υψόμετρα που χρησιμοποιούν οι μηχανικοί στις μελέτες τους.

UNIVERSITY OF WEST ATTICA
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING AND SURVEYING AND GEOINFORMATICS
ENGINEERING

GRADUATE THESIS

CONSTRUCTION AND COMPARISON OF MAPS OF GRAVITY ANOMALIES AT
ATTICA

Antonopoulos Charalampos (supervised by Andritsanos V.D.)

ABSTRACT

Initially, the Graduate Thesis was given to me and Makris Georgios, with whom the fieldwork and the processing of the measurements in the office were done together.

The steps we followed were the following:

First, the selection of the points which would constitute the gravimetric network. Secondly, the search and verification of whether these points really exist and whether access to them was possible. Next, we proceeded with the measurements needed to solve the gravity grid. For the implementation of the measurements, we used the appropriate instruments which were mainly the gravimeter on which the specific work is focused and the GPS for the exact determination of the position of the points.

Subsequently, finishing the measurements of the points in the field we started their processing using specific programs provided by the Geodesy - Topography laboratory until we reached their final form.

Finally, we proceeded to build some maps using the Surfer program. The final result of the work is the construction of value maps of the intensity of gravity and gravity anomalies using the points of measurements in the field. The calculated gravity anomalies are the input data to the gravitational determination of the geoid on a local scale. The geoid is a key element, both in the topographic reductions of the measurements from the physical surface to the reference surface, as well as in the connection of the altitude information from the GPS with the orthometric altitudes used by the engineers in their studies.

1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Γεωδαισία (Γη+Δαίω=μοιράζω) είναι η επιστήμη που ασχολείται με το σχήμα, το μέγεθος και το πεδίο βαρύτητας της Γης, με τις μεταβολές τους στο χρόνο, καθώς και με την αποτύπωση τμημάτων της επιφάνειάς της με όλα τα φυσικά ή/και τεχνικά χαρακτηριστικά της. Ως σχήμα της Γης στην περίπτωση αυτή θεωρείται το σχήμα του γεωειδούς, που ορίζεται ως η ισοδυναμική επιφάνεια του γήινου πεδίου βαρύτητας η οποία προσαρμόζεται καλύτερα στη μέση στάθμη των θαλασσών. Κατ' επέκταση, καλύπτει σε ό,τι αφορά αυτούς τους γνωστικούς τομείς και τη Σελήνη και τους άλλους πλανήτες. Από τον ορισμό φαίνεται ότι η Γεωδαισία σχετίζεται άμεσα με την Αστρονομία και τη Γεωφυσική, καθώς και με την Χαρτογραφία, επιστήμες με τις οποίες έχει αρκετές επικαλύψεις.

Ως επιστήμη η Γεωδαισία άρχισε να αναπτύσσεται κατά τον 17ο αιώνα από Ευρωπαίους αστρονόμους, μαθηματικούς και φυσικούς. Οι μεγάλες εξελίξεις της γεωδαισίας σημειώθηκαν μετά το 1950, ύστερα από την τεχνολογική εξέλιξη των μικροκυμάτων και της ηλεκτρονικής, που επέτρεψε την κατασκευή νέων οργάνων για εύκολη και ακριβή μέτρηση αποστάσεων και την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών, που βοήθησαν την εκτέλεση μεγάλων και πολύπλοκων υπολογισμών. Σημαντική ώθηση στην επιστήμη της γεωδαισίας έδωσε η εκτόξευση τεχνητών δορυφόρων και η εφαρμογή της τεχνολογίας GPS που χρησιμοποιήθηκαν ως νέα γεωδαιτικά εργαλεία με νέες μεθοδολογίες και οδήγησαν σε τέτοιες εξελίξεις, ώστε να επικρατήσουν των κλασικών μεθόδων και να δώσουν νέες δυνατότητες για την εξυπηρέτηση των στόχων της Γεωδαισίας.

Για να επιτύχει τους σκοπούς της η Γεωδαισία στηρίζεται σε παρατηρήσεις και μετρήσεις που αναφέρονται κυρίως σε αποστάσεις, γωνίες, υψομετρικές διαφορές, ένταση και διεύθυνση της βαρύτητας. Δεδομένου ότι όλες οι μετρήσεις (εκτός της βαρύτητας) υλοποιούνται με τη χρήση Η/Μ κυμάτων και γίνονται πάνω στη Φυσική Γήινη Επιφάνεια και μέσα στην ατμόσφαιρα, δέχονται τις επιδράσεις τόσο του πεδίου βαρύτητας της γης (γωνίες, υψομετρικές διαφορές) όσο και της ατμόσφαιρας (γωνίες, αποστάσεις). Χρειάζονται επομένως αναγωγές.

Η κλασική Γεωδαισία χρησιμοποιεί τις μετρήσεις αυτές για να προσδιορίσει τις θέσεις ενός μεγάλου αριθμού σημείων (τριγωνομετρικά σημεία) χωρίζοντας τη γεωδαιτική διαδικασία, τόσο των μετρήσεων όσο και των υπολογισμών, σε οριζοντιογραφία και υψομετρία. Οι μέθοδοι που ακολουθούνται στην οριζοντιογραφία είναι του τριγωνισμού ή/και του τριπλευρισμού, ενώ στην υψομετρία της χωροστάθμησης. Αντίστοιχα υλοποιούνται δίκτυα οριζοντίου(γεωδαιτικά) ή κατακορύφου (χωροσταθμικά) ελέγχου με τελικό σκοπό την ίδρυση ενός Γεωδαιτικού Συστήματος Αναφοράς.

Ο προσδιορισμός των συντεταγμένων των βασικών σημείων (τριγωνομετρικών), αποτελεί την κύρια πρακτική εφαρμογή της Γεωδαισίας και γίνεται με ευθύνη κρατικών υπηρεσιών. Οι θέσεις των σημείων προσδιορίζονται με σύνδεσή τους μέσω μετρήσεων, με τα βασικά σημεία και εκφράζονται και αυτές χωριστά για την οριζοντιογραφία και την υψομετρία. Κάθε σημείο προβάλλεται κάθετα πάνω σ'ένα ελλειψοειδές εκ περιστροφής, που επιλέγεται έτσι, ώστε να προσαρμόζεται καλύτερα στο γεωειδές και επομένως να προσεγγίζει ικανοποιητικά τη μέση στάθμη των θαλασσών.

Η θέση ενός σημείου στο χώρο χρησιμοποιώντας ως επιφάνεια αναφοράς το ελλειψοειδές ορίζεται με το γεωδαιτικό πλάτος (φ), το γεωδαιτικό μήκος (λ), καθώς και με το γεωμετρικό υψόμετρο (h). Τα υψόμετρα όμως που χρησιμοποιούνται στο Εθνικό Σύστημα Υψομετρίας ορίζονται ως προς το γεωειδές και, πρακτικά, ως προς τη μέση στάθμη της θάλασσας και ονομάζονται ορθομετρικά (H_0). Ο προσδιορισμός τους γίνεται με τον προσδιορισμό των ορθομετρικών υψομετρικών διαφορών, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της γεωμετρικής χωροστάθμησης. Επομένως, για να αναφερθούν τα υψόμετρα στην ίδια μαθηματική επιφάνεια αναφοράς (ελλειψοειδές) πρέπει να είναι γνωστές οι αποχές του γεωειδούς (N) από το ελλειψοειδές αναφοράς για τα αντίστοιχα σημεία. Έτσι τα γεωμετρικά υψόμετρα προκύπτουν από τη σχέση:

$$h = H_0 + N, \quad (1.1)$$

Οι μετρήσεις της κλασικής Γεωδαισίας ανάγονται στην επιφάνεια αναφοράς του Γεωδαιτικού Συστήματος Αναφοράς (Γ.Σ.Α), όπου προσδιορίζονται οι γεωδαιτικές συντεταγμένες (φ, λ) και στη συνέχεια στο προβολικό σύστημα, που εφαρμόζει το ΓΣΑ για τον υπολογισμό των επίπεδων ορθογώνιων συντεταγμένων (x, y) των σημείων για την δημιουργία χαρτών και τοπογραφικών διαγραμμάτων. Οι επιφανειακές συντεταγμένες (φ, λ) και (x, y) συμπληρώνονται συνήθως, σε ένα ΓΣΑ, από το υψόμετρο H_0 για να ορίσουν τη θέση του σημείου στο χώρο.

Με τις κλασικές μεθόδους δεν είναι δυνατόν να καλυφθούν πολύ μεγάλες εκτάσεις της Γης, αφού είναι απαραίτητο να υπάρχει αμοιβαία ορατότητα ανάμεσα στα διάφορα τριγωνομετρικά σημεία, για να μπορούν να γίνουν μετρήσεις (γωνιών, μηκών). Αυτό είχε ως επακόλουθο η κάθε χώρα να έχει ανεξάρτητο τριγωνομετρικό δίκτυο και δικό της γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς.

Η χρήση των τεχνητών δορυφόρων και ιδιαίτερα του GPS επέτρεψε τις μετρήσεις πολύ μεγάλων αποστάσεων και τη δημιουργία τρισδιάστατων γεωδαιτικών δικτύων καθώς και τον ενιαίο προσδιορισμό στο χώρο των θέσεων των σημείων που εκφράζονται τώρα με καρτεσιανές συντεταγμένες (X, Y, Z) σε ένα ενιαίο παγκόσμιο γήινο σύστημα αναφοράς (ITRF: International Terrestrial Reference Frame).

Ιστορικά τα περισσότερα διαδεδομένα συστήματα της δορυφορικής γεωδαισίας υπήρξαν τα ειδικά φωτογραφικά τηλεσκόπια, το σύστημα TRANSIT που στηρίζεται στο φαινόμενο DOPPLER και εχρησιμοποιείτο κυρίως στην ναυσιπλοΐα, το σύστημα μέτρησης αποστάσεων με Laser (SLR: Satellite Laser Ranging) και σήμερα το σύστημα εντοπισμού GPS (Global Positioning System). Με το σύστημα αυτό ένας ειδικός δέκτης με μικροϋπολογιστή, που δέχεται τα σήματα των δορυφόρων NAVSTAR/GPS (Navigation System with Time and Ranging) μπορεί άμεσα να προσδιορίσει τη γεωκεντρική θέση του σημείου (εφόσον υπάρχει δίκτυο μόνιμων σταθμών GPS), ή τη σχετική του θέση ως προς έναν άλλον δέκτη που βρίσκεται σε απόσταση μέχρι μερικές εκατοντάδες χιλιόμετρα με ακρίβεια μέχρι 0,1 ppm.

Οι υπολογισμοί από τα αποτελέσματα των μετρήσεων με δέκτες GPS είναι απλούστεροι, εφόσον γίνονται σε τρισδιάστατο σύστημα αναφοράς και οι συντεταγμένες μπορούν εύκολα να μετατραπούν σε γεωδαιτικές ελλειψοειδείς και στη συνέχεια, σε επίπεδες ορθογώνιες συντεταγμένες σύμφωνα με το ΓΣΑ και με την απεικόνιση που έχει επιλεγεί για τις εφαρμογές.

Τα Γεωδαιτικά Συστήματα Αναφοράς σήμερα είναι γεωκεντρικά και τα δίκτυα που τα υλοποιούν αποτελούνται συνήθως από αριθμό σημείων-σταθμών GPS τα οποία λειτουργούν συνεχώς, με τα οποία

μπορεί ο χρήστης να συνδεθεί σε αποστάσεις μερικών δεκάδων km και να προσδιορίσει την θέση του στο ΓΣΑ, σε πολύ μικρό χρόνο (της τάξεως του 1 λεπτού) με πολύ καλή ακρίβεια.

Υπάρχουν επίσης αντίστοιχα συστήματα μέτρησης υψομέτρων με δορυφόρους (Satellite Altimetry) που προσδιορίζουν την τοπογραφία της επιφάνειας της θάλασσας με ακρίβεια cm.

Τέλος, η Γεωδαισία χρησιμοποιεί Διαστημικής τεχνολογίας συστήματα που προσδιορίζουν τη θέση σημείων με πολύ μεγάλη ακρίβεια, χρησιμοποιώντας την αρχή της συμβολομετρίας πολύ μεγάλης βάσης VLBI (Very Long Baseline Interferometry).

Με τα εξελιγμένα αυτά συστήματα η Γεωδαισία είναι δυνατόν να μετρήσει διηπειρωτικές αποστάσεις με ακρίβεια εκατοστού του μέτρου. Επειδή όμως οι θέσεις, άρα και οι συντεταγμένες των γεωδαιτικών σημείων, υπόκεινται σε τεκτονικές μετακινήσεις και μεταβάλλονται με το χρόνο, η Γεωδαισία πρέπει μαζί με τις συντεταγμένες των γεωδαιτικών σημείων να δίνει και το χρόνο (τέταρτη διάσταση) που τους αντιστοιχεί, ή και να δίνονται οι τεκτονικές μετακινήσεις (ταχύτητα και διεύθυνση) των σημείων των δικτύων.

Η μελέτη της βαρυτικής δύναμης ξεκίνησε πριν από πολλά χρόνια όταν αρχικά ο Νεύτωνας και στη συνέχεια ο Γαλιλαίος την παρατήρησαν και προσπάθησαν να την μοντελοποιήσουν. Μετέπειτα βρήκε εφαρμογή σε πολλούς επιστημονικούς κλάδους όπως γεωδαισία, γεωφυσική, σεισμολογία, μετεωρολογία κ.α. Σε αυτή την εργασία θα επικεντρωθούμε στην εφαρμογή της βαρύτητας στην Γεωδαισία. Μία από αυτές τις εφαρμογές είναι και η δημιουργία δικτύου βαρυτημετρικών σημείων με την βοήθεια επίγειων μετρήσεων. Ο τρόπος συλλογής επίγειων μετρήσεων έχει εξελιχθεί με την χρήση νέων ευαίσθητων οργάνων και πλέον τα δεδομένα είναι πιο ακριβή. Παράλληλα, για την εκμετάλλευση αυτών των αρχείων έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι, οι οποίες τα τελευταία χρόνια έχουν εξελιχθεί με την ευρεία χρήση των υπολογιστών. Επιπλέον έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές επεξεργασίας των δεδομένων αυτών οι οποίες διαφοροποιούνται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των δεδομένων και της περιοχής μελέτης. Πέρα από αυτά έχουν εξελιχθεί τα τελευταία χρόνια τόσο τα παγκόσμια γεωδυναμικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται όσο και τα ψηφιακά μοντέλα εδάφους. Με την συγκεκριμένη εργασία θα προσπαθήσουμε να εκμεταλλευτούμε τα πιο σύγχρονα από αυτά τα νέα δεδομένα και εργαλεία, ώστε να δημιουργήσουμε με το βέλτιστο τρόπο το βαρυτημετρικό μας δίκτυο με επίγειες επεξεργασμένες μετρήσεις βαρύτητας. (Wikipedia/Γεωδαισία, Εισαγωγή στη γεωδαισία, Ε.Μ.Π, 2007)

1.2 ΣΤΟΧΟΙ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Τελικός στόχος της πτυχιακής αυτής εργασίας είναι η δημιουργία ενός βαρυτομετρικού δικτύου που θα υλοποιηθεί με επίγειες μετρήσεις. Για να επιτευχθεί όμως το τελικό αποτέλεσμα θα πρέπει να πραγματοποιηθούν οι ενδιαμέσοι στόχοι της εργασίας αυτής οι οποίοι είναι :

- 1) Περιγραφή θεωρητικού υποβάθρου, που σκοπό έχει την κατανόηση των μεθόδων που θα χρησιμοποιηθούν .
- 2) Γενική περιγραφή των μεθόδων, που θα χρησιμοποιηθούν για την υλοποίηση του δικτύου μας.
- 3) Ανάλυση των προγραμμάτων, που θα χρησιμοποιηθούν για την υλοποίηση διάφορων υπολογισμών.
- 4) Η υλοποίηση του βαρυτημετρικού μας δικτύου στην βόρεια περιοχή της Αττικής με πλήρη περιγραφή των ενδιαμέσων σταδίων.

1.3 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Η εργασία αυτή αναπτύσσεται μέσα σε 7 κεφάλαια :

Στο **πρώτο κεφάλαιο** συνοψίζονται οι στόχοι και περιγράφονται τα περιεχόμενα των επόμενων ενοτήτων.

Στο **δεύτερο κεφάλαιο** εκτίθεται το θεωρητικό υπόβαθρο της συγκεκριμένης μελέτης και μεταξύ άλλων περιλαμβάνει εισαγωγικές έννοιες για την βαρύτητα, περιγραφή του τρόπου συλλογής βαρυτημετρικών μετρήσεων, γενικά περί αναγωγών και διορθώσεων που θα επιβληθούν στις τελικές τιμές της απόλυτης βαρύτητας καθώς και θεωρητικά στοιχεία για τις μεθόδους υπολογισμού της βαρύτητας.

Στο **τρίτο κεφάλαιο** γίνεται μία απλή αναφορά στο θεωρητικό κομμάτι των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν με GPS (Global Positioning System).

Στο **τέταρτο κεφάλαιο** παρουσιάζονται με σύντομο τρόπο όλες οι εργασίες πεδίου, καθώς και τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν. Σε παράρτημα που βρίσκεται στο τέλος της εργασίας υπάρχουν όλα τα σημεία σε εικόνες όπως αυτές λήφθηκαν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.

Στο **πέμπτο κεφάλαιο** αναφέρονται αναλυτικά η κατασκευή και σύγκριση των χαρτών, καθώς και τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την εργασία.

Στο **έκτο κεφάλαιο** συνοψίζονται τα συμπεράσματα τα οποία έχουμε βγάλει από όλη την διαδικασία της πτυχιακής εργασίας και επιπλέον κάποιες προτάσεις που αφορούν στην βελτίωση του ήδη υπάρχον δικτύου.

Στο **έβδομο κεφάλαιο** επισυνάπτονται παραρτήματα που περιέχουν εικόνες από τις μετρήσεις πεδίου που πραγματοποιήθηκαν και από τις μετέπειτα επεξεργασίες αυτών.

2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ

2.1.1 ΒΑΡΥΤΙΚΗ ΕΛΞΗ – ΠΕΔΙΟ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ

Στη φυσική, βαρύτητα ονομάζεται η ιδιότητα των υλικών σωμάτων να έλκουν και να έλκονται αμοιβαία με άλλα υλικά σώματα. Τα ελκόμενα σώματα κινούνται με επιταχυνόμενη κίνηση προς το έλκον σώμα. Οι έλξεις είναι αμοιβαίες. Το μέτρο της αντίστασης, που παρουσιάζει κάθε σώμα στη μεταβολή της κινητικής του κατάστασης, το ονομάζουμε μάζα του σώματος. Η δύναμη έλξης, που ονομάζεται βάρος, είναι μεγαλύτερη όταν τα σώματα είναι πλησιέστερα ή όταν έχουν μεγαλύτερη μάζα.

Η βαρύτητα στη γη έλκει τα υλικά σώματα και προκαλεί την πτώση τους στην επιφάνειά της όταν αφεθούν ελεύθερα. Επιπροσθέτως, η βαρύτητα είναι η αιτία της ύπαρξης της γης, του ήλιου και των άλλων αστρικών σωμάτων. Χωρίς αυτή δεν θα υπήρχε ζωή, όπως τη γνωρίζουμε σήμερα. Η βαρύτητα είναι επίσης υπεύθυνη για την τροχιά της γης και των υπόλοιπων πλανητών γύρω από τον ήλιο, την τροχιά της σελήνης γύρω από τη γη, τον σχηματισμό παλιρροιών και άλλα φυσικά φαινόμενα που παρατηρούμε.

Ο νόμος του Νεύτωνα για τη βαρύτητα διατυπώνεται ως εξής:

«Κάθε σώμα στο σύμπαν έλκει κάθε άλλο σώμα με δύναμη ανάλογη του γινομένου των μαζών τους και αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης του κέντρου μάζας τους».

Ο νόμος αυτός εκφράζεται ως:

$$F = \frac{G \cdot M_1 \cdot M_2}{r^2}, \quad (2.1)$$

όπου:

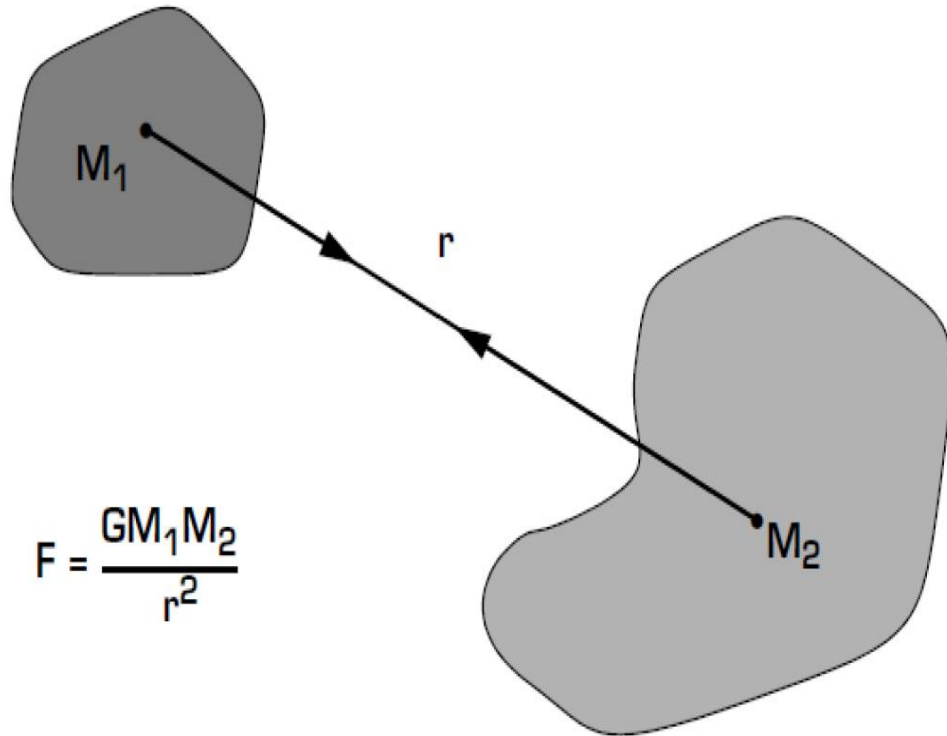
F : το μέτρο της βαρυτικής δύναμης

G : Διεθνής Βαρυτική Σταθερά με τιμή $6.6742 \times 10^{-11} \text{N}(\text{m}/\text{kg})^2$

M_1, M_2 : οι μάζες των σωμάτων (kg)

R : η απόσταση μεταξύ των κέντρων μάζας των σωμάτων (m)

Η βαρυτική αυτή δύναμη έχει διεύθυνση επί του ευθύγραμμου τμήματος που συνδέει τα κέντρα των 2 μαζών (όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.1)



Εικόνα 2.1 :Αναπαράσταση βαρυτικών δυνάμεων (πηγή: A GUIDE TO HIGH PRECISION

LAND GRAVIMETER SURVEYS, by H.O. Seigel)

Η επιτάχυνση που αποκτά για παράδειγμα η M_1 εξαιτίας αυτής της δύναμης υπολογίζεται :

$$\frac{F}{M_1} = \alpha = \frac{G \cdot M_2}{r^2}, \quad (2.2)$$

σε m / s^2 .

Επιπλέον κάθε μάζα προκύπτει από το γινόμενο του όγκου της επί την πυκνότητά της, δηλαδή :

$$M = d \cdot V, \quad (2.3)$$

όπου η πυκνότητα μετράται σε kg / m^3 .

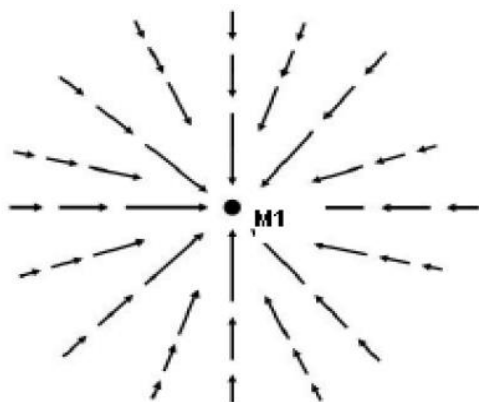
Μάλιστα αν η πυκνότητα αυτή δεν είναι σταθερή σε όλο τον όγκο της μάζας τότε ο υπολογισμός της επιτάχυνσης για ένα σώμα γίνεται μέσω του ολοκληρώματος του όγκου της μάζας :

$$\vec{\alpha} = G \cdot \int \frac{d \cdot \vec{r}}{r^3} \cdot d \cdot v, \quad (2.4)$$

Για το λόγο αυτό η επιτάχυνση που αποκτά κάθε σώμα λόγω της βαρυτικής δύναμης διαφέρει σε κάθε σημείο του. Αν θεωρήσουμε σαν μάζα M_1 τη Γη τότε ακόμα και αν το σχήμα της ήταν πλήρως

σφαιρικό θα είχαμε διαφορετική επιτάχυνση της βαρύτητας στην επιφάνεια της εξαιτίας της διαφοράς στην κατανομή των μαζών της.

Κάθε δύναμη δημιουργεί ένα πεδίο γύρω της, έτσι και οι βαρυτικές δυνάμεις δημιουργούν ένα βαρυτικό πεδίο. Το βαρυτικό πεδίο της μάζας M_1 είναι :



Εικόνα 2.2: Ακτινωτό Βαρυτικό Πεδίο (πηγή: A GUIDE TO HIGH PRECISION

LAND GRAVIMETER SURVEYS, by H.O. Seigel)

$$\vec{F} = -\frac{G \cdot M_1}{L^3} \cdot \vec{L}, \quad (2.5)$$

όπως παρατηρούμε απο την εικόνα 2.2 το πεδίο των δυνάμεων δεν μπορεί να προσδιορίσει επακριβώς μία δύναμη καθώς σε κάθε σημείο του έχουμε διαφορετική δύναμη, έτσι εισήχθει ο όρος δυναμικό δύναμης το οποίο συμβολίζεται διεθνώς με V και ισχύει (H.O. Seigel A, 1995):

$$F = \bar{V} \cdot V = gravV, \quad (2.6)$$

με αντικαταστάσεις στον τύπο 2.6 και πράξεις, οδηγούμαστε στον τύπο του δυναμικού έλξης:

$$V = \frac{G \cdot M_2}{r}, \quad (2.7)$$

2.1.2 ΓΗΙΝΗ ΕΛΞΗ – ΓΗΙΝΟ ΠΕΔΙΟ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ

Οι παραπάνω τύποι βρίσκουν εφαρμογή για τον υπολογισμό της δύναμης και επιτάχυνσης της βαρύτητας στην επιφάνεια της γης αν θεωρήσουμε ως μία από τις μάζες, τη μάζα της Γής και ως απόσταση μεταξύ των σωμάτων την ακτίνα της (θεωρώντας σε πρώτη προσέγγιση τη γη σφαιρική). Δηλαδή οι τύποι 2.1 και 2.2 γίνονται:

$$B = G \cdot \frac{M_E \cdot m}{R_E^2} = m \cdot g, \quad (2.8)$$

$$\frac{B}{M_E} = g = \frac{G \cdot M_E}{R_E^2}, \quad (2.9)$$

$$\vec{B} = -\frac{G \cdot M_E}{R_E^3} \cdot \vec{R}_E, \quad (2.10)$$

$$V_E = \frac{G \cdot m}{R_E}, \quad (2.11)$$

όπου B η δύναμη της βαρύτητας (m το βάρος του δοκιμίου) και g (=gravity=βαρύτητα) η επιτάχυνση της βαρύτητας. Βεβαίως οι τύποι αυτοί είναι ιδιαίτερα απλοποιημένοι καθώς δεν έχει συνυπολογιστεί ένα πλήθος παραγόντων που τους επηρεάζουν και θα τους αναλύσουμε παρακάτω.

Η μάζα της γης M_e δημιουργεί γύρω της ένα ακτινωτό (όπως είδαμε) βαρυτικό πεδίο B, αν θεωρήσουμε τη πυκνότητά της σταθερή και ίση με 2.67 gr/cm^3 και επιπλέον σφαιρική από τον τύπο 2.10 προκύπτει ότι η επιτάχυνση της βαρύτητας πάνω στην επιφάνειά της σε πρώτη προσέγγιση έχει μέτρο $g=9.8422477 \text{ m/sec}^2$ και κατεύθυνση προς το κέντρο μάζας της.

Εντούτοις η γη δεν είναι πλήρως σφαιρική καθώς παρουσιάζει στους πόλους επι-πλάτυνση (~0.335%) ενώ τα υπόλοιπα μεγέθη που την αφορούν παίρνουν τιμές:

$$M_e=5.98 \times 10^{24} \text{ Kg (Κατά προσέγγιση η μάζα της)}$$

$$R_e=6368 \text{ Km (Μέση ακτίνα κατά προσέγγιση)}$$

Επομένως συμπεραίνουμε ότι η επιτάχυνση της βαρύτητας που αποκτά ένα σώμα στην επιφάνεια της γης μεταβάλλεται μεταξύ των τιμών 9.78 (στον Ισημερινό) και 9.83 m/s^2 (στους πόλους) και είναι ανεξάρτητη του βάρους του.

Ειδικότερα για το δυναμικό έλξης της γης μπορούμε να πούμε επιπλέον ότι θα πρέπει να συμφωνεί με τον τύπο του **Poisson** για το εσωτερικό της σφαίρας και με το τύπο του **Laplace** για το εξωτερικό της:

$$\Delta V = -4 \cdot \pi \cdot G \cdot \rho(\text{Poisson}), \quad (2.12)$$

$$\vec{V} = \Delta V = 0(\text{Laplace}), \quad (2.13)$$

Η φυσική ερμηνεία του τύπου του Poisson είναι ότι το άθροισμα των στοιχειωδών μαζών στο εσωτερικό της σφαίρας (με τις πυκνότητές τους) δημιουργεί το γήινο δυναμικό, ενώ η ένταση της κάθε μάζας είναι ανάλογη της πυκνότητάς της.

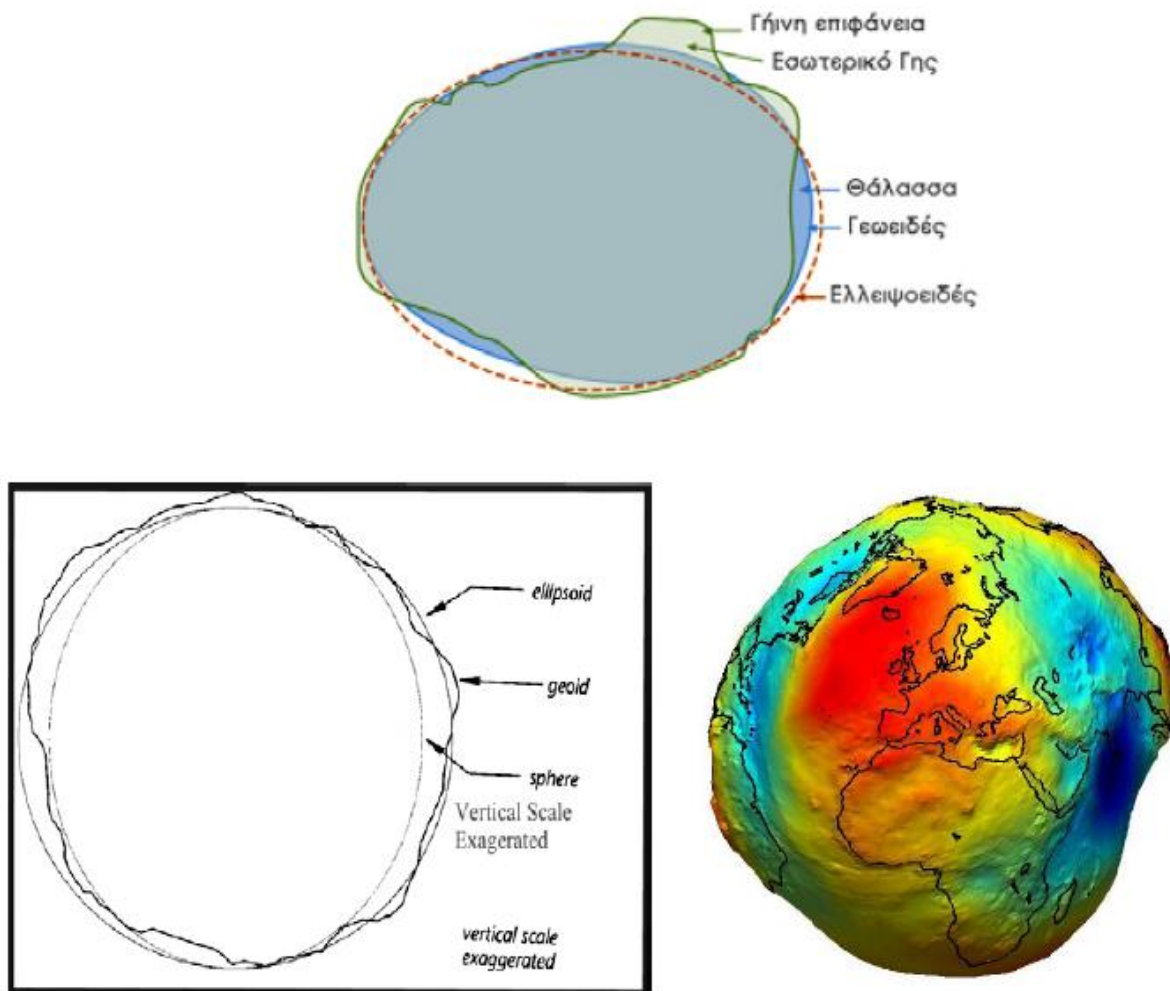
Αντίστοιχα ο τύπος του Laplace υποδηλώνει ότι δεν προστίθεται επιπλέον δυναμικό στο γήινο, έξω από τη σφαίρα καθώς δεν υπάρχουν μάζες ($\rho=0$).

Οι δύο αυτές εξισώσεις είναι οι βασικές διαφορικές εξισώσεις της φυσικής γεωδαισίας. Η επίλυση μάλιστα της εξίσωσης Laplace είναι μία αρμονική συνάρτηση του δυναμικού της γήινης βαρύτητας.

Επιπλέον η επιτάχυνση της βαρύτητας στην επιφάνεια της γης επηρεάζεται και από τη περιστροφή της γης καθώς και από πλήθος άλλους παράγοντες που θα εξετάσουμε παρακάτω. (H.O. SeigelA, 1995)

2.2 ΓΕΩΕΙΔΕΣ

Γεωειδές ονομάζεται η επιφάνεια που προσεγγίζεται από τη μέση στάθμη της θάλασσας γύρω από τη γη και αποτελεί μία ισοδυναμική επιφάνεια του γήινου βαρυτικού πεδίου όπου σε κάθε σημείο της η βαρυτική δύναμη έχει κατεύθυνση προς το κέντρο της γης. Μάλιστα έχει τεκμηριωθεί ότι το γεωειδές δεν είναι σφαιροειδής επιφάνεια καθώς περιλαμβάνει «εξάρσεις» γύρω από τους μεγάλους ορεινούς όγκους και «βυθίσεις» γύρω από τους ωκεανούς. Βεβαίως παρουσιάζει και πολλές τοπικές ανωμαλίες και ως εκ τούτου είναι δύσκολο να περιγραφεί από μία μαθηματική επιφάνεια. Ο τυπικός ορισμός του γεωειδούς παρατίθεται παρακάτω:



Εικόνα 2.3: Σχηματική και γραφική απεικόνιση γεωειδούς (πηγή icgem)

Η ισοδυναμική επιφάνεια έλξης και περιστροφής της Γης, που πλησιάζει περισσότερο την Μ.Σ.Θ. με ακρίβεια $\pm 1\text{m}$ ονομάζεται Γεωειδές. Η Μ.Σ.Θ. θεωρείται ότι έχει διορθωθεί από τις επιδράσεις των μεταβολών της πυκνότητας του θαλάσσιου ύδατος, των κυμάτων, των παλιρροιών, των ρευμάτων και των ατμοσφαιρικών συνθηκών. Έτσι η επιφάνεια αυτή ως ισοδυναμική είναι εξ ορισμού παντού κάθετη στην διεύθυνση της κατακορύφου (διεύθυνση του διανύσματος της βαρύτητας).

Το Γεωειδές είναι μια κλειστή και συνεχής επιφάνεια που εκτείνεται μέσα στο στερεό σώμα της Γης. Πρέπει να σημειωθεί ότι το Γεωειδές είναι μια ισοδυναμική επιφάνεια που έχει πάντα τα κοίλα προς τα μέσα. Η καμπυλότητά του παρουσιάζει ασυνέχειες σε σημεία με απότομες μεταβολές της πυκνότητας, συνεπώς δεν είναι μια αναλυτική επιφάνεια, δηλαδή δεν περιγράφεται με απλές μαθηματικές σχέσεις. Γι' αυτό δεν είναι κατάλληλη επιφάνεια αναφοράς για προσδιορισμό οριζοντιογραφικών θέσεων σημείων της Φ.Γ.Ε.. Αντίθετα, είναι πολύ βολική επιφάνεια αναφοράς για υψομετρικό προσδιορισμό θέσης, διότι δεν απαιτούνται πολύπλοκες μαθηματικές σχέσεις.

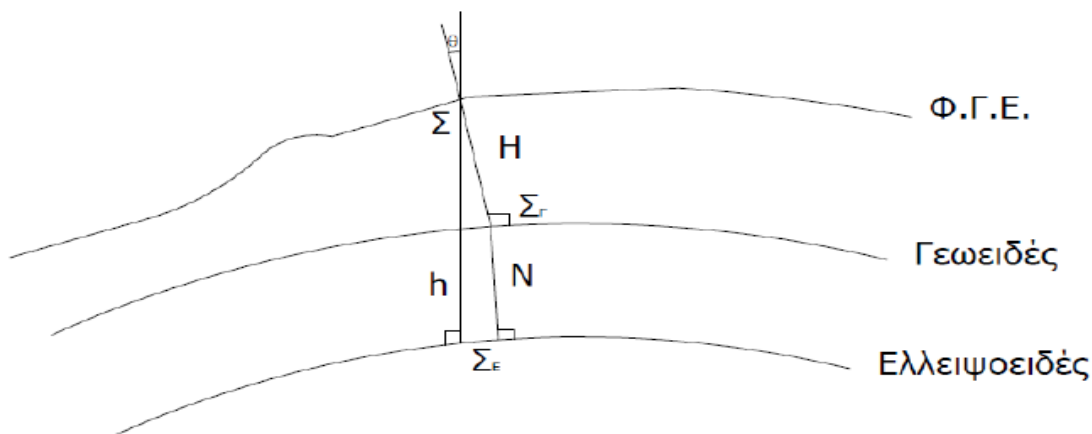
Ο υπολογισμός του γεωειδούς αποτελεί μία σύνθετη εργασία η οποία απασχολεί τα τελευταία χρόνια την επιστημονική κοινότητα. Η χρησιμότητά ενός ακριβούς γεωειδούς έγκειται στο γεγονός ότι αυτό αποτελεί μία αξιόπιστη υλοποιήσιμη επιφάνεια αναφοράς των υψομέτρων. Όμως σε κάθε χώρα έχει υιοθετηθεί ένα διαφορετικό υψομετρικό σύστημα το οποίο είναι άμεσα συσχετισμένο με τοπικούς παλιρροιογράφους. Ως εκ τούτου έχει ιδιαίτερη σημασία ο υπολογισμός τοπικού γεωειδούς για κάθε ξεχωριστό υψομετρικό σύστημα. (Για παράδειγμα ο παλιρροιογράφος του Πειραιά που προσδιορίζει τη μέση στάθμη της θάλασσας στη χώρα μας βρίσκεται περίπου 37 μέτρα πάνω από το ελλειψοειδές αναφοράς ενώ ο αντίστοιχος της Βαλένθια περίπου 25m).

2.3 ΥΨΟΜΕΤΡΑ

Όπως αναφέρθηκε κάθε χώρα υλοποιεί δικό της υψομετρικό σύστημα το οποίο αναφέρεται σε κάποιον (ή κάποιους) παλιρροιογράφους. Τα υλοποιούμενα υψόμετρα σε κάθε τέτοιο σύστημα μπορεί να είναι διαφορετικών ειδών.

2.3.1 ΟΡΘΟΜΕΤΡΙΚΑ ΥΨΟΜΕΤΡΑ

Είναι τα υψόμετρα τα οποία χρησιμοποιούνται και στη χώρα μας και παίρνουν τη τιμή 0 στο παλιρροιογράφο του Πειραιά και κατά προσέγγιση στη μέση στάθμη της θάλασσας στον Ελλαδικό χώρο. Η γραμμική απόσταση που μετριέται κατά μήκος της κατακορύφου από ένα σημείο Σ της Φυσικής Γήινης Επιφάνειας (Φ.Γ.Ε) έως το Γεωειδές σημείο Σ_{Γ} , ονομάζεται **ορθομετρικό υψόμετρο** H του σημείου Σ_E .



Εικόνα 2.4: Απεικόνιση των ορθομετρικών υψομέτρων

Κάθε σημείο Σ της $\Phi.\Gamma.Ε.$ αντιστοιχεί σε ένα μόνο σημείο στο ελλειψοειδές που υλοποιείται με το ίχνος Σ_E της καθέτου από το σημείο πάνω σ' αυτό. Συνεπώς, τα δύο σημεία Σ και Σ_E έχουν τις ίδιες γεωδαιτικές συντεταγμένες (φ, λ) ενώ το μήκος της καθέτου $\Sigma\Sigma_E$ ορίζεται ως το **γεωμετρικό υψόμετρο**. Όπως είναι φυσικό η κάθετη στο ελλειψοειδές από το σημείο Σ δεν ταυτίζεται με την κατακόρυφη αλλά διαφέρουν κατά μια γωνία θ , η οποία καλείται **απόκλιση κατακορύφου**.

Η **διακύμανση του γεωειδούς** N είναι στην ουσία η ποσότητα που υπολογίζουμε όταν προσδιορίζουμε το γεωειδές. Η ποσότητα αυτή στην ουσία αποτελεί τη κάθετη απόσταση από το ελλειψοειδές αναφοράς προς το γεωειδές. Είναι προφανές ότι η σχέση που συνδέει τα γεωμετρικά με τα ορθομετρικά υψόμετρα είναι:

$$H = h - N, \quad (2.14)$$

Το ορθομετρικό υψόμετρο προσδιορίζεται με διάφορες μεθόδους σχετικών μετρήσεων από σημείο γνωστού ορθομετρικού υψομέτρου (ή παλιρροιογράφο). Αντίθετα το γεωμετρικό υψόμετρο προσδιορίζεται απευθείας με δορυφορικές μεθόδους (GPS). Οι περισσότερες χώρες του κόσμου χρησιμοποιούν ορθομετρικά υψόμετρα στα εθνικά συστήματα υψών τους. (Τζιαβός Η.Ν, Βέργος Γ.Σ, 2013-2014),

2.3.2 ΚΑΝΟΝΙΚΑ ΥΨΟΜΕΤΡΑ

Τα κανονικά υψόμετρα χρησιμοποιούν ως επιφάνεια αναφοράς μια επιφάνεια η οποία ονομάζεται **σχεδόν γεωειδές** (η οποία προέρχεται από μία άλλη επιφάνεια, το **τελουροειδές**) και η οποία αποτελεί το γεωμετρικό τόπο των σημείων στα οποία ισχύει η σχέση:

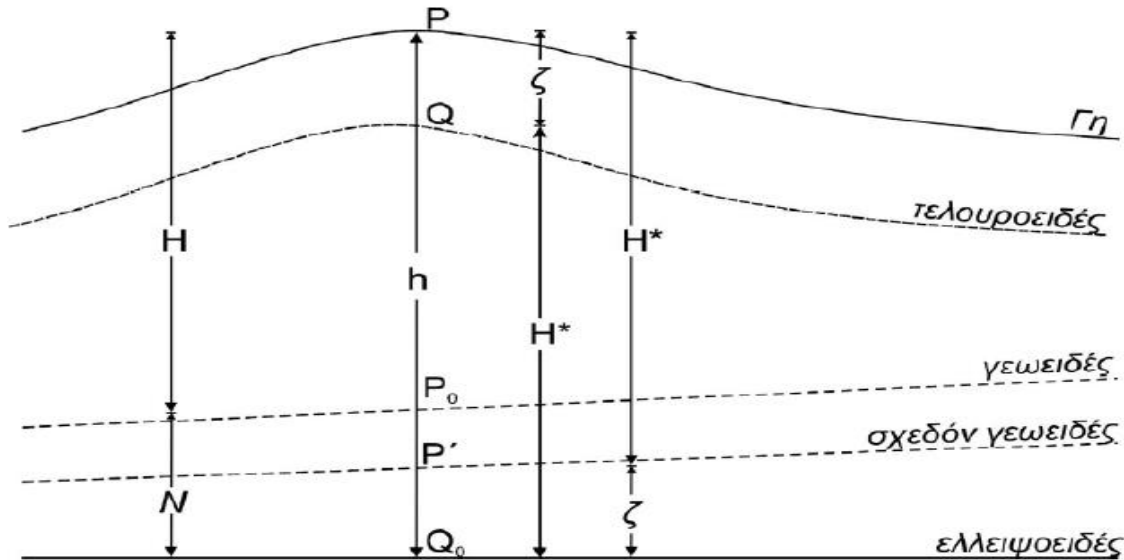
$$U_Q = W_P, \quad (2.15)$$

όπου η ποσότητα U_Q αποτελεί τη τιμή του κανονικού δυναμικού της βαρύτητας (που έχει προκύψει από το χρησιμοποιούμενο ελλειψοειδές αναφοράς) επί της ελλειψοειδούς καθέτου από τη προβολή του σημείου P στο ελλειψοειδές. Η ποσότητα W_P αντιπροσωπεύει τη μετρούμενη τιμή του δυναμικού της

βαρύτητας στο σημείο P το οποίο βρίσκεται στη ΦΓΕ. Η απόσταση PQ = ζ του τελουροειδούς από τη ΦΓΕ κατά μήκος της καθέτου στο ελλειψοειδές ονομάζεται ανωμαλία ύψους (height anomaly). Σε αυτή την απόσταση ζ πάνω από το ελλειψοειδές αναφοράς βρίσκεται το σχεδόν γεωειδές. Επομένως ως κανονικό υψόμετρο ορίζεται η απόσταση της ΦΓΕ από το σχεδόν γεωειδές ή αντίστοιχα η απόσταση του τελουροειδούς από το ελλειψοειδές αναφοράς.

$$QQ_0 = PP' = H^*, \quad (2.16)$$

Η μέτρηση των κανονικών υψομέτρων γίνεται μέσω του προσδιορισμού των γεωδυναμικών αριθμών C. Ο γεωδυναμικός αριθμός σε ένα σημείο προσδιορίζεται με γεωμετρική χωροστάθμιση συνδυασμένη με μετρήσεις βαρύτητας και εκφράζει τη διαφορά δυναμικού της βαρύτητας από τη μέση στάθμη της θάλασσας προς το σημείο που θέλουμε να τον υπολογίσουμε. Στη πράξη αποτελεί το άθροισμα των υψομετρικών διαφορών των ενδιάμεσων σημείων επί τη τιμή της βαρύτητας στο μέσον της απόστασης των ενδιάμεσων σημείων.



Εικόνα 2.5: Γραφική απεικόνιση κανονικών υψομέτρων.

Τα παραπάνω εκφράζονται μαθηματικά με τη σχέση:

$$C_P = W_{0 \rightarrow P} = \int_0^P \bar{g} \cdot d \cdot n \approx \sum_i^m \bar{g}_i \cdot \Delta n_i, \quad (2.17)$$

Από το γεωδυναμικό αριθμό προκύπτουν τα κανονικά υψόμετρα μέσω της σχέσης :

$$H_P^* = \frac{C_P}{\bar{\gamma}_{PP'}} = \frac{C_P}{\gamma_{0_{\omega_0}}} \left[1 + (1 + f + m - 2 \cdot f \cdot \sin^2 \varphi) \cdot \frac{C}{\alpha \cdot \gamma_{0_{\omega_0}}} + \left(\frac{C}{\alpha \cdot \gamma_{0_{\omega_0}}} \right)^2 \right], \quad (2.18)$$

όπου α, f, m οι παράμετροι του χρησιμοποιούμενου ελλειψοειδούς αναφοράς. Ο προσδιορισμός των κανονικών υψομέτρων παρέχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να γίνει χωρίς να χρειάζονται αναγωγές και διορθώσεις και γι αυτό το λόγο έχει καθιερωθεί σε αρκετές χώρες κυρίως της Βόρειας Ευρώπης (Γερμανία, κάτω χώρες κλπ).

Από τους παραπάνω ορισμούς είναι σαφές ότι η σχέση που συνδέει τα κανονικά με τα γεωμετρικά υψόμετρα είναι:

$$h = \zeta + H^*, \quad (2.19)$$

Τέλος έχει αποδειχθεί ότι για τα ορθομετρικά υψόμετρα κατά αντιστοιχία με τα κανονικά ισχύει :

$$H = \frac{C}{g}, \quad (2.20)$$

Το μειονέκτημα των κανονικών υψομέτρων είναι ότι αναφέρονται σε μία μη υλοποιήσιμη επιφάνεια (σχεδόν γεωειδές). (Τζιαβός Η.Ν, Βέργος Γ.Σ, 2013-2014).

2.3.3 ΔΥΝΑΜΙΚΑ ΥΨΟΜΕΤΡΑ

Είναι η τελευταία κατηγορία υψομέτρων τα οποία είναι και τα λιγότερο χρησιμοποιούμενα. Δε χρησιμοποιούν κάποια συγκεκριμένη επιφάνεια αναφοράς αλλά ορίζονται ως το πηλίκο του γεωδυναμικού αριθμού στο σημείο προς μία σταθερή τιμή κανονικής βαρύτητας (συνήθως γ_{45°). Δηλαδή ισχύει :

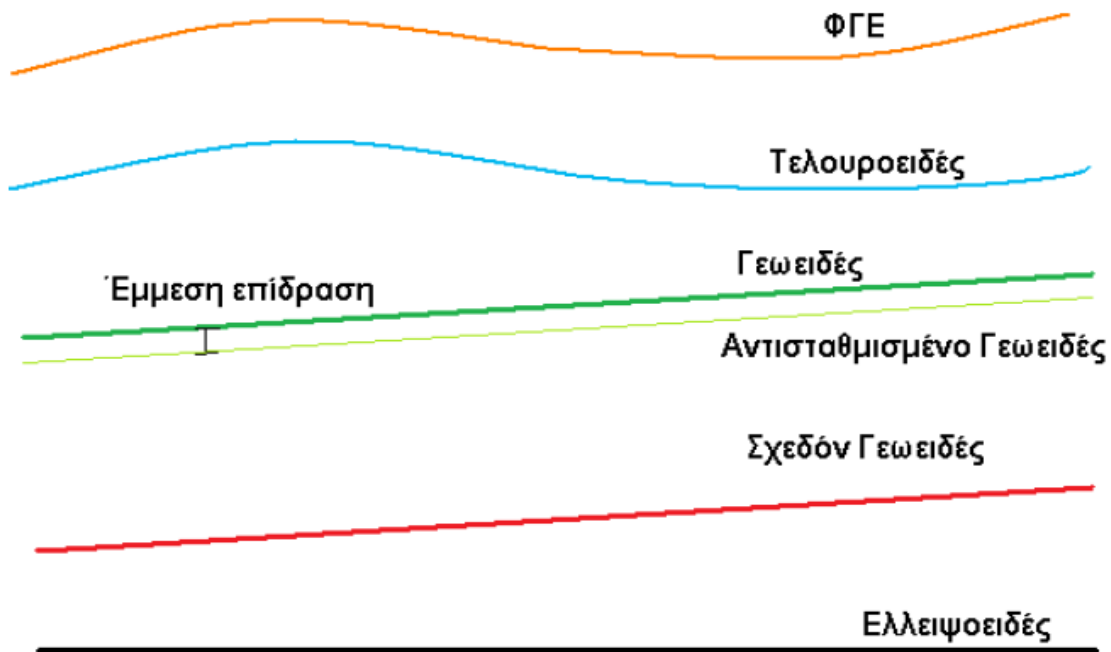
$$H^D = \frac{C}{\gamma_{45^\circ}}, \quad (2.21)$$

Τα σημεία με το ίδιο δυναμικό υψόμετρο ανήκουν και πάλι στην ίδια ισοδυναμική επιφάνεια και βρίσκουν εφαρμογή κυρίως στην ωκεανογραφία όπου δεν ενδιαφέρει συνήθως η μεγάλη ακρίβεια. (Τζιαβός Η.Ν, Βέργος Γ.Σ, 2013-2014).

2.4 ΓΕΩΕΙΔΕΣ – ΣΧΕΔΟΝ ΓΕΩΕΙΔΕΣ – ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΜΕΝΟ ΓΕΩΕΙΔΕΣ

Πριν προχωρήσουμε παρακάτω κρίνεται σκόπιμο να κάνουμε μία αναφορά στις επιφάνειες που ψάχνουμε να υπολογίσουμε ή μας προκύπτουν κατά τους υπολογισμούς. Αναφέραμε ήδη τη κατεξοχήν επιφάνεια που μας ενδιαφέρει, το **γεωειδές (geoid)**. Επιπλέον αναφέρθηκε η επιφάνεια που ονομάζεται **τελουροειδές (telluroid)**, η οποία αποτελεί την επιφάνεια αναφοράς των κανονικών υψομέτρων. Από το τελουροειδές επίσης προκύπτει και το **σχεδόν γεωειδές (quasigeoid)**. Μια άλλη επιφάνεια η οποία συναντάμε κατά τους υπολογισμούς του γεωειδούς είναι το **αντισταθμισμένο γεωειδές (compensated geoid ή απλά co-geoid)**. Η επιφάνεια αυτή προκύπτει κατά τους υπολογισμούς που κάνουμε λόγω των αναγωγών των μετρήσεων από την φυσική γήινη επιφάνεια στο γεωειδές. (Τις αναγωγές αυτές θα τις δούμε αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο). Με τις αναγωγές αυτές αλλοιώνουμε το βαρυτικό πεδίο στη περιοχή (λόγω της μεταφοράς των μαζών) με αποτέλεσμα οι υπολογισμοί να αφορούν το

αντισταθμισμένο γεωειδές και όχι το πραγματικό. Βεβαίως η διαφορά μεταξύ τους είναι πολύ μικρή αλλά πρέπει να υπολογιστεί. Η διαφορά αυτή ονομάζεται **έμμεση επίδραση (indirect effect)** και για έναν υπολογισμό ακριβείας θα πρέπει να τη λάβουμε υπόψη. Επιδιώκουμε γενικά οι τοπογραφικές αναγωγές που θα επιλέξουμε να προκαλούν όσο γίνεται μικρότερη έμμεση επίδραση. (Τζιαβός Η.Ν, Βέργος Γ.Σ, 2013-2014),



Εικόνα 2.6: Επιφάνειες που συναντάμε κατά τον υπολογισμό του Γεωειδούς

2.5 Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΓΗΣ.

Στην πραγματικότητα η γη δεν είναι σφαιρική, αλλά το σχήμα της είναι πολύ κοντά σε ένα ελλειψοειδές εκ περιστροφής (εικ. 2.7Α και 2.7Γ). Αυτό σημαίνει ότι είναι «πεπλατυσμένη» στους πόλους. Αυτή η πλάτυνση μπορεί να αποδοθεί με την τιμή f , η οποία ορίζεται ως:

$$f = \frac{\text{ισημερινή ακτίνα} - \text{πολική ακτίνα}}{\text{ισημερινή ακτίνα}} \approx \frac{1}{297}, \quad (2.22)$$

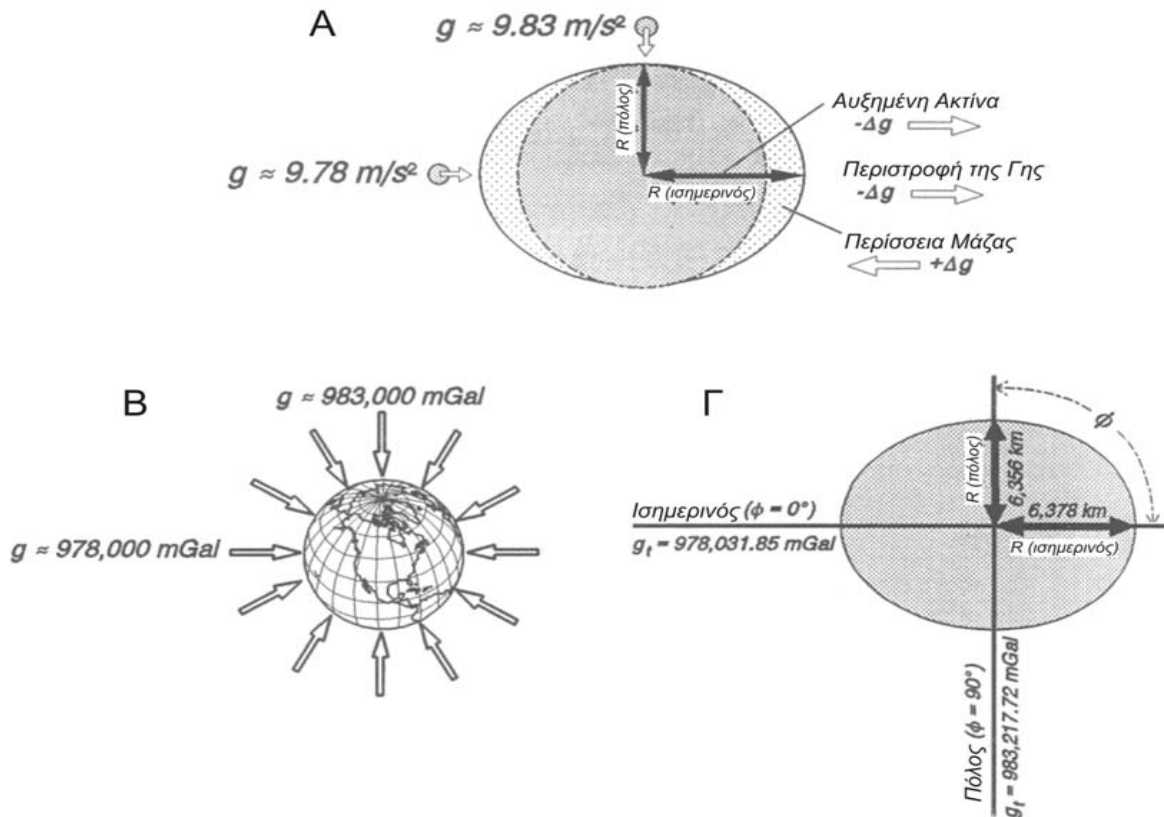
Επειδή υπάρχει η πλάτυνση της γης, δηλαδή η ακτίνα της δεν είναι παντού η ίδια, το g θα μεταβάλλεται με το γεωγραφικό πλάτος σύμφωνα με τη σχέση:

$$g_t = 9.7803253359 \cdot \left(\frac{1 + 0.001931852652458 \eta \mu^2 \varphi}{1 - e^2 \cdot \eta \mu^4 \varphi} \right) mGal, \quad (2.23)$$

Στην εξίσωση αυτή το φ μετριέται σε μοίρες.

Η επιφάνεια της θάλασσας πάνω στην οποία λαμβάνεται η τιμή βαρύτητας από τη σχέση (2.23), αντιστοιχεί στη μέση στάθμη της θάλασσας όλων των ωκεανών και του ισοδύναμου επιπέδου αυτής κάτω από τις ηπείρους.

Στη σχέση (2.23), η τιμή $978.031,85 \text{ mGal}$ είναι η τιμή του g στον ισημερινό ($\varphi=0$). Καθώς το φ αυξάνει προς τους πόλους το g θα αυξάνει επειδή η απόσταση μεταξύ ενός σημείου που βρίσκεται επί της στάθμης της θάλασσας και του κέντρου της γης μειώνεται. Έτσι, στους πόλους ($\varphi=90^0$), προκύπτει ότι το g ισούται με $983.217,72 \text{ mGal}$. Η βαρύτητα επομένως μεταβάλλεται περίπου 5000 mGal από τον ισημερινό μέχρι τους πόλους. Στην εικόνα 2.7B απεικονίζεται η αύξηση της έντασης του πεδίου από τον ισημερινό προς τους πόλους.



Εικόνα 2.7 α) Τρεις κύριοι παράγοντες είναι υπεύθυνοι για τη διαφορά της βαρύτητας στον ισημερινό σε σχέση με τους πόλους,

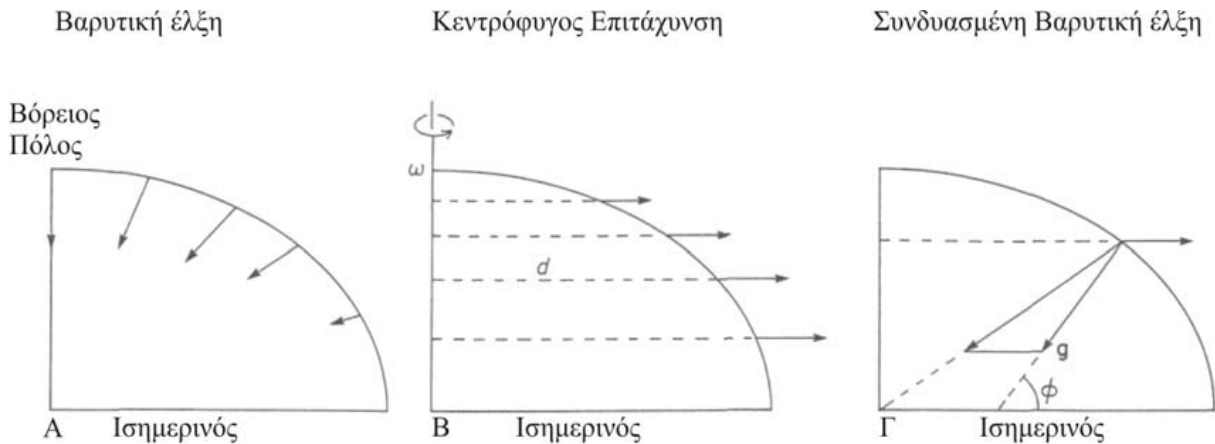
β) Η βαρύτητα αυξάνει από περίπου $978,000 \text{ mGal}$ στον ισημερινό μέχρι περίπου $983,000 \text{ mGal}$ στους πόλους,

γ) Η μεταβολή της βαρύτητας από τον ισημερινό μέχρι τους πόλους, σύμφωνα με τη 1967 Διεθνή Εξίσωση Βαρύτητας.

Η απόσταση από το κέντρο της γης δεν είναι η μόνη αιτία για την αύξηση της βαρύτητας προς τους πόλους σε μια επιφάνεια ενός ελλειψοειδούς εκ περιστροφής. Η φυγοκεντρική επίδραση, η οποία δρα σε κάθε αντικείμενο που επικάθεται στη γη, πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη. Επειδή η γη περιστρέφεται, το κάθε αντικείμενο επ' αυτής κινείται κατά μήκος μιας κυκλικής τροχιάς με κέντρο που βρίσκεται στον άξονα περιστροφής της γης. Στην εικόνα 2.8B γίνεται φανερό ότι η φυγοκεντρική επίδραση δεν κατευθύνεται από το κέντρο της γης κατακόρυφα προς τα έξω, αλλά κατευθύνεται προς τα έξω της κυκλικής τροχιάς του κινούμενου αντικειμένου. Η ένταση της φυγόκεντρης δύναμης a_c , είναι:

$$a_c = \omega^2 \cdot d, \quad (2.24)$$

όπου ω είναι η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής και d είναι η απόσταση του αντικειμένου από το κέντρο της κυκλικής τροχιάς. Μπορούμε να ιδούμε ότι η φυγοκεντρική επίδραση δρα έντονα σε ένα αντικείμενο που βρίσκεται στον ισημερινό. Εκεί η τιμή της απόστασης d είναι η μέγιστη, ίση με R_e . Η απόσταση d ελαττώνεται σε μεγαλύτερα πλάτη προσεγγίζοντας τη τιμή μηδέν στους πόλους. Έτσι, σύμφωνα με την εξίσωση (2.24), η φυγοκεντρική επίδραση ελαττώνεται προς μεγαλύτερα πλάτη και μηδενίζεται στους πόλους. Τα διανύσματα στην εικόνα 2.8B δείχνουν την μείωση της φυγόκεντρης δύναμης με την αύξηση του γεωγραφικού πλάτους.



Εικόνα 2.8 Διανύσματα που δείχνουν:

A) την έλξη βαρύτητας στην επιφάνεια ενός ελλειψοειδούς,

B) τη φυγόκεντρο επιτάχυνση στην επιφάνεια ενός περιστρεφόμενου ελλειψοειδούς και

Γ) τη συνολική βαρυτική έλξη που ασκείται σε σώμα επί της επιφανείας ενός περιστρεφόμενου ελλειψοειδούς, η οποία είναι η συνισταμένη των διανυσμάτων της βαρύτητας και της φυγόκεντρης επιτάχυνσης. Τα διανύσματα δεν έχουν χαραχθεί υπό κλίμακα.

Η βαρύτητα στην επιφάνεια ενός ελλειψοειδούς εκ περιστροφής περιγράφεται πλήρως με τον συνδυασμό των επιδράσεων της μάζας και της φυγόκεντρης δύναμης. Στην εικόνα 2.8Γ φαίνεται πως προκύπτει η πλήρης βαρυτική έλξη (βαρύτητα) g , από τις δύο παραπάνω αναφερθείσες επιδράσεις. Τα

διανύσματα στην εικόνα 2.8Α δείχνουν τη σχετική αύξηση της βαρύτητας αν και δεν έχουν χαραχθεί υπό κλίμακα. Στην πραγματικότητα η βαρυτική έλξη της μάζας είναι πολύ μεγαλύτερη από τη φυγόκεντρική επίδραση. Να σημειωθεί ότι, στον ισημερινό οι διευθύνσεις των δύο επιδράσεων είναι αντίθετες, με συνέπεια η βαρύτητα g , να διευθύνεται προς το κέντρο της γης. Αυτό δεν συμβαίνει σε όλες τις άλλες θέσεις, όπου το g , δεν διευθύνεται ακριβώς προς το κέντρο του ελλειψοειδούς.

Από τα παραπάνω είναι φανερό γιατί η βαρύτητα δεν είναι παντού η ίδια σε ένα ελλειψοειδές εκ περιστροφής. Για μια στατική σφαίρα ισχύει, $g = GM/R^2$. Για μια όμως περιστρεφόμενη σφαίρα, η σταθερή αυτή τιμή πρέπει να τροποποιηθεί, για να ληφθούν υπόψη οι επιδράσεις λόγω πλάτυνσης και φυγόκεντρης δύναμης, οι οποίες και οι δύο εξαρτώνται από το γεωγραφικό πλάτος. Οι διορθώσεις εφαρμόζονται στη τιμή βαρύτητας g_e , του ισημερινού. Η γενική εξίσωση για τον υπολογισμό της βαρύτητας $g(\varphi)$ για ένα πλάτος φ σε ένα ελλειψοειδές εκ περιστροφής είναι,

$$g(\varphi) = g_e(1 + C_1 \cdot \eta \mu^2 \varphi + C_2 \cdot \eta \mu^4 \varphi), \quad (2.25)$$

Οι σταθερές C_1 και C_2 εξαρτώνται από την πλάτυνση f και την ταχύτητα περιστροφής ω . Οι τιμές αυτών των σταθερών για τη γη, υπολογίζονται από αστρονομικές μετρήσεις και παρατηρήσεις των τροχιών τεχνητών δορυφόρων. (Αλεξόπουλος/βαρύτητα)

2.6 ΒΑΡΥΤΗΜΕΤΡΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

2.6.1 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΒΑΡΥΤΗΜΕΤΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Από τα μέχρι τώρα καταγεγραμμένα καθίσταται σαφής η σημαντικότητα της ύπαρξης βαρυτημετρικών δεδομένων. Εντούτοις η συλλογή τους είναι μια ιδιαίτερα δύσκολη διαδικασία καθώς επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες και επιπλέον ως μεγέθη είναι ιδιαίτερα μικρά. Αυτό έχει ως συνέπεια να χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα ευαίσθητα όργανα και ως εκ τούτου με ιδιαίτερα υψηλό κόστος.

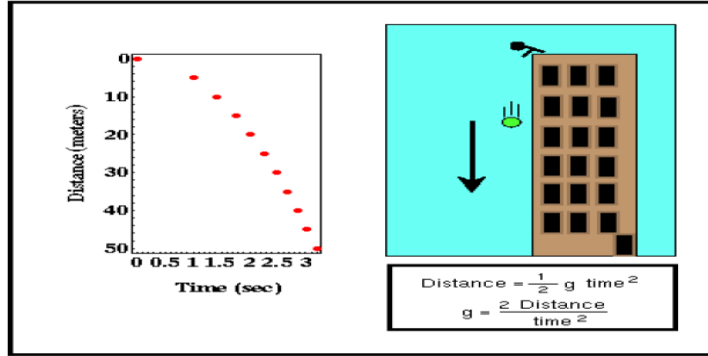
Η συλλογή των βαρυτημετρικών δεδομένων μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους είτε στη ξηρά (μεγαλύτερη ακρίβεια), είτε στη θάλασσα (μικρότερη ακρίβεια), είτε από αέρος (ακόμα πιο μικρή ακρίβεια), είτε τα τελευταία χρόνια και με διάφορες διαστημικές τεχνικές και με δορυφόρους που αποστέλλονται ειδικά για αυτό το σκοπό (π.χ. GOCE και CHAMP).

Στη παρούσα πτυχιακή εργασία θα αναφερθούμε μόνο σε **επίγειες μετρήσεις** βαρύτητας καθώς μόνο τέτοια δεδομένα θα χρησιμοποιήσουμε.

2.6.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ

Η βαρύτητα γενικά μπορεί να μετρηθεί με διάφορους τρόπους:

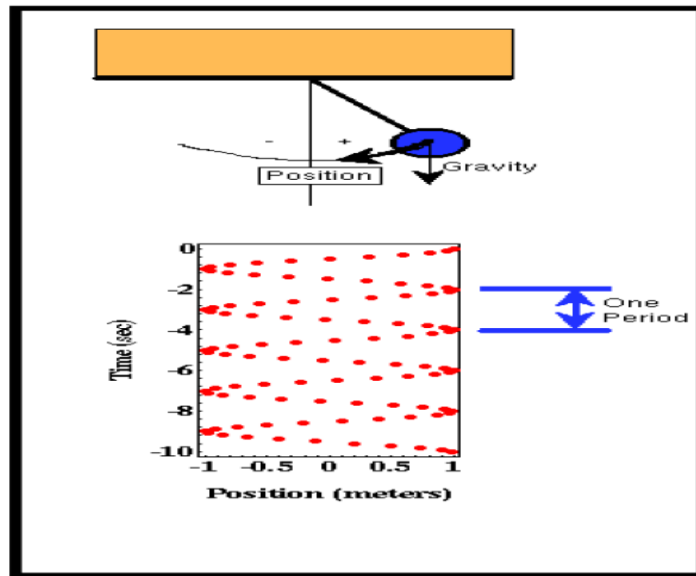
- 1) πτώση σώματος στο κενό και απευθείας μέτρηση της επιτάχυνσής του (η οποία οφείλεται αποκλειστικά στη βαρύτητα). (εικόνα 2.9).



Εικόνα 2.9: Μέτρηση βαρύτητας με ελεύθερη πτώση (πηγή: Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics by R. E. Sheriff)

2) Από τη περίοδο κίνησης ιδανικού εκκρεμούς (εικόνα 2.10) σύμφωνα με τον τύπο :

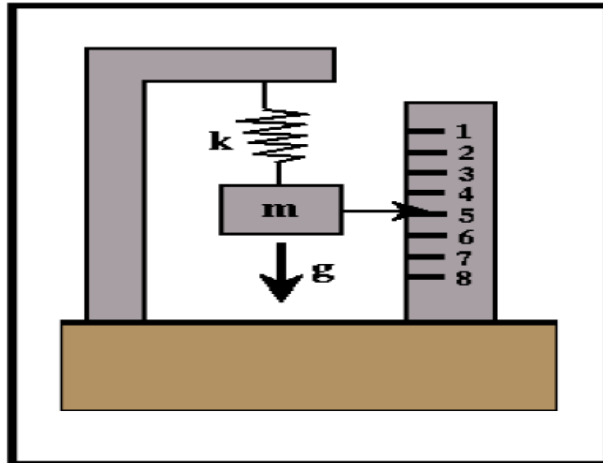
$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{K}{g}}, \quad (2.26)$$



Εικόνα 2.10: Μέτρηση Βαρύτητας με Εκκρεμές (Πηγή: Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics by R. E. Sheriff)

3) Από τη κίνηση ελατηρίου στο οποίο προσαρμόζεται μία μάζα και όλο το σύστημα βρίσκεται σε κενό αέρα με συγκεκριμένη θερμοκρασία.(εικόνα 2.11). Ο υπολογισμός γίνεται με τη βοήθεια του τύπου :

$$x = \frac{m \cdot g}{k}, \quad (2.27)$$



Εικόνα 2.11: Μέτρηση βαρύτητας με ελατήριο (πηγή: Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics by R. E. Sheriff)

Η ελεύθερη πτώση βρίσκει εφαρμογή στα απόλυτα βαρυτήμετρα ενώ το ελατήριο στα σχετικά βαρυτήμετρα. Προφανώς για να μπορέσουμε να παρατηρήσουμε τις διαφορές βαρύτητας οι οποίες είναι πολύ μικρές σε κάθε τόπο, θα πρέπει τα όργανα που θα χρησιμοποιηθούν να παρέχουν σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας ελατηρίου, κενό αέρος και ιδιαίτερα ευαίσθητους αισθητήρες. Στο εμπόριο δεν υπάρχουν πολλές εταιρείες που κατασκευάζουν τέτοια όργανα. (R. E. Sheriff)

2.6.3 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΒΑΡΥΤΗΜΕΤΡΩΝ

Ο σκοπός αυτού του υποκεφαλαίου είναι να παρουσιάσει αναλυτικότερα τις βασικές φυσικές αρχές που αναφέρθηκαν παραπάνω πάνω στις οποίες στηρίζεται η λειτουργία των διαφόρων οργάνων και μετρητικών διατάξεων που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της έντασης της βαρύτητας της Γης. Η κύρια πρόθεση είναι η παρουσίαση και η επεξήγηση βασικών σημαντικών μαθηματικών σχέσεων που οδήγησαν στην εξέλιξη των μεθόδων που χρησιμοποιούνται ακόμα και σήμερα στα σύγχρονα βαρυτημετρικά όργανα.

Από την πρακτική εμπειρία είναι ευρέως γνωστό ότι εάν αγνοηθούν τα αποτελέσματα της αντίστασης αέρα, οποιοδήποτε αντικείμενο που πέφτει κοντά στη γήινη επιφάνεια θα κινηθεί με τη σταθερή επιτάχυνση g , όπου g είναι η ένταση της βαρύτητας που κατά προσέγγιση έχει την τιμή $9,81 \text{ m/s}^2 (=981 \text{ cm/s}^2)$ κοντά στην επιφάνεια της Γης, ενώ η κατεύθυνση του διανύσματος g της βαρύτητας είναι προς το κέντρο της Γης.

Η μέτρηση της έντασης βαρύτητας g , ένα σημείο της γήινης επιφάνειας ή πάνω από αυτή μπορεί να εκτελεσθεί άμεσα ή έμμεσα. Στην πρώτη περίπτωση μετράται η απόλυτη τιμή της έντασης της βαρύτητας σε ένα συγκεκριμένο σημείο, ενώ στη δεύτερη περίπτωση μετράται η σχετική τιμή της, δηλαδή η διαφορά των τιμών της βαρύτητας σε δύο διαφορετικά σημεία, π.χ. P και Q. Στην δεύτερη περίπτωση, γνωρίζοντας τη βαρυτημετρική διαφορά $\Delta g_{PQ} = g_Q - g_P$, η τιμή της βαρύτητας σε ένα άγνωστο σημείο Q μπορεί να υπολογισθεί εύκολα ως $g_Q = g_P + \Delta g_{PQ}$ σε σχέση με τη γνωστή τιμή της βαρύτητας στο γνωστό σημείο P. Οι διαδικασίες μέτρησης της σχετικής (διαφοράς της) βαρύτητας μεταξύ σημείων είναι πολύ ευκολότερες από την διαδικασία μέτρησης της απόλυτης τιμής του g .

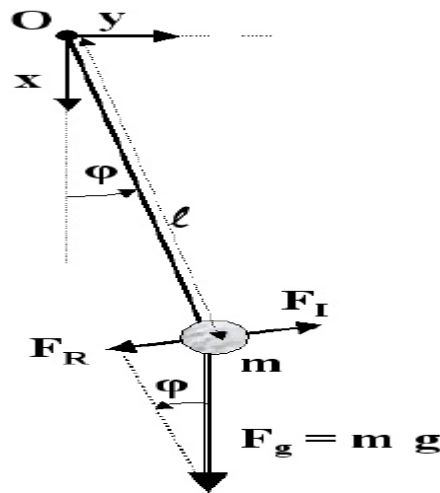
Δεδομένου ότι η τιμή της έντασης της βαρύτητας g εκφράζει την επιτάχυνση κάθε σημειακής μάζας κάτω από την επίδραση της έλξης της Γης και της φυγόκεντρου δύναμης που προκαλείται από την περιστροφή της, η κύρια μέθοδος που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της βαρύτητας βασίζεται ουσιαστικά στην ακριβή μέτρηση του μήκους και του χρόνου. Η κυριότερη δυσκολία αποτελεί το γεγονός ότι είναι εξαιρετικά δύσκολο να κατασκευαστούν όργανα τα οποία να μπορούν μετρήσουν μεταβολές της βαρύτητας της τάξης του 40 ppm που αποτελεί και το τυπικό ζητούμενο από τις γεωφυσικές διασκοπήσεις. Υπάρχουν ωστόσο, μια σειρά μεθόδων που επιτρέπουν κάτι τέτοιο με τη βοήθεια ευαίσθητων οργάνων και αισθητήρων, όπως διατάξεις έμμεσης μέτρησης της βαρύτητας που βασίζονται στις φυσικές αρχές:

- της ταλάντωσης εκκρεμών,
- της ελεύθερης πτώσης σωμάτων και
- της παραμόρφωσης ελατηρίων. (Δ.Δεληκαράογλου 2003)

2.6.3.1 ΟΡΓΑΝΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗ ΕΚΚΡΕΜΩΝ.

Η αρχή της ταλάντωσης ενός εκκρεμούς είναι από τις παλαιότερες αρχές της φυσικής που χρησιμοποιήθηκε για τον έμμεσο προσδιορισμό της απόλυτης τιμής της βαρύτητας. Ήδη από το 1583 ο Galileo ήταν ο πρώτος που μελέτησε την κίνηση των εκκρεμών καταδεικνύοντας περί το 1602 την λεγόμενη αρχή του “ισοχρονισμού των εκκρεμών” ότι η *περίοδος ταλάντωσης* ενός εκκρεμούς είναι ανεξάρτητη από το *έυρος της ταλάντωσης*.

Στην απλούστερη περίπτωση, ένα υλικό σημείο γνωστής μάζας m αιωρείται από ένα σταθερό σημείο O , δια μέσου ενός αβαρούς νήματος μήκους l , και ταλαντώνεται με ένα κανονικό ρυθμό εκατέρωθεν της θέσης ηρεμίας του (κατά την διεύθυνση της κατακόρυφου) σε ένα επίπεδο κάθετο στον οριζόντιο άξονα περιστροφής στο σημείο O . Η σχετική παράμετρος που περιγράφει αυτήν την ταλάντωση είναι γνωστή ως *περίοδος ταλάντωσης*, που εκφράζει τον χρόνο που απαιτείται για το εκκρεμές να ολοκληρώσει έναν κύκλο της κίνησης, δηλαδή τον χρόνο που απαιτείται μέχρι η αιωρούμενη μάζα να ανακαταλάβει την ίδια θέση στο χώρο κατά την κίνηση της.



Εικόνα 2.12: Αρχή του μαθηματικού εκκρεμούς.

Ο λόγος που το εκκρεμές ταλαντώνεται εκατέρωθεν της κατακόρυφου είναι ότι, μόλις η μάζα μετατοπίζεται από την κατακόρυφο, η δύναμη της βαρύτητας την τραβά προς τα κάτω και σαν αποτέλεσμα το εκκρεμές αρχίζει να κινείται προς τα κάτω. Όταν το εκκρεμές φθάνει στην κατακόρυφο δεν μπορεί να σταματήσει στιγμιαία και η μάζα συνεχίζει την κίνηση της προς την αντίθετη κατεύθυνση. Η δύναμη της βαρύτητας την επιβραδύνει μέχρις ότου η ταχύτητα της αιωρούμενης μάζας μηδενίζεται, η δύναμη της βαρύτητας την τραβά πάλι προς τα κάτω και αρχίζει να πέφτει πάλι. Εάν δεν υπάρχει καμία τριβή στο σημείο από όπου αιωρείται η μάζα του εκκρεμούς και η αντίσταση του αέρα δεν επιδρούσε στην κίνηση του εκκρεμούς, αυτό θα συνέχιζε την κίνηση (ταλάντωση) του επ' αόριστο. Ωστόσο αυτό δεν συμβαίνει στην πράξη και κυρίως λόγω της τριβής που προκαλεί η αντίσταση του αέρα, η ταλάντωση φθίνει προοδευτικά, ελαττώνοντας την περίοδο της. Σύμφωνα με τους νόμους του Newton, η δύναμη αδράνειας F_I (δηλ., μάζα \times επιτάχυνση) πρέπει να είναι ίση με την ασκούμενη δύναμη F_R . Στην περίπτωση μας, η ασκούμενη δύναμη F_R προκαλείται από την ελκτική δύναμη F_g εξ αιτίας της βαρύτητας g . Από τη γεωμετρία του προβλήματος (όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα), είναι σαφές ότι:

$$F_R = -F_g \cdot \sin \varphi = -m \cdot g \cdot \sin \varphi, \quad (2.28)$$

όπου φ είναι η γωνία απόκλισης του εκκρεμούς από την κατακόρυφο και το αρνητικό πρόσημο υποδηλώνει ότι η ασκούμενη δύναμη F_R προσπαθεί να επαναφέρει τη μάζα m στην θέση ηρεμίας της (δηλ. στη θέση όπου $\varphi = 0$). Η μέγιστη τιμή φ_{\max} που λαμβάνει η γωνία απόκλισης του εκκρεμούς ορίζει το εύρος της ταλάντωσης.

Στη συνέχεια είναι απαραίτητο να εκφρασθεί η δύναμη αδράνειας F_I ως συνάρτηση της γωνίας φ . Συνήθως θεωρείται ότι το εκκρεμές είναι σταθερού μήκους, έτσι ώστε η μάζα m μπορεί να κινηθεί μόνο κατά μήκος του κύκλου με ακτίνα λ . Επιπλέον η γωνία φ εκφράζεται σε ακτίνια, και η επιτάχυνση υπολογίζεται ως $\lambda d^2\varphi/dt^2$. Κατά συνέπεια από τον νόμο του Newton έχουμε:

$$F_I = \frac{m \cdot \lambda \cdot d^2\varphi}{dt^2} = -m \cdot g \cdot \sin\varphi, \quad (2.29)$$

από όπου προκύπτει η εξίσωση κίνησης ενός “ιδανικού” ή “μαθηματικού” εκκρεμούς

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + \omega_0^2 \cdot \sin\varphi = 0, \quad (2.30)$$

όπου:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{\lambda}}, \quad (2.31)$$

είναι η συχνότητα της ταλάντωσης του εκκρεμούς. Η παραπάνω εξίσωση της κίνησης του εκκρεμούς είναι διαφορική εξίσωση δευτέρου βαθμού ως προς τη γωνία ταλάντωσης φ . Κατά συνέπεια, η λύση της απαιτεί τον καθορισμό δύο παραμέτρων: την τιμή της γωνίας ταλάντωσης φ και τη γωνιακή ταχύτητα

του εκκρεμούς σε μια συγκεκριμένη στιγμή. Οι δύο αυτοί παράμετροι καθορίζουν την δυναμική κατάσταση του συγκεκριμένου εκκρεμούς. Επιπλέον, η εν λόγω εξίσωση κίνησης είναι μη γραμμική δεδομένου ότι ο δεύτερος όρος εξαρτάται μη γραμμικά από τη γωνία ταλάντωσης φ .

Είναι αξιοσημείωτο ότι η μάζα του εκκρεμούς δεν υπεισέρχεται στην παραπάνω εξίσωση κίνησης του εκκρεμούς, κάτι που παρατήρησε πρώτος ο Galileo πειραματιζόμενος με το εργαστηριακό εκκρεμές που κατασκεύασε και οδηγήθηκε στον υπολογισμό της τιμής της έντασης της βαρύτητας. Επιπλέον, από την άποψη των νόμων του Newton, δεν είναι απαραίτητο η αδρανής μάζα (δηλ. η μάζα m που σχετίζεται με τη δύναμη F_I) να είναι ίση με την ελκτική μάζα (δηλ. η μάζα m που σχετίζεται με τη δύναμη F_g), γεγονός που ώθησε τον Einstein να διατυπώσει την αρχή της ισοδυναμίας της αδρανειακής και της ελκτικής μάζας, που αναπόφευκτα τον οδήγησε στην Γενική Θεωρία της Σχετικότητας, μέσα από την οποία παρέχεται μια πληρέστερη κατανόηση της σημασίας και του ρόλου της βαρύτητας.

Η έννοια του ιδανικού εκκρεμούς υποδηλώνει ότι η κίνηση του εκκρεμούς δεν επηρεάζεται π.χ. από της τριβές του αέρα. Από τα παραπάνω είναι εύκολα κατανοητό ότι για μικρές μετατοπίσεις, η μετακίνηση ενός ιδανικού εκκρεμούς μπορεί να περιγραφεί από μαθηματική άποψη όπως η απλή αρμονική κίνηση, δεδομένου ότι η αλλαγή στην δυναμική ενέργεια στο κατώτατο σημείο του κυκλικού τόξου της ταλάντωσης είναι σχεδόν ανάλογη προς το τετράγωνο της μετατόπισης της μάζας του εκκρεμούς. Τα πραγματικά εκκρεμή δεν διενεργούν απειροελάχιστες μετατοπίσεις, έτσι η συμπεριφορά τους είναι πραγματικά μη γραμμική. Τα πραγματικά εκκρεμή χάνουν επίσης την ενέργεια καθώς ταλαντεύονται, και έτσι η κίνησή τους μετριάζεται, με αποτέλεσμα το μέγεθος της ταλάντωσης μειώνεται περίπου εκθετικά με το χρόνο. Μαθηματικά, η εν λόγω κίνηση ενός πραγματικού εκκρεμούς περιγράφεται από τη σχέση:

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{a \cdot d\varphi}{dt} + \omega_0 \cdot \sin\varphi = 0, \quad (2.32)$$

όπου a καλείται ο συντελεστής απόσβεσης της ταλάντωσης, που γενικά είναι εξαιρετικά δύσκολο να υπολογισθεί, δεδομένου ότι οι εκάστοτε δυνάμεις τριβής που ασκούνται στην αιωρούμενη μάζα (π.χ. αεροδυναμική αντίσταση, τριβή του νήματος στο σημείο πρόσδεσης, κ.ά.) μπορεί να εξαρτώνται από την ταχύτητα της κίνησης της και άλλες παραμέτρους με έναν περίπλοκο τρόπο. Ακόμα πιο πολύπλοκη γίνεται η περίπτωση που η ταλάντωση του εκκρεμούς προκαλείται μια περιοδικής μορφής δύναμη που εξασκείται στη μάζα του εκκρεμούς, οπότε η κίνηση του εκκρεμούς περιγράφεται από μια σχέση της μορφής:

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{a \cdot d\varphi}{dt} + \omega_0 \cdot \sin\varphi = \left(\frac{A}{l}\right) \cdot \omega_0 \cdot \cos 2\pi \cdot f \cdot t, \quad (2.33)$$

όπου A και f είναι αντίστοιχα το εύρος (μήκος) και η συχνότητα της περιοδικής μορφής της ασκούμενης δύναμης. Είναι επίσης δυνατόν, η ταλάντωση να προκληθεί από την επιταχυνόμενη ή κυκλική μετατόπιση του σημείου ταλάντωσης (κέντρου) του εκκρεμούς. Στη προκειμένη περίπτωση, η εξίσωση κίνησης του εκκρεμούς περιγράφεται από τη γενική σχέση της μορφής:

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{a \cdot d\varphi}{dt} + \omega_0^2 \cdot \sin\varphi = \frac{-d^2 \cdot (x/l)}{dt^2 \cdot \cos\varphi} + \frac{d^2 \cdot (y/l)}{dt^2 \cdot \sin\varphi}, \quad (2.34)$$

όπου $x_0(t)$, $y_0(t)$ είναι οι συντεταγμένες του κέντρου του εκκρεμούς. Στη προκειμένη περίπτωση, ανάλογα με τη μορφή των συναρτήσεων $x_0(t)$ και $y_0(t)$ μπορεί να χαρακτηρισθούν διαφορετικές περιοδικές μορφές της κίνησης του κέντρου του εκκρεμούς, Για παράδειγμα, ο συνδυασμός της μορφής $x_0(t) = A \cos(2\pi ft)$ και $y_0(t) = 0$ οδηγεί σε περιοδική οριζόντια κίνηση του κέντρου του εκκρεμούς. Αντίστοιχα ο συνδυασμός της μορφής $x_0(t) = 0$ και $y_0(t) = A \cos(2\pi ft)$ οδηγεί σε περιοδική κατακόρυφη κίνηση του κέντρου του εκκρεμούς, ενώ ο συνδυασμός της μορφής $x_0(t) = A \cos(2\pi ft)$ και $y_0(t) = A \cos(2\pi ft)$ οδηγεί σε κυκλική κίνηση του κέντρου του εκκρεμούς.

Σε κάθε περίπτωση, δεδομένου ότι η δύναμη της βαρύτητας είναι εκείνη που παράγει την ταλάντωση, είναι αναμενόμενο η περίοδος της ταλάντωσης να διαφέρει για τις διαφορετικές τιμές της βαρύτητας. Ειδικότερα, εάν η ένταση της βαρύτητας είναι μικρή, η δύναμη της βαρύτητας εξασκεί λιγότερο “τράβηγμα” στο εκκρεμές προς τα κάτω, και σαν αποτέλεσμα το εκκρεμές κινείται πιο αργά προς την κατακόρυφο, έτσι ώστε η παρατηρούμενη περίοδος ταλάντωσης είναι μεγαλύτερη. Κατά συνέπεια, με τη μέτρηση της περιόδου από την ταλάντωση ενός εκκρεμούς, μπορούμε να υπολογίσουμε την επιτάχυνση της βαρύτητας.

Στην περίπτωση ενός εκκρεμούς αποτελούμενο από μια σημειακή μάζα είναι εύκολο να αποδειχθεί ότι η περίοδος ταλάντωσης του εκκρεμούς, T , είναι ανάλογος προς το αντίστροφο της τετραγωνικής ρίζας της επιτάχυνσης της βαρύτητας, g .

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{k}{g}}, \quad (2.35)$$

όπου η σταθερά της αναλογικότητας, k , εξαρτάται από τα φυσικά χαρακτηριστικά του εκκρεμούς όπως το μήκος λ του νήματος από το οποίο αιωρείται η μάζα του σώματος και την αρχική μετατόπιση της μάζας του εκκρεμούς από την κατακόρυφο.

Στην πράξη, για να μετρηθεί η ένταση της βαρύτητας g , π.χ. με ζητούμενη ακρίβεια 1 μέρος στα 50 εκατομμύρια της τιμής του g (δηλαδή $\pm 0.5 \text{ mgal}$) απαιτείται μια πολύ ακριβής εκτίμηση της σταθεράς k του χρησιμοποιούμενου εκκρεμούς, γεγονός που είναι εξαιρετικά δύσκολο. Θεωρώντας το αιωρούμενο σώμα υλικό σημείο και για μικρές γωνίες ταλάντωσης ($< 15^\circ$) ως προς την κατακόρυφο, ισχύει $k = \lambda$, και η ταλάντωση θεωρείται ότι δεν επηρεάζεται από την μάζα του υλικού σημείου. Αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως συνέπεια της ισοδυναμίας της μάζας εξ αιτίας της βαρύτητας και της αδρανούς μάζας του αιωρούμενου σώματος του εκκρεμούς: ένα βαρύτερο σώμα απαιτεί μια ισχυρότερη δύναμη της βαρύτητας για να το επαναφέρει στη θέση ηρεμίας του, αλλά αφ' ετέρου έχει περισσότερη αδράνεια, έτσι ώστε τα δύο αποτελέσματα να ακυρώνονται. Για τυπικές γωνίες ταλάντωσης 10° το σφάλμα της παραπάνω σχέσης είναι της τάξης του 1 προς 500, ενώ για γωνίες ταλάντωσης 90° η παραπάνω σχέση δεν ισχύει δεδομένου ότι στην περίπτωση αυτή η μάζα παραμένει στιγμιαία ακίνητη, οπότε ισχύει $T = \infty$.

Κατά συνέπεια, από την παρατήρηση της περιόδου ταλάντωσης ενός εκκρεμούς γνωστού μήκους λ , θεωρητικά είναι δυνατόν να υπολογισθεί η στην ένταση της βαρύτητας g από τη σχέση:

$$T = \left(\frac{2\pi}{\omega_0} \right) = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{g}}, \quad (2.36)$$

που αποτελεί την εξίσωση κίνησης του λεγόμενου μαθηματικού εκκρεμούς, το οποίο προφανώς δεν υλοποιείται στην πράξη. Ωστόσο η εξίσωση αυτή ισχύει και για ένα φυσικό εκκρεμές, με τη μόνη διαφορά ότι το μήκος λ αντικαθιστάται από το ανηγμένο μήκος $\lambda_a = J_0 / ma$ του φυσικού εκκρεμούς, όπου J_0 είναι η ροπή αδρανείας σε σχέση με τον άξονα περιστροφής στο σημείο O , m είναι η μάζα του φυσικού εκκρεμούς και a είναι η απόσταση του σημείου O από το κέντρο μάζας του εκκρεμούς.

Από την σχέση που εκφράζει την περίοδο ταλάντωσης είναι εύκολο να υπολογισθεί η ευαισθησία της εν λόγω μεθόδου στην μέτρηση του χρόνου. Από την παράγωγο ως προς τον χρόνο προκύπτει ότι:

$$\frac{dg}{dT} = -\frac{2g}{T} \rightarrow \left| \frac{dg}{g} \right| = \left| 2 \cdot \frac{dT}{T} \right|, \quad (2.37)$$

που σημαίνει ότι για καλύτερη ακρίβεια στη μέτρηση του g απαιτείται μεγάλη τιμή για την περίοδο ταλάντωσης T (που αντίστοιχα απαιτεί μεγάλο μήκος l του εκκρεμούς). Στη πράξη, αυτό επιτυγχάνεται παρατηρώντας την ταλάντωση ενός δεδομένου εκκρεμούς για ένα εκτεταμένο χρονικό διάστημα tN και μετρώντας τον αριθμό των ταλαντώσεων N , έτσι ώστε η περίοδος ταλάντωσης υπολογίζεται από τη διαίρεση του συνολικού χρόνου της ταλάντωσης με τον αριθμό των ταλαντώσεων $T = tN / N$. Αυτό είναι τυπικά μια μορφή υπολογισμού του μέσου όρου της περιόδου ταλάντωσης, που οδηγεί σε καλύτερη εκτίμηση, όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των ταλαντώσεων που παρατηρούνται.

Γενικότερα η επίδραση των σφαλμάτων της μέτρησης του χρόνου και του μήκους l του εκκρεμούς στην τιμή της βαρύτητας που υπολογίζεται από την ταλάντωση ενός εκκρεμούς εκφράζεται από τη σχέση:

$$\left(\frac{dg}{g} \right) = \left(\frac{dl}{l} \right) - 2 \left(\frac{dT}{T} \right), \quad (2.38)$$

Από αυτή τη σχέση, υπολογίζεται εύκολα ότι αν στην πράξη επιζητείται η μέτρηση της έντασης της βαρύτητας με ακρίβεια $\pm 10^{-7} g = 0.1 \text{ mgal}$, η ακρίβεια μέτρησης του l μήκους 1 m πρέπει να είναι της τάξης $\pm 0.1 \mu\text{m}$ (δηλ. $\lambda \times 10^{-7}$), και η ακρίβεια στη μέτρηση της αντίστοιχης περιόδου ταλάντωσης $T = 2 \text{ sec}$ πρέπει να είναι της τάξης του 10^{-7} sec ($=0.1 \mu\text{sec}$).

Από τα τέλη του 18^{ου} αιώνα και μέχρι τα μέσα του 20^{ου} αιώνα, ουσιαστικά όλες οι μετρήσεις της απόλυτης τιμής της βαρύτητας έγιναν χρησιμοποιώντας κάποιο τύπο συσκευών βασισμένων στην αρχή της ταλάντωσης εκκρεμών. Σε όλες τις περιπτώσεις, κατά τη διάρκεια της κατασκευής των εκκρεμών και στην τεχνολογία των εκάστοτε μετρητικών διατάξεων, καθώς και κατά την αναγωγή των μετρήσεων κυριαρχούσε η προσπάθεια να κρατηθούν οι διαφορετικές πηγές σφαλμάτων όσο το δυνατόν μικρότερες, λαμβάνοντας υπόψη την μέχρι τότε γνώση της θεωρίας και της τεχνολογίας. Ο πιο συνηθισμένος ο τύπος τέτοιων συσκευών περιείχε διάφορα εκκρεμή που ταλαντευόταν χρησιμοποιώντας κάποιο βάρος αιωρούμενο από ένα μη διασταλτό μεταλλικό σύρμα. Το 1818, ο βρετανός φυσικός Henry Kater

ανέπτυξε το αποκαλούμενο “αντιστρέψιμο εκκρεμές”, αποτελούμενο από μια μεταλλική ράβδο με δύο μεταλλικά βάρη στα δύο της άκρα, που μπορούσε να τεθεί σε ταλάντευση αιωρούμενο από οποιαδήποτε από τα δύο άκρα. Στην περίπτωση αυτή, μετατοπίζοντας κατάλληλα το μικρότερο βάρος, το ανηγμένο μήκος του αντιστρεπτού εκκρεμούς υπολογίζεται ως η απόσταση μεταξύ των δύο σημείων εξάρτησης του, τα οποία επιλέγονται με τέτοιο τρόπο ώστε, όταν το εκκρεμές ταλαντώνεται από το ένα ή το άλλο άκρο του, η περίοδος ταλάντωσης του εκκρεμούς παραμένει η αυτή. Με τον τρόπο αυτό, κατά τη διάρκεια των μετρήσεων απαλείφονται σημαντικές πηγές σφαλμάτων. Αξίζει να σημειωθεί ότι μια μακρά σειρά μετρήσεων με αναστρέψιμα εκκρεμή χρησιμοποιήθηκαν συστηματικά κατά την περίοδο 1898-1904 για τη μέτρηση της βαρύτητας στο Pendulum Hall του Ινστιτούτου Γεωδαισίας του Potsdam (Γερμανία). Αυτές οι πρώτες μετρήσεις οδήγησαν στο πρώτο πλαίσιο αναφοράς (*gravity datum*) της βαρύτητας και αργότερα στην υλοποίηση του πρώτου Παγκόσμιου Δικτύου της Βαρύτητας.



Εικόνα 2.13: Αντιστρέψιμο Εκκρεμές του Henry Kater (Α.Δεληκαράογλου 2003).

Σχετικές μετρήσεις της βαρύτητας είναι δυνατές με τη λειτουργία ενός εκκρεμούς σε δύο διαφορετικά σημεία. Υπό την προϋπόθεση ότι το μήκος του εκκρεμούς παραμένει αμετάβλητο μεταξύ των μετρήσεων στα δύο σημεία, αν οι περίοδοι ταλάντωσης μετρηθούν σε δύο διαφορετικά σημεία P και Q, μπορεί εύκολα ναδειχθεί ότι η σχετική βαρύτητα μεταξύ των δύο σημείων εκφράζεται από τη σχέση:

$$\Delta g_{PQ} = g_Q - g_P = - 2 g_P \left[\frac{(T_Q - T_P)}{T_P} \right] + g_P \left[\frac{(T_Q - T_P)}{T_P} \right]^2, \quad (2.39)$$

η οποία είναι ανεξάρτητη από το μήκος λ του εκκρεμούς, που υπεισέρχεται στην περίπτωση της εκάστοτε απόλυτης μέτρησης g_Q ή g_P .

Αν η τιμή της βαρύτητας είναι γνωστή στο σημείο P, με την βοήθεια της παραπάνω σχέσης μπορεί να υπολογισθεί η τιμή της βαρύτητας από τις μετρήσεις T_P , T_Q της περιόδου ταλάντωσης του εκκρεμούς στα εν λόγω σημεία. Στην προκειμένη περίπτωση, τα οποιαδήποτε συστηματικά σφάλματα τα οποία είναι ανεξάρτητα από τη θέση και το χρόνο απαλείφονται με την παραπάνω διαδικασία των σχετικών μετρήσεων. Στην πράξη, αν επιζητείται η μέτρηση της σχετικής έντασης της βαρύτητας με ακρίβεια $\pm 10^{-7}g = 0.1 \text{ mgal}$, η σχετική ακρίβεια που απαιτείται για τη μέτρηση του χρόνου πρέπει να είναι καλύτερη από $\pm 5 \times 10^{-8}\text{sec}$, που αντίστοιχα απαιτεί το μήκος λ του χρησιμοποιούμενου εκκρεμούς να διατηρείται σταθερό με ακρίβεια $\pm 10^{-7} \lambda$ μεταξύ των μετρήσεων στα δύο σημεία.

Σήμερα οι προαναφερόμενες ακρίβειες μπορούν να επιτευχθούν από κατάλληλες μετρητικές διατάξεις που βασίζονται σε συμβολόμετρα για τις μετρήσεις απόστασης και σε ηλεκτρονικά χρονόμετρα για τις μετρήσεις του χρόνου. Τυπικά η ακρίβεια που επιτυγχάνεται στη μέτρηση της

απόλυτης έντασης της βαρύτητας από μετρητικές διατάξεις που βασίζονται στη μέθοδο της ταλάντωσης εκκρεμών είναι της τάξης του ± 0.3 mgal. (Δ. Δεληκαράογλου 2003)

2.6.3.2 ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΛΕΥΘΕΡΗ ΠΤΩΣΗ ΤΩΝ ΣΩΜΑΤΩΝ

Ακόμα και σήμερα, οι μετρήσεις της απόλυτης βαρύτητας με εκκρεμή επιβαρύνονται με πολυάριθμα προβλήματα και πηγές σφαλμάτων που καθιστούν τα αποτελέσματα τους όχι αρκετά ακριβή για να ικανοποιήσουν τις σύγχρονες γεωδαιτικές ανάγκες. Για αυτό το λόγο, τα τελευταία χρόνια, οι μέθοδοι που βασίζονται στην ταλάντωση εκκρεμών έχουν κατά κανόνα εκτοπιστεί από τις λεγόμενες βαλλιστικές μεθόδους μέτρησης της επιτάχυνσης της βαρύτητας που βασίζονται στην παρατήρηση της ελεύθερης πτώσης σωμάτων.

Η επιτάχυνση της βαρύτητας μπορεί να μετρηθεί άμεσα με τη ρίψη ενός αντικειμένου και τη μέτρηση της επιτάχυνσης (δηλαδή του χρονικού ποσοστού αλλαγής της ταχύτητας) του εν λόγω σώματος καθώς πέφτει από ένα δεδομένο ύψος. Ιστορικά, η μέθοδος αυτή αποδίδεται στον Ιταλό μαθηματικό και αστρονόμο Galileo, ο οποίος διεξήγαγε τα γνωστά πειράματα του, ρίπτοντας από τον κεκλιμένο Πύργο της Πίζας αντικείμενα ποικίλης μάζας, προσπαθώντας να διαπιστώσει αν η επιτάχυνση βαρύτητας που ένα αντικείμενο υποβάλλεται είναι ανεξάρτητη από τη μάζα του, που τελικά λέγεται ότι τον οδήγησαν και στο να υπολογίσει την τιμή της επιτάχυνσης βαρύτητας. Στην πραγματικότητα ωστόσο ο Γαλιλαίος κατέληξε σε αυτό τον υπολογισμό, όχι από τα πειράματα του της πτώσης των αντικειμένων, αλλά χρησιμοποιώντας μετρήσεις βασισμένες στα εκκρεμή, όπως η μεθοδολογία που αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα.

Από τις θεμελιώδεις αρχές της φυσικής, είναι γνωστό ότι, σε μια διάσταση, η μέση ταχύτητα ενός κινούμενου σώματος, μέσα σε ένα χρονικό διάστημα είναι το πηλίκο της απόστασης που διανύει το σώμα μεταξύ μιας αρχικής $S_{αρχ}$ και μιας τελικής θέσης $S_{τελ}$ και του αντίστοιχου χρόνου που απαιτείται για να διανύσει την εν λόγω απόσταση μεταξύ των δύο θέσεων, δηλαδή:

$$v_{ave} = \frac{\Delta S}{\Delta t}, \quad (2.40)$$

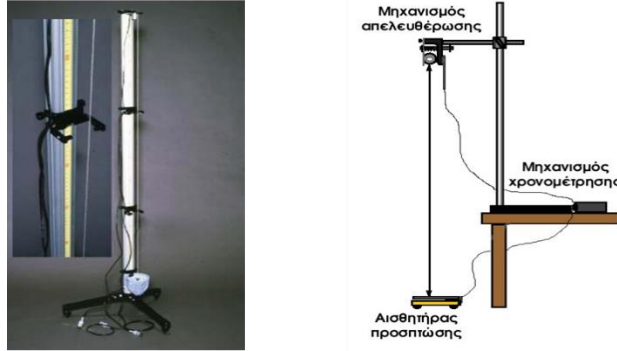
όπου $\Delta S = S_{τελ} - S_{αρχ}$ και $\Delta t = t_{τελ} - t_{αρχ}$. Η στιγμιαία ταχύτητα σε ένα σημείο ορίζεται ως το όριο αυτής της αναλογίας δεδομένου ότι το χρονικό διάστημα γίνεται πολύ μικρό:

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{dS}{dt}, \quad (2.41)$$

Ως εκ τούτου, η ταχύτητα δίνεται από την κλίση της εφαπτομένης της συνάρτησης της απόσταση ως προς το χρόνο. Εάν η ταχύτητα του αντικειμένου ήταν σταθερή η κλίση θα ήταν σταθερή, και η καμπύλη θα ήταν μια ευθεία γραμμή. Αυτό δεν είναι προφανώς η περίπτωση για ένα σώμα σε ελεύθερη πτώση, δεδομένου ότι το σώμα είναι αρχικά εν στάση και έχει διαφορετικές από το μηδέν ταχύτητες στις μετέπειτα χρονικές στιγμές της πτώσης του.

Όταν η ταχύτητα ενός σώματος ποικίλλει, η κίνηση λέγεται ότι είναι επιταχυνόμενη και η μέση επιτάχυνση για ένα χρονικό διάστημα είναι το πηλίκο της αλλαγής της στιγμιαίας ταχύτητας και του χρόνου που απαιτείται για την εν λόγω αλλαγή:

$$a_{ave} = \frac{\Delta v}{\Delta t}, \quad (2.42)$$



Εικόνα 2.14: Τυπική μετρητική διάταξη υπολογισμού της έντασης της βαρύτητας g από την ελεύθερηπτώση σωμάτων (αριστερά) και σχηματικά η βασική αρχή των μετρήσεων (δεξιά). (Δ.Δεληκαράογλου 2003).

όπου $\Delta v = v_{τελ} - v_{αρχ}$. Η στιγμιαία επιτάχυνση καθορίζεται με τον ίδιο τρόπο όπως η στιγμιαία ταχύτητα ως:

$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt}, \quad (2.43)$$

Στην περίπτωση που η επιτάχυνση είναι σταθερά, δηλαδή $a = \text{σταθερά}$, το εν λόγω σώμα επιτελεί τις ίδιες αλλαγές της ταχύτητας σε ίσα διαστήματα του χρόνου, και με άλλα λόγια παρουσιάζει ομοιόμορφα επιταχυνόμενη κίνηση. Αυτός ο τύπος κίνησης παράγεται όταν η ασκούμενη δύναμη επάνω σε ένα σώμα είναι σταθερή. Στη προκειμένη περίπτωση, της κίνησης ενός σώματος που πέφτει ελεύθερα στο κενό, η επιτάχυνση του σώματος αποτελεί την ένταση της βαρύτητας g , που κατά προσέγγιση έχει την τιμή $9,81 \text{ m/s}^2$ ($= 981 \text{ cm/s}^2$) κοντά στην επιφάνεια της Γης.

Για την ομοιόμορφα επιταχυνόμενη κίνηση ($a = \text{σταθερά}$), η παραπάνω σχέση για τη στιγμιαία επιτάχυνση μπορεί να εκφραστεί διαφορετικά από τη σχέση:

$$dv = a \cdot dt, \quad (2.44)$$

και αν η σχέση αυτή ολοκληρωθεί για το χρονικό διάστημα από το t_0 στο t , όπου οι αντίστοιχες ταχύτητες είναι v_0 και v , το αποτέλεσμα είναι :

$$v = v_0 + a \cdot (t - t_0), \quad (2.45)$$

ή

$$v = a \cdot t + \text{σταθερά}, \quad (2.46)$$

Με άλλα λόγια, η γραφική παράσταση της ταχύτητας ως συνάρτηση του χρόνου είναι μια ευθεία γραμμή, η κλίση της οποίας είναι η επιτάχυνση, a .

Από τα παραπάνω είναι εύκολο να δειχτεί ότι η απόσταση s που διανύει ένα σώμα σε ελεύθερη πτώση είναι ανάλογη προς το τετράγωνο του χρόνου t της πτώσης του και δίδεται από τη σχέση:

$$S = v_0 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2, \quad (2.47)$$

όπου v_0 είναι η αρχική ταχύτητα του σώματος και η σταθερά αναλογικότητας είναι στη προκειμένη περίπτωση η επιτάχυνση της βαρύτητας, g . Επομένως, με την ακριβή μέτρηση των αποστάσεων και των χρόνων καθώς ένα σώμα είναι σε ελεύθερη πτώση, είναι δυνατό να υπολογιστεί η επιτάχυνση της βαρύτητας. Συγκεκριμένα αν και οι δύο πλευρές της εξίσωσης διαιρεθούν με το χρόνο t , προκύπτει ότι:

$$\frac{S}{t} = v_0 + \frac{1}{2} \cdot g \cdot t, \quad (2.48)$$

Κατά συνέπεια, η γραφική παράσταση του λόγου S/t , ως συνάρτηση του χρόνου t , εκφράζει μια ευθεία γραμμή της οποίας η κλίση είναι ίση με $\frac{1}{2} g$.

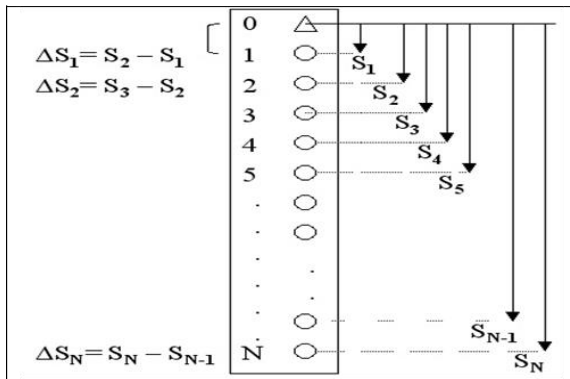
Στη πράξη, για την κίνηση με τη σταθερή επιτάχυνση, η μέση ταχύτητα μεταξύ δύο σημείων της πτώσης του αντικειμένου είναι ίση με τη στιγμιαία ταχύτητα στο μεσαίο σημείο του διαστήματος που διανύεται. Δηλαδή η μέση ταχύτητα μεταξύ του t_0 και του t είναι ίση με τη στιγμιαία ταχύτητα στο μεσαίο σημείο, δηλαδή κατά τη χρονική στιγμή $(t_0 - t)/2$. Αυτό το γεγονός είναι σημαντικό επειδή μόνο οι μέσες ταχύτητες καθορίζονται πειραματικά, όπως φαίνεται σχηματικά και στο επόμενο σχήμα.

Η μεθοδολογία τέτοιων μετρήσεων αποτελεί ουσιαστικά μια μοντέρνα παραλλαγή του πειράματος του Γαλιλαίου από τον Πύργο της Πίζας. Χρησιμοποιώντας κατάλληλες μετρητικές διατάξεις στο εργαστήριο, αν παρατηρήσουμε την πτώση του αντικειμένου σε διαδοχικές θέσεις (επίπεδα), που αντιστοιχούν στις διαδοχικές χρονικές στιγμές Δt , $2\Delta t$, $3\Delta t$, ..., $N \Delta t$ από την έναρξη της πτώσης, έχουμε:

$$S_1(t_1 = \Delta t), S_2(t_2 = 2\Delta t), S_3(t_3 = 3\Delta t), \dots, S_8(t_8 = 8\Delta t), \dots, S_N(t = N\Delta t), \quad (2.49)$$

όπου $S(t)$ είναι η απόσταση κάθε θέσης του αντικειμένου από το αρχικό σημείο αναφοράς. Η μέση ταχύτητα του αντικειμένου στα ενδιάμεσα διαστήματα κατά την πτώση του υπολογίζεται εύκολα από σχέσεις της μορφής:

$$\begin{aligned}
v_1 \left(\frac{\Delta t}{2} \right) &= \frac{S(\Delta t) - S(0)}{\Delta t} \\
v_2 \left(\frac{3\Delta t}{2} \right) &= \frac{S(2\Delta t) - S(\Delta t)}{\Delta t} \\
v_3 \left(\frac{5\Delta t}{2} \right) &= \frac{S(3\Delta t) - S(2\Delta t)}{\Delta t} \\
&\dots\dots \\
v_N \left(\frac{N\Delta t}{2} \right) &= \frac{S(N\Delta t) - S((N-1) \cdot \Delta t)}{\Delta t}
\end{aligned} \tag{2.50}$$



Εικόνα 2.15: Το πείραμα του Galileo και η σχηματική μεθοδολογία μέτρησης της βαρύτητας από την ελεύθερη πτώση ενός σώματος. (Α.Δεληκαράογλου 2003).

Αν η επιτάχυνση του αντικειμένου είναι σταθερή, οι εν λόγω μέσες τιμές της ταχύτητας πτώσης θα είναι ακριβώς ίσες με τις στιγμιαίες ταχύτητες στο κάθε μεσο- διάστημα. Η γραφική παράσταση τους θα είναι όπως ήδη αναφέρθηκε μια ευθεία γραμμή, η κλίση της οποίας είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας, g . Με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων μπορεί να υπολογισθούν εύκολα ο σταθερός συντελεστής b της εν λόγω ευθείας και η πειραματική τιμή του g , αντίστοιχα από τις σχέσεις:

$$b = v_0 = \frac{(\sum_i t_i^2) \cdot (\sum_i v_i) - (\sum_i t_i) \cdot (\sum_i t_i \cdot v_i)}{N \cdot \sum_i t_i^2 - (\sum_i t_i)^2} \tag{2.51}$$

$$g = \frac{N \cdot \sum_i t_i \cdot v_i - (\sum_i t_i) \cdot (\sum_i v_i)}{N \cdot \sum_i t_i^2 - (\sum_i t_i)^2} \tag{2.52}$$

Σε αναλογία με την περίπτωση των εκκρεμών, η επίδραση των σφαλμάτων της μέτρησης του χρόνου t και της απόστασης S στην τιμή της βαρύτητας που υπολογίζεται από την ελεύθερη πτώση του σώματος εκφράζεται από τη σχέση:

$$\frac{dg}{g} = \frac{dS}{S} - 2 \cdot \left(\frac{dt}{t} \right), \quad (2.53)$$

Από τη σχέση αυτή συνάγεται εύκολα ότι για να μετρήσουμε, με τις εν λόγω μεθόδους, τις αλλαγές στη επιτάχυνση της βαρύτητας με ακρίβεια καλύτερη από 1 μέρος σε 100 εκατομμύρια της τιμής του g (δηλαδή $\pm 0.01 \times 10^{-5} \text{m/sec}^2$ ή $\pm 0.01 \text{ mgal}$), χρησιμοποιώντας μια μετρητική διάταξη που να επιτρέπει την πτώση του αντικειμένου κατά 1 m, πρέπει να είμαστε σε θέση να μετρήσουμε τις αλλαγές στην απόσταση που διανύει το αντικείμενο με ακρίβεια καλύτερη από $\pm 0.01 \mu\text{m}$ και τις αλλαγές στο χρόνο με ακρίβεια καλύτερη από $\pm 2 \times 10^{-8} \text{sec}$ ($= \pm 20 \text{ nsec}$). Παρόλο που αυτά τα επίπεδα ακρίβειας είναι εξαιρετικά υψηλά, σήμερα έχουν σχεδιασθεί όργανα που βασίζονται στην εν λόγω μεθοδολογία και επιτρέπουν τη ακριβή μέτρηση της απόστασης (με τη τεχνολογία των λέιζερ) και του χρόνου (με ατομικά χρονόμετρα) και την αντίστοιχη μέτρηση της έντασης της βαρύτητας με ακρίβεια καλύτερη από 1 microgal (0,001 mgals), που αντιστοιχεί σε μια ακρίβεια μέτρησης σχεδόν 1 μέρους σε 1 δισεκατομμύριο!!.

Στην παραπάνω φυσική αρχή και μεθοδολογία βασίζονται σήμερα τα απόλυτα βαρυτήμετρα τα οποία θα εξετασθούν αναλυτικότερα σε επόμενη ενότητα. (Δ.Δεληκαράογλου 2003).

2.6.3.3 ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΕΛΑΤΗΡΙΩΝ.

Η μέτρηση της σχετικής τιμής της βαρύτητας είναι επίσης δυνατή από τη χρήση απλών μετρητικών διατάξεων που βασίζονται στην παραμόρφωση ελατηρίων στην άκρη των οποίων κρέμεται μια μάζα m . Τα όργανα αυτά προσφέρουν μεγαλύτερη ακρίβεια και ταχύτητα μέτρησης. Στην πλέον απλή περίπτωση που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (2.15), παρατηρείται σε διάφορες χρονικές στιγμές t η θέση $x(t)$ της μάζας κατά μήκος του κατακόρυφου άξονα, όταν η μάζα απομακρύνεται από τη θέση ισορροπίας της x_0 και θεωρώντας ως θετική την κίνηση προς τα κάτω. Στη θέση ισορροπίας της εν λόγω μάζας ισχύει $x_0(t=0) = 0$ και $dx/dt = 0$. Αγνοώντας αρχικά οποιουδήποτε εξωτερικούς παράγοντες, όπως η αντίσταση στην κίνηση λόγω του περιβάλλοντος μέσου, όπως ο αέρας ή κάποιο υγρό μέσα στο οποίο κινείται το ελατήριο, οι μόνες δυνάμεις που ενεργούν στη μάζα του ελατηρίου είναι η δύναμη της βαρύτητας F_g , η οποία συμβάλει στη κίνηση του ελατηρίου με ένα όρο mg και μια δύναμη F_H που προσπαθεί να επαναφέρει τη μάζα στη θέση ηρεμίας της συμπιέζεται. Η δύναμη F_H εκφράζεται σύμφωνα με το Νόμο του Hooke ως $F_H = k \cdot \Delta l$ όπου k είναι μια σταθερά ($k > 0$) που περιγράφει την ακαμψία του ελατηρίου και εκφράζει το ποσοστό που το ελατήριο τεντώνεται ή από το φυσικό μήκος του. Εάν θεωρήσουμε ως Δl το μήκος του ελατηρίου όταν η μάζα είναι στη θέση ισορροπίας της, δηλαδή όταν $x = x_0(t=0)$ σε οποιαδήποτε άλλη στιγμή το ελατήριο επιμηκύνεται ή συμπιέζεται κατά $x + \Delta l$. Κατά συνέπεια σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή t η συνολική δύναμη που ενεργεί στη μάζα του ελατηρίου δίνεται από τη σχέση:

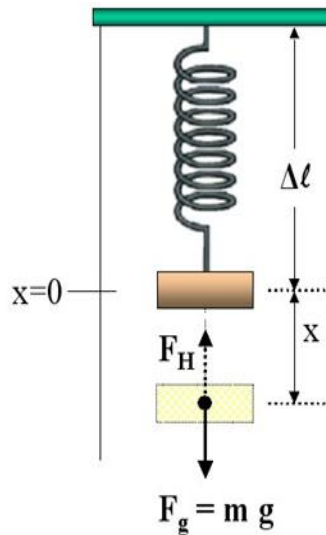
$$F = m \cdot g - k \cdot (x + \Delta l), \quad (2.54)$$

που εκφράζει τη συνθήκη ισορροπίας του ελατηρίου.

Προφανώς στη θέση ισορροπίας της μάζας ισχύει $x = 0$ και $F = 0$, και συνεπώς

$$m \cdot g = k \cdot \Delta l, \quad (2.55)$$

που υποδηλώνει ότι η δύναμη της βαρύτητας επιμηκώνει το ελατήριο κατά ένα ποσό που είναι ανάλογο προς δύναμη της βαρύτητας και όπου η σταθερά της αναλογικότητας μεταξύ του τεντώματος του ελατηρίου και της επιτάχυνσης της βαρύτητας εκφράζεται από τη τιμή της μάζας που κρεμείται από το ελατήριο διαιρούμενης με τη σταθερά k του ελατηρίου. Όσο πιο μεγάλη είναι η τιμή της σταθεράς k , τόσο πιο δύσκαμπτο είναι το ελατήριο και τόσο πιο λίγο επιμηκώνεται αυτό, για μια δεδομένη τιμή της επιτάχυνσης της βαρύτητα.



Εικόνα 2.16: Αρχή λειτουργίας βαρυτήμετρων με ελατήριο (Δ.Δεληκαράογλου 2003).

Λαμβάνοντας υπόψη τη σχέση $mg = k \Delta l$, συνάγεται εύκολά ότι η συνολική δύναμη

$$F = -k \cdot x, \quad (2.56)$$

ή εφαρμόζοντας τον Νόμο του Newton

$$m \cdot d_2x/dt_2 = -k \cdot x, \quad (2.57)$$

Και συνεπώς

$$d_2x/dt_2 = -k \cdot x/m, \quad (2.58)$$

Η γραμμική αυτή εξίσωση αυτή είναι παρόμοια με την εξίσωση κίνησης ενός εκκρεμούς και μπορεί να δειχθεί ότι η λύση της είναι της μορφής:

$$x = x_0 \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{k}{m}} \cdot t\right), \quad (2.59)$$

Η περίοδος της κίνησης (ταλάντωσης) του ελατηρίου, όπως και στην περίπτωση ενός εκκρεμούς, δίνεται από τη σχέση:

$$T = 2 \cdot \pi / \sqrt{\frac{k}{m}} = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{m}{k}} = \frac{1}{f}, \quad (2.60)$$

όπου f είναι η συχνότητα της κίνησης του ελατηρίου που εκφράζει τον αριθμό των ταλαντώσεων του ελατηρίου ανά μονάδα χρόνου. Από την παραπάνω σχέση είναι προφανές ότι για μια συγκεκριμένη μάζα που κρεμιέται από ένα ελατήριο, όσο αυξάνεται η σταθερά k του ελατηρίου, δηλαδή όσο πιο δύσκαμπτο είναι το ελατήριο, τόσο ελαττώνεται η περίοδος και αυξάνεται η συχνότητα της κίνησης (ταλάντωσης) του. Ή με άλλα λόγια, για ένα ελατήριο με συγκεκριμένη σταθερά k , αυξάνοντας τη μάζα που κρεμιέται από το ελατήριο, αυξάνεται η περίοδος και ελαττώνεται η συχνότητα της ταλάντωσης του ελατηρίου.

Ιδανικά, υποτίθεται ότι το ελατήριο δεν έχει καμία μάζα και ότι η δύναμη που ενεργεί για να αποκαταστήσει την ηρεμία (ισορροπία) του ελατηρίου χρησιμοποιείται μόνο για να κινήσει τη μάζα που κρεμιέται από αυτό, αλλά στην πραγματικότητα, μέρος της εν λόγω δύναμης χρησιμοποιείται για να κινήσει το ελατήριο πίσω στη θέση ισορροπίας του. Σαν αποτέλεσμα, η μάζα του ελατηρίου δεν μπορεί να αγνοηθεί και πρέπει να ληφθεί υπόψη στον υπολογισμό της περιόδου της κίνησης του ελατηρίου. Ο λόγος είναι εύκολα κατανοητός, δεδομένου ότι το ελατήριο στο σημείο εξάρτησης του δεν κινείται σχεδόν καθόλου, ενώ στο άκρο από το οποίο εξαρτάται η μάζα, το ελατήριο κινείται με τον ίδιο ρυθμό όπως και η μάζα που κρεμιέται από ένα ελατήριο. Κατά συνέπεια, κάθε μέρος του ελατηρίου κινείται με ένα διαφορετικό εύρος. Εμπειρικά έχει αποδειχθεί ότι το $1/3$ της μάζας m_E του ελατηρίου πρέπει να περιληφθεί ως μάζα στις εξισώσεις για τον υπολογισμό της περιόδου και της συχνότητας. Επομένως, στην πράξη, η περίοδος του ελατηρίου από το οποίο ενεργεί στη μάζα του ελατηρίου εκφράζεται από την απλουστευμένη μορφή κρεμιέται μια μάζα m δίνεται από τη σχέση

$$T = 2\pi / \left[\left(m + \frac{1}{3} \cdot m_E \right) / k \right]^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{f}, \quad (2.61)$$

η οποία χρησιμοποιείται στην πράξη για τον υπολογισμό της σταθεράς του εκάστοτε ελατηρίου και στη συνέχεια για τον υπολογισμό της τιμής της έντασης της βαρύτητας. (Δ.Δεληκαράογλου 2003).

2.7 ΣΥΓΧΡΟΝΑ ΒΑΡΥΤΗΜΕΤΡΑ – ΤΡΟΠΟΣ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

2.7.1 ΒΑΡΥΤΗΜΕΤΡΑ LACOSTE-ROMBERG MODEL-G ΚΑΙ -D

Οι αντικειμενικές ανάγκες για την υψηλή ακρίβεια των μετρήσεων βαρύτητας θέτουν μεγάλες απαιτήσεις στο μηχανισμό ανάγνωσής των βαρυτήμετρων και στη σταθερότητα της ελαστικότητας των ελατηρίων τους, η οποία οφείλει να είναι της τάξης του 10^{-8} (που αντιστοιχεί σε $0.01 \times 10^{-5} \text{ msec}^{-2}$) για διαστήματα πολλών ωρών, του χρόνου δηλαδή που τυπικά χρειάζεται για την μεταφορά των οργάνων μεταξύ σταθμών.

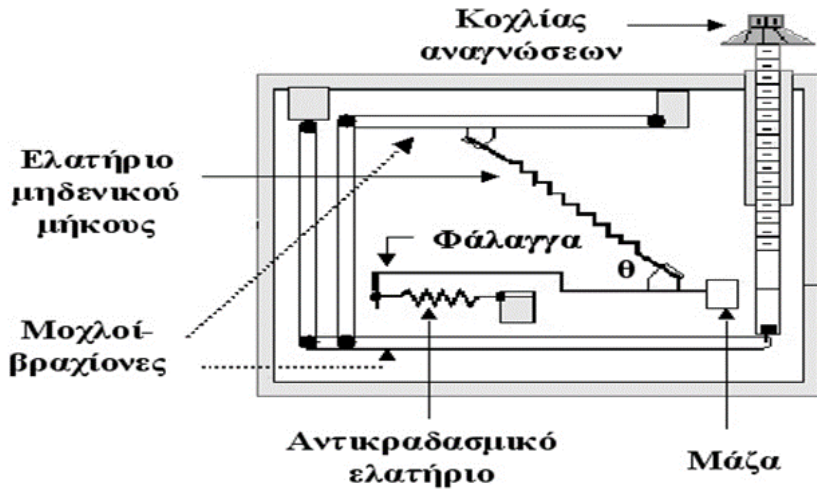
Τα βαρυτήμετρα *LaCoste-Romberg*, εκτός από τα ελατήρια μηδενικού μήκους, χρησιμοποιούν και ένα σύστημα μοχλών-βραχιόνων που παρέχουν το μηχανικό πλεονέκτημα και την ευαισθησία που απαιτείται για να μετρηθεί με μεγάλη ακρίβεια η θέση της μάζας στο τέλος του ελατηρίου. Με τον τρόπο αυτό το σύστημα ισορροπίας της μάζας που χρησιμοποιείται παράγει τις σχετικές μετρήσεις βαρύτητας με τυπική ακρίβεια της τάξης του 1 μέρους σε 100 εκατομμύρια της τιμής της γήινης βαρύτητας. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των ελατηρίων τους αποτελούνται από κράματα μετάλλων (π.χ. NiFe), χαλαζία, κ.ά. με χαρακτηριστικές επιθυμητές ιδιότητες:

Α)μεγάλη ελαστικότητα (ώστε να επιτρέπουν μεγαλύτερη ένταση του ελατηρίου),

Β)μικρό θερμοελαστικό συντελεστή (ώστε να εξαρτώνται το δυνατόν λιγότερο από αλλαγές της θερμοκρασίας)

Γ)μικρό συντελεστή διαστολής (ώστε οποιεσδήποτε αλλαγές της θερμοκρασίας να προκαλούν μικρές μεταβολές του μήκους του ελατηρίου).

Τα συνηθέστερα βαρυτήμετρα τέτοιου τύπου που χρησιμοποιούνται για γεωδαιτικούς και γεωφυσικούς σκοπούς είναι τα λεγόμενα *LaCoste-Romberg Model-G*. Αυτό το συγκεκριμένο μοντέλο βαρυτήμετρου χρησιμοποιεί δύο τρόπους για την ανάγνωση της θέσης της μάζας: μέσο ενός οπτικού συστήματος (το προσοφθάλμιο φακό) και μέσο ενός ηλεκτρονικού κοχλίου. Στο εσωτερικό του οργάνου, η μάζα που χρησιμοποιείται κρέμεται στο άκρο μιας οριζόντιας μεταλλικής φάλαγγας που αντισταθμίζεται από το ελατήριο μηδενικού μήκους. Κάτω από την επίδραση της βαρύτητας, η φάλαγγα μετατοπίζεται ελαφρά παρασύροντας το ελατήριο κατά τέτοιο τρόπο, ώστε η γωνία θ που σχηματίζουν μεταξύ τους μεταβάλλεται έτσι ώστε η ροπή που εξασκεί το ελατήριο επί της φάλαγγας, να μεταβάλλεται κατά την ίδια διεύθυνση που μεταβάλλεται η ροπή που οφείλεται στη βαρύτητα. Περιστρέφοντας τον κοχλία αναγνώσεων, ο οποίος συνδέεται με κατάλληλες αρθρώσεις με το εσωτερικό σύστημα μοχλών, πραγματοποιείται η επαναφορά της φάλαγγας στην οριζόντια θέση.



Εικόνα 2.17: Τυπικός μηχανισμός ενός βαρυτημέτρου. (Α.Δεληκαράογλου 2003).

Από την ανάγνωση του ποσού της περιστροφής παρέχεται (μέσο μιας φωτεινής δέσμης που ανακλάται στο βάρος του ελατηρίου) η ένδειξη της μεταβολής της βαρύτητας από τις τιμές στο πίνακα αναγνώσεων (των ακέραιων ψηφίων πλην του τελευταίου) και τη κλίμακα αναγνώσεων του δεκαδικού μέρους του τελευταίου ψηφίου παρέχουν την ανάγνωση βαρύτητας. Ο μετρητής που δείχνει πόσο στρέφεται ο κοχλίας παρέχει ενδείξεις που όμως δεν αντιστοιχούν σε μονάδες βαρύτητας και συνεπώς απαιτείται κάποια διαδικασία μετατροπής τους σε μονάδες βαρύτητας. Στα βαρυτήμετρα Lacoste and Romberg μια μονάδα ένδειξης z του βαρυτήμετρου αντιστοιχεί περίπου σε 1 mgal μεταβολής της πραγματικής έντασης της βαρύτητας. Η ακριβής σχέσης μεταξύ τους τυπικά δίνεται από μια εξίσωση βαθμονόμησης η οποία εκφράζεται από μια σχέση της μορφής:

$$g = f(z) = f_{poly}(z) + f_{period}(z), \quad (2.62)$$

όπου η συνάρτηση $f(z)$ συνήθως αποτελείται από μια συνάρτηση πολυωνυμικής μορφής:

$$f_{Polynomial}(z) = \sum_{n=0}^m p_n \cdot z^n, \quad (2.63)$$

όπου p_n είναι πολυωνυμικοί συντελεστές και ένα περιοδικό μέρος

$$f_{periodic}(z) = \sum_{i=0}^k a_i \cdot \cos(\omega_i \cdot z - \phi_i), \quad (2.64)$$

όπου a_i είναι συντελεστές, και ω_i , ϕ_i εκφράζουν το εύρος και τη φάση περιοδικών όρων. Η συνάρτηση $f_{Polynomial}(z)$ εκφράζει το κύριο μέρος της αντιστοιχίας μεταξύ z και g και η συνάρτηση $f_{Periodic}(z)$ εκφράζει το μαθηματικό μοντέλο των σφαλμάτων του κοχλίου ανάγνωσης. Στη πράξη, κάθε βαρυτήμετρο βαθμονομείται από τον κατασκευαστή και συνοδεύεται από δικούς του πίνακες

μετατροπής των εν λόγω ενδείξεων σε μονάδες βαρύτητας (mgal), μέσω σειράς συντελεστών που ουσιαστικά αποτελούν μια πιο πρακτική μορφή των παραπάνω εξισώσεων βαθμονόμησης.

Πίνακας 2-1: Τυπικός πίνακας συντελεστών μετατροπής των ενδείξεων βαρυτήμετρου σε τιμές της βαρύτητας

<u>Counter reading</u>	<u>Value in mgal</u>	<u>Factor for interval</u>
000	000.00	1.02086
100	102.09	1.02054
200	204.14	1.02031
300	306.17	1.02014
....
1000	1020.06	1.01959
1100	1122.02	1.01956
1200	1223.98	1.01954
....
7000	7141.71	

Η διαδικασία μετατροπής των ενδείξεων του βαρυτήμετρου σε τιμές της βαρύτητας συνοψίζεται στα ακόλουθα απλά βήματα:

1. Διαβάζεται η ένδειξη του βαρυτήμετρου (π.χ. 1115.34 μονάδες ανάγνωσης)

2. Επιλέγεται από τον πίνακα μετατροπής η τιμή (**Counter Reading**) που είναι πλησιέστερα στην παραπάνω ένδειξη του βαρυτημέτρου (δηλαδή 1100.00) και λαμβάνεται η αντίστοιχη ένδειξη σε mgal (1100.00→1122.02mgal).

3. Υπολογίζεται η διαφορά της ένδειξης του βαρυτημέτρου (μονάδες ανάγνωσης) από την αντίστοιχη πλησιέστερη τιμή από τον πίνακα μετατροπής (δηλαδή, $1115.34 - 1100.00 \rightarrow 15.34$) και πολλαπλασιάζεται με τον αντίστοιχο συντελεστή (**Factor for interval**), από τον πίνακα μετατροπής, για τη συγκεκριμένη πλησιέστερη τιμή στην ένδειξη του βαρυτήμετρου (δηλαδή $15.34 \times 1.01956 \rightarrow 15.64$). Η τιμή αυτή προστίθεται στην πραγματική ένδειξη του βαρυτήμετρου (δηλαδή, $1115.34 + 15.64 \rightarrow 1130.98$ mgal) που είναι και η αντίστοιχη τιμή της έντασης της βαρύτητας σε mgal.

Τα εν λόγω βαρυτήμετρα ήταν τα πρώτα όργανα μέτρησης της βαρύτητας που κατασκευάστηκαν με τη δυνατότητα μέτρησης μεταβολών της βαρύτητας μέχρι 7000 mgal, που καλύπτει όλο το εύρος των ενδείξεων που μπορεί να λάβει οποιαδήποτε βαρυτομετρική διαφορά στην επιφάνεια της Γης.

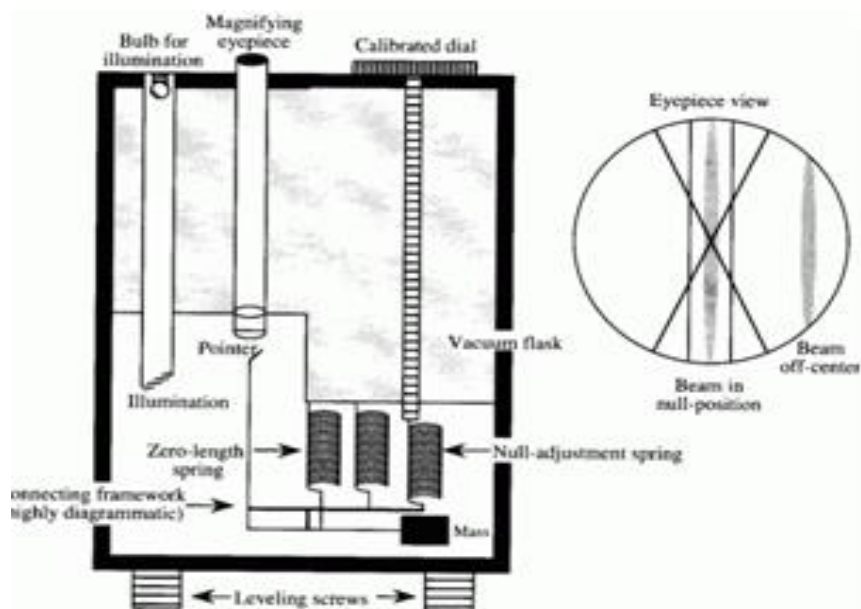
Η δυνατότητα αυτή εξαλείφει την ανάγκη επαναριθμήσεων του οργάνου κατά την εκτέλεση μετρήσεων σε διαφορετικές τοποθεσίες. Τα εν λόγω βαρυτόμετρα έχουν ανεπαίσθητη ολίσθηση (μικρότερη από 0.5 mgal ανά μήνα) εξ' αιτίας της υστέρησης (μεταβολών) του ελατηρίου τους ως συνάρτηση των ωρών συνεχούς λειτουργίας. Αυτό επιτυγχάνεται με την ύπαρξη ενός εσωτερικού θερμοστατικού μηχανισμού που λειτουργεί συνεχώς, έτσι ώστε να διατηρεί την εσωτερική θερμοκρασία σταθερή περίπου στους 50°C, μειώνοντας στο ελάχιστο στις εξωτερικές επιδράσεις όπως οι αλλαγές της θερμοκρασίας, της ατμοσφαιρικής πίεσης και των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων.

Σε συνδυασμό με τη δυνατότητα αναγνώσεων με ακρίβεια της τάξης του ± 0.04 mgal και επαναληπτικότητα των μετρήσεων στο ίδιο σημείο της τάξης του ± 0.01 mgal, οι δυνατότητες αυτές έχουν αναδείξει τα βαρυτόμετρα τύπου G, από το 1960 μέχρι σήμερα, ως τα πλέον διαδεδομένα όργανα μέτρησης της βαρύτητας, με τα οποία έχει μετρηθεί η ένταση της βαρύτητας σε περισσότερους από 25 εκατομμύριο σταθμούς σε παγκόσμια κλίμακα.

Παρόμοιου αλλά βελτιωμένου τύπου βαρυτόμετρα LaCoste-Romberg αποτελούν εκείνα του τύπου Model-D τα οποία αποτελούν μια υψηλής ακρίβειας τροποποιημένη έκδοση του Model-G. Τα εν λόγω βαρυτόμετρα έχουν εύρος μέτρησης των μεταβολών της βαρύτητας μέχρι 200 mgal (αντί 7000 mgal εκείνων του τύπου model-G) και ένα λεπτό μικρομετρικό κοχλία επαναφοράς που επιτρέπει στο βαρυτόμετρο να “διαβάζει” την ένδειξη της βαρύτητας σε οποιαδήποτε σημείο του κόσμου, ενώ επιδεικνύουν μεγαλύτερη ευαισθησία ανάγνωσης. Χρησιμοποιώντας τον μικρομετρικό κοχλία μικρού εύρους, ελαττώνονται τα σφάλματα που προέρχονται από ατέλειες του συνηθισμένου μικρομετρικού κοχλία που εξηγεί την βελτίωση της ακρίβειας στα βαρυτόμετρα τύπου Model-D από εκείνα του τύπου Model-G.

Σε επαναλαμβανόμενες μετρήσεις η τυπική ακρίβεια είναι της τάξης του ± 0.005 mgal, ενώ πραγματικοί έλεγχοι στο πεδίο επί ολοκλήρου του εύρους των τιμών της γήινης βαρύτητας έχουν δείξει αποτελέσματα με ακρίβεια μεγαλύτερη από ± 0.01 mgal. Η ολίσθηση του οργάνου είναι τυπικά αμελητέα, μικρότερη από 1 mgal ανά μήνα λειτουργίας και μικρότερη από 0.5 mgal ανά μήνα λειτουργίας μετά από ένα έτος. (Δ.Δεληκαράογλου 2003).

2.7.2 SCINTREX CG5



Εικόνα 2.18: Τυπικός μηχανισμός βαρυτημέτρου Scintrex CG5 (Α.Δελικαράογλου 2003).

Το Scintrex CG-5 είναι το πιο πρόσφατο όργανο μέτρησης βαρύτητας από την Scintrex Ltd. Το μοντέλο CG-5 μπορεί να λειτουργεί με ελάχιστη εκπαίδευση χειριστή, και αυτοματοποιημένες λειτουργίες πετυχαίνοντας έτσι την σημαντική μείωση πιθανών σφαλμάτων ανάγνωσης. Η λήψη των δεδομένων έχει γίνει πιο εύκολη με την παροχή μιας γρήγορης διασύνδεσης USB που παρέχει ευέλικτες μορφές δεδομένων. Η απομάκρυνση του θορύβου έχει βελτιωθεί μέσα από μια σειρά από αυτοματοποιημένες λειτουργίες διόρθωσης οι οποίες είναι εύκολο να διατηρηθούν. Με την συνεχή παρακολούθηση των ηλεκτρονικών αισθητήρων κλίσης, το μοντέλο CG-5 μπορεί αυτόματα να αντισταθμίσει τα σφάλματα στο μέτρο και στην κλίση του διανύσματος της βαρύτητας. Λόγω της χαμηλής μάζας και τις εξαιρετικές ελαστικές ιδιότητες του χαλαζία, οι θόρυβοι έχουν σχεδόν εξαλειφθεί. Το CG-5 μπορεί να μεταφερθεί σε πολύ ανώμαλους δρόμους και η εναπομένουσα ολίσθηση (drift) παραμένει σε χαμηλά επίπεδα. Επίσης μπορεί να αντέξει ένα σοκ πάνω από 20G και το απόβαρο θα είναι όχι περισσότερο από 5 microgal. Επίσης το CG-5 προσφέρει την καλύτερη δυνατή επαναληψιμότητα με πάνω από 10 αναγνώσεις, οι οποίες μπορούν να επαναληφθούν μέσα με μία τυπική απόκλιση 0.005mGal. Ένα ενσωματωμένο απομακρυσμένο βοήθημα ραδιοσυχνοτήτων διατηρεί τη σταθερότητα του οργάνου μετά την οριζοντίωση. Εξοπλισμένο με ένα δέκτη GPS, Garmin 12 καναλιών, κεραίας ίδιας με το BK5 εντοπίζει με ακρίβεια <math><15\text{m}</math> με το πρότυπο GPS, και <math><3\text{m}</math> σύμφωνα με τις SBAS διορθώσεις που έλαβε. Εύκολα μεταφερόμενο, η ικανότητα του CG-5 να κρατά ζεστές τις μπαταρίες ανταλλαγής, επιτρέπει εκτεταμένη διάρκεια ζωής της μπαταρίας και εξασφαλίζει τη θερμοκρασία του αισθητήρα μέχρι εκεί που μπορεί να διατηρηθεί.

Αυτά τα όργανα είναι σήμερα τα υψηλότερα ακρίβειας στην κατηγορία μετρητών βαρύτητας που μετρούν τις αυξήσεις βαρύτητας μεταξύ των σταθμών παρατήρησης. Οι κύριες τεχνικές παράμετροι CG-5 μετρητών βαρύτητας είναι οι ακόλουθες :

Ευκρίνεια (resolution) : 0,001 mGal

Τυπική απόκλιση (standard deviation) : < 0,005 mGal

Εύρος των μετρήσεων που ανέρχεται περίπου στα 8000mGal

Υπάρχει αντιστάθμιση της εκάστοτε θερμοκρασίας (ύπαρξη θερμοστάτη)

Χαμηλή εναπομείνουσα ολίσθηση (drift) του οργάνου

Λήψη δεδομένων καθώς και του μέσου όρου με ανάλυση μίας μέτρησης ανά δευτερόλεπτο.

Φιλτράρισμα του θορύβου των μετρήσεων

Συνεχόμενη διόρθωση των κλίσεων

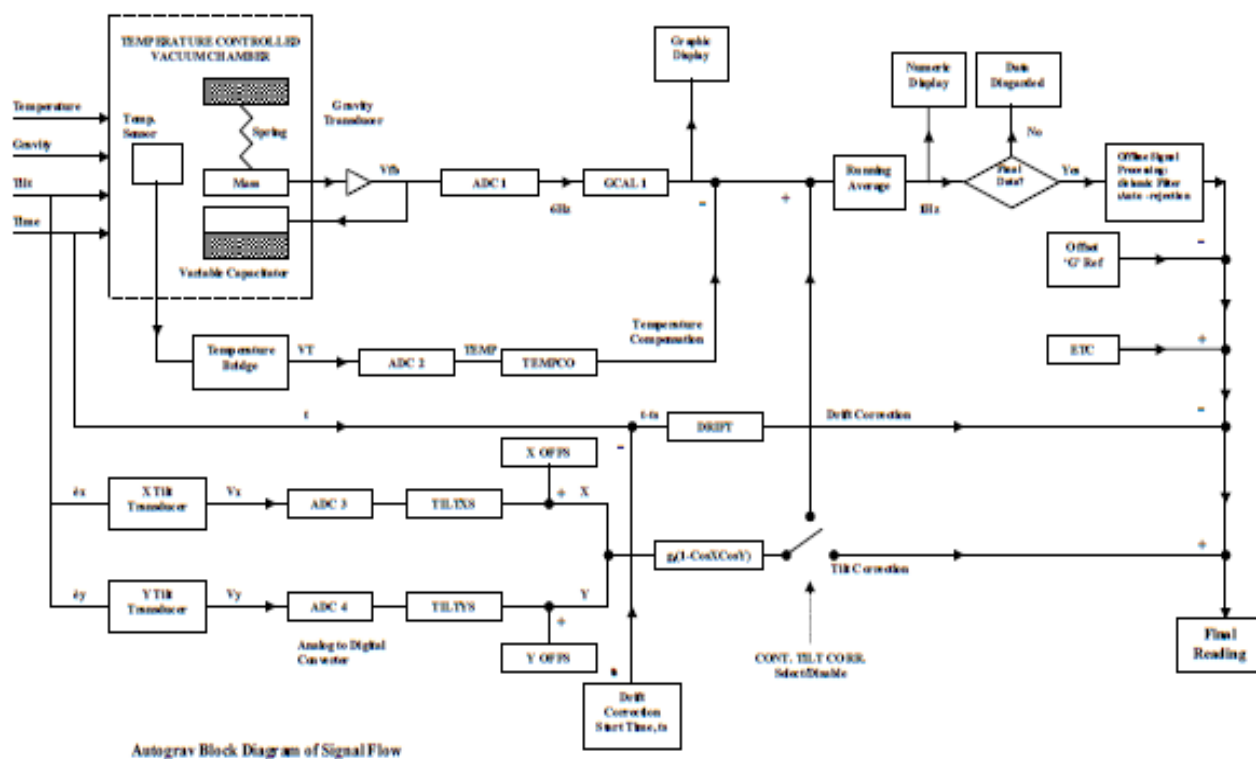
Διορθώσεις στη βαρυτική διακύμανση της παλίρροιας

Μνήμη για αποθήκευση των μετρήσεων που φτάνει έως 12 Mbytes.

2.7.2.1 Επισκόπηση Συστήματος

Το αισθητήριο στοιχείο του Autogran βασίζεται σε ένα ελαστικό λωμένο σύστημα χαλαζία. Η βαρυτική δύναμη στη μάζα δοκιμής εξισορροπείται από ένα ελατήριο και μια σχετικά μικρή ηλεκτροστατική δύναμη αποκατάστασης. Η θέση της μάζας, που ανιχνεύεται από έναν μεταφορικό μετατροπέα χωρητικότητας, μεταβάλλεται από αλλαγή της βαρύτητας. Ένα κύκλωμα αυτόματης ανατροφοδότησης εφαρμόζει τάση DC στις πλάκες πυκνωτών που παράγουν ηλεκτροστατική δύναμη στη μάζα που την φέρνει πίσω σε μηδενική θέση. Η τάση ανάδρασης, η οποία είναι ένα μέτρο της σχετικής τιμής της βαρύτητας στον χώρο ανάγνωσης, μετατρέπεται σε ψηφιακό σήμα και στη συνέχεια μεταδίδεται στο σύστημα απόκτησης δεδομένων του οργάνου για επεξεργασία, εμφάνιση και αποθήκευση. Η έμφυτη αντοχή και οι εξαιρετικές ελαστικές ιδιότητες του συγχωνευμένου χαλαζία με οριακές στάσεις γύρω από τη μάζα απόδειξης επιτρέπουν τη λειτουργία του οργάνου χωρίς σύσφιξη. Περαιτέρω προστασία παρέχεται από ένα ανθεκτικό σύστημα με σκονί που συνδέει τον αισθητήρα με το περίβλημα. Οι παράμετροι του αισθητήρα βαρύτητας και των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων του επιλέγονται έτσι ώστε η τάση ανάδρασης να καλύπτει μια περιοχή πάνω από 8000 mGals χωρίς επαναφορά. Η χρήση ενός ηλεκτρονικού σχεδιασμού χαμηλού θορύβου, μαζί με μία εξαιρετικά ακριβής αυτόματη βαθμονόμηση αναλογικού προς ψηφιακό μετατροπέα, έχει ως αποτέλεσμα μια ανάλυση του 0.001 mGal, εξοπλίζοντας τον μετρητή βαρύτητας και για τις διεξοδικές έρευνες πεδίου και μεγάλης κλίμακας περιφερειακών ή γεωδαιτικών ερευνών. Οι αισθητήρες κλίσης του οργάνου είναι επίσης ηλεκτρονικοί, με ανάλυση 1 arc second. Οι έξοδοι από τους αισθητήρες εμφανίζονται στον μπροστινό πίνακα του οργάνου και μεταδίδονται επίσης στο σύστημα λήψης δεδομένων όπου εμφανίζονται και αποθηκεύονται. Εάν το όργανο λειτουργεί σε ασταθή βάση, οι διορθώσεις σε πραγματικό χρόνο για σφάλματα κλίσης μπορούν να πραγματοποιηθούν αυτόματα σε εύρος ± 400 arc second. Η προστασία από μεταβολές της θερμοκρασίας περιβάλλοντος παρέχεται με την τοποθέτηση του ελαστικού συστήματος χαλαζία, του αναλογικού σε ψηφιακό μετατροπέα, των ευαίσθητων ηλεκτρονικών εξαρτημάτων και των αισθητήρων κλίσης μέσα σε ένα περιβάλλον υψηλής θερμοκρασίας. Δεν υπάρχει μηχανική αντιστάθμιση θερμοκρασίας. Οι εξωτερικές αλλαγές θερμοκρασίας μειώνονται κατά ένα συντελεστή άνω του επιπέδου του 104 και τα μικρά υπολειπόμενα αποτελέσματα διορθώνονται στο λογισμικό χρησιμοποιώντας την έξοδο ενός αισθητήρα που βρίσκεται σε στενή θερμική επαφή με το κύριο ελατήριο. Το εύρος λειτουργίας του θερμοστάτη στο τυπικό όργανο είναι -40°C έως $+45^{\circ}\text{C}$.

Ωστόσο, επειδή δεν υπάρχει κρίσιμο σημείο λειτουργίας για τον αισθητήρα, η ανώτερη θερμοκρασία λειτουργίας μπορεί να ρυθμιστεί σε χαμηλότερη ή υψηλότερη τιμή (προαιρετικά -45°C). Ολόκληρος ο μηχανισμός ανίχνευσης βαρύτητας περικλείεται σε θάλαμο κενού. Δεδομένου ότι δεν υπάρχουν μηχανικές τροφοδοσίες, επιτυγχάνεται εξαιρετική απομόνωση από μεταβολές στην ατμοσφαιρική πίεση. Αυτό το εξαιρετικά σταθερό περιβάλλον λειτουργίας για το ελαστικό σύστημα χαλαζία επιτρέπει την ακριβή πρόβλεψη της μακροπρόθεσμης μετατόπισης του αισθητήρα και η διόρθωση του λογισμικού σε πραγματικό χρόνο το μειώνει σε λιγότερο από $0,02 \text{ mGals} / \text{ημέρα}$. Ο σχεδιασμός του αισθητήρα είναι μηχανικά πολύ απλός. Η λεπτή εξισορρόπηση που απαιτείται για την επίτευξη αστάθειας δεν είναι απαραίτητη, καθώς ο μορφοτροπέας μετατόπισης έχει επαρκή ανάλυση ($0,02\text{nm}$) για την ανίχνευση της θέσης δέσμης ενός μη ασταθισμένου συστήματος και το ηλεκτρονικό φίλτράρισμα μειώνει την επίδραση του σεισμικού θορύβου. Οι μηχανισμοί, οι βίδες μικρόμετρων, τα κιβώτια ταχυτήτων και οι μηχανικές τροφοδοτήσεις που συνδέονται με μηχανικά συστήματα ανάδρασης έχουν αντικατασταθεί από μια τάση που εφαρμόζεται στις ίδιες πλάκες που σχηματίζουν τον μορφοτροπέα μετατόπισης. Ο έλεγχος της θερμοκρασίας είναι επίσης αρκετά ακριβής ώστε ο αισθητήρας να λειτουργεί χωρίς μηχανική αντιστάθμιση. (CG-5, Scintrex Autograv System, operation manual).



Εικόνα 2.19: Διαγράμματα Autograv της ροής σημάτων.

2.7.2.2 Επεξεργασία του σήματος βαρύτητας

Κατά την ανάγνωση αυτής της ενότητας, ανατρέξτε επίσης στο παραπάνω διάγραμμα. Η είσοδος στο μετατροπέα βαρύτητας αναλογικού προς ψηφιακό (ADCL) μεταβάλλεται μεταξύ V_{fb} , της εξόδου

του μετατροπέα βαρύτητας και του Vcal, της σταθερής τάσης βαθμονόμησης. Όταν το όργανο βρίσκεται στη λειτουργία SETUP (αφού πατηθεί το πλήκτρο SETUP μία φορά), η τάση βαθμονόμησης είναι συνδεδεμένη με ADCL. Σε αυτή τη λειτουργία, η τιμή του Vcal μπορεί να εμφανιστεί στην οθόνη κάτω από την επικεφαλίδα G R A V. Στη λειτουργία READ (μετά το πάτημα του πλήκτρου MEASURE CLR) η είσοδος στο ADC 1 κρατείται στο Vcal για ένα δευτερόλεπτο (κατά τη διάρκεια του P A U S E) και στη συνέχεια μεταβιβάζεται στο Vfb για x δείγματα ενός δευτερολέπτου. Επαναφέρεται στη συνέχεια σε Vcal για ένα δείγμα και έπειτα σε Vfb για δείγματα x και ούτω καθ'εξής έως ότου τερματιστεί η ανάγνωση. Η τιμή του x εισάγεται στη ρύθμιση Autogran στη γραμμή CAL AFTER. Η έξοδος του ADC 1 ονομάζεται SC όταν εφαρμόζεται Vcal και SF όταν εφαρμόζεται το Vfb. (CG-5, Scintrex Autogran System, operation manual).

2.7.2.3 Μη διορθωμένο δείγμα

Η τάση βαθμονόμησης και άλλοι συντελεστές βαθμονόμησης εφαρμόζονται στη συνέχεια στο σήμα βαρύτητας με τη συνάρτηση fcal για να δώσουν ένα μη διορθωμένο δείγμα

$$SU = f_{cal}(SC, SF) = GCAL1 \left(\frac{SF}{SC} \right) + GCAL2 \left(\frac{SF}{SC} \right)^2, \quad (2.655)$$

Το SF διαιρείται από την πιο πρόσφατη τιμή του SC για να διορθώσει οποιαδήποτε μετατόπιση στον συντελεστή κλίμακας του ADC1. Οι παράγοντες GCAL1 και GCAL2 είναι οι συντελεστές βαθμονόμησης του οργάνου που εισάγονται μέσω του πληκτρολογίου. Λαμβάνουν υπόψη μια μικρή τετραγωνική μη γραμμικότητα που είναι εγγενής στο ADC και τη μετατροπή από την ηλεκτροστατική τάση ανάδρασης στη δύναμη. Το μη διορθωμένο δείγμα έχει διόρθωση μετατόπισης και εφαρμόζεται GREF και, αν επιλεγεί, στη συνέχεια και η διόρθωση κλίσης, για να δώσει ένα διορθωμένο δείγμα

$$S = SU - DC + GREF + TIC = SU + G, \quad (2.666)$$

Ο μέσος όρος των διορθωμένων δειγμάτων δίνει τη διορθωμένη ανάγνωση

$$RU_{i,j} = \frac{\sum_{j=1}^y \sum_{i=1}^x GCAL1 \left(\frac{SF_{ij}}{SC_j} \right) + GCAL2 \left(\frac{SF_{ij}}{SC_j} \right)^2 + C_{ij}}{(j-1) \cdot x + i - NR} = \frac{\sum_{j=1}^y \sum_{i=1}^x (S_{ij} + C_{ij})}{DUR}, \quad (2.677)$$

Όπου SCj είναι η τιμή της βαθμονόμησης τάσης jth και SFij και Cij είναι το ith δείγμα βαρύτητας και η διόρθωση μετά τη βαθμονόμηση τάσης jth. (CG-5, Scintrex Autogran System, operation manual).

2.7.2.4 Τυπική απόκλιση

Η τυπική απόκλιση (SD) των διορθωμένων δειγμάτων υπολογίζεται κάθε δευτερόλεπτο και απορρίπτονται δείγματα που είναι περισσότερες από τέσσερις τυπικές αποκλίσεις από την RUij. Αυτή η λειτουργία AUTO REJECT μπορεί να απενεργοποιηθεί μέσω του πληκτρολογίου. Η ένδειξη SD εμφανίζεται κάθε φορά εκτός όταν το όργανο βαθμονομείται μόνο του, π.χ. κάθε 12 δευτερόλεπτα, αν

επιλεγεί η τιμή CAL AFTER 12, τότε εμφανίζεται το σφάλμα (ERR). Καταγράφεται και εξάγεται επίσης. Είναι το μέτρο του θορυβώδους σήματος, που περιλαμβάνει τον σεισμικό θόρυβο οργάνου και περιβάλλοντος. Η τρέχουσα τιμή του RUij εμφανίζεται στην επάνω γραμμή της οθόνης κατά την περίοδο ανάγνωσης και στον τρέχοντα αριθμό δείγματος

$$DUR = (j - 1) \cdot \chi + i - NK, \quad (2.688)$$

όπου NR είναι ο αριθμός των απορρίψεων. Στη δεξιά πλευρά της δεύτερης γραμμής η ένδειξη εναλλάσσεται μεταξύ της τελευταίας τιμής του ERR κατά τη δειγματοληψία βαθμονόμησης και της τυπικής απόκλισης του μέσου όρου. Το ERR εκτιμάται με την υπόθεση ότι ο θόρυβος κατά τη δειγματοληψία βαρύτητας κατανέμεται κανονικά (δηλαδή λευκό) από τη σχέση:

$$ERR = \frac{SD}{\sqrt{DUR}}, \quad (2.699)$$

Ο τύπος που δίνεται στην παραπάνω εξίσωση είναι αυτός που χρησιμοποιήθηκε στο CG-5. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια περιόδων υψηλής σεισμικότητας (που προκαλούνται από μικροαισθητικό θόρυβο), η τυπική απόκλιση του μέσου υπολογίζεται καλύτερα με:

$$ERR = \frac{SD}{DUR}, \quad (2.70)$$

αν το SEISMIC FILTER είναι απενεργοποιημένο, και

$$ERR = \frac{SD}{(DUR)^n}, \quad (2.71)$$

όπου $n = 1$ έως 2 , αν επιλεγεί το SEISMIC FILTER. (CG-5, Scintrex Autogran System, operation manual).

2.7.2.5 Εμφάνιση ανάγνωσης

Η δειγματοληψία του σήματος βαρύτητας σταματά όταν το DUR φτάσει στο προκαθορισμένο READ TIME ή όταν πατηθεί το πλήκτρο MEASURE CLR. Μέχρι τρεις περαιτέρω διορθώσεις: Στη συνέχεια, η διόρθωση κλίσης (TIC), η διόρθωση θερμοκρασίας (TEC) και η διόρθωση της παλίσρροιας της γης (ETC) προστίθενται στη RU για να δώσουν την ένδειξη R η οποία στη συνέχεια εμφανίζεται.

$$R = RU + TIC + ETC - TEC, \quad (2.72)$$

2.7.2.6 Αντιστάθμιση και διορθώσεις

Ακολουθούν οι τύποι διορθώσεων που εξετάζονται σε αυτήν την ενότητα:

- Διόρθωση ολίσθησης
- Διόρθωση κλίσης

- Αντιστάθμιση θερμοκρασίας
- Διόρθωση της παλίρροιας της γης

Ορισμένες διορθώσεις, όπως η αντιστάθμιση θερμοκρασίας, εκτελούνται αυτόματα στο σύστημα. Ωστόσο, η θεωρία παρέχεται εδώ για πληρότητα. (CG-5, Scintrex Autogran System, operation manual).

2.7.2.7 Διόρθωση ολίσθησης

Η μακροπρόθεσμη παρακέντηση οργάνου οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στη χαλάρωση της πίεσης στο ελαστικό σύστημα. Μετά από μια αρχική περίοδο σταθεροποίησης, μπορεί να θεωρηθεί μια γραμμική συνάρτηση του χρόνου. Η επίδραση της μακροπρόθεσμης μετατόπισης θα είναι να παράγει μια ομοιόμορφη αλλαγή στην ανάγνωση με το χρόνο. Για παράδειγμα εάν δύο μη διορθωμένες μετρήσεις λαμβάνονται κατά περιόδους t_j και t_2 σε ένα σημείο όπου δεν υπήρξε μεταβολή στη βαρύτητα, τότε η διαφορά μεταξύ τους θα εξαρτηθεί από το μακροπρόθεσμο ρυθμό ολίσθησης d του οργάνου και είναι:

$$RU(\bar{t}_2) - RU(\bar{t}_1) = d(\bar{t}_2 - \bar{t}_1)^2, \quad (2.73)$$

Για την εξάλειψη των επιπτώσεων της μετατόπισης οργάνου, μια διόρθωση ολίσθησης

$$DC(t) = (t - t_s)DRIFT, \quad (2.74)$$

αφαιρείται από κάθε μη διορθωμένο δείγμα SU.

DRIFT είναι η σταθερά μετατόπισης με μονάδες mGal / 24hrs, t_s , είναι ο χρόνος έναρξης διόρθωσης μετατόπισης και t είναι ο χρόνος κατά τον οποίο λαμβάνονται τα δείγματα. Τόσο το DRIFT όσο και το t_s εισάγονται μέσω του πληκτρολογίου.

Με τη διόρθωση της μετατόπισης, η εξίσωση 2.73 γίνεται:

$$R(\bar{t}_2) - R(\bar{t}_1) = RU(\bar{t}_2) - DC(\bar{t}_2) - RU(\bar{t}_1) + DC(\bar{t}_1) = (d(\bar{t}_2 - \bar{t}_1) - DRIFT(\bar{t}_2 - \bar{t}_1)), \quad (2.75)$$

Εάν η διόρθωση ολίσθησης έχει ρυθμιστεί σωστά:

$$\begin{aligned} DRIFT &= d \\ R(\bar{t}_2) - R(\bar{t}_1) &= 0 \end{aligned} \quad (2.76)$$

2.7.2.8 Διόρθωση κλίσης (TIC)

Η αναλογία μη αντισταθμισμένης βαρύτητας αλλάζει σε απόκριση προς την κλίση σύμφωνα με την ακόλουθη έκφραση:

$$RU(\theta_x - \theta_y) = RU(0,0) - g(1 - \cos \theta_x \cdot \cos \theta_y), \quad (2.77)$$

Όπου g είναι η τιμή της βαρύτητας στο σημείο ανάγνωσης και θ_x και θ_y είναι οι κλίσεις του αισθητήρα βαρύτητας γύρω από δύο οριζόντιους άξονες (x και y) με θ_x και $\theta_y = 0$ που ορίζονται ως ο προσανατολισμός στον οποίο μεγιστοποιείται ο μη αντισταθμισμένος μετρητής βαρύτητας.

Η διόρθωση κλίσης λειτουργεί σε ένα εύρος ± 200 arcsec και είναι :

$$TIC = g_t(1 - \cos \theta_x \cdot \cos \theta_y), \quad (2.78)$$

όπου g_t είναι μια μέση βαρύτητα της στάθμης της θάλασσας 980.6 Gal και X και Y είναι οι αναφερόμενοι μετρητές βαρύτητας.

Υποθέτοντας ότι το $g_t = g$ (η υπόθεση αυτή οδηγεί σε σφάλμα 0.002 mGal στην χειρότερη περίπτωση), η διορθωμένη τιμή ανάγνωσης θα είναι:

$$RU(\theta_x, \theta_y) = RU(0, 0) - g_t(\cos \theta_x \cdot \cos \theta_y - \cos x \cdot \cos y), \quad (2.79)$$

Εάν

$$\begin{aligned} x &= \theta_x \\ y &= \theta_y \end{aligned}, \quad (2.80)$$

τότε

$$RU(\theta_x, \theta_y) = RU(0, 0) = 0, \quad (2.81)$$

και εξαλείφονται τα σφάλματα που οφείλονται στην κλίση του οργάνου. Υπάρχουν δύο επιλεγόμενοι τρόποι λειτουργίας της διόρθωσης κλίσης:

1. (CONT TILT CORR-SELECTED), εφαρμόζεται διόρθωση σε κάθε δείγμα ενός δευτερολέπτου.
2. (CONT TILT CORR - DISABLED), μια διόρθωση εφαρμόζεται μόνο στο τέλος της ανάγνωσης με βάση τις τιμές X και Y του τελευταίου δεύτερου δείγματος της ένδειξης.

Ο λόγος για δύο τρόπους λειτουργίας είναι ότι οι αισθητήρες κλίσης έχουν μια σχετικά γρήγορη απόκριση (τυπικά μερικά δευτερόλεπτα) μέχρι περίπου 5 arcsec της τελικής τιμής και στη συνέχεια διαρκεί ένα περίπου λεπτό για να φτάσει μέσα στο 1 arcsec της τελικής αξίας. Εάν το Autogran βρίσκεται σε σταθερή βάση και δεν μετακινείται κατά τη διάρκεια της ανάγνωσης, τότε η λειτουργία OFF θα δώσει το πιο ακριβές αποτέλεσμα καθώς οι αισθητήρες κλίσης θα έχουν περισσότερο χρόνο για να αποκατασταθούν προτού εφαρμοστεί μια αντιστάθμιση. Εάν το όργανο βρίσκεται σε μαλακή βάση και κινείται κατά τη διάρκεια μιας μέτρησης, είναι προτιμότερο να επιλέξετε τη λειτουργία συνεχούς διόρθωσης. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε διάστημα αρκετών ωρών, ορισμένες μεταβολές κλίσης μπορεί να προκύψουν από την κίνηση του ελαστομερούς στους απομονωτές κρούσεων (που χρησιμοποιούνται για την προστασία του αισθητήρα από σοβαρές διαταραχές). Αυτό δεν σχετίζεται με τη λειτουργία ανάγνωσης. Ωστόσο, στη λειτουργία σταθμού βάσης, αυτές οι αλλαγές διορθώνονται από τη λειτουργία διόρθωσης κλίσης, ανεξάρτητα από το εάν η λειτουργία διόρθωσης κλίσης είναι ενεργοποιημένη ή απενεργοποιημένη. (CG-5, Scintrex Autogran System, operation manual).

2.7.2.9 Αντιστάθμιση Θερμοκρασίας (TEC)

Το βασικό στρώμα από λωμένο χαλαζία είναι το πιο ευαίσθητο στη θερμοκρασία συστατικό του μετρητή βαρύτητας με συντελεστή περίπου $-130 \text{ mGal} / ^\circ \text{K}$. Αυτό το ελατήριο προστατεύεται από τις μεταβολές της θερμοκρασίας περιβάλλοντος με έναν θερμοστάτη δύο σταδίων ο οποίος διατηρεί τη θερμοκρασία ελατηρίου T_s σταθερή σε απόσταση μικρότερη από $0,5 \text{ mK}$ υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας.

Οι μεταβολές στο T_s μετρούνται χρησιμοποιώντας έναν αισθητήρα θερμοκρασίας σε καλή θερμική επαφή με το mainspring. Η έξοδος της γέφυρας θερμοκρασίας μετατρέπεται σε ψηφιακό σήμα, το TEMP που φαίνεται στο σχήμα στη σελίδα 46 και αυτό μετατρέπεται στο σήμα αντιστάθμισης θερμοκρασίας.

$$TEC = TEMPCO \cdot TEMP, \quad (2.82)$$

TEMPCO είναι ο συντελεστής θερμοκρασίας οργάνου σε mGal / mK . Μετράται κατά την παραγωγή κάθε οργάνου και εισάγεται μέσω του ηλεκτρολογίου. Μια νέα τιμή του TEC υπολογίζεται και εφαρμόζεται μετά τη λήψη του τελευταίου δείγματος.

Η θερμοκρασία ελατηρίου TEMP σε μονάδες mK μπορεί να εμφανιστεί στην οθόνη υγρών κρυστάλλων. Η τελευταία τιμή TEMP για κάθε ανάγνωση αποθηκεύεται επίσης στη μνήμη μαζί με άλλες μεταβλητές μέτρησης. Το εύρος του TEMP είναι $\pm 3,0 \text{ mK}$ και ρυθμίζεται με μηδενική μετατόπιση έως $\pm 1,0 \text{ mK}$ για κανονική λειτουργία. Αυτό εξασφαλίζει ότι υπάρχει τουλάχιστον ένα εύρος χρήσης $2,0 \text{ mK}$ για να αντισταθμιστούν οι σοβαρές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

Η θερμοκρασία του θαλάμου μετρείται με ένα σύνολο από δύο θερμίστορες, οι οποίοι παρουσιάζουν μακροπρόθεσμα μια μετατόπιση λόγω της γήρανσης τους. Ωστόσο, η επίδραση αυτής της μετατόπισης δεν μπορεί να διακριθεί από τη μετατόπιση του αισθητήρα βαρύτητας και διορθώνεται από τη γραμμική διόρθωση μετατόπισης. (CG-5, Scintrex Autograv System, operation manual).

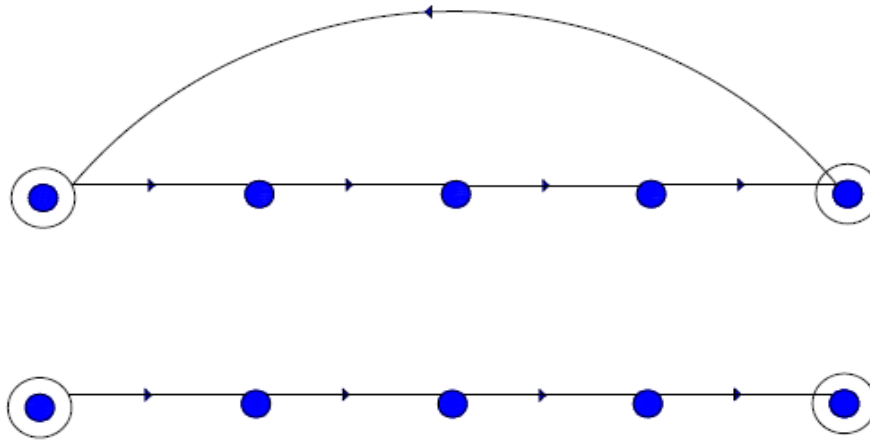
2.7.2.10 Διόρθωση παλίρροιας γης (ETC)

Το ETC παράγεται στο λογισμικό μέσω του τύπου Longman1 (βαρυμετρικός συντελεστής = 1.16) εισάγοντας το γεωγραφικό πλάτος, το γεωγραφικό μήκος και τη διαφορά μεταξύ του χρόνου ρολογιού του βαρυμέτρου και του GMT από το ηλεκτρολόγιο. Εφαρμόζεται μετά την λήψη του τελευταίου δείγματος και μπορεί επίσης να απενεργοποιηθεί μέσω του ηλεκτρολογίου. Ο χρόνος που χρησιμοποιείται στον παλιρροϊκό υπολογισμό είναι το μέσον μεταξύ της έναρξης και της λήξης μιας ένδειξης. Είναι κρίσιμο το γεγονός ότι το UTCDIFF εισάγεται σωστά στο CG-5. Εάν η πινακίδα εισάγεται εσφαλμένα ή η τιμή είναι λάθος επειδή οι τοπικές μετατοπίσεις θερινής ώρας (καλοκαιρινή ώρα) δεν καταγράφονται σωστά, τότε οι προκύπτουσες διορθώσεις θα είναι χαμηλές. (CG-5, Scintrex Autograv System, operation manual).

2.7.3 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι υλοποίησης των μετρήσεων οι οποίοι είναι δυνατόν να εφαρμοστούν (κλειστό loop μετάβαση –επιστροφή, ανοιχτό loop κλπ) οι οποίοι αναλύονται εκτενώς στη βιβλιογραφία και δε θα ήταν σκόπιμο να επαναληφθούν εδώ. Αντίθετα κρίνεται σκόπιμο να περιγραφεί επακριβώς η μέθοδος μέτρησης των σημείων που χρησιμοποιήθηκαν παρακάτω σε αυτή την πτυχιακή εργασία.

Ειδικότερα η ΓΥΣ για τη συλλογή των δεδομένων χρησιμοποίησε δύο μεθόδους, το ανοιχτό loop εξαρτώμενο από 2 γνωστά σημεία και το κλειστό loop εξαρτώμενο από δύο γνωστά σημεία, οι οποίες παρουσιάζονται στο παρακάτω γράφημα:



Εικόνα 2.20: Οι μέθοδοι μετρήσεων από τη ΓΥΣ για τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν.

Αναλυτικά η διαδικασία των μετρήσεων έχει ως εξής:

- Αρχικά μετράται ένας βασικός σταθμός (σταθμός του Εθνικού Βαρυτομετρικού Δικτύου)
- Στη συνέχεια μετρώνται τα ενδιάμεσα σημεία (κυρίως τριγωνομετρικά της ΓΥΣ), με 2 μετρήσεις ανά σταθμό σε διάστημα το πολύ 3 λεπτών μεταξύ τους και μέγιστη επιτρεπόμενη διαφορά μεταξύ των δύο μετρήσεων το πολύ 10 mgal.
- Μέτρηση ενός διαφορετικού βασικού σταθμού και η επιστροφή στον αρχικό σταθμό (η και όχι).
- Στο τέλος της κάθε ημέρας ο κάθε παρατηρητής καθαρογράφει τις μετρήσεις οι οποίες περιλαμβάνουν το όνομα του σταθμού την ακριβή ώρα (σε UTC) και την ένδειξη του οργάνου.

Κατά τη διαδικασία των μετρήσεων δίνεται ιδιαίτερη μέριμνα ώστε η μέτρηση να πραγματοποιηθεί όσο το δυνατόν πιο κοντά στο «καρφί» το οποίο βρίσκεται στη βόρεια πλευρά του τριγωνομετρικού και είναι το σημείο στο οποίο αναφέρονται τελικώς οι συντεταγμένες (και κυρίως τα υψόμετρα). Η καταγραφή των στοιχείων και η επανάληψη της μέτρησης δεν θα ήταν απαραίτητη αν χρησιμοποιούνταν το CG5 της SCINTREX, καθώς με αυτό γίνεται αυτόματα η καταγραφή των στοιχείων και επιπλέον δεν υπάρχει λάθος παρατηρητή.

2.7.4 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Στη συνέχεια το κάθε Loop ξεχωριστά επιλύεται στο γραφείο και προκύπτουν οι τιμές απόλυτης βαρύτητας για το κάθε σταθμό. Η επεξεργασία των μετρήσεων περιλαμβάνει τα κάτωθι:

- Αναγωγή των ενδείξεων του οργάνου με το συντελεστή του εκάστοτε παρατηρητή (ο οποίος προσδιορίστηκε από την ελεγκτική βάση της Πάρνηθας). Ο συντελεστής αυτός είναι συνήθως από 0.99997 έως 1.00003. (Δεν απαιτείται στο CG5 της SCINTREX).

- Αναγωγή των ενδείξεων που προκύπτουν με το συντελεστή ανάγνωσης του οργάνου. Ο συντελεστής ανάγνωσης για το κάθε όργανο δίδεται από τη κατασκευαστική εταιρεία και είναι διαφορετικός για κάθε όργανο. (Γίνεται αυτόματα στο CG5 της SCINTREX).

- Αναγωγή επίδρασης της παλίρροιας για το κάθε σταθμό ξεχωριστά η οποία υπολογίζεται από το τύπο του LONGMAN (1959) και εξαρτάται από τη θέση του σταθμού και την ώρα μέτρησης. (Υπάρχει η δυνατότητα να υπολογιστεί αυτόματα στο CG5 της SCINTREX). Υπάρχουν και άλλα πιο σύγχρονα μοντέλα υπολογισμού των παλίρροιών τα οποία όμως δεν μεταβάλλουν δραματικά τα δεδομένα.

- Στη συνέχεια υπολογίζεται το εναπομένον drift των μετρήσεων το οποίο υπολογίζεται θεωρώντας τους 2 γνωστούς σταθμούς σταθερούς (με σταθερή τιμή βαρύτητας) και για έλεγχο υπολογίζεται και η μέτρηση στον αρχικό σταθμό (αν πρόκειται για κλειστό loop). Για παράδειγμα αν g_1 και g_2 είναι οι τιμές απόλυτης βαρύτητας των δύο σταθερών σταθμών τότε $\Delta g = g_2 - g_1$. Αφού έχουμε υποβάλλει τις αρχικές μας ενδείξεις σε όλες τις παραπάνω μεταβολές τότε η διαφορά των 2 διορθωμένων ενδείξεων στους δύο βασικούς σταθμούς έστω $\Delta a = a_2 - a_1$ συγκρίνεται με τη διαφορά των απολύτων τιμών Δg . Αν η διαφορά τους είναι μεγαλύτερη από 200 mgal τότε θα πρέπει να επαναλάβουμε τις μετρήσεις σε διαφορετική περίπτωση «μοιράζουμε» το drift γραμμικά σε όλους τους σταθμούς που μετρήθηκαν. Για να γίνει αυτό υπολογίζουμε το χρόνο (σε λεπτά) που μεσολάβησε μεταξύ των μετρήσεων στους βασικούς σταθμούς, έστω $\Delta t = t_1 - t_2$. Στη συνέχεια θεωρούμε ότι το drift μεταβάλλεται γραμμικά οπότε υπολογίζουμε τη κλίση του με τη διαίρεση $\Delta a / \Delta t$. Έτσι έχουμε υπολογίσει τη μεταβολή του drift ανά λεπτό μετρήσεων οπότε πολλαπλασιάζοντας τα λεπτά τα οποία παρήλθαν από την αρχή των μετρήσεων μέχρι τη μέτρηση του κάθε σταθμού υπολογίζουμε το drift που είναι αναγκαίο να προσθέσουμε (ή αφαιρέσουμε) από τις μετρήσεις του κάθε σταθμού.

- Τέλος από τις τελικές σχετικές διαφορές υπολογίζουμε την τιμή της απόλυτης βαρύτητας για το κάθε σταθμό.

Πέρα από τη παραπάνω διαδικασία θα μπορούσαμε να διορθώσουμε τις αρχικές μας μετρήσεις και λόγω **ατμοσφαιρικής πίεσης**. Η διόρθωση αυτή έχει υπολογιστεί από τον Merriam (1992) προσεγγιστικά και είναι:

$$\Delta g_p = -0.36 \mu Gal / millibar = -0.36 \mu / kPa, \quad (2.83)$$

Δηλαδή θα πρέπει να έχει μετρηθεί η ατμοσφαιρική πίεση σε κάθε σταθμό. (Για παράδειγμα αν έχουμε σχετική διαφορά σε δύο σταθμούς ατμοσφαιρικής πίεσης 10 KPa τότε θα πρέπει να αφαιρέσουμε 36 μGal , από τη σχετική διαφορά βαρύτητας που έχουν μεταξύ τους). Οι δεδομένες μετρήσεις δεν είχαν στοιχεία ατμοσφαιρικής πίεσης και έτσι δε χρησιμοποιήθηκε η συγκεκριμένη διόρθωση. Η εξαγωγή ατμοσφαιρικών πιέσεων λόγω υψομέτρου εκ των υστέρων δεν συνίσταται καθώς μπορεί να έχει αποκλίσεις έως και 200% από τη μετρημένη ατμοσφαιρική πίεση (λόγω καιρικών συνθηκών κλπ) και έτσι να αλλοιώνει τα αποτελέσματα.

Ομοίως δεν χρησιμοποιούμε **διόρθωση για την ανύψωση του υδροφόρου ορίζοντα**, η οποία επιβάλλεται σε ειδικές μελέτες χρησιμοποιώντας υδρολογικά στοιχεία της περιοχής και πληροφορίες για τη σύσταση του εδάφους (πορώδες - στεγανό). Η διόρθωση που επιβάλλεται και προέρχεται είναι:

$$\Delta g_R = 0.04192 mGal / m, \quad (2.8470)$$

Δηλαδή για 10 cm βροχής στην περιοχή θα πρέπει να αυξήσουμε την παρατηρούμενη τιμή κατά 4μGal. Στη παρούσα μελέτη δεν υπήρχαν τέτοια στοιχεία και η διόρθωση δεν χρησιμοποιήθηκε.

Τέλος υπάρχει η διόρθωση λόγω αλλαγής της στάθμης της θάλασσας η οποία εφαρμόζεται όταν μετράμε σε παραθαλάσσια περιοχή με μεγάλο βάθος (δηλαδή σε χείλος γκρεμού, η σε πολύ βαθιά παραλία, ή λιμάνι με πολύ βαθιά θάλασσα κλπ). Η διόρθωση είναι ανάλογη της παλιρροιακής διόρθωσης που ήδη χρησιμοποιήσαμε και έχει μέτρο:

$$\Delta g_T = 0.02 mGal / m, \quad (2.85)$$

Δηλαδή αν έχουμε παλιρροιακή ανύψωση 5 cm τη στιγμή της μέτρησης θα πρέπει να προσθέσουμε 1μGal στις μετρήσεις μας.

Χρησιμοποιώντας όλες ή κάποιες από τις παραπάνω διορθώσεις, με τη διαδικασία που περιγράφηκε καταλήγουμε στις **τελικές τιμές απόλυτης βαρύτητας** για τη κάθε μέτρηση. Τις τιμές αυτές όμως δεν μπορούμε να τις χρησιμοποιήσουμε χωρίς επιπλέον μετατροπή για γεωδαιτικούς σκοπούς καθώς είναι συσχετισμένες με το υψόμετρο του σημείου τις τοπογραφικές μάζες που το περιβάλλουν τη θέση του σταθμού κλπ, έτσι θα πρέπει να τις επεξεργαστούμε περαιτέρω για να οδηγηθούμε σε χρησιμοποιήσιμα δεδομένα για γεωδαιτικούς σκοπούς.

2.8 ΔΙΟΡΘΩΣΕΙΣ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ

Ο γεωδαίτης που χρησιμοποιεί τη βαρύτητα ως ένα εργαλείο για τη διερεύνηση της δομής του γεωειδούς, ενδιαφέρεται για τις απόλυτες τιμές του g . Αυτό που προσπαθεί να κάνει είναι να ορίσει τις ανομοιογένειες και τις διαφορές (αντιθέσεις) των πυκνοτήτων σε εκείνη την περιοχή της γης που ερευνά. Το ενδιαφέρον στοιχείο εδώ είναι η εξέταση της διαφοράς μεταξύ της επίδρασης ενός ιδιαίτερου χαρακτηριστικού στη βαρύτητα και η επίδραση που προκύπτει εάν δεν είναι παρόν το χαρακτηριστικό αυτό. Αυτό λοιπόν που παρουσιάζει ενδιαφέρον είναι μόνο οι **επιδράσεις στη τιμή της βαρύτητας**.

Γενικά, μετριέται το g σε ένα σημείο στην περιοχή έρευνας και σε ένα σημείο αναφοράς μακριά από την περιοχή, αλλά υπολογίζεται και ερμηνεύεται η τιμή Δg , δηλαδή η διαφορά μεταξύ της βαρύτητας στο σημείο μέτρησης και της βαρύτητας στο σημείο αναφοράς. Επειδή τέτοιες ανωμαλίες βαρύτητας είναι συνήθως πολύ μικρές, η μονάδα ms^{-2} είναι υπερβολικά μεγάλη (κυμαίνεται μεταξύ 9,83 και 9,78 ms^{-2}). Οι ανωμαλίες βαρύτητας μετριούνται συνήθως σε μονάδες βαρύτητας ($g.u$) όπου:

$$\begin{aligned} 1gal &= 10^{-2} m / s^2 \\ 1mgal &= 10^{-3} gal \\ 1\mu gal &= 10^{-6} gal = 10g.u \end{aligned} \quad (2.86)$$

Εφόσον το g είναι περίπου 10 ms^{-2} , η μονάδα βαρύτητας είναι περίπου ένα δεκάκις εκατομμυριοστό της απόλυτης τιμής της βαρύτητας στην επιφάνεια της γης. Δυστυχώς, η διαφορά βαρύτητας μεταξύ δύο σημείων (σταθμού μέτρησης και σημείου αναφοράς) εξαρτάται από πολλούς παράγοντες εκτός των μεταβολών της πυκνότητας. Από την στιγμή που υπάρχει η διαφορά Δg , στη συνέχεια χρειάζεται να εφαρμοσθούν «διορθώσεις» για να απαλειφθούν οι άλλες επιδράσεις, πριν κανείς προχωρήσει και συμπεράνει για τη φυσική κατάσταση του φλοιού στην ιδιαίτερη περιοχή έρευνας. Οι κυριότερες διορθώσεις που απαιτούνται, και οι λόγοι που τις επιβάλλουν, αναφέρονται παρακάτω. (Αλεξόπουλος/βαρύτητα).

2.8.1 ΥΛΙΚΟ ΠΑΡΕΜΒΟΛΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΣΗΜΕΙΟΥ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΣΗΜΕΙΟΥ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

Η διόρθωση υψόμετρου gfa και ισούται με $0,3086$ επί το υψόμετρο, είναι γνωστή ως **διόρθωση ελεύθερου αέρα**, επειδή για τον υπολογισμό της έχει υποτεθεί ότι το μόνο υλικό που μεσολαβεί μεταξύ των σημείων μέτρησης και αναφοράς είναι ο αέρας. Στην πράξη όμως, πέραν της υψομετρικής διαφοράς μεταξύ των σημείων μέτρησης και αναφοράς που οφείλεται στην τοπογραφία, υπάρχει και η μάζα που δεν έχει ληφθεί υπόψη. Εάν τα δύο σημεία μέτρησης και αναφοράς βρίσκονται στην επιφάνεια της γης, αλλά λόγω της τοπογραφίας το σημείο μέτρησης βρίσκεται σε υψόμετρο μεγαλύτερο του σημείου αναφοράς, τότε η βαρύτητα στο σημείο μέτρησης θα είναι μικρότερη από το σημείο αναφοράς κατά μια ποσότητα gfa (διόρθωση ελεύθερου αέρα), επειδή το σημείο μέτρησης είναι πιο μακριά από το κέντρο της γης σε σχέση με το σημείο αναφοράς. Την ίδια όμως στιγμή, η βαρύτητα στο σημείο μέτρησης θα είναι μεγαλύτερη από εκείνη στο σημείο αναφοράς κατά ένα ποσό g_b , επειδή ασκείται μια επί πλέον έλξη από τη μάζα πυκνότητας ρ , που βρίσκεται μεταξύ των επιπέδων του σημείου μέτρησης και του σημείου αναφοράς. Μπορεί ναδειχθεί ότι:

$$g_b = 2\pi \cdot G \cdot \rho \cdot h = 41,91 \cdot 10^{-5} \cdot \rho \cdot h, \quad (2.87)$$

όπου h είναι σε μέτρα και ρ είναι σε kgm^{-3} .

Η διόρθωση g_b πρέπει να αφαιρεθεί από το Δg εάν το σημείο μέτρησης είναι υψηλότερα από το σημείο αναφοράς και να προστεθεί εάν το σημείο μέτρησης είναι χαμηλότερα του σημείου αναφοράς. Η ποσότητα g_b είναι γνωστή ως **διόρθωση Bouguer** και λαμβάνει υπόψη, αντίθετα με τη διόρθωση ελεύθερου αέρα, την πυκνότητα ρ . Για ένα τυπικό πέτρωμα του φλοιού της γης με πυκνότητα π.χ. $2,67 \times 10^3 \text{ kgm}^{-3}$ και εάν το σημείο μέτρησης βρίσκεται ένα μέτρο υψηλότερα του σημείου αναφοράς, τότε έχουμε:

$$g_b = 1,118 \text{ g.u. και } gfa = 3,086 \text{ g.u.}$$

Με άλλα λόγια, η διόρθωση Bouguer είναι τυπικά μικρότερη από την διόρθωση ελεύθερου αέρα. Έτσι, αν και οι διορθώσεις Bouguer και ελεύθερου αέρα έχουν αντίθετο πρόσημο, η βαρύτητα που μετρίεται στην επιφάνεια της γης γενικά θα ελαττώνεται με το υψόμετρο κατά $1,968 \text{ g.u.}$, όπως φαίνεται παραπάνω. (Αλεξόπουλος/βαρύτητα).

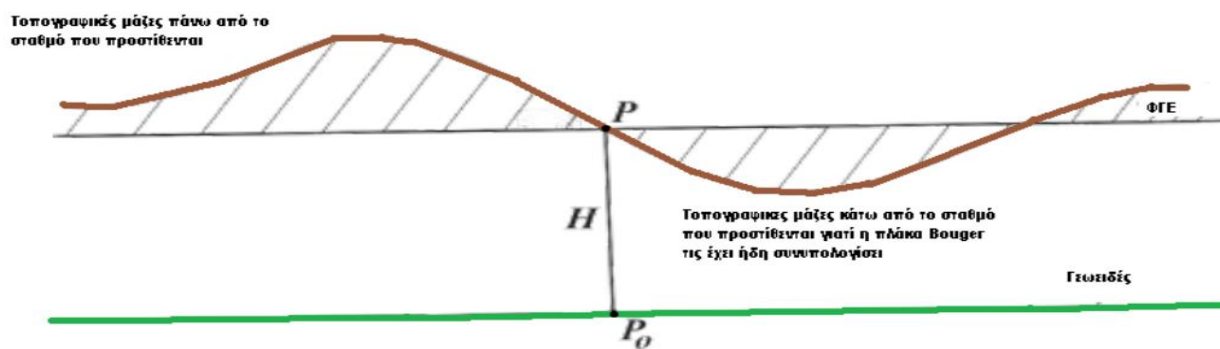
2.8.2 ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑ

Αν η μέτρηση γινόταν σε μία πλήρως επίπεδη περιοχή τότε η αναγωγή Bouguer θα διόρθωνε πλήρως την επίδραση της τοπογραφίας στη μέτρησή μας. Στη πράξη βεβαίως δεν υπάρχουν τέτοιες περιοχές και έτσι πρέπει να επιβληθεί η τοπογραφική διόρθωση στις μετρήσεις. Η τοπογραφική διόρθωση υπολογίζει τις μάζες που βρίσκονται ψηλότερα ή χαμηλότερα από το επίπεδο της μέτρησης και **προσθέτει** την επιρροή τους στις μετρήσεις. Με δεδομένο ότι θα έχει γίνει ήδη η απλή αναγωγή Bouguer όλες οι μάζες είτε πάνω είτε κάτω από το επίπεδο της μέτρησης προστίθενται στις μετρήσεις, καθώς οι μεν μάζες που υπέρκεινται της μέτρησης δημιουργούν ασθενές βαρυντικό πεδίο γύρω τους αντίθετης διεύθυνσης από το γήινο και ως εκ τούτου μειώνουν τη μέτρηση της βαρύτητας. Οι δε μάζες που υπόκεινται του επιπέδου μέτρησης προστίθενται διότι η θετική τους επίδραση στη μέτρηση έχει ήδη υπολογιστεί από τη πλάκα Bouguer. Τα παραπάνω γίνονται ευκολότερα κατανοητά με την εικόνα 2.20.

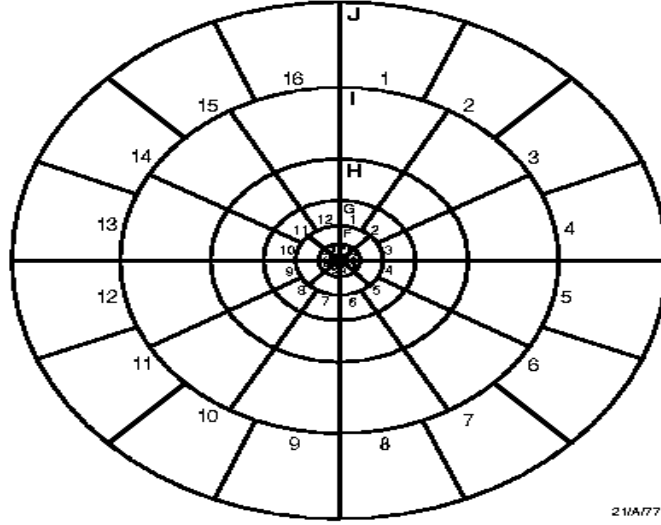
Για τον υπολογισμό των τοπογραφικών διορθώσεων χρησιμοποιούνταν για χρόνια η μέθοδος του Hammer. Σύμφωνα με αυτή δημιουργούνταν κυκλικοί τομείς επί τοπογραφικών χαρτών που για τον κάθε έναν υπολογιζόταν ξεχωριστά το μέσο υψόμετρό του καθώς και η μέση πυκνότητα των πετρωμάτων του (αν υπήρχε διαθέσιμος γεωλογικός χάρτης). Οι κυκλικοί αυτοί τομείς εκτείνονταν μέχρι μία μέγιστη ακτίνα 167 Km, ενώ για κάθε κυκλικό τομέα (πρίσμα) υπολογιζόταν η συνεισφορά του στη μέτρηση μέσω του τύπου:

$$\delta g_T(pr) = \theta \cdot G \cdot p \left[(R_2 - R_1) + \sqrt{R_1^2 + H_m} - \sqrt{R_2^2 + H_m} \right], \quad (2.88)$$

όπου ρ η πυκνότητα, H_m το μέσο ύψος, θ η γωνία με αρχή το Βορρά και R_1, R_2 οι ακτίνες του κυκλικού τομέα. Το άθροισμα της επίδρασης όλων των κυκλικών τομέων έδινε τη τελική τοπογραφική διόρθωση στο σταθμό.



Εικόνα 2.21 : Αναγωγή λόγω αναγλύφου



Εικόνα 2.22: Κυκλικόι Τομείς του Hammer

Τα τελευταία χρόνια με την ύπαρξη πλέον ψηφιακών μοντέλων εδάφους υψηλής ακρίβειας έχει μοντελοποιηθεί ο υπολογισμός της τοπογραφικής διόρθωσης και γίνεται πλέον υπολογιστικά μέσω του τύπου:

$$c_p = G_p \int_{-x}^x \int_{H_p}^{H(x,y)} \frac{z - H_p}{\left[(x_Q - x_p)^2 + (y_Q - y_p)^2 + (z_Q - H_p)^2 \right]^{3/2}} \cdot dx_Q dy_Q dz_Q, \quad (2.89)$$

ο οποίος προϋποθέτει ότι δεχόμαστε σταθερή πυκνότητα και ότι αγνοούμε τη καμπυλότητα της γης (μέχρι τα 167 Km δεν εισάγουμε μεγάλο σφάλμα ενώ απλοποιούμε πολύ τη σχέση υπολογισμού).

Στη παραπάνω σχέση ρ είναι η σταθερή πυκνότητα που επιλέγουμε για όλη τη περιοχή, P το σημείο μέτρησης, Q το σημείο από το οποίο θέλουμε να υπολογίσουμε την επίδραση x,y,z καρτεσιανές συντεταγμένες των σημείων και H_p το υψόμετρο του σταθμού.

Επιπλέον για πιο γρήγορα αποτελέσματα χρησιμοποιείται και ο μετασχηματισμός Fourier για τον υπολογισμό των τοπογραφικών διορθώσεων. Πιο συγκεκριμένα αν έχουμε ένα καννάβο τριών διαστάσεων με διαστάσεις M,N και K στις διευθύνσεις x, y και z αντίστοιχα και Δ_{ijk} είναι η τιμή του κάθε στοιχείου αντίστοιχα ενώ Δx , Δy και Δz είναι το βήμα του καννάβου σε κάθε διάσταση σε μορφή συνέλιξης η τοπογραφική διόρθωση γίνεται:

$$T_Z(x_k, y_l, z_\mu) = G \cdot p \cdot (x_k, y_l, z_\mu) \cdot I_3 \cdot (x_k, y_l, z_\mu), \quad (2.90)$$

και μετασχηματίζεται σε τριών διαστάσεων FFT :

$$\begin{aligned} T_Z(x_k, y_l, z_\mu) &= G \cdot F^{-1} \left[F \cdot \left[p(x_k, y_k, z_k) \cdot F \cdot (I_3(x_k, y_k, z_k)) \right] \right] = \\ &= G \cdot F^{-1} \cdot \left[P(u_m, v_n, w_\lambda) \cdot L_3(u_m, v_n, w_\lambda) \right], \end{aligned} \quad (2.91)$$

2.9 ΑΝΩΜΑΛΙΕΣ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ

Ανάλογα με τις αναγωγές που χρησιμοποιούνται προκύπτουν και οι αντίστοιχες ανωμαλίες βαρύτητας.

Η αρχική ανωμαλία βαρύτητας την οποία αναφέραμε και παραπάνω δίνεται κατευθείαν μέσω του τύπου:

$$\Delta g = g - \gamma, \quad (2.92)$$

Όπου γ είναι η κανονική βαρύτητα και g η τιμή της βαρύτητας στο γεωειδές. Αν για να φτάσουμε από την ΦΓΕ στο γεωειδές θεωρήσουμε ότι υπάρχει μόνο ελεύθερος αέρας τότε χρησιμοποιούμε την αναγωγή ελευθέρου αέρα και η αντίστοιχη **ανωμαλία ελευθέρου αέρα** δίνεται από τον τύπο:

$$\Delta g_{FA} = g - \gamma + g_{fa}, \quad (2.93)$$

Οι ανωμαλίες ελευθέρου αέρα είναι ιδιαίτερα χρήσιμες καθώς έχουν μεγάλη συσχέτιση με το υψόμετρο οπότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό του γεωειδούς.

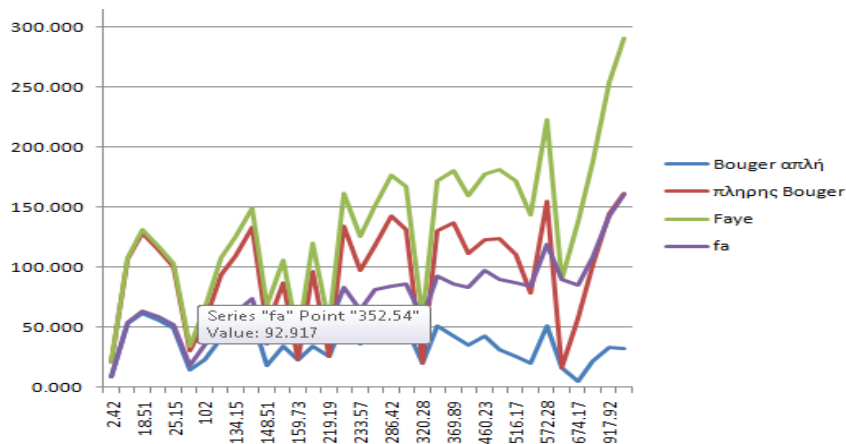
Αν θεωρηθεί ότι για να κατεβούμε από τη ΦΓΕ στο γεωειδές θα πρέπει να εφαρμόσουμε και ένα πιάτο Bouguer τότε οδηγούμαστε στην **απλή ανωμαλία Bouguer** η οποία δίνεται από το τύπο:

$$\Delta g_B = g - \gamma + \Delta g_{FA} - g_b, \quad (2.94)$$

Οι απλές ανωμαλίες Bouguer δεν είναι τόσο εύχρηστες για τον υπολογισμό του γεωειδούς καθώς οι τιμές τους είναι ιδιαίτερα μεγάλες και δεν είναι εύκολο να παρθούν αντιπροσωπευτικοί μέσοι όροι. Η επόμενη ανωμαλία ονομάζεται πλήρης ανωμαλία Bouguer και προκύπτει αν στην απλή ανωμαλία προσθέσουμε και τη τοπογραφική διόρθωση.

$$\Delta g_{BF} = g - \gamma + \Delta g_{FA} - g_b + T_Z, \quad (2.95)$$

Το χαρακτηριστικό αυτής της ανωμαλίας είναι ότι παρουσιάζεται σχεδόν ασυσχέτιστη με τα υψόμετρα.



Εικόνα 2.23: Συσχέτιση Βαρύτητας με τα Υψόμετρα.

Επιπλέον κάποιες φορές είναι χρήσιμες για τον υπολογισμό των συνοριακών προβλημάτων και οι λεγόμενες ανωμαλίες Faye οι οποίες είναι οι ανωμαλίες ελεύθερου αέρα συν την τοπογραφική διόρθωση:

$$\Delta g_{Faye} = \Delta g_{FA} + T_z,$$

(2.96)

2.9.1 ΕΙΔΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΑΝΩΜΑΛΙΕΣ BOUGUER

- Πολλές φορές στον υπολογισμό των τοπογραφικών αναγωγών οι μάζες εξομοιώνονται με ευθείες.
- Κατά τον υπολογισμό των ανωμαλιών Bouguer οι μάζες έχουν μετακινηθεί (αφαίρεση ή πρόσθεση μαζών και δεν τηρούνται οι προϋποθέσεις που πρέπει να πληρούνται για τον προσδιορισμό του γεωειδούς (μάζες επί του γεωειδούς, μικρή έμμεση επίδραση). Ως εκ τούτου οι ανωμαλίες Bouguer δεν είναι κατάλληλες για τον προσδιορισμό του γεωειδούς.
- Οι ανωμαλίες Bouguer είναι απαλλαγμένες από την επίδραση της ορατής τοπογραφίας και οφείλονται σε ανωμαλίες πυκνότητας των ανώτερων λιθοσφαιρικών μαζών. Αντανακλούν τη γενικότερη τάση του πεδίου βαρύτητας που οφείλεται στη διαφορά πυκνότητας μεταξύ διαφορετικών γεωλογικών σχηματισμών τοπικής έκτασης και είναι κατάλληλες για γεωφυσική διασκόπηση και εντοπισμό ορυκτών πόρων και άλλων πηγών ενέργειας.
- Οι ανωμαλίες Bouguer μεταβάλλονται ομαλά και είναι αντιπροσωπευτικές για μεγαλύτερες εκτάσεις από ότι οι ανωμαλίες βαρύτητας. Επομένως είναι κατάλληλες για τον σχηματισμό μέσων τιμών και την πρόγνωση ομόλογων τιμών. Από τις μέσες ή σημειακές τιμές ανωμαλίας Bouguer προκύπτουν στη συνέχεια ανωμαλίες ελεύθερου αέρα.

3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΥΣΤΗΜΑ GPS

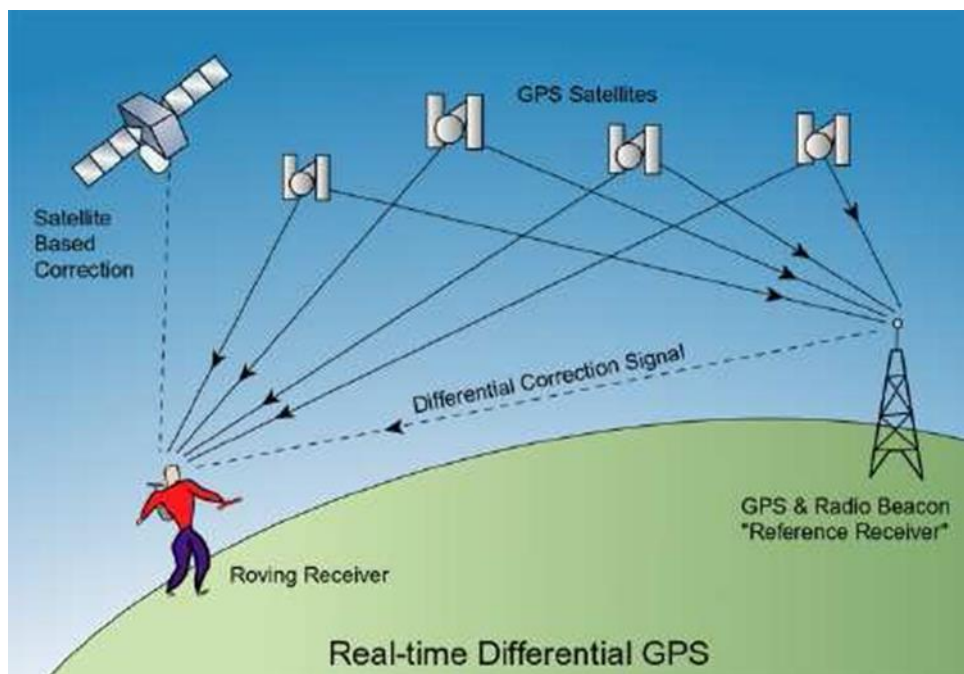
3.1 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ GPS

Το **GPS (Global Positioning System)**, **Παγκόσμιο Σύστημα Θέσεως** είναι ένα παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού θέσης, το οποίο βασίζεται σε ένα "πλέγμα" τριάντα δύο δορυφόρων της Γης, που περιφέρονται γύρω από τη γη και στους οποίους υπάρχουν ειδικές συσκευές, οι λεγόμενοι "δέκτες GPS", οι οποίοι παρέχουν ακριβείς πληροφορίες για τη θέση ενός σημείου, το υψόμετρό του, την ταχύτητα και την κατεύθυνση της κίνησης του (διαστημικό τμήμα). Οι δέκτες αυτοί παρέχουν ακριβείς πληροφορίες για τη θέση ενός σημείου, το υψόμετρό του, την ταχύτητα και την κατεύθυνση της κίνησης του. Επίσης, σε συνδυασμό με ειδικό λογισμικό χαρτογράφησης μπορούν να απεικονίσουν γραφικά τις πληροφορίες αυτές. Το GPS συνδυάζει τρεις παράγοντες: α) το διαστημικό τμήμα, β) το επίγειο τμήμα ελέγχου και γ) τον χρήστη με σκοπό τον εντοπισμό θέσεως του τελευταίου. Το δίκτυο αυτό ρυθμίζεται καθημερινά από τη βάση πολεμικής αεροπορίας του Schriever στο Colorado με τη βοήθεια επίγειων κεραιών λήψης και αποστολής σημάτων με τους δορυφόρους έτσι ώστε να διορθώνονται και να ελέγχεται η σωστή λειτουργία τους (επίγειο τμήμα ελέγχου). Οι τοπογραφικές και υδρογραφικές αποτυπώσεις, οι απλοί τριγωνισμοί και τα δίκτυα πύκνωσης, τα εθνικά, ηπειρωτικά και παγκόσμια γεωδαιτικά δίκτυα, η μελέτη μικρομετακινήσεων κρίσιμων τεχνικών έργων καθώς επίσης και οι γεωδυναμικές εφαρμογές, όπως είναι η παρακολούθηση μικρομετακινήσεων του φλοιού της γης, αποτελούν μερικές χαρακτηριστικές εφαρμογές του GPS. (Βέργος Γ, Κατσουγιαννόπουλος Σ., Σεπτέμβριος (2004).

3.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑ ΤΩΝ GPS

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

Τα δύο ίσως και μοναδικά μειονεκτήματα του συστήματος που το καθιστούν ικανό αλλά όχι αναγκαίο για τοπογραφικές εργασίες είναι η απαίτηση για «ανοιχτό» ουρανό ώστε να υπάρχει οπτική επαφή με ικανό αριθμό δορυφόρων, γεγονός που δυσκολεύει τη χρήση σε πόλεις και κατοικημένες περιοχές με έντονη δόμηση. Λόγω του στρατιωτικού χαρακτήρα του συστήματος η μείωση της ακρίβειας του συστήματος και η εισαγωγή σφαλμάτων από πλευρά των ΗΠΑ κατά χρονικά διαστήματα δεν εγγυώνται την απρόσκοπτη λειτουργία του. (Βέργος Γ, Κατσουγιαννόπουλος Σ., Σεπτέμβριος (2004).

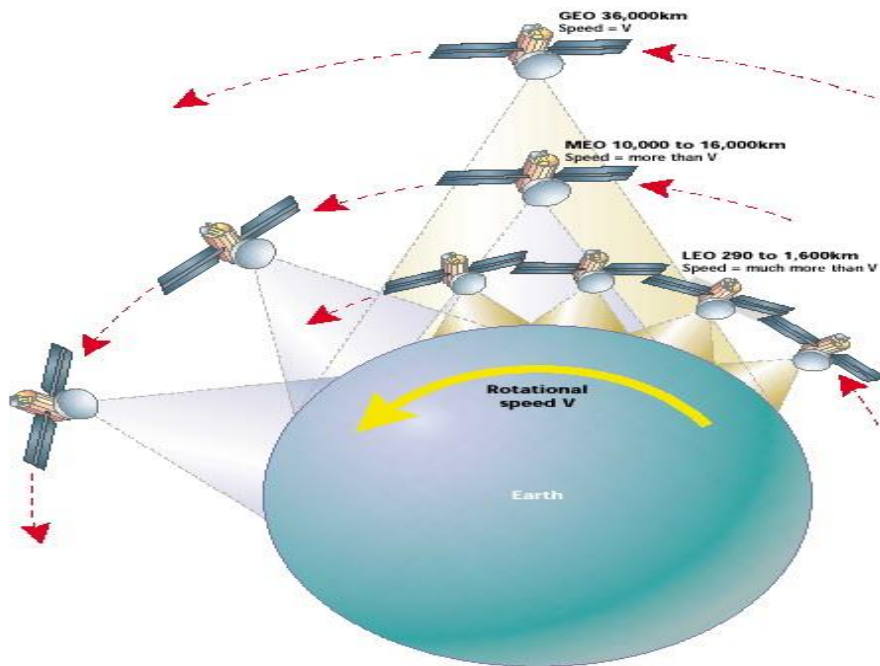


Εικόνα 3.1 : Το σύστημα του GPS α) διαστημικό τμήμα, β) επίγειο και χρήστης

3.3 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ

Το σύστημα GPS αποτελείται ουσιαστικά από «πομπούς σε τροχιά» που είναι οι δορυφόροι GPS (εικόνα 2.2) και από δέκτες GPS στη γήινη επιφάνεια. Τα δορυφορικά σήματα χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση μετρήσεων από το δέκτη, που ισοδυναμούν σε αποστάσεις μεταξύ δέκτη και δορυφόρων σε κάθε χρονική στιγμή. Οι παρατηρήσεις και άλλες πληροφορίες καταγράφονται στη μνήμη του δέκτη και επεξεργάζονται είτε εσωτερικά από το λογισμικό του δέκτη σε πραγματικό χρόνο είτε εκ των υστέρων, παρέχοντας τη θέση (συντεταγμένες), ή την ταχύτητα και τον χρόνο. Κάθε δορυφόρος διαθέτει τέσσερα ατομικά χρονόμετρα. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων ο δέκτης «διαβάζει» και ένα μήνυμα δεδομένων πλοήγησης που περιλαμβάνει απαραίτητες πληροφορίες για τον υπολογισμό της θέσης σε πραγματικό χρόνο, όπως είναι τα στοιχεία τροχιάς των δορυφόρων, από τα οποία υπολογίζονται οι συντεταγμένες των δορυφόρων, οι παράμετροι διόρθωσης χρόνου και άλλα συστηματικά σφάλματα. Το σήμα που στέλνουν οι δορυφόροι του GPS περιέχει όλη την απαιτούμενη πληροφορία για τον εντοπισμό θέσης. Κάθε δορυφόρος στέλνει ένα μοναδικό σήμα το οποίο διαμορφώνεται σε μία από τις δύο συχνότητες στην περιοχή του L φάσματος. Για να αποκωδικοποιήσει ο δέκτης τις συχνότητες αυτές χρησιμοποιεί δύο κωδικούς διαίρεσης πολλαπλής πρόσβασης (Code Division Multiple Access, CDMA). Αυτοί είναι, ο γενικός κωδικός C/A (Coarse Acquisition - χονδροειδούς απόκτησης) που είναι διαθέσιμος για πολιτική χρήση, και ο κωδικός ακριβείας P (precision), ο οποίος μπορεί να κρυπτογραφηθεί ως ένας P(Y) κωδικός διαθέσιμος μόνο για στρατιωτική χρήση. Η L1 συχνότητα διαμορφώνεται με τους C/A και P κωδικούς, ενώ η L2 χρησιμοποιούσε αρχικά μόνο τον P ενώ πλέον στους πιο σύγχρονους δορυφόρους από το 2005 και έπειτα προστέθηκε και ο L2C κωδικός για πολιτική χρήση. (Βέργος Γ, Κατσουγιαννόπουλος Σ., Σεπτέμβριος (2004).

FIGURE 71: SATELLITE ORBITAL DISTANCES



Εικόνα 3.2 : Οι κινήσεις των δορυφόρων περίξ της γης

Χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις GPS για τον ακριβέστερο προσδιορισμό της θέσης κάθε σημείου του οποίου μετρήθηκε η βαρύτητα. Αυτό συνέβη διότι ο δέκτης GPS που έχει το βαρυτήμετρο πάνω του δεν πλησιάζει την τοπογραφική ακρίβεια με την οποία θέλουμε να προσδιορίσουμε τα σημεία μας. Έτσι λοιπόν με τις μετρήσεις GPS που πραγματοποιήθηκαν ήταν δυνατός ο εντοπισμός των σημείων πάνω στην ΦΓΕ σε ένα συγκεκριμένο σύστημα αναφοράς. Ο προσδιορισμός της θέσης κάθε σημείου υπόκειται στην λειτουργία των δορυφόρων. Οι δορυφόροι λειτουργούν σαν σημεία αναφοράς στο χώρο. Επομένως η θέση ενός σημείου προσδιορίζεται με τις μετρήσεις των μηκών από την κεραία του δεκτή προς τουλάχιστον τέσσερις δορυφόρους. Για να μετρηθούν αυτά τα μήκη θα πρέπει ο επίγειος δέκτης να μετρήσει τουλάχιστον τον χρόνο που απαιτείται για να ταξιδέψει το σήμα από τον δορυφόρο μέχρι την κεραία. Επίσης θα πρέπει οι συντεταγμένες του δορυφόρου να είναι γνωστές στο παγκόσμιο γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς οποιαδήποτε χρονική στιγμή t . Στον τομέα των διορθώσεων για την μετάδοση του σήματος, θα πρέπει να υπάρξουν καθυστερήσεις στο σήμα επειδή αυτό διέρχεται μέσα από τα διάφορα στρώματα της ατμόσφαιρας καθώς επίσης και διορθώσεις για τα σφάλματα των χρονομέτρων του δορυφόρου και δέκτη.

Για να υπολογιστεί η θέση ενός παρατηρητή θα πρέπει να γίνει μέτρηση μηκών προς τους δορυφόρους. Έτσι αν έχουμε 3 δορυφόρους η θέση που θέλουμε προσδιορίζεται ως η τομή τριών σφαιρών που έχουν κέντρο το δορυφόρο και ακτίνα την απόσταση. Για να αποφασιστεί ποιο από τα δύο σημεία αποδίδει την πραγματική θέση του δέκτη χρειαζόμαστε μέτρηση από 4^ο δορυφόρο, η οποία διευκολύνει την απομάκρυνση του ενός σημείου ως μη αποδεκτό. Επομένως ο 4^{ος} δορυφόρος είναι σημαντικός καθώς μία τέταρτη μέτρηση χρειάζεται αρχικά για το συγχρονισμό του ρολογιού του δέκτη με τον παγκόσμιο χρόνο και έπειτα για την επίλυση της εξίσωσης που μας δίνει το μήκος μεταξύ κέντρου φάσης της κεραίας του δέκτη και του δορυφόρου :

$$(X - X_{\delta\sigma\rho})^2 + (Y - Y_{\delta\sigma\rho})^2 + (Z - Z_{\delta\sigma\rho})^2 = (c \cdot \Delta t - c \cdot \Delta T)^2, \quad (3.1)$$

όπου :

X, Y, Z = οι συντεταγμένες του αγνώστου σημείου στο γεωκεντρικό καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων,

$X_{\delta\sigma\rho}, Y_{\delta\sigma\rho}, Z_{\delta\sigma\rho}$ = οι γνωστές συντεταγμένες του δορυφόρου (γνωστό σημείο) στο γεωκεντρικό καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων,

c = η ταχύτητα του φωτός,

Δt = η διαφορά του χρόνου που μετράτε μεταξύ εκπομπής σήματος από τον δορυφόρο και λήψης του ίδιου σήματος από την κεραία του δέκτη,

ΔT = το σφάλμα συγχρονισμού μεταξύ των χρονομέτρων του δέκτη και του δορυφόρου.

Ο όρος $c \cdot \Delta t$ ονομάζεται ψευδαπόσταση R .

Ο όρος $c \cdot \Delta t - c \cdot \Delta T = R - c \cdot \Delta T$ είναι το μήκος μεταξύ της κεραίας του δέκτη και του δορυφόρου.

Το ΔT είναι ο 4^{ος} άγνωστος μέσα στην εξίσωση. Έτσι πάντοτε για τον προσδιορισμό θέσης επιλύεται ένα σύστημα τουλάχιστον τεσσάρων εξισώσεων με τέσσερις αγνώστους.

Επομένως ο ελάχιστος αριθμός δορυφόρων που πρέπει να παρατηρηθούν για έναν πλήρη δορυφορικό εντοπισμό είναι τέσσερις.

Η θέση κέντρου φάσης της κεραίας του δέκτη υπολογίζεται και εκφράζεται αρχικά σε γεωκεντρικές καρτεσιανές συντεταγμένες (X, Y, Z) . Κατόπιν αυτές μετατρέπονται σε ελλειψοειδές συντεταγμένες, γεωδαιτικό μήκος λ , γεωδαιτικό πλάτος ϕ και γεωμετρικό υψόμετρο h , ως προς κάποιο ελλειψοειδές αναφοράς, εφαρμόζοντας τον κατάλληλο μετασχηματισμό. (Λάμπρου Ε., Πανταζής Γ, 2010).

3.3.1 ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

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

- Στον στατικό προσδιορισμό (Static Positioning) ο δέκτης ή οι δέκτες GPS παραμένουν ακίνητοι στα προσδιοριζόμενα σημεία σε όλη τη διάρκεια των μετρήσεων. Ο δέκτης δεν είναι απαραίτητο να έχει συνεχή επαφή με τους δορυφόρους όταν μεταφέρεται από σημείο σε σημείο.
- Στον κινηματικό προσδιορισμό (Kinematic Positioning) ο δέκτης ή οι δέκτες GPS κινούνται κατά μήκος μιας διαδρομής και ο δέκτης υπολογίζει συντεταγμένες σε “τυχαία

σημεία” της διαδρομής ανά τακτά χρονικά διαστήματα που έχουμε ορίσει εμείς. Στον κινηματικό προσδιορισμό η επαφή του δέκτη με τους δορυφόρους θα πρέπει να είναι συνεχής κατά τη διάρκεια της κίνησης.

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

$$\begin{aligned} P_{IA}^i &= p_A^i + c \cdot \delta_A - c \cdot \delta^i + I_A^i + T_A^i + e_A^i = \\ &= \sqrt{(X^i - X_A)^2 + (Y^i - Y_A)^2 + (Z^i - Z_A)^2} + c \cdot \delta_A - c \cdot \delta^i + I_A^i + T_A^i + e_A^i, \end{aligned} \quad (3.2)$$

όπου ο δείκτης 1 αναφέρεται στον φορέα L1 (ανάλογα ισχύει για τον φορέα L2). Η εξίσωση αυτή αποτελεί το βασικό μαθηματικό μοντέλο για τον απόλυτο προσδιορισμό θέσης. (Τσακίρη Μ. 2004).

3.3.2 ΣΧΕΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ

Με τον όρο σχετικό προσδιορισμό θέσης, εννοούμε τον προσδιορισμό του διανύσματος μεταξύ δυο σημείων, έστω A και B. Το διάνυσμα αυτό ονομάζεται βάση (baseline). Με άλλα λόγια με τον σχετικό προσδιορισμό, υπολογίζονται οι συντεταγμένες ενός ή και περισσότερων σημείων ως προς κάποιο άλλο σημείο που θεωρείται γνωστό. Ο σχετικός προσδιορισμός θέσης προϋποθέτει ταυτόχρονες μετρήσεις προς S δορυφόρους από δυο τουλάχιστον δέκτες. Αντί των πρωτογενών παρατηρήσεων GPS χρησιμοποιούνται συνήθως γραμμικοί συνδυασμοί τους με σημαντικά πλεονεκτήματα αλλά και κάποια μειονεκτήματα. Ο κυριότερος λόγος είναι ότι με αυτόν τον τρόπο, απαλείφονται ή ελαχιστοποιούνται τα περισσότερα από τα συστηματικά σφάλματα, μερικά από τα οποία είναι δύσκολο να περιγραφούν μαθηματικά πλήρως. Το ίδιο ισχύει και για τα σφάλματα της επιλεκτικής διαθεσιμότητας όταν η κατάσταση αυτή είναι ενεργή. Οι ψευδοαποστάσεις από κώδικες μπορούν να χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές σχετικού προσδιορισμού χωρίς αυξημένες απαιτήσεις ακρίβειας, της τάξης του 0.5 έως 1 m, για παράδειγμα σε πολλές εφαρμογές GIS. (Τσακίρη Μ. 2004).

3.3.3 ΣΧΕΤΙΚΟΣ ΣΤΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ

Με τον όρο στατικό προσδιορισμό θέσης εννοούμε τον προσδιορισμό όπου οι δέκτες παραμένουν ακίνητοι στα σημεία καθόλη τη διάρκεια των μετρήσεων. Για να προσδιοριστούν σωστά οι συνιστώσες μιας βάσης, αρκεί οι συντεταγμένες του σημείου που θεωρείται γνωστό να είναι γνωστές με ακρίβεια μερικών μέτρων, ενδεικτικά της τάξης των 10 m ως προς το WGS84. Στην ουσία, δηλαδή, η επίλυση μιας βάσης αναφέρεται σε ένα “ψευδο-WGS84”. Με ανενεργή την κατάσταση SA, η ακρίβεια αυτή παρέχεται εύκολα από την τυπική λύση πλοήγησης ή για μεγαλύτερη ακρίβεια από τον προσδιορισμό θέσης εκ των υστέρων. Όταν έχουμε να επιλύσουμε πολλές βάσεις, που αποτελούν ένα δίκτυο GPS, αρκεί να είναι γνωστό ένα μόνο σημείο. Τα λογισμικά GPS έχουν τη δυνατότητα να επιλύουν τις βάσεις

αυτόματα ή δίνουν και τη δυνατότητα να επιλέγει ο χρήστης ποιες βάσεις θα επιλύσει από το σύνολο των βάσεων σύμφωνα με κάποια κριτήρια. Στις συνήθεις γεωδαιτικές και τοπογραφικές εργασίες σχεδόν πάντα μας ενδιαφέρει η ένταξη του δικτύου GPS στο τοπικό σύστημα αναφοράς. Έτσι, για να ελεγχθεί η ένταξη, κάποια από τα σημεία του δικτύου που πρέπει να είναι τουλάχιστον τρία, πρέπει να είναι κοινά ώστε να χρησιμοποιηθούν για το μετασχηματισμό του δικτύου GPS στο τοπικό datum. Για να αξιοποιήσουμε τα σημαντικά πλεονεκτήματα που προσφέρει η τεχνική των διαφορών, οι παρατηρήσεις πρέπει να είναι ταυτόχρονες με ικανοποιητική ακρίβεια στα σημεία κάθε βάσης που επιλύεται. Ο χρόνος παραμονής σε κάθε σημείο μέτρησης για δέκτη μιας συχνότητας θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 20 λεπτά για αποστάσεις μέχρι 5 Km από το σημείο αναφοράς (reference point), σημείο στο οποίο ο ένας από τους δυο δέκτες παραμένει καθόλη τη διάρκεια των μετρήσεων (συνήθως είναι κάποιο τριγωνομετρικό ή γενικά σημείο με γνωστές συντεταγμένες). Η βέλτιστη απαιτούμενη χρονική διάρκεια συλλογής παρατηρήσεων εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των σημείων, από τον αριθμό και τη γεωμετρία των δορυφόρων, όπου δείκτης της ακρίβειας των μετρήσεων είναι η τιμή του GDOP η οποία κατά τη διάρκεια των μετρήσεων δεν θα πρέπει να ξεπερνά το 8. Για αποστάσεις μεγαλύτερες των 5 Km και μέχρι 15 Km, ο δέκτης είναι καλό να παραμείνει για τουλάχιστον μια ώρα. Ο ρυθμός καταγραφής των παρατηρήσεων θα πρέπει να κυμαίνεται από 10 μέχρι 20 sec. Η γωνία αποκοπής (cut off angle) ορίζεται στις 15° μοίρες (είναι η γωνία κάτω από την οποία δεν καταγράφονται μετρήσεις). Συνήθως όταν απαιτείται μέγιστη ακρίβεια μετράμε όσο το δυνατόν περισσότερες βάσεις (baselines) μεταξύ των σημείων, με την απαίτηση να 71 φτιάχνουμε κλειστά γεωμετρικά σχήματα π.χ. τρίγωνα ή τετράπλευρα με μια έστω διαγώνιο μετρημένη, έτσι ώστε να μπορούμε πάντοτε να έχουμε τον έλεγχο των σφαλμάτων στις μετρήσεις μας. Για τη μέτρηση ενός δικτύου GPS στην πιο απλή περίπτωση που διαθέτουμε δυο δέκτες, αρκεί ο ένας να τοποθετηθεί σε ένα γνωστό σημείο και ο άλλος ο δέκτης να περιφέρεται στα υπόλοιπα σημεία (ακτινική διάταξη). Κάθε φορά, δηλαδή, μετράμε στην ουσία μια βάση και στη συνέχεια συμπληρώνουμε τις παρατηρήσεις στο δίκτυό μας, μετρώντας τις υπόλοιπες βάσεις. Για τη μέτρηση δικτύων με αυτή τη μέθοδο είναι καλύτερο να διαθέτουμε τρεις δέκτες έτσι ώστε να μετράμε κάθε φορά τρίγωνα από βάσεις και να μειώνουμε το χρόνο μετακίνησης. Σε κάθε ομάδα μετρήσεων θα πρέπει στο σύνολο των σημείων που προσδιορίζονται να υπάρχουν τουλάχιστον δυο γνωστά σημεία (όσο περισσότερα τόσο καλύτερα), από τα οποία το ένα θα είναι σίγουρα το σημείο αναφοράς, ώστε να μπορεί να γίνει έπειτα από την επίλυση ο μετασχηματισμός ομοιότητας των προσδιορισθέντων σημείων από το σύστημα GPS στο ανάλογο προβολικό σύστημα. Οι ακρίβειες που μπορούν να επιτευχθούν με αυτή τη διαδικασία είναι της τάξης των 1-2 cm ±1ppm της απόστασης μεταξύ των σημείων. Η διαδικασία αυτή είναι κατάλληλη για μετρήσεις δικτύων, μικρομετακινήσεων τεχνικών έργων κλπ. Και γενικά όπου απαιτείται υψηλή ακρίβεια στις συντεταγμένες των σημείων μας. (Βέργος Γ, Κατσουγιαννόπουλος Σ., Σεπτέμβριος (2004).

4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΠΕΔΙΟΥ

4.1 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η περιοχή μελέτης μας υφίσταται στην Νοτιοανατολική περιοχή της Αττικής περιλαμβάνοντας αρκετές περιοχές της. Αναλυτικότερα, ξεκινάει από την λεωφόρο Κηφισού στο ύψος του Παλαιού Φαλήρου, προχωράει στην παραλιακή οδό όπου και περιλαμβάνει την περιοχή του Ελληνικού, όπως επίσης και τη Βάρη, συνεχίζει την πορεία της ανατολικότερα περνώντας το Λαγονήσι και τα Καλύβια Θορικού, φτάνοντας στην περιοχή του Θυμαρίου όπου και αλλάζει την πορεία της βορειότερα μέχρι τα Σπάτα και το Μαρκόπουλο, έως ότου φτάσει στη βάση της περιοχής μελέτης μας που είναι το ΤΕΙ Αθήνας. Το μεγαλύτερο ποσοστό της περιοχής μελέτης είναι αστικό, διότι περιλαμβάνονται σ' αυτό πολλοί Δήμοι του νομού Αττικής. Σε αντίθεση με τις πόλεις βέβαια υπάρχουν και αρκετά σημεία τα οποία μας δυσκόλεψαν σε κάποιο βαθμό όσον αφορά την εύρεση τους, καθώς και την μετάβαση από και προς αυτά, όπως είναι το Τριγωνομετρικό 186026 στον Άγιο Κωνσταντίνο Θορικού, καθώς και το Τριγωνομετρικό 186016 στο Θυμάρι.



Εικόνα 4.1 : Απόσπασμα περιοχής μελέτης.

Κατόπιν της οριοθέτησης της περιοχής μελέτης μας βάσει των βαρυτημετρικών σημείων του προϋπάρχοντος δικτύου και των τριγωνομετρικών σημείων, άρχισε να γίνεται ο εντοπισμός των σημείων αυτών καθώς και η σήμανση για αυτά σε κεντρικούς δρόμους για τον ευκολότερο εντοπισμό τους. Τα σημεία που επιλέχθηκαν καθώς και πληροφορίες και οδοιπορικά παρουσιάζονται στο Παράρτημα 7Α.

4.2 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΕΔΙΟΥ

Έπειτα από τον καθορισμό της περιοχής μελέτης και την διαδικασία ανεύρεσης και σήμανσης των σημείων, όπου απαιτούνταν, ξεκίνησε η διαδικασία των μετρήσεων. Σε αυτές περιλαμβάνονται μετρήσεις βαρυτημέτρου καθώς επίσης και μετρήσεις με δέκτες GPS. Κάθε μέρα μετρήσεων ξεκινούσε με αρχική μέτρηση του βαρυτημέτρου στο βαθράκι του TEI. Στη συνέχεια της ημέρας οι μετρήσεις μεταφερόντουσαν στα τριγωνομετρικά σημεία τα οποία ήταν μέσα στην περιοχή μελέτης μας. Οι μετρήσεις του βαρυτημέτρου λάμβαναν χώρα δίπλα στα τριγωνομετρικά σημεία της ΓΥΣ και είχαν διάρκεια ενός δεκαλέπτου. Μέσα σε αυτό το χρονικό διάστημα πραγματοποιήθηκαν 10 σετ μετρήσεων του ενός λεπτού. Το βαρυτήμετρο τοποθετούνταν δίπλα από το εκάστοτε βάθρο έτσι ώστε να καταγραφεί όσο το δυνατόν καλύτερα η επιτάχυνση της βαρύτητας σε συνδυασμό με τον εντοπισμό θέσης που πραγματοποιήθηκε από τις μετρήσεις GPS που λάμβαναν χώρα παράλληλα με τις βαρυτημετρικές. Επιπλέον, ο δέκτης GPS για την πραγματοποίηση των δορυφορικών μετρήσεων, τοποθετήθηκε σε κατάλληλη βάση εξαναγκασμένης κέντρωσης στη στέψη του βάθρου, εφόσον οι μετρήσεις γίνονταν σε βάθρο της ΓΥΣ. Στην περίπτωση που οι μετρήσεις του GPS λάμβαναν χώρα εκτός βάθρου, και απλά σε ένα υλοποιημένο σημείο (σήμανση: ατσαλόκαρφο), τότε χρησιμοποιήθηκε κατάλληλος τοπογραφικός τρίποδας για την κέντρωση και οριζοντίωση του δέκτη. Οι παρατηρήσεις GPS στα σημεία πραγματοποιήθηκαν σε διάστημα μίας ώρας με ρυθμό καταγραφής τα 15 sec και γωνία αποκοπής τις 10°.

4.3 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΕ

4.3.1 ΔΕΚΤΗΣ GPS

Ο δέκτης GPS που χρησιμοποιήθηκε είναι τύπου “Hyper Pro” της εταιρείας Topcon δύο συχνοτήτων (L1 και L2). Στην περίπτωση του σχετικού κινηματικού προσδιορισμού θέσης (RTK), η ακρίβεια μέτρησης του οργάνου οριζοντιογραφικά είναι 3mm+0.50ppm και υψομετρικά 5mm+0.5ppm, ενώ στην περίπτωση του σχετικού στατικού προσδιορισμού θέσης (STATIC) με τον οποίο έγιναν οι μετρήσεις μας, η ακρίβεια μέτρησης του οργάνου οριζοντιογραφικά είναι 1-2 cm ±1ppm.



Εικόνα 4.2: Δέκτης GPS TOPCON hipper Pro

Ο αρκετά ελαφρύς σχεδιασμός που έχει ο συγκεκριμένος δέκτης παρέχει στον χρήστη του την δυνατότητα μετακίνησης είτε οι μετρήσεις είναι στατικού εντοπισμού είτε κινηματικού εντοπισμού. Υπάρχει επίσης το χαρακτηριστικό της διπλής συχνότητας καθώς επίσης και του διπλού αστερισμού RTK GPS και GPS tracking. Το GPS tracking επιτρέπει στο χρήστη να εντοπίσει τη θέση του, με φόντο το χάρτη, είτε σε πραγματικό χρόνο είτε κατά την ανάλυση της τροχιάς αργότερα μέσω ενός GPS λογισμικού παρακολούθησης (Post Processing).

Τα δύο προηγούμενα χαρακτηριστικά προσφέρουν μεγαλύτερη δυνατότητα δορυφορικής κάλυψης, αυξημένη απόδοση και βελτιωμένη ακρίβεια πάνω από τα συστήματα του GPS. Επόμενα χαρακτηριστικά τα οποία μας βοηθούν πολύ σε όλων των ειδών τις μετρήσεις (στατικό, κινηματικό) είναι ο πλήρως ενσωματωμένος δέκτης (ή αλλιώς κεραία) ο οποίος βοηθάει στην μείωση του όγκου του δέκτη κατά την μεταφορά του. Επιπρόσθετα το ενσωματωμένο Bluetooth έκδοσης 1.1 comp βοηθά στην απόλυτη και γρήγορη επικοινωνία του δέκτη με το χειριστήριο (controller). Στην συνέχεια το μεγάλης εμβέλειας UHF radio που φτάνει μέχρι τα 4mi (μίλια) δίνει την δυνατότητα σε χρήστες, όταν λαμβάνουν μετρήσεις κινηματικού εντοπισμού να απομακρύνονται αρκετά από την βάση (σε base-rover λειτουργία). Τέλος το Topcon λογισμικό το οποίο είναι ένας ελεγκτής λογισμικού δίνει στον δέκτη την απαραίτητη λειτουργικά υποδομή να λαμβάνει μετρήσεις με σωστές παραμέτρους. (Topcon Hipper Pro Operator's Manual)

4.3.2 BAPTΥTHMETPO SCINTREX CG5

Η Scintrex CG-5 μεγιστοποιεί την παραγωγικότητα και παρέχει ανώτερη επαναληπτικότητα δεδομένων σε ανώμαλο έδαφος τομέα. Ο προσδιορισμός θέσης του κάθε σταθμού μετρείται με την ενσωματωμένη δυνατότητα GPS.



Εικόνα 4.3 : Βαρυτήμετρο ScintrexCG5

Το CG-5 είναι ο πιο πρόσφατος μετρητής βαρύτητας από τη Scintrex Ltd. Το CG-5 μπορεί να λειτουργεί με ελάχιστη εκπαίδευση του χειριστή του και εμπεριέχει αυτοματοποιημένες λειτουργίες μειώνοντας σημαντικά την πιθανότητα σφαλμάτων ανάγνωσης. Οι λήψεις πολλών δεδομένων ταυτόχρονα επιτυγχάνεται με την παροχή μιας γρήγορης σύνδεσης του οργάνου με USB που παρέχει εύκολα τα μετρηθέντα στοιχεία. Η απομάκρυνση του θορύβου έχει βελτιωθεί μέσα από μια σειρά από αυτοματοποιημένες λειτουργίες διόρθωσης οι οποίες είναι εύκολο να διατηρηθούν.

Με την συνεχή παρακολούθηση των ηλεκτρονικών αισθητήρων κλίσης που διαθέτει, το CG-5 μπορεί αυτόματα να αντισταθμίσει τα σφάλματα ως προς το μέτρο της κλίσης της βαρύτητας. Λόγω της χαμηλής μάζας του και τις εξαιρετικές ελαστικές ιδιότητες του χαλαζία, οι θόρυβοι έχουν σχεδόν εξαλειφθεί. Το CG-5 μπορεί να μεταφερθεί σε πολύ ανώμαλους δρόμους και η εναπομένουσα μετατόπιση να παραμένει σε χαμηλά επίπεδα. Το CG-5 μπορεί να αντέξει ένα σοκ πάνω από 20G και ο θόρυβος στις μετρήσεις δεν θα είναι περισσότερο από 5 mGal.

Το CG-5 προσφέρει την καλύτερη δυνατότητα επαναληψιμότητας. Πάνω από 10 σετ αναγνώσεων του CG-5 θα επαναληφθούν μέσα σε ένα τυπική απόκλιση 0.005mGal. Εξοπλισμένο με μια ολοκληρωμένη έξυπνη κεραία GPS Garmin 12 καναλιών και δίνει στίγμα με ακρίβεια μικρότερη των 15m με το πρότυπο GPS που διαθέτει και μικρότερη των 3m αν λάβει τις απαραίτητες διορθώσεις SBAS.

Resolution:	1 micro Gal
Standard Deviation:	< 5 Micro Gal
Residual drift:	0.02 milliGal/day
Ambient Temperature Coefficient:	0.2 microGal/°C
Pressure Coefficient:	0.15 microGal/ kPa
Magnetic Field Coefficient:	1 microGal/Gauss
Sensor Type:	Fused quartz using electrostatic nulling
Range of automatic tilt compensation:	+/- 200 arc.sec
GPS Accuracy:	Standard: <15m; DGPS (SBAS) <3m
Remote trigger:	Up to 30m range
Memory:	1 M Byte
Data I/O port:	USB memory stick, USB or Serial
Display:	1/4 VGA 320 x 240 pixels
Power:	2 x 6Ah (10.8V) rechargeable Lithium Smart Batteries
Operating temperature range:	- 40°C to + 45°C
Automated compensations:	Temperature Instrument tilt Tide, Noisy sample Seismic noise filter
Operating range:	8000 mGal without re-setting

Πίνακας 4.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά οργάνου ScrintrexCG5 (Technical Specifications).

4.4 ΧΡΟΝΟΔΙΑΓΡΑΜΜΑ

Αρχικά, πριν από την έναρξη των μετρήσεων, έγιναν κάποιες εργασίες, οι οποίες αφορούν στην αναγνώριση της περιοχής μελέτης. Η μεγαλύτερη βαρύτητα δόθηκε στην αναζήτηση των βαρυτημετρικών σημείων. Εφόσον τα σημεία αυτά ευρέθησαν το επόμενο στάδιο ήταν η αναζήτηση των τριγωνομετρικών. Όλη αυτή η διαδικασία διήρκησε περίπου μία εβδομάδα. Έπειτα από αυτή τη διαδικασία ακολούθησαν οι εργασίες πεδίου (μετρήσεις των σημείων). Οι εργασίες αυτές διαρκούσαν από τις 8 το πρωί μέχρι περίπου τις 4 το μεσημέρι. Συνολικά απαιτήθηκαν 29 ημέρες μετρήσεων (όχι

καθημερινών) από 10/06/2015 έως 08/07/2015. Η επεξεργασία των μετρήσεων και των δύο οργάνων χρειάστηκε περίπου 30 ημέρες. Το κατέβασμα της κάθε ημέρας μετρήσεων γινόταν στο τέλος της. Στο τέλος έγινε ο διαχωρισμός των μετρήσεων σε κάθε μέρα ξεχωριστά. Έπειτα χρειάστηκαν 10 μέρες για την επεξεργασία των δεδομένων από τα εκάστοτε λογισμικά. Οι τελικές εργασίες γραφείου που περιλαμβάνουν μαζί και την σύνταξη του τεύχους της πτυχιακής εργασίας περιελάμβαναν όλο το υπόλοιπο διάστημα μέχρι την παρουσίαση της.

5 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

5.1 ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ GPS ΚΑΙ ΕΠΙΛΥΣΗ

Όσο αναφορά την αποθήκευση των δεδομένων του GPS, όπως προαναφέρθηκε αυτή γινόταν στο τέλος κάθε ημέρας μέτρησης. Η κάθε μέρα μέτρησης περιελάμβανε 3 αρχεία με την ημερομηνία της μέτρησης στο όνομα του καθενός.

Με το πέρας των μετρήσεων στο πεδίο, μεταφέρθηκαν οι μετρήσεις στο πρόγραμμα «Topcon Tools» με σκοπό την επίλυση των βάσεων που μετρήθηκαν στο πεδίο. Στηριζόμενοι στην καταγραφή της ώρας έναρξης και λήξης μετρήσεων του οργάνου από το πεδίο, δόθηκαν οι πραγματικές ονομασίες στα σημεία που αποτελούν το δίκτυο στην καρτέλα «GPS Occupations». Σε κάθε μέτρηση σημειώθηκαν τα ύψη της κεραίας στη στήλη «Antenna Height» και στη στήλη «Antenna Height Method» επιλέχθηκε το «slant» για τα νέα 2 νέα ιδρυθέντα σημεία και το «Vertical» για τα τριγωνομετρικά. Αυτός ο διαχωρισμός των υψομέτρων έγινε διότι το ύψος οργάνου για τα καινούργια σημεία μετριέται κεκλιμένα από την ένδειξη στην άκρη του δέκτη μέχρι το έδαφος ενώ για τα τριγωνομετρικά σημεία μετριέται κατακόρυφα από το σημείο αναφοράς της κεραίας (antenna reference point- ARP) μέχρι τη στέγη του βάρους. Το σημείο που είχε οριστεί από εμάς σαν βάση μας (base) ήταν το σημείο του ΤΕΙ Αθήνας το οποίο λάμβανε μετρήσεις καθ' όλη την διάρκεια της ημέρας επί 24ώρου βάσεως. Ο σταθμός αυτός ιδρύθηκε και εγκαταστάθηκε στο πλαίσιο της προσπάθειας του τμήματος μας για συνεχή ενημέρωση και συμμετοχή στις σύγχρονες τάσεις στο αντικείμενο του Τοπογράφου Μηχανικού. Ο νέος μόνιμος δορυφορικός σταθμός αναφοράς GNSS (Global Navigation Satellite System) βρίσκεται εγκατεστημένος στο τμήμα της παλιάς ΣΤΕΦ στο Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής και ονομάστηκε ΤΕΙΑΤΗ1. Ο σταθμός αυτός συλλέγει δεδομένα του δορυφορικού συστήματος εντοπισμού GPS (Global Positioning System). Η λειτουργία ενός τέτοιου είδους σταθμού αποτελεί βασικό εργαλείο στο σύγχρονο πεδίο εργασίας και έρευνας καθώς αποτελεί 24ωρη πηγή δεδομένων βοηθώντας τις τοπογραφικές-γεωδαιτικές εργασίες. Τα δεδομένα αυτά μπορεί κανείς να τα διαχειριστεί αρκεί να έχει πρόσβαση στο διαδίκτυο. Ο ρυθμός καταγραφής των δεδομένων είναι στα 30sec και η γωνία αποκοπής των δορυφόρων 10°. Για την καλύτερη διάθεση των προϊόντων, γίνεται ποιοτικός έλεγχος των δεδομένων του σταθμού ο οποίος περιλαμβάνει τον έλεγχο των παρατηρούμενων δορυφόρων, τον αριθμό καταγραφής δεδομένων και υπολογισμός ενός ποσοστού σε σχέση με τα δεδομένα που καταγράφονται από την γωνία αποκοπής των δορυφόρων. Υπολογισμός της μέσης τιμής του φαινομένου της πολυανάκλασης αλλά και επιμέρους αντίστοιχες τιμές για τις συχνότητες L1 και L2. Έλεγχος της ολίσθησης των κύκλων και υπολογισμός του ποσοστού σε σχέση με το συνολικό αριθμό των παρατηρήσεων. Τέλος έχουμε την απεικόνιση της ποιότητας του σήματος σε κάθε συχνότητα L1 και L2 συναρτήσει του αζιμουθίου και της γωνίας ύψους του κάθε δορυφόρου καθώς επίσης και την εκτίμηση της ζενιθίας τροποσφαιρικής υστέρησης. Κατόπιν, και αφού λάβαμε τις ήδη επεξεργασμένες μετρήσεις, αυτές εισήχθησαν στο πρόγραμμα και όπως φαίνεται και στην εικόνα το σημείο αυτό του Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής (ΤΕΙΑΤΗ1) καταγράφηκε ως σταθερό. Κατόπιν από το πρόγραμμα αυτό βγάλαμε τα ϕ , λ , h καθώς και τα X , Ψ , Z του κάθε σημείου.

Η επίλυση των δεδομένων του GPS έγινε στην από κοινού πτυχιακή πριν τον διαχωρισμό με την πτυχιακή του Μακρή Γεώργιου.

5.2 ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΒΑΡΥΤΗΜΕΤΡΟΥ ΚΑΙ ΕΠΙΛΥΣΗ

Η αποθήκευση και των βαρυτημετρικών δεδομένων πεδίου, όπως επίσης και των δεδομένων GPS γινόταν στο τέλος της κάθε ημέρας των μετρήσεων σε ένα αρχείο txt το οποίο περιείχε σε αναλυτική μορφή τις μετρήσεις καθώς και τις παραμέτρους του οργάνου που εισήχθησαν από εμάς στην αρχή των μετρήσεων.

Η επίλυση των δεδομένων του Βαρυτημέτρου έγινε στην από κοινού πτυχιακή πριν τον διαχωρισμό με την πτυχιακή του Μακρή Γεώργιου.

5.2.1 ΣΥΝΟΡΘΩΣΗ ΒΑΡΥΤΗΜΕΤΡΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

Η διαφορά βαρύτητας ανάμεσα σε δύο σημεία ισούται με:

$$\Delta g(i, j) = g(i) - g(j) + v \quad (5.1)$$

όπου $\Delta g(i, j)$ είναι η διαφορά βαρύτητας από το σημείο i στο σημείο j , $g(j)$ η τιμή βαρύτητας στο σημείο j , $g(i)$ η τιμή βαρύτητας στο σημείο i και v το σφάλμα της παρατήρησης $\Delta g(i, j)$.

Τα σημεία που θα χρησιμοποιηθούν για την δημιουργία των απαραίτητων εξισώσεων παρατήρησης, είναι σημεία των οποίων οι τιμές της βαρύτητας για το καθένα είναι γνώστες, εκτός από ένα σημείο (σημείο TEI), του οποίου η τιμή βαρύτητας είναι άγνωστη. Έτσι ο αριθμός των σημείων είναι 5, με 4 γνωστά και 1 άγνωστο. Τα σημεία είναι τα εξής:

- 1) Σημείο στο Ελληνικό ($g(ell) = 980044.377$ mGal)
- 2) Σημείο στην Αγία Τριάδα ($g(ag) = 980042.605$ mGal)
- 3) 17066 ($g(66) = 979915.561$ mGal)
- 4) Σημείο στη Μεταμόρφωση ($g(met) = 980003.098$ mGal)
- 5) Σημείο στο TEI ($g(TEI) = \text{άγνωστο}$)

Τα τέσσερα γνωστά σημεία είναι σημεία του βαρυτημετρικού δικτύου της Ελλάδας με τις τιμές τους αναφερόμενες στο σύστημα βαρύτητας του Potsdam (Αραμπέλος, 2007).

Το επόμενο βήμα που έγινε ήταν η δημιουργία εξισώσεων παρατήρησης μέσω του τύπου (5.1) ανάμεσα σε 2 σημεία κάθε φορά. Οι εξισώσεις παρατήρησης που δημιουργήθηκαν παρουσιάζονται στην πτυχιακή εργασία του Μακρή Γεώργιου.

5.2.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΝΩΜΑΛΙΩΝ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ

Από τα δεδομένα υπαίθρου, μετά από κατάλληλες διορθώσεις και αναγωγές, προέκυψαν ισάριθμες ανωμαλίες ελευθέρου αέρα. Επίσης προέκυψαν διορθώσεις Bouguer αλλά και ανάγλυφου και σε τελικό στάδιο πλήρης ανωμαλίες Bouguer. Οι ανωμαλίες ελευθέρου αέρα υπολογίστηκαν με τη βοήθεια του παρακάτω τύπου :

$$\Delta g_{FA} = g_{\Gamma\Upsilon\text{Σ}} + 0.3086 \cdot H - \gamma (\text{mgal}), \quad (5.2)$$

Όπου H το ορθομετρικό υψόμετρο του σταθμού σε μέτρα, $g_{\Gamma\Upsilon\text{Σ}}$ οι τιμές όπως δόθηκαν από την Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού και γ η κανονική τιμή βαρύτητας από τον αντίστοιχο τύπο της κανονικής βαρύτητας για το ελλειψοειδές του WGS84. (Ανδριτσάνος Β.Δ., Κατσάμπαλος Κ.Ε., Κεχαΐδου Κ.Ε., Τζιαβός Η.Ν, 1999).

Για να ξεκινήσουμε να έχουμε απτά αποτελέσματα για την εργασία μας καταστρώθηκε ένα excel αποσπάσματα του οποίου παρατίθενται παρακάτω. Ως προς τις στήλες του excel έχουμε :

Μέση Τιμή Βαρυτημέτρου : Η τιμή για κάθε σημείο προκύπτει από τον μέσο όρο των 10 μετρήσεων που έχουν ληφθεί .

Μέση Τιμή Τυπικής Απόκλισης : Είναι η μέση τιμή των τιμών των τυπικών αποκλίσεων που βγαίνουν από κάθε δεκάδα μετρήσεων σε κάθε σημείο.

Μέση Τιμή Χρόνου : Η μέση τιμή των χρόνων κατά τους οποίους λήφθηκαν οι 10 μετρήσεις για κάθε σημείο.

Διορθωμένη Τιμή Βαρυτημέτρου : Είναι η διαφορά της μέσης τιμής βαρυτημέτρου με την διαφορά χρόνου των μετρήσεων.

Τιμή $\Gamma\Upsilon\text{Σ}$: Είναι η απόλυτη τιμή βαρύτητας σύμφωνα με την Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού.

Διαφορά Μετρήσεων : Είναι ο πολλαπλασιασμός της πρώτης τιμής σε κάθε μέτρηση με το πηλίκο από την πρώτη τιμή στη διαφορά χρόνων προς αυτή που επιζητούμε.

Διαφορά Χρόνων : Είναι η διαφορά της μέσης τιμής χρόνου της μέτρησης μας με την μέση τιμή χρόνου της πρώτης μέτρησης κάθε ημέρας ξεχωριστά.

Κανονική Βαρύτητα στο ΕΕΠ : Είναι η υπολογισμένη κανονική βαρύτητα στο ΕΕΠ.

Αναγωγή Ελεύθερου Αέρα : Είναι ο πολλαπλασιασμός της σταθεράς -0.3086 με το ορθομετρικό υψόμετρο.

Ανωμαλία Ελεύθερου Αέρα : Υπολογίζεται ως η τιμή της $\Gamma\Upsilon\text{Σ}$ μείον το άθροισμα την κανονικής βαρύτητας στο ΕΕΠ και της αναγωγής ελεύθερου αέρα.

Σημείο	Μέση Τιμή Βαρυτόμετρου	Μέση Τιμή Τοπικής Απόκλισης	Μέση Τιμή Χρόνου	Διορθωμένη Τιμή Βαρυτόμετρου	E	N	φ(°)	λ(°)	h(m)	H(m)
ΤΕΙ	3618,966	0,004278054	42139,25576	3618,966	471344,059	4205723,723	38,0027764	23,6755110	107,013	59,436
Βαρυτιμετρικό σημείο αγίας τριάδας	3620,184	0,007599124	42139,34267	3620,182	477043,157	4193234,410	37,8889159	23,7406205	74,935	38,489
18030	3606,592	0,005329393	42139,40017	3606,590	482218,558	4187461,767	37,8370012	23,7996188	165,306	127,096
Βαρυτιμετρικό σημείο μέσα στο αεροδρόμιο του ελληνικού	3664,318	0,016462873	42162,39903	3663,950	475329,838	4194278,645	37,8982830	23,7211004	42,764	6,295
ΤΕΙ	3618,971	0,004725854	42139,58318	3618,966	471344,059	4205723,723	38,0027764	23,6755110	107,013	59,436
ΤΕΙ	3619,064	0,003230243	42140,26282	3619,064	471344,059	4205723,723	38,0027764	23,6755110	107,013	59,436
18015	3605,687	0,003241115	42140,33477	3605,690	489395,752	4183314,015	37,7997274	23,8812455	155,364	117,068
18046	3609,341	0,004109843	42140,39771	3609,346	494400,312	4191922,571	37,8773606	23,9380274	161,246	122,790
18083	3596,890	0,007517848	42140,49322	3596,898	491877,291	4200982,163	37,9589959	23,9092380	202,408	163,680
ΤΕΙ	3619,054	0,015919779	42140,57049	3619,064	471344,059	4205723,723	38,0027764	23,6755110	107,013	59,436
ΤΕΙ	3620,521	0,002247511	42153,22241	3620,521	471344,059	4205723,723	38,0027764	23,6755110	107,013	59,436
186016	3557,357	0,005000009	42153,28999	3557,366	498025,048	4171571,666	37,6939484	23,9792955	393,888	355,652
186026	3569,159	0,004422962	42153,35776	3569,176	500798,253	4175890,352	37,7328751	24,0107570	355,614	317,228
18006	3594,687	0,005742532	42153,44012	3594,713	497335,384	4180226,08	37,7719508	23,9714429	239,268	200,872
ΤΕΙ	3620,483	0,003530912	42153,53753	3620,521	471344,059	4205723,723	38,0027764	23,6755110	107,013	59,436
ΤΕΙ	3661,440	0,005922115	42162,31362	3661,440	471344,059	4205723,723	38,0027764	23,6755110	107,013	59,436
ΕΛΛΗΝΙΚΟ (ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΟ)	3664,318	0,016462873	42162,39903	3664,340	475329,838	4194278,645	37,8982830	23,7211004	42,764	6,295
ΤΕΙ	3661,380	0,006054828	42162,54796	3661,440	471344,059	4205723,723	38,0027764	23,6755110	107,013	59,436

Σημείο	Τιμή(ΥΖ)(mgals)	σφ(m)	σλ(m)	σh(m)	Estimated accuracy(mgals)	Ημερομηνία	διαφορά μετρήσεων	διαφορές χρόνων	Κανονική βαρύτητα στο ΕΕΠ(mgals)	Αναγωγή ελεύθερου αέρα	Ανωμαλία ελεύθερου αέρα(mgals)
ΤΕΙ	980041,47					16/6/2015	0,0052	0,32742	983033,141	-18,3419496	-3010,013
Βαρυτιμετρικό σημείο αγίας τριάδας	980042,605	0,01082	0,00567	0,01221	(+) - 0,010		0,001380282	0,08691	978085,226	-11,8777054	1945,500844
18030	980029,094	0,00558	0,00534	0,00773			0,002293482	0,14441	983194,662	-39,2218256	-3204,789462
Βαρυτιμετρικό σημείο μέσα στο αεροδρόμιο του ελληνικού	980044,377	0,01514	0,00615	0,01635	(+) - 0,013		0,387555446	23,14327	982251,080	1,942637	-2208,625509
ΤΕΙ	980041,47						0,0052	0,32742	983033,1406	-18,3419496	-3010,012513
ΤΕΙ	980041,47					17/6/2015	-0,0101	0,30767	983033,1406	-18,3419496	-3010,012513
18015	980028,096	0,01329	0,0073	0,01516			-0,00236193	0,07195	979943,590	-36,1271848	48,37915011
18046	980031,752	0,00556	0,00494	0,00744			-0,004428085	0,13489	982686,816	-37,892994	-2692,956809
18083	980019,304	0,00716	0,00444	0,00842			-0,007563428	0,2304	979152,9165	-50,511648	815,8758904
ΤΕΙ	980041,47						-0,0101	0,30767			
ΤΕΙ	980041,47					30/6/2015	-0,039	0,31512	983033,141	-18,3419496	-3010,012513
186016	979978,314	0,01414	0,00839	0,01644			-0,008299524	0,06758	983218,242	-109,7542072	-3349,682452
186026	979990,124	0,00818	0,00694	0,01072			-0,016622382	0,13535	979556,094	-97,8965608	336,1337682
18006	980015,662	0,01045	0,00752	0,01288			-0,026737043	0,21771	981229,327	-61,9890992	-1275,653657
ΤΕΙ	980041,47						-0,0387	0,31512	983033,1406	-18,3419496	-3010,012513
ΤΕΙ	980041,47					8/7/2015	-0,060	0,23434	983033,1406	-18,3419496	-3010,012513
ΕΛΛΗΝΙΚΟ (ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΟ)	980044,377	0,01514	0,00615	0,01635	(+) - 0,019		-0,021868226	0,08541	982251,0599	-1,942637	-2208,625509
ΤΕΙ	980041,47						-0,060	0,23434	983033,141	-18,3419496	-3010,012513

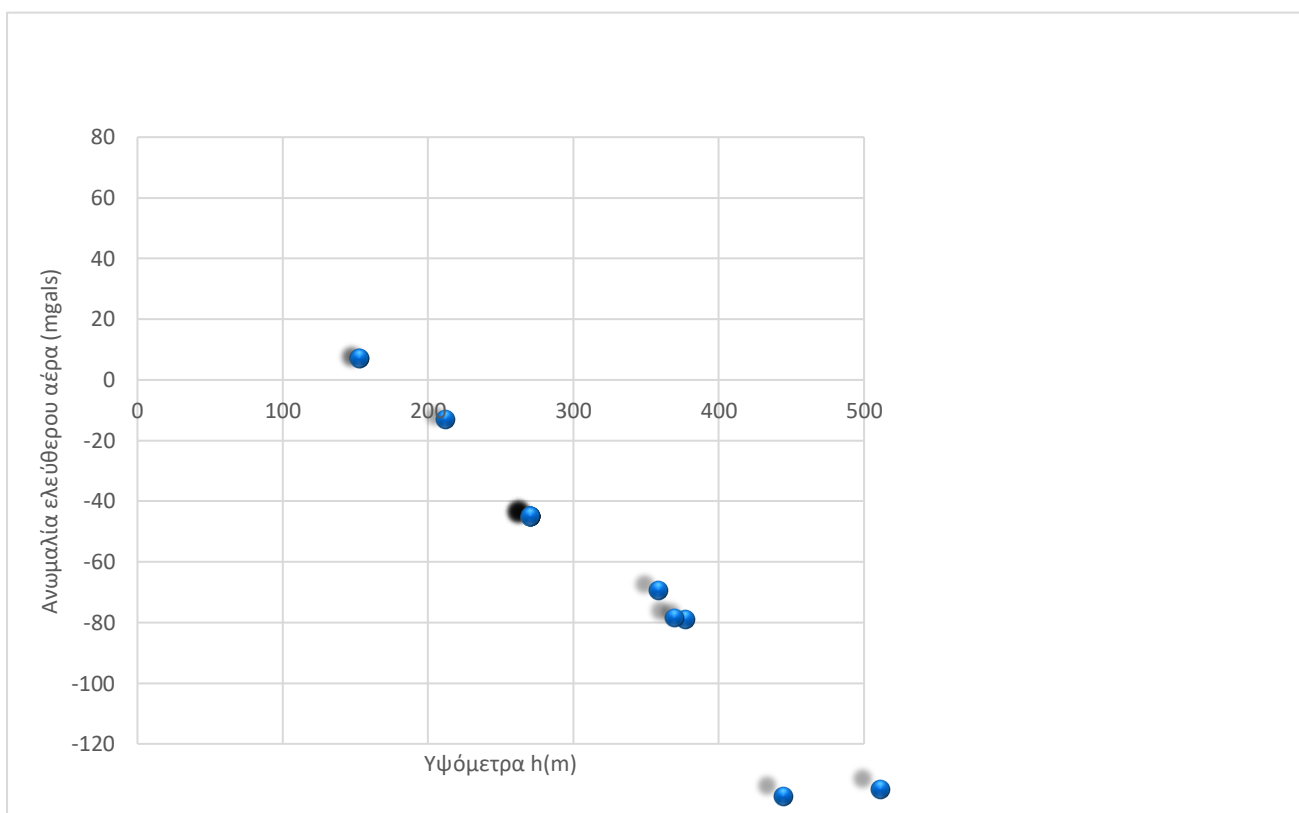
Πίνακας 5.1 : Απόσπασμα από επεξεργασία των μετρήσεων του βαρυτόμετρου σε συνδυασμό με του GPS και το πρόγραμμα excel.

Στην συνέχεια παρουσιάζεται ένα διάγραμμα, όπου στον άξονα των x τοποθετήθηκαν οι τιμές των Δg (ανωμαλιών ελεύθερου αέρα σε mgals) και στον άξονα των y τα υψόμετρα των σημείων. Με τον τρόπο αυτό γίνεται αντιληπτή η εξάρτηση των ανωμαλιών ελεύθερου αέρα από το υψόμετρο. Παρατηρείται ότι τα σημεία σχηματίζουν μια ευθεία η οποία εξίσωση της είναι:

$$y = -0.5233x + 74.215, \quad (5.3)$$

Όπου:

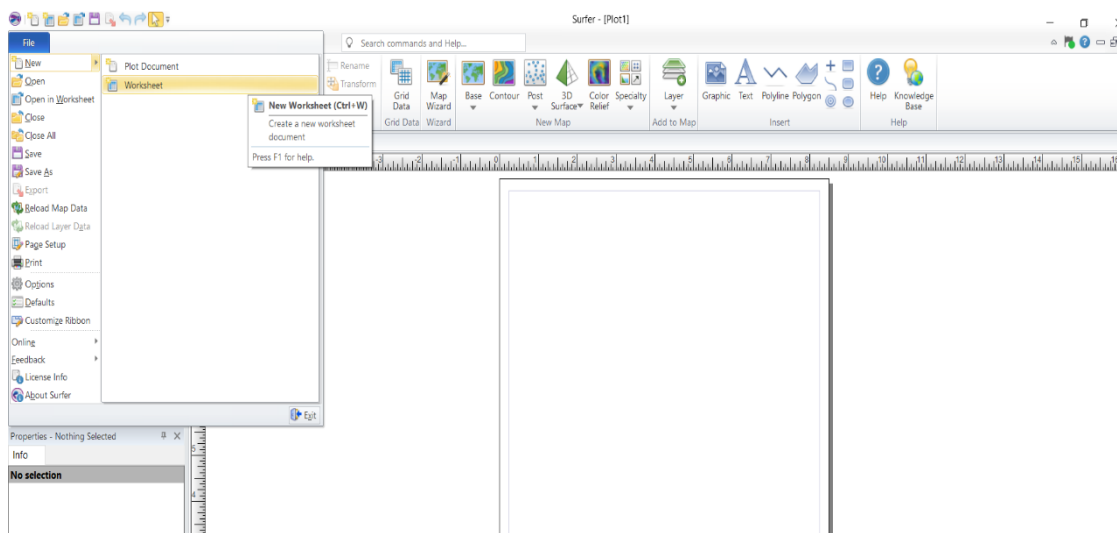
$$R^2 = 0.9985, \quad (5.4)$$



Εικόνα 5.1: Ανωμαλία ελεύθερου αέρα σε σχέση με τα υψόμετρα.

5.3 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΧΑΡΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ SURFER

Το πρόγραμμα Surfer ανήκει στην κατηγορία των προγραμμάτων στο οποίο εισάγονται δεδομένα και μέσω αυτών μπορούν να κατασκευαστούν ισοϋψείς καμπύλες. Σε πρώτο στάδιο δημιουργήθηκε μία βάση δεδομένων για τη σχεδίαση των ισοπαραμετρικών καμπυλών. Το αρχείο μπορεί να είναι σε μορφή excel. Στη πρώτη στήλη θα αναγραφεί το όνομα του σημείου, στη δεύτερη και τη τρίτη στήλη θα προστεθούν οι συντεταγμένες X, Y αντίστοιχα, προσέχοντας να έχουν όλα τα κελιά την ίδια μορφή και κυρίως όπου υπάρχουν δεκαδικοί αριθμοί, η υποδιαστολή να είναι ίδια σε όλα, όχι αλλού κόμμα και αλλού τελεία γιατί το πρόγραμμα δεν το καταλαβαίνει και δε θα διαβάξει σωστά το κελί. Στη τέταρτη στήλη και στις επόμενες εισάγονται τα στοιχεία των παραμέτρων που επιθυμούμε να σχεδιάσουμε τις καμπύλες. Έπειτα στο πρόγραμμα επιλέγεται, File→New →Worksheet→Ok.



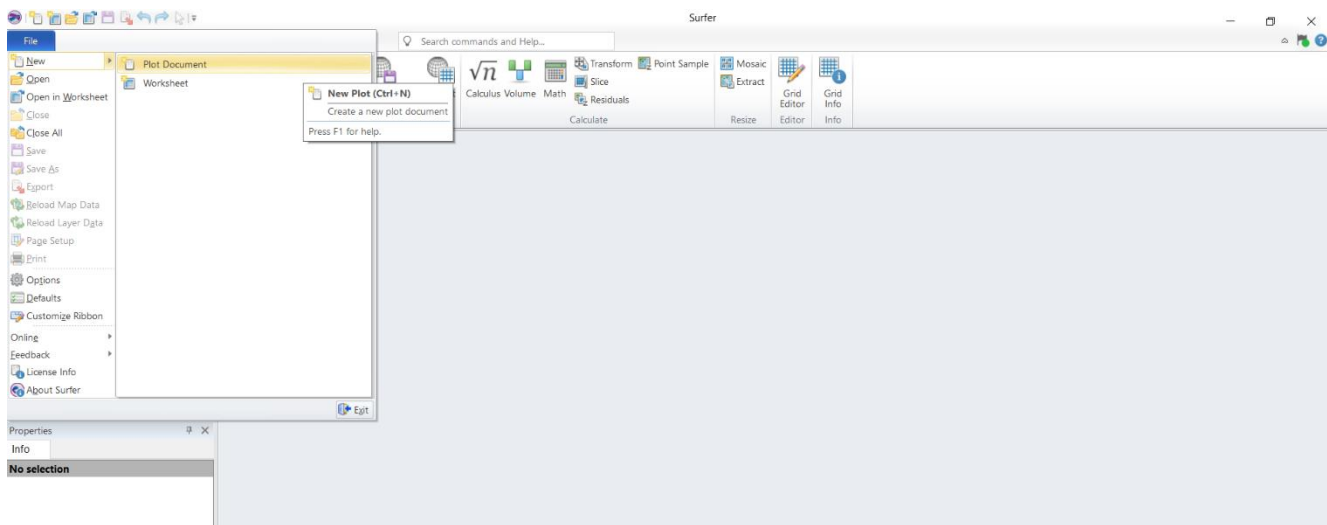
Εικόνα 5.2: Ανοιγμα νέου φύλλου Excel

Έπειτα, εμφανίζεται ένα φύλλο excel, από την εντολή Open αναζητείται το αρχείο excel που έχει δημιουργηθεί και το επιλέγεται.

	A1															
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	471344.059	4205723.723	59.436													
2	477043.157	4193234.410	38.489													
3	482218.558	4187461.767	127.096													
4	475329.838	4194278.645	6.295													
5	489395.752	4183314.015	117.068													
6	494400.312	4191922.571	122.790													
7	491877.291	4200982.163	163.680													
8	498025.048	4171571.666	355.652													
9	500798.253	4175890.352	317.228													
10	497335.384	4180226.080	200.872													
11	475329.838	4194278.645	6.295													
12	471344.059	4205723.723	107.013													
13	440122.113	4211447.203	191.953													
14	449069.414	4216773.387	494.390													
15	461309.829	4224710.592	924.171													
16	465216.137	4207456.304	149.276													
17	461924.828	4216705.249	137.787													
18	475275.509	4221611.355	1165.481													
19	476409.934	4221308.347	704.066													
20	476537.401	421287.571	284.462													
21	478868.251	4212596.543	195.928													
22	468670.563	4222295.714	950.762													
23	471187.795	4211439.607	490.749													
24																
25																
26																

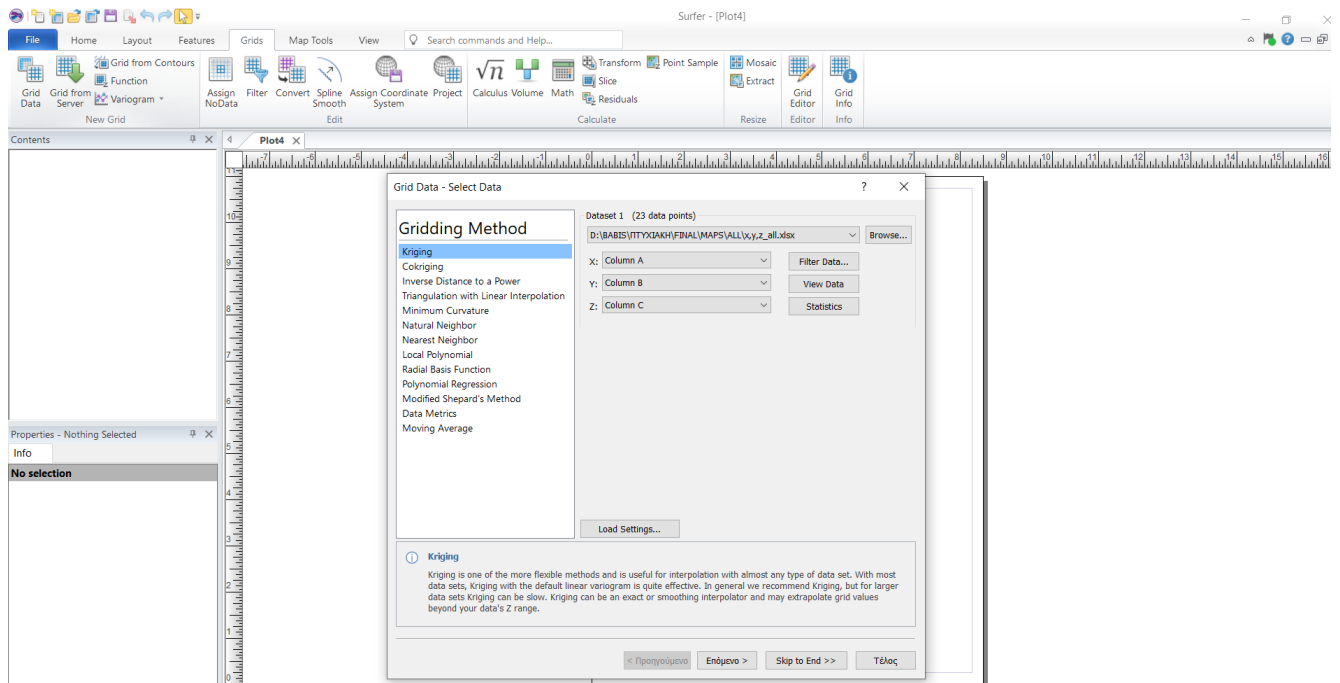
Εικόνα 5.3: Κατασκευή αρχείου Excel

Εφόσον ανοίξει το αρχείο στη συνέχεια γίνεται Save as golden software data (*.data). Κλείνει το αρχείο και ανοίγει πάλι η αρχική σελίδα του προγράμματος. Στη συνέχεια File→New →Plot→Ok.



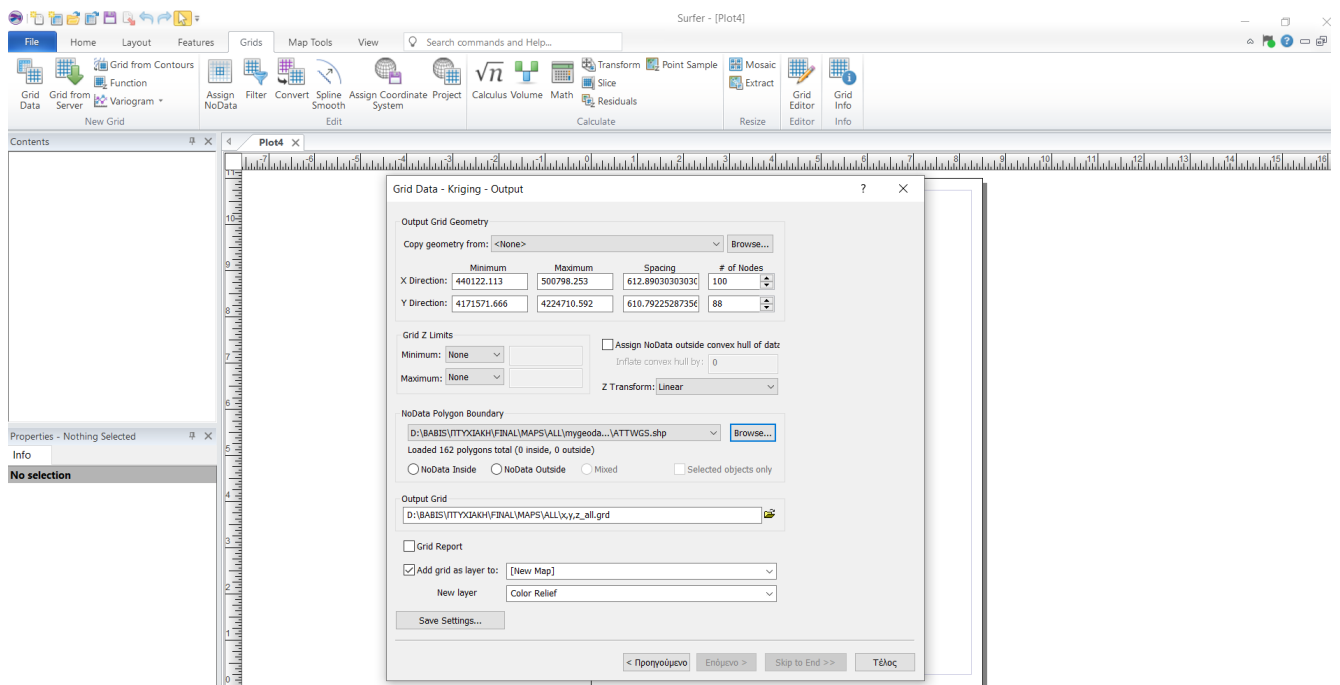
Εικόνα 5.4: Άνοιγμα νέας σελίδας κατασκευής χάρτη

Στη συνέχεια, από το toolbars, επιλέγεται η εντολή Grid→Data και τσεκάρεται το αρχείο που έχει ήδη δημιουργηθεί με κατάληξη *.data.



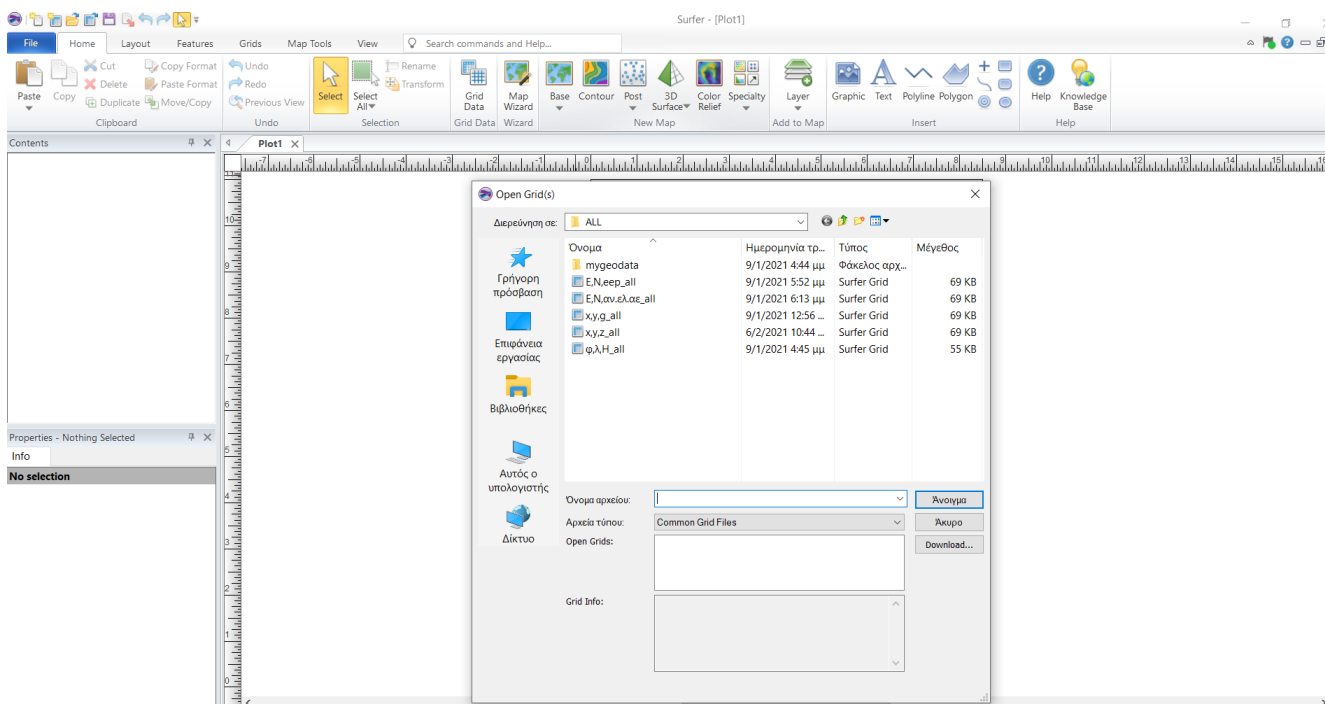
Εικόνα 5.5: Κατασκευή υποβάθρου νέου χάρτη

Πριν ανοίξουμε το αρχείο όμως πρέπει να προσέξουμε να του ορίσουμε το Boundary που οριοθετεί τη στεριά από τη θάλασσα, διότι δεν υπάρχουν τιμές Βαρύτητας στη θάλασσα.



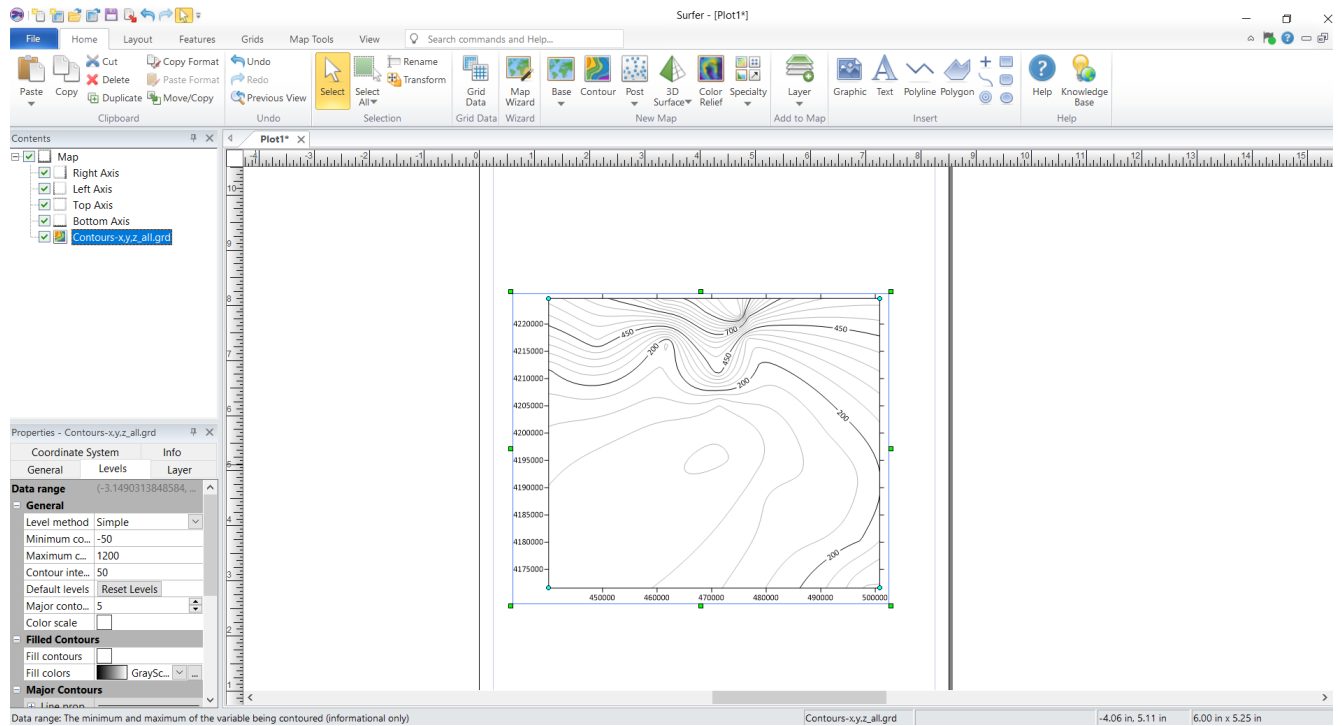
Εικόνα 5.6: Εισαγωγή Boundary Polygon

Αφού ανοίξουμε το αρχείο, εμφανίζεται μια πινακίδα Scattered data interpolation, όπου στην επιλογή General εμφανίζονται τα min και max των αξόνων σύμφωνα με το αρχείο που δημιουργήθηκε. Στο κάρναβο μπορεί να γίνει αλλαγή στα όρια. Στο επόμενο βήμα, γίνεται επιλογή της εντολής Map → Contour map → New contour map, όπου θα εμφανιστεί το αρχείο Grid που έχει δημιουργηθεί από μόνο του.



Εικόνα 5.7: Άνοιγμα κατασκευασμένου υποβάθρου νέου χάρτη

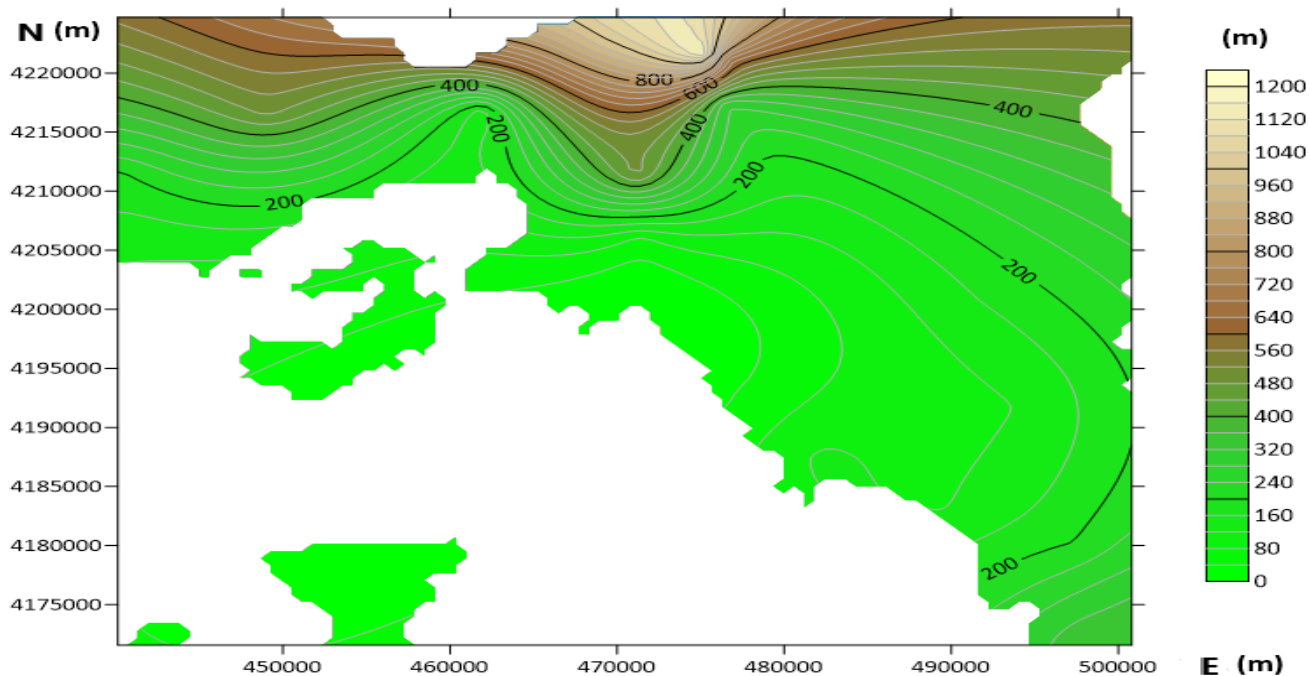
Στην πινακίδα που εμφανίζεται στο Options → Fill contours → Color Scale → Smooth contours και στη συνέχεια στη επιλογή Levels υπάρχει δυνατότητα να τροποποιηθούν οι γραμμές από τις εντολές (level-line-fills-labels) πατώντας πάνω σε κάθε επιλογή, θα εμφανίζεται ένα παράθυρο στο οποίο μπορούν να πραγματοποιηθούν μορφοποιήσεις όσον αφορά τη συχνότητα των καμπυλών τις ετικέτες και το χρώμα του υποβάθρου.



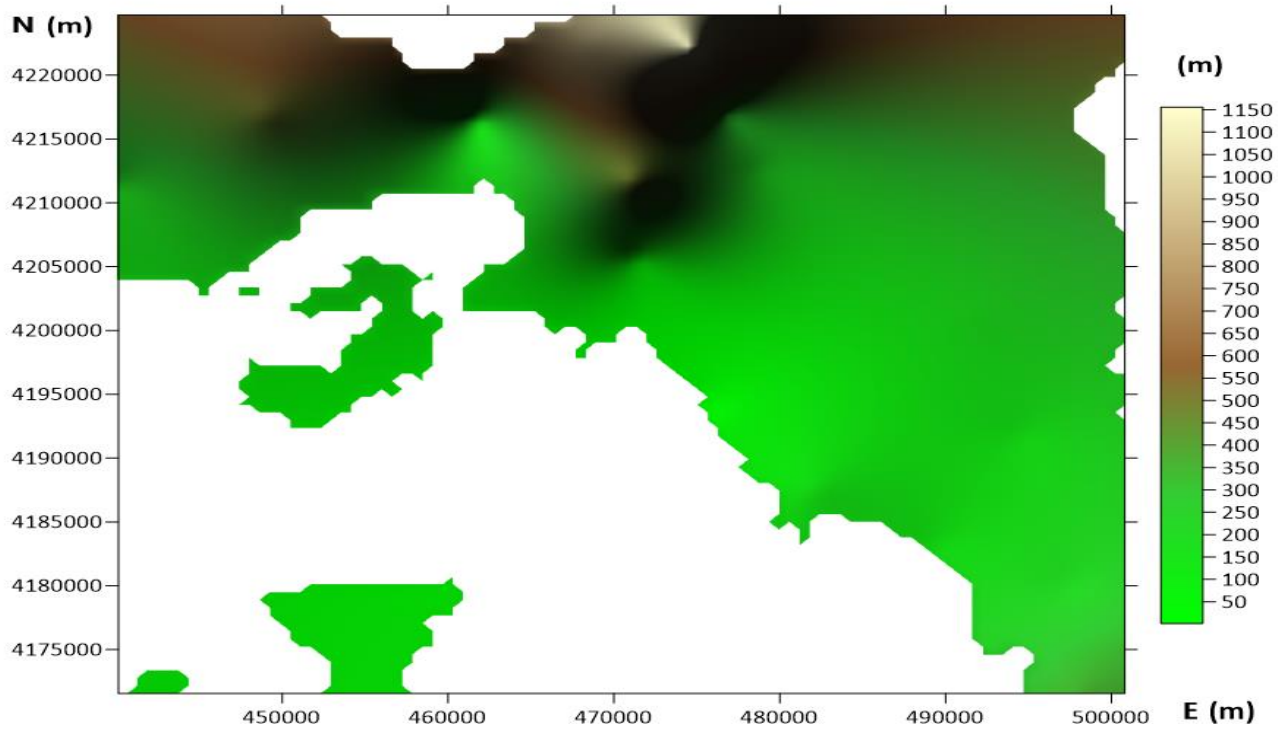
Εικόνα 5.8: Επεξεργασία τελικού αρχείου νέου χάρτη

Τέλος γίνεται επιλογή της εντολής Apply → Ok. Εν τέλει έχει εμφανιστεί ο χάρτης μας και οι υψομετρικές καμπύλες, εφόσον στην τελευταία στήλη του αρχείου που έχει δημιουργηθεί έχει εισαχθεί το υψόμετρο κάθε σημείου. Αντίστοιχα μπορούν να δημιουργηθούν οι χάρτες για τα υπόλοιπα δεδομένα που έχουν συλλεχθεί και επεξεργαστεί. (Surfer Manual).

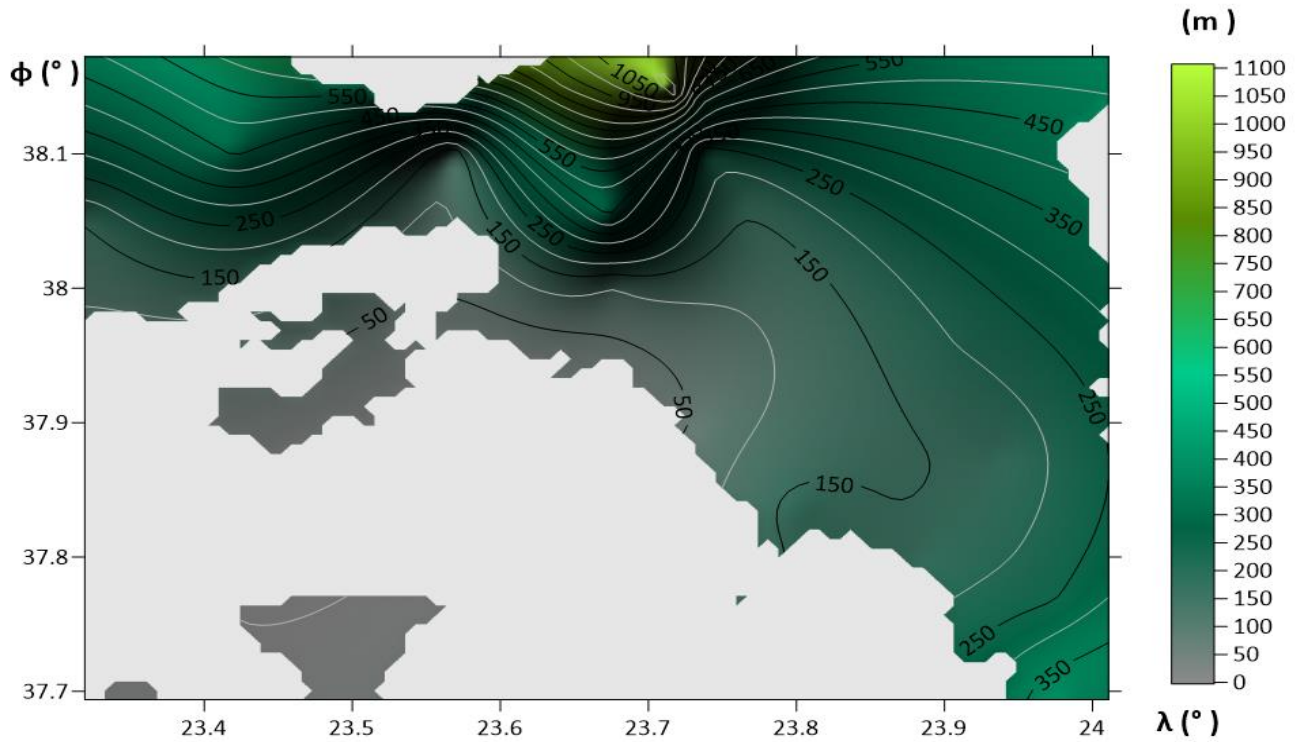
Οι χάρτες που παραθέτονται παρακάτω έχουν δημιουργηθεί με τα βαρυτιμετρικά σημεία που μας είχαν δοθεί εξ αρχής, καθώς και τα βαρυτιμετρικά σημεία που μετρήθηκαν της πτυχιακής εργασίας αυτής καθώς και των Χαβδούλα Απόστολο και Τούση Ναπολέων.



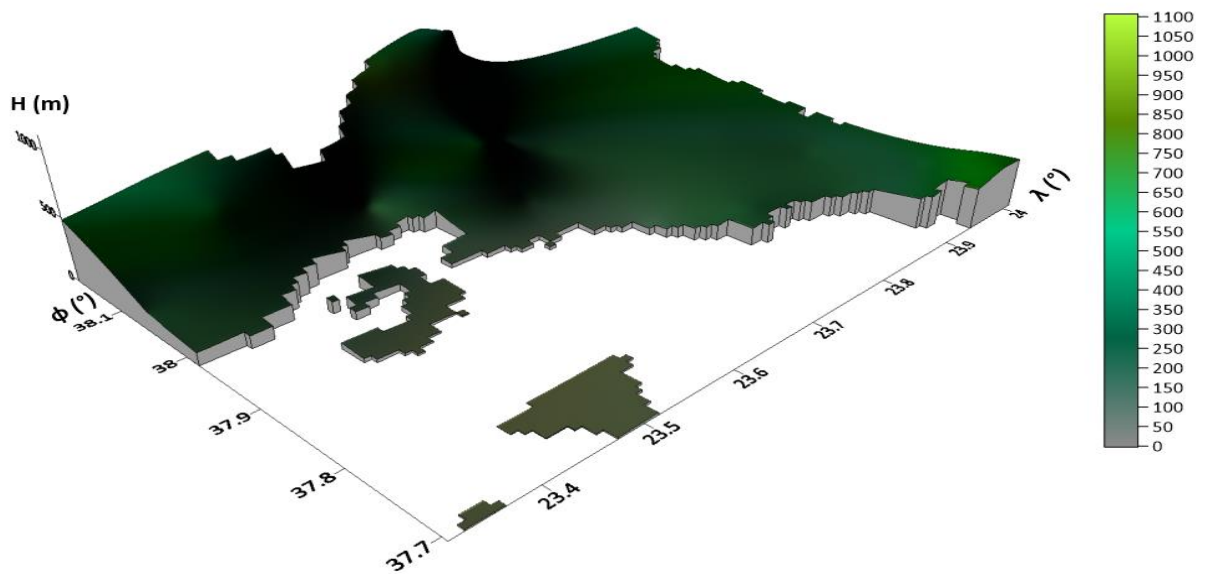
Εικόνα 5.9: Χάρτης ορθομετρικών υψομέτρων σημείων μετρήσεων σε προβολικές συντεταγμένες TM87 (E, N, H)



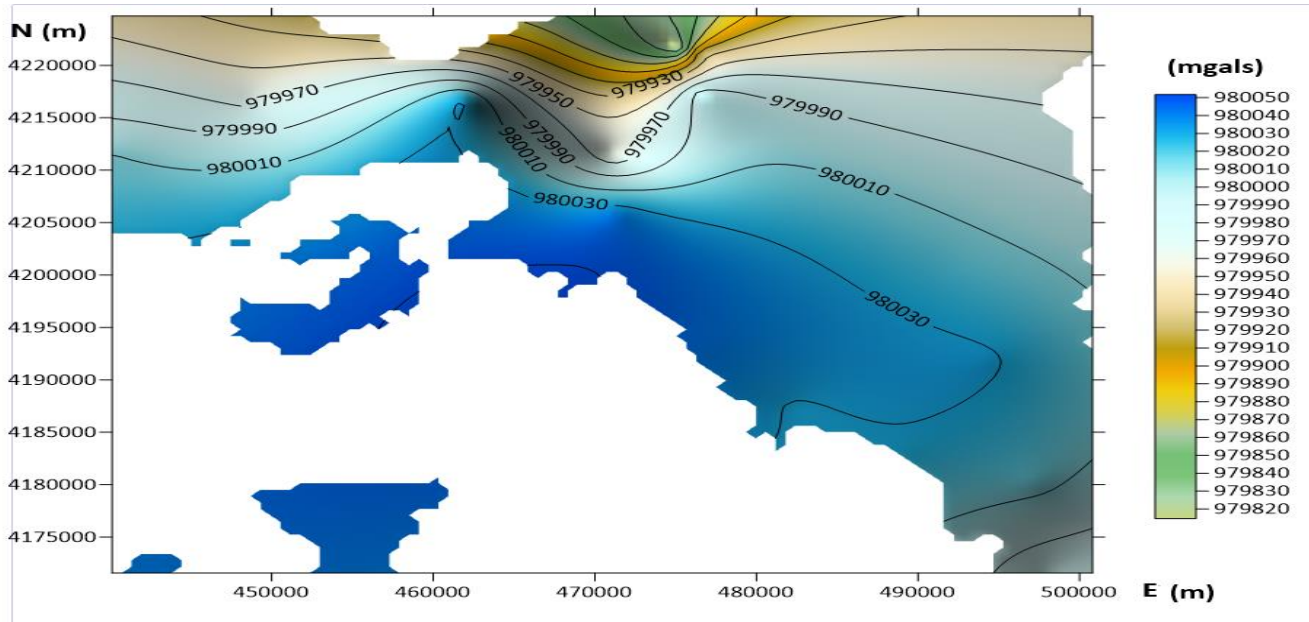
Εικόνα 5.10 : Χάρτης ορθομετρικών υψομέτρων σημείων μετρήσεων σε προβολικές συντεταγμένες TM87 (E, N, H) σε μορφή 3D



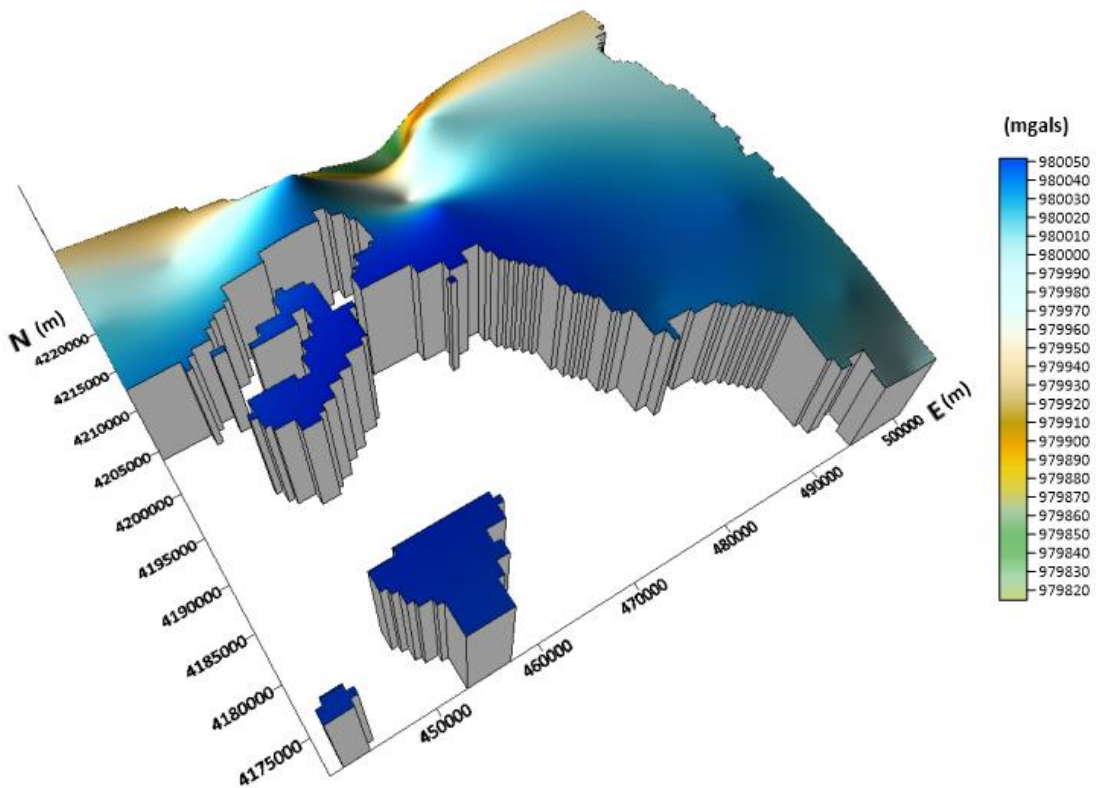
Εικόνα 5.11: Χάρτης ορθομετρικών υψομέτρων σημείων μετρήσεων με γεωδαιτικές συντεταγμένες στο ITRF2008 (φ,λ,H)



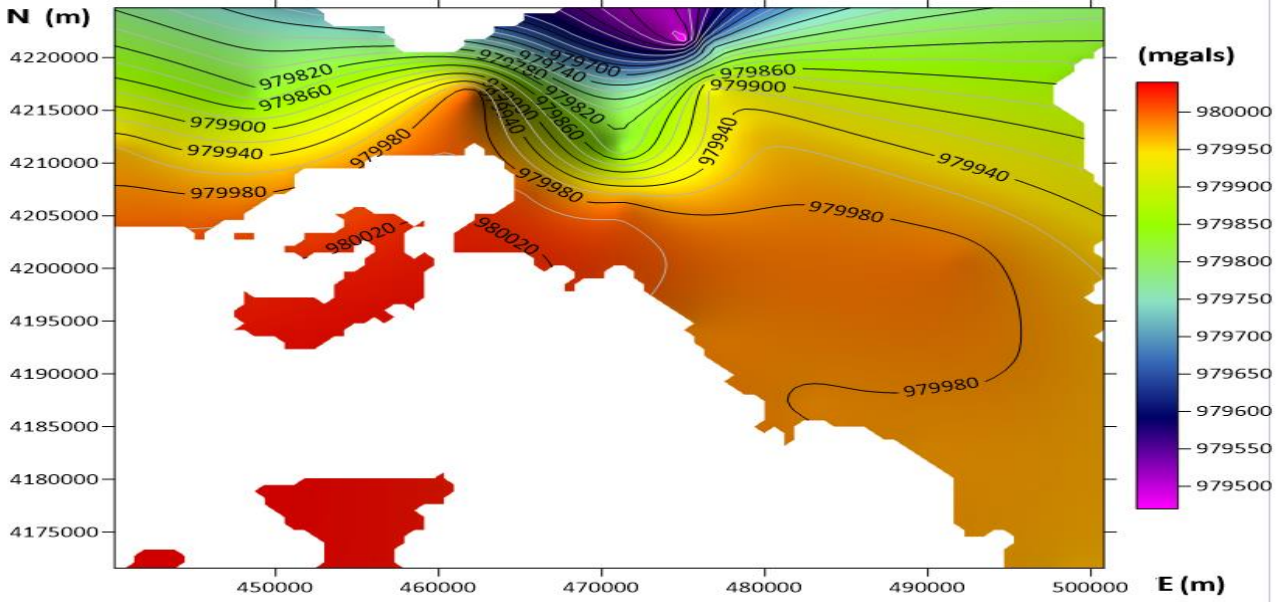
Εικόνα 5.12: Απεικόνιση 3D ορθομετρικών υψομέτρων σημείων μετρήσεων με γεωδαιτικές συντεταγμένες στο ITRF2008 (φ, λ, H)



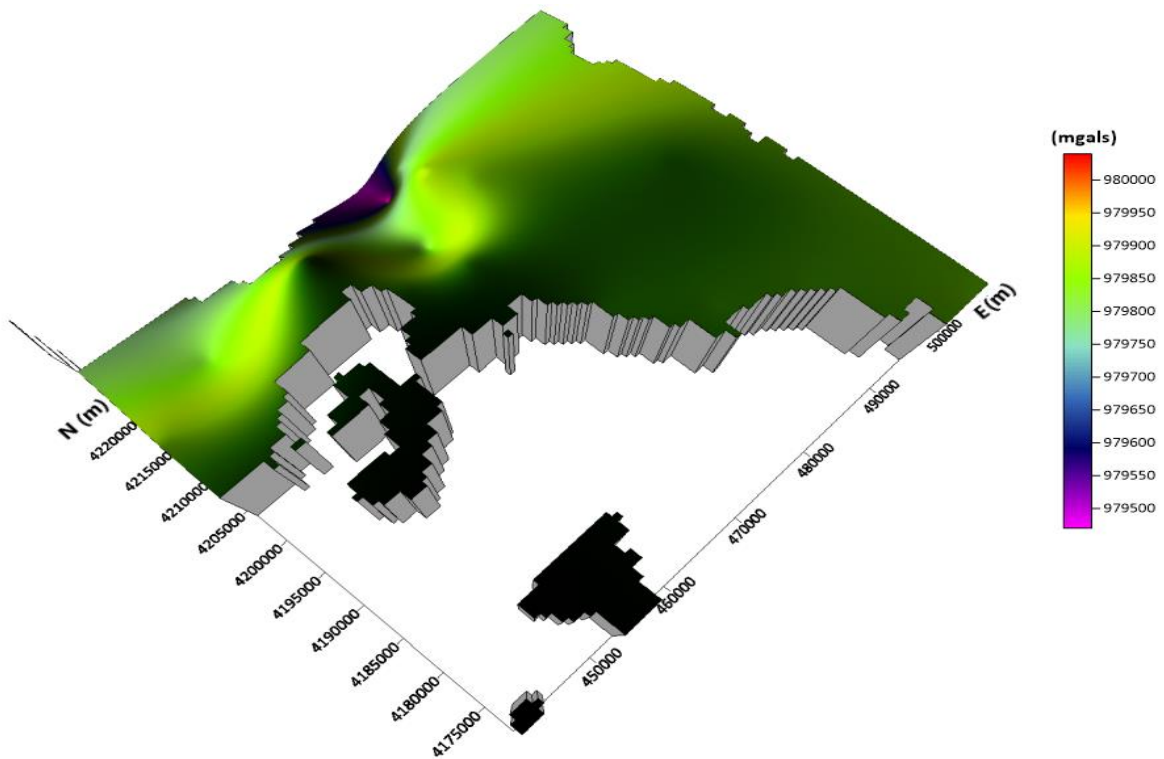
Εικόνα 5.12: Χάρτης τιμής της έντασης της βαρύτητας σε προβολικές συντεταγμένες TM87 (E, N, g)



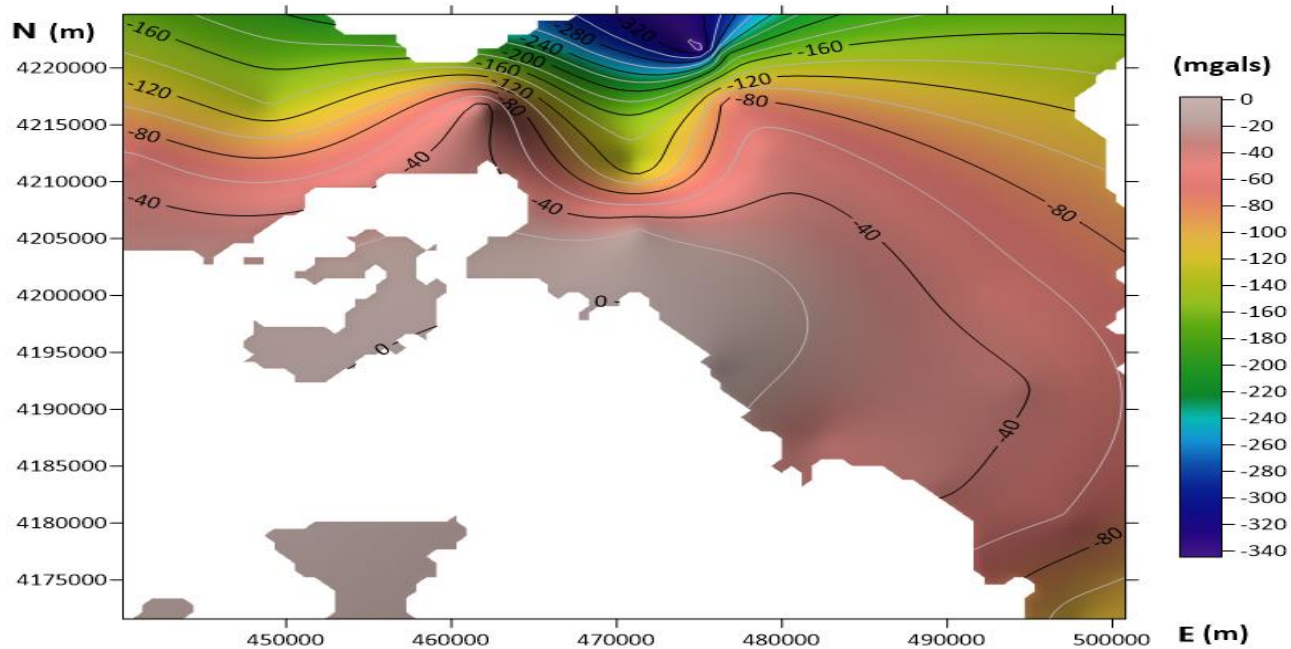
Εικόνα 5.13: Απεικόνιση έντασης της βαρύτητας προβολικών συντεταγμένων TM87 E, N, g σε 3D



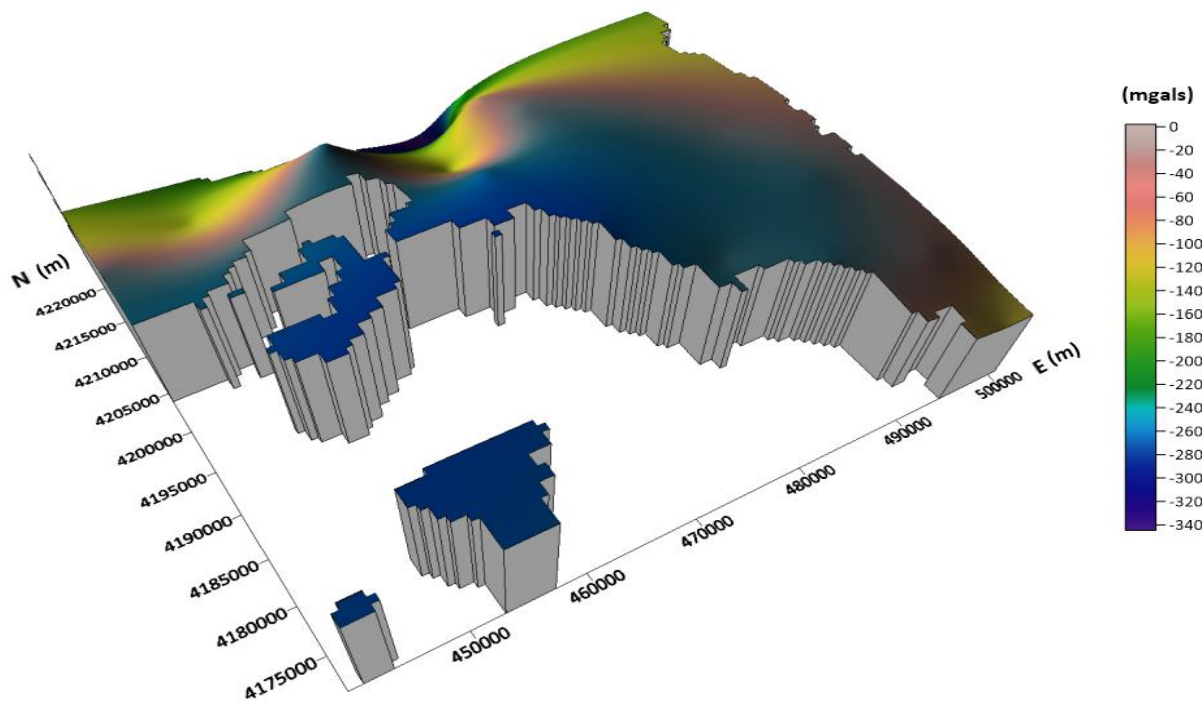
Εικόνα 5.14: Χάρτης τιμές κανονικής βαρύτητας στα σημεία μετρήσεων σε προβολικές συντεταγμένες TM87 E, N, γ- Κανονική Βαρύτητα στο ΕΕΠ GRS80 (mgals)



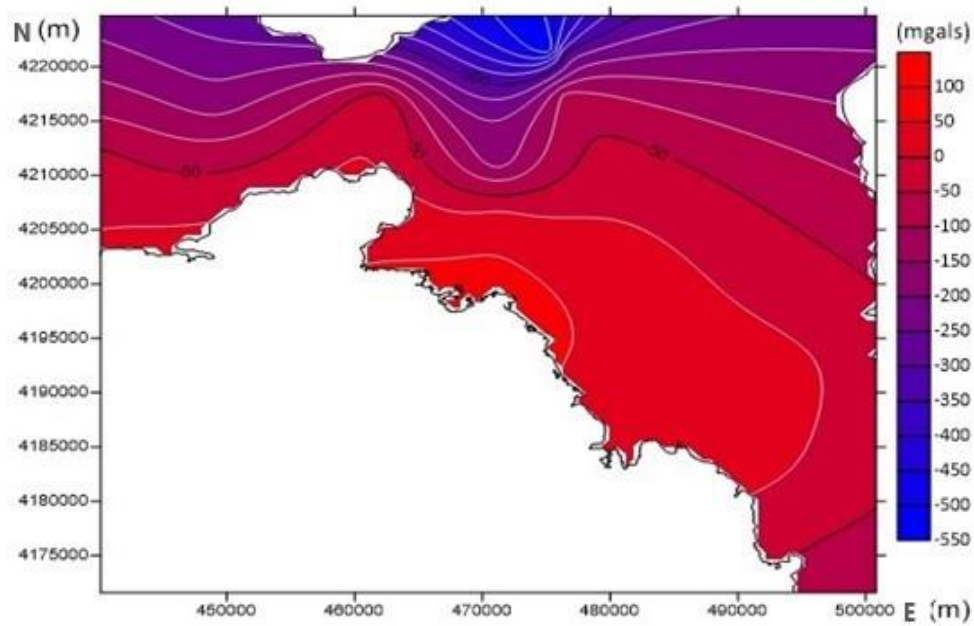
Εικόνα 5.15: Απεικόνιση χάρτη Κανονικής Βαρύτητας στο ΕΕΠ (mgals) σε 3D



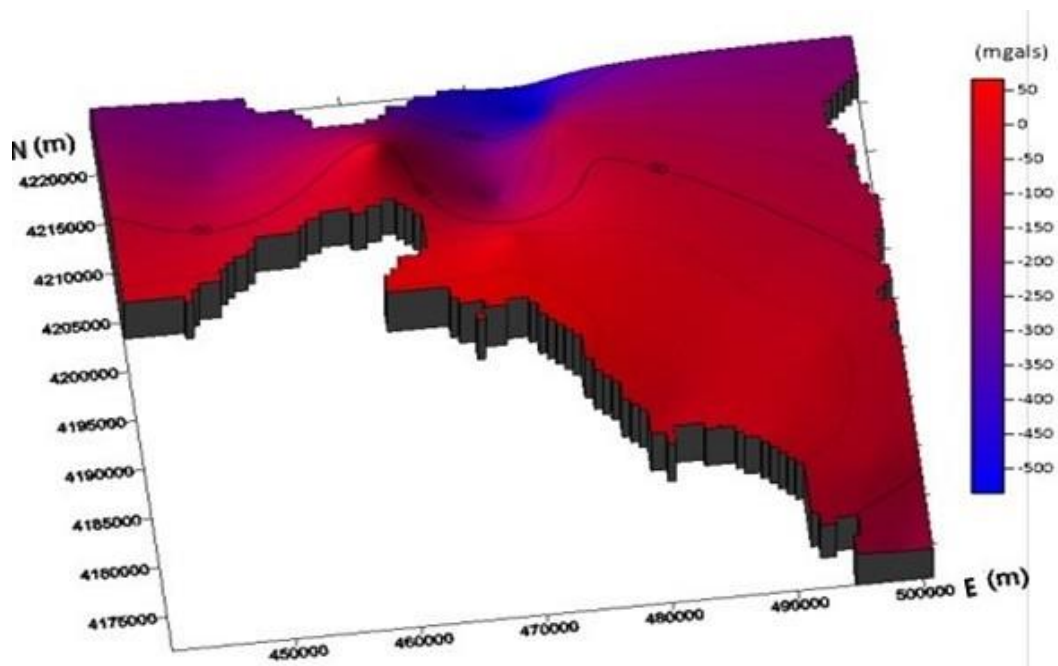
Εικόνα 5.16: Χάρτης με E,N,δgFA (Αναγωγή ελεύθερου αέρα)



Εικόνα 5.17: Απεικόνιση χάρτη αναγωγής ελεύθερου αέρα σε 3D



Εικόνα 5.18: Χάρτης απεικόνισης ανωμαλιών ελεύθερου αέρα



Εικόνα 5.19: Χάρτης απεικόνισης ανωμαλιών ελεύθερου αέρα σε 3D

6 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μέτρηση και επεξεργασία μετρήσεων βαρύτητας με σκοπό την ίδρυση βαρυτημετρικού δικτύου και τη δημιουργία χαρτών ανωμαλιών βαρύτητας στην περιοχή της βορειοδυτικής Αττικής είναι το αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής. Η χρησιμοποίηση του βαρυτημέτρου σχετικής μέτρησης βαρύτητας σε συνδυασμό με παρατηρήσεις GNSS για την οριζοντιογραφικό εντοπισμό της θέσης οδήγησε στη δημιουργία του τελικού παραδοτέου. Για την επεξεργασία των πρωτογενών μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν τεχνικές προεπεξεργασίας και συνόρθωσης δικτύου, καθώς και στατιστικοί έλεγχοι αξιολόγησης του τελικού αποτελέσματος. Το δίκτυο εξαρτήθηκε από γνωστά σημεία του ελληνικού βαρυτημετρικού δικτύου της ΓΥΣ και πραγματοποιήθηκαν στατιστικοί έλεγχοι υποθέσεων, τόσο στις παρατηρήσεις, όσο και στα σταθερά σημεία του δικτύου. Εντοπίστηκαν προβλήματα στην ένταξη του δικτύου και ιδιαίτερα στο σημείο του δικτύου στη Μεταμόρφωση, στο οποίο όλοι οι στατιστικοί έλεγχοι που επιλέχθηκαν απέτυχαν. Μετά από προσεκτικό έλεγχο των μετρήσεων, αποφασίστηκε η κατάργηση του σημείου ως σταθερού και η ένταξή του ως άγνωστη παράμετρο στη συνόρθωση. Με την ένταξη του βαρυτημετρικού δικτύου (σταθερά σημεία τα σημεία του Ελληνικού, της Αγίας Τριάδας και ένα σημείο της Πάρνηθας) δεν εντοπίστηκαν περαιτέρω προβλήματα και υπολογίστηκαν οι τελικές τιμές της βαρύτητας στα νέα σημεία του δικτύου. Τα τελικά παραδοτέα των χαρτών των ανωμαλιών βαρύτητας κατασκευάστηκαν με τη βοήθεια υπολογισμένων ανωμαλιών ελευθέρου αέρα στα σημεία του δικτύου και χρησιμοποιώντας μεθόδους παρεμβολής σε κανάβους κατάλληλους για την τελική απεικόνιση.

Όπως γίνεται αντιληπτό, η ίδρυση και συνόρθωση του συγκεκριμένου βαρυτημετρικού δικτύου σήμαινε και την μέτρηση πολλών σημείων ανά την Αττική. Έτσι για την υλοποίηση των μετρήσεων απαραίτητη κρίθηκε η ενοικίαση αυτοκινήτου. Γενικά, όπως είναι γνωστό, οι μετρήσεις βαρύτητας αποτελούν αρκετά χρονοβόρα και ακριβή από άποψη κόστους διαδικασία μετρήσεων, αφού η έκταση της περιοχής των μετρήσεων είναι αρκετά μεγάλη, έτσι ώστε να είναι δυνατός ο εντοπισμός μεταβολών στις τιμές της βαρύτητας. Επιπλέον, η θεωρητική τεκμηρίωση της πτυχιακής αποτέλεσε ένα σημαντικό τμήμα της ενασχόλησής μας, καθώς ελάχιστη αναφορά είχε γίνει στα μαθήματα της σχολής που την αφορούν. Οι βαρυτημετρικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν αποτέλεσαν την επόμενη δυσκολία (καθώς με τις μετρήσεις GPS δεν αντιμετωπίσαμε κάποιο τεχνικό πρόβλημα). Το όργανο (βαρυτήμετρο) ήταν τοποθετημένο σε ένα αρκετά μεγάλο κουτί και λόγω της ευαισθησίας του απαιτούνται πολύ προσεκτικοί χειρισμοί κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Το όργανο αυτό μεταφέρθηκε σε πολύ απομακρυσμένες και δυσπρόσιτες περιοχές, όπως φαίνεται και μέσα στο τεύχος. Απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή κατά τη μεταφορά και μετρητική διαδικασία, καθώς αποτελεί ένα από τα πιο ακριβά όργανα της σχολής. Δυσκολία επίσης αντιμετωπίστηκε στην εύρεση των βαρυτημετρικών αφετηριών, αφού αρκετές από αυτές είχαν καταστραφεί και οι περιγραφές που υπήρχαν διαθέσιμες δεν παρουσίαζαν ευκρινώς την τοποθεσία κάποιων από αυτών. Επίσης σε 2 με 3 σημεία η πρόσβαση μας έπρεπε να γίνει με τα πόδια, καθώς η πρόσβαση με το αυτοκίνητο ήταν αδύνατη. Ιδιαίτερα στα τριγωνομετρικά σημεία, στα οποία μετρήθηκε βαρύτητα, η πρόσβαση ήταν ιδιαίτερος δύσκολη με αποτέλεσμα τη μεταφορά των οργάνων σε αρκετή απόσταση από το δρόμο. Όλες οι προαναφερθείσες δυσκολίες αποτέλεσαν τις τεχνικές δυσκολίες ως προς την σύνταξη της πτυχιακής μας εργασίας.

Το επόμενο κομμάτι αφορά καθαρά στις δυσκολίες στο κομμάτι της επεξεργασίας των μετρήσεων. Όσο αναφορά τις μετρήσεις του GPS, αυτές επιλύθηκαν με λογισμικό γνωστών λειτουργιών από την ενασχόληση στο πλαίσιο μαθημάτων του προγράμματος σπουδών. Για τις μετρήσεις του βαρυτημέτρου δεν χρειάστηκε κάποιο ιδιαίτερο λογισμικό αλλά αρκετή επεξεργασία και έλεγχος των μετρήσεων με τα προγράμματα excel και matlab πριν το τελικό αποτέλεσμα. Συμπερασματικά καταλήγουμε πως το βαρυτημετρικό δίκτυο στην Ελλάδα δεν είναι τόσο διαδεδομένο και ανεπτυγμένο, λόγω των διαβαθμισμένων πληροφοριών για αυτό από τη ΓΥΣ. Οι πληροφορίες για τα σημεία του δικτύου που χρησιμοποιήθηκαν για την εξάρτηση αντλήθηκαν από την ιστοσελίδα του Διεθνούς Γραφείου Βαρυτημετρίας (Bureau Gravimetrique International)

6.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Προτείνεται η συνέχιση της ίδρυσης δικτύων σε διπλανές επικαλυπτόμενες περιοχές με παρόμοιο τρόπο και ο συγκριτικός έλεγχος στις κοινές περιοχές, και αν τα αποτελέσματα είναι εξίσου καλά η επέκταση των υπολογισμών σε όλο τον Ελλαδικό χώρο.

Επίσης προτείνεται η επέκταση των ταυτόχρονων μετρήσεων GPS και βαρύτητας σε άλλες περιοχές πέρα από τις ήδη μετρημένες από τη ΓΥΣ, αλλά και η μέτρηση με απόλυτο βαρυτόμετρο του Εθνικού σταθμού αφετηρίας της Βαρύτητας της ΓΥΣ, ο οποίος είναι η αφετηρία για όλες τις μετρήσεις βαρύτητας στον Ελλαδικό χώρο και στη συνέχεια η επανασυνόρθωση όλου του δικτύου βαρύτητας.

Τέλος επειδή οι παραπάνω προτάσεις είναι χρονοβόρες αλλά και με υψηλό κόστος προτείνεται η χρήση παγκόσμιων γεωδυναμικών μοντέλων σφαιρικών αρμονικών συναρτήσεων σε συνδυασμό με τα τοπικά δεδομένα βαρύτητας για τη βελτίωση της μοντελοποίησης του πεδίου και τον ορθό επαναπροσδιορισμό ενός εθνικού κατακόρυφου συστήματος αναφοράς. Ήδη με τις σύγχρονες δορυφορικές αποστολές μελέτης του πεδίου βαρύτητας (GRACE, CHAMP, GOCE) η ανάγκη ενσωμάτωσης τοπικών δεδομένων βαρύτητας στις πληροφορίες των παγκόσμιων μοντέλων για την ενοποίηση κατακορύφων συστημάτων αναφοράς αποτελεί σημαντικό κομμάτι της έρευνας αιχμής στη Γεωδαισία.

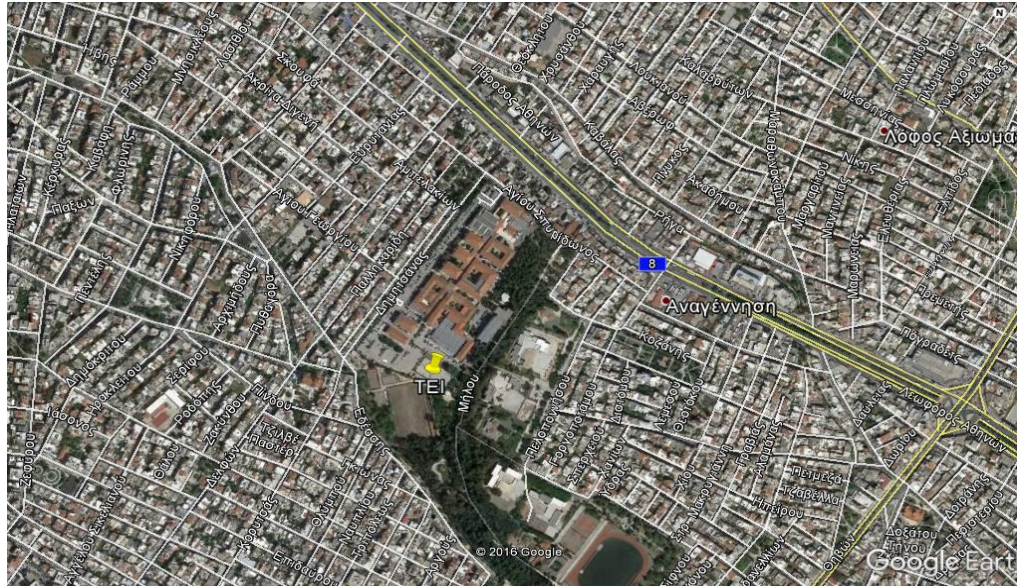
7 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

7.1 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΕΙΚΟΝΕΣ ΑΠΟ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΕΔΙΟΥ, ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕ ΟΝΟΜΑΣΙΕΣ ΤΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ ΤΟΥΣ ΚΑΙ ΟΔΟΠΟΡΙΚΑ ΠΡΟΣ ΤΑ ΣΗΜΕΙΑ ΑΥΤΑ.

Όνομασία	E (m)	N (m)	H (m)
ΤΕΙ	471344.059	4205723.723	59.436
Βαρυτημετρικό σημείο αγίας τριάδας	477043.157	4193234.410	38.489
18030	482218.558	4187461.767	127.096
Βαρυτημετρικό σημείο μέσα στο αεροδρόμιο του ελληνικού	475329.838	4194278.645	6.295
18015	489395.752	4183314.015	117.068
18046	494400.312	4191922.571	122.790
18083	491877.291	4200982.163	163.680
186016	500798.253	4175890.352	355.652
186026	500798.253	4175890.352	317.228
18006	497335.384	4180226.080	200.872
ΕΛΛΗΝΙΚΟ (ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΟ)	475329.838	4194278.645	6.295

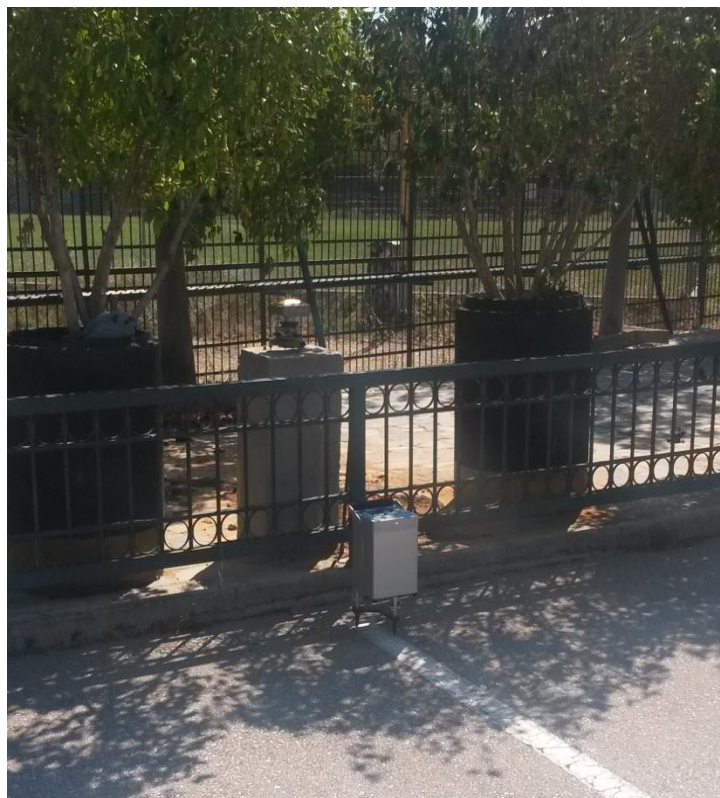
Πίνακας 7.1

Οι κωδικοί των σημείων καθώς επίσης και οι συντεταγμένες τους αναφέρονται στον παραπάνω πίνακα. Οι συντεταγμένες αυτές είναι στο Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς (ΕΓΣΑ87).



Εικόνα 7.1: Τριγωνομετρικό εντός του χώρου του ΤΕΙ Αθήνας.

Το τριγωνομετρικό σημείο του ΤΕΙ Αθήνας βρίσκεται μέσα στο ίδρυμα , το οποίο είναι στο Δήμο Αιγάλεω στην οδό Δημητσάνης.



Εικόνα 7.2: Βαθράκι ΤΕΙ Αθήνα



Εικόνα 7.3: Βαρυτημετρικά σημεία εντός του παλαιού αεροδρομίου του Ελληνικού.

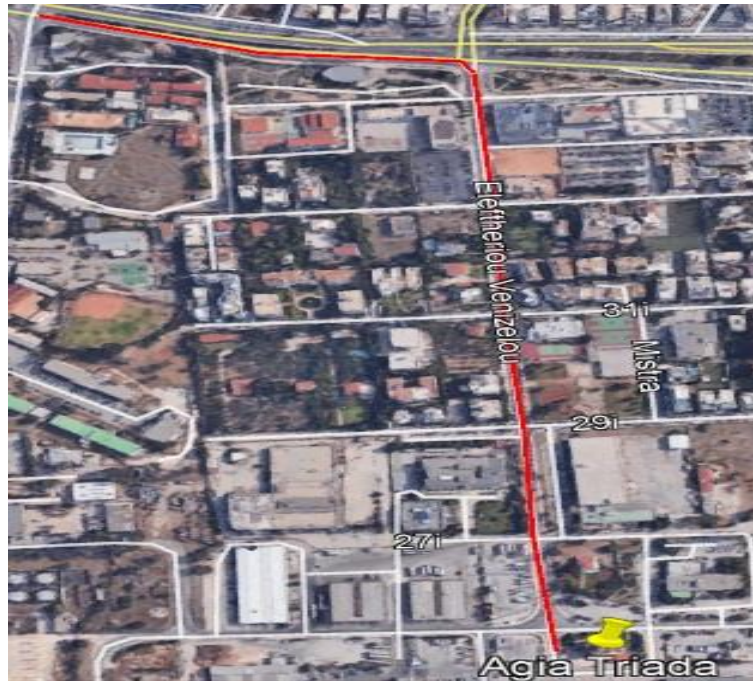
Το βαρυτημετρικό σημείο Ελληνικού της Γ.Υ.Σ. όπως και το δεύτερο σημείο μας βρίσκονται εντός του παλαιού αεροδρομίου της περιοχής του Ελληνικού.



Εικόνα 7.4: Βαρυτημετρικό σημείο στο αεροδρόμιο του ελληνικού



Εικόνα 7.5: Δεύτερο σημείο στο αεροδρόμιου του ελληνικού



Εικόνα 7.6: Οδοιπορικό προς το Βαρυτημετρικό σημείο της Αγίας Τριάδας.

Ευρισκόμενοι στην κάθοδο της Λ. Βουλιαγμένης στο ύψος του Ελληνικού, κατευθυνόμαστε δεξιά στην Ελ. Βενιζέλου και οδηγώντας για 700μ. περίπου συναντάμε την εκκλησία της Αγίας Τριάδας, όπου και βρίσκεται το βαρυτημετρικό σημείο της Γ.Υ.Σ.



Εικόνα 7.7: Βαρυτημετρικό σημείο Αγίας Τριάδας



Εικόνα 7.8: Οδοιπορικό προς το Τριγωνομετρικό 18030.

Οδηγώντας επί της οδού Βάρης-Κορωπίου προς Κορωπί, στρίβουμε αριστερά στην Α. Παπανδρέου, συνεχίζουμε για 400μ. και στρίβουμε δεξιά σε επαρχιακή οδό για άλλα 400μ. όπου και συναντάμε το τριγωνομετρικό σημείο 18030.



Εικόνα 7.9: Τριγωνομετρικό σημείο 18030

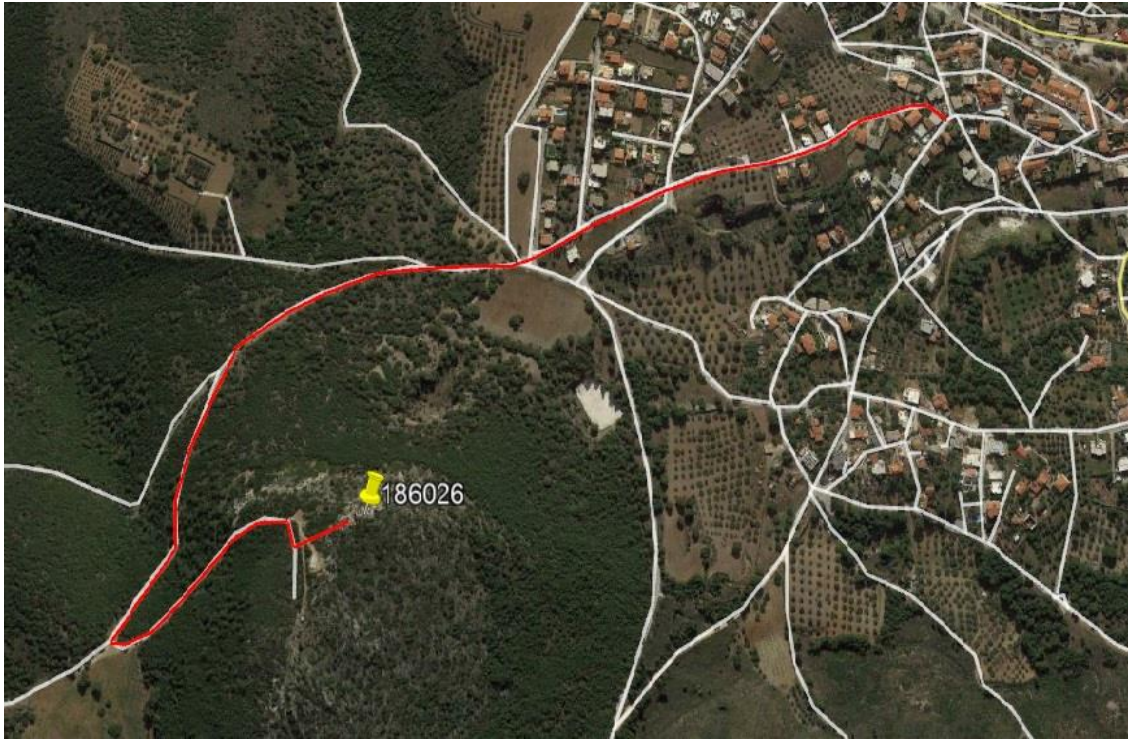


Εικόνα 7.10: Οδοιπορικό προς το Τριγωνομετρικό 18083.

Κατευθυνόμενοι προς την περιοχή των Σπάτων μέσω της Λ. Σπάτων, φτάνοντας στον κυκλικό κόμβο βγαίνουμε στην έξοδο της οδού Διαδόχου Κωνσταντίνου, έπειτα στρίβουμε δεξιά στην οδό Αγίου Δημητρίου και συνεχίζουμε για 400μ. όπου και κατευθυνόμαστε ελαφρώς αριστερά στην οδό Βασιλέως Παύλου, στα επόμενα 100μ. στρίβουμε δεξιά στην οδό Παύλου Μελά στην οποία προχωράμε για 400μ. όπου βρίσκεται το τριγωνομετρικό 18083.



Εικόνα 7.11: Τριγωνομετρικό σημείο 18083



Εικόνα 7.12: Οδοιπορικό προς το Τριγωνομετρικό 186026.

Οδηγώντας από την περιοχή του Αγίου Κωνσταντίνου Θορικού σε επαρχιακές οδούς για μερικά χιλιόμετρα κι έπειτα περπατώντας για λίγα μετρά ακόμη συναντάμε το τριγωνομετρικό 186026.



Εικόνα 7.13: Τριγωνομετρικό σημείο 186026

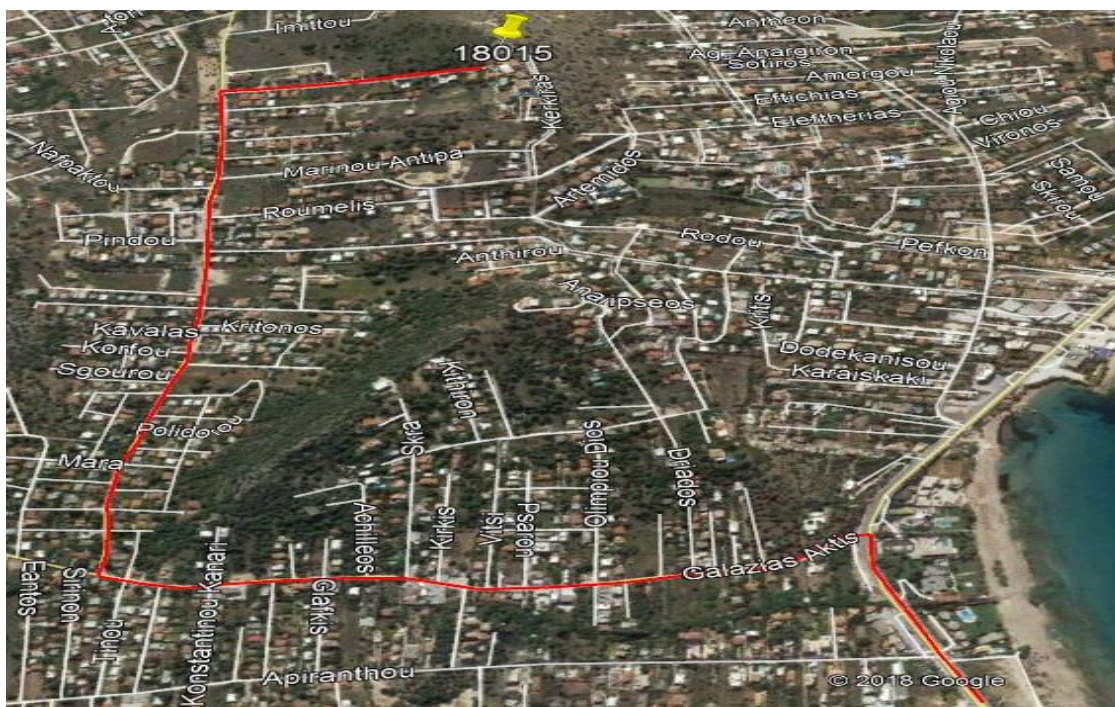


Εικόνα 7.14: Οδοιπορικό προς το Τριγωνομετρικό 18006.

Ευρισκόμενοι στην περιοχή της Φέριζας στην άνοδο της οδού Εγνίας οδηγούμε για 1,5χμ. περίπου όπου και στρίβουμε δεξιά σε μια επαρχιακή οδό και προχωράμε για άλλα 350μ. συναντώντας το τριγωνομετρικό 18006.



Εικόνα 7.15: Τριγωνομετρικό σημείο 18006

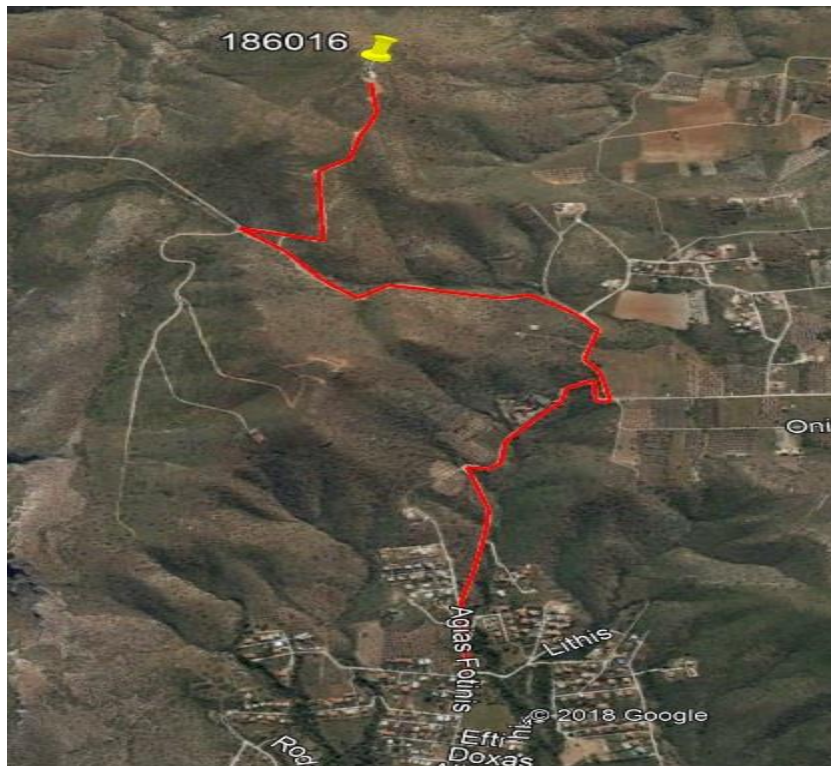


Εικόνα 7.16: Οδοιπορικό προς το Τριγωνομετρικό 18015.

Οδηγώντας στην κάθοδο της Λ. Αθηνών – Σουνίου στο ύψος του Λαγονησίου στρίβουμε αριστερά στην οδό Γαλάζιας Ακτής στην οποία συνεχίζουμε για περίπου 1χμ., όπου στρίβουμε δεξιά στην οδό Παναγιώτη Μιχάλη και οδηγούμε για ακόμα 1χμ. ώσπου στρίβουμε δεξιά σε μία τοπική ανώνυμη οδό την οποία την ακολουθάμε για 300μ. όπου και βρίσκεται στα αριστερά μας το τριγωνομετρικό 18015.



Εικόνα 7.17: Τριγωνομετρικό σημείο 18015

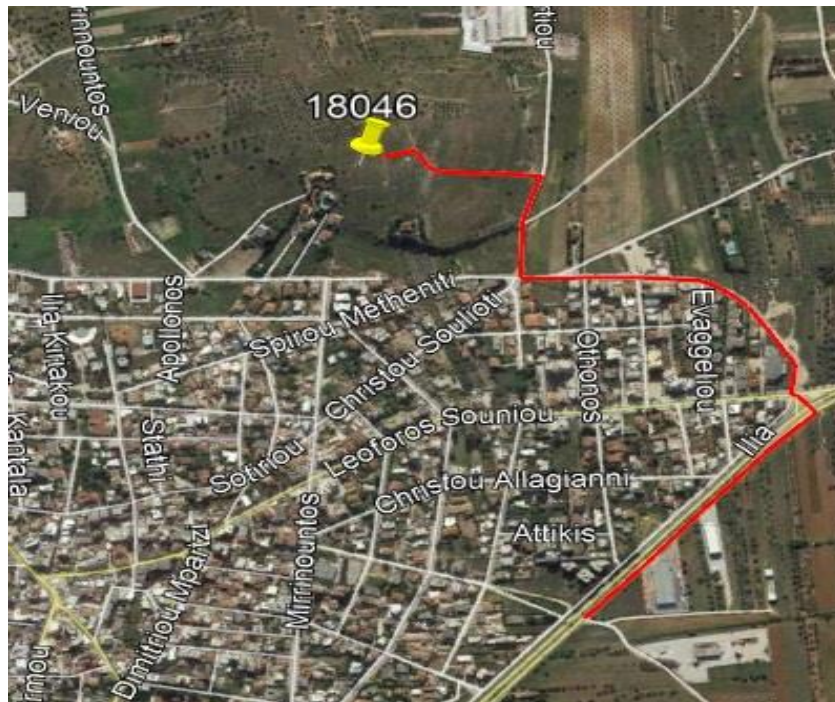


Εικόνα 7.18: Οδοιπορικό προς το Τριγωνομετρικό 186016.

Ξεκινώντας από την περιοχή του Θυμαρίου και οδηγώντας στην άνοδο της οδού Αμπελοφιλοσόφων για μερικά χιλιόμετρα και στη συνέχεια σε επαρχιακή οδό για 500μ. φτάνουμε στο τριγωνομετρικό 186016.



Εικόνα 7.19: Τριγωνομετρικό σημείο 18016



Εικόνα 7.20: Οδοιπορικό προς το Τριγωνομετρικό 18046.

Ευρισκόμενοι στην Λ. Μαρκοπούλου στην άνοδο στρίβουμε αριστερά στην οδό Κωνσταντίνου Σωτηρίου όπου και οδηγούμε για αρκετά μέτρα μέχρις ότου συναντήσουμε την οδό 25^{ης} Μαρτίου στην οποία στρίβουμε δεξιά και συνεχίζουμε για 200μ. ακόμη όπου κατευθυνόμαστε αριστερά σε μία επαρχιακή οδό και προχωράμε για 250μ ώσπου συναντάμε το τριγωνομετρικό 18046.



Εικόνα 7.21: Τριγωνομετρικό σημείο 18046

8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ανδριτσάνος Β.Δ., Κατσάμπαλος Κ.Ε., Κεχαΐδου Κ.Ε., Τζιαβός Η.Ν., (1999), “Βελτιστοποίηση Τοπικού Γεωειδούς με δεδομένα Βαρύτητας, Τοπογραφίας, Πυκνότητας και GPS”.
2. Βέης Γ., Μπιλλήρης, Χ., Παπαζήση Κ., (2015), “Κεφάλαια ανώτερης γεωδαισίας”.
3. Βέργος Γ, Κατσουγιαννόπουλος Σ., Σεπτέμβριος (2004). “Παγκόσμιο Σύστημα Δορυφορικού Προσδιορισμού”.
4. Δεληκαράογλου Δ., Αθήνα (2003), “Γεωφυσικές διαδοκμήσεις βαρυτημετρία”.
5. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, (2007), “Εισαγωγή στη γεωδαισία”.
6. Λάμπρου Ε., Πανταζής Γ, (2010), “Εφαρμοσμένη Γεωδαισία”, Εκδόσεις ΖΗΤΗ.
7. Μακρής Γεώργιος (2021), “Μέτρηση και επεξεργασία βαρυτημετρικών δεδομένων στη Νοτιανατολική Αττική”, Πτυχιακή εργασία, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής.
8. Τζιαβός Η.Ν, Βέργος Γ.Σ, (2013-2014), “Εισαγωγή στο Πεδίο Βαρύτητας”.
9. Τσακίρη Μ. (2004). “Εισαγωγή στο GPS”, Εργαστήριο γενικής γεωδαισίας, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
10. Φωτίου Α., Πικριδάς Χ.. (2006), “GPS και γεωδαιτικές εφαρμογές”, Εκδόσεις ΖΗΤΗ.
11. Department of defense world geodetic system 1984, (2014) “Its Definition and Relationships with Local Geodetic Systems”.
12. Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics by R. E. Sheriff.
13. H.O. Seigel A, (1995), “A guide to high precision land gravimeter surveys”.
14. Surfer Manual.
15. Topcon Hipper Pro Operator’s Manual.
16. CG-5, Scintrex Autograv System, operation manual.

8.1 ΙΣΤΟΤΟΠΟΙ

<https://el.wikipedia.org/wiki/Γεωδαισία>

<http://users.uoa.gr/~jalexopoulos/varytita.pdf>

<https://www.geomatrix.co.uk/land-products/gravity/scintrex-cg5/>