



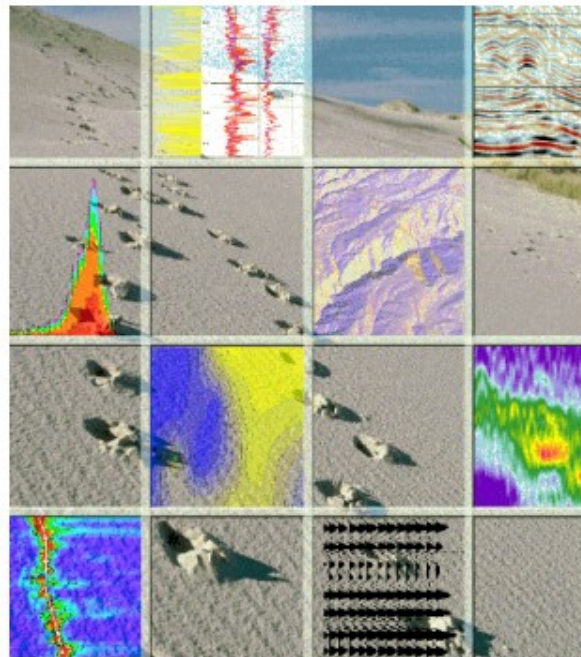
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΑΘΗΝΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ &
ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΜΕΛΕΤΗ ΠΑΛΙΡΡΟΙΩΝ ΤΟΥ ΓΗΙΝΟΥ ΦΛΟΙΟΥ ΜΕ
ΒΑΡΥΤΗΜΕΤΡΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ**



ΓΚΟΓΚΟ ΕΝΙΑΝΤΑ (Α.Μ. 11014)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ Δ. ΑΝΔΡΙΤΣΑΝΟΣ

Επίκουρος Καθηγητής ΤΕΙ Αθήνας

ΑΘΗΝΑ 2015

Πίνακας Περιεχομένων

Ευρετήριο Εικόνων.....	4
Πρόλογος.....	7
Περίληψη.....	8
Abstract	9
1 ^ο Κεφάλαιο: Εισαγωγή.....	10
2 ^ο Κεφάλαιο: Γήινο Πεδίο Βαρύτητας και Βαρυτημετρία.....	12
2.1 Εισαγωγή στο πεδίο βαρύτητας της Γης	12
2.2 Μαθηματική Τεκμηρίωση	13
2.2.1 Το γεωκεντρικό σύστημα	13
2.2.2 Το τοπικό σύστημα αναφοράς του πεδίου βαρύτητας.....	14
2.2.3 Επιτάχυνση και δυναμικό της βαρύτητας.....	15
2.3 Κανονικό πεδίο βαρύτητας.....	16
2.3.1 Κανονική βαρύτητα.....	17
2.4 Βαρυτημετρία.....	18
3 ^ο Κεφάλαιο: Όργανα Μέτρησης Στο Πεδίο Βαρύτητας.....	20
3.1 Μετρήσεις με βαρυτήμετρα.....	20
3.1.1 Όργανα μέτρησης από την μέθοδο ταλάντωσης εκκρεμών	20
3.1.2 Μετρήσεις της βαρύτητας από την ελεύθερη πτώση σωμάτων	22
3.1.3 Όργανα μέτρησης της βαρύτητας από την παραμόρφωση ελατηρίου	23
3.2. Πρώτη κατηγορία: Γεωδαιτικά Βαρυτήμετρα.....	27
3.2.1 Βαρυτήμετρα LaCoste-Romberg Model -G & -D.....	27
3.2.2 Βαρυτήμετρα Worden	29
3.2.3 Βαρυτήμετρα EDCON Super-G.....	30
3.2.4 Βαρυτήμετρα CG-5	31
3.3. Δεύτερη κατηγορία: Απόλυτα Βαρυτήμετρα	32
3.3.1 Απόλυτο Βαρυτήμετρο FG5.....	33
3.3.2 Απόλυτα Βαρυτήμετρα νέας γενιάς	34
3.4 Τρίτη κατηγορία: Απόλυτα Βαρυτήμετρα Υπεραγωγμότητας.....	36
3.5 Απόλυτες – Σχετικές μετρήσεις Βαρύτητας.....	37
3.5.1 Απόλυτη τιμή της βαρύτητας.....	38
3.5.2 Σχετική τιμή της βαρύτητας	38

3.5.3	Διορθώσεις των μετρήσεων της βαρύτητας	39
3.5.3.1	Διορθώσεις για την ολίσθηση (drift) του οργάνου	40
3.5.3.2	Διορθώσεις για τις παλιρροιακές έλξεις	40
3.5.4	Αναγωγές των μετρήσεων της βαρύτητας	41
3.5.4.1	Αναγωγή λόγω γεωγραφικού πλάτους φ	42
3.5.4.2	Αναγωγή λόγω υψομέτρου	42
3.5.4.3	Αναγωγή λόγω της μάζας των υπεδαφίων πετρωμάτων (Αναγωγή Bouguer)	43
3.5.4.4	Αναγωγή λόγω τοπογραφικού αναγλύφου	44
3.6	Δορυφορικές τεχνικές για μετρήσεις βαρύτητας	45
4 ^ο	Κεφάλαιο: Γήινες Παλίρροιες	48
4.1	Γενική εισαγωγή	48
4.2	Στατικές παλίρροιες	49
4.3	Παλιρροϊκή δύναμη.....	49
4.4	Δυναμικό παλίρροιας.....	51
4.5	Έκφραση του παλιρροϊκού δυναμικού σε σφαιρικές αρμονικές	52
4.6	Παρατήρηση παλιρροιών.....	54
4.6.1	Παλιρροϊκοί σταθμοί.....	55
4.6.2	Καταγραφή της βαρύτητας	55
4.7	Μέθοδοι ανάλυσης παλιρροιών	56
4.7.1	Η μέθοδος του Venedikon	56
4.7.2	Η μέθοδος των Usandivaras-Ducarme	56
4.7.3	Η μέθοδος του Chojnicki	56
4.7.4	Άλλες μέθοδοι	57
5 ^ο	Κεφάλαιο: Καταγραφή και Ανάλυση Δεδομένων.....	58
5.1	Βαρυτημέτρο CG-5	58
5.2	Χώρος εγκατάστασης	61
5.3	Δημιουργία εργασίας.....	62
5.4	Διάταξη καταγραφής.....	66
5.5	Οριζόντιωση βαρυτημέτρου	66
5.6	Διαδικασία μεταφοράς των μετρήσεων	68
5.7	Προγράμματα Επεξεργασίας Παλιρροϊκών Μετρήσεων	70
5.7.1	TSoft.....	70
5.7.1.1	Υπολογισμός συνθετικής (θεωρητικής) παλίρροιας	74

5.7.1.2 Διόρθωση των ανεπεξέργαστων δεδομένων.....	76
5.7.1.3 Υπολογισμός των εναπομείναντων σφαλμάτων.....	77
5.7.1.4 Διόρθωση των τεχνικών σφαλμάτων.....	77
5.7.1.5 Υπολογισμός της διορθωμένης παλίρροιας	79
5.7.1.6 Ανάλυση των δεδομένων	80
5.7.2 ETERNA 3.4	82
5.7.2.1 Περιγραφή του προγράμματος DECIMATE.....	84
5.7.2.2 Περιγραφή του προγράμματος DESPIKE.....	85
5.7.2.3 Περιγραφή του προγράμματος ANALYZE	86
5.8. Ανάλυση των μετρήσεων – αποτελεσμάτων	87
6° Κεφάλαιο: Συμπεράσματα – Προτάσεις	101
Βιβλιογραφία	103

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1: Γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς.....	13
Εικόνα 2: Τοπικό σύστημα αναφοράς του πεδίου βαρύτητας (x,y,z) και γεωκεντρικό σύστημα (X, Y, Z).....	14
Εικόνα 3: Το χωροσταθμικό ελλειψοειδές.....	16
Εικόνα 4: Ελλειψοειδείς συντεταγμένες.....	17
Εικόνα 5: Το εκκρεμές του Γαλιλαίου.....	21
Εικόνα 6: Το πείραμα του Γαλιλαίου και η αρχή της ελεύθερης πτώσης των σωμάτων.....	23
Εικόνα 7: Αρχή λειτουργίας βαρυτημέτρων με ελατήριο.....	24
Εικόνα 8: Όργανο με ελατήριο το οποίο ενεργεί από πλάγια θέση.....	24
Εικόνα 9: Όργανο με οριζόντιο ελατήριο επαναφοράς.....	25
Εικόνα 10: Γεωδαιτικό βαρυτήμετρο LaCoste-Romberg Model -G.....	28
Εικόνα 11: Βαρυτήμετρο τύπου Worden.....	29
Εικόνα 12: Βαρυτήμετρο EDCON Super-G.....	30
Εικόνα 13: Το αυτογραφικό βαρυτήμετρο CG-5.....	31
Εικόνα 14: Σχηματική αρχή λειτουργίας απόλυτου βαρυτημέτρου.....	32
Εικόνα 15: Νέου τύπου απόλυτων βαρυτημέτρων.....	34
Εικόνα 16: Φορητά απόλυτα βαρυτήμετρα νέας γενιάς: μοντέλο A-10(αριστερά) & I-10(δεξιά) της Microsolutions-g, Colorado.....	35
Εικόνα 17: Τυπική πλήρης διάταξη ενός υπεραγωγικού βαρυτημέτρου μαζί με τις απαραίτητες ηλεκτρονικές μονάδες.....	36
Εικόνα 18: Α) Απόλυτη τιμή βαρύτητας είναι η πραγματική επιτάχυνση της βαρύτητας (g), Β) Η σχετική τιμή βαρύτητας αντανακλά τη διαφορά της επιτάχυνσης βαρύτητας (Δg) μεταξύ ενός σταθμού (g_1) σχετικά με ένα άλλο σταθμό (g_2).....	37
Εικόνα 19: Η γεωμετρία της αναγωγής του υψομέτρου.....	42
Εικόνα 20: Η πλάκα Bouguer.....	43
Εικόνα 21: Κυκλικό διάγραμμα τοπογραφικής διόρθωσης, με τα εσωτερικά μέρη μεγεθυμένα για καλύτερη απεικόνιση.....	44
Εικόνα 22: Υπολογισμός τοπογραφικής αναγωγής με τη μέθοδο των ζωνών.....	45
Εικόνα 23: Επίγειες μέθοδοι βαρυτημετρίας στη ξηρά, στη θάλασσα ή στον αέρα.....	46
Εικόνα 24: Δορυφορικές μέθοδοι βαρυτημετρίας.....	47
Εικόνα 25: Η συνολική δύναμη της Σελήνης αντιπροσωπεύεται από τα βέλη.....	50
Εικόνα 26: Η παραμόρφωση της Γης.....	50
Εικόνα 27: Το πρότυπο της δύναμης.....	51
Εικόνα 28: Σχηματική επεξήγηση των W, Wt, Wd, φ.γ.ε (t), φ.γ.ε.....	54
Εικόνα 29: Βαλίτσα μεταφοράς του Βαρυτημέτρου.....	58
Εικόνα 30: Η Οθόνη και Πληκτρολόγιο του CG-5.....	59
Εικόνα 31: Δέκτης GPS.....	60
Εικόνα 32: RF Πομπός του βαρυτημέτρου.....	60
Εικόνα 33: Η μπλέ ένδειξη για την καταγραφή των μετρήσεων.....	61
Εικόνα 34: Ο χώρος τοποθέτησης του οργάνου.....	62
Εικόνα 35: Ειδική βάση οριζοντίωσης του βαρυτημέτρου.....	66
Εικόνα 36: Η οθόνη οριζοντίωσης του οργάνου.....	67

Εικόνα 37: Καλώδιο μεταφοράς δεδομένων από το βαρυτήμετρο στον ηλεκτρονικό υπολογιστή.	68
Εικόνα 38: Η τοποθεσία βάσης δεδομένων.....	71
Εικόνα 39: Επιλογή προσθήκης νέας τοποθεσίας.	71
Εικόνα 40: Οι παράμετροι μιας τοποθεσίας.	72
Εικόνα 41: Η εμφάνιση της θεωρητικής παλίρροιας.....	72
Εικόνα 42: Επιλογή της επεξεργασίας των παραμέτρων της επιλεγμένης τοποθεσίας.....	73
Εικόνα 43: Διαγραφή της επιλεγμένης τοποθεσίας.....	73
Εικόνα 44: Επιλογή της αποθήκευσης της τοποθεσίας.	74
Εικόνα 45: Επεξεργασία των παραμέτρων της παλίρροιας.....	74
Εικόνα 46: Παράθυρο επεργασίας των βασικών παραμέτρων.....	75
Εικόνα 47: Ο υπολογισμός της θεωρητικής παλίρροιας μέσω του προγράμματος TSoft.....	75
Εικόνα 48: Το νέο κανάλι που περιέχει την θεωρητική παλίρροια.....	76
Εικόνα 49: Παράθυρο ρύθμισης των παραμέτρων των αιχμών.	78
Εικόνα 50: Παράθυρο ρύθμισης των ρυθμίσεων των κενών.	78
Εικόνα 51: Παράθυρο ρύθμισης παραμέτρων του βήματος.....	79
Εικόνα 52: Υπολογισμός της διορθωμένης παλίρροιας.	79
Εικόνα 53: Παράθυρο υπολογισμού της παλίρροιας.	80
Εικόνα 54: Το παράθυρο των καναλιών.....	81
Εικόνα 55: Στην πάνω εικόνα φαίνονται οι αιχμές (spikes) και στην κάτω η εξομάλυνση τους.	81
Εικόνα 56: Στο κόκκινο πλέγμα είναι η χρονική περίοδος ύπαρξης μεγάλων αιχμών και στην κάτω εικόνα φαίνεται η εξομάλυνση αυτού του σφάλματος.....	82
Εικόνα 57: Διάγραμμα της διαδικασίας παρατήρησης - ανάλυσης της παλίρροιας.	87
Εικόνα 58: Πρόγραμμα επεξεργασίας και ανάλυσης παλιρροϊκών δεδομένων.	88
Εικόνα 59: Παράθυρο διαλόγου εισαγωγής σημαντικών στοιχείων των μετρήσεων.	89
Εικόνα 60: Γράφημα με τις παρατηρήσεις 8 ημερών.....	90
Εικόνα 61: Στην πρώτη εικόνα φαίνεται το τμήμα της εγγραφής με τις μεγαλύτερες αιχμές . Στην δεύτερη φαίνεται το ίδιο τμήμα σε μεγέθυνση.....	91
Εικόνα 62: Η εξομάλυνση της καταγραφής.	93
Εικόνα 63: Σε μεγέθυνση η εξομάλυνση ενός τμήματος χωρίς τις αιχμές από τα δεδομένα..	93
Εικόνα 64: Ένωση των τμημάτων με την βοήθεια της κυβικής παρεμβολής.	94
Εικόνα 65: Σε μεγέθυνση η συνένωση ενός τμήματος μετά την κυβική παρεμβολή.....	94
Εικόνα 66: Η μη καλή εφαρμογή της συνένωσης στα δεδομένα.	95
Εικόνα 67: Η φιλτραρισμένη παλίρροια και η θεωρητική παλίρροια υπολογισμένη από το TSoft πρόγραμμα.....	95
Εικόνα 68: Σε μεγέθυνση: α) Τα αρχικά δεδομένα, β) Η "φιλτραρισμένη" παλίρροια και γ) η θεωρητική παλίρροια.....	96
Εικόνα 69: Η θεωρητική παλίρροια υπολογισμένη από το βαρυτήμετρο CG-5.	96
Εικόνα 70: Η πρώτη περίπτωση είναι η θεωρητική παλίρροια από το ίδιο το όργανο και η δεύτερη περίπτωση είναι η θεωρητική παλίρροια από το TSoft πρόγραμμα.....	97
Εικόνα 71: Η πρώτη εικόνα είναι η θεωρητική παλίρροια από το βαρυτήμετρο χαμηλότερης ανάλυσης και ακρίβειας ενώ στην δεύτερη εικόνα είναι η θεωρητική από το Tsoft.	97
Εικόνα 72: Παράθυρο διαλόγου με τα αρχικά δύο κανάλια.	98
Εικόνα 73: Τα νέα κανάλια μετά από υπολογισμό των υπολοιπόμενων.....	98

Εικόνα 74: α) Η θεωρητική παλίρροια υπολογισμένη από το όργανο, β) Τα " μη διορθωμένα" υπολοιπόμενα, γ) Τα τελικά διορθωμένα υπολοιπόμενα. 99

Πρόλογος

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Πτυχιακή εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Τοπογραφίας και Γεωπληροφορικής του ΤΕΙ Αθήνας και ολοκληρώθηκε τον Νοέμβριο του 2015.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η μελέτη που πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Γεωδαισίας – Τοπογραφίας του ΤΕΙ Αθήνας, με σκοπό τον προσδιορισμό των παλιρροιών του γήινου φλοιού της Γης χρησιμοποιώντας βαρυτημετρικές παρατηρήσεις. Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε είναι το αυτογραφικό βαρυτήμετρο CG-5. Για την εργασία αυτή, η καταγραφή των δεδομένων έγινε μέσω του βαρυτημέτρου το οποίο ρυθμίστηκε έτσι ώστε τα δεδομένα να καταγράφονται ανά 1 λεπτό για συνολικό διάστημα καταγραφής περίπου 8 ημερών.

Με την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής θα ήθελα να εκφράσω τις πιο θερμές ευχαριστίες μου για την ουσιαστική συμβολή του καθηγητή μου κ. Ανδριτσάνου Βασίλειου, για την ανάθεση του θέματος, την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου που με στηρίζουν σε κάθε μου βήμα.

Περίληψη

Η παρούσα Πτυχιακή Εργασία αναφέρεται στην μελέτη των παλιρροιών του στερεού φλοιού της Γης χρησιμοποιώντας βαρυτημετρικές παρατηρήσεις. Γενικά, οι μετρήσεις της βαρύτητας βασίζονται σε πειράματα που έχουν σχέση με την αρχή του ελατηρίου (σχετικές μετρήσεις). Με τον όρο σχετική μέτρηση της βαρύτητας, εννοούμε τη μέτρηση της διαφοράς Δg_{PG} τιμών του g σε δύο διαφορετικά σημεία P και Q. Οι μεταβολές στην ένταση της βαρύτητας που προκαλούνται από παλίρροιες είναι δυνατό να μετρηθούν με βαρυτήμετρα.

Στη συγκεκριμένη εργασία οι παρατηρήσεις αυτές έγιναν από όργανα μέτρησης σχετικών τιμών βαρύτητας. Τα όργανα αυτά μετρούν τις μεταβολές της έντασης της βαρύτητας του γήινου πεδίου. Ταυτόχρονα με τις μετρήσεις του βαρυτημέτρου καταγράφηκαν και μετρήσεις θερμοκρασίας, ατμοσφαιρικής πίεσης, σχετικής υγρασίας κλπ, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την διόρθωση των βαρυτημετρικών μετρήσεων από τις αντίστοιχες επιδράσεις. Τα δεδομένα αυτά καταγράφονταν κάθε ένα λεπτό και ακολουθήθηκε ειδική διαδικασία με στόχο τον προσδιορισμό των διακριτών ωριαίων τιμών.

Επιπλέον, για τον υπολογισμό αυτών των τιμών αλλά και για την καταγραφή, την προεπεξεργασία και την ανάλυση των παλιρροϊκών μετρήσεων έγιναν με χρήση διαφόρων ειδικών προγραμμάτων. Τα μεγέθη ουσιαστικά που αναλύονται είναι οι αποκλίσεις της πραγματικής παλίρροιας από τις αντίστοιχες θεωρητικές τιμές.

Abstract

This Thesis refers to the study of the tides of the earth's crust using gravimetric observations. Generally, the gravity measurements are based on experiments related to the principle of the spring (related measurements). By the term relative measurement of gravity, we mean measuring the difference Dg_{PG} values of g in two different points P and Q. Changes in the magnitude of gravity caused by tides can be measured with gravimeters.

In this study, observations were made by instruments for measuring the relevant gravitational values. These instruments measure the changes of the magnitude of the earth's gravitational field. At the same time with the gravity measurements, were also recorded temperature measurements, air pressure, relative humidity, etc., which were used for correcting gravimetric measurements of the corresponding effects. These data were recorded every one minute and after that, a specific procedure to identify the hourly values was followed.

Moreover, for the calculation of these values but also for recording, preprocessing and analysis of those tidal measurements were all made by using various specific PC programs. The figures that are analyzed are the variations of the actual tide from the corresponding theoretical values.

1^ο Κεφάλαιο: Εισαγωγή

Σκόπος της εργασίας αυτής είναι η μελέτη των γήινων παλιρροιών που προκαλούν τις μεταβολές στην ένταση της βαρύτητας σε ένα συγκεκριμένο σημείο από καταγραφές της βαρύτητας. Για το λόγο αυτό έγινε με χρήση του βαρυτημέτρου.

Λόγω της μεγάλης ευαισθησίας του οργάνου, υπάρχουν πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν τις καταγραφές των δεδομένων, με το πιο σημαντικό να είναι το ίδιο το όργανο. Στην παρούσα εργασία η καταγραφή έγινε ψηφιακά χρησιμοποιώντας το ίδιο το όργανο.

Γενικότερα, μπορεί να αναφερθεί ότι η μελέτη των γήινων παλιρροιών σχετίζεται με αρκετούς κλάδους των γεω-επιστημών, όπως την γεωφυσική, τη σεισμολογία, τη μελέτη των θαλάσσιων παλιρροιών, τη γεωδαισία κλπ.

Ειδικότερα όσον αφορά τη γεωδαισία, ενδιαφέρον παρουσιάζεται στον προσδιορισμό των διορθώσεων της παλίρροιας (tidal corrections) στα διάφορα γεωδαιτικά μετρητικά μεγέθη. Σε έναν άλλον κλάδο της γεωδαισίας, στην βαρυτημετρία πιο συγκεκριμένα, οι διορθώσεις αυτές πρέπει να γίνουν με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Στην Ελλάδα, η έρευνα στον τομέα των παλιρροιών είναι πολύ περιορισμένη και ελάχιστες είναι οι εργασίες εφαρμογής που έχουν γίνει.

Η εργασία χωρίζεται ουσιαστικά σε δύο μέρη και αποτελείται από 6 κεφάλαια. Το πρώτο μέρος είναι κυρίως θεωρητικό και γίνεται αναφορά αρχικά στις βασικές αρχές και στην σημασία του πεδίου βαρύτητας της Γης, στις μαθηματικές εκφράσεις και στο κανονικό πεδίο βαρύτητας. Επιπλέον, γίνεται αναφορά και στο αντικείμενο της βαρυτημετρίας.

Το επόμενο κεφάλαιο, περιγράφει τα όργανα μέτρησης στο πεδίο βαρύτητας. Πιο συγκεκριμένα, περιγράφονται αναλυτικά τα βαρυτήμετρα και η αρχή λειτουργίας τους, οι απόλυτες και σχετικές μετρήσεις και δίνεται και μια σύντομη περιγραφή στις δορυφορικές αποστολές.

Το τελευταίο κεφάλαιο του πρώτου μέρους της εργασίας, αναφέρεται γενικά στις παλίρροιας του φλοιού της Γης, στην σημασία τους και στην επίδραση τους στις γεωδαιτικές και βαρυτημετρικές μετρήσεις.

Το δεύτερο μέρος της εργασίας, περιλαμβάνει την περιγραφή του οργάνου που χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή των μετρήσεων, την προ-επεξεργασία των μετρήσεων, την περιγραφή των προγράμματος στα οποία έγινε η

εφαρμογή, την επεξεργασία και την ανάλυση των ωριαίων τιμών καθώς και τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

Τέλος, το τελευταίο κεφάλαιο περιλαμβάνει τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την εργασία και τις προτάσεις που γίνονται για μελλοντικές βελτιώσεις τόσο του συστήματος καταγραφής, όσο και της επεξεργασίας και ανάλυσης των μετρήσεων.

Οι βασικοί στόχοι της εργασίας είναι :

1. Ο προσδιορισμός με αρκετά καλή ακρίβεια των παλιρροιακών κυμάτων για το συγκεκριμένο σημείο.
2. Η απόκτηση της εμπειρίας και της γνώσης τόσο στην καταγραφή και ανάλυση των αποτελεσμάτων της παλίρροιας της βαρύτητας, όσο και με την χρήση του βαρυτημέτρου.

2^ο Κεφάλαιο: Γήινο Πεδίο Βαρύτητας και Βαρυτημετρία

Η μελέτη του πεδίου βαρύτητας της γης αποτελεί ένα από τα βασικά αντικείμενα της επιστήμης της γεωδαισίας, ενώ καλύπτει επίσης ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών του συνόλου των γεωεπιστημών. Οι ραγδαίες επιστημονικές πρόοδοι των τελευταίων τριάντα χρόνων στα όργανα μέτρησης και τις μεθόδους προσδιορισμού και κυρίως οι σύγχρονες δορυφορικές αποστολές, που αποσκοπούν στον υψηλής ακρίβειας προσδιορισμό των παραμέτρων του πεδίου βαρύτητας της γης, έδωσαν στο γεωδαιτικό αυτόν κλάδο νέες διαστάσεις και προοπτικές. Οι εξελίξεις αυτές συνδέονται τόσο με την κλίμακα απόδοσης των δεδομένων και των αποτελεσμάτων στον τρισδιάστατο χώρο, γήινο και διαστημικό, όσο και με τη διεπιστημονική προσέγγιση και αξιοποίηση των τελικών πρακτικών εφαρμογών. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται κάποια βασικά στοιχεία και παράγοντες που επηρεάζουν το πεδίο βαρύτητας της γης, επεξηγούνται βασικές έννοιες μαθηματικών σχέσεων και εξισώσεων που περιγράφουν το πεδίο βαρύτητας. Επίσης, αναλύονται το πραγματικό – κανονικό πεδίο βαρύτητας αλλά και ο τομέας της βαρυτημετρίας.

2.1 Εισαγωγή στο πεδίο βαρύτητας της Γης

Το γήινο πεδίο βαρύτητας είναι ένα πεδίο δυνάμεων, σε κάθε σημείο του οποίου η ένταση της βαρύτητας ποικίλει λόγω της κατανομής της γήινης μάζας μέσα στη Γη και των διαφορετικών υλικών, με διαφορετικές πυκνότητες, που τις συνιστούν. Συγκεκριμένα, η Γη αποτελείται από τρία κύρια στρώματα – τον φλοιό, τον μανδύα και τον πυρήνα. Κάθε στρώμα έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά που, το καθένα με τον τρόπο του, επιδρούν στο γήινο πεδίο βαρύτητας.

Άλλοι εξίσου σημαντικοί παράγοντες που επιδρούν στο πεδίο βαρύτητας είναι:

- i. Οι γήινες παλίρροιες, που προκαλούνται από τις ελκτικές δυνάμεις της βαρύτητας που ασκεί στους ωκεανούς η Σελήνη.
- ii. Η Σελήνη που είναι πολύ μικρότερη σε μέγεθος από τον Ήλιο, είναι επίσης πολύ πιο κοντά στη Γη, και έτσι η επίδρασή της στις παλίρροιες, και στο πεδίο βαρύτητας είναι πιο σημαντική.
- iii. Οι ωκεανοί που καλύπτουν περίπου τρία τέταρτα της γήινης επιφάνειας. Η στάθμη των ωκεανών αλλάζει με την προσθήκη νέων όγκων υδάτων από το λιώσιμο των πάγων λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου και

την αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη, των ωκεάνιων ρευμάτων, κ.ά.

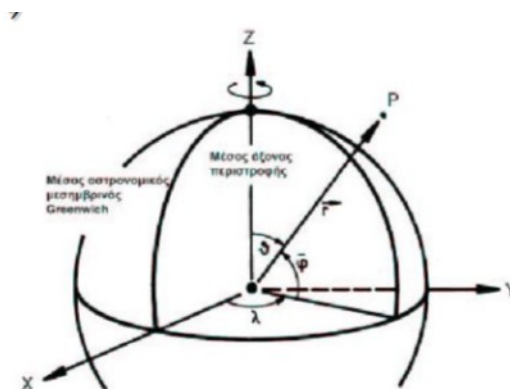
- iv. Και επιπλέον, ένας άλλος παράγοντας είναι τα στρώματα των πάγων στις αρκτικές περιοχές της Γης (π.χ. στην Ανταρκτική), τα οποία συμπιέζουν το γήινο φλοιό από κάτω τους. Οι οποιοσδήποτε αλλαγές στα στρώματα αυτά του πάγου, όπως η μείωση του πάχους τους λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου, προκαλούν φαινόμενα όπως η αναπήδηση του γήινου φλοιού (postglacial rebound) και αλλάζουν διαχρονικά το πεδίο βαρύτητας.

2.2. Μαθηματική Τεκμηρίωση

Σκοπός της ενότητας αυτής είναι η παρουσίαση και η επεξήγηση βασικών εννοιών και διαφόρων σημαντικών μαθηματικών σχέσεων που εκφράζουν τις κύριες παραμέτρους που περιγράφουν το πεδίο βαρύτητας της Γης.

2.2.1. Το γεωκεντρικό σύστημα

Για την προσέγγιση του πεδίου βαρύτητας σε σφαιρική κλίμακα χρησιμοποιείται το ελλειψοειδές γεωκεντρικό σύστημα συντεταγμένων. Η γεωμετρία του ορίζεται από ένα ελλειψοειδές εκ περιστροφής με μεγάλο ημιάξονα a και μικρό ημιάξονα b .



Εικόνα 1: Γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς

Το πεδίο βαρύτητας σφαιρικών σωμάτων περιγράφεται απλούστερα με τη χρησιμοποίηση σφαιρικών συντεταγμένων (r, θ, λ) , όπου r η γεωκεντρική απόσταση, $\theta = 90^\circ - \varphi$ η σφαιρική απόσταση, όπου φ το γεωκεντρικό πλάτος και λ το γεωγραφικό μήκος. Το γεωκεντρικό πλάτος φ συνδέεται με το (ελλειψοειδές) γεωγραφικό πλάτος $\bar{\varphi}$ με τη σχέση:

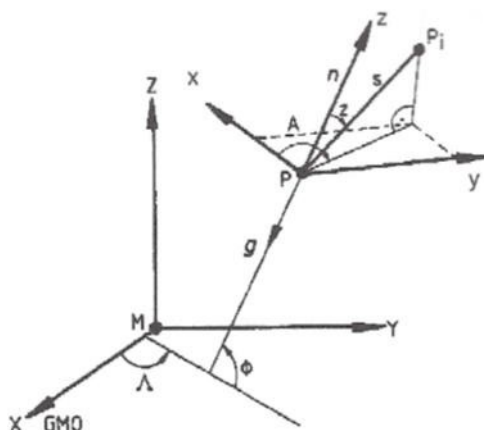
$$\tan \bar{\varphi} = \left(\frac{b}{a}\right)^2 \tan \varphi \quad (2.1)$$

Για το διάνυσμα θέσης r του σημείου P ισχύουν οι ακόλουθοι τύποι μετασχηματισμού:

$$r = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = r \begin{pmatrix} \sin \theta \cos \lambda \\ \sin \theta \sin \lambda \\ \cos \lambda \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

2.2.2. Το τοπικό σύστημα αναφοράς του πεδίου βαρύτητας

Για την περιγραφή της γεωμετρίας του πεδίου βαρύτητας σε τοπική κλίμακα και για τους υπολογισμούς σε περιορισμένες περιοχές χρησιμοποιούνται τοπικά συστήματα συντεταγμένων που συνδέονται με το σημείο P του πεδίου βαρύτητας όπου γίνεται ο υπολογισμός, έχοντας δηλαδή το σημείο P την αρχή τους.



Εικόνα 2: Τοπικό σύστημα αναφοράς του πεδίου βαρύτητας (x,y,z) και γεωκεντρικό σύστημα (X, Y, Z)

Ο προσανατολισμός του συστήματος είναι ο ακόλουθος: ο άξονας z συμπίπτει με τη διεύθυνση της κατακορύφου και κατευθύνεται στο ναδίρ (δηλ. έχει τη διεύθυνση του διανύσματος g , ενώ συνήθως στη γεωδαΐσια ο άξονας z κατευθύνεται στο ζενίθ). Οι άξονες x και y ορίζουν ένα τοπικό οριζόντιο επίπεδο και κατευθύνονται στο βορρά και στην ανατολή αντίστοιχα. Τα τοπικά συστήματα συνδέονται με το σφαιρικό σύστημα μέσω του αστρονομικού πλάτους Φ και του αστρονομικού μήκους Λ , ενώ η διεύθυνση του μεσημβρινού ορίζεται με το αστρονομικό αζιμούθιο A του επίγειου στόχου. Το διάνυσμα της βαρύτητας εκφράζεται με τη σχέση:

$$g = -gn = -g \begin{pmatrix} \cos \Phi \cos \Lambda \\ \cos \Phi \sin \Lambda \\ \sin \Phi \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

όπου n το μοναδιαίο διάνυσμα της εξωτερικής καθέτου.

2.2.3. Επιτάχυνση και δυναμικό της βαρύτητας

Σύμφωνα με το έργο του “Philosophiae Naturalis Principia Mathematica” (Οι μαθηματικές αρχές της φυσικής φιλοσοφίας), ο Νεύτωνας παρουσίασε το πρώτο μαθηματικό πρότυπο για το χρόνο και το χώρο και διατύπωσε τις θεμελιώδεις αρχές για τη κίνηση των φυσικών σωμάτων. Στηριζόμενος στις εν λόγω θεμελιακές αρχές και στην Ευκλείδεια Γεωμετρία προσδιόρισε το βαρυτικό πεδίο δυνάμεων και οδηγήθηκε τελικά στον Νόμο της Παγκόσμιας Έλξης των σωμάτων, που απετέλεσε και την απαρχή των θεωρήσεων του πεδίου βαρύτητας μέχρι σήμερα. Γνωστός ως 1^{ος} νόμος του Νεύτωνα, ο νόμος της έλξης της βαρύτητας δηλώνει ότι η αμοιβαία ελκτική δύναμη F μεταξύ δύο μαζών m_1 και m_2 , που θεωρούνται συγκεντρωμένες σε δύο σημεία P_1 και P_2 , είναι ανάλογη προς το τετράγωνο της απόστασης L μεταξύ των δύο σημείων:

$$F_{\text{έλξη}} = \frac{Gm_1 m_2}{L^2} \quad (2.4)$$

Όπου L είναι η απόσταση μεταξύ των κέντρων των δύο μαζών, η οποία σε ένα καρτεσιανό σύστημα αναφοράς μπορεί να εκφραστεί, σαν συνάρτηση των διανυσμάτων θέσης $r_1(x_1, y_1, z_1)$ και $r_2(x_2, y_2, z_2)$ των δύο σημείων από τη σχέση:

$$L = |L| = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2 + (Z_1 - Z_2)^2} \quad (2.5)$$

Ένα σώμα που περιστρέφεται μαζί με τη Γη υπόκειται σε ελκτικές δυνάμεις που οφείλονται στη μάζα της γης και των ουράνιων σωμάτων και στη φυγόκεντρη δύναμη που οφείλεται στην περιστροφή της γης. Ο συνδυασμός των ελκτικών δυνάμεων και της φυγόκεντρης δύναμης είναι η δύναμη της βαρύτητας. Μονάδες μέτρησης της επιτάχυνσης της βαρύτητας στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων (SI) είναι το ms^{-2} .

Κατά την εκτέλεση μετρήσεων της γήινης βαρύτητας, συνήθως δεν μετράμε τη δύναμη της βαρύτητας F , αλλά μετράμε την επιτάχυνση της, που συμβολίζεται ως g και είναι αποτέλεσμα της επιτάχυνσης b εξ αιτίας της ελκτικής δύναμης

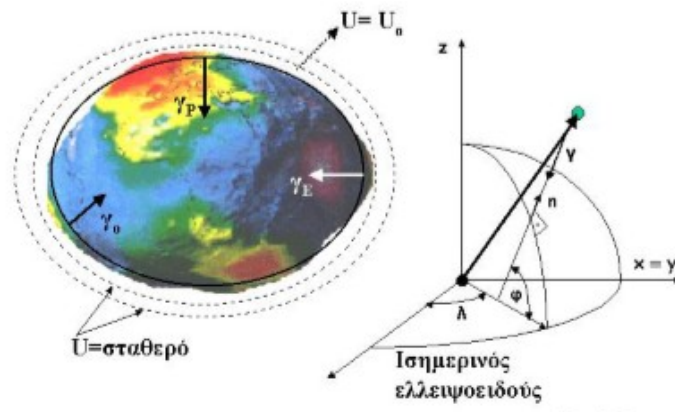
$F_{ελξης}$ και της επιτάχυνσης z εξ αιτίας της φυγόκεντρης δύναμης F_{ϕ} που επιδρούν σε μια μοναδιαία μάζα, δηλαδή:

$$g = b + z \quad (2.6)$$

Επιπλέον, η επιτάχυνση της βαρύτητας μπορεί να θεωρηθεί ως το ποσοστό αλλαγής της ταχύτητας ενός σώματος κάτω από την επιρροή της δύναμης της βαρύτητας. Η ένταση της βαρύτητας εκφράζεται σε μονάδες επιτάχυνσης, που προς τιμή του Galileo, ο οποίος μέτρησε πρώτος τη δύναμη της βαρύτητας, ονομάζονται gal, όπου $1gal = 1cm \text{ sec}^{-2}$.

2.3 Κανονικό πεδίο βαρύτητας

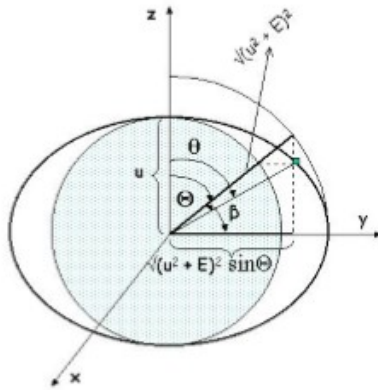
Το σχήμα της Γης μπορεί να προσεγγισθεί με τον καλύτερο δυνατό τρόπο από ένα ελλειψοειδές εκ περιστροφής. Αν και η Γη δεν έχει ακριβώς το σχήμα του ελλειψοειδούς, το πεδίο βαρύτητας ενός ελλειψοειδούς, είναι θεμελιώδους σπουδαιότητας επειδή οι αποκλίσεις του πραγματικού γήινου πεδίου βαρύτητας από το «κανονικό» πεδίο του εν λόγω ελλειψοειδούς είναι τόσο μικρές που μπορούν να θεωρηθούν γραμμικές. Αυτός ο διαχωρισμός του γήινου πεδίου βαρύτητας σε ένα «κανονικό» απλοποιεί αρκετά το πρόβλημα του προσδιορισμού του.



Εικόνα 3: Το χωροσταθμικό ελλειψοειδές

Συγκεκριμένα θεωρείται ότι το κανονικό σχήμα της Γης είναι ένα ελλειψοειδές εκ περιστροφής, που καθορίζεται πλήρως γεωμετρικά από τον μεγάλο ημιάξονα a και τον μικρό ημιάξονα b (ή την επιπλάτυνση του f), ενώ επιπλέον εισάγονται ως φυσικές παράμετροι και η συνολική μάζα του, ίση με τη μάζα της Γης M , καθώς και την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του, ίση με την

γωνιακή ταχύτητα της Γης ω . Επιπλέον θεωρείται ότι η επιφάνεια του είναι μια ισοδυναμική επιφάνεια του κανονικού πεδίου βαρύτητας, δεδομένου ότι το εν λόγω ελλειψοειδές παριστά την κανονική μορφή του γεωειδούς, το οποίο είναι μια ισοδυναμική επιφάνεια του πραγματικού πεδίου βαρύτητας. Το εν λόγω ελλειψοειδές με τις παραπάνω ιδιότητες και τις παραμέτρους που το καθορίζουν αποκαλείται *χωροσταθμικό ελλειψοειδές αναφοράς*.



Εικόνα 4: Ελλειψοειδείς συντεταγμένες

Το μοντέλο του γήινου πεδίου βαρύτητας που χαρακτηρίζεται με αυτές τις ιδιότητες καλείται κανονικό πεδίο βαρύτητας και το δυναμικό που διαμορφώνει συμβολίζεται ως U , έτσι ώστε

$$U = V_N + \Phi \quad (2.7)$$

όπου V_N είναι το κανονικό μέρος του δυναμικού έλξης V και Φ είναι το δυναμικό της φυγόκεντρης δύναμης. Είναι προφανές ότι το εν λόγω ελλειψοειδές, που είναι μια

επιφάνεια όπου $U = \text{σταθερό}$ και αποτελεί το μαθηματικό μοντέλο του γεωειδούς, το οποίο ορίζεται ως μια επιφάνεια όπου το πραγματικό γήινο δυναμικό είναι σταθερό, δηλαδή $W = V + \Phi = \text{σταθερό}$. Με τον τρόπο αυτό, για τον προσδιορισμό του πεδίου βαρύτητας στο χώρο έξω από τις μάζες της Γης, το κανονικό πεδίο βαρύτητας εισάγεται ως σύστημα αναφοράς.

2.3.1. Κανονική βαρύτητα

Ο καθορισμός του κανονικού ελλειψοειδούς επιτρέπει το ορισμό αντίστοιχων παραμέτρων του κανονικού δυναμικού πεδίου σε αναλογία με εκείνες του πραγματικού γήινου δυναμικού. Σε αντιστοιχία με το διάνυσμα της βαρύτητας g ορίζεται το διάνυσμα της κανονικής βαρύτητας, που συμβολίζεται ως γ και ικανοποιεί τη σχέση:

$$\gamma = \text{grad}U = \bar{\nabla}U \quad (2.8)$$

Το μέτρο $\gamma = |\gamma|$ είναι η ένταση της κανονικής βαρύτητας. Ωστόσο ενώ το διάνυσμα της βαρύτητας g έχει τη διεύθυνση της κατακόρυφου στο εκάστοτε σημείο, η διεύθυνση του διανύσματος της κανονικής βαρύτητας συμπίπτει με εκείνη της εκάστοτε καθέτου στην επιφάνεια του κανονικού ελλειψοειδούς που χρησιμοποιείται για να εκφράσει το κανονικό πεδίο βαρύτητας. Η «πραγματική» βαρύτητα δίνεται από την αντίστοιχη σχέση:

$$g = \bar{V}W \quad (2.9)$$

Στην επιφάνεια του κανονικού ελλειψοειδούς η ένταση της κανονικής βαρύτητας δίνεται από την λεγόμενη σχέση του *Somigliana*:

$$\gamma_0 = \frac{[a \gamma_e \cos^2 \varphi + b \gamma_p \sin^2 \varphi]}{\sqrt{a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \varphi}} \quad (2.10)$$

η οποία επίσης εκφράζει την εξάρτηση της κανονικής βαρύτητας από το γεωγραφικό πλάτος φ .

2.4. Βαρυτημετρία

Η Βαρυτημετρία ή Βαρυτομετρία είναι ένας ιδιαίτερος επιστημονικός κλάδος της εφαρμοσμένης Γεωφυσικής και ειδικότερα της Βαρυτικής Γεωφυσικής που αντικείμενό της είναι η μέτρηση της έντασης της βαρύτητας και κατ' επέκταση του όλου βαρυτικού πεδίου της Γης.

Η βαρυτημετρία ως ανεξάρτητος επιστημονικός κλάδος άρχισε να αναπτύσσεται στα τέλη του 19ου αιώνα. Ο όρος βαρυτημετρία αποτελεί την ελληνική απόδοση του αγγλικού gravimetry (από το λατινικό gravis = βάρος) και το ρήμα μετρώ, ο οποίος καθιερώθηκε ως επιστημονικός όρος του γνωστικού αντικείμενου τον 20^ο αιώνα.

Το αντικείμενο της βαρυτημετρίας, θα μπορούσε να περιγραφεί ως ο ορισμός του πεδίου βαρύτητας της Γης και άλλων ουράνιων σωμάτων, συναρτήσεως της θέσης και του χρόνου, με μετρήσεις βαρύτητας και των βαθμίδων της βαρύτητας στην επιφάνεια ή στο χώρο.

Αν είναι γνωστή η κατανομή της βαρύτητας στην επιφάνεια της γης, τότε σε συνδυασμό και με άλλες γεωδαιτικές μετρήσεις, μπορεί να ορισθεί η μορφή της επιφάνειας αυτής. Η επιφάνεια αναφοράς για τη μέτρηση των υψών είναι μια ισοδυναμική επιφάνεια του πεδίου βαρύτητας της γης. Η δημιουργία μοντέλων βαρύτητας της γης και η ερμηνεία των αποκλίσεων του πραγματικού πεδίου βαρύτητας από τα θεωρητικά μοντέλα είναι επίσης αντικείμενο της σύγχρονης βαρυτημετρίας.

Μεταβολές όμως στο πεδίο βαρύτητας της γης οφείλονται και σε άλλα αίτια, όπως για παράδειγμα, στην επίδραση των μαζών των ουράνιων σωμάτων, η οποία προκαλεί περιοδικές μεταβολές του πεδίου βαρύτητας και παραμόρφωση του σχήματος της λιθόσφαιρας (γήινες παλίρροιες). Η

καταγραφή και μελέτη του φαινομένου παρέχει πληροφορίες για τον τρόπο με τον οποίο αντιδρά η λιθόσφαιρα στην παλιρροϊκή φόρτιση.

Η γνώση του εξωτερικού πεδίου βαρύτητας της γης συμβάλλει στον ακριβέστερο προσδιορισμό της τροχιάς των τεχνητών δορυφόρων, οι οποίοι είναι μάζες που κινούνται μέσα στο πεδίο βαρύτητας και με τη σειρά τους παρέχουν πλήθος πληροφοριών για τη βελτίωση της γνώσης του πεδίου βαρύτητας, δηλαδή υπάρχει μια συνεχής ανάδραση ανάμεσα στη βαρυτημετρία και στις σύγχρονες δορυφορικές μεθόδους.

Από το 1945 και μετά η βαρυτημετρία γνώρισε σημαντικές τεχνολογικές εξελίξεις με την κατασκευή στατικών οργάνων μεγάλης ακρίβειας και ευρείας κλίμακας μετρήσεων, την κατασκευή οργάνων απόλυτης μέτρησης βασισμένων στην αρχή της ελεύθερης πτώσης και την κατασκευή οργάνων για μετρήσεις στη θάλασσα.

Η σύγχρονη εποχή της βαρυτημετρίας χαρακτηρίζεται από τις ραγδαίες εξελίξεις τόσο στην κατασκευή οργάνων (όργανα υπεραγωγιμότητας, αδρανειακά συστήματα, βαθμιδόμετρα), όσο και στην ανάπτυξη συστημάτων και μεθόδων χάρις στις οποίες η γνώση μας σχετικά με το πεδίο βαρύτητας βελτιώνεται συνεχώς από νέες πηγές.

Η εξέλιξη της βαρυτημετρίας συνεχίζεται μέσα από διεθνείς συνεργασίες μεγάλων οργανισμών, των ειδικών ομάδων εργασίας της Διεθνούς Γεωδαιτικής Ένωσης αλλά και μικρότερων ερευνητικών ομάδων και μεμονωμένων ερευνητών, με τη χρησιμοποίηση όλων των μεθόδων και τεχνολογικών μέσων τα οποία σε κάθε εποχή τίθενται στη διάθεση της επιστημονικής έρευνας.

3^ο Κεφάλαιο: Όργανα Μέτρησης Στο Πεδίο Βαρύτητας

Ο σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι να παρουσιάσει συνοπτικά τις βασικές φυσικές αρχές στις οποίες στηρίζεται η αρχή λειτουργίας των διαφόρων οργάνων και μετρητικών διατάξεων που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της έντασης της βαρύτητας της Γης. Επιπλέον, αναλύονται διάφορες κατηγορίες βαρυτημέτρων, κατηγορίες μετρήσεων βαρύτητας καθώς και σύγχρονες δορυφορικές αποστολές.

3.1. Μετρήσεις με βαρυτήμετρα

Είναι γνωστό 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

3.1.1 Όργανα μέτρησης από την μέθοδο ταλάντωσης εκκρεμών

Οι συσκευές που βασίζονται στη μέθοδο του εκκρεμούς έχουν εκτοπισθεί από όργανα που βασίζονται στην αρχή του ελατηρίου, γνωστά ως βαρυτήμετρα (gravimeters). Τα όργανα αυτά προσφέρουν μεγαλύτερη ακρίβεια και ταχύτητα μέτρησης.

Η αρχή 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 εύρος της ταλάντωσης.

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 5: Το εκκρεμές του Γαλιλαίου

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.

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.

Σχετικές μετρήσεις με εκκρεμή

Εκτός από τη μειωμένη ακρίβεια, οι σχετικές μετρήσεις με εκκρεμές απαιτούν πολύ χρόνο, δηλαδή για να γίνει μια μέτρηση σε ένα σημείο είναι περίπου μια ημέρα. Οι 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:

$$\Delta g_{PQ} = g_Q - g_P = -2 g_P \left[\frac{T_Q - T_P}{T_P} \right] + g_P \left[\frac{(T_Q - T_P)}{T_P} \right]^2 \quad (3.1)$$

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.

Σε περίπτωση που 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 $\pm 5 \times 10^{-8} \text{ sec}$.

Αξίζει να αναφερθεί ότι 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 $\pm 0.3 \text{ mgal}$.

3.1.2. Μετρήσεις της βαρύτητας από την ελεύθερη πτώση σωμάτων

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 του εν λόγω σώματος καθώς πέφτει από ένα δεδομένο ύψος.



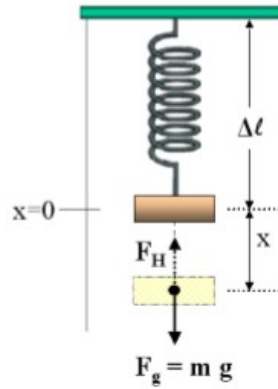
Εικόνα 6: Το πείραμα του Γαλιλαίου και η αρχή της ελεύθερης πτώσης των σωμάτων.

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.

Για να μετρήσουμε, 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).

3.1.3. Όργανα μέτρησης της βαρύτητας από την παραμόρφωση ελατηρίου

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.



Εικόνα 7: Αρχή λειτουργίας βαρυτημέτρων με ελατήριο

Από την παραπάνω εικόνα φαίνεται η απλή περίπτωση μέτρησης της βαρύτητας με ελατήριο, όπου η μάζα m εξαρτάται από κατακόρυφο ελατήριο. Σύμφωνα με το νομο του Hooke το βάρος αντισταθμίζεται από την τάση του ελατηρίου. Η συνθήκη ισορροπίας του συστήματος δίνεται από τη σχέση:

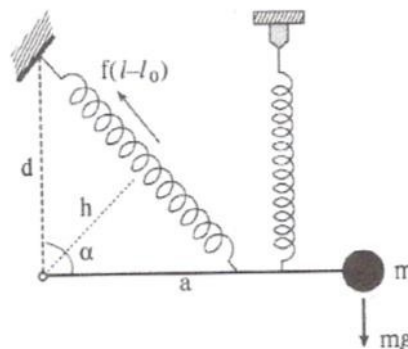
$$m g - f \Delta l = 0 \quad (3.2)$$

όπου f η σταθερά του ελατηρίου και $\Delta l = (l - l_0)$, το μήκος του ελατηρίου χωρίς και με το φορτίο αντίστοιχα.

Περισσότερο συνηθισμένες όμως είναι οι παρακάτω διατάξεις:

1. Όργανα αστατικού τύπου ή μη γραμμικά όργανα (astatized gravimeters)
2. Γραμμικά όργανα (linear gravimeters)

Στην πρώτη περίπτωση η μάζα είναι στερεωμένη στο ένα άκρο, ενώ το ελατήριο επαναφοράς ενεργεί σε γωνία α (πλάγια), όπως ακριβώς φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα (8).



Εικόνα 8: Όργανο με ελατήριο το οποίο ενεργεί από πλάγια θέση

Στην περίπτωση αυτή η ισορροπία του συστήματος περιγράφεται από τη σχέση:

$$mga - f(l - l_0)h = 0 \quad (3.3)$$

όπου $h = \beta \sin \Delta = \beta \frac{d}{l} \sin a$, οπότε με αντικατάσταση στη σχέση (3.3) προκύπτει:

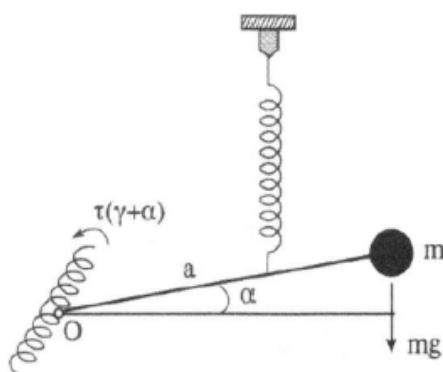
$$mga - f\beta d \frac{l-l_0}{l} \sin a = 0 \quad (3.4)$$

Με βάση τη γεωμετρία της εικόνας(8) και με διαφορίση της σχέσης (3.4) η τελική σχέση είναι:

$$\Delta g = \frac{f\beta d}{ma} \left(\frac{l-l_0}{l} \cos a + \frac{l_0}{l^3} \beta d \sin^2 a \right) \Delta \alpha \quad (3.5)$$

Τα όργανα τα οποία βασίζονται στην παραπάνω αρχή είναι γνωστά ως *μη γραμμικά ή όργανα αστατικού τύπου* (astatized gravimeters).

Μια άλλη συνηθισμένη διάταξη είναι η δεύτερη περίπτωση όπου η μάζα είναι στερεωμένη στο άκρο ενός στελέχους του οποίου το άλλο είναι δυνατό να περιστρέφεται γύρω από τον άξονα O. Η ισορροπία επιτυγχάνεται είτε με οριζόντιο ελατήριο στρέψης όπως φαίνεται στην εικόνα (9) ή με ελατήριο επαναφοράς που ενεργεί κατακόρυφα ή πλάγια όπως ακριβώς φαίνεται στην προηγούμενη εικόνα (8).



Εικόνα 9: Όργανο με οριζόντιο ελατήριο επαναφοράς.

Για την συγκεκριμένη περίπτωση διάταξης η ισορροπία του ζεύγους περιγράφεται από την εξίσωση:

$$mga \cos a - \tau(\gamma + \alpha) = 0 \quad (3.6)$$

όπου a το μήκος του στελέχους, α η γωνία του στελέχους με την οριζόντια θέση, τ η σταθερά στρέψης του ελατηρίου και γ η αρχική γωνία στροφής του ελατηρίου.

Με διαφορίση και με αντικατάσταση στην σχέση (3.6) προκύπτει:

$$\Delta g = \frac{\tau}{ma} \Delta \alpha \quad (3.7)$$

Δηλαδή, στην περίπτωση που $\alpha=0$ υπάρχει μια γραμμική σχέση μεταξύ Δg και $\Delta \alpha$.

Τα όργανα τα οποία βασίζονται στην παραπάνω αρχή είναι γνωστά ως *γραμμικά όργανα* (linear gravimeters).

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του ελατηρίου των βαρυτημέτρων είναι κράματα μετάλλων με μικρό θερμοελαστικό συντελεστή, π.χ. NiFe και χαλαζίας με γραμμικό θερμοελαστικό συντελεστή και μικρό συντελεστή θερμικής διαστολής.

Στις περισσότερες περιπτώσεις το σύστημα μέτρησης βρίσκεται κλεισμένο σε θερμοστατικό θάλαμο που επιπλέον προσφέρει θωράκιση απέναντι σε ατμοσφαιρικές και ηλεκτρικές επιδράσεις. Δύο αντιπροσωπευτικοί τύποι οργάνων με ελατήριο είναι το βαρυτήμετρο *Askania Gs γραμμικού τύπου* και το βαρυτήμετρο *LaCoste – Romberg αστατικού τύπου*.

Η απαίτηση ακρίβειας την οποία πρέπει να πληρούν τα σημερινά βαρυτήμετρα ($0.01 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$) προϋποθέτει ανάλογη απόκριση του μηχανισμού ενδείξεων και πολύ μεγάλη (της τάξης του 10^{-8}) σταθερότητα του συντελεστή f του ελατηρίου για το διάστημα (μερικών ωρών) το οποίο μεσολαβεί μεταξύ δύο μετρήσεων.

3.2. Πρώτη κατηγορία: Γεωδαιτικά Βαρυτήμετρα

Τα σύγχρονα γεωδαιτικά βαρύμετρα επιτρέπουν την μέτρηση των μεταβολών στη σχετική επιτάχυνση της γήινης βαρύτητα με ακρίβεια καλύτερη από 1 μέρος σε 1000 εκατομμύρια της τιμής της βαρύτητας της Γης, δηλαδή με μια ακρίβεια της τάξης του 0.001 mgal. Μια τέτοια ακρίβεια μπορεί να επιτευχθεί μόνο κάτω από καλά ελεγχόμενες συνθήκες και όταν ακολουθούνται προσεκτικά οι συνιστώμενες διαδικασίες των μετρήσεων.

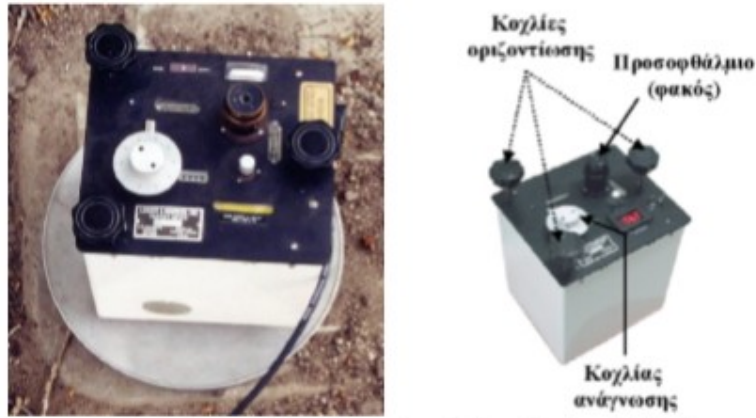
Τα όργανα αυτού του τύπου παράγονται από διάφορους κατασκευαστές, συμπεριλαμβανομένων των βαρυτήμετρων LaCoste-Romberg, και Worden που χρησιμοποιούνται ευρέως για γεωδαιτικούς και γεωφυσικούς σκοπούς.

3.2.1 Βαρυτήμετρα LaCoste-Romberg Model -G & -D

Τα βαρυτήμετρα LaCoste-Romberg, 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:

- μεγάλη ελαστικότητα (ώστε να επιτρέπουν μεγαλύτερη ένταση του ελατηρίου),
- μικρό θερμοελαστικό συντελεστή (ώστε να εξαρτώνται το δυνατόν λιγότερο από αλλαγές της θερμοκρασίας)
- 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.



Εικόνα 10: Γεωδαιτικό βαρυντήμετρο LaCoste-Romberg Model -G

Αυτό το συγκεκριμένο μοντέλο βαρυντήμετρου χρησιμοποιεί δύο τρόπους για την ανάγνωση της θέσης της μάζας: μέσω ενός οπτικού συστήματος (το προσοφθάλμιο φακό) και μέσω ενός ηλεκτρονικού κοιλία. Στο εσωτερικό του οργάνου, η μάζα που χρησιμοποιείται κρέμεται στο άκρο μιας οριζόντιας μεταλλικής φάλαγγας που αντισταθμίζεται από το ελατήριο μηδενικού μήκους, δηλαδή από ένα ελατήριο πολύ μικρού μήκους. Αξίζει να σημειωθεί ότι στα βαρυντήμετρα Lacoste & Romberg μια μονάδα ένδειξης z του βαρυντήμετρου αντιστοιχεί περίπου σε 1 mgal μεταβολής της πραγματικής έντασης της βαρύτητας.

Τα εν λόγω βαρυντήμετρα 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 βαρυντημετρική διαφορά στην επιφάνεια της Γης. Η δυνατότητα αυτή εξαλείφει την ανάγκη επαναριθμήσεων του οργάνου κατά την εκτέλεση μετρήσεων σε διαφορετικές τοποθεσίες.

Τα συγκεκριμένα βαρυντήμετρα 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.

Παρόμοιου αλλά βελτιωμένου τύπου βαρυντήμετρα LaCoste-Romberg αποτελούν εκείνα του τύπου Model-D τα οποία αποτελούν μια υψηλής ακρίβειας τροποποιημένη έκδοση του Model-G. Τα εν λόγω βαρυντήμετρα 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 βαρυτήμετρο 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 βαρυτήμετρα 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.

3.2.2. Βαρυτήμετρα Worden



Εικόνα 11: Βαρυτήμετρο τύπου Worden

Τα βαρυτήμετρα Worden ανήκουν στα λεγόμενα βαρυτήμετρα *αστατικού τύπου* που βασίζονται σε ένα ελαστικό σύστημα από χαλαζία. Στα αστατικού τύπου βαρυτήμετρα η ισορροπία της μάζας του ελατηρίου επιτυγχάνεται με ένα μηχανισμό επαναφοράς που ενεργεί πλάγια στο ελατήριο μηδενικού μήκους που χρησιμοποιείται. Το από χαλαζία στοιχείο ισορροπεί τη μάζα κοντά στο σημείο αστάθειας, έτσι ώστε είναι δυνατή η μέτρηση επιμηκύνσεων ή συσπειρώσεων του ελατηρίου ακόμα και για μικρές μεταβολές της βαρύτητας. Τα βαρυτήμετρα αυτά μετρούν τις σχετικές τιμές της βαρύτητας και μπορούν να ανιχνεύσουν μεταβολές με ακρίβεια της τάξης του 1 μέρους σε 100.000.000 της κανονικής βαρύτητας της Γης. Κάτω από ιδανικές συνθήκες, τα εν λόγω βαρυτήμετρα επιτρέπουν τη μέτρηση των σχετικών τιμών της βαρύτητας της τάξης του 0.01 mgal και σε συνδυασμό με το μικρό βάρος τους και μέγεθος τους χρησιμοποιούνται ευρέως για γεωφυσικές διασκοπήσεις.

3.2.3. Βαρυτήμετρα EDCON Super-G



Εικόνα 12: Βαρυτήμετρο EDCON Super-G

Το 1988 η αμερικανική εταιρεία EDCON άρχισε την ανάπτυξη και το 1990 κατασκεύασε ένα βελτιωμένο τύπο του βαρυτήμετρου LaCoste-Romberg Model-G, το λεγόμενο βαρυτήμετρο Super-G™ που συνδυάζει την απλότητα της λειτουργίας του, με υψηλή αξιοπιστία και ακρίβεια μερικών μGal κάτω και από τις πλέον δυσμενείς συνθήκες μετρήσεων (π.χ. σε αρκτικές περιοχές).

Κατασκευασμένο για τη δυνατότητα συνεχούς λειτουργίας (για μακρά διάρκεια μετρήσεων) και την ευκολία της λειτουργίας του, το εν λόγω βαρυτήμετρο ενσωματώνει πολυάριθμες βελτιώσεις που εξαλείφουν τις διάφορες πηγές θορύβου των μετρήσεων, βελτιώνοντας την ακρίβεια και την απαιτούμενη διάρκεια των μετρήσεων στους εκάστοτε σταθμούς. Επιπλέον, η δυνατότητα αυτόματης καταγραφής των ενδείξεων εξαλείφει τα λάθη ανάγνωσης ή καταγραφής των μετρήσεων και επιτρέπει την συλλογή δεδομένων χωρίς την παρουσία χειριστών του οργάνου, γεγονός που είναι ιδιαίτερο χρήσιμο σε πολλές κρίσιμες εφαρμογές, όπως π.χ. για τη διεξαγωγή μετρήσεων σε ασταθή εδάφη, όπως κοντά σε ηφαίστεια, περιοχές κατολισθήσεων, κ.ά.

3.2.4. Βαρυτήμετρα CG-5



Εικόνα 13: Το αυτογραφικό βαρυτήμετρο CG-5

Τα βαρυτήμετρα CG-5 είναι ευαίσθητα όργανα σταθερής βάσης με την οποία επιχειρείται η βαρυτημετρία ενός τόπου. Τα βαρυτήμετρα αυτά έχουν εύρος μέτρησης πάνω από 8000 mgals χωρίς επανεκκίνηση και η ανάλυση τους κυμαίνεται στα 0,001 mgal. Αυτό επιτρέπει στα αυτογραφικά βαρυτήμετρα να χρησιμοποιηθούν τόσο για λεπτομερείς έρευνες πεδίου και μεγάλης κλίμακας περιφερειακές ή γεωδαιτικές έρευνες. Τα όργανα αυτά

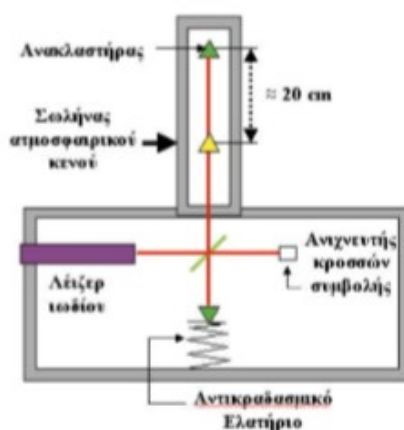
παρέχουν μεγάλη ακρίβεια στις μετρήσεις που λαμβάνονται από το πάτημα ενός πλήκτρου και τις περισσότερες φορές χρειάζεται λιγότερο από ένα λεπτό για να ολοκληρωθεί μια ανάγνωση. Επιπλέον, μια σειρά από αναγνώσεις των μετρήσεων βαρύτητας μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη ρύθμιση του οργάνου στη λειτουργία αυτόματης επανάληψης. Οι μεμονωμένες μετρήσεις εμφανίζονται άμεσα σε mgals. Τα δεδομένα αποθηκεύονται σε μνήμη Flash και μπορεί να σταλούν σε ένα εκτυπωτή, modem, συσκευή εγγραφής ή PC.

Η χαμηλή ολίσθηση είναι αποτέλεσμα του εξαιρετικά σταθερού λειτουργικού και περιβαλλόμενου από χαλαζία ελαστικού συστήματος (μη μαγνητικό λιωμένο χαλαζία) και έτσι δεν επηρεάζεται από τις μεταβολές του μαγνητικού πεδίου. Επιπλέον, επιτρέπει τη μακροπρόθεσμη μετατόπιση του αισθητήρα και μια διόρθωση λογισμικού σε πραγματικό χρόνο μειώνει την ολίσθηση σε λιγότερο από 0,02 mgal ανά ημέρα.

Είναι έτσι κατασκευασμένο για τη δυνατότητα λειτουργίας σε θερμοκρασίες από -40°C έως 45 °C. Το εν λόγω βαρυτήμετρο κάνει αυτόματες διορθώσεις κατά την καταγραφή των παρατηρήσεων στις παλίρροιες, στην κλίση του οργάνου, στην θερμοκρασία, στον θόρυβο καθώς και στις σεισμικές δονήσεις.

3.3. Δεύτερη κατηγορία: Απόλυτα Βαρυτήμετρα

Τα απόλυτα βαρυτήμετρα είναι όργανα μέτρησης της απόλυτης τιμής της έντασης της γήινης βαρύτητας σε ένα συγκεκριμένο σημείο και όχι της σχετικής διαφοράς της βαρύτητας σε σχέση με ένα άλλο σημείο αναφοράς την οποία μετρούν τα προαναφερόμενα βαρυτήμετρα. Το κύριο πλεονέκτημα τους είναι ότι δεν επηρεάζονται οι μηχανικές υστερήσεις και τα σφάλματα βαθμονόμησης που συνήθως χαρακτηρίζουν τα συμβατικά βαρυτήμετρα μέτρησης της σχετικής βαρύτητας. Ωστόσο, ο υπολογισμός της απόλυτης έντασης της βαρύτητας είναι πολύ δυσκολότερος από τον προσδιορισμό της σχετικής βαρύτητας μεταξύ δύο σημείων και για το λόγο αυτό τα απόλυτα βαρυτήμετρα είναι περισσότερο πολύπλοκες και πιο ευαίσθητες ηλεκτρονικές μετρητικές διατάξεις που βασίζονται σε σύγχρονες τεχνικές της ατομικής φυσικής και της μέτρησης του χρόνου.



Εικόνα 14: Σχηματική αρχή λειτουργίας απόλυτου βαρυτημέτρου

Η λειτουργία τους βασίζεται στην ίδια φυσική αρχή της ελεύθερης πτώσης των σωμάτων, δηλαδή τη μέτρηση της επιτάχυνσης που ενός σώματος γνωστής μάζας m που πέφτει στο κενό.

Τυπικά οι μετρήσεις τους εκτελούνται χρησιμοποιώντας ένα συμβολόμετρο λέιζερ (laser interferometer) που μετράει με μεγάλη ακρίβεια την επιτάχυνση ενός ανακλαστήρα κατά την πτώση του στο κενό που σχηματίζεται σε ένα ειδικά σχεδιασμένο σωλήνα, όπου η πίεση του αέρα έχει ελαττωθεί στο ένα δισεκατομμυριοστό της πίεσης μιας ατμόσφαιρας για να μειωθεί η ασκούμενη τριβή στον εν λόγω ανακλαστήρα και για να απομονώνεται η μάζα από οποιοσδήποτε μη-βαρυτημετρικές επιταχύνσεις (π.χ. ηλεκτρομαγνητικές επιδράσεις) και άλλους θορύβους. Για τη μέτρηση του χρόνου της πτώσης χρησιμοποιείται ένα ατομικό χρονόμετρο. Το οπτικό σήμα που δημιουργείται κατευθύνεται σε ένα φωτοανιχνευτή όπου καταγράφεται η ακριβής τροχιά του

ανακλαστήρα κατά τη διάρκεια της πτώσης του και από την ανάλυση αυτών των στοιχείων καθορίζεται η απόλυτη τιμή της βαρύτητας.

3.3.1 Απόλυτο Βαρυτήμετρο FG5

Ένα σύγχρονο απόλυτο βαρυτήμετρο τέτοιου τύπου αποτελεί το μοντέλο FG5, που κατασκευάζεται από την αμερικανική εταιρεία Micro-g Solutions Inc. Σήμερα χρησιμοποιούνται περίπου 30 τέτοια όργανα σε όλο τον κόσμο.

Τα βαρυτήμετρα FG5 χρησιμοποιούν ένα μηχανισμό που παράγει μια ελεύθερη πτώση της μάζας για 20 cm που διαρκεί περίπου 0.2 sec. Στη πραγματικότητα, εξ αιτίας των απαραίτητων μηχανικών τμημάτων του, ο σωλήνας κενού ενός βαρυτήμετρου FG5 έχει μήκος περίπου 75 cm. Για καλές συνθήκες μετρήσεων, μια τέτοια διαδικασία είναι ικανή να παρέχει μετρήσεις με ακρίβεια της τάξης $\pm 5 \mu\text{Gal}$ από μια απλή πτώση της μάζας

Ο υπολογισμός της ακρίβειας των απόλυτων βαρυτήμετρων παρουσιάζει μια αντικειμενική δυσκολία – δεν υπάρχουν άλλου τύπου όργανα μέτρησης της βαρύτητας με υψηλότερη ακρίβεια με τα οποία θα ήταν δυνατή η βαθμονόμηση τους. Για τον λόγο αυτό οι οποιεσδήποτε δοκιμές συνήθως περιορίζονται στις ακόλουθες τρεις κατηγορίες:

- 1) Δοκιμές που συγκρίνουν ένα βαρύμετρο με άλλο του διαφορετικού τύπου.
- 2) Δοκιμές που συγκρίνουν τα παρόμοια βαρύμετρα το ένα σε σχέση με το άλλο.
- 3) Δοκιμές της επανάληψης των μετρήσεων ενός απόλυτου βαρυμέτρου κατά τη διάρκεια του χρόνου.

Τα σύγχρονα απόλυτα βαρυτήμετρα μεταφέρονται σχετικά εύκολα (χωρίς ωστόσο να θεωρούνται φορητά) και επιτρέπουν τη μέτρηση της δύναμης της βαρύτητας με μια ακρίβεια ενός μέρους σε ένα δισεκατομμύριο, γεγονός που τα καθιστά κατάλληλα για ποικίλες προηγμένες γεωδαιτικές εφαρμογές. Η τυπική διάρκεια τέτοιων μετρήσεων σε έναν σταθμό είναι 2 ή 3 ώρες για την τοποθέτηση και προετοιμασία του οργάνου και άλλες 24 ώρες για τη συλλογή αρκετών στοιχείων για μια ακριβή μέτρηση.

Σήμερα τέτοιες επαναληπτικές μετρήσεις της απόλυτης βαρύτητας της Γης διεξάγονται σε κανονικά χρονικά διαστήματα, στα πλαίσια διεθνών ερευνητικών προγραμμάτων που αφορούν τη μελέτη της Γης ως σύστημα (π.χ. τεκτονικές μικρομετακινήσεις και παραμορφώσεις εξ αιτίας της σεισμικής και

ηφαιστειακής δραστηριότητας, αναπήδηση του γήινου φλοιού, μεταβολές της περιστροφής της Γης, κ.α.

3.3.2 Απόλυτα Βαρυτήμετρα νέας γενιάς

Τελευταία έχουν κατασκευασθεί νέου τύπου απόλυτα βαρύμετρα μικρότερων διαστάσεων από τα συνηθισμένα FG5 που αναμένεται να βελτιώσουν πολύ τη διεξαγωγή μετρήσεων της απόλυτης βαρύτητας για δυναμικές και στατικές εφαρμογές.

Τα νέα αυτά όργανα είναι πολύ μικρότερα σε μέγεθος από τα προηγούμενα απόλυτα βαρύμετρα και μπορούν να καταγράψουν τα στοιχεία των μετρήσεων σε πολύ υψηλότερο ποσοστό. Η κυριότερη βελτίωση σε σχέση με τα βαρυτήμετρα FG5 σχετίζεται κυρίως με το νέο σχεδιασμό του σωλήνα κενού που χρησιμοποιείται στη προκειμένη περίπτωση.



Εικόνα 15: Νέου τύπου απόλυτων βαρυτημέτρων

Ο κατασκευαστικός στόχος για του νέου τύπου απόλυτα βαρυτήμετρα ήταν να κατασκευασθεί ένας σωλήνας ελεύθερης πτώσης που να παρέχει τουλάχιστον την ίδια χαρακτηριστική ακρίβεια αλλά σημαντικά μικρότερων από εκείνες των βαρυτήμετρων FG5. Τα νέου τύπου απόλυτα βαρυτήμετρα είναι ιδιαίτερα φορητά, και επιτυγχάνουν μια πιο μακρόχρονης διάρκειας πτώση της ελεύθερης μάζας από ότι τα συμβατικά απόλυτα βαρύμετρα. Τυπικά τα νέα απόλυτα βαρυτήμετρα είναι ικανά να εκτελούν 100

επαναληπτικές μετρήσεις ανά λεπτό, που οδηγούν σε τυπική ακρίβεια ανά διαδρομή της μάζας περίπου $\pm 4 \mu\text{gal}$. Με τον τρόπο αυτό, ο συνολικά απαιτούμενος χρόνος ελεύθερης πτώσης ανά λεπτό παρατήρησης έχει αυξηθεί κατά μια τάξη μεγέθους σε σχέση με τα προηγούμενα απόλυτα βαρυτήμετρα. Αυτό τα καθιστά ιδανικά για τη διεξαγωγή μετρήσεων βαρύτητας σε δυναμικά περιβάλλοντα όπως σε πλοία και αεροσκάφη, καθώς επίσης και για γρήγορες στατικές γεωφυσικές διασκοπήσεις, οι οποίες απαιτούν ευκολία στη μεταφορά και ταχύτητα στο προετοιμασία και τη χρήση του οργάνου.



Εικόνα 16: Φορητά απόλυτα βαρυτήμετρα νέας γενιάς: μοντέλο A-10(αριστερά) & I-10(δεξιά) της Microsolutions-g, Colorado

Τα πλέον σύγχρονα απόλυτα βαρυτήμετρα αυτού του τύπου είναι τα μοντέλα A-10 και I-10 που κατασκευάζονται από την Micro-g Solutions, Inc. (την κατασκευάστρια εταιρεία του FG5). Το μοντέλο A-10 είναι ένα ξανασχεδιασμένο απόλυτο βαρύμετρο, βασισμένο σε ένα πρωτότυπο όργανο που αναπτύχθηκε από την Εθνική Υπηρεσία για τη μελέτη των Ωκεανών και της Ατμόσφαιρας των Η.Π.Α. (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA). Είναι χαμηλού κόστους και έχει βελτιστοποιηθεί για την ταχύτητα της συλλογής στοιχείων, την ευκολία της χρήσης, και τη φορητότητα του για εφαρμογές στο πεδίο ιδιαίτερα κάτω από αντίξοες συνθήκες μετρήσεων (π.χ. σε ακραίες θερμοκρασίες, στον ήλιο το χιόνι, και τον αέρα). Αντίστοιχα το απόλυτο βαρύμετρο I-10 είναι ένα νέο φορητό απόλυτο βαρύμετρο που σχεδιάζεται για εργαστηριακή χρήση. Η λειτουργία του βασίζεται στις ίδιες προδιαγραφές και την κατασκευή του μοντέλου A-10, και παρέχεται από την κατασκευάστρια εταιρεία ως μια χαμηλής τιμής επιλογή για εκείνους που χρειάζονται ένα αξιόπιστο εργαστηριακό βαρύμετρο με δυνατότητες γρήγορης απόκτησης δεδομένων και τον υπολογισμό της τιμής της βαρύτητας.

3.4. Τρίτη κατηγορία: Απόλυτα Βαρυτήμετρα Υπεραγωγιμότητας

Τα βαρυτήμετρα υπεραγωγιμότητας είναι ένας τύπος βαρυτήμετρου που αναπτύχθηκε αρχικά στο τέλος της δεκαετίας του '60 και η λειτουργία τους βασίζεται στην αρχή της υπεραγωγιμότητας, δηλαδή τη συμπεριφορά που παρουσιάζουν ορισμένα υλικά των οποίων η ηλεκτρική αντίσταση σχεδόν μηδενίζεται στην θερμοκρασία του απόλυτου μηδέν, όπου “παγώνει” κάθε κίνηση των ηλεκτρονίων των ατόμων τους. Τέτοια υλικά είναι συνήθως τα λεγόμενα υπερκράματα μετάλλων (π.χ. niobium, Nb) και τα κεραμικά υλικά, που αποτελούνται από μέταλλα με προσμίξεις αμέταλλων στοιχείων σε μικρές ποσότητες.

Η αρχή λειτουργία τους είναι παρόμοια με των βαρυτήμετρων που βασίζονται στην αρχή της παραμόρφωσης ελατηρίων, όπου όμως το μηχανικό ελατήριο αντικαθίσταται από ένα μαγνητικό μηχανισμό που προκαλεί τον μετεωρισμό μιας υπεραγωγικής σφαίρας που βρίσκεται στο ηλεκτρομαγνητικό μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί η ροή ηλεκτρικού ρεύματος σε μια σειρά μεταλλικών ελατηρίων. Ο αντικειμενικός στόχος μιας τέτοιας διάταξης είναι να χρησιμοποιηθεί η τέλεια σταθερότητα των ηλεκτρικών ρευμάτων για να δημιουργηθεί ένα τέλεια σταθερό ελατήριο.



Εικόνα 17: Τυπική πλήρης διάταξη ενός υπεραγωγικού βαρυτημέτρου μαζί με τις απαραίτητες ηλεκτρονικές μονάδες.

Τα βαρυτήμετρα αυτά παρέχουν σταθερότητα για μακρές χρονικές περιόδους έτσι ώστε ο θόρυβος των μετρήσεων εξ αιτίας του οργάνου μπορεί να είναι σε επίπεδα μικρότερα από εκείνα των γεωφυσικών σημάτων που επιζητείται να ανιχνευθούν κατά τη διάρκεια συνεχών μετρήσεων της απόλυτης βαρύτητας που κυμαίνονται από μερικά λεπτά μέχρι μερικά χρόνια. Τα όργανα αυτά, όπως είναι προφανές, είναι υψηλού κόστους και γι' αυτό ο αριθμός τους είναι περιορισμένος σε όλο τον κόσμο και οι μετρήσεις που εκτελούν αποτελούν

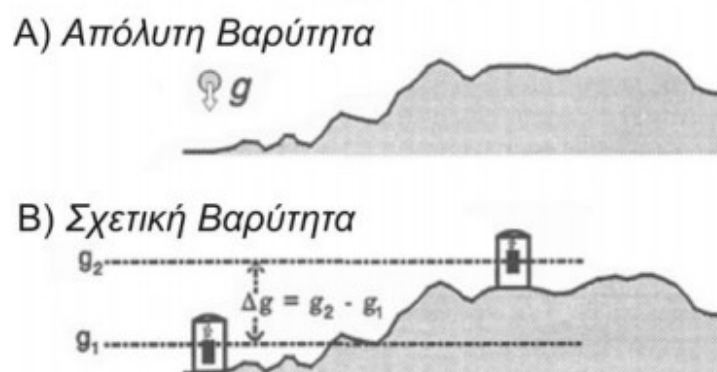
συντονισμένες ενέργειες διεθνών οργανισμών που τα χρησιμοποιούν για τη διεξαγωγή ταυτόχρονων μετρήσεων σε επιλεγμένους σταθμούς για περιόδους τουλάχιστον 5-6 ετών κάθε φορά.

Τα βαρόμετρα υπεραγωγιμότητας είναι σήμερα οι πιο ευαίσθητες συσκευές για τη μέτρηση των διαχρονικών μεταβολών της βαρύτητας. Μπορούν να μετρήσουν τις αλλαγές στη βαρύτητα σε ένα σημείο με ακρίβεια της τάξης του ενός nanogal, ή περίπου ένα μέρος σε 10^{12} της κανονικής βαρύτητας στη γήινη επιφάνεια. Ως εκ τούτου, χρησιμοποιούνται για γεωδυναμικές εφαρμογές πολύ υψηλών απαιτήσεων ακρίβειας, όπως για παράδειγμα για την ανίχνευση των μικρών δονήσεων (εσωτερικά κύματα βαρύτητας) στο γήινο ρευστό πυρήνα.

3.5. Απόλυτες – Σχετικές μετρήσεις Βαρύτητας

Οι βαρυτημετρικές μετρήσεις είναι δυνατό να είναι απόλυτες ή σχετικές. Με τον όρο απόλυτη μέτρηση της βαρύτητας (absolute gravity measurement) εννοούμε τον προσδιορισμό του μέτρου g σε ένα σημείο P, ενώ με τον όρο σχετική μέτρηση της βαρύτητας (relative gravity measurement) εννοούμε τη μέτρηση της διαφοράς Δg_{PQ} των τιμών του g σε δύο διαφορετικά σημεία P και Q.

Οι μετρήσεις της βαρύτητας (απόλυτες & σχετικές) είναι έμμεσες μέτρησεις, δηλ. βασίζονται σε πειράματα που έχουν σχέση με την κίνηση μαζών στο πεδίο βαρύτητας, οπότε το μετρούμενο μέγεθος είναι συνήθως μήκος και χρόνος ή μήκος και περίοδος ταλάντωσης (απόλυτες μετρήσεις), ή σε πειράματα που βασίζονται στην αρχή του ελατηρίου (σχετικές μετρήσεις).



Εικόνα 18: Α) Απόλυτη τιμή βαρύτητας είναι η πραγματική επιτάχυνση της βαρύτητας (g), Β) Η σχετική τιμή βαρύτητας αντανακλά τη διαφορά της επιτάχυνσης βαρύτητας (Δg) μεταξύ ενός σταθμού (g_1) σχετικά με ένα άλλο σταθμό (g_2).

3.5.1. Απόλυτη τιμή της βαρύτητας

Υπάρχουν δύο βασικοί τρόποι προσδιορισμού της απόλυτης τιμής βαρύτητας. Η μέθοδος του πίπτοντος βάρους, όπου η ταχύτητα και η μετατόπιση ενός ελεύθερα πίπτοντος σώματος μετριοούνται και η απόλυτη τιμή της βαρύτητας υπολογίζεται από τον τύπο:

$$z = u_0 t + \frac{1}{2} g t^2 \quad (3.8)$$

όπου z = απόσταση που διανύει το πίπτον σώμα

t = χρόνος που απαιτείται να διανύσει απόσταση z

u_0 = αρχική ταχύτητα σώματος

g = απόλυτη τιμή βαρύτητας

Χρησιμοποιώντας την δεύτερη μέθοδο, ένα εκκρεμές ταλαντώνεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \quad (3.9)$$

όπου T = η περίοδος ταλάντωσης του εκκρεμούς και

L = το μήκος του εκκρεμούς

Η απόλυτη τιμή βαρύτητας υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$g = L \left(\frac{4\pi^2}{T^2} \right) \quad (3.10)$$

3.5.2. Σχετική τιμή της βαρύτητας

Η ακρίβεια που πρέπει να ληφθούν οι απόλυτες τιμές βαρύτητας καθιστά τις μετρήσεις αυτές ακριβές και χρονοβόρες. Οι σχετικές μετρήσεις βαρύτητας μπορούν να γίνουν εύκολα και με ένα όργανο, το βαρυτήμετρο, το οποίο ουσιαστικά μετρά το μήκος ενός ελατηρίου. Η μάζα ενός σώματος αναρτάται από ένα ελατήριο το οποίο παραμένει σταθερό. Όταν το βαρυτήμετρο μεταφέρεται από ένα σταθμό ή ένα σημείο σε ένα άλλο, η δύναμη (F) την οποία η μάζα (m) ασκεί στο ελατήριο ποικίλλει ανάλογα με την τοπική επιτάχυνση της βαρύτητας (g):

$$F = mg \quad \& \quad g = \frac{F}{m} \quad (3.11)$$

Ουσιαστικά, το βαρυτήμετρο απλά ζυγίζει μια μάζα σε διαφορετικούς σταθμούς. Το ελατήριο τεντώνεται (+ Δl) όπου υπάρχει μεγαλύτερη βαρύτητα και συρρικνώνεται (- Δl), όπου η βαρύτητα είναι μικρότερη.

3.5.3. Διορθώσεις των μετρήσεων της βαρύτητας

Οι εκάστοτε μετρήσεις βαρύτητας, είτε αυτές αναφέρονται στην απόλυτη ή στη σχετική τιμή της έντασης της βαρύτητας, προκειμένου να αποβούν χρήσιμες για τις εκάστοτε συγκεκριμένες ανάγκες μιας γεωφυσικής διασκόπησης πρέπει να διορθώνονται για μια σειρά από φυσικές επιδράσεις και παράγοντες που επηρεάζουν τις πρωτογενείς παρατηρήσεις. Με αυτόν τον τρόπο θα διασφαλίζεται η ορθή ερμηνεία των τιμών της βαρύτητας μια περιοχής ή συγκεκριμένων σημείων και θα μπορεί να συσχετισθούν οι παρατηρούμενες μεταβολές της βαρύτητας με τις υπεδάφειες παραλλαγές της πυκνότητας της Γης.

Επιπλέον, δεδομένου ότι οι μετρήσεις βαρύτητας διεξάγονται συνήθως στην επιφάνεια της Γης και προκειμένου οι μετρούμενες τιμές g να είναι άμεσα συγκρίσιμες με τις αντίστοιχες τιμές γ του κανονικού πεδίου βαρύτητας, ώστε να μπορεί να υπολογισθούν οι ζητούμενες ανωμαλίες βαρύτητας Δg , οι μετρήσεις πρέπει να “ανάγονται” εξ ορισμού από την τοπογραφική επιφάνεια στο γεωειδές.

Στη Γεωδαισία ο όρος διόρθωση υποδηλώνει την επεξεργασία των μετρήσεων προκειμένου να απαλειφθούν από τις μετρούμενες τιμές οι οποιεσδήποτε επιδράσεις που οφείλονται είτε σε ενδογενή σφάλματα των οργάνων (π.χ.βαρυτήμετρα) που χρησιμοποιούνται, είτε σε φυσικά φαινόμενα στο εσωτερικό και το εξωτερικό της Γης που επηρεάζουν διαχρονικά τις τιμές της βαρύτητας (π.χ.παλίρροιες).

Χρονικές παραλλαγές της βαρύτητας νοούνται εκείνες οι μεταβολές στην παρατηρηθείσα επιτάχυνση της βαρύτητας σε ένα συγκεκριμένο σημείο (ακόμα και αν δεν μετακινηθεί το χρησιμοποιούμενο βαρυτήμετρο) που μπορούν να διαφέρουν διαχρονικά για δύο κυρίως αιτίες:

- Στην διαφορετική συμπεριφορά του ίδιου του βαρυτήμετρου κατά τη διάρκεια του χρόνου εξ αιτίας ενδογενών παραγόντων ή τυχόν αλλαγές στις εκάστοτε συνθήκες του περιβάλλοντος των μετρήσεων.
- Σε παράγοντες που οφείλονται στις μεταβολές των ελκτικών δυνάμεων που ασκούνται στο όργανο από την επίδραση του Ήλιου και της Σελήνης.

3.5.3.1. Διορθώσεις για την ολίσθηση (drift) του οργάνου

Τα βαρυτήμετρα και άλλες μετρητικές διατάξεις που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της βαρύτητας κατασκευάζονται από υλικά υψηλών προδιαγραφών και βασίζονται σε εσωτερικές λειτουργίες που διασφαλίζουν την εκτέλεση μετρήσεων με μικρά ενδογενή σφάλματα και συνεπώς με υψηλές ακρίβειες της τάξης του $\pm 0.01 \text{ mgal}$ ή ακόμη και καλύτερες. Ωστόσο, τα όργανα αυτά είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα, γεγονός που κάνει επιτακτική την ανάγκη βαθμονόμησης τους έτσι ώστε να γίνονται οι κατάλληλες διορθώσεις στις πρωτογενείς μετρήσεις.

Μια από τις κυριότερες πηγές σφαλμάτων που επηρεάζουν άμεσα τις μετρήσεις οφείλεται στη λεγόμενη ολίσθηση (instrument drift) του οργάνου. Με τον όρο ολίσθηση εννοούμε την αργή και συνεχή αυτόματη μεταβολή της ένδειξης του βαρυτήμετρου, ενώ απότομες μεγάλου εύρους αλλά όχι συνεχείς μεταβολές των ενδείξεων χαρακτηρίζονται ως *άλματα* (jumps).

Τα αίτια για την ολίσθηση αποδίδονται στην κόπωση του υλικού του ελατηρίου σε μεταβολές της πίεσης, της θερμοκρασίας και του μαγνητικού πεδίου και σε μηχανικούς κραδασμούς. Το φαινόμενο της ολίσθησης παρατηρείται λοιπόν, τόσο σε ακίνητο όργανο (στατική ολίσθηση) όσο και σε συνθήκες πεδίου (δυναμική ολίσθηση). Η στατική ολίσθηση είναι της τάξης του $0.001 \dots 0.1 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$ ανά ημέρα ενώ σε συνθήκες πεδίου φθάνει τα $0.01 \dots 1 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$.

Για τον έλεγχο του φαινομένου και τη διόρθωση των μετρήσεων, οι μετρήσεις πεδίου πρέπει να περιέχουν ορισμένες επαναλήψεις και για το σκοπό αυτό στο πεδίο ακολουθούνται τυποποιημένα σχήματα μετρήσεων. Αν θεωρηθεί το φαινόμενο της ολίσθησης ως γραμμική συνάρτηση του χρόνου, η διόρθωση των μετρήσεων γίνεται κατανέμοντας τις ασυμφωνίες που παρατηρούνται στα σημεία των επαναλήψεων σε όλες τις ενδιάμεσες μετρήσεις ανάλογα με το χρόνο. Αυτό γίνεται αφού προηγηθεί η διόρθωση των μετρήσεων λόγω του φαινομένου των παλιρροιών.

3.5.3.2. Διορθώσεις για τις παλιρροιακές έλξεις

Οι ελκτικές δυνάμεις του Ήλιου και της Σελήνης όπως διαστρεβλώνουν τη μορφή της επιφάνειας των θαλασσών, διαστρεβλώνουν κατά παρόμοιο τρόπο και τη μορφή της επιφάνειας της Γης. Ωστόσο επειδή ο γήινος στερεός φλοιός ανταποκρίνεται στις εξωτερικές δυνάμεις πολύ λιγότερο εύκολα από ότι οι θαλάσσιες μάζες, το μέγεθος των παραμορφώσεων της γήινης επιφάνειας είναι

πολύ λιγότερο (της τάξης των μερικών εκατοστών) από το μέγεθος των θαλάσσιων παλιρροιών (που είναι της τάξης των μερικών μέτρων). Καθώς εξ αιτίας των παλιρροιακών έλξεων αλλάζει η μορφή της Γης, αλλάζει και η απόσταση του εκάστοτε σημείου των μετρήσεων βαρύτητας από το κέντρο μάζας της Γης και κατά συνέπεια η εν λόγω παραμόρφωση της γήινης επιφάνειας προκαλεί μετρήσιμες αλλαγές στην μετρούμενη επιτάχυνση της βαρύτητας, δεδομένου ότι η τιμή της είναι αντιστρόφως ανάλογη προς το τετράγωνο της απόστασης του εκάστοτε σημείου από το κέντρο της Γης. Η εν λόγω επίδραση ποικίλλει από θέση σε θέση, αλλά μπορεί να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να προκαλέσει παραλλαγές στην επιτάχυνση της βαρύτητας μεγέθους μέχρι και 0.2 ως 0.3 mgal. Στη πράξη, η διόρθωση των μετρήσεων βαρύτητας για τις παλιρροιακές έλξεις λαμβάνεται συνήθως από πίνακες συναρτήσεως του γεωγραφικού πλάτους του εκάστοτε σημείου των μετρήσεων και της ημέρας και ώρας της εκάστοτε μέτρησης.

3.5.4. Αναγωγές των μετρήσεων της βαρύτητας

Ο όρος αναγωγή στη Γεωδαισία υποδηλώνει την επεξεργασία των μετρήσεων προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι επιδράσεις που οφείλονται αποκλειστικά στη θεωρητική προσέγγιση και τη μεθοδολογία μοντελοποίησης που ακολουθείται στην μελέτη του γήινου πεδίου βαρύτητας (π.χ. το διαχωρισμό του πραγματικού και του κανονικού πεδίου βαρύτητας). Οι *χωρικές παραλλαγές της βαρύτητας* αφορούν κυρίως αλλαγές στην παρατηρηθείσα επιτάχυνση της βαρύτητας που εξαρτώνται από την εκάστοτε τοποθεσία των μετρήσεων, οι οποίες όμως δεν συσχετίζονται με τη γεωλογία της περιοχής. Τα κύρια αίτια είναι:

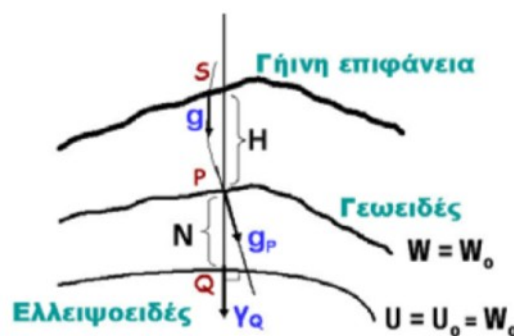
1. Οι παραλλαγές εξ αιτίας του γεωγραφικού πλάτους φ , οι οποίες προκαλούνται από την ελλειψοειδή μορφή του σχήματος της Γης και την περιστροφή της Γης.
2. Οι παραλλαγές εξ αιτίας του υψομέτρου των εκάστοτε σημείων των μετρήσεων.
3. Οι παραλλαγές εξ αιτίας της μάζας των υπεδαφίων πετρωμάτων κάτω από τα σημεία των μετρήσεων της βαρύτητας.
4. Οι παραλλαγές εξ αιτίας της τοπογραφίας (μορφολογίας) στην περιοχή γύρω από τα σημεία των μετρήσεων της βαρύτητας.

3.5.4.1. Αναγωγή λόγω γεωγραφικού πλάτους φ

Έχει αναφερθεί ότι η βαρύτητα μεταβάλλεται με το γεωγραφικό πλάτος λόγω του σχήματος της γης. Έτσι, εάν η γη ήταν τελείως ομοιόμορφη δομικά θα υπήρχε μια πεπερασμένη τιμή του Δg μεταξύ του σημείου μέτρησης και του σημείου αναφοράς, εάν τα δύο σημεία ήταν σε διαφορετικό πλάτος. Η επίδραση του πλάτους πρέπει να εξαλειφθεί από τη μετρηθείσα τιμή της διαφοράς βαρύτητας Δg , πριν δοθεί οποιαδήποτε ερμηνεία σχετικά με τις μεταβολές της πυκνότητας.

3.5.4.2. Αναγωγή λόγω υψομέτρου

Οι μετρήσεις βαρύτητας σε σημεία με διαφορετικά υψόμετρα διαφέρουν εξ αιτίας των μεταβολών (της κλίσης) του γήινου δυναμικού ως προς το ύψος του εκάστοτε σημείου από το γεωειδές που αποτελεί την ισοσταθμική επιφάνεια αναφοράς. Ως εκ τούτου είναι απαραίτητο στην επεξεργασία των μετρήσεων να ενσωματώνεται μια ακόμα διόρθωση, η λεγόμενη *αναγωγή υψομέτρου* ή *αναγωγή ελεύθερου αέρα*. Πρακτικά με την εφαρμογή αυτής της αναγωγής ουσιαστικά μετατρέπουμε από μαθηματική άποψη τις παρατηρηθείσες τιμές βαρύτητας σε εκείνες που θα κατέγραφε το βαρυτήμετρο αν όλα τα σημεία παρατήρησης ήταν στο ίδιο υψόμετρο (στη προκειμένη περίπτωση στο γεωειδές όπου $H=0$), απομονώνοντας περαιτέρω με τον τρόπο αυτό, τη ζητούμενη γεωλογική συνεισφορά του πεδίου βαρύτητας στην μέτρησή της βαρύτητας στο συγκεκριμένο σημείο στην επιφάνεια της Γης.



Εικόνα 19: Η γεωμετρία της αναγωγής του υψομέτρου.

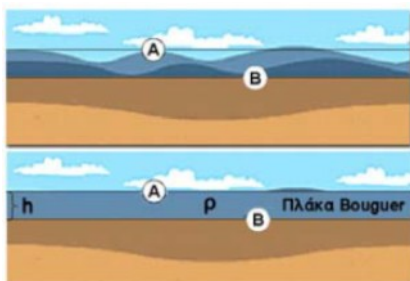
Η αναγωγή δg_F της τιμής της βαρύτητας λόγω υψομέτρου h , δίνεται από τη σχέση:

$$\delta g_F = 0.3086 \left(\frac{mGal}{m} \right) H \quad (3.12)$$

Πρακτικά η αναγωγή του ελεύθερου αέρα ισοδυναμεί με μια παράλληλη μετατόπιση ή συμπίεση των τοπογραφικών μαζών από το σημείο μέτρησης στο εσωτερικό του γεωειδούς, έτσι ώστε το σημείο της μέτρησης είναι σαν να βρίσκεται πλέον “στον αέρα”, που δικαιολογεί και την ονομασία της εν λόγω αναγωγής.

3.5.4.3. Αναγωγή λόγω της μάζας των υπεδαφίων πετρωμάτων (Αναγωγή Bouguer)

Οι ανωμαλίες ελεύθερου αέρα σε μια περιοχή, όπως προκύπτουν από την προηγούμενη διαδικασία, είναι σε υψηλό βαθμό συσχετισμένες με το υψόμετρο του εκάστοτε σημείου και κατά συνέπεια δεν είναι αντιπροσωπευτικές των παραλλαγών της βαρύτητας για μεγάλες περιοχές, δεδομένου ότι δεν λαμβάνονται υπόψη οι τοπογραφικές μάζες που παρεμβάλλονται μεταξύ του εκάστοτε σημείου των μετρήσεων και του γεωειδούς. Στην πραγματικότητα οι ενδείξεις ενός βαρυτήμετρου θα διαφέρουν σε ένα σταθμό A σε υψόμετρο h και σε ένα σταθμό B στην επιφάνεια της θάλασσας (δηλαδή στο γεωειδές), λόγω των διαφορετικών υψομέτρων των δύο σημείων, άλλα θα εμπεριέχουν επίσης μια διαφορά επειδή υπάρχει πρόσθετη τοπογραφική μάζα κάτω από το υψηλότερο σημείο A σε σχέση με εκείνη που υπάρχει στο χαμηλότερο σημείο B. Μια τέτοια ρεαλιστικότερη προσέγγιση που λαμβάνει υπόψη και τις παρεμβαλλόμενες τοπογραφικές μάζες γύρω και κάτω από κάθε σημείο μέτρησης της βαρύτητας αποτελεί η λεγόμενη αναγωγή Bouguer των μετρήσεων βαρύτητας, που καταλήγει στις αποκαλούμενες *ανωμαλίες βαρύτητας Bouguer*, από το όνομα του Γάλλου μαθηματικού και γεωδαίτη Pierre Bouguer που πρώτος ασχολήθηκε με την αντίστοιχη διόρθωση των μετρήσεων βαρύτητας με εκκρεμή που εκτέλεσε στα βουνά του Περού.



Εικόνα 20: Η πλάκα Bouguer

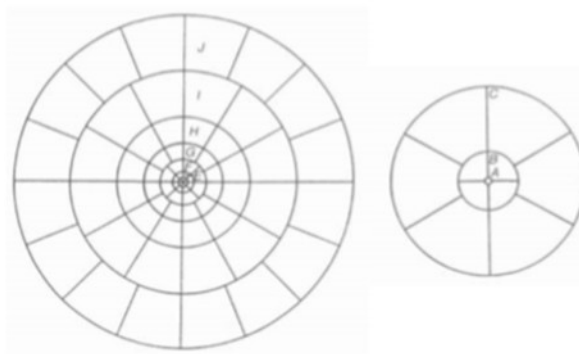
Σε πρώτη προσέγγιση, η επίδραση στην τιμή της βαρύτητας στο σημείο A μπορεί να θεωρηθεί ότι προκαλείται από την έλξη της εν λόγω αποκαλούμενης *πλάκας Bouguer*, η οποία εκλαμβάνεται συνήθως ως ένας κύλινδρος με οριζόντια ακτίνα που τείνει στο άπειρο και ύψος h του οποίου η έλξη μπορεί να δειχθεί ότι εκφράζεται από τη σχέση:

$$\delta g_B = 2\pi G\rho h \approx 0.1119 \left(\frac{mGal}{m} \right) H \quad (3.13)$$

όπου G είναι η σταθερά της παγκόσμιας έλξης, ρ και h είναι η θεωρούμενη πυκνότητα και το πάχος της πλάκας Bouguer που λαμβάνεται ίσο με το ορθομετρικό υψόμετρο H του σημείου A .

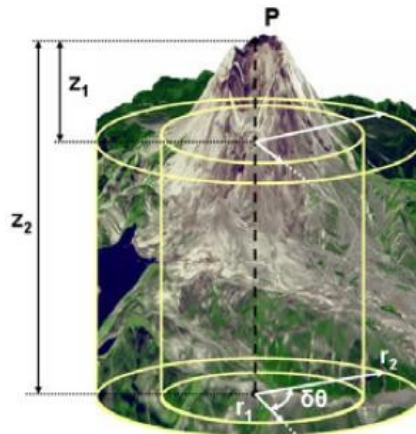
3.5.4.4. Αναγωγή λόγω τοπογραφικού αναγλύφου

Η μέτρηση βαρύτητας πρέπει να διορθωθεί από επιδράσεις λόφων και κοιλάδων που βρίσκονται στο σημείο μέτρησης. Ουσιαστικά δηλαδή πρέπει να ληφθεί υπόψη η επίδραση της τοπογραφίας ή η κατανομή των τοπογραφικών μαζών γύρω από το σημείο μέτρησης. Η επίδραση αυτή υπολογίζεται διαιρώντας την περιοχή γύρω από το σημείο μέτρησης σε «διαμερίσματα», όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 21: Κυκλικό διάγραμμα τοπογραφικής διόρθωσης, με τα εσωτερικά μέρη μεγεθυμένα για καλύτερη απεικόνιση.

Ο αναλυτικός υπολογισμός των *τοπογραφικών αναγωγών* (*terrain reduction*) είναι ιδιαίτερα δυσχερής και γι' αυτό στην πράξη γίνεται με τη βοήθεια ειδικών διαφανών διαγραμμάτων (*terrain templates*) (Εικόνα 21) και πινάκων συναρτήσεως της διαφοράς ΔH του υψομέτρου εκάστου σημείου μέτρησης και του μέσου υψομέτρου της περιβάλλουσας το σημείο περιοχής και υπολογίζοντας τον μέσο όγκο και τη μέση πυκνότητα κάθε διαμερίσματος στο οποίο διαιρείται η τοπογραφική επιφάνεια της περιοχής ενδιαφέροντος. Για παράδειγμα, με κέντρο το σημείο μιας μέτρησης η περιβάλλουσα περιοχή μπορεί, δια μέσου σειράς ομόκεντρων κύκλων και αντίστοιχες ακτίνες, να διαιρεθεί σε κυλινδρικούς δακτυλίους.



Εικόνα 22: Υπολογισμός τοπογραφικής αναγωγής με τη μέθοδο των ζωνών.

Η συνολική τοπογραφική αναγωγή Δg για κάθε σημείο ενδιαφέροντος υπολογίζεται αθροίζοντας τη συνεισφορά όλων των επιμέρους διαμερισμάτων (πρισματικών τομέων) στα οποία διαιρείται η περιοχή:

$$\delta g_T = \Sigma \Delta g_t^z \quad (3.14)$$

Στη πράξη, η εν λόγω διεργασία εφαρμόζεται σε αποστάσεις μέχρι μερικές δεκάδες ή εκατοντάδες χιλιόμετρα γύρω από κάθε σημείο μέτρησης, ανάλογα με την εφαρμογή ενδιαφέροντος, την γεωμορφολογία της περιοχής και τη ζητούμενη τελική ακρίβεια των ανωμαλιών βαρύτητας. Το μέγεθος της αναγωγής λόγω του ανάγλυφου συνήθως κυμαίνεται από 0.1-1 mgal σε πεδινές περιοχές, ενώ σε ορεινές περιοχές κυμαίνεται από 10-100 mgal.

3.6. Δορυφορικές τεχνικές για μετρήσεις βαρύτητας

Οι τεχνικές μέτρησης της βαρύτητας διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες: τις επίγειες και τις δορυφορικές.

Πριν από την ανάπτυξη των δορυφορικών τεχνικών οι μέθοδοι παρατήρησης του γήινου πεδίου βαρύτητας περιορίζονταν στις επίγειες μεθόδους βαρυτημετρίας που βασίζονται σε μια ευρεία ποικιλία μεθόδων μέτρησης της απόλυτης ή της σχετικής τιμής της βαρύτητας. Εξ αιτίας των λογιστικών δυσκολιών τους, επαρκής κάλυψη της γήινης επιφάνειας με επίγειες μετρήσεις βαρύτητας υπήρχε κυρίως μόνο στις ανεπτυγμένες και εύκολα προσβάσιμες περιοχές.

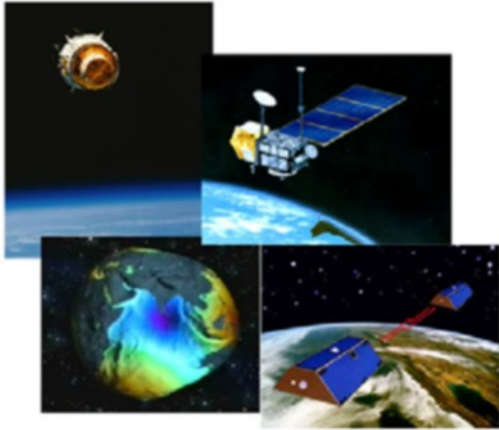


Εικόνα 23: Επίγειες μέθοδοι βαρυτημετρίας στη ξηρά, στη θάλασσα ή στον αέρα.

Η κάλυψη με μετρήσεις βαρύτητας στις θαλάσσιες περιοχές ήταν (και παραμένει) ανεπαρκής και οικονομικά ασύμφορη, πέρα από το γεγονός ότι οι μετρήσεις βαρύτητας στη θάλασσα δεν παρείχαν αξιόπιστη ακρίβεια στα αποτελέσματα. Κάτω από αυτές τις περιστάσεις η λεπτομερής περιγραφή και υπολογισμός καταλλήλων μοντέλων βαρύτητας ήταν σοβαρά περιορισμένη.

Διασκοπήσεις από αέρος χρησιμοποιούν σε αεροπλάνα ή ελικόπτερα ειδικές μετρητικές διατάξεις και όργανα τα οποία συνήθως απαιτείται να διατηρούν τον προσανατολισμό τους στην οριζόντια διεύθυνση κατά τη διάρκεια της πτήσης, καθώς επίσης και οι μετρήσεις να αποθηκεύονται αυτόματα μαζί με το ακριβές στίγμα της θέσης του αισθητήρα κατά τη χρονική στιγμή της εκάστοτε μέτρησης.

Σήμερα αυτό είναι περισσότερο εφικτό με τη χρήση αερομεταφερόμενων συστημάτων GPS κατάλληλα διασυνδεδεμένων με τις εκάστοτε μετρητικές διατάξεις και όργανα μέτρησης της βαρύτητας και των παραλλαγών της. Οι από αέρος διασκοπήσεις προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις καθαρά επίγειες ή στη θάλασσα μετρήσεις, όπως ταχύτητα εκτέλεσης των μετρήσεων και δυνατότητα χρήσης τους σε απρόσιτες περιοχές, αλλά και σημαντικά μειονεκτήματα, όπως είναι οι επιδράσεις ανεπιθύμητων παρόμοιων σημάτων με εκείνα των μετρήσεων (π.χ. της επιτάχυνσης του αεροπλάνου) που πρέπει να ανιχνεύονται και να εξαλείφονται, η εξομάλυνση του πεδίου βαρύτητας εξ αιτίας του ύψους της πτήσης και το μεγάλο κόστος στη περίπτωση που οι διασκοπήσεις αφορούν περιοχές μικρής έκτασης.



Εικόνα 24: Δορυφορικές μέθοδοι βαρυτημετρίας

Οι δορυφορικές τεχνικές πρόσφεραν και προσφέρουν νέες δυνατότητες κυρίως από την προσθήκη νέων τύπων διαφορετικών μετρητικών διατάξεων και δεδομένων μέτρησης του πεδίου βαρύτητας. Οι κυριότερες δορυφορικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται ευρέως σήμερα για αυτό τον σκοπό συμπεριλαμβάνουν τη Δορυφορική Αλτιμετρία (Satellite Altimetry), την παρακολούθηση από δορυφόρο σε δορυφόρο των παραλλαγών του πεδίου βαρύτητας (Satellite to Satellite

Tracking, SST) και τη δορυφορική βαθμιδομετρία (Satellite Gradiometry).

Τα κύρια πλεονεκτήματα των δορυφορικών μεθόδων έναντι των επίγειων μεθόδων μέτρησης της βαρύτητας είναι προφανή: η δυνατότητα παγκόσμιας κάλυψης, ομοιογενής ποιότητα των μετρήσεων, υψηλή ακρίβεια και υψηλή αποδοτικότητα (σε κόστος και χρόνο διεξαγωγής των μετρήσεων). Κατά συνέπεια, οι δορυφορικές μέθοδοι βαρυτημετρίας αναμένεται να παίξουν ένα συνεχώς αυξανόμενο ρόλο στον λεπτομερή προσδιορισμό του γήινου πεδίου βαρύτητας.

4^ο Κεφάλαιο: Γήινες Παλίρροιες

Η βαρυτική έλξη του ήλιου και της σελήνης προκαλεί τις παλίρροιες, τόσο στον ωκεανό και στο στερεό φλοιό. Οι παλίρροιες στον ωκεανό είναι φυσικά, γνωστές σε όποιον έχει επισκεφθεί την ακτή της θάλασσας. Οι γήινες παλίρροιες δεν είναι τόσο γνωστές στους περισσότερους ανθρώπους. Αυτό δεν συμβαίνει επειδή οι παλίρροιες της γης είναι μικρές. Στην πραγματικότητα, από κορυφή σε κορυφή οι κατακόρυφες παλιρροϊκές μετατοπίσεις είναι συνήθως πολλές δεκάδες εκατοστά. Γι'αυτό, και η δυσκολία είναι στην προσπάθεια παρατήρησης των στερεών παλίρροιας της γης. Ως αποτέλεσμα, η κίνηση δεν είναι άμεσα εμφανής και δεν μπορεί να ανιχνευθεί χωρίς ευαίσθητα όργανα. Σε αυτό το κεφάλαιο, γίνεται αναφορά γενικά στις γήινες παλίρροιες, στις στατικές παλίρροιες, παλιρροϊκή δύναμη και στο δυναμικό παλίρροιας, στους αριθμούς Love καθώς επίσης και στις γήινες παλιρροϊκές παραμορφώσεις.

4.1. Γενική εισαγωγή

Με τον όρο γήινες παλίρροιες εννοείται η παραμορφωτική επίδραση και οι επιπτώσεις της στο σχήμα της γης και στο βαρυτημετρικό της πεδίο, που οφείλεται στη διαχρονικά μεταβαλλόμενη έλξη της γης από τον ήλιο και τη σελήνη, καθώς και από τους υπόλοιπους πλανήτες σε αντιδιαστολή με τις θαλάσσιες παλίρροιες που το ενδιαφέρον επικεντρώνεται μόνο στις μεταβολές της στάθμης της θάλασσας.

Καθώς το πεδίο βαρύτητας της γης μεταβάλλεται, μεταβάλλονται και οι ισοδυναμικές του επιφάνειες, ενώ παράλληλα παραμορφώνεται και η γη κατά την κατακόρυφη και την οριζόντια έννοια. Στην πραγματικότητα, η γη δεν είναι ανελαστικό σώμα, αλλά παρουσιάζει κάποια ελαστικότητα με αποτέλεσμα να υπόκειται σε παραμόρφωση κάτω από την επίδραση των δυνάμεων της παλίρροιας. Τα επιμέρους παλιρροϊκά φαινόμενα που μπορούν να παρατηρηθούν είναι η μεταβολή στην ένταση της βαρύτητας, η ακτινική μετατόπιση του γεωειδούς σαν μεταβολή της στάθμης της θάλασσας και οι περιοδικές αποκλίσεις της κατακορύφου σαν αποτέλεσμα της επίδραση των οριζόντιων παλιρροϊκών δυνάμεων.

Η παρατήρηση των παλιρροιαίων συνίσταται στην καταγραφή της μεταβολής της έντασης της βαρύτητας με άμεσο στόχο τον προσδιορισμό του βαρυτημετρικού συντελεστή, στην καταγραφή των περιοδικών αποκλίσεων της κατακορύφου με κατάλληλα εκρεμμή (κλισίμετρα) στις δύο βασικές

διευθύνσεις, με στόχο τον προσδιορισμό του συντελεστή γ και στην καταγραφή της γραμμικής επιμήκυνσης με αντίστοιχα επιμηκυνσιόμετρα. Ο συνδυασμός αυτών των παρατηρήσεων αρκεί για τον εμπειρικό προσδιορισμό των τριών αριθμών του Love.

Οι αριθμοί του Love έχουν κατά καιρούς προσδιοριστεί θεωρητικά με βάση τη θεωρία της ελαστικότητας και τη χρήση διαφόρων μοντέλων γης. Παλαιότερα ο προσδιορισμός των παλιρροϊκών συντελεστών είχε σαν στόχο τη σύγκριση με τους αντίστοιχους θεωρητικούς και την επιβεβαίωση των λύσεων που προέκυπταν από τα διάφορα θεωρητικά μοντέλα.

Εκτός από την επίδραση των θαλάσσιων παλιρροιών, και διάφοροι τοπικοί γεωλογικοί παράγοντες επηρεάζουν και διαφοροποιούν τους παλιρροϊκούς συντελεστές. Βέβαια την ισχυρότερη επίδραση από τέτοιους παράγοντες την δέχονται οι καταγραφές που αφορούν τις οριζόντιες συνιστώσες και την γραμμική επιμήκυνση. Αντίθετα, η επίδραση των θαλάσσιων παλιρροιών είναι μεγαλύτερη στην κατακόρυφη συνιστώσα στην οποία κυριαρχεί η επίδραση των χαμηλού βαθμού αρμονικών του αναπτύγματος του δυναμικού της θαλάσσιας παλίρροιας. Στις οριζόντιες συνιστώσες κυριαρχεί η επίδραση των υψηλού βαθμού αρμονικών της θαλάσσιας παλίρροιας.

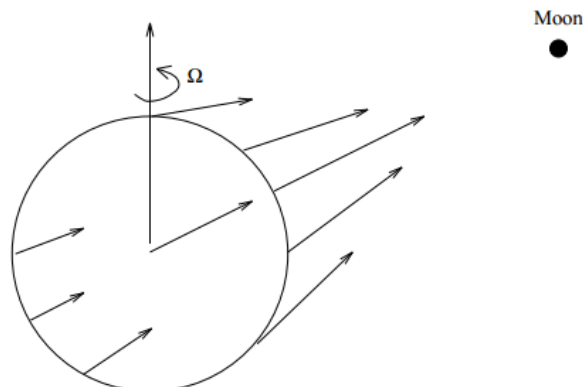
4.2. Στατικές παλίρροιες

Με τον όρο στατικές παλίρροιες εννοείται η έκφραση του φαινομένου της παλίρροιας πάνω στη γη, στην περίπτωση που η γη θεωρηθεί σαν ανελαστικό σώμα, δηλαδή δεν υπόκειται σε παραμορφώσεις. Βέβαια αυτή η αντιμετώπιση είναι εντελώς υποθετική αλλά και ταυτόχρονα αυστηρά μαθηματική, δεδομένου ότι το φαινόμενο της παλίρροιας οφείλει την ύπαρξη του σε συγκεκριμένους νόμους της φυσικής και της ουράνιας μηχανικής, δηλαδή στην έλξη και τη σχετική κίνηση μεταξύ της γης, του ήλιου και της σελήνης.

4.3. Παλιρροϊκή δύναμη

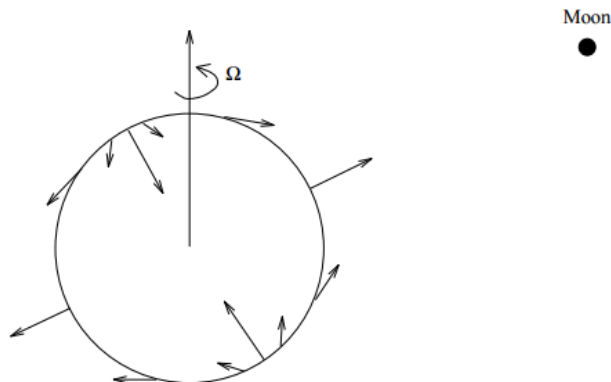
Η βαρυτική δύναμη από τον ήλιο και το φεγγάρι προκαλεί την τροχιακή κίνηση της γης. Αυτό είναι μακράν το μεγαλύτερο αποτέλεσμα αυτής της δύναμης στη γη. Αλλά αυτή η βαρυτική δύναμη δρα έτσι ώστε να παραμορφώσει τη γη και τους ωκεανούς, και αυτές οι παραμορφώσεις είναι οι παλίρροιες. Στην πραγματικότητα, είναι συνήθης ο διαχωρισμός της ηλιακής βαρυτικής δύναμης σε ένα μέρος που είναι σταθερό πάνω από τη γη και το

οποίο προκαλεί την τροχιακή κίνηση, και ένα μικρό υπόλοιπο το οποίο προκαλεί τις παλίρροιες. Αυτό το υπόλοιπο είναι η παλιρροϊκή δύναμη.



Εικόνα 25: Η συνολική δύναμη της Σελήνης αντιπροσωπεύεται από τα βέλη.

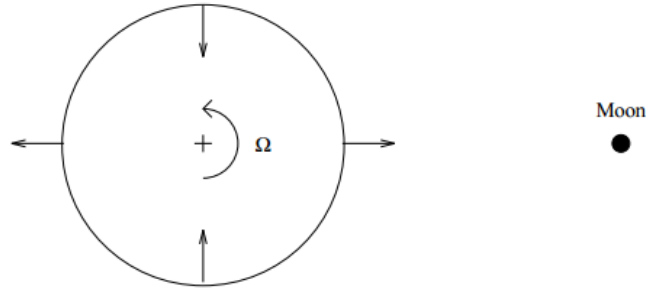
Η τροχιακή δύναμη στη γη είναι ο μέσος όρος όλων των βελών. Σε ένα μεγάλο βαθμό προσέγγισης, η μέση δύναμη ισούται με την δύναμη που ενεργεί στο κέντρο της γης. Αν αφαιρέσουμε το βέλος στο κέντρο της γης από όλα τα άλλα βέλη, μένουμε με την παλιρροϊκή δύναμη, η οποία είναι η δύναμη που τείνει να παραμορφώσει τη γη όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 26: Η παραμόρφωση της Γης.

Η παλιρροϊκή δύναμη, εξ ορισμού της, δεν προκαλεί καμία καθαρή δύναμη πάνω στη γη και έτσι δεν επηρεάζει τη τροχιακή κίνηση της Γης.

Από την παραπάνω εικόνα, φαίνεται ότι η δύναμη είναι ακτινικά προς τα έξω στις πλευρές και μακριά από το φεγγάρι, και είναι ακτινικά προς τα μέσα στις άλλες πλευρές. Κοιτάζοντας από πάνω προς τα κάτω το Βόρειο Πόλο παίρνουμε το πρότυπο δύναμης όπως φαίνεται και στην εικόνα (27).



Εικόνα 27: Το πρότυπο της δύναμης.

Αυτό το πρότυπο παραμένει σταθερό σε σχέση με το φεγγάρι και η γη περιστρέφεται σε σχέση με αυτό. Αυτό προκαλεί την παλιρροϊκή δύναμη σε ένα σταθερό σημείο πάνω στη γη για να είναι μεταβλητή με το χρόνο.

4.4. Δυναμικό παλίρροιας

Η παλιρροϊκή δύναμη προκαλεί μετατοπίσεις στη γη και στον ωκεανό. Αυτές είναι οι παλίρροιες της γης και των ωκεανών. Η παραμόρφωση αυτή συμβαίνει στις ίδιες συχνότητες όπως και η παλιρροϊκή δύναμη. Το παλιρροϊκό δυναμικό προκύπτει ως η διαφορά των δυναμικών της ελκτικής και της φυγόκεντρης δύναμης. Το δυναμικό της φυγόκεντρης δύναμης δίνεται από τη σχέση:

$$dV_{\varphi} = \frac{G}{r^2_M} r \cos\psi dM_M \quad (4.1)$$

ή μετά από ολοκλήρωση:

$$V_{\varphi} = \frac{GM_M}{r^2_M r \cos\psi} + c_{\varphi} \quad (4.2)$$

Όπου M_M η μάζα της σελήνης και c_{φ} σταθερά.

Το συνολικό δυναμικό βαρύτητας σε ένα σημείο x στη γη, εξαιτίας της σελήνης είναι:

$$V(\vec{x}) = \frac{GM}{|\vec{x} - \vec{R}|} \quad (4.3)$$

Κάτω από την επίδραση του παλιρροϊκού δυναμικού V_{φ} προκαλείται μια ακτινική παραμόρφωση Δr_i του ελκόμενου σημείου P , η οποία είναι δυνατό να θεωρηθεί κλάσμα της παραμόρφωσης Δr_i των χωροσταθμικών επιφανειών και ισχύει η σχέση:

$$\Delta r_{el} = h\Delta r_t = h \frac{V_t}{g} \quad (4.4)$$

Ως συνέπεια της νέας κατανομής της μάζας οι χωροσταθμικές επιφάνειες $W + V_t =$ σταθερό παραμορφώνονται εκ νέου και έστω V_d το δυναμικό το οποίο προκαλεί τη νέα παραμόρφωση. Το δυναμικό παραμόρφωσης V_d είναι δυνατό να θεωρηθεί ανάλογο του παλιρροϊκού δυναμικού V_t , δηλαδή:

$$V_d = kV_t \quad (4.5)$$

Το παλιρροϊκό δυναμικό της ελαστικής γης προκύπτει από τα δυναμικά V_t και V_d και τη μεταβολή του δυναμικού gVr_{el} που προκαλείται από την ακτινική παραμόρφωση Vr_{el} :

$$V_{el} = V_t + V_d - gVr_{el} = V_t(l + k - h) \quad (4.6)$$

όπου οι παράμετροι (αριθμοί) $k = k(r)$, $h = h(r)$ του Love εμφανίζονται ως συντελεστές αναλογίας και εξαρτώνται από το βαθμό του αναπτύγματος σφαιρικών αρμονικών συναρτήσεων του παλιρροϊκού δυναμικού.

4.5. Έκφραση του παλιρροϊκού δυναμικού σε σφαιρικές αρμονικές

Οι αριθμοί Love h , k , και l είναι αδιάστατες παράμετροι που μετρούν την ακαμψία ενός πλανητικού σώματος και την ευαισθησία του σχήματος του να αλλάξει υπό την επίδραση ενός παλιρροϊκού δυναμικού.

Το 1911 ο Augustus Edward Hough Love εισήγαγε τις τιμές h και k που χαρακτηρίζουν τη συνολική ελαστική απόκριση της Γης με τις παλίρροιες καθώς επίσης συνδέονται με την κατανομή των ελαστικών ιδιοτήτων και της πυκνότητας στο εσωτερικό της γης. Αργότερα, το 1912, ο Ιάπωνας T. Shida πρόσθεσε έναν τρίτο αριθμό Love το l , ο οποίος ήταν απαραίτητος για να αποκτήσουν μια συνολική περιγραφή της απόκρισης της στερεάς Γης σε σχέση με τις παλίρροιες.

Ο αριθμός Love h ορίζεται ως ο λόγος της παλίρροιας σώματος προς το ύψος της στατικής παλίρροιας ισορροπίας, που ορίζεται επίσης ως η κατακόρυφη (ακτινική) μετατόπιση ή παραλλαγή των ελαστικών ιδιοτήτων του πλανήτη. Όσον αφορά την παλίρροια παράγει δυναμικό $V(\varphi, \lambda)/g$, η μετατόπιση είναι $hV(\varphi, \lambda)/g$, όπου φ είναι το γεωγραφικό πλάτος, λ είναι ανατολικό γεωγραφικό μήκος και g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Για μια υποθετική στερεά Γη ο αριθμός $h = 0$. Για μια υγρή Γη, θα ήταν $h = 1$. Ωστόσο, η παραμόρφωση της σφαίρας προκαλεί το δυναμικό πεδίο για να

αλλάξει, και ως εκ τούτου να παραμορφωθεί η σφαίρα ακόμη περισσότερο. Το θεωρητικό μέγιστο εκτιμάται για $h = 2,5$. Για την πραγματική Γη, το h βρίσκεται μεταξύ αυτών των τιμών.

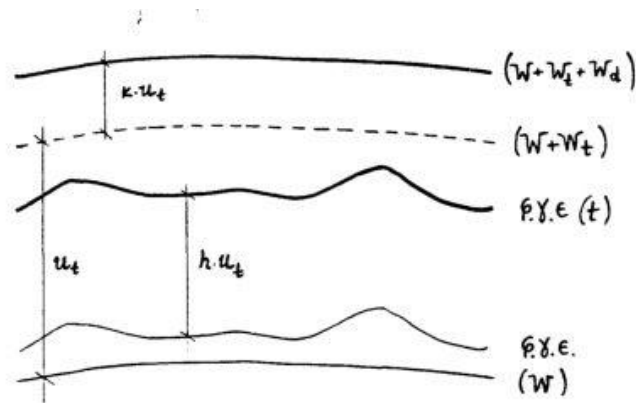
Ο αριθμός Love k ορίζεται ως η κυβική διαστολή ή η αναλογία του πρόσθετου δυναμικού (αυτο-αντιδραστική δύναμη) που παράγεται από την παραμόρφωση του δυναμικού παραμόρφωσης. Μπορεί να παρασταθεί ως $k = V(\varphi, \lambda)/g$. Για ένα άκαμπτο σώμα το k είναι ίσο με το 0.

Ο αριθμός Love l αντιπροσωπεύει την αναλογία της οριζόντιας (εγκάρσιας) μετατόπισης του ως στοιχείο της μάζας του φλοιού του πλανήτη με εκείνη του αντίστοιχου στατικού θαλάσσιας παλίρροιας. Στο δυναμικό συμβολισμό η εγκάρσια μετατόπιση είναι $l \operatorname{del}(V(\varphi, \lambda))/g$, όπου del είναι ο οριζόντιος φορέας κλίσης. Όπως οι αριθμοί h και k , έτσι και ο αριθμός l είναι 0 για ένα άκαμπτο σώμα.

Τα μεγέθη των αριθμών Love εξαρτώνται από την ακαμψία και την κατανομή της μάζας ενός σφαιροειδούς σώματος. Οι Αριθμοί Love h_n , k_n , και l_n μπορούν επίσης να υπολογιστούν για υψηλότερες τάξεις των σφαιρικών αρμονικών. Για τις γήινες παλίρροιες μπορεί να υπολογιστούν οι ταλαντώσεις της κατακορύφου είναι ανηγμένες με τον συντελεστή γ όπου: $\gamma = l + k - h$ και ο βαρυτημετρικός συντελεστής: $f = l + h - (3/2)k$.

Ο συγκεκριμένος βαρυτημετρικός συντελεστής (f) παριστάνει τη μεγέθυνση των μεταβολών της βαρύτητας λόγω των ελαστικών παραμορφώσεων της γης. Ο βαρυτημετρικός συντελεστής προκύπτει για τα κύρια παλιρροϊκά κύματα συγκρίνοντας τη μετρούμενη με το βαρυτήμετρο παλιρροϊκή μεταβολή της βαρύτητας με την αντίστοιχη κανονική μεταβολή της βαρύτητας.

Είναι φανερό ότι με παρατηρήσεις και στις τρεις συνιστώσες (προσδιορισμός των f , γ) μπορούν να προσδιοριστούν οι δύο αριθμοί του Love h , k . Ο αριθμός l μπορεί να προσδιοριστεί απ'ευθείας από μετρήσεις επιμήκυνσης (με επιμηκυσιόμετρα). Οι αριθμοί του Love διαφοροποιούνται ανάλογα με το βαθμό του δυναμικού και συνήθως χαρακτηρίζονται από τον αντίστοιχο δείκτη. Συνηθίζεται οι αριθμοί για το δυναμικό δευτέρου βαθμού, να αναφέρονται χωρίς δείκτη.



Εικόνα 28: Σχηματική επεξήγηση των W , W_t , W_d , $\phi.\gamma.\epsilon (t)$, $\phi.\gamma.\epsilon.$

4.6. Παρατήρηση παλιρροιών

Η σύγχρονη παρατήρηση των παλιρροιών διαχωρίζεται σε τρεις κατηγορίες παρατήρησης. Η πρώτη κατηγορία είναι η παρατήρηση της μεταβολής της έντασης της βαρύτητας που γίνεται με τα κλασικά στατικά βαρυτήμετρα ή τα βαρυτήμετρα υπεραγωγιμότητας. Το αποτέλεσμα στην περίπτωση αυτή είναι ο προσδιορισμός του βαρυτημετρικού συντελεστή (f).

Η δεύτερη κατηγορία είναι η παρατήρηση της απόκλισης της κατακόρυφου με αναφορά τον φλοιό της γης. Πιο συγκεκριμένα, η παρατήρηση αυτή συνίσταται στην καταγραφή της μεταβολής της κλίσης του φλοιού της γης και γίνεται στις δύο κύριες διευθύνσεις βορρά – νότου και ανατολής- δύσης. Τα πιο συνηθισμένα όργανα που χρησιμοποιούνται για τη καταγραφή της κλίσης είναι τα οριζόντια εκκρεμή. Ο στόχος στη περίπτωση αυτή είναι ο προσδιορισμός του συντελεστή γ .

Η τρίτη κατηγορία παρατήρησης των παλιρροιών είναι η παρατήρηση της γραμμικής επιμήκυνσης. Τα διάφορων τύπων επιμηκυνσιόμετρα ή μετρήτες τάσεων που χρησιμοποιούνται, καταγράφουν τις τάσεις που αναπτύσσονται από τις παραμορφώσεις του φλοιού της γης. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν από ένα έως έξι επιμηκυνσιόμετρα, και να προσδιοριστούν απ'ευθείας αντίστοιχοι συνδυασμοί των αριθμών του Love.

4.6.1. Παλιρροϊκοί σταθμοί

Η επιλογή της θέσης ενός σταθμού μέτρησης της παλίρροιας είναι πάρα πολύ σημαντική, ώστε τα αποτελέσματα των μετρήσεων να είναι ρεαλιστικά και με τις δυνατόν λιγότερες άλλες επιδράσεις. Οι μετρήσεις της απόκλισης κατακορύφου και των τάσεων είναι περισσότερο ευαίσθητες σε τοπογραφικές, γεωλογικές και θερμοκρασιακές επιδράσεις. Συνήθως ένας τέτοιος σταθμός, δημιουργείται σε στοές σε αρκετό βάθος και συνήθως σε ομαλό τοπογραφικό ανάγλυφο. Αντίθετα, για τις καταγραφές της βαρύτητας απαιτείται ένα σταθερό βάθος απομονωμένο από την οποιαδήποτε κτιριακή κατασκευή, ώστε να υπάρχει σταθερή έδραση του οργάνου και μικρές θερμοκρασιακές μεταβολές κατά τη διάρκεια της ημέρας, στον χώρο όπου θα βρίσκεται το βαρυτήμετρο. Σημαντικό επίσης κριτήριο για την επιλογή της θέσης ενός παλιρροϊκού σταθμού είναι να μην είναι σημαντική η δευτερογενής επίδραση των θαλάσσιων παλιρροιών.

4.6.2. Καταγραφή της βαρύτητας

Για την καταγραφή των μεταβολών βαρύτητας χρησιμοποιούνται τα κλασσικά στατικά (π.χ Askania) ή αστατικά (π.χ LaCoste & Romberg) βαρυτήμετρα, στα οποία όμως έχει προσαρμοστεί μια ηλεκτρονική διάταξη με ένα πυκνωτή και παράγεται έτσι ένα αναλογικό σήμα, το οποίο παλαιότερα καταγράφονταν από αναλογικά καταγραφικά χαρτιού. Σήμερα με την εξέλιξη της τεχνολογίας, το αναλογικό αυτό σήμα μπορεί να μετατραπεί εύκολα σε ψηφιακό, να καταγραφεί και όλη η διαχείριση της πληροφορίας να γίνει εύκολα μέσω των ηλεκτρονικών υπολογιστών.

Για την επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο της νέας τεχνολογίας βαρυτήμετρα, τα βαρυτήμετρα υπεραγωγιμότητας. Τα βαρυτήμετρα αυτά έχουν πολύ μεγαλύτερη σταθερότητα και σχεδόν μηδενική υστέρηση, ενώ παρέχουν ακρίβειες καλύτερες από 0,1 μgal . Από την άλλη μεριά, υπάρχει η τάση να βελτιωθούν οι παρεχόμενες ακρίβειες των κλασσικών οργάνων.

4.7. Μέθοδοι ανάλυσης παλιρροιών

4.7.1. Η μέθοδος του Venedikov

Το πρώτο βήμα της μεθόδου αυτής συνίσταται στην απομόνωση του drift του οργάνου και στον ταυτόχρονο διαχωρισμό των ημερήσιων, ημι-ημερήσιων και των τριτο-ημερήσιων παλιρροιών. Εφαρμόζονται δύο φίλτρα, ένα άρτιο και ένα περιττό, σε κάθε 48 ωριαίες παρατηρήσεις και για κάθε κατηγορία παλιρροιών. Με αυτή τη διαδικασία απομονώνεται το drift και η σταθερά και παραμένει στα νέα δεδομένα, μόνο εκείνη η πληροφορία, που αφορά τις συνιστώσες της συγκεκριμένης κατηγορίας παλιρροιών.

4.7.2. Η μέθοδος των Usandivaras-Ducarme

Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στην λογική του υπολογισμού, και όχι της απομόνωσης του οργανικού drift. Η ωριαία παρατήρηση εκφράζεται με τη σχέση:

$$l_{i,t} = \sum_j H_j \cos[\omega_j t + \Phi_j(T_i)] + C + \sum_{k=i}^n B_k P_k^i \quad (4.7)$$

όπου H_j το παρατηρηθέν εύρος της συνιστώσας j με συχνότητα ω_j και Φ_j η παρατηρηθείσα φάση της ίδιας συνιστώσας την χρονική στιγμή T_o . Έτσι λοιπόν, υπάρχει δυνατότητα ταυτόχρονου υπολογισμού των συντελεστών εύρων και των καθυστερήσεων φάσεων για όλες τις ομάδες κυμάτων, συμπεριλαμβανομένων και των συνιστωσών μεγάλης περιόδου. Για να ξεπεραστεί το πρόβλημα των διαφορετικών αναφορών στις διαφορές τμηματικές καταγραφές, που σημαίνει και αντίστοιχο αριθμό σταθερών όρων, θεωρείται σαν μοναδιαία παρατήρηση η διαφορά δύο ωριαίων παρατηρήσεων, οπότε και απαλείφονται οι σταθεροί όροι.

4.7.3. Η μέθοδος του Chojnicki

Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται στην εργασία και στηρίζεται σε μια επαναληπτική διαδικασία, με στόχο τον όσο το δυνατό καλύτερο προσδιορισμό του οργανικού drift και όλων των άλλων επιδράσεων μεγάλης περιόδου. Σε πρώτη φάση γίνεται μια πρώτη ανάλυση ώστε να προσδιοριστούν προσεγγιστικά οι συντελεστές ευρών και οι υστερήσεις φάσεων για όλες τις

ομάδες των κυμάτων. Αυτές οι προσεγγιστικές τιμές των παλιρροϊκών σταθερών χρησιμοποιούνται για την ανακατασκευή μιας θεωρητικής παλιρροϊκής καμπύλης, και η οποία αφαιρείται από τα πρωτογενή δεδομένα, με στόχο να προσδιοριστούν υπολειπόμενες τιμές, οι οποίες κατά βάση εμπεριέχουν το drift και άλλες επιδράσεις μεγάλης περιόδου. Η εφαρμογή του φίλτρου του Pertsev στις υπολειπόμενες τιμές, επιτρέπει τον ακριβέστερο προσδιορισμό του drift και των άλλων επιδράσεων. Οι τιμές αυτές αφαιρούνται από τα πρωτογενή δεδομένα και τα νέα αυτά διορθωμένα δεδομένα αναλύονται ξανά για να επιτευχθούν οι τελικοί συντελεστές ευρών και οι υστερήσεις φάσεων. (*Παρασκευάς Μηλάς, 1993*)

4.7.4. Άλλες μέθοδοι

Εκτός από τις προαναφερθείσες μεθόδους ή παραλλαγές τους που όλες βασικά στηρίζονται στην ελαχιστοτετραγωνική αρμονική ανάλυση, και σε διάφορες μεθόδους φιλτραρίσματος, έχουν αναπτυχθεί και εφαρμοστεί μέθοδοι που στηρίζονται κατά βάση στη μέθοδο της φασματικής ανάλυσης. Συνήθως κατά την εφαρμογή των μεθόδων αυτών γίνεται φασματική ανάλυση τόσο στην καταγραμμένη χρονοσειρά, όσο και στην αντίστοιχη θεωρητική και με διάφορες τεχνικές προκύπτουν οι ζητούμενοι παλιρροϊκοί συντελεστές.

Βέβαια η φασματική ανάλυση συνήθως εφαρμόζεται στις περιπτώσεις εκείνες που το ζητούμενο είναι και η ανίχνευση των συχνοτήτων, κάτι που δεν συμβαίνει στην περίπτωση των γήινων παλιρροϊών, για τις οποίες οι συχνότητες είναι γνωστές. Αυτός είναι ένας βασικός λόγος, μεταξύ άλλων, που αποτρέπει την εφαρμογή τέτοιων μεθόδων για την ανάλυση των γήινων παλιρροϊών.

5^ο Κεφάλαιο: Καταγραφή και Ανάλυση Δεδομένων

Για την πραγματοποίηση της εργασίας αυτής, χρησιμοποιήθηκε το γεωδαιτικό αυτογραφικό βαρυτήμετρο CG-5. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται περιγραφή του οργάνου που χρησιμοποιήθηκε, αναλύεται η διαδικασία μετρήσεων και μεταφοράς δεδομένων σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, καθώς επίσης περιγράφονται τα προγράμματα επεξεργασίας των δεδομένων. Τέλος, με βάση τα προγράμματα αυτά γίνεται επεξεργασία των μετρήσεων και αναλύονται τα αποτελέσματα.

5.1. Βαρυτημέτρο CG-5

Το βαρυτημέτρο αυτό όπως αναφέρθηκε και παραπάνω χρησιμοποιήθηκε στην συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία με σκοπό την συλλογή των παλιρροιακών δεδομένων βαρύτητας. Το όργανο αυτό είναι πολύ ευαίσθητο γι'αυτό και η συσκευασία τοποθέτησης και μεταφοράς του, είναι κατάλληλα διαμορφωμένη έτσι ώστε να είναι απόλυτα σταθερό και να μην υπάρχει κανένας κίνδυνος ατυχήματος.



Εικόνα 29: Βαλίτσα μεταφοράς του Βαρυτημέτρου.

Τα υλικά εξαρτήματα του CG-5 περιλαμβάνουν μια οθόνη, ένα πληκτρολόγιο, ένα καλώδιο κατεβάσματος δεδομένων, μια μνήμη Flash, ένα ρολόι πραγματικού χρόνου, ένα τροφοδοτικό μπαταρίας καθώς και ένα δέκτη GPS. Πιο αναλυτικά το καθένα περιγράφεται παρακάτω:

- Οθόνη

Η οθόνη γραφικών είναι μια οθόνη VGA που λειτουργεί στους -20°C έως και τους $+45^{\circ}\text{C}$. Όταν θερμαίνεται, η οθόνη λειτουργεί από -35°C έως $+45^{\circ}\text{C}$. Η εισαγωγή των δεδομένων γίνεται μέσω ενός αλφαριθμητικού πληκτρολογίου.



Εικόνα 30: Η Οθόνη και Πληκτρολόγιο του CG-5.

- Καλώδια σύνδεσης και μεταφοράς δεδομένων



Το σύστημα αυτό είναι εξοπλισμένο με 2 θύρες COM (RS-232) για τη μεταφορά δεδομένων. Έχει επίσης και μια θύρα USB όπως φαίνεται και στην εικόνα που λειτουργεί στα 12 Mbits / sec.

- Μνήμη

Η μνήμη αποθήκευσης δεδομένων βασίζεται στην τεχνολογία Flash με ένα πρότυπο διαμόρφωσης των 12 Mbytes που αποθηκεύει περίπου 200.000 αναγνώσεις. Αυτές οι τιμές θα ποικίλουν ανάλογα με το αν ο χρήστης έχει ενεργοποιήσει τα ανεπεξέργαστα δεδομένα μετρήσεων (raw data), τα οποία διαμορφώνουν το σύστημα για την ψηφιοποίηση των δειγμάτων 6 φορές το κάθε δευτερόλεπτο. Αν η πρώτη λειτουργία απόκτησης δεδομένων είναι ενεργοποιημένη, η πραγματική χωρητικότητα της μνήμης εξαρτάται από τη χρονική διάρκεια που επιλέγεται από τον χρήστη.

- Ρολόι πραγματικού χρόνου & Έξυπνο τροφοδοτικό μπαταρίας

Το ρολόι πραγματικού χρόνου τροφοδοτείται από μια συνεχή εφεδρική μπαταρία λιθίου. Το CG-5 βασίζεται σε μια έξυπνη διάταξη με διπλές μπαταρίες που είναι ένα πρότυπο λιθίου βιντεοκάμερας. Η χωρητικότητα είναι

6,6 Ah και το σύστημα επιτρέπει την αυτόματη μετάβαση από τη μια μπαταρία στην άλλη, καθώς η ικανότητα μειώνεται στο πεδίο.

- Δέκτης GPS



Εικόνα 31: Δέκτης GPS.

Το CG-5 διαθέτει ένα δέκτη GPS το οποίο συνδέεται στη θύρα COM2 και επιτρέπει στο χρήστη να διαβάσει το σημείο αναφοράς του δικτύου. Επιπλέον, μπορεί να ορίσει το RTC (Real Time Clock) με το UTC (Coordinated Universal Time). Αξίζει να τονιστεί ότι ο δέκτης αυτός δεν θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί για ακριβείς

μετρήσεις υψομέτρου, αφού είναι δέκτης μίας συχνότητας.

- FR Πομπός



Εικόνα 32: RF Πομπός του βαρυτήμετρου.

Το CG-5 είναι εξοπλισμένο με μια ραδιοσυχνότητα που δίνει την δυνατότητα στο βαρυτήμετρο να πραγματοποιήσει απομακρυσμένες εκκινήσεις. Δηλαδή να ξεκινάει να μετράει χωρίς να πατάει ο χρήστης το κουμπί εκκίνησης από το πληκτρολόγιο της οθόνης αλλά έχοντας ο χρήστης απομακρυνθεί από το

όργανο να πατήσει το πλήκτρο του πομπού και να ξεκινήσει αυτόματα η μέτρηση.

Το εύρος λειτουργίας του με την κεραία είναι μέχρι περίπου 10 μέτρα. Ενώ η λειτουργία χωρίς την συνδεδεμένη κεραία με το CG-5 είναι περιορισμένη περίπου στο 1 μέτρο. Ο πομπός RF επιτρέπει στους χρήστες να χειρίζονται εξ αποστάσεως το CG-5. Επιπλέον, ο χρήστης θα καταλάβει όταν το όργανο αρχίσει να μετράει όταν έφοσον έχει πατήσει το κουμπί του τηλεχειριστηρίου και στο όργανο είναι αναμένη η μπλε ένδειξη στο μπροστινό μέρος όπως δείχνει και η εικόνα (33).



Εικόνα 33: Η μπλέ ένδειξη για την καταγραφή των μετρήσεων.

5.2. Χώρος εγκατάστασης

Το βαρυτήμετρο τοποθετήθηκε για 8 ημέρες στο γραφείο του καθηγητή Β. Ανδριτσάνου. Το γραφείο του βρίσκεται στο κτίριο της Στεφ του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Τοπογραφίας και Γεωπληροφορικής στον πρώτο όροφο. Απέναντι από το γραφείο του είναι η αποθήκη των οργάνων του τμήματος. Οι ατμοσφαιρικές συνθήκες σε αυτόν τον χώρο είναι αρκετά σταθερές. Πιο συγκεκριμένα, όπως δείχνει και η παρακάτω εικόνα λόγω της μεγάλης διέλευσης πολλών σπουδαστών το βαρυτήμετρο έπρεπε να τοποθετηθεί σε ένα σταθερό σημείο και συγκεκριμένα μέσα σε μια ντουλάπα έτσι ώστε να μην είναι σε επαφή με τους σπουδαστές και να είναι σταθερό επειδή είναι ένα όργανο μεγάλης ευαισθησίας. Πρέπει να σημειωθεί ότι, η τοποθεσία αυτή για τη μέτρηση των παλιρροιών δεν είναι η ιδανικότερη, αφού απαιτείται σταθερό έδαφος και χαμηλή εξωτερική κίνηση. Δυστυχώς όμως, η μη διαθεσιμότητα τέτοιων χώρων οδήγησε στην επιλογή της θέσης αυτής, με τις όποιες αδυναμίες και προβλήματα στην ανάλυση των τελικών δεδομένων.





Εικόνα 34: Ο χώρος τοποθέτησης του οργάνου.

5.3. Δημιουργία εργασίας

Πριν ξεκινήσει η καταγραφή των δεδομένων το πρώτο στάδιο ήταν η δημιουργία νέας εργασίας και ρύθμιση των παραμέτρων του οργάνου. Παρακάτω μέσω των εικόνων φαίνονται αναλυτικά τα βήματα που ακολουθήθηκαν:

1. Αρχικά, με την εκκίνηση του οργάνου εμφανίζεται η παρακάτω οθόνη:

STATION DESIGNATION				09:19
				 OPT ION
				NEXT
				LINE
				FUNCT
				EDIT
				READ
				GPS.
				 LEVEL
Longitude	Des°	Min'	Sec"	
	79W	30	13.42	
Latitude	43N	47	24.32	
Elevation:	205.899994			
Line ID:	100N			
Sel:↑↓ Chs:Enter #				100%

2. Από την επιλογή “OPTION” ρυθμίστηκαν κάποιοι βασικοί παράμετροι όπως ο αριθμός των κύκλων και την καθυστέρηση της εκκίνησης του επόμενου κύκλου:

DEFINE THE OPTIONS 09:16		FINAL KEY
Read Time:	60	on off
Factory Flag:	80	
#Of Cycles:	88888	
Start Delay:	4	
Line separation:	0.	FUNCT
Station separation:	0.	EDIT
Auto station inc.:	NO	
Chart Scale:	1	
Measurement:	NUMERIC	
LCD Heater:	OFF	
Record Amb.Temp:	NO	OK
Sel: ↑↓# Ch9:Enter #		100%

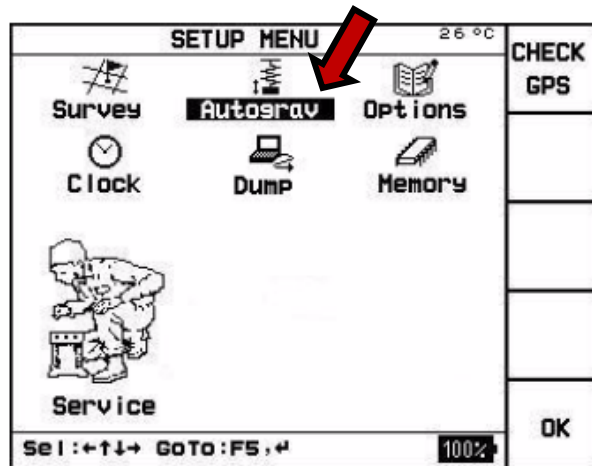
3. Στην συνέχεια, από το κεντρικό παράθυρο έγινε επιλογή της ρύθμισης “SURVEY”:

SETUP MENU 26 °C		CHECK GPS
Survey	Autosrav	Options
Clock	Dump	Memory
Service		
Sel: ↑↑↓↓ GoTo:F5, #		100%
		OK

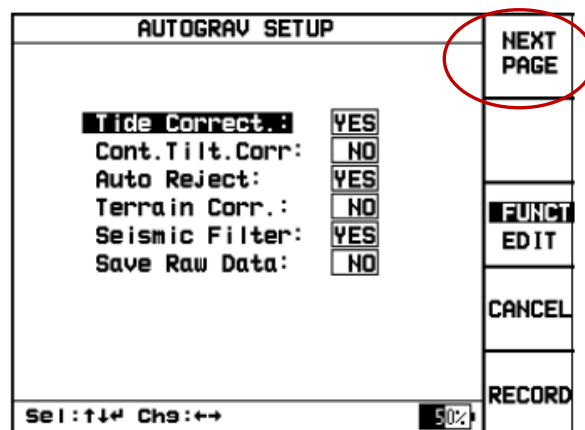
4. Μέσα στο περιβάλλον του “ SURVEY HEADER” δόθηκε το όνομα της εργασίας στο πεδίο “SurveyID”.

SURVEY HEADER 26 °C		PARAMS
SurveyID:	Default	READ GPS
Customer:	Default	
Operator:	Default	
GRID REFERENCE:		FUNCT EDIT
Latitude:	43.9N	
Longitude:	79.6W	
Azimuth:	0.	
Elevation:	0.	CANCEL
UTM Zone:	0	
GMT Diff.:	5.	OK
Sel: ↑↓# Ch9:Alpha, ↔		100%

5. Έπειτα, πάλι από το κεντρικό μενού επιλέχθηκε η καρτέλα “Autograv”.

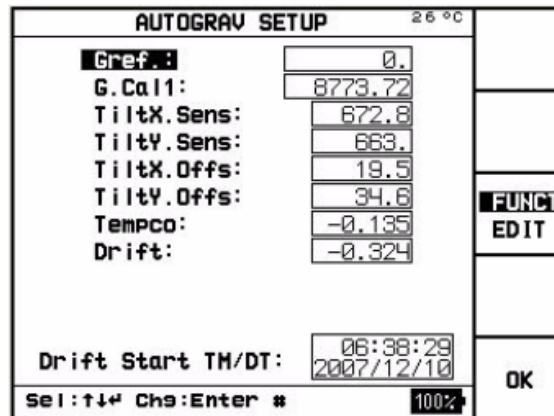


6. Μέσα στο περιβάλλον του “Autograv” ρυθμίστηκαν σημαντικοί παράμετροι όπως είναι η διόρθωση της παλίρροιας, η αυτόματη απόρριψη των λάθων τιμών, η διόρθωση του αναγλύφου και το σεισμικό φίλτρο:

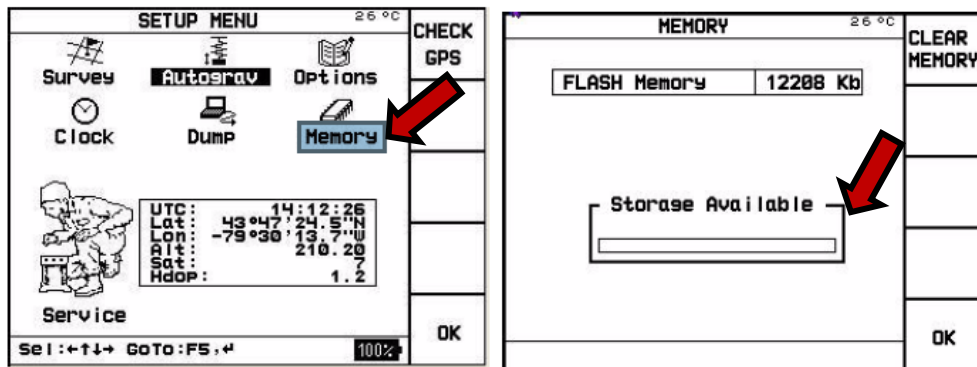


Οι παράμετροι αυτοί χρησιμοποιήθηκαν στον αυτόματο προσδιορισμό του συντελεστή ολίσθησης του οργάνου (drift), ενώ στην συνέχεια ρυθμίστηκαν κατάλληλα για την παρατήρηση των παλιρροιών (Tide Correction: No)

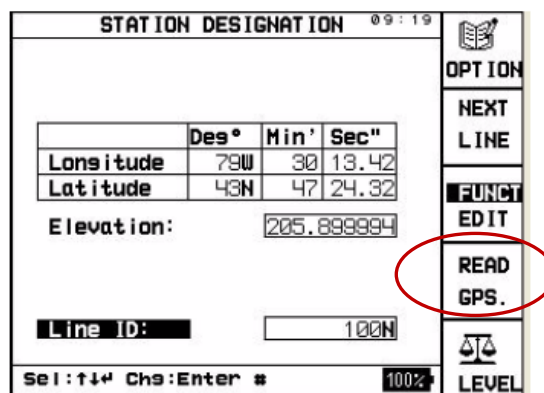
7. Προχωρώντας στην επόμενη σελίδα από την επιλογή “NEXT PAGE” έγινε ο έλεγχος των ρυθμίσεων στις παραμέτρους που δείχνει και η παρακάτω εικόνα:



8. Επιπλέον, ελέγχθηκε και η κατάσταση της μνήμης του οργάνου από το κεντρικό μενού → “Memory”:



9. Τέλος, πριν την τοποθέτηση του οργάνου στο σημείο αναφοράς και την οριζοντίωση του, πραγματοποιήθηκε μια μέτρηση GPS με την βοήθεια του δέκτη GPS του οργάνου. Πρώτα συνδέθηκε ο δέκτης με την δεύτερη θύρα του οργάνου και ύστερα για να ξεκινήσει η μέτρηση πατήθηκε το F4 που αντιστοιχεί στην καρτέλα “READ GPS”. Η μέτρηση διήρκησε μερικά δευτερόλεπτα.



5.4. Διάταξη καταγραφής

Για την καταγραφή της παλίσρροιας το γεωδαιτικό βαρυτήμετρο CG-5 ήταν συνδεδεμένο στο ρεύμα μέχρι την ολοκλήρωση της καταγραφής. Η τροφοδοσία του έγινε μέσω τροφοδοτικού DC το οποίο έχει εύρος εισόδου από 90V έως 264V. Για την επίτευξη όμως της σταθερής τροφοδοσίας του, χρησιμοποιήθηκε διάταξη από φορτιστή μπαταρίας και μπαταρίες 11.1V.

Για την εξασφάλιση της καλύτερης έδρασης του, αλλά και της σωστότερης οριζοντίωσης του, το βαρυτήμετρο τοποθετήθηκε σε ειδική βάση οριζοντίωσης, το τρικόχλιο, όπως φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 35: Ειδική βάση οριζοντίωσης του βαρυτημέτρου.

Η βάση αυτή είναι κατασκευασμένη από αλουμίνιο πάχους 2cm, είναι τριγωνική και φέρει 3 κοχλίες, ικανούς να οριζοντιώνουν σωστά το βαρυτήμετρο κατά την εγκάρσια και τη διαμήκη έννοια.

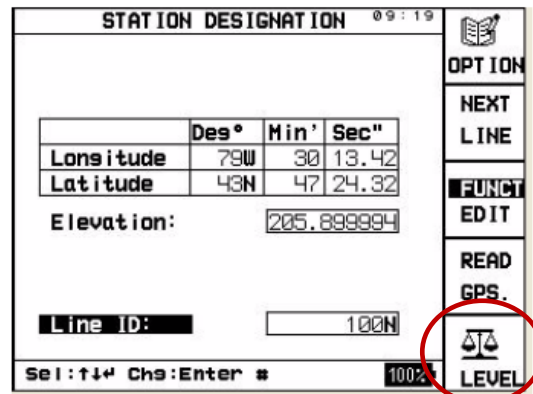
5.5. Οριζοντίωση βαρυτημέτρου

Η σωστή οριζοντίωση ενός βαρυτημέτρου παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην ποιότητα των παρατηρήσεων και πρέπει να προηγείται οποιασδήποτε άλλης εργασίας. Το βαρυτήμετρο έχει δύο αεροστάθμες για την οριζοντίωση του: τη διαμήκη που είναι παράλληλη με το στέλεχος που συγκρατεί το βάρος του βαρυτημέτρου και βασικά επηρεάζει την ευαισθησία του και την εγκάρσια, κάθετη προς την διαμήκη. Οι άξονες των αεροστάθμων είναι υλοποιημένοι στην ειδική βάση οριζοντίωσης και με τη βοήθεια δυο κοχλίων, ένα για κάθε

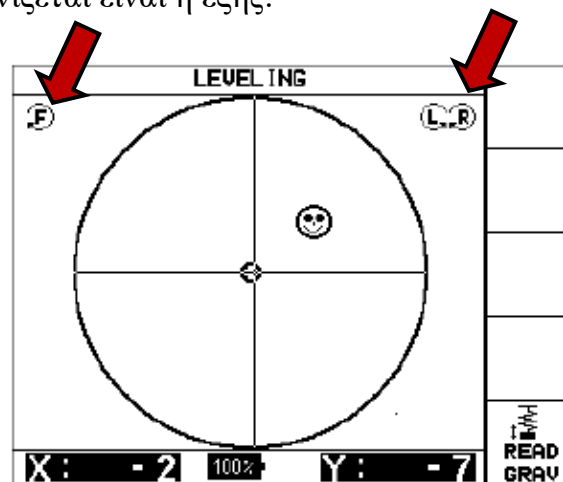
άξονα, υπάρχει η δυνατότητα να οριζοντιωθεί το σύστημα βαρυτήμετρο – βάση.

Η οριζοντίωση του οργάνου γίνεται πρώτα με την εγκάρσια αεροστάθμη και έπειτα με την διαμήκη.

Το όργανο τοποθετήθηκε πάνω στο τρικόχλιο και για να ξεκινήσει η οριζοντίωση επιλέχθηκε από το αρχικό μενού το “LEVEL”



Η οθόνη που εμφανίζεται είναι η εξής:



Εικόνα 36: Η οθόνη οριζοντίωσης του οργάνου.

Η σωστή οριζοντίωση έγινε σύμφωνα με την φορά που έδειχναν τα βελάκια L, R & F. Όταν εμφανιστεί το πρόσωπο στην οθόνη σημαίνει ότι η οριζοντίωση έχει τελειώσει και οι τιμές των X, Y είναι μέσα στα επιτρεπτά όρια. Μόλις ολοκληρωθεί η οριζοντίωση, η καταγραφή της παλίνρροιας θα ξεκινήσει με το πάτημα του πομπού FR.

5.6. Διαδικασία μεταφοράς των μετρήσεων

Το CG-5 επιτρέπει τη μεταφορά των δεδομένων είτε μέσω μιας RS-232C θύρας ή μέσω μιας θύρας USB. Και οι δύο επιλογές μπορούν να προσεγγιστούν μέσω του SCTUTIL πρόγραμματος, το οποίο θα πρέπει πρώτα να εγκατασταθεί στον υπολογιστή. Στην συγκεκριμένη εργασία η μεταφορά έγινε μέσω USB θύρας.



Εικόνα 37: Καλώδιο μεταφοράς δεδομένων από το βαρυτήμετρο στον ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Αρχικά, συνδέθηκαν τα δύο καλώδια στις αντίστοιχες θύρες που αναγράφονται πάνω από το κάθε καλώδιο COM 1 και COM 2 στις αντίστοιχες θύρες του βαρυτημέτρου.

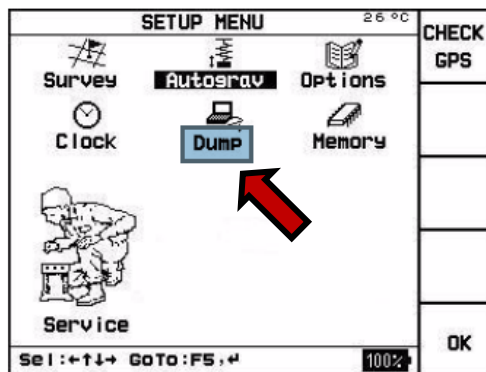


Πριν συνδεθεί και το USB στην θύρα USB του καλωδίου

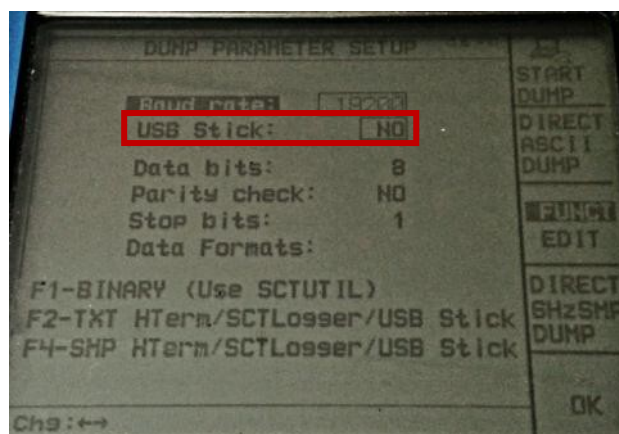


ακολουθήθηκαν οι εξής ενέργειες στην οθόνη του βαρυτημέτρου:

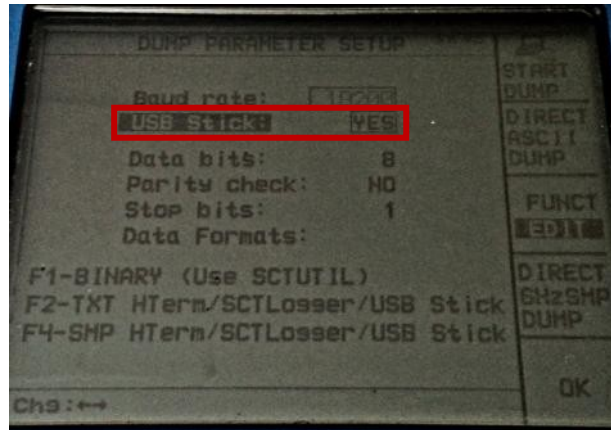
Από το κεντρικό μενού της οθόνης επιλέχθηκε όπως φαίνεται και παρακάτω το “Dump”.



Στην συνέχεια, μέσα στο περιβάλλον του “Dump” στην επιλογή USB Stick από απενεργοποιημένη που ήταν στην αρχή,



Με την επιλογή F4 ενεργοποιήθηκε η επιλογή και το όργανο ήταν έτοιμο να δεχτεί το USB στην θύρα USB.



5.7. Προγράμματα Επεξεργασίας Παλιρροϊκών Μετρήσεων

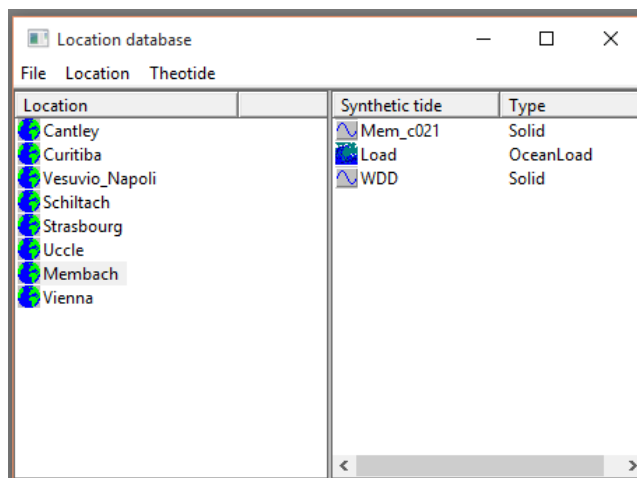
5.7.1. TSoft

Το TSoft είναι ένα πακέτο λογισμικού για την ανάλυση των χρονοσειρών και τις γήινες παλίρροιες. Σε αντίθεση με τα περισσότερα από τα υπάρχοντα συστήματα, το λογισμικό αυτό επιτρέπει στο χρήστη να επεξεργαστεί τα δεδομένα με ένα πλήρως διαδραστικό και γραφικό τρόπο, αξιοποιώντας τις προηγμένες δυνατότητες γραφικών των σημερινών συστημάτων υπολογιστών. Αυτή η προσέγγιση έχει μια σειρά από σημαντικά πλεονεκτήματα, ιδίως στον τομέα της διόρθωσης των σφαλμάτων των δεδομένων, καθώς και την ανίχνευση και την επεξεργασία των ειδικών γεγονότων (π.χ. ελεύθερες ταλαντώσεις μετά από σεισμούς).

Επιπλέον, το TSoft δεν αναγκάζει τον χρήστη να εφαρμόσει μια αυστηρή αλληλουχία ενεργειών σχετικά με τα δεδομένα, ούτε επιβάλλει ένα σταθερό σύστημα αρχειοθέτησης των αρχείων δεδομένων. Προσφέρει μόνο το σύνολο των εργαλείων που απαιτούνται για την επεξεργασία των δεδομένων, αφήνοντας τον χρήστη εντελώς ελεύθερο να οργανώσει τη «ρουτίνα» επεξεργασίας των δεδομένων με τον τρόπο που αυτός ή αυτή προτιμά.

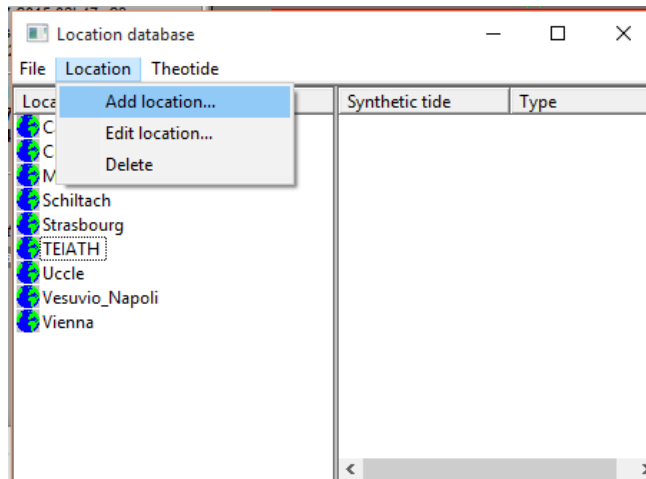
Το πρόγραμμα αυτό είναι εξοπλισμένο με μια βάση δεδομένων τοποθεσίας (Location database), που διευθύνει τις θέσεις και τις συνθετικές παλίρροιες, δηλαδή τις σειρές των παλιρροϊκών παραμέτρων υπό την μορφή ενός πίνακα κύματος. Για κάθε τοποθεσία, πολλαπλές συνθετικές παλίρροιες μπορούν να αποθηκευτούν. Με τον τρόπο αυτό, μπορεί κανείς να αποθηκεύσει τις παλίρροιες που περιλαμβάνουν τις υστερήσεις φάσης των οργάνων (για τον υπολογισμό των εναπομείναντων σφαλμάτων κατά τη διάρκεια της διόρθωσης των δεδομένων) και θεωρητικές παλίρροιες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν

για τις αναλύσεις. Στο αριστερό τμήμα του παραθύρου της θέσης της βάσης δεδομένων εμφανίζεται μια λίστα με τα ονόματα όλων των εγκαταστάσεων που βρίσκονται στη βάση δεδομένων.



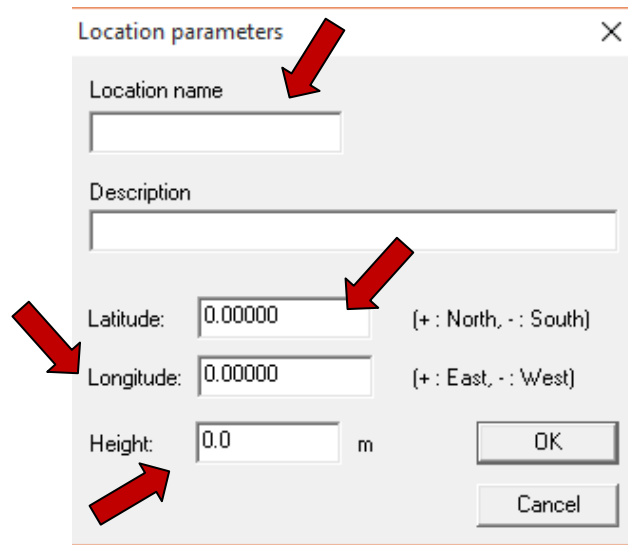
Εικόνα 38: Η τοποθεσία βάσης δεδομένων.

Από την επιλογή του μενού "Location→Add Location" μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δημιουργηθεί μια νέα θέση και να καθοριστούν οι παράμετροι (είτε για τις παλίρροιες του Στερεού Φλοιού της Γης είτε για τις θαλάσσιες παλίρροιες).



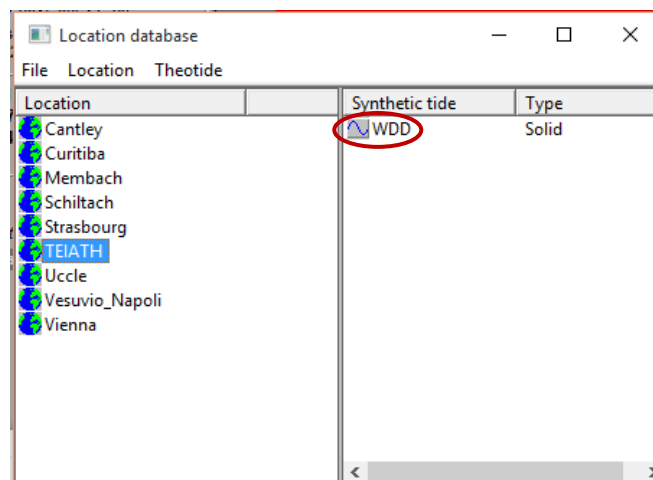
Εικόνα 39: Επιλογή προσθήκης νέας τοποθεσίας.

Ένα άλλο παράθυρο διαλόγου εμφανίζεται, με σκοπό τον καθορισμό των παραμέτρων της συγκεκριμένης τοποθεσίας όπως είναι το όνομα της τοποθεσίας, το γεωγραφικό μήκος και πλάτος (σε δεκαδική μορφή) και υψόμετρο πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας.



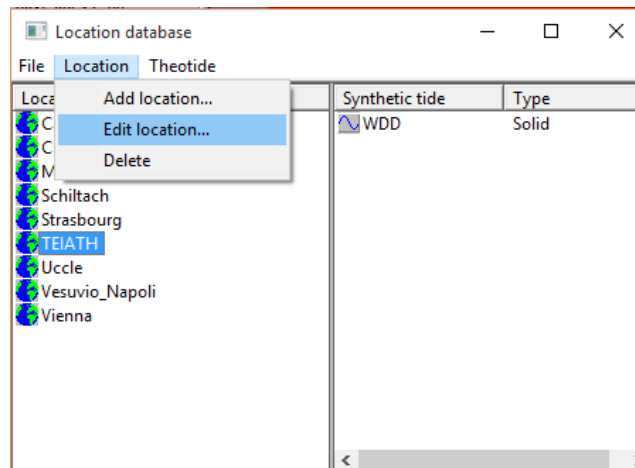
Εικόνα 40: Οι παράμετροι μιας τοποθεσίας.

Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται στο δεξιό μέρος του παραθύρου η θεωρητική παλίρροια που είναι γνωστή για την τρέχουσα επιλεγμένη περιοχή και είναι το εικονίδιο “WDD”.



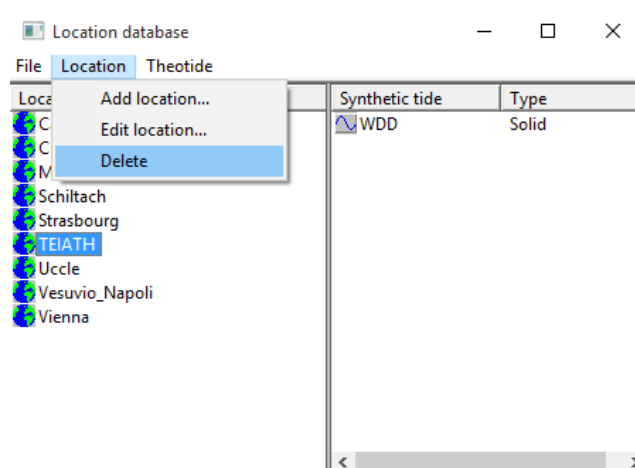
Εικόνα 41: Η εμφάνιση της θεωρητικής παλίρροιας.

Η περιγραφή μιας συγκεκριμένης τοποθεσίας μπορεί να φαίνεται από την επιλογή του ονόματος και χρησιμοποιώντας την επιλογή από το μενού “Location→Edit Location” ή κάνοντας διπλό κλικ στο όνομα της τοποθεσίας.



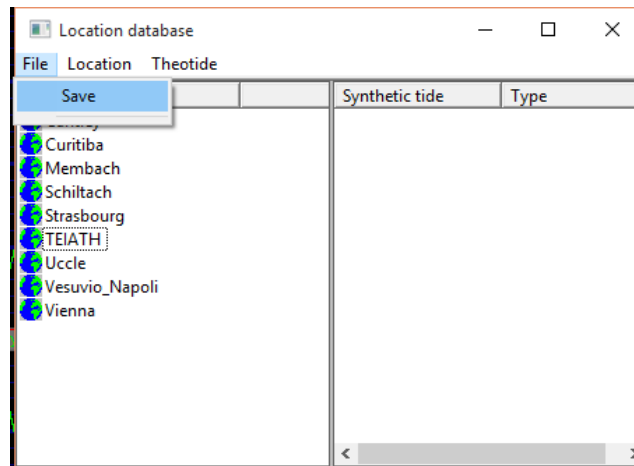
Εικόνα 42: Επιλογή της επεξεργασίας των παραμέτρων της επιλεγμένης τοποθεσίας.

Από την άλλη, εάν έχει γίνει λάθος ο χρήστης μπορεί από το μενού “Location→Delete” να αφαιρέσει την τρέχουσα επιλεγμένη τοποθεσία.



Εικόνα 43: Διαγραφή της επιλεγμένης τοποθεσίας.

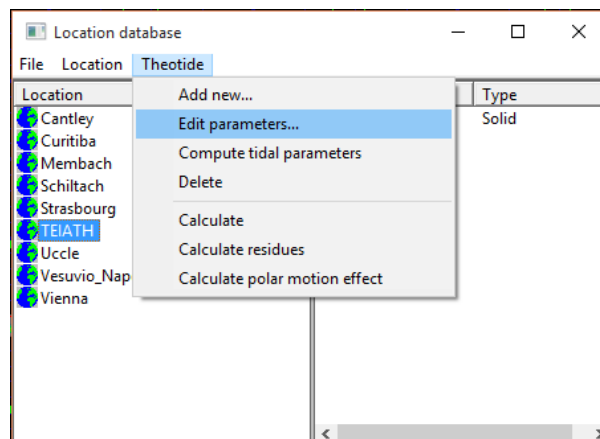
Όταν οι αλλαγές της βάσης δεδομένων ολοκληρωθούν, μπορεί να αποθηκευτούν στο δίσκο χρησιμοποιώντας την επιλογή “File→Save”.



Εικόνα 44: Επιλογή της αποθήκευσης της τοποθεσίας.

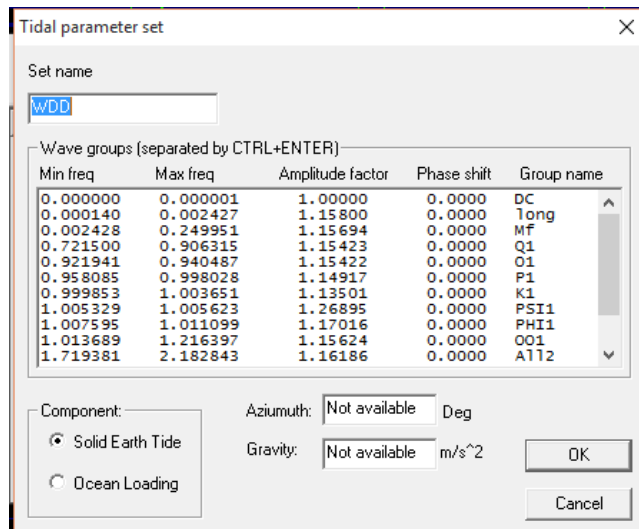
5.7.1.1. Υπολογισμός συνθετικής (θεωρητικής) παλίρροιας

Για την επεξεργασία των παραμέτρων μιας συγκεκριμένης παλίρροιας, ο χρήστης επιλέγει το όνομα της παλίρροιας και καλεί από το μενού την επιλογή “Theotide→Edit parameters”.



Εικόνα 45: Επεξεργασία των παραμέτρων της παλίρροιας.

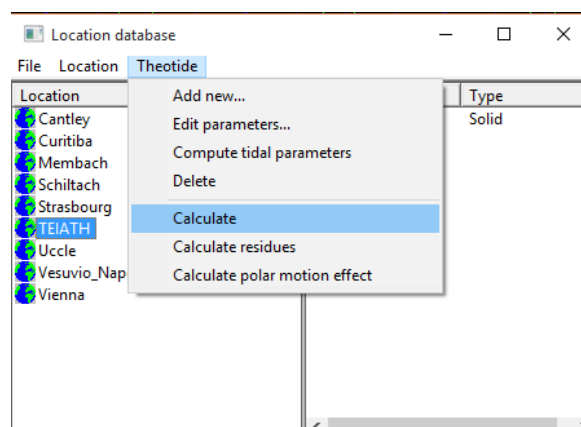
Στο παράθυρο διαλόγου που θα ανοίξει, κάθε γραμμή περιέχει την ελάχιστη και τη μέγιστη συχνότητα εντός της ομάδας (σε κύκλους ανά ημέρα), τον παράγοντα πλάτους (δ), η μετατόπιση φάσης (σε μοίρες), και το όνομα της ομάδας κύματος. Κάθε ομάδα κύματος για τις παλίρροιας του στερεού φλοιού της γης γράφεται σε ξεχωριστή γραμμή όπως φαίνεται και παρακάτω:



Εικόνα 46: Παράθυρο επεργασίας των βασικών παραμέτρων.

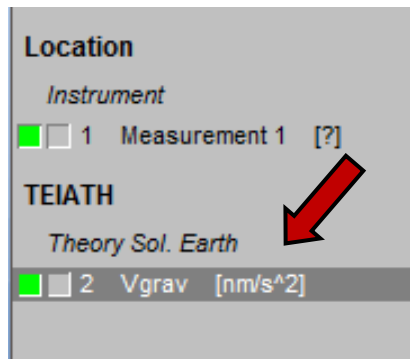
Η πιο γνωστή ομάδα κύματος είναι η Q₁ η οποία είναι η ομάδα κύματος από τη Σελήνη και τον Ήλιο.

Όταν ένα αρχείο φορτώνεται στο TSoft, η τοποθεσία της βάσης δεδομένων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία ενός νέου καναλιού, που περιέχει τη θεωρητική παλίρροια. Είναι δυνατός ο υπολογισμός της θεωρητικής παλίρροιας εάν επιλεγεί η σωστή τοποθεσία καθώς και το σωστό όνομα της θεωρητικής παλίρροιας. Στο πρόγραμμα όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα γίνεται με την επιλογή “Theotide→Calculate”.



Εικόνα 47: Ο υπολογισμός της θεωρητικής παλίρροιας μέσω του προγράμματος TSoft.

Το νέο κανάλι που έχει δημιουργηθεί, περιέχει τη θεωρητική παλίρροια για το χρονικό διάστημα του αρχείου, με τη χρήση 1200 κυμάτων. Το παλιρροϊκό σήμα υπολογίζεται σε σχέση με το UTC (Universal Time Coordinated) και οι μονάδες μέτρησης είναι $\frac{nm}{s^2}$.



Εικόνα 48: Το νέο κανάλι που περιέχει την θεωρητική παλίρροια.

5.7.1.2. Διόρθωση των ανεπεξέργαστων δεδομένων

Τα ανεπεξέργαστα δεδομένα, που προέρχονται άμεσα από ένα όργανο, συχνά περιέχουν ανεπιθύμητες μετρήσεις που μπορεί να επηρεάσει αρνητικά σε μεγάλο βαθμό τις αναλύσεις. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για την περίπτωση ενός βαρυτημέτρου, όπου οι ανεπιθύμητες μετρήσεις μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις ομάδες:

- **Αιχμές.** Σε μια τέτοια περίπτωση, το σήμα αποκλίνει σημαντικά από την αναμενόμενη τιμή κατά τη διάρκεια μιας πολύ σύντομης χρονικής περιόδου (συνήθως ένα ή μερικά σημεία μέτρησης). Αυτές οι αιχμές μπορεί να οφείλονται σε προβλήματα του ίδιου του οργάνου. Είναι σαφές ότι η παρουσία τέτοιων γεγονότων υποβαθμίζει την ποιότητα της κάθε ανάλυσης.
- **Σεισμοί.** Ένας (ακόμη και πολύ ασθενής) σεισμός μπορεί να προκαλέσει πολύ σοβαρές αποκλίσεις του σήματος, κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Εάν ο στόχος της ανάλυσης δεν είναι ο ίδιος ο σεισμός (αλλά π.χ. τις παλίρροιες της γης), θα πρέπει να αφαιρεθεί από τα δεδομένα.
- **Βήματα.** Συχνά εμφανίζεται ότι το σήμα του μέτρου της βαρύτητας αλλάζει ξαφνικά χωρίς καμία (γεω) φυσική αιτία αλλά πολλές φορές λόγω προβλημάτων των οργάνων, και παραμένει σταθερή κατά τη νέα τιμή. Σαφώς, η συσσώρευση αυτών των βημάτων μπορεί να επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό τη μακροπρόθεσμη συμπεριφορά της ολίσθησης του οργάνου (drift).
- **Διακοπές (κενά).** Λόγω της ανεπάρκειας του οργάνου, οι χρονοσειρές της καταχώρισης μπορεί να διακοπούν σε ορισμένες στιγμές. Αυτές οι διακοπές μπορεί να διαφέρουν από το ένα σημείο δεδομένων για αρκετές εβδομάδες.

Για τις αιχμές και τους σεισμούς, υπάρχουν δύο πιθανοί τρόποι διόρθωσης:

1. Απομάκρυνση των «κακών» δεδομένων και αφήνοντας ένα κενό ή
2. Αντικαθιστώντας τα «κακά» δεδομένα με κάποια παρεμβολή.

5.7.1.3. Υπολογισμός των εναπομείναντων σφαλμάτων

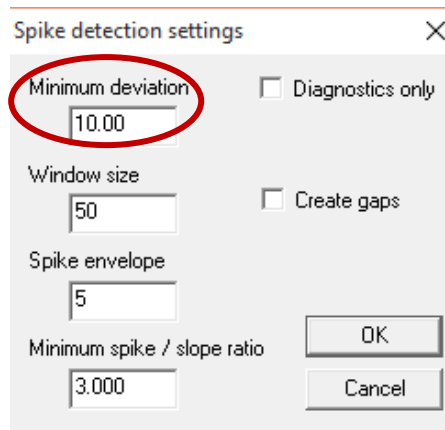
Στο TSoft, η διόρθωση των δεδομένων, γίνεται στο επίπεδο των υπολοίπων. Ένα ισχυρό χαρακτηριστικό του TSoft είναι στην πραγματικότητα ότι μπορεί, ανά πάσα στιγμή, να αναιρέσει (και να τροποποιήσει) διορθώσεις που έχουν γίνει νωρίτερα σε ένα συγκεκριμένο κανάλι. Ωστόσο, για το σκοπό αυτό, δύο αντίγραφα αυτού του καναλιού θα πρέπει να είναι ενεργά. Και τα δύο κανάλια θα πρέπει να έχουν ακριβώς τα ίδιες πληροφορίες πεδίου, εκτός από το ότι το οπτικό πεδίο μέτρησης του πρώτου καναλιού θα πρέπει να τελειώνει με «#raw», ενώ το δεύτερο κανάλι θα πρέπει να τελειώνει με «#corr».

Στο πρώτο κανάλι θα πρέπει τα δεδομένα να διατηρούνται αμετάβλητα, ενώ οι διορθώσεις (παρεμβολές, κ.λπ.) να εκτελούνται στο δεύτερο κανάλι. Φυσικά, είναι απολύτως δυνατό να διορθώσει τα δεδομένα με ένα μόνο κανάλι, αλλά αργότερα θα είναι αδύνατο να αναιρέσει τυχόν παρεμβολές και βήματα. Προκειμένου να είναι σε θέση να υπολογίσει τα υπόλοιπα, ένα κανάλι που περιέχει τη θεωρητική παλίρροια της θέσης θα πρέπει να είναι ενεργό.

5.7.1.4. Διόρθωση των τεχνικών σφαλμάτων

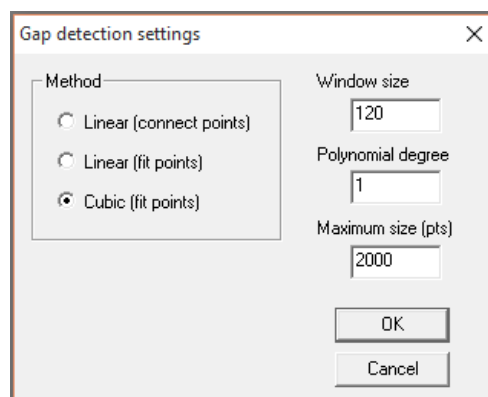
Το TSoft περιέχει αλγόριθμους που ανιχνεύουν αυτόματα τις αιχμές, τους σεισμούς, τα βήματα και τα κενά στο σήμα, και ότι υπολογίζει ένα διορθωτή για το καθένα.

Η επιλογή από το μενού “Correctors→Auto detect spikes” χρησιμοποιείται για την ανίχνευση των αιχμών και των σεισμών στο επισημασμένο κανάλι. Εμφανίζεται ένα παράθυρο διαλόγου το οποίο ζητά από το χρήστη να ρυθμίσει τις διάφορες παραμέτρους. Η πρώτη παράμετρος είναι η ελάχιστη τυπική απόκλιση.



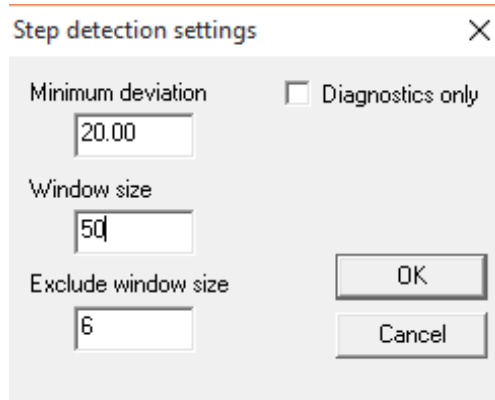
Εικόνα 49: Παράθυρο ρύθμισης των παραμέτρων των αιχμών.

Η δεύτερη επιλογή “Correctors→Auto detect gaps” χρησιμοποιείται για την ανίχνευση των κενών πάλι στο επισημασμένο κανάλι. Το παράθυρο διαλόγου ζητά από τον χρήστη να επιλέξει την μέθοδο της παρεμβολής που θα χρησιμοποιηθεί καθώς και μερικές άλλες παραμέτρους. Συνήθως, στις εργασίες χρησιμοποιείται η τρίτη επιλογή “Cubic (fit points)”.



Εικόνα 50: Παράθυρο ρύθμισης των ρυθμίσεων των κενών.

Τέλος, η επιλογή “ Correctors→Auto detect steps” ανιχνεύει τα βήματα στο επιλεγμένο κανάλι. Στο παράθυρο διαλόγου που εμφανίζεται, ζητείται η ελάχιστη τιμή βήματος, καθώς και ορισμένες άλλες παραμέτρους που σχετίζονται με τον αλγόριθμο αναζήτησης.

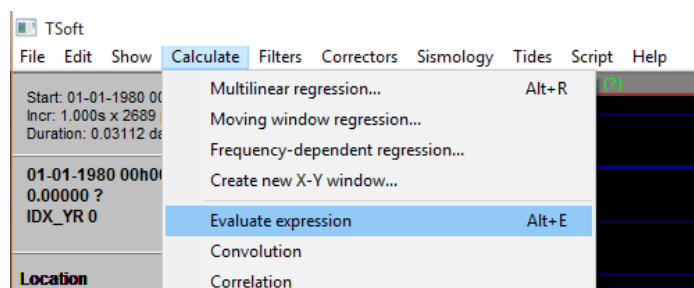


Εικόνα 51: Παράθυρο ρύθμισης παραμέτρων του βήματος.

Λόγω της φύσης των αλγορίθμων ανίχνευσης, η καλύτερη προσέγγιση είναι πρώτα να ανιχνεύουν και να διορθώνουν αιχμές δηλαδή να γίνει εξόμαλυνση των παρατηρήσεων, μετά να ανιχνεύουν και να διορθώνουν τα κενά, και, τέλος, η ανίχνευση και διόρθωση των βημάτων.

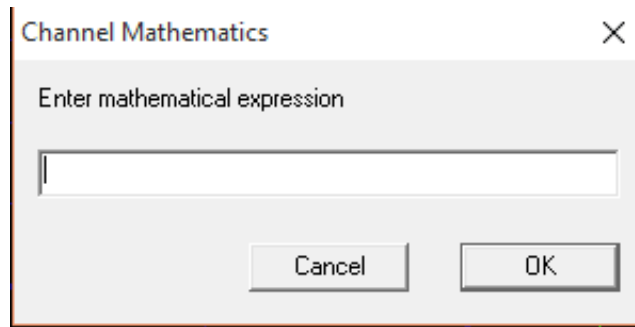
5.7.1.5. Υπολογισμός της διορθωμένης παλίρροιας

Όταν τα εναπομείναντα σφάλματα καθώς και τα τεχνικά σφάλματα διορθώνονται σωστά, είναι δυνατόν να αποκατασταθεί η διορθωμένη παλίρροια προσθέτοντας τα διορθωμένα σφάλματα στη θεωρητική παλίρροια (αν είναι απαραίτητο, ενσωματώνεται και η πίεση). Στο TSoft αυτό επιτυγχάνεται όπως φαίνεται και παρακάτω με την επιλογή “Calculate→Evaluate expression”.



Εικόνα 52: Υπολογισμός της διορθωμένης παλίρροιας.

Έπειτα, εμφανίζεται ένα παράθυρο,



Εικόνα 53: Παράθυρο υπολογισμού της παλίρροιας.

και ο τύπος για τον υπολογισμό των υπολοίπων είναι:

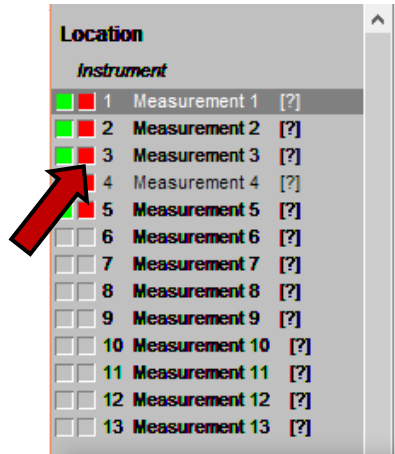
$$\text{υπόλοιπα} = \text{παλίρροια} - \text{συνθετική παλίρροια} + 3.2 * \text{πίεση} \quad (5.1)$$

τότε ο αντίστροφος τύπος για την αποκατάσταση της διορθωμένης παλίρροιας είναι:

$$\text{παλίρροια} = \text{θεωρητική παλίρροια} + \text{υπόλοιπα} - 3.2 * \text{πίεση} \quad (5.2)$$

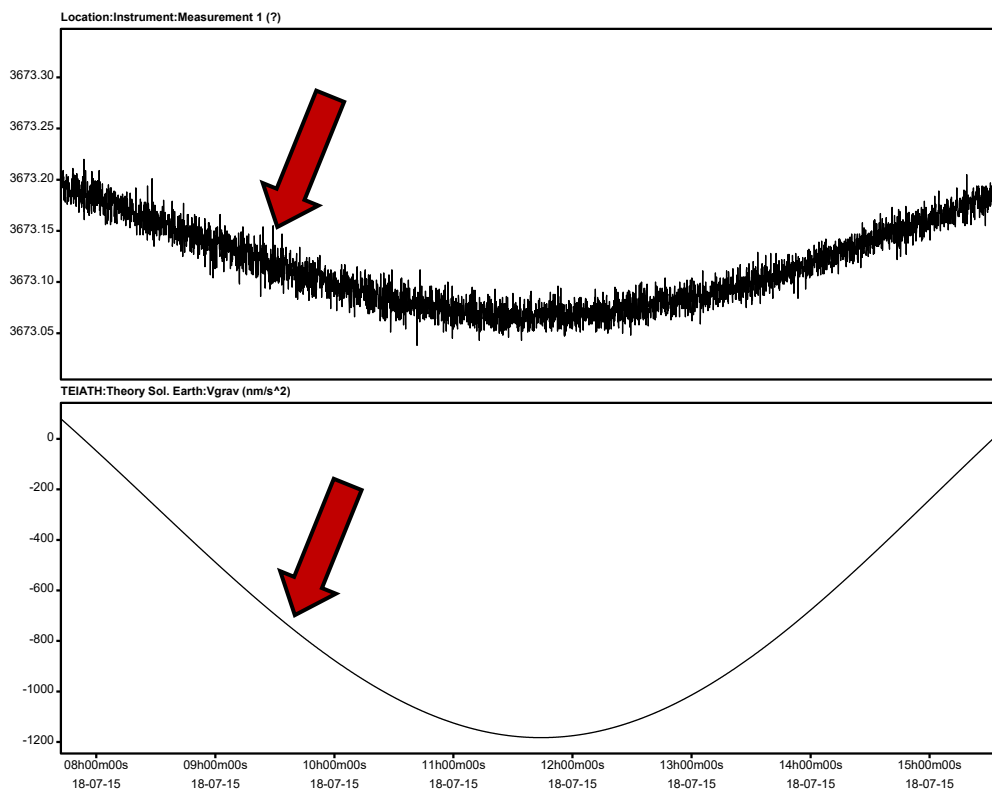
5.7.1.6. Ανάλυση των δεδομένων

Το TSoft μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εφαρμόσει μια ποικιλία διαφορετικών εργαλείων για την ανάλυση των δεδομένων. Η εφαρμογή αυτών των εργαλείων είναι εντελώς διαδραστική, και τα αποτελέσματα εμφανίζονται με ένα γραφικό τρόπο. Στις περισσότερες των περιπτώσεων, οι υπολογισμοί εκτελούνται μόνο στο ενεργό τμήμα των δεδομένων. Επιπλέον, μερικά από τα εργαλεία ανάλυσης απαιτούν ένα σύνολο από επιλεγμένα κανάλια. Ένα κανάλι μπορεί να είναι επιλεγμένο ή μη επιλεγμένο κάνοντας κλικ με το αριστερό πλήκτρο του ποντικιού στο εσωτερικό της δεξιάς πλευράς του ορθογώνιου που βρίσκεται δίπλα στα ονόματα των καναλιών στο παράθυρο καναλιού. Για επιλεγμένα κανάλια, αυτό το ορθογώνιο έχει συνταχθεί με κόκκινο χρώμα.

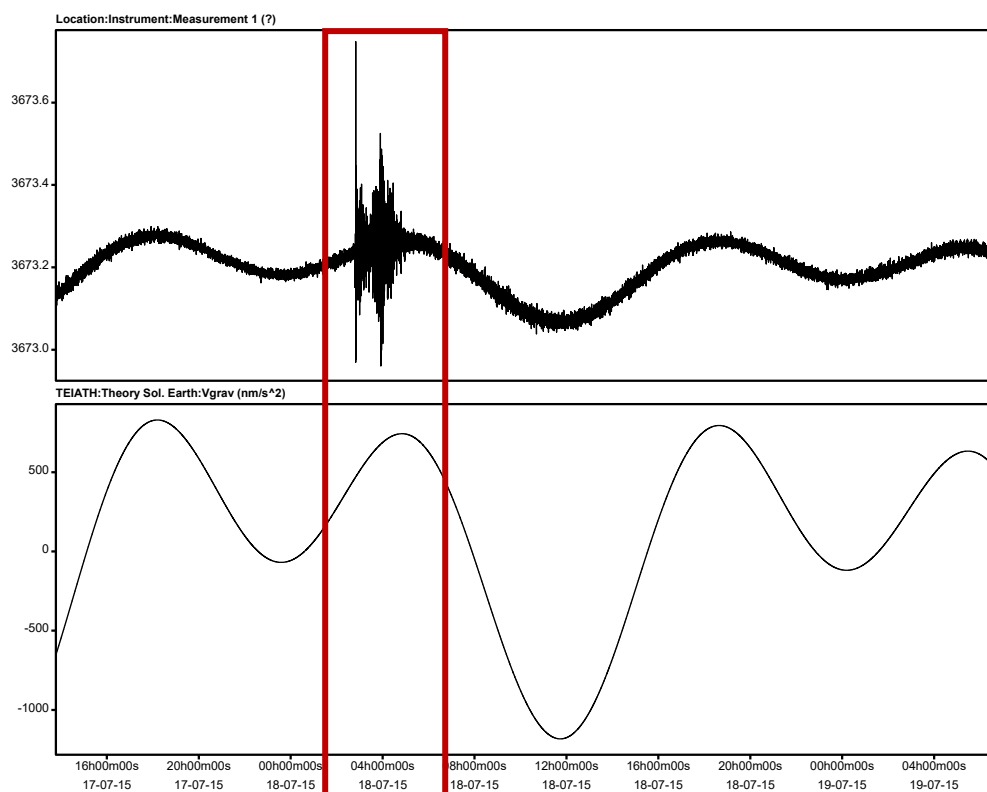


Εικόνα 54: Το παράθυρο των καναλιών.

Στην ουσία η διαδικασία που ακολουθείται για την ανάλυση των παλιρροιών είναι αρχικά η εισαγωγή των μετρήσεων στο πρόγραμμα. Στη συνέχεια, γίνεται ανίχνευση των αιχμών (spikes) ή και των σεισμών εάν έγιναν και εξομαλύνονται οι παρατηρήσεις. Πιο συγκεκριμένα, οι αιχμές και οι σεισμοί φαίνονται στις παρακάτω εικόνες:



Εικόνα 55: Στην πάνω εικόνα φαίνονται οι αιχμές (spikes) και στην κάτω η εξομάλυνση τους.



Εικόνα 56: Στο κόκκινο πλέγμα είναι η χρονική περίοδος ύπαρξης μεγάλων αιχμών και στην κάτω εικόνα φαίνεται η εξομάλυνση αυτού του σφάλματος.

Έπειτα μετά την εξομάλυνση τους, γίνεται το φιλτράρισμα των κενών και μετά δημιουργείται μέσω του προγράμματος η θεωρητική παλίρροια. Ύστερα υπολογίζονται τα εναπομείναντα σφάλματα και ο χρήστης προσπαθεί στη συνέχεια να μοντελοποιήσει αυτά τα σφάλματα για να προβεί στην εύρεση των παλιρροϊκών παραμέτρων, δηλαδή τις ομάδες κύματος που αναφέρθηκαν σε παραπάνω ενότητες της εργασίας για τον χρόνο παρατήρησης τους.

5.7.2. ETERNA 3.4

Το ETERNA 3.4 είναι ένα πακέτο επεξεργασίας παλιρροϊακών δεδομένων. Αναπτύχθηκε από τον Γερμανό γεωφυσικό Hans-Georg Wenzel το 1996. Το πρόγραμμα αυτό επιτρέπει την καταγραφή, προεπεξεργασία και ανάλυση των παρατηρήσεων των παλίρροιων της Γης. Τα υπολογιστικά προγράμματα *DETIDE*, *DESPIKE*, *DECIMATE*, *ANALYZE*, *PREDICT* και *OCELOAD* είναι γραμμένα στο πρότυπο Fortran 77/90 και μπορούν επίσης να καταρτίζονται

και να εκτελούνται σε ένα σταθμό εργασίας υπό το λειτουργικό σύστημα «UNIX». Η γλώσσα Fortran (FORmulae TRANslator) είναι μία από τις πρώτες γλώσσες προγραμματισμού υψηλού επιπέδου, η οποία χρησιμοποιήθηκε κυρίως σε επιστημονικές αλλά και σε εμπορικές εφαρμογές. Δημιουργήθηκε τη δεκαετία του 1950 από την IBM και χρησιμοποιείται μέχρι και σήμερα.

Το ETERNA περιέχει τα ακόλουθα 21 προγράμματα (συμπεριλαμβανομένων και των απαραίτητων αρχείων για την εκτέλεση των προγραμμάτων αυτών καθώς και παραδείγματα):

ΟΝΟΜΑΣΙΑ	ΣΕΙΡΕΣ ΚΩΔΙΚΑ	ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ
ANALYZE	6374	Ανάλυση των παλιρροϊκών δεδομένων.
BENCHMAR	3913	Σύγκριση παλιρροϊκών μοντέλων με σειρά αναφοράς.
DETIDE	4079	Βαθμονόμηση των παλιρροϊκών δεδομένων.
DESPIKE	2166	Αφαίρεση των αιχμών των παλιρροϊκών δεδομένων.
DECIMATE	1034	Διαχωρισμός των δεδομένων της παλίρροιας της Γης.
ETSTEP	1028	Αξιολόγηση ενός εγγεγραμμένου βήματος ανταπόκρισης.
IERS	179	Μετασχηματισμός των δεδομένων της περιστροφής της γης.
SETUP34	267	Εγκατάσταση του ETERNA 3.4.
HELPME34	356	Εμφάνιση των σελίδων βοήθειας.
LOAD97	554	Φόρτωση των υπολογισμών των θαλάσσιων παλιρροϊών
PREDICT	3718	Υπολογισμος των συνθετικών παλιρροϊκών μοντέλων.
PREGRED	4067	Γραφική επεξεργασία των παλιρροϊκών δεδομένων.

PREPLOT	361	Οπτικοποίηση των παλιρροϊκών δεδομένων.
PLOTDATA	2054	Κύρια δεδομένα των παλίρροιων της Γης.
PLOTFILT	1568	Κύρια γραφική παρουσίαση ενός φίλτρου.
PLOTSPECT	1519	Κύρια φασμάτα των υπολοιπόμενων των παλιρροιών
PLOTHIST	1570	Κύρια ιστογράμματα των υπολοιπόμενων των παλιρροιών.
RECTIDE	2511	Καταγραφή των παλιρροϊκών δεδομένων.
TRANS	983	Μετατροπή του παλιού διεθνούς format
WPAREX	231	Παρεμβολή των παλιρροϊκών παραμέτρων.

Συνολικά έχει 38.525 σειρές κώδικα.

5.7.2.1. Περιγραφή του προγράμματος DECIMATE

Το πρόγραμμα «DECIMATE» μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να διαχωρίσει τα δεδομένα που αποθηκεύονται στο πρότυπο ETERNA μετά από τα χαμηλοπερατά (low-pass) φιλτράρισμα σε χαμηλότερα διαστήματα δειγματοληψίας. Αν τα δεδομένα π.χ. έχουν καταγραφεί με διάστημα 10s, το πρόγραμμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να φιλτράρει τα δεδομένα και να γίνει η δειγματοληψία των δεδομένα σε διάστημα 60s. Μετά την προεπεξεργασία των δεδομένων με το πρόγραμμα «DESPIKE» που αναφέρθηκε προηγουμένως, τα προεπεξεργασμένα δεδομένα μπορεί και πάλι να διαχωριστούν σε ωριαία διάστημα χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα «DECIMATE».

Το πρόγραμμα αυτό διαβάζει μόνο το όνομα "pn" από το αρχείο "project" και καθορίζει τις απαραίτητες διάφορες παραμέτρους των κυμάτων από το αρχείο "pn".ini. Το μήκος των αρχείων δεδομένων που πρέπει να αποδεκατιστούν με το DECIMATE περιορίζεται σε 10.000 ημέρες = 30 έτη. Το μήκος

αριθμητικών φίλτρων για να χρησιμοποιηθεί με το πρόγραμμα περιορίζεται σε 4.501 συντελεστές

5.7.2.2. Περιγραφή του προγράμματος DESPIKE

Το «DESPIKE» πρόγραμμα είναι ένα πρόγραμμα γραμμένο στο πρότυπο ‘Fortran 90’ για την προεπεξεργασία των παρατηρήσεων της γήινης παλίρροιας. Το «DESPIKE» ήταν ένα μέρος του μεγαλύτερου προγράμματος ‘PRETERNA’ που αναπτύχθηκε από τον H.-G. Wenzel το 1991. Το πρόγραμμα αυτό χρησιμοποιεί την τυπική μορφή του ETERNA για την αποθήκευση και την ανταλλαγή των υψηλών προδιαγραφών ανάλυσης και υψηλού ρυθμού παλίρροιας της Γης. Το τελικό αρχείο του DESPIKE μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας για την εισαγωγή σε ένα γραφικό επεξεργαστή PREGRED ή και στο πρόγραμμα ανάλυσης «ANALYZE» των παλιρροιών.

Το DESPIKE προσπαθεί αρχικά να απομακρύνει τα βήματα από τα δεδομένα (destepping). Οι μισοί ωριαίοι μέσοι όροι του παραμένοντος σήματος υπολογίζονται μαζί με τις τυπικές αποκλίσεις τους. Ένα βήμα γίνεται αντιληπτό αν υπερβαίνει τρεις φορές τα εκτιμώμενα για την τυπική απόκλιση δεδομένα.

Μετά την απομάκρυνση των βημάτων (destepping), το DESPIKE πρόγραμμα ξεκινά το βρόχο της αφαίρεσης των αιχμών (despiking). Το «despiking» διεξάγεται σε μια επαναληπτική αναζήτηση και αφαίρεση των αιχμών χρησιμοποιώντας τα αρχικά δείγματα του παραμένοντος σήματος από το τελευταίο κανάλι δεδομένων εισόδου.

Μετά τον προγραμματισμό για την αφαίρεση των αιχμών (despiking), το πρόγραμμα αναζητά κενά στα δεδομένα και προσπαθεί να παρεμβάλει τα δεδομένα στα κενά. Για την κάλυψη των κενών (degapping) μέσω παρεμβολής, το DESPIKE κοιτάζει πρώτα για τα κενά στα μετεωρολογικά κανάλια και στη συνέχεια παρεμβάλει τα κενά σε αυτά τα κανάλια από ένα πολυώνυμο 1ου βαθμού. Ο αριθμός των κενών περιορίζεται σε 500, και το μέγιστο μήκος του ενός κενού περιορίζεται σε 30.000 δείγματα. Έτσι, το μέγιστο μήκος του κένου εξαρτάται από το διάστημα δειγματοληψίας.

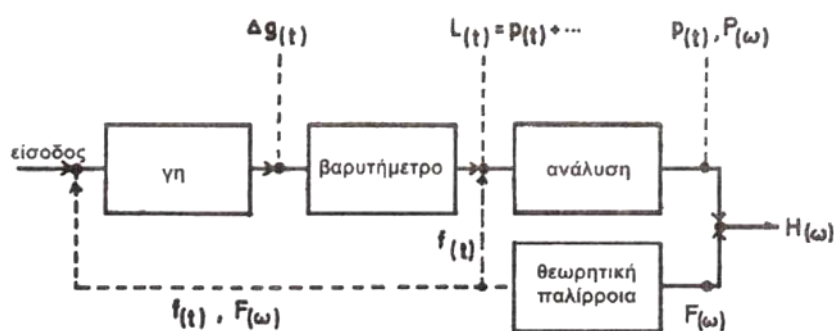
5.7.2.3. Περιγραφή του προγράμματος ANALYZE

Το πρόγραμμα «ANALYZE» είναι ένα πρόγραμμα γραμμένο και αυτό στο πρότυπο ‘Fortran 90’ για την ανάλυση των παλιρροϊακών παρατηρήσεων της Γης. Αποτελεί ένα συνδυασμό των ιδεών του Chojnicki (1973), του Schueller (1976) και του Wenzel (1976, 1977, 1994). Έχουν γίνει βέβαια σημαντικές βελτιώσεις και αλλαγές σε σύγκριση με τις προηγούμενες εκδόσεις του «ANALYZE». Το πρόγραμμα επιτρέπει τη ρύθμιση των παλιρροϊκών παραμέτρων, των μετεωρολογικών παραμέτρων παλινδρόμησης και των πολικών παλιρροϊκών παραμέτρων παλινδρόμησης, καθώς και τον υπολογισμό του φάσματος του πλάτους των υπολοίπων.

5.8. Ανάλυση των μετρήσεων – αποτελεσμάτων

Σκοπός της ανάλυσης των παλιρροϊκών μετρήσεων είναι ο προσδιορισμός των δύο βασικών παραμέτρων, δηλ. του πλάτους και της φάσης των παλιρροϊκών κυμάτων σε ένα σταθμό, ώστε να είναι δυνατός ο υπολογισμός της παλίρροιας στο σταθμό αυτό σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Στην πράξη, επειδή ο αριθμός των παρατηρήσεων που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση είναι περιορισμένος, δεν είναι δυνατό να προσδιοριστούν οι παράμετροι για κάθε κύμα χωριστά, αλλά για ομάδες κυμάτων. Τα μεγέθη που αναλύονται είναι οι αποκλίσεις της πραγματικής παλίρροιας από τις αντίστοιχες θεωρητικές τιμές της.

Η διαδικασία της παρατήρησης και ανάλυσης των παλιρροϊών περιγράφεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 57: Διάγραμμα της διαδικασίας παρατήρησης - ανάλυσης της παλίρροιας.

Το πεδίο επιταχύνσεων $f(t)$ που ενεργεί στη γη μπορεί να θεωρηθεί ως «είσοδος» σε ένα σύστημα που αποτελείται από τη γη, το όργανο παρατήρησης και τη μέθοδο της ανάλυσης. Το πεδίο $f(t)$ προκαλεί μια παραμόρφωση στο στερεό φλοιό της γης, στους ωκεανούς και στην ατμόσφαιρα, που είναι συνάρτηση του χρόνου. Το όργανο παρατήρησης όπως στην προκειμένη περίπτωση ήταν το βαρυτήμετρο αντιδρά στη στιγμιαία μεταβολή του μεγέθους του προκαλέσει η παλίρροια και αποδίδει ένα σήμα $L(t)$ που είναι συνάρτηση του χρόνου t . Σκοπός της ανάλυσης είναι από την παρατήρηση $L(t)$ να προσδιοριστεί η παλίρροια $p(t)$. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να γίνει η διόρθωση του θορύβου $s(t)$ που περιέχεται στην παρατήρηση καθώς και ο προσδιορισμός του όρου $d(t)$ δηλαδή του σήματος που προέρχεται από μεταβολή κάποιας παραμέτρου του οργάνου.

Στην συγκεκριμένη εργασία όπως έχει αναφερθεί και στις προηγούμενες ενότητες οι μετρήσεις διήρκησαν 8 ημέρες δηλαδή από τις 15 Ιουλίου 2015 έως τις 22 Ιουλίου 2015 στο εργαστήριο Γεωδαισίας – Τοπογραφίας του ΤΕΙ Αθήνας.

Με την ολοκλήρωση των μετρήσεων, τα δεδομένα λήφθηκαν από το όργανο και ήταν έτοιμα για ανάλυση. Οι παρατηρήσεις βρίσκονται σε ένα αρχείο .txt και η μορφή τους φαίνεται παρακάτω:

```
CG-5 SURVEY
Survey name: tides
Instrument S/N: 41242
Client: Α/ης ΒΙΒΕΗ
Operator: γΗ
Date: 2015/ 7/15
Time: 08:45:59
LONG: 23.6753006 E
LAT: 38.0013275 N
ZONE: 0
GMT DIFF.: 0.0
```

Εισαγωγικά στοιχεία, ονομασία της εργασίας.

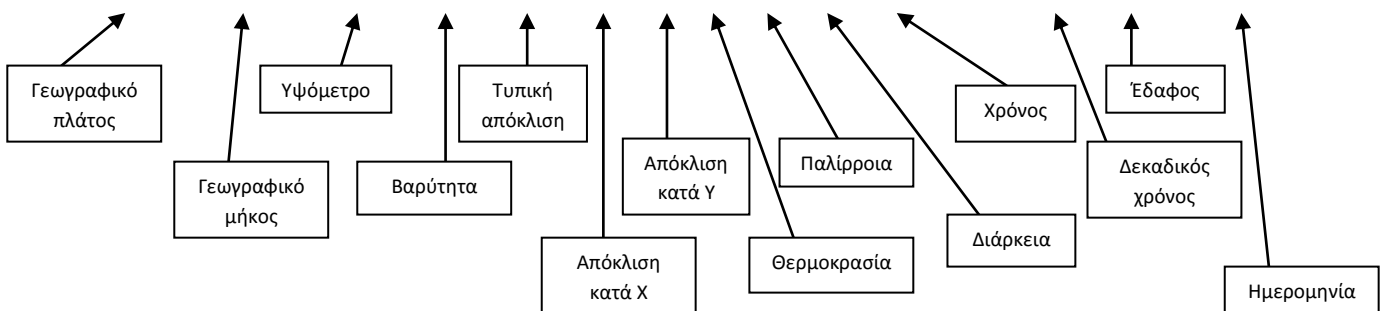
```
CG-5 SETUP PARAMETERS
Gref: 0.000
Gcall: 7753.542
TiltxS: 714.014
TiltyS: 666.615
Tiltx0: 5.606
Tilty0: 22.302
Tempco: -0.128
Drift: 1.657
DriftTime Start: 08:46:04
DriftDate Start: 2015/07/15
```

Ρυθμίσεις των παραμέτρων του οργάνου και υπολογισμός του συντελεστή ολίσθησης (drift).

```
CG-5 OPTIONS
Tide Correction: NO
Cont. Tilt: YES
Auto Rejection: YES
Terrain Corr.: NO
Seismic Filter: YES
Raw Data: NO
0.000S
```

Επιλογές βασικών παραμέτρων.

```
/-----LAT-----LONG-----ALT-----GRAV.---SD---TILT--TILTY-TEMP---TIDE---DUR-REJ-----TIME---DEC.TIME+DATE--TERRAIN--DATE
38.0013046 23.6769199 32.7635 3673.101 0.024 0.0 -0.9 -1.66 0.127 4 0 08:47:23 42169.36565 0.0000 2015/07/15
38.0013046 23.6757679 32.7635 3673.095 0.021 -0.1 -0.9 -1.66 0.127 4 0 08:47:31 42169.36574 0.0000 2015/07/15
38.0013046 23.6757679 32.7635 3673.092 0.039 -0.9 -1.2 -1.66 0.127 4 0 08:47:38 42169.36583 0.0000 2015/07/15
```

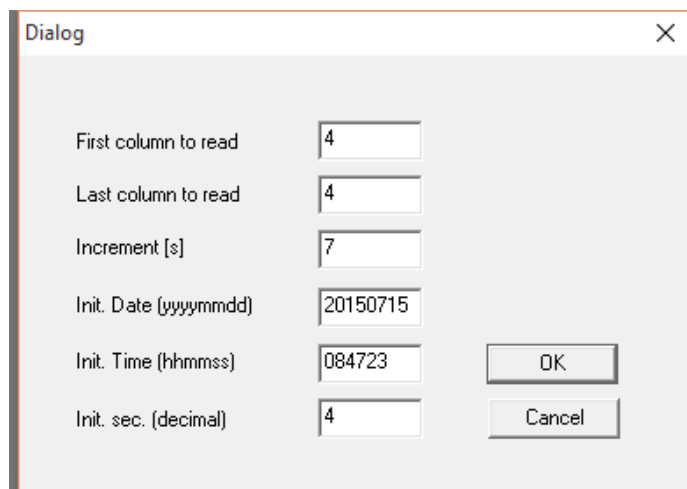


Στη συνέχεια, έγινε η εισαγωγή των μετρήσεων στο TSoft πρόγραμμα.



Εικόνα 58: Πρόγραμμα επεξεργασίας και ανάλυσης παλιρροϊκών δεδομένων.

Με την εισαγωγή των μετρήσεων εμφανίζεται στο πρόγραμμα το εξής παράθυρο διαλόγου:



First column to read	4
Last column to read	4
Increment [s]	7
Init. Date (yyyymmdd)	20150715
Init. Time (hhmmss)	084723
Init. sec. (decimal)	4

Εικόνα 59: Παράθυρο διαλόγου εισαγωγής σημαντικών στοιχείων των μετρήσεων.

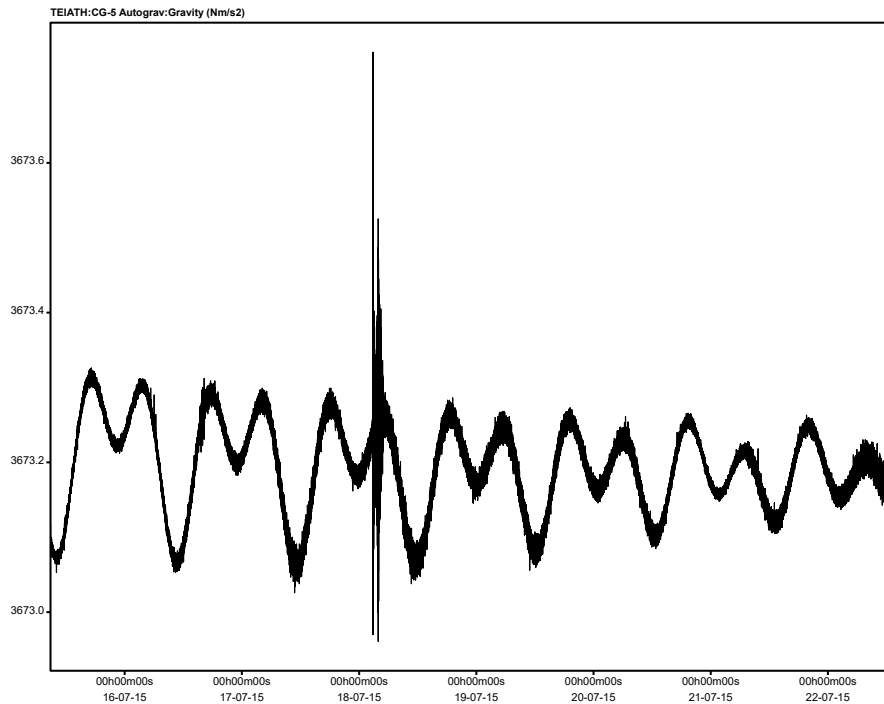
Η στήλη από τα δεδομένα που κυρίως εξετάζεται είναι η 4^η στήλη που αναφέρεται στην τιμή της βαρύτητας και πως αυτή κυμαίνεται. Η στήλη αυτή περιέχει την επίδραση από όλους τους παραγόντες που επηρεάζουν την βαρύτητα δηλαδή την Σελήνη, τον Ήλιο και τους πλανήτες και χωρίζεται από διάφορες ομάδες ανάλογα με την επίδραση από τη Σελήνη, τον Ήλιο και τους λοιπούς πλανήτες.

Τα «7» δευτερόλεπτα δείχνουν πόσο διαφέρει χρονικά η κάθε μέτρηση. Δηλαδή, η πρώτη μέτρηση έγινε στις 08:47:23 και η αμέσως επόμενη πραγματοποιήθηκε στις 08:47:31.

Στην επόμενη γραμμή έγινε εισαγωγή της ημερομηνίας όπου ξεκίνησαν οι μετρήσεις. Ύστερα, συμπληρώθηκε η ακριβώς ώρα έναρξης της πρώτης μέτρησης.

Στην τελευταία γραμμή, συμπληρώθηκε επίσης το χρονικό διάστημα της κάθε μέτρησης (interval time).

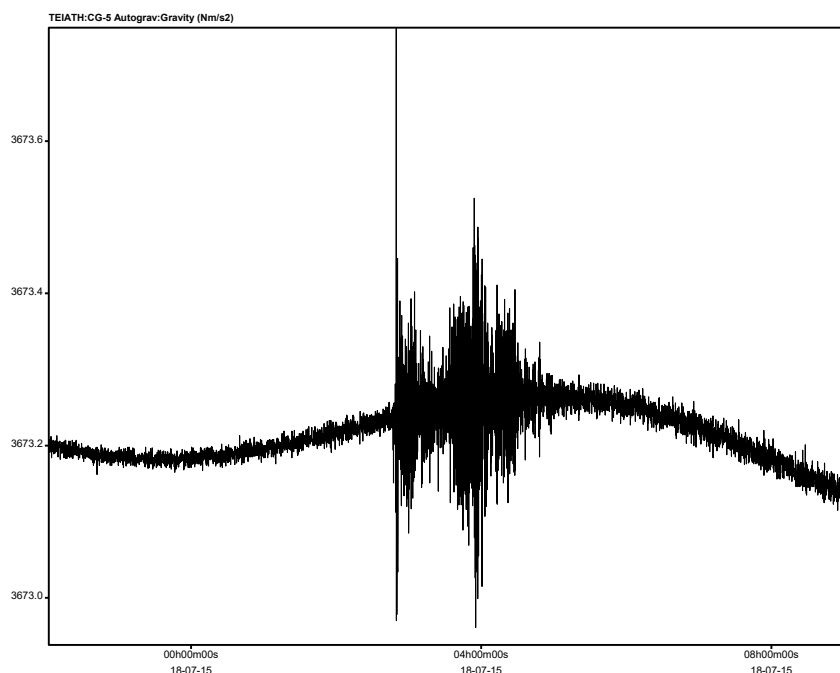
Με την ολοκλήρωση των εισαγωγικών αυτών στοιχείων, οι μετρήσεις σύμφωνα με το πρόγραμμα έχουν την εξής κυματώδης μορφή:

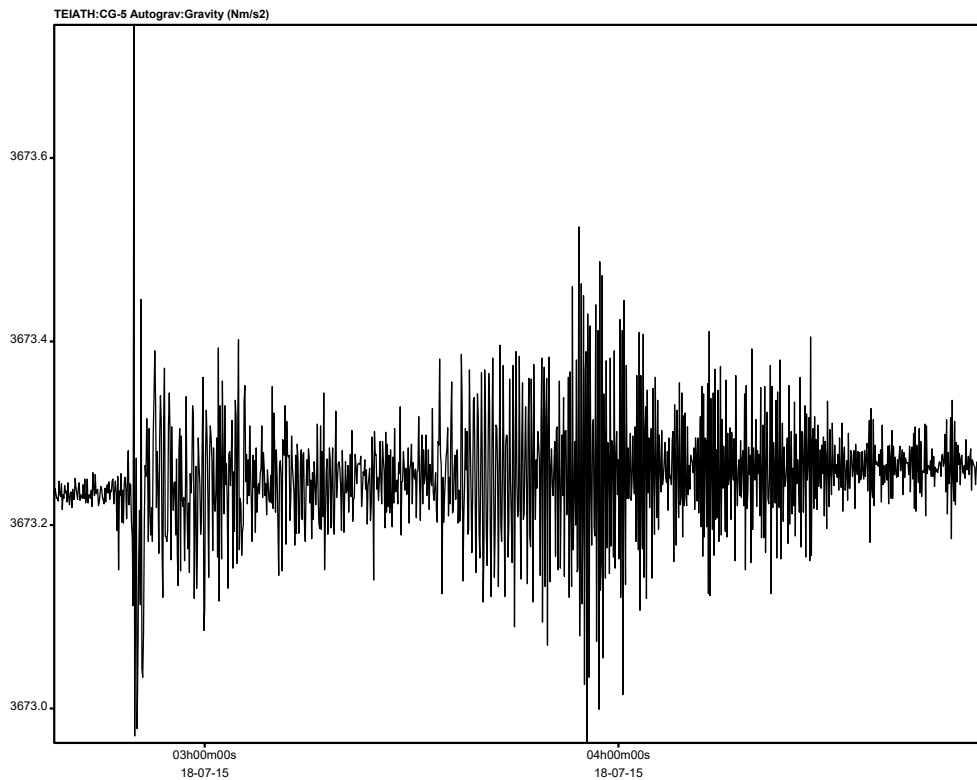


Εικόνα 60: Γράφημα με τις παρατηρήσεις 8 ημερών.

Στον Y άξονα είναι οι τιμές της βαρύτητας ενώ στον X άξονα είναι η ημερομηνία και ο χρόνος. Επιπλέον, έγινε και έλεγχος των παρατηρήσεων εάν η έναρξη και η λήξη των μετρήσεων είναι ίδιες με την φόρτωση τους στο πρόγραμμα. Πράγματι, οι τιμές της βαρύτητας από το Tsoft ήταν ίδιες και στην έναρξη και στην λήξη των μετρήσεων σύμφωνα με το αρχείο που λήφθηκε από το όργανο.

Στις 18/07/2015 όπως παρατηρείται και στις παρακάτω εικόνες υπάρχει πολύ μεγάλος θόρυβος στις παρατηρήσεις.





Εικόνα 61: Στην πρώτη εικόνα φαίνεται το τμήμα της εγγραφής με τις μεγαλύτερες αιχμές . Στην δεύτερη φαίνεται το ίδιο τμήμα σε μεγέθυνση.

Ο θόρυβος αυτός είχε διάρκεια 3 ώρες περίπου, από τις 02h:47m:10s έως τις 05h:00m:17s. Η περίπτωση να ήταν σεισμός απορρίφθηκε διότι εκείνο το χρονικό διάστημα και εκείνη την ημέρα δεν έγινε κανένας σεισμός. Πιθανολογείται κάποια εσωτερική διαταραχή στο εσωτερικό ή πλησίον του χώρου εγκατάστασης του βαρυτημέτρου (π.χ., λειτουργία air-condition ή συστήματος εξαερισμού των εγκαταστάσεων δρομολογητών που υπάρχουν στο χώρο), να αποτελεί την αιτία αυτής της διαταραχής. Προφανώς, με την επιλογή μιας καταλληλότερης θέσης για την εγκατάσταση μόνιμου παλιρροϊκού σταθμού τέτοια φαινόμενα θα εκλείψουν. Παρόλ' αυτά, για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, η ύπαρξη της διαταραχής αυτής αποτέλεσε ένα ιδανικό παράδειγμα απομάκρυνσης αιχμών και προβληματικών δεδομένων μέσω των προγραμμάτων προεπεξεργασίας.

Επόμενο στάδιο ήταν η δημιουργία της βάσης της τοποθεσίας απ'όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις. Η τοποθεσία αυτή ήταν το ΤΕΙ Αθήνας (ΤΕΙATH) με συντεταγμένες

- $\varphi=38^{\circ}.0028$
- $\lambda=23^{\circ}.6755$
- $h=107.789\text{m}$.

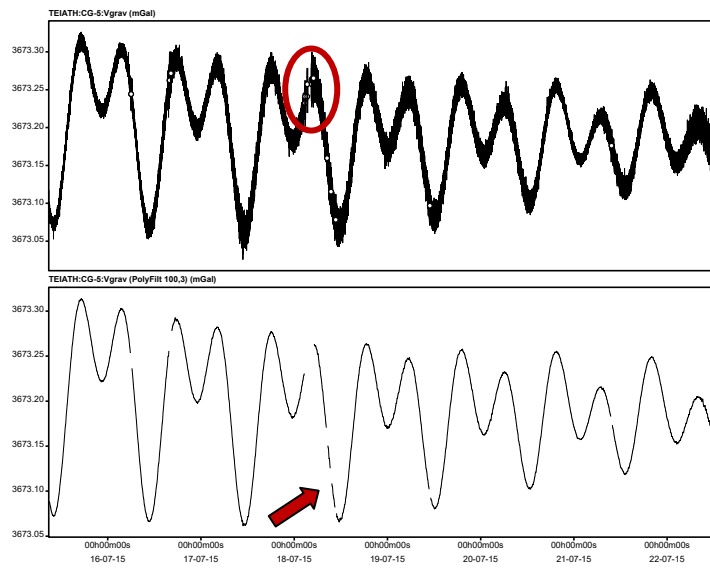
Αμέσως μετά την δημιουργία της τοποθεσίας, υπολογίστηκαν οι τιμές των παραμέτρων των παλινδρομικών κυμάτων, βάσει των θεωρητικών τιμών των ομάδων κυμάτων που είναι διαθέσιμες στο πρόγραμμα και οι οποίες φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Ελάχιστη Συχνότητα	Μέγιστη Συχνότητα	Συντελεστής Εύρους	Μετατόπιση Φάσης	Ομάδες Κύματος
0.000000	0.000001	1.00000	0.0000	DC
0.000140	0.002427	1.15800	0.0000	long
0.002428	0.249951	1.15694	0.0000	Mf
0.721500	0.906315	1.15423	0.0000	Q1
0.921941	0.940487	1.15422	0.0000	O1
0.958085	0.998028	1.14917	0.0000	P1
0.999853	1.003651	1.13501	0.0000	K1
1.005329	1.005623	1.26895	0.0000	PSI1
1.007595	1.011099	1.17016	0.0000	PHI1
1.013689	1.216397	1.15624	0.0000	OO1
1.719381	2.182843	1.16186	0.0000	All2
2.753244	3.381478	1.07350	0.0000	M3
3.381379	4.347615	1.03900	0.0000	M4

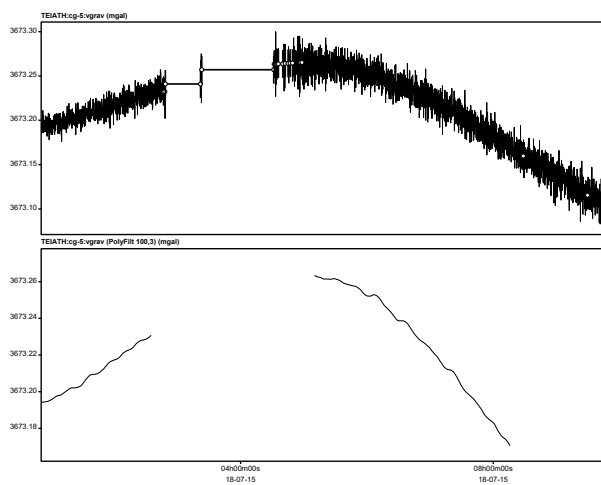
Έπειτα ακολούθησε ο προσδιορισμός της θεωρητικής παλινδρομίας αφού πρώτα έγινε η εξόμαλυνση (despike) και το φιλτράρισμα (filtering) των μετρήσεων.

Σε πρώτη φάση έπρεπε να απορριφθούν οι μεμονωμένες εσφαλμένες τιμές και γενικότερες διαταραχές μικρής σχετικά διάρκειας (μέχρι 3 ώρες), οι οποίες είναι εύκολο να διακριθούν οπτικά. Το κριτήριο απόρριψης μεμονομένων τιμών εξ αιτίας της διαφορετικής ποιότητας στις καταγραφές ήταν δυσκολότερο να προσδιοριστεί. Η απόκλιση στηρίζεται στον έλεγχο της απόκλισης μιας τιμής από την προσαρμογή (deviation). Το κριτήριο που τελικά επιλέχθηκε με βάση τα αποτελέσματα που έδωσε, βασίζεται στο $\sigma=0.1$ (όπου σ το τυπικό σφάλμα της προσαρμογής) με παράλληλη χρησιμοποίηση πάνω και κάτω του ορίου ανάλογα και το επίπεδο του θορύβου και 0.038 το προτινόμενο όριο των διαδοχικών επαναλήψεων με σκοπό να δημιουργηθούν τα κενά

(gaps). Έπειτα, έγινε διόρθωση των μετρήσεων μέσω του «polynomial filtering» όπου στην ουσία τα κενά παραμένουν ενώ εξομαλύνεται το σήμα.

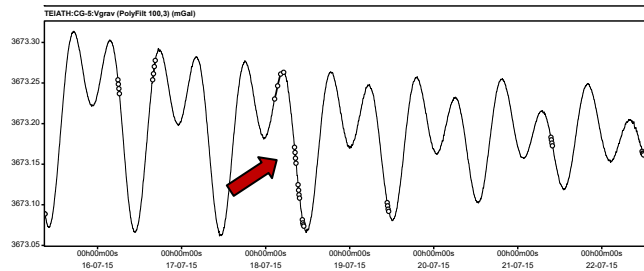
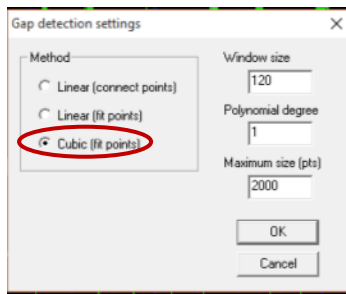


Εικόνα 62: Η εξομάλυνση της καταγραφής.

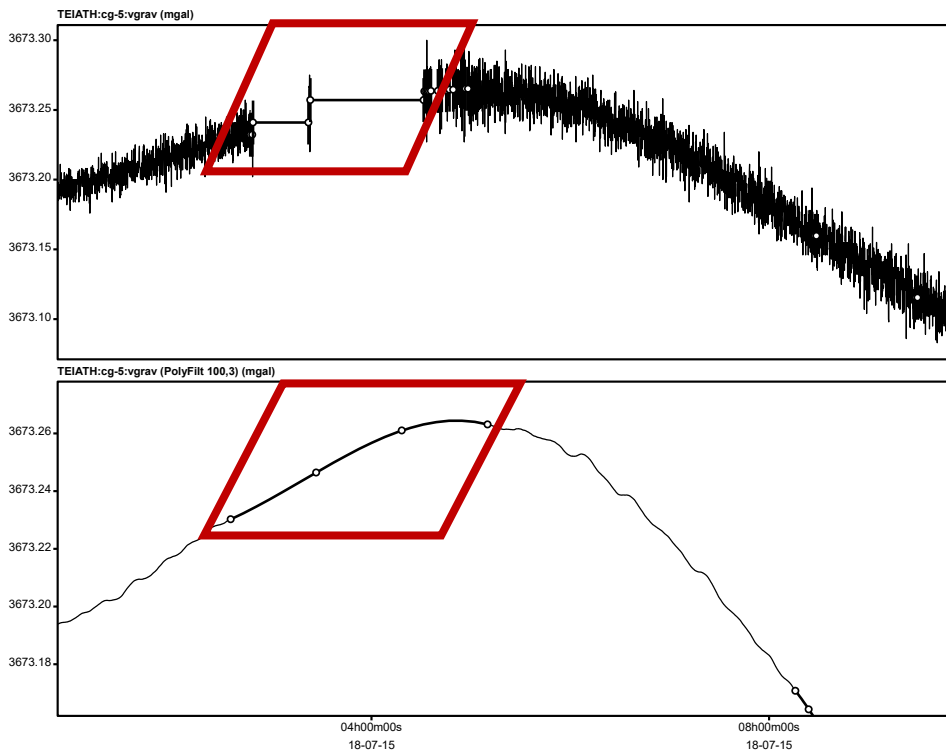


Εικόνα 63: Σε μεγέθυνση η εξομάλυνση ενός τμήματος χωρίς τις αιχμές από τα δεδομένα.

Μέσω της παρεμβολής (κυβικής) έγινε η σύνδεση των τμημάτων στα οποία υπήρχαν κενά.

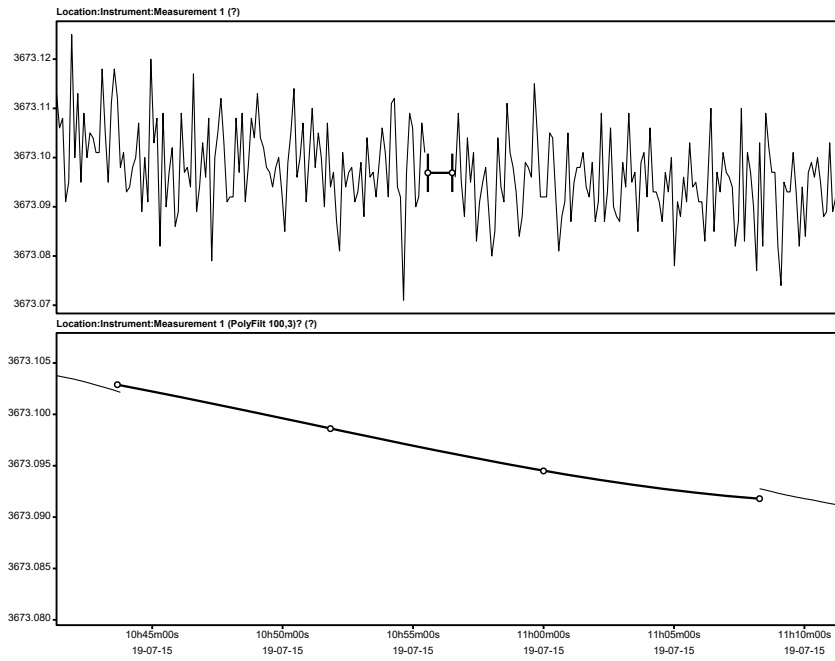


Εικόνα 64: Ένωση των τμημάτων με την βοήθεια της κυβικής παρεμβολής.



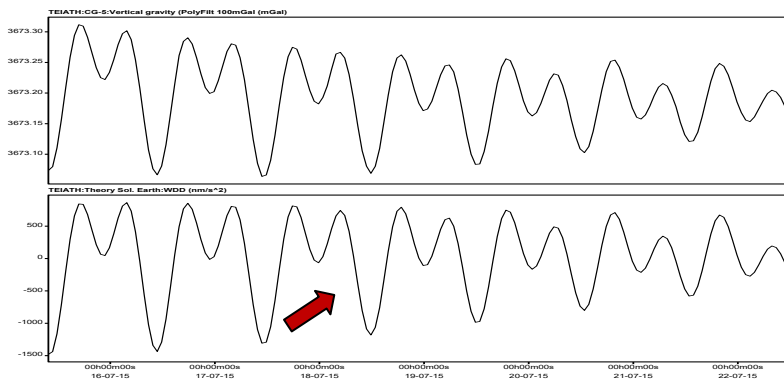
Εικόνα 65: Σε μεγέθυνση η συνένωση ενός τμήματος μετά την κυβική παρεμβολή.

Βέβαια αξίζει να παρατηρήθει ότι η συνένωση των τμημάτων δεν εφαρμόστηκε τέλεια αλλά για να μην υπάρχει μείωση της πληροφορίας στα δεδομένα με την εφαρμογή του φίλτρου ήταν προτιμότερο να γίνει η συνένωση.

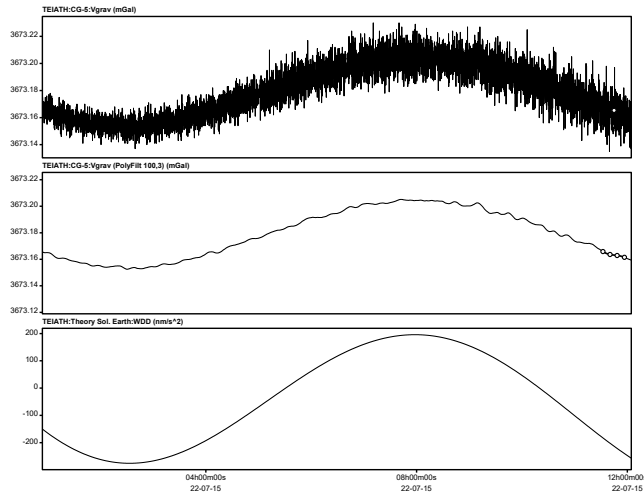


Εικόνα 66: Η μη καλή εφαρμογή της συνένωσης στα δεδομένα.

Μετά τη συνένωση υπολογίστηκε η θεωρητική παλίρροια η οποία φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



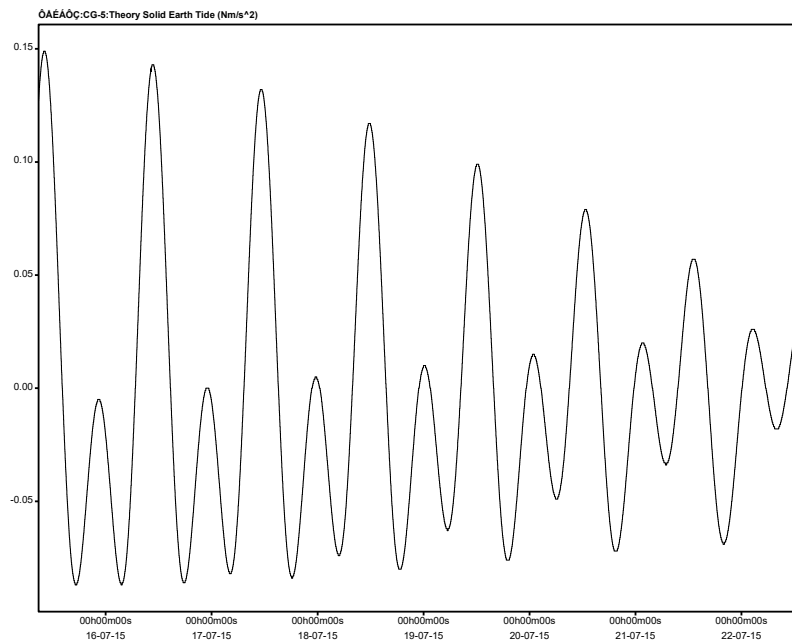
Εικόνα 67: Η φιλτραρισμένη παλίρροια και η θεωρητική παλίρροια υπολογισμένη από το TSoft πρόγραμμα.



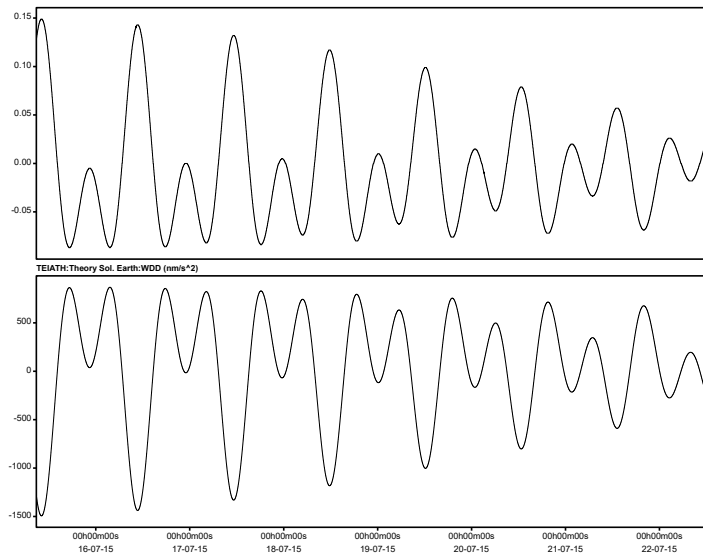
Εικόνα 68: Σε μεγέθυνση: α) Τα αρχικά δεδομένα, β) Η "φιλτραρισμένη" παλίρροια και γ) η θεωρητική παλίρροια.

Σε αυτή τη φάση αξίζει να τονιστεί ότι την θεωρητική την υπολογίζει και το ίδιο το βαρυτήμετρο και στην προκειμένη περίπτωση είναι η στήλη 9 (tide) από τις μετρήσεις που λήφθηκαν από το όργανο.

Στην παρακάτω εικόνα παρατηρείται η θεωρητική παλίρροια η οποία σύμφωνα με αυτήν είναι με ανάποδο πρόσημο με βάση το φ και το λ.

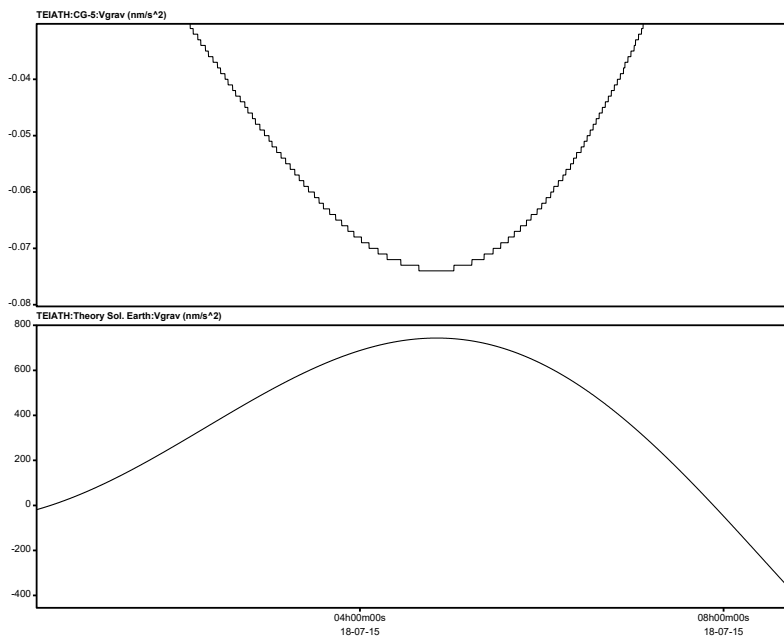


Εικόνα 69: Η θεωρητική παλίρροια υπολογισμένη από το βαρυτήμετρο CG-5.



Εικόνα 70: Η πρώτη περίπτωση είναι η θεωρητική παλίρροια από το ίδιο το όργανο και η δεύτερη περίπτωση είναι η θεωρητική παλίρροια από το TSoft πρόγραμμα.

Αξίζει να τονιστεί ότι η παλίρροια που είναι υπολογισμένη από το πρόγραμμα είναι καλύτερης ακρίβειας από αυτή που υπολόγισε το βαρυτήμετρο.

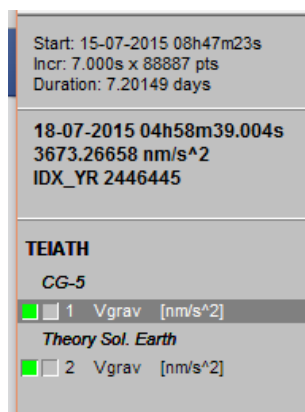


Εικόνα 71: Η πρώτη εικόνα είναι η θεωρητική παλίρροια από το βαρυτήμετρο χαμηλότερης ανάλυσης και ακρίβειας ενώ στην δεύτερη εικόνα είναι η θεωρητική από το Tsoft.

Επόμενο στάδιο ήταν η διόρθωση των ανεπεξέργαστων δεδομένων και ο υπολογισμός των υπολοίπων.

Ο υπολογισμός των υπολοιπόμενων μέσω του προγράμματος έγινε με την χρήση εξίσωσης ([1]-[2]), δηλαδή από την από τις αρχικές παρατηρήσεις μείον την θεωρητική παλίρροια που έχει υπολογιστεί μέσω του προγράμματος. Σύμφωνα με την παρακάτω εικόνα γίνεται αφαίρεση των δύο καναλιών που έχουν δημιουργηθεί.

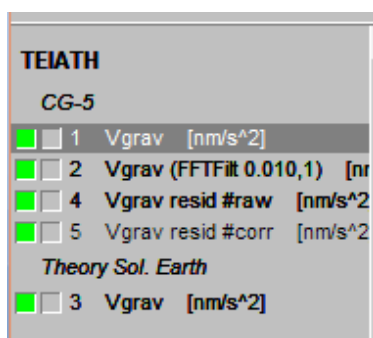
Αρχικά, υπολογίστηκε η θεωρητική παλίρροια και στο παράθυρο διαλόγου εμφανίζονται τα εξής κανάλια:



Εικόνα 72: Παράθυρο διαλόγου με τα αρχικά δύο κανάλια.

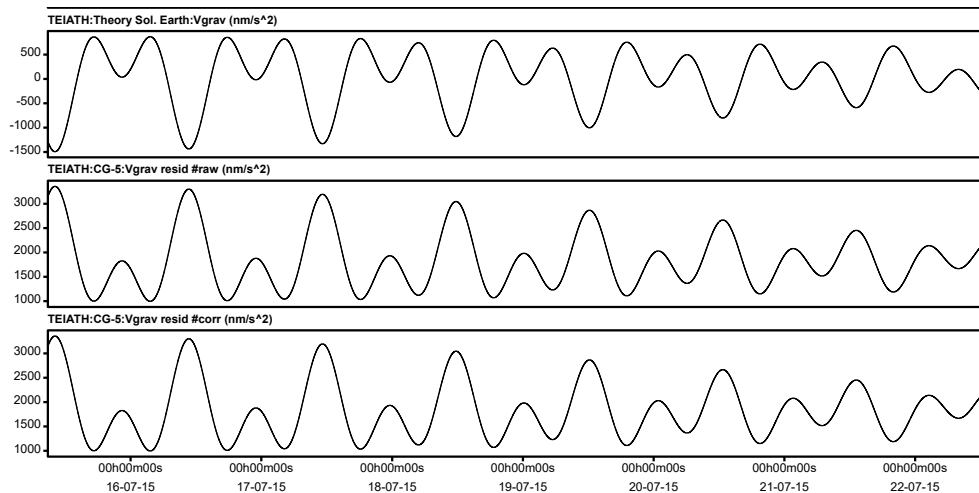
Στη συνέχεια, προστέθηκε ένα επιπλέον κανάλι το οποίο περιείχε τα μη διορθωμένα εναπομείναντα σφαλμάτα των ανεπεξέργαστων δεδομένων μέσω της παραπάνω εξίσωσης που αναφέρθηκε. Το νέο κανάλι που δημιουργήθηκε μετονομάστηκε σε “Vgrav resid #raw”. Έπειτα, για την δημιουργία ενός καναλιού που θα περιείχε τα διορθωμένα υπολοιπόμενα, έγινε αντιγραφή του προηγούμενου καναλιού και το νέο κανάλι μετονομάστηκε σε “Vgrav resid #corr”.

Στο παράθυρο διαλόγου στο Tsoft εμφανίζονται τα παρακάτω κανάλια:



Εικόνα 73: Τα νέα κανάλια μετά από υπολογισμό των υπολοιπόμενων.

Ενώ οι παλίρροιες μετά τους παραπάνω υπολογισμούς φαίνονται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 74: a) Η θεωρητική παλίρροια υπολογισμένη από το όργανο, b) Τα " μη διορθωμένα" υπολοιπόμενα, c) Τα τελικά διορθωμένα υπολοιπόμενα.

Επόμενο στάδιο, ήταν η εύρεση των παλιρροϊκών συντελεστών, συγκεκριμένα του συντελεστή πλάτους και της διαφοράς φάσης. Οι συντελεστές αυτοί υπολογίστηκαν αυτόματα από το πρόγραμμα μετά τον υπολογισμό της θεωρητικής παλίρροιας με την χρήση συγκεκριμένων ομάδων κυμάτων (Standard Groups):

a/a	Ομάδες κυμάτων	Ελάχιστη Συχνότητα (Hz)	Μέγιστη Συχνότητα (Hz)	Συντελεστής Εύρους (nm/s ²)	Διαφορά φάσης (deg)
Group 1	Long	0.00000	0.00243	78953.74541	-89.8
Group 2	Mf	0.00243	0.72000	3.01030	1.8
Group 3	Q1	0.72150	0.90631	1.98437	-1.7
Group 4	O1	0.92194	0.94049	2.13151	10.4
Group 5	NO1	0.95808	0.97419	72.75410	-116.2
Group 6	P1	0.98905	0.99803	655.58932	-55.1
Group 7	S1	0.99985	1.00015	48184.77004	-102.8
Group 8	K1	1.00183	1.00365	70.16102	2.0
Group 9	PSI1	1.00533	1.00562	9019.77320	11.7
Group 10	PHI1	1.00760	1.01110	2822.75604	41.6
Group 11	J1	1.01369	1.04480	43.26854	-104.8
Group 12	OO1	1.06484	1.21640	11.32008	-115.3
Group 13	2N2	1.71938	1.87214	1.01767	14.5
Group 14	N2	1.88839	1.90646	1.13666	5.3
Group 15	M2	1.92377	1.94275	1.14115	1.1
Group 16	L2	1.95823	1.97693	2.06433	-33.2
Group 17	S2	1.99179	2.00289	1.29832	6.4
Group 18	K2	2.00303	2.18284	1.89978	-3.2
Group 19	M3	2.75324	3.08125	1.07303	0.0

Η σημασία των περισσότερων ομάδων κυμάτων φαίνεται στον παρακάτω πίνακα. Οι βασικές ονομασίες προέρχονται από τα αρχικά M (moon) και S (Sun) και αναφέρονται σε συγκεκριμένες ομάδες συχνοτήτων των κυματισμών. Οι δείκτες 1 και 2 αναφέρονται σε ημερίσιες και ημι-ημερίσιες επιδράσεις. Περισσότερα για τις ονομασίες και την κατάταξη των ομάδων των κυματισμών αναφέρονται αναλυτικά από τον Darwin (1884):

a/a	Ομάδες κύματος	Αντιστοίχιση παλιρροϊκών επιδράσεων
Group 1	long	Παλίρροια μακράς περιόδου
Group 2	Mf	Δεκαπενθήμερη σεληνιακή επίδραση
Group 3	Q1	Μεγαλύτερη ελλειπτική από Ήλιο και Σελήνη
Group 4	O1	Ημερήσια Σεληνιακή επίδραση
Group 5	NO1	Ημερήσια Ελλειπτική Σεληνιακή επίδραση
Group 6	P1	Ημερήσια Ηλιακή Επίδραση
Group 7	S1	Κύρια Ηλιακή Επίδραση
Group 8	K1	Ημερήσια επίδραση της Σελήνης
Group 9	PS11	-
Group 10	PH11	-
Group 11	J1	-
Group 12	OO1	-
Group 13	2N2	Δεύτερης τάξης Σεληνιακή ελλειπτική επίδραση
Group 14	N2	Ημι-ημερίσια Σεληνιακή ελλειπτική επίδραση
Group 15	M2	Κύρια επίδραση Σελήνης
Group 16	L2	Μικρότερη σεληνιακή επίδραση (ημι-ημερίσια)
Group 17	S2	Κύρια Ημι-ημερίσια Ηλιακή Επίδραση
Group 18	K2	Ημι-ημερήσια επίδραση της Σελήνης
Group 19	M3	Συνιστώσα Κύριας επίδρασης Σελήνης (εξάωρη περίοδος)

6^ο Κεφάλαιο: Συμπεράσματα – Προτάσεις

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται σύνοψη όσων παρατηρήθηκαν στα προηγούμενα και αξιολογούνται τα σημαντικότερα αποτελέσματα της εργασίας. Παρουσιάζονται οι εργασίες μέτρησης, ανάλυσης και επεξεργασίας πρωτογενών παρατηρήσεων βαρύτητας με τη βοήθεια βαρυτημέτρου σχετικής μέτρησης. Για πρώτη φορά, μελετάται η ανάλυση των συνιστωσών των παλιρροϊκών επιδράσεων στην περιοχή του ΤΕΙ Αθήνας.

Το σύστημα καταγραφής των παλιρροϊκών δεδομένων είναι αρκετά εύκολο καθώς το βαρυτήμετρο ρυθμίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να καταγράφει τα δεδομένα ανά 1 δευτερόλεπτο χωρίς καμμία εξωτερική βοήθεια. Το σύστημα συλλογής των δεδομένων είναι και αυτό λειτουργικό διότι το βαρυτήμετρο καταγράφει σε εσωτερική μνήμη και τα δεδομένα λαμβάνονται στο τέλος της καταγραφής με την βοήθεια μιας USB θύρας. Η περιορισμένη χωρητικότητα της εσωτερικής μνήμης του βαρυτημέτρου οδηγεί σε περιορισμένες εγγραφές και μικρό διάστημα καταγραφής μετρήσεων. Για την ασφαλή ανάλυση των παλιρροϊών απαραίτητη κρίνεται η ύπαρξη διάταξης, η οποία να εξασφαλίζει την συνεχή καταγραφή δεδομένων, με τις λιγότερες δυνατές διακόπες. Η ύπαρξη δείγματος μετρήσεων μακράς χρονικής περιόδου θα εξασφαλίσει την ασφαλή εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικών με τη μελέτη της παλίρροιας του γήινου φλοιού στην περιοχή. Απαραίτητη, επίσης, κρίνεται και η ύπαρξη κατάλληλου χώρου-εργαστηρίου εγκατάστασης του σταθμού μέτρησης των παλιρροϊών, μακριά από εξωτερικές επιδράσεις για την καλύτερη ποιότητα των τελικών αποτελεσμάτων.

Ένα μειονέκτημα στη διαδικασία των μετρήσεων είναι και απουσία καταγραφής της θερμοκρασίας, της ατμοσφαιρικής πίεσης και της υγρασίας, στοιχεία τα οποία συνεισφέρουν στην καλύτερη μοντελοποίηση των παρατηρήσεων, αφού εφαρμοστούν οι κατάλληλες διορθώσεις.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την προεπεξεργασία των δεδομένων βελτίωσε σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα της καταγραφής και της ανάλυσης των παρατηρήσεων. Η απομάκρυνση των αιχμών (spikes) δημιούργησε κενά (gaps) στα παλιρροϊκά δεδομένα. Για να καλυφθούν αυτά τα κενά έπρεπε να γίνει συνένωση. Αξίζει να αναφερθεί ότι σε ορισμένες περιπτώσεις οι συνενώσεις των δεδομένων δεν ήταν τόσο καλές. Όμως, για να μην υπάρχει μείωση της πληροφορίας των μετρήσεων η συνένωση αυτή κρίθηκε απαραίτητο να πραγματοποιηθεί.

Αξίζει να τονιστεί ότι το βαρυτήμετρο κατέγραφε τις τιμές της παλίρροιας και ουσιαστικά υπολόγιζε την θεωρητική παλίρροια. Η θεωρητική παλίρροια που

υπολογίστηκε από το βαρυτήμετρο ήταν χαμηλότερης ανάλυσης από την θεωρητική παλίρροια που υπολογίστηκε από το Tsoft πρόγραμμα. Επιπλέον, λόγω του γεωγραφικού πλάτους και μήκους η παλίρροια από το όργανο εμφανίζεται με ανάποδο πρόσημο με την αντίστοιχη από το πρόγραμμα.

Όσον αφορά το βαρυτήμετρο μια βασική πρόταση που μπορεί να γίνει ώστε μελλοντικά η ποιότητα των παρατηρήσεων να είναι καλύτερη είναι να γίνεται ένας γενικότερος έλεγχος και συντήρηση του. Επιπλέον, με την πάροδο του χρόνου τα χαρακτηριστικά του ελατηρίου αλλάζουν και για το λόγο αυτό χρειάζεται συνεχής έλεγχος της βαθμονόμησης του, δηλαδή να γίνεται συνεχής επαναπροσδιορισμός των γραμμικών συντελεστών κλίμακας.

Προτείνεται επίσης, αφού γίνουν οι έλεγχοι και οι βελτιώσεις στο όργανο, η εγκατάσταση ενός παλιρροϊκού σταθμού στο ΤΕΙ Αθήνας με σκοπό την συνεχή λειτουργία του για να καλυφθεί το κενό σε αυτή την περιοχή. Με αυτό τον τρόπο, τα αποτελέσματα των αναλύσεων από τις συνεχείς καταγραφές, να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μελλοντικές βαρυτημετρικές εργασίες ακρίβειας.

Βιβλιογραφία

Ελληνική

Αραμπέλος Δ., (2000), *Βαρυτημετρία*, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.

Φωτίου Ι. Α., (2007), *Γεωμετρική Γεωδαισία, Θεωρία και Πράξη*, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.

Δεληκαράογλου Δ., (2003), Σημειώσεις του μαθήματος «*Γεωφυσικές Διασκοπήσεις – Βαρυτημετρία*» του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (Ε.Μ.Π), Α' Έκδοση, Αθήνα.

Δεληκαράογλου Δ., (2007), Σημειώσεις του μαθήματος «*Εισαγωγή στο Γήινο Πεδίο Βαρύτητας*» του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (Ε.Μ.Π), Α' Έκδοση, Αθήνα.

Μηλάς Π., (1992), Διδακτορική διατριβή, *Μελέτη των Γήινων Παλιρροιών Από Καταγραφές Βαρύτητας, Εφαρμογή στην Περιοχή των Αθηνών*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (Ε.Μ.Π), Αθήνα.

Μπιλλήρης Χ., (2006), Σημειώσεις του μαθήματος «*Εισαγωγή στη Γεωδαισία*» του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (Ε.Μ.Π), Αθήνα.

Βέργος Γ.Σ., (2014-2015), Παρουσιάσεις του μαθήματος «*Βαρυτημετρία*» του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης (Α.Π.Θ), Θεσσαλονίκη.

Τζιαβός Ν.Η. - Βέργος Γ.Σ., (2013-2014), Παρουσιάσεις του μαθήματος «*Εισαγωγή στο πεδίο βαρύτητας*» του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης (Α.Π.Θ), Θεσσαλονίκη.

Ξενόγλωσση

Wahr J., (1996), Class Notes of «*Geodesy and Gravity*», Department of Physics, University of Colorado, Boulder, CO 80309, pg. 261-281.

Torge W., (2001), *Geodesy*, 3rd completely revision and extended edition, Berlin and New York. pg.61-106,187-211.

Darwin G. H., (1884), *Report of the Fifty-Third Meeting of the British Association for the Advancement of Science*, London, pg. 118.