



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

Διπλωματική εργασία

ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΜΕ ΤΗΝ ΒΑΡΥΤΟΜΕΤΡΙΚΗ
ΜΕΘΟΔΟ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΕΝΕΡΓΟΥ
ΡΗΓΜΑΤΟΣ ΣΕ ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ
ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗΣ

Κυριακόπουλος
Κυριάκος

Επιβλέπων Καθηγητής
Αποστολόπουλος Γεώργιος

Αθήνα, 2023



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΜΕ ΤΗΝ ΒΑΡΥΤΟΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ
ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΕΝΕΡΓΟΥ ΡΗΓΜΑΤΟΣ ΣΕ ΠΑΡΑΚΤΙΑ
ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗΣ

Όνομα Φοιτητή: ΚΥΡΙΑΚΟΠΟΥΛΟΣ ΚΥΡΙΑΚΟΣ

Επιβλέπων Καθηγητής: Αποστολόπουλος Γεώργιος

ΑΘΗΝΑ, 2023



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΜΕ ΤΗΝ ΒΑΡΥΤΟΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ
ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΕΝΕΡΓΟΥ ΡΗΓΜΑΤΟΣ ΣΕ ΠΑΡΑΚΤΙΑ
ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗΣ

Όνομα Φοιτητή: ΚΥΡΙΑΚΟΠΟΥΛΟΣ ΚΥΡΙΑΚΟΣ

Επιβλέπων Καθηγητής: Αποστολόπουλος Γεώργιος

Εγκρίθηκε από την τριμελή
επιτροπή

.....
Γ. Αποστολόπουλος,
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Μ. Μενεγάκη,
Καθηγήτρια ΕΜΠ

.....
Ι. Βακαλάς,
Επικ. Καθηγητής ΕΜΠ

Copyright © Κυριακόπουλος Κυριάκος, 2023
Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All rights reserve

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Έχοντας πλέον βρεθεί στη δύση των πανεπιστημιακών μου σπουδών και στο τελευταίο κεφάλαιο της πορείας μου για την προπτυχιακή μου εκπαίδευση, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου σε όλους όσους με στήριξαν, ο καθένας με τον δικό του ξεχωριστό τρόπο, σε αυτό μου το εγχείρημα.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Αποστολόπουλο Γεώργιο, καθηγητή του Ε.Μ.Π. στον τομέα Μεταλλευτικής, και υπεύθυνο του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, ο οποίος αποτέλεσε κάτι παραπάνω από ακαδημαϊκό πρότυπο και κινητήριο δύναμη για την πορεία μου ως φοιτητής. Μέσω των μαθημάτων της Μεταλλευτικής Έρευνας αλλά κυρίως της Γεωφυσικής Έρευνας, με βοήθησε να οξύνω την κριτική μου σκέψη και αντίληψη και να αποκτήσω πολύτιμες εμπειρίες μέσω της συνεργασίας που είχαμε, τόσο εντός όσο και εκτός πανεπιστημιακών συνόρων. Η βοήθεια του, αποτέλεσε καταλυτικό παράγοντα για την περάτωση των σπουδών μου και χωρίς αυτή η εξέλιξη μου δεν θα ήταν δυνατή.

Έπειτα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Δημήτριο Καραϊσκό, υποψήφιο Διδάκτορα Μεταλλειολόγο-Μεταλλουργό, για την συμβολή του στην παρούσα διπλωματική εργασία, τόσο με τους μετρήσεις υπαίθρου, που πραγματοποιήθηκαν στην Αλεξανδρούπολη, όσο και με την βοήθειά του στην πορεία της συγγραφής τους.

Ένα ακόμη ευχαριστώ σε όλο το διδακτικό προσωπικό της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών του Ε.Μ.Π., για την προσφορά τους στην ακαδημαϊκή μου κατάρτιση, και για την γνώση που μου πρόσφεραν απλόχερα.

Τέλος, ένα **τεράστιο** ευχαριστώ, τους γονείς μου Ελένη και Γεώργιο, που μου έδωσαν την δυνατότητα για αυτό το «ταξίδι», το οποίο και δεν θα μπορούσα να ξεκινήσω χωρίς τη στήριξή τους, αλλά και σε όλο το οικογενειακό μου περιβάλλον το οποίο συνέβαλε για την σταδιοδρομία μου. Επίσης, η πορεία μου δεν θα μπορούσε να επιτευχθεί χωρίς την βοήθεια των **δικών μου ανθρώπων** τους οποίους και ευχαριστών βαθύτατα.

Είμαι και θα είμαι για πάντα ευγνώμων, σε όλους σας,

Κυριακόπουλος Κυριάκος

Ιούνιος, 2023

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η γεωφυσική έρευνα στην περιοχή νότια του Απαλού, Αλεξανδρούπολης, με την χρήση της μεθόδου της βαρυτικής διασκόπησης για τον εντοπισμό πιθανού ρήγματος στην περιοχή. Η συγκεκριμένη έρευνα αποτελεί κομμάτι ενός ευρύτερου έργου, για την κατασκευή αγωγού για μία Πλωτής Μονάδα Αποθήκευσης και Αεροποίησης, ο οποίος θα διαπερνά από την περιοχή έρευνας.

Πρώτο στάδιο του σχεδιασμού της γεωφυσικής έρευνας, αποτέλεσε η συγκέντρωση πληροφοριών για την γεωλογία και την τεκτονική της περιοχής, στάδιο το οποίο αποτέλεσε βάση για τον μετέπειτα σχεδιασμό της έρευνας. Έπειτα από το πρώτο (αναγνωριστικό) στάδιο, έγινε η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου για τον εντοπισμό του στόχου σε σχετικά μεγάλο βάθος, που αποτελεί ένα ρήγμα, με διεύθυνση Δ-Α. Λαμβάνοντας υπόψη λοιπόν την γεωλογία και την τεκτονική της περιοχής, η χρήση της βαρυτικής μεθόδου αποτέλεσε μια ιδανική λύση για την εύρεση και εκτίμηση της θέσης του ρήγματος.

Στην συνέχεια, για την ερμηνεία και την επεξεργασία των δεδομένων που συγκεντρώθηκαν από την περιοχή νότια του Απαλού, εξετάστηκαν περιπτώσεις από την διεθνή βιβλιογραφία, με παρόμοιες συνθήκες ή/και στόχους. Ακολούθησε η λήψη των δεδομένων στην περιοχή με κατάλληλο σχεδιασμό για τον ευκολότερο εντοπισμό του στόχου και έπειτα η επεξεργασία τους με την χρήση κατάλληλων λογισμικών για την μελέτη τους.

Τέλος, παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε χάρτες, με κάποιες εκτιμήσεις για τον στόχο της έρευνας, καθώς και ο σχολιασμός και τα συμπεράσματα για τις βαρυτικές ανωμαλίες που παρατηρήθηκαν κατά την διάρκεια των αποτελεσμάτων.

ABSTRACT

The subject of the present thesis is the geophysical investigation in the area south from Apalos, Alexandroupolis, using the gravity method to locate a possible fault in the area. This survey is part of a larger project for the construction of a pipeline for a Floating Storage and Regasification Unit, which will pass through the survey area.

The first stage of the geophysical survey, was to gather information on the geology and tectonics of the area, a stage which formed the basis for the subsequent survey design. After the first (reconnaissance) stage, a suitable method was selected to locate the target, which is the fault. Therefore, taking into account the geology and tectonics of the area, the use of the gravity method was an ideal solution for finding and assessing the fault in a relatively great depth.

Subsequently, to interpret and process the data collected from the area south of Appaloosa, cases from the international literature with similar conditions and/or targets were examined. This was followed by acquiring the data in the area with a suitable design to facilitate target location and then processing the data using appropriate software for research.

Finally, the results of the measurements were presented on maps, with some estimates for the location of the target, as well as commentary and conclusions on the gravitational anomalies observed during the results.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	I
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	III
ABSTRACT	IV
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	- 3 -
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	- 4 -
1.1. ΓΕΝΙΚΑ	- 4 -
1.2. ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ	- 5 -
1.3. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ.....	- 6 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	- 8 -
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	- 9 -
2.1. ΒΑΡΥΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ.....	- 9 -
2.1.1. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	- 9 -
2.1.2. ΑΡΧΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥ	- 9 -
2.1.3. ΌΡΓΑΝΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	- 11 -
2.2. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ	- 12 -
2.3. ΒΑΡΥΤΙΚΕΣ ΔΙΟΡΘΩΣΕΙΣ.....	- 14 -
2.3.1. DRIFT CORRECTION.....	- 15 -
2.3.2. ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΟΥ ΠΛΑΤΟΥΣ	- 15 -
2.3.3. ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΕΛΕΥΘΕΡΟΥ ΑΕΡΑ.....	- 16 -
2.3.4. ΔΙΟΡΘΩΣΗ BOUGUER	- 17 -
2.3.5. ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΟΡΘΩΣΗ.....	- 17 -
2.4. ΑΝΩΜΑΛΙΑ BOUGUER – ΜΕΘΟΔΟΣ NETTLETON	- 20 -
2.4.1. ΑΝΩΜΑΛΙΑ BOUGUER	- 20 -
2.4.2. ΜΕΘΟΔΟΣ NETTLETON.....	- 20 -
2.5. ΑΝΩΜΑΛΙΕΣ ΜΙΚΡΗΣ ΚΑΙ ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ (RESIDUAL - REGIONAL)	- 23 -
2.6. ΠΡΩΤΗ ΠΑΡΑΓΩΓΟΣ ΒΑΡΥΤΙΚΩΝ ΑΝΩΜΑΛΙΩΝ	- 26 -
2.7. ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΒΑΡΥΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	- 27 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	- 28 -
3. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΒΑΡΥΤΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΥΡΕΣΗ ΤΗΣ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΣΤΗ ΔΙΕΘΝΗ ΒΙΟΓΡΑΦΙΑ	- 29 -
3.1. ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΗΠΙΩΝ ΡΗΓΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΥΠΟΒΑΘΡΟΥ, ΜΕ ΒΑΡΥΤΙΚΑ ΚΑΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΣΤΗ ΛΕΚΑΝΗ ΤΗΣ ΑΛΜΠΕΡΤΑ, ΤΟΥ ΚΑΝΑΔΑ. (LYATSKY ET. AL., 2004)	- 29 -
3.1.1. ΓΕΝΙΚΑ	- 29 -
3.1.2. ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	- 31 -
3.1.3. ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	- 33 -
3.1.4. ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑ ΒΗΜΑΤΩΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ	- 33 -
3.1.5. ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ	- 35 -
3.2. ΒΑΡΥΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΩΣ ΜΕΣΟ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΡΗΓΜΑΤΩΝ. ΥΠΟΓΕΙΑ ΡΗΓΜΑΤΑ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΛΜΑΔΑ, ΒΡΑΖΙΛΙΑ. (VALERIA C. F. BARBOSA ET. AL., 2007)	- 36 -
3.2.1. ΓΕΝΙΚΑ	- 36 -
3.2.2. ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΔΟΜΗ	- 36 -
3.2.3. ΒΑΡΥΤΟΜΕΤΡΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΥΚΝΩΤΗΤΑΣ	- 37 -
3.2.4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ	- 40 -
3.2.5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	- 40 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο: ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	- 41 -

4.	ΒΑΡΥΤΟΜΕΤΡΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΣΕ ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗΣ .	- 42 -
4.1.	ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	- 42 -
4.2.	ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	- 43 -
4.3.	ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ.....	- 45 -
4.4.	ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΈΡΕΥΝΑ – ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΥΠΑΙΘΡΟΥ	- 47 -
4.4.1.	ΜΕΘΟΔΟΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΈΡΕΥΝΑΣ	- 47 -
4.4.2.	ΒΑΡΥΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΥΠΑΙΘΡΟ	- 48 -
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ	- 50 -
5.	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΒΑΡΥΤΙΚΟΙ ΧΑΡΤΕΣ	- 51 -
5.1.	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	- 51 -
5.1.1.	ΒΑΡΥΤΙΚΕΣ ΔΙΟΡΘΩΣΕΙΣ.....	- 51 -
5.1.2.	ΜΕΘΟΔΟΣ ΦΩΤΟΣΚΙΑΣΗΣ	- 52 -
5.2.	ΒΑΡΥΤΙΚΟΙ ΧΑΡΤΕΣ	- 53 -
5.2.1.	ΓΕΝΙΚΑ	- 53 -
5.2.2.	ΧΑΡΤΗΣ ΑΝΩΜΑΛΙΑΣ BOUGUER	- 54 -
5.2.3.	ΧΑΡΤΗΣ ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΑΝΩΜΑΛΙΑΣ	- 55 -
5.2.4.	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΧΑΡΤΗ ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΑΝΩΜΑΛΙΑΣ	- 56 -
5.2.5.	ΧΑΡΤΗΣ ΜΙΚΡΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΑΝΩΜΑΛΙΑΣ	- 57 -
5.2.6.	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΧΑΡΤΗ ΜΙΚΡΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΑΝΩΜΑΛΙΑΣ.....	- 58 -
5.2.7.	ΧΑΡΤΗΣ ΠΡΩΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΟΥ.....	- 59 -
5.2.8.	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΧΑΡΤΗ ΠΡΩΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΟΥ	- 60 -
5.2.9.	ΧΑΡΤΗΣ ΦΩΤΟΣΚΙΑΣΗΣ ΜΙΚΡΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΑΝΩΜΑΛΙΑΣ	- 61 -
5.2.10.	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΧΑΡΤΗ ΦΩΤΟΣΚΙΑΣΗΣ ΜΙΚΡΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΑΝΩΜΑΛΙΑΣ.....	- 62 -
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	- 63 -
6.	ΣΧΟΛΙΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	- 64 -
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	- 69 -

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1. Εισαγωγή

1.1. Γενικά

Η έρευνα αλλά και η εξόρυξη μετάλλων δεν αποτελεί στοιχείο του σύγχρονου πολιτισμού, ωστόσο, τα αρχικά βήματα στην **Εφαρμοσμένη Γεωφυσική**, ως προς την εύρεση μετάλλων, παρουσιάστηκαν το 1843 από τον *Von Wrede*, και εδραιώθηκαν το 1879 από τον *Robert Thalén* με το σύγγραμμα *On the Examination of Iron Ore Deposit by Magnetic Methods* (W.M.Telford et. al. ,1990). Η **Εφαρμοσμένη Γεωφυσική**, αποτελεί την επιστήμη που εφαρμόζει αρχές φυσικής για την έρευνα του υπεδάφους της γης. Η γεωφυσική έρευνα του εσωτερικού της γης, έχει ως φυσικό επακόλουθο τις μετρήσεις των φυσικών ιδιοτήτων στο στρώμα της. Η ανάλυση αυτών των μετρήσεων μπορεί να αποκαλύψει με ποιόν τρόπο οι διάφορες φυσικές ιδιότητες των πετρωμάτων του εσωτερικού της γης, μπορεί να μεταβάλλονται στις διάφορες κατευθύνσεις ενδιαφέροντος.

Οι γεωφυσικές μέθοδοι μπορούν να εφαρμοστούν σε αρκετές κλίμακες, με αποτέλεσμα ένα ευρύ φάσμα από έρευνες, που μπορούν και εξετάζουν, από ολόκληρη την γη, έως τοπικές περιοχές του ανώτερου φλοιού. Ένα παράδειγμα του φάσματος των εφαρμογών, της εφαρμοσμένης γεωφυσικής, αποτελεί, η χρήση ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων, για μία τοπική έρευνα, όπως η αναζήτηση αρχαιολογικών δομών (π.χ αρχαία τοιχία), αλλά και η χρήση σεισμικών μετρήσεων, για μία μεγάλης κλίμακας έρευνα, όπως η εύρεση ενός ταμιευτήρα υδρογονανθράκων.

Οι εκτιμήσεις που προκύπτουν από τα δεδομένα μιας γεωφυσικής έρευνας, αποδίδουν μια εικόνα ενός γεωλογικού υποβάθρου, το οποίο μπορεί να αποκλίνει απο τη πραγματική του φύση. Η απόκλιση αυτή μπορεί να οφείλεται σε πολλούς λόγους, κύρια αιτία της, όμως, αποτελεί η αβεβαιότητα που συνοδεύει την γεωφυσικής έρευνα, όπως αναλύεται και παρακάτω στην ερμηνεία βαρυτικών δεδομένων (2^ο Κεφάλαιο). Ωστόσο, η γεωφυσική έρευνα αποτελεί μία γρήγορη και οικονομική λύση για την έρευνα γεωλογικών στόχων, χωρίς αυτό να σημαίνει την πάντοτε ακριβή απεικόνιση τους, ενώ τέλος, η συμβολή

της αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο για την μεγιστοποίηση της απόδοσης της έρευνας, μειώνοντας το ποσοστό των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων, παράγοντας ο οποίος καθορίζει μεγάλο ποσοστό του κόστους της έρευνας.

1.2. Γεωφυσικές Μέθοδοι

Η γεωφυσική έρευνα εμπεριέχει πληθώρα μεθόδων, οι οποίες διακρίνονται στις παθητικές μεθόδους, δηλαδή σε αυτές που χρησιμοποιούν τα φυσικά πεδία της γης, όπως η βαρυτική και μαγνητική μέθοδος, και στις ενεργητικές μεθόδους, οι οποίες απαιτούν τη διοχέτευση τεχνητά παραγόμενης ενέργειας στο υπέδαφος, όπως η σεισμική και η ηλεκτρική μέθοδος. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι κυριότερες μέθοδοι, που χρησιμοποιούνται στην γεωφυσική έρευνα:

Μέθοδοι	Μετρούμενα Μεγέθη	Φυσική Ιδιότητα Ενδιαφέροντος
Σεισμική	Χρόνος διάδοσης κυμάτων ανάκλασης ή διάθλασης	Πυκνότητα και μέτρο ελαστικότητας
Βαρυτική	Ένταση του Βαρυτικού Πεδίου	Πυκνότητα
Μαγνητική	Ένταση του Γεωμαγνητικού Πεδίου	Μαγνητική Επιδεκτικότητα και Παραμένων Μαγνητισμός
Ηλεκτρική		
↳ Ειδική Αντίσταση	Ηλεκτρική Αντίσταση του υποβάθρου	Ηλεκτρική Αγωγιμότητα
↳ Επαγόμενη Πολικότητα	Ένταση παροδικά μεταβαλλόμενου δυναμικού	Ηλεκτρική Χωρικότητα
↳ Φυσικό Δυναμικό	Ηλεκτρικό δυναμικό	Ηλεκτρική Αγωγιμότητα
↳ Ηλεκτρομανητική	Απόκριση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας	Ηλεκτρική Αγωγιμότητα και Επαγωγή
↳ Γεωραντάρ	Χρόνος διάδοσης των ανακλώμενων παλμών του Γεωραντάρ	Δηλεκτρική Σταθερά

Πίνακας 1 - Γεωφυσικές Μέθοδοι

Η επιλογή της κατάλληλης γεωφυσικής μεθόδου για την έρευνα μίας περιοχής ενδιαφέροντος στηρίζεται σε μεγάλο ποσοστό, στην διαφορά των τιμών μίας φυσικής ιδιότητας (όπως π.χ. πυκνότητα, ειδική αντίσταση, κτλ.) των πετρωμάτων που υπάρχουν στο

υπέδαφος της περιοχής. Αυτό σημαίνει ότι σε μία περιοχή όπου τα πετρώματα μπορεί να έχουν παρόμοιες τιμές για μία συγκεκριμένη φυσική ιδιότητα, δεν προτιμάται η έρευνα με τη γεωφυσική μέθοδο που χρησιμοποιεί τη συγκεκριμένη φυσική ιδιότητα. Εάν για παράδειγμα, σε μία περιοχή έρευνας τα πετρώματα έχουν παραπλήσιες τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας, δεν θα επιλεγθεί ως μέθοδος έρευνας η μέθοδος της ειδικής αντίστασης, εφόσον ο στόχος της έρευνας είναι η απεικόνιση του πετρώδους υποβάθρου.

Παρά το γεγονός ότι οι παρόμοιες τιμές στις μετρήσεις της γεωφυσικής έρευνας για μία συγκεκριμένη φυσική ιδιότητα, μπορούν να αποβούν καταλυτικές για την απόρριψη μίας γεωφυσικής μεθόδου, δεν αποτελούν μοναδικό κριτήριο για την επιλογή της βέλτιστης, ή και για τον συνδυασμό μεθόδων. Ένας από τους παράγοντες που μπορεί, επίσης, να επηρεάσει την επιλογή της κατάλληλης γεωφυσικής μεθόδου, αποτελεί και το βάθος διασκόπησης, δηλαδή το βάθος στο οποίο μια μέθοδος είναι ικανή να αποδώσει κάποιο αποτέλεσμα. Για παράδειγμα, οι μετρήσεις των βαρυτικών ή των μαγνητικών μεθόδων, δεν έχουν κάποιον περιορισμό, αναφορικά με το βάθος διασκόπησης τους, πράγμα που καθιστά τις συγκεκριμένες μεθόδους ιδανικές για την έρευνα σε μεγάλα βάθη.

Τέλος, κρίσιμο ρόλο στην επιλογή της βέλτιστης γεωφυσικής μεθόδου παίζει το κόστος. Ο συγκεκριμένος παράγοντας έχει διακυμάνσεις, όχι μόνο ανάμεσα στις διάφορες γεωφυσικές μεθόδους, αλλά και σε μία συγκεκριμένη μέθοδο. Πιο συγκεκριμένα, ανάλογα με την έκταση της έρευνας και το πλήθος των μετρήσεων, οι τιμές μπορεί να μεταβάλλονται ακόμη και για την ίδια γεωφυσική μέθοδο. Παραδείγματος χάρη, οι τιμές για την πραγματοποίηση χερσαίων σεισμικών μετρήσεων, παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση σε σχέση με τις τιμές παράκτιων σεισμικών μετρήσεων, πράγμα το οποίο οφείλεται τόσο στη διαφορά του εξοπλισμού, όσο και στην πολύπλοκη φύση της παράκτιας έρευνας.

1.3. Αντικείμενο Διπλωματικής

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αποτελεί η γεωφυσική έρευνα σε παραλιακή περιοχή της Αλεξανδρούπολης. Αναλυτικότερα, η έρευνα διεξήχθη νοτιοδυτικά του αερολιμένα «Δημόκριτος», της Αλεξανδρούπολης, όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις.

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας, είναι ο εντοπισμός ενεργού ρήγματος στην παραπάνω περιοχή, ως προς την κατασκευή αγωγού φυσικού αερίου, ενώ η μέθοδος, η οποία επιλέχθηκε για τις μετρήσεις, είναι η βαρυτομετρική μέθοδος, η οποία αποτελεί αξιόπιστο εργαλείο για τον εντοπισμό βαθέων γεωλογικών δομών. Εκτός από τις γεωφυσικές μετρήσεις, είναι αναγκαία και η τοπογραφία της περιοχής για τις διάφορες διορθώσεις των μετρήσεων, όπως παρουσιάζεται και στο επόμενο κεφάλαιο, αλλά και η γεωλογία της περιοχής.

Η λήψη των βαρυτομετρικών μετρήσεων της παρούσας διπλωματικής εργασίας, έγινε με εξοπλισμό του εργαστηρίου Γεωφυσικής της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων και Μεταλλουργών, ενώ επιβλέπων της αποστολής ήταν ο Δρ. Γ. Αποστολόπουλος. Μέρος του ανθρώπινου δυναμικού της έρευνας, αποτέλεσε επίσης και ο Δ.Καραΐσκος υποψήφιος διδάκτορας της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων και Μεταλλουργών.



Εικόνα 1 - Έκλινα από τις βαρυτικές μετρήσεις στην Αλέξανδρούπολη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο
ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2. Θεωρητικό Μέρος

2.1. Βαρυτική Μέθοδος

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, πραγματοποιήθηκαν βαρυτομετρικές μετρήσεις σε παράκτια περιοχή της Αλεξανδρούπολης, ως προς τον εντοπισμό ενεργού ρήγματος, όπως προαναφέρθηκε.

2.1.1. Ιστορική Αναδρομή

Η ύπαρξη του βαρυτικού πεδίου δεν αποτελεί μία νέα ανακάλυψη για τον κόσμο της επιστήμης. Από το 16^ο αιώνα η ανθρωπότητα είχε ήδη ξεκινήσει την εξερεύνηση της βαρυτικής δύναμης, με τον *Isaac Newton* να διατυπώνει τον νόμο της βαρυτικής έλξης, στα τέλη του 17^{ου} αιώνα. Ωστόσο, η πρώτη βαρυτική μέτρηση πραγματοποιείται αρκετά αργότερα, στα τέλη του 19^{ου} αιώνα, από τον Ούγγρο φυσικό, *Baron Roland von Eötvös* με την χρήση ενός ζυγού στρέψης, ενώ το πρώτο βαρυτόμετρο τύπου LaCoste εμφανίστηκε το 1939. Τέλος, αποτελεί άξιο αναφοράς, πως καθ' όλη τη πορεία των ετών διάφορες μηχανικές και υπολογιστικές τεχνικές έχουν βρει εφαρμογή πάνω, τόσο στην επιστήμη της γεωφυσικής όσο και στη βαρυτομετρική μέθοδο, όπως για παράδειγμα η εφαρμογή του ηλεκτρονικού υπολογιστή, η οποία και διευκόλυνε στον υπολογισμό και στην ερμηνεία των δεδομένων βαρύτητας.

2.1.2. Αρχές μεθόδου

Η βαρυτομετρική μέθοδος αξιοποιεί τις διαφορές στο βαρυτικό πεδίο της γης, οι οποίες προκαλούνται από τις τοπικές διαφορές στην πυκνότητα των πετρωμάτων, που

βρίσκονται πιο κοντά στην επιφάνεια της γης. Λόγω της φύσης της μεθόδου, η οποία χρησιμοποιεί ένα φυσικό πεδίο της γης, δεν υπάρχει κάποιο συγκεκριμένο βάθος διασκόπησης, πράγμα το οποίο σημαίνει πως οι μετρήσεις είναι ένα αποτέλεσμα όλων των υπεδιαφικών υλικών, έως και τον πυρήνα της γης.

Οι μεταβολές στην επιτάχυνση της βαρύτητας, αποτελούν το μετρούμενο μέγεθος για την βαρυτομετρική μέθοδο και οι μετρήσεις χρησιμοποιούν το **1 gal (cm/sec²)** ως μονάδα μέτρησης ή το **1 gu (=0.1 mGal)**. Παρακάτω δίνεται ο γενικός τύπος της επιτάχυνσης της βαρύτητας:

$$g = G * \frac{M}{r^2}$$

g: επιτάχυνση της βαρύτητας

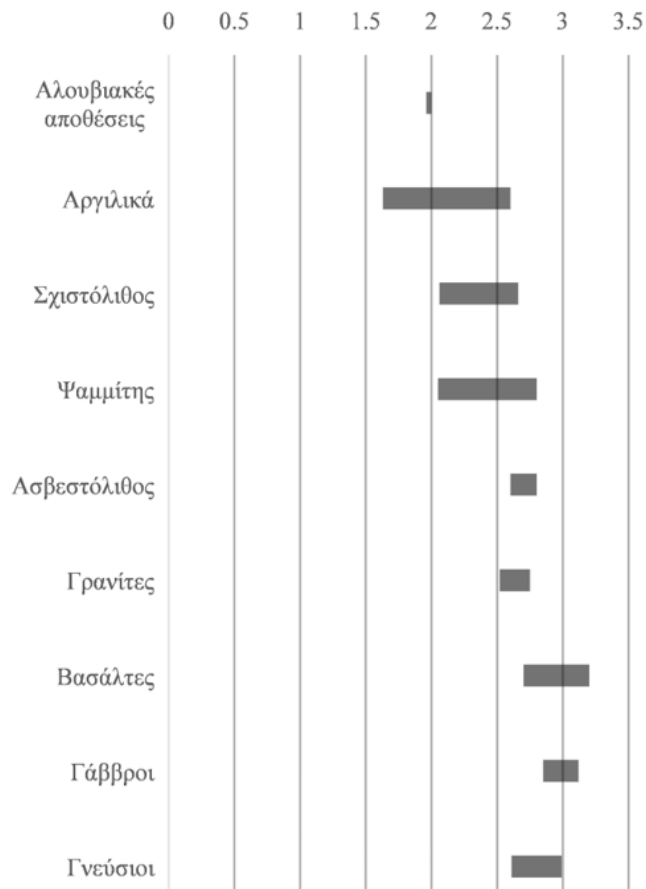
G: παγκόσμια βαρυτική σταθερά ($6,672 * 10^{-8} \text{ cm}^3/(\text{g} * \text{sec}^2)$ στο CGS)

M: η μάζα της Γης ως ομογενής σφαίρα

r: ακτίνα της Γης ως σφαίρα

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η φυσική ιδιότητα στην οποία στηρίζεται η βαρυτομετρική μέθοδος είναι η **πυκνότητα**. Η διαφορά πυκνότητας μεταξύ των πετρωμάτων του υπεδάφους μπορεί να μας δώσει μία εκτίμηση, του τρόπου διακύμανσής της. Μία γενική ταξινόμηση με βάση την πυκνότητα των πετρωμάτων απεικονίζεται στην Εικόνα 2. Ένα γενικό εύρος πυκνοτήτων, για τα πετρώματα είναι: για τα ιζηματογενή πετρώματα η πυκνότητα να κυμαίνεται 1.6-2.6 g/cm³, για τα πυριγενή 2.2-3.3 g/cm³ και τέλος για τα μεταμορφωμένα πετρώματα 2.4-3.5 g/cm³ (LaFehr, 1934).

Πυκνότητα Πετρωμάτων (g/cm^3)



Εικόνα 2-Πυκνότητες Πετρωμάτων (Kearey, 1984)

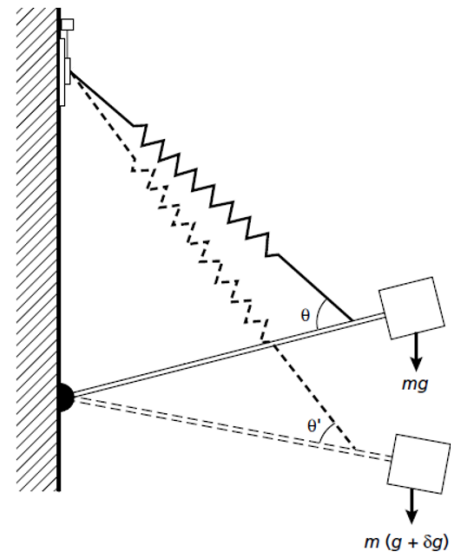
2.1.3. Όργανα Μέτρησης

Σχετικά με τις βαρυτικές μετρήσεις, το κύριο όργανο στο οποίο στηρίζεται η μέθοδος και χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των μετρήσεων της παρούσας έρευνας, είναι το βαρυτόμετρο. Το συγκεκριμένο όργανο αποτελείται από ένα σύστημα ελατηρίου και βαριδίου σταθερής μάζας. Έτσι, οι διάφορες διακυμάνσεις στην ένδειξη του βάρους, συσχετίζονται με την επιτάχυνση της βαρύτητας και, συνεπώς, με την πυκνότητα των πετρωμάτων του υπεδάφους. Στην Εικόνα 3 παρουσιάζεται ο μηχανισμός ενός βαρυτόμετρου τύπου LaCoste και Romberg, ωστόσο, ο συγκεκριμένος τύπος βαρυτομέτρου δεν αποτελεί και τον μοναδικό. Όσον αφορά στην αρχή της λειτουργίας του παραπάνω τύπου βαρυτόμετρου, το μέγεθος της επιμήκυνσης του ελατηρίου από την αρχική του

κατάσταση (δs), είναι ανάλογο της ελκτικής δύναμης που ασκείται, άρα και της αύξησης της επιτάχυνσης της βαρύτητας (δg). Ένας ακόμη παράγοντας, ο οποίος συνεισφέρει στα αποτελέσματα των μετρήσεων είναι η σταθερά k η οποία χαρακτηρίζει την ελαστικότητα του ελατηρίου.

Όπως προαναφέρθηκε, τα βαρυτόμετρα τύπου LaCoste και Romberg δεν αποτελούν τα μόνα βαρυτόμετρα. Το όργανο με το οποίο έγινε η πρώτη βαρυτική μέτρηση ήταν ο ζυγός στρέψης. Άλλα παραδείγματα οργάνων τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μία βαρυτική μέτρηση,

αποτελούν: το βαρυτόμετρο σταθερού τύπου, το βαρυτόμετρο ασταθούς τύπου αλλά και το βαρυτόμετρο τύπου Worden. Ωστόσο, όλα τα παραδείγματα που προαναφέρθηκαν, έχουν παρόμοια λειτουργία με το βαρυτόμετρο LaCoste-Romberg, δηλαδή ένα μηχανισμό ελατηρίου-βαριδίου με κάποιες μικρές εναλλαγές.

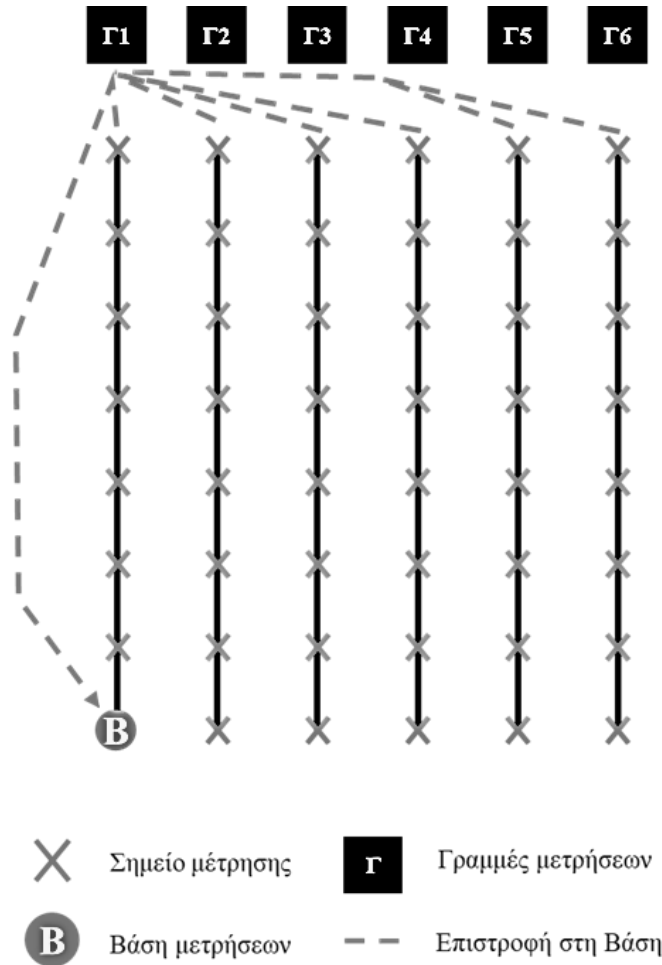


Εικόνα 3-Μηχανισμός λειτουργίας βαρυτόμετρου τύπου LaCoste και Romberg

2.2. Μετρήσεις Βαρύτητας

Οι μετρήσεις για την απόκτηση των βαρυτικών δεδομένων, όπως προαναφέρθηκε, γίνονται με συγκεκριμένα όργανα, τα βαρυτόμετρα και ο τρόπος απόκτησης των δεδομένων γίνεται με μετρήσεις ανά κάποια μέτρα ανάλογα με τον εκάστοτε στόχο της έρευνας, σε παράλληλες ευθείες. Η παρακάτω Εικόνα 4 αποδίδει μία τυπική διαδικασία απόκτησης βαρυτικών δεδομένων.

Σε μία βαρυτική έρευνα, τα σημεία μέτρησης καθορίζονται κυρίως από το στόχο της έρευνας. Στην περίπτωση έρευνας για ορυκτά μεταλλεύματα ή στην περίπτωση γεωτεχνικής μελέτης το «βήμα» των μετρήσεων κυμαίνεται σε κάποια μέτρα. Αντίθετα, για περιπτώσεις έρευνας σχετικά με την τεκτονική της περιοχής ή την ευρύτερη γεωλογία, οι μετρήσεις μπορεί να απέχουν μεταξύ τους έως και εκατοντάδες μέτρα.



Εικόνα 4-Γράφημα διαδικασίας λήψης βαρυτικών μετρήσεων

Η αρχή της διαδικασίας των βαρυτικών μετρήσεων γίνεται με την λήψη της πρώτης μέτρησης, η θέση της οποίας ονομάζεται «Βάση». Οι υπόλοιπες μετρήσεις γίνονται σε παράλληλες γραμμές, και μετά το τέλος της τελευταίας μέτρησης κάθε γραμμής-ευθείας, επιστρέφουμε στην «Βάση» για να μετρήσουμε εκ νέου την επιτάχυνση της βαρύτητας. Έπειτα, συνεχίζουμε με την επόμενη ευθεία και επαναλαμβάνουμε.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η επιστροφή στην Βάση και η μέτρηση της επιτάχυνσης της βαρύτητας, μετά το τέλος της εκάστοτε ευθείας-γραμμής, αποσκοπεί στην παρακολούθηση της μεταβολής της. Η επιτάχυνση της βαρύτητας αποτελεί ένα μέγεθος, το οποίο μεταβάλλεται κατά την διάρκεια της ημέρας, με αποτέλεσμα να αποτελεί επιτακτική ανάγκη η παρακολούθηση της αλλαγής της, ώστε να είναι δυνατή η βαρυτική έρευνα. Ακόμη, οι μεταβολές των μετρούμενων τιμών της επιτάχυνσης της βαρύτητας, για μία

συγκεκριμένη θέση, μπορεί να μεταβάλλονται. Αυτή η μεταβολή των τιμών οφείλεται σε δύο παράγοντες: στην φύση του οργάνου, αλλά και σε παλιρροιακά φαινόμενα.

Το βαρυτόμετρο αποτελεί ένα μηχανικό όργανο, ικανό για τον εντοπισμό αλλαγών στην επιτάχυνση της βαρύτητας της τάξης του 0,001mGal. Αυτό σημαίνει ότι, το βαρυτόμετρο αποτελεί όργανο υψηλής ευαισθησίας, του οποίου η μεταφορά από θέση σε θέση, αλλά και η χρήση του, έχουν ως αποτέλεσμα την επιμήκυνση του ελατηρίου του και, κατα συνέπεια, την αλλοίωση των τιμών της επιτάχυνσης της βαρύτητας. Επιπλέον, όλο το σύστημα ελατηρίου-βαριδίου βρίσκεται μέσα σε λάδι, υπό σταθερή θερμοκρασία. Συνεπώς, οι αλλαγές στη θερμοκρασία μπορούν να επηρεάσουν τις βαρυτικές μετρήσεις.

Τα παλιρροιακά φαινόμενα, όπως αυτά της κίνησης του ήλιου και της σελήνης, μπορούν να επηρεάσουν τις μετρήσεις ενός ευαίσθητου οργάνου, όπως είναι το βαρυτόμετρο, με αποτέλεσμα κατά την διάρκεια της ημέρας, οι τιμές των μετρήσεων του, να αλλάζουν, ακόμη και για το ίδιο σημείο. Παλιρροιακά φαινόμενα, επίσης, μπορούν να συναντηθούν σε παράκτιες περιοχές λόγω των θαλάσσιων παλιρροιών. Συνεπώς, αφού οι τιμές του βαρυτόμετρου για μία σταθερή θέση, αλλάζουν με το χρόνο, είναι αναγκαίο, οι τιμές της μέτρησης να διορθώνονται.

2.3. Βαρυτικές Διορθώσεις

Οι βαρυτικές διορθώσεις, αντιμετωπίζουν τα προβλήματα που μπορούν να αλλοιώσουν τις τιμές των μετρήσεων. Αυτές οι αλλοιώσεις μπορεί να οφείλονται στο ίδιο το όργανο, όπως προαναφέρθηκε, ή και σε εξωτερικούς παράγοντες. Παρακάτω αναλύονται οι βαρυτικές διορθώσεις: **Drift Correction**, **Διόρθωση Γεωγραφικού Πλάτους**, **Διόρθωση Ελεύθερου Αέρα**, **Διόρθωση Bouguer** και **Τοπογραφική Διόρθωση**, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την επεξεργασία των δεδομένων της παρούσας έρευνας.

2.3.1. Drift Correction

Η πρώτη διόρθωση των μετρήσεων που εφαρμόζεται, ονομάζεται «**drift correction**». Η διόρθωση αυτή, συμβάλλει στην μετατροπή των παραποιημένων μετρήσεων, που λαμβάνονται λόγω παλιρροιακών φαινομένων και της φύσης του οργάνου. Πιο συγκεκριμένα, οι μετρήσεις λαμβάνονται στην ίδια θέση, και σε συνάρτηση με τον χρόνο, καταγράφονται σε ένα διάγραμμα. Η αρχική θέση της μέτρησης, αναφέρθηκε ως «Βάση», στην οποία μετά από τακτά χρονικά διαστήματα επιστρέφουμε για να παρατηρήσουμε την διακύμανση των μετρήσεων του βαρυτόμετρου σε σχέση με το χρόνο. Η διόρθωση (δg) των μετρήσεων, θεωρώντας την αρχική μέτρηση ως τη σωστή για τη Βάση, και γνωρίζοντας τον χρόνο (t) σε κάθε σημείο μέτρησης, μπορεί να βρεθεί μέσω του διαγράμματος. Ωστόσο, οι βαρυτικές διορθώσεις δεν σταματούν στην παραπάνω τεχνική.

2.3.2. Διόρθωση Γεωγραφικού Πλάτους

Μετά την εφαρμογή της πρώτης διόρθωσης, ακολουθεί η **διόρθωση γεωγραφικού πλάτους**. Αναλυτικότερα, επειδή το βαρυτικό πεδίο της γης μεταβάλλεται από θέση σε θέση, λόγω του σχήματος της (σφαιροειδές), αλλά και λόγω της γωνιακής ταχύτητας που έχει αναπτύξει, κατά την περιστροφική της κίνηση, υπάρχει διόγκωση στον ισημερινό και επιπεδοποίηση στους πόλους της. Επιπλέον η μάζα που βρίσκεται στον ισημερινό ξεπερνά σε ποσότητα αυτή των πόλων. Σύμφωνα, λοιπόν, με τις παραπάνω παραμέτρους το βαρυτικό πεδίο της γης επηρεάζεται σε σχέση με το γεωγραφικό πλάτος φ :

$$g_{\varphi} = 9780318.5(1 + 0.005278895\sin^2\varphi + 0.000023462\sin^4\varphi)$$

Όπου:

g σε gu

$$10 \text{ gu} = 1 \text{ mGal} (=10^{-3}\text{cm/sec}^2)$$

Η παραπάνω σχέση δίνει την θεωρητική τιμή της επιτάχυνσης της βαρύτητας σε κάθε θέση της γης. Συνεπώς εάν αφαιρεθεί η τιμή g_ϕ από τις μετρήσεις, προκύπτουν τιμές που σχετίζονται με τις τοπικές βαρυτικές ανωμαλίες.

2.3.3. Διόρθωση Ελεύθερου Αέρα

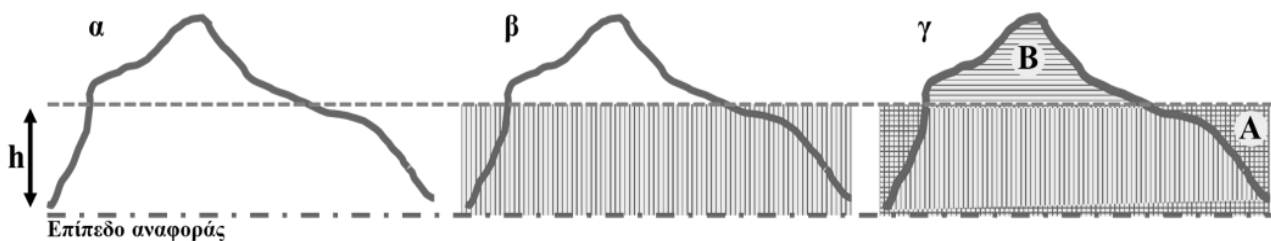
Επόμενο στάδιο αποτελεί η **διόρθωση ελεύθερου αέρα**. Ειδικότερα για την ερμηνεία των μεταβολών που παρατηρούνται στην επιτάχυνση της βαρύτητας, οι οποίες συνδέονται με τις υψομετρικές μεταβολές, η συγκεκριμένη διόρθωση είναι αναγκαία. Κατά την εφαρμογή της, ανάγουμε τις τιμές βαρύτητας που μετρήσαμε, στις αντίστοιχες τιμές βαρύτητας που θα προέκυπταν, αν οι μετρήσεις είχαν γίνει στο ίδιο υψόμετρο (Εικόνα 5.α.). Με τον τρόπο αυτόν, απομονώνουμε ακόμα περισσότερο τη γεωλογική συνιστώσα του βαρυτικού πεδίου.

$$g_{FA} = 3.086 * h$$

Όπου:

g σε gU και h σε m

Αν ο σταθμός μέτρησης είναι πάνω από το επίπεδο αναφοράς η διόρθωση προστίθεται, ενώ σε αντίθετη περίπτωση, αφαιρείται. Έτσι, προκύπτει η επιθυμητή διόρθωση.



Εικόνα 5 - α) Διόρθωση ελεύθερου αέρα, β) Διόρθωση Bouguer και γ) Τοπογραφική διόρθωση

2.3.4. Διόρθωση Bouguer

Στη συνέχεια, ακολουθεί η **διόρθωση Bouguer**, η οποία λαμβάνει ως δεδομένα μόνο τις υψομετρικές διαφορές, πράγμα το οποίο παραγκωνίζει τη επιρροή του υλικού που υπάρχει μεταξύ των σημείων μέτρησης και του επιπέδου αναφοράς. Το συγκεκριμένο υλικό πυκνότητας d , ασκεί βαρυτική έλξη, με αποτέλεσμα να επηρεάζει τις βαρυτικές μετρήσεις. Επιπλέον, για την σωστή εφαρμογή της διόρθωσης Bouguer, είναι αναγκαίο να γνωρίζουμε τα υψόμετρα όλων των σημείων παρατήρησης και την πυκνότητα της «πλάκας» που χρησιμοποιείται για την προσέγγιση της περίσσειας μάζας, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 5.β.

$$g_B = 0.4191 * d * h$$

Όπου:

g σε gu , d σε g/cm^3 και h σε m

Αν ο σταθμός μέτρησης είναι πάνω από το επίπεδο αναφοράς, η διόρθωση αφαιρείται, σε αντίθεση περίπτωση προστίθεται.

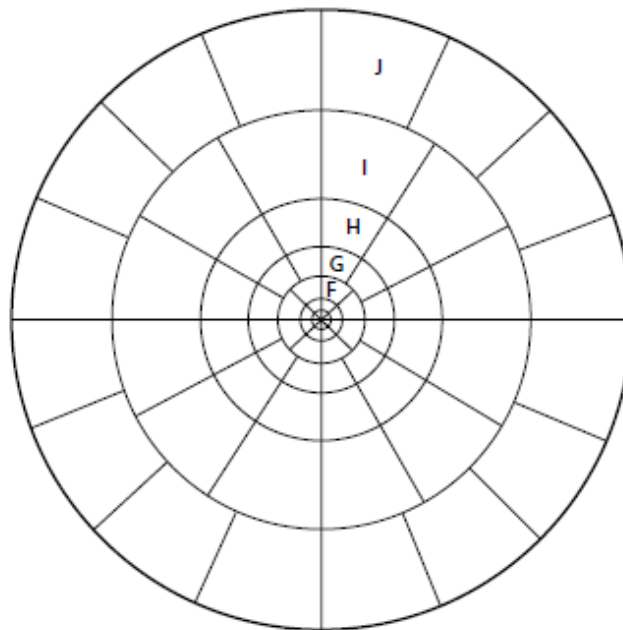
2.3.5. Τοπογραφική Διόρθωση

Ένας ακόμη παράγοντας που επηρεάζει τις βαρυτικές μετρήσεις και δεν έχει συμπεριληφθεί στις παραπάνω διορθώσεις, αποτελεί το **τοπογραφικό ανάγλυφο**. Το τοπογραφικό ανάγλυφο γύρω από τα σημεία των μετρήσεων, στις παραπάνω διορθώσεις έχει θεωρηθεί ως επίπεδο, κάτι που συμβαίνει σε λίγες περιπτώσεις.

Οι περιοχές της Εικόνα 5.γ που συμβολίζονται με το γράμμα «Α», αποτελούν περιοχές που θεωρήθηκαν ως μέρος της «πλάκας» για την διόρθωση Bouguer, κάτι το οποίο δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Στις συγκεκριμένες περιοχές δεν υπάρχει υλικό πυκνότητας d , ωστόσο, στη διόρθωση Bouguer θεωρήθηκε το αντίθετο, με αποτέλεσμα μία

υπερδιόρθωση. Η τοπογραφική διόρθωση, λοιπόν, αναλαμβάνει την αποκατάσταση του συγκεκριμένου σφάλματος με μία θετική τοπογραφική διόρθωση.

Παρόμοια για την περιοχή «B», η οποία δεν λαμβάνεται υπόψη από τη διόρθωση Bouguer, θεωρώντας πως πάνω από το υψόμετρο των βαρυτικών μετρήσεων, δεν υπάρχει κάποιο υλικό, από το οποίο τα όργανα του βαρυτόμετρου να έλκονται. Έτσι, η τοπογραφική διόρθωση είναι αναπόφευκτη, σε περιπτώσεις που υπάρχει υλικό πάνω από τα σημεία μετρήσεων. Η τοπογραφική διόρθωση έχει προσθετικό χαρακτήρα και σε αυτή την περίπτωση.



Εικόνα 6 - Χάρτης Hammer

Μία από τις μεθόδους για τον υπολογισμό της τοπογραφικής διόρθωσης, αποτελεί ο τμηματικός υπολογισμός της περιβάλλουσας τοπογραφίας, στα σημεία όπου έχουν ληφθεί οι βαρυτικές μετρήσεις. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 6, ομόκεντροι κύκλοι διαχωρίζονται σε ζώνες, στις οποίες υπολογίζεται το μέσο υψόμετρο. Το συγκεκριμένο δίκτυο αποτελεί τον χάρτη Hammer, ενώ η τοπογραφική διόρθωση δίνεται από τον Πίνακα 3 σε συνδυασμό με τη σχέση:

$$T = 0,4191 \frac{d}{n} (r_1 - r_2 + \sqrt{r_1^2 + z^2} - \sqrt{r_2^2 + z^2})$$

Όπου:

T: τοπογραφική διόρθωση

d: μέση επικρατούσα τιμή πυκνότητας των γύρω σχηματισμών

z: υψομετρική διαφορά μεταξύ σημείου μέτρησης και του μέσου όρου υψομέτρου του τμήματος

n: αριθμός τμημάτων ανά ζώνη

*r*₁: εσωτερική ακτίνα ζώνης σε *m*

*r*₂: εξωτερική ακτίνα ζώνης σε *m*

Zώνη	r1	r2	n	Zώνη	r1	r2	n
B	2	16.6	4	H	1529.4	2614.4	12
C	16.6	53.3	6	I	2614.4	4468.8	12
D	53.3	170.1	6	G	4468.8	6652.2	16
E	170.1	390.1	8	K	6652.2	9902.5	16
F	390.1	894.8	8	L	9902.5	14740.9	16
G	894.8	1529.4	12	M	14740.9	21943.3	16

Πίνακας 2 - Πίνακας παραμέτρων ζωνών Hammer

Προσθέτοντας λοιπόν την τοπογραφική διόρθωση από όλους τους τομείς, βρίσκουμε την συνολική τοπογραφική διόρθωση για κάθε σημείο μέτρησης.

2.4. Ανωμαλία Bouguer – Μέθοδος Nettleton

2.4.1. Ανωμαλία Bouguer

Η τιμή η οποία προκύπτει μετά από όλες τις παραπάνω διορθώσεις, για τη βαρυντομετρική μέθοδο, ονομάζεται ανωμαλία Bouguer και ο τύπος της είναι:

$$g_{BA} = g_{\text{παρ.}} - g_{\varphi} + 0,3086h - 0.04191hd + Td$$

Όπου:

$g_{\text{παρ.}}$: παρατηρούμενες τιμές υπαίθρου μετά το *drift correction*

g_{φ} : θεωρητική τιμή βαρυντικού πεδίου της γης

h : υψόμετρο

d : πυκνότητα

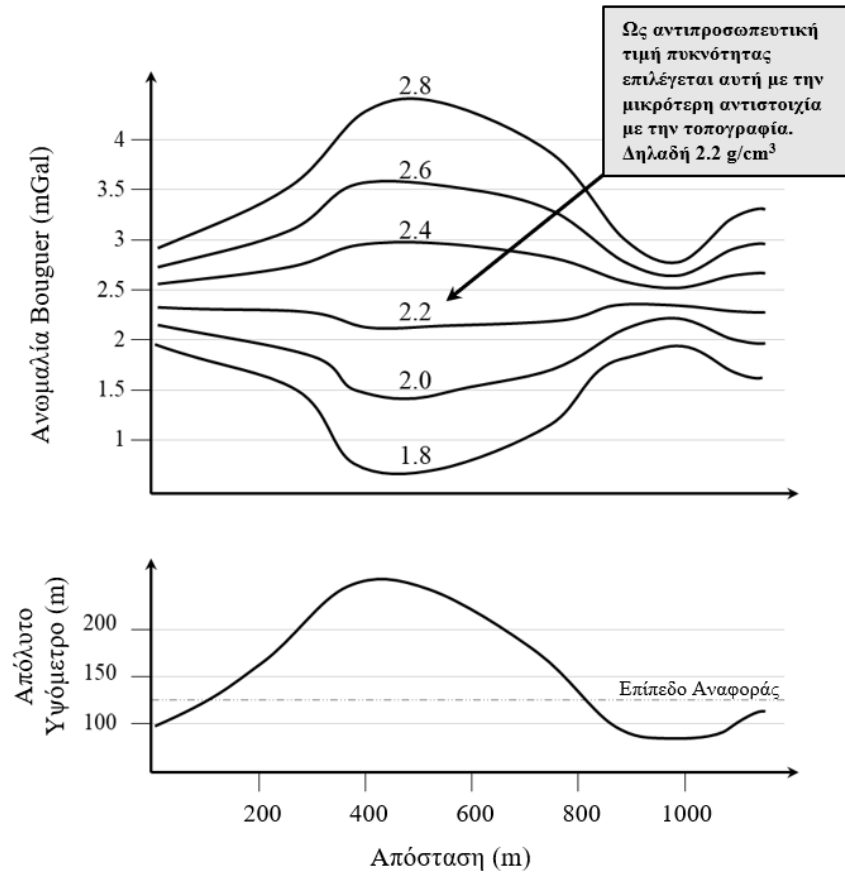
T : ο συντελεστής τοπογραφικής διόρθωσης

2.4.2. Μέθοδος Nettleton

Η πυκνότητα των επιφανειακών υλικών που συχνά παρουσιάζουν ενδιαφέρον σε μελέτες κοντά στην επιφάνεια μπορεί να μετρηθεί με τη διενέργεια μιας σειράς βαρυντικών παρατηρήσεων. Η μάζα των παρακείμενων υλικών σχετίζεται άμεσα με τις μετρήσεις της βαρύτητας, με αποτέλεσμα, μέσω εξειδικευμένων τεχνικών, να μπορεί να προσδιοριστεί η πυκνότητα *in situ*.

Η συγκεκριμένη τεχνική αποτελεί τη **μέθοδο Nettleton**, με την οποία μπορεί να υπολογιστεί η πυκνότητα, με την προϋπόθεση ότι οι βαρυντικές μετρήσεις λαμβάνουν χώρα κατά μήκος μιας γραμμής, στην οποία υφίσταται το τοπογραφικό ανάγλυφο. Η καμπύλη ανωμαλίας Bouguer με τη μικρότερη σχέση μορφής με την τοπογραφική καμπύλη είναι

αυτή η οποία έχει μεγαλύτερο ενδιαφέρον, καθώς αποδίδει την ευστοχότερη πυκνότητα επιφανειακών σχηματισμών, που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της.



Εικόνα 7 - Μέθοδος Nettleton, για τον προσδιορισμό της πυκνότητας.

Για ακριβέστερο υπολογισμό της πυκνότητας χρησιμοποιείται ο συντελεστής συσχέτισης (Correlation Coefficient) της ανωμαλίας Bouguer και του υψομέτρου.

$$CC = \frac{\sum_i (\Delta g_i - \overline{\Delta g})(H_i - \overline{H})}{\sqrt{\sum_i (\Delta g_i - \overline{\Delta g})^2 \sum_i (H_i - \overline{H})^2}}$$

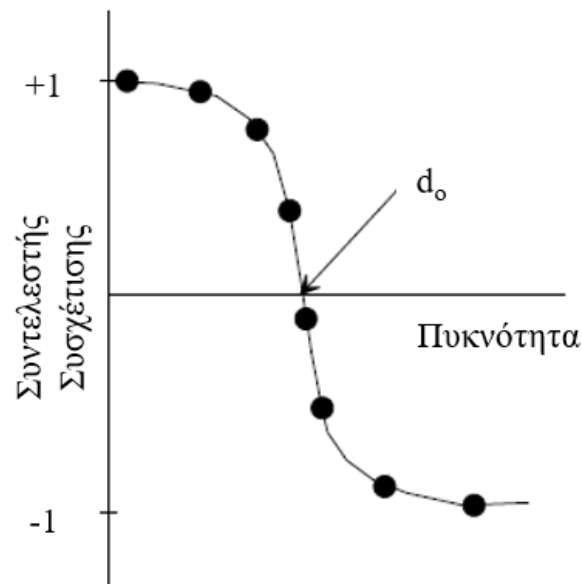
Όπου:

Δg_i και H_i : Ανωμαλία Bouguer και υψόμετρο του i σταθμού μέτρησης αντίστοιχα

$\overline{\Delta g}$: Μέση τιμή των ανωμαλιών Bouguer όλων των σταθμών μέτρησης

\overline{H} : Μέση τιμή των υψομέτρων όλων των σταθμών μέτρησης.

Στο διάγραμμα του συντελεστή συσχέτισης και της πυκνότητας, στη θέση που η καμπύλη τέμνει τον άξονα των πυκνοτήτων και ο συντελεστής συσχέτισης είναι 0 (μηδέν), βρίσκουμε την τιμή πυκνότητας d_0 , η οποία θεωρείται ως μέση επικρατούσα πυκνότητα για τον υπολογισμό της τελικής πυκνότητας d_f .



Διάγραμμα 1 - Διάγραμμα συνταλαστική συσχέτισης
(Αποστολόπουλος, Αθήνα 2015)

$$d_f = d_0 + \frac{\sum_i (\Delta^0 g_i - \overline{\Delta^0 g})(H_i - \overline{H})}{2\pi G \sum_i (H_i - \overline{H})^2}$$

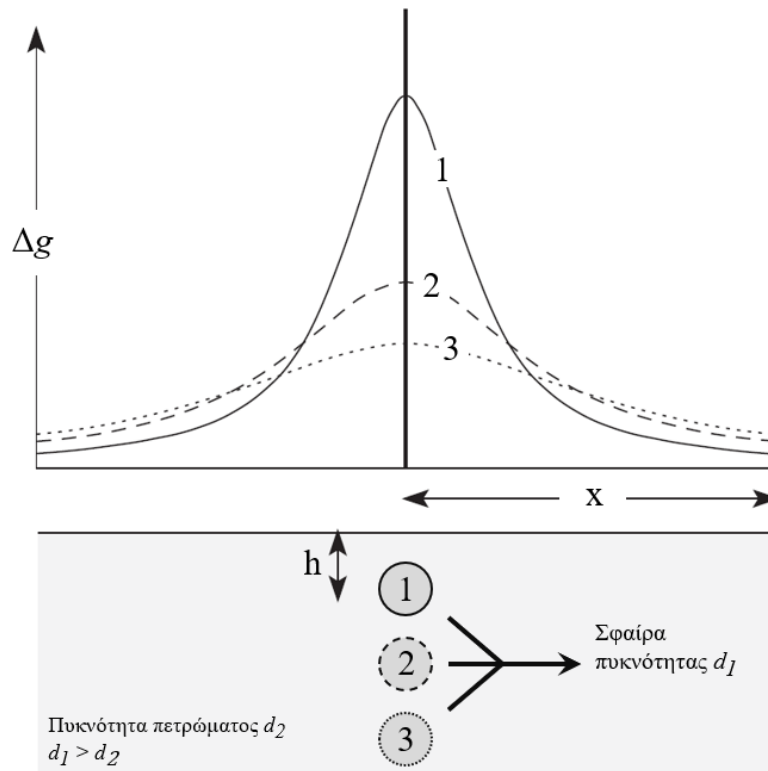
Όπου:

G : η παγκόσμια σταθερά της βαρύτητας ($6,672 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3/\text{gr sec}^2$ στο σύστημα CGS)

$\Delta^0 g_i$: η ανωμαλία Bouguer του i σταθμού μέτρησης με πυκνότητα d_0 .

2.5. Ανωμαλίες Μικρής και Μεγάλης Κλίμακας (Residual - Regional)

Η ανωμαλία Bouguer, επηρεάζεται από όλους τους σχηματισμούς του υπεδάφους, μίας περιοχής, ανεξαρτήτως βάθους. Ωστόσο, η απόδοση του χάρτη Bouguer μας δίνει μία οριζόντια εικόνα για τις βαρυτικές εναλλαγές της επιτάχυνσης της βαρύτητας. Αυτή η εικόνα εμπεριέχει στοιχεία τα οποία μπορούν να δημιουργήσουν εμπόδια στην ερμηνεία των δεδομένων, όταν η έρευνα στοχεύει στην εύρεση σχηματισμών-δομών κοντά στην επιφάνεια. Τα συγκεκριμένα εμπόδια αποτελούν φυσικό επακόλουθο των διαφορετικών πυκνοτήτων των πετρωμάτων αλλά και της παρουσίας τους σε διάφορα βάθη.

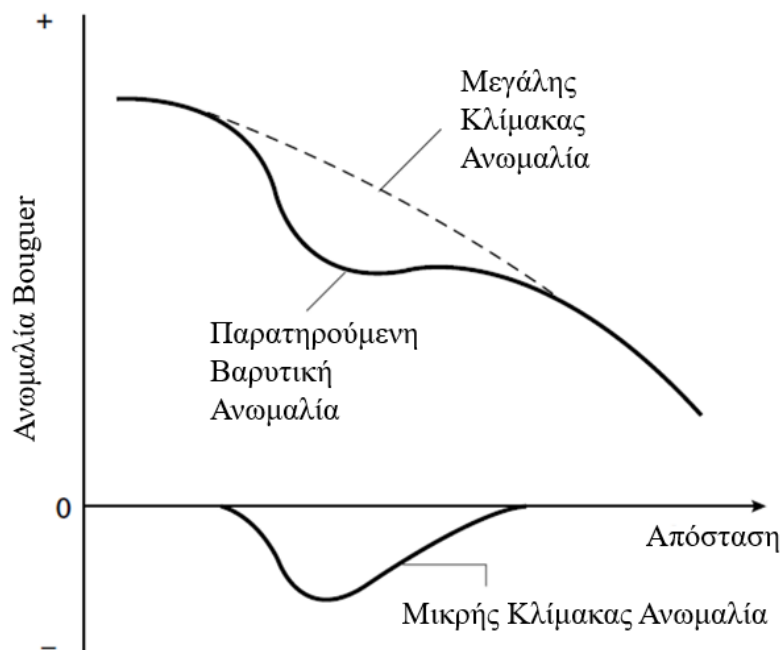


Εικόνα 8 - Αναπαράσταση βαρυτικής επιτάχυνσης σε σχέση με το βάθος "h"

Στην περίπτωση που το περιβάλλον του σχηματισμού-στόχου είναι σχετικά ομοιογενές, οι εναλλαγές στην βαρυτική επιτάχυνση σχετίζονται κυρίως με το βάθος. Όσο μειώνεται το βάθος, αυξάνεται το πλάτος και μειώνεται το μήκος κύματος της ανωμαλίας και αντιστρόφως. Στην Εικόνα 8 αποτυπώνεται το παραπάνω φαινόμενο, όπου

απεικονίζεται μία σφαίρα με μεγαλύτερη πυκνότητα (πυκνότητα d_1) από το περιβάλλον πέτρωμα (πυκνότητα d_2). Όσο πιο κοντά βρίσκεται η σφαίρα στο έδαφος, τόσο πιο έντονη η αύξηση της επιτάχυνσης της βαρύτητας, αλλά με μικρότερη επιρροή στην γενικότερη βαρυτική ανωμαλία. Αντίθετα, όσο πιο βαθιά βρίσκεται η σφαίρα, τόσο μικρότερη είναι η αύξηση της επιτάχυνσης της βαρύτητας, και, συνεπώς τόσο μεγαλύτερη η επιρροή στην γενικότερη βαρυτική ανωμαλία.

Όπως προαναφέρθηκε, το παραπάνω φαινόμενο αποτελεί ένα μοντέλο ομογενούς περιβάλλοντος, με αποτέλεσμα το υπόβαθρο να μην έχει μεγάλη επιρροή στην βαρυτική ανωμαλία. Ωστόσο, σε πολλές περιπτώσεις, οι σχηματισμοί-δομές που βρίσκονται σε μεγάλο βάθος, μπορεί να επηρεάζουν την επιτάχυνση της βαρύτητας. Αυτοί οι σχηματισμοί-δομές, έχουν ως αποτέλεσμα μία Μεγάλης Κλίμακας Ανωμαλία (Regional). Αντίθετα, οι σχηματισμοί-δομές όπου βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, έχουν ως αποτέλεσμα μια Μικρής Κλίμακας Ανωμαλία (Residual).



Εικόνα 9 - Γραφική αναπαράσταση αφαίρεσης Μεγάλης Κλίμακας Ανωμαλία από την Παρατηρούμενη Βαρυτική Ανωμαλία, ως προς την έυρεση Μικρής Κλίμακας Ανωμαλία

Η ανωμαλία Bouguer λοιπόν, είναι αποτέλεσμα της συνεισφοράς της μεγάλης και της μικρής κλίμακας ανωμαλίας. Σε μία βαρυτομετρική έρευνα, οι στόχοι ενδιαφέροντος

μπορεί να βρίσκονται σε μικρό βάθος, άρα η μεγάλης κλίμακας ανωμαλία λειτουργεί σαν «θόρυβος» για την ερμηνεία των μετρήσεων. Αυτός ο «θόρυβος» μπορεί να αφαιρεθεί, αφαιρώντας από την ανωμαλία Bouguer την μεγάλης κλίμακας ανωμαλία, με αποτέλεσμα οι τιμές της βαρυτικής ανωμαλίας να ελέγχονται αποκλειστικά από την μικρής κλίμακας ανωμαλία. Συνεπώς, η εικόνα η οποία θα αποτυπώνεται, έπειτα από αυτή την αφαίρεση, θα αποτελεί μια εκτίμηση της εικόνας των τοπικών υπόγειων σχηματισμών. Η Εικόνα 9 παρουσιάζει μία διαδικασία που μπορεί να ακολουθηθεί, για την εύρεση της μεγάλης και της μικρής κλίμακας ανωμαλίας, μέσω της αφαίρεσης της πρώτης από την παρατηρούμενη βαρυτική ανωμαλία.

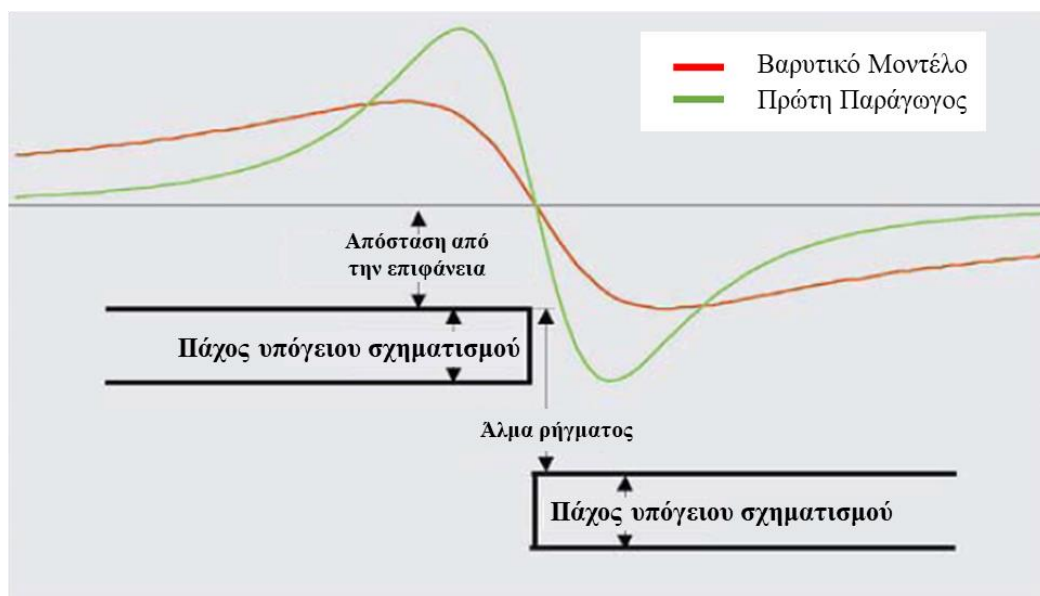
Η συγκεκριμένη διαδικασία «φιλτραρίσματος» μπορεί να γίνει με διάφορες μεθόδους. Μία από αυτές είναι η Γραφική Μέθοδος, που απεικονίζεται και στην Εικόνα 9. Η συγκεκριμένη μέθοδος στηρίζεται στην σχεδίαση-υπόθεση μίας εκτιμώμενης μεγάλης κλίμακας ανωμαλίας, η οποία συμφωνεί με την τάση των μετρούμενων τιμών, και έπειτα στην αφαίρεσή της από τις παρατηρούμενες τιμές. Έτσι, προκύπτουν οι μικρής κλίμακας ανωμαλίες. Ωστόσο, αν και η γραφική μέθοδος μπορεί να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα, αποτελεί μία μέθοδο, η οποία στηρίζεται σε μεγάλο ποσοστό στην εμπειρία του μελετητή με αποτέλεσμα η διαδικασία να είναι επιρρεπής σε ανθρώπινα λάθη.

Κάποιες από τις μεθόδους για την εύρεση της μεγάλης κλίμακας ανωμαλίας, οι οποίες απομονώνουν τον ανθρώπινο παράγοντα, είναι οι υπολογισμοί με την χρήση μαθηματικών μεθόδων. Η Μέθοδος Μέσης Τιμής εντάσσεται στην κατηγορία των μαθηματικών μεθόδων. Η παραπάνω μέθοδος, με τη χρήσης καννάβου, λαμβάνει μία μέση τιμή για όλες τις τιμές των σημείων του καννάβου, η οποία αποτελεί και την μεγάλης κλίμακας ανωμαλία. Μαθηματική μέθοδος αποτελεί επίσης και η Πολυωνυμική Προσέγγιση, η οποία στοχεύει στη προσέγγιση της ανωμαλίας μεγάλης κλίμακας από ένα πολυώνυμο. Ο βαθμός του πολυωνύμου δεν είναι σταθερός και μπορεί να μεταβάλλεται ανάλογα με την έρευνα ενώ η γνώση της ευρύτερης γεωλογίας της περιοχής, αποτελεί καταλυτικό παράγοντα για την επιλογή του βαθμού.

2.6. Πρώτη Παράγωγος Βαρυτικών Ανωμαλιών

Η χρήση της πρώτης παραγώγου αποτελεί μία μέθοδο ενίσχυσης των βαρυτικών ανωμαλιών που βρίσκονται στην επιφάνεια. Πιο αναλυτικά, έχει παρατηρηθεί πως οι δομές μικρου βάθους παρουσιάζουν μια απότομη εξασθένηση στο σήμα, το οποίο λαμβάνεται από την επιφάνεια, σε σχέση με το ύψος. Ο ρυθμός μεταβολής μίας ανωμαλίας σε συνάρτηση με το ύψος (z) αποτυπώνεται από την πρώτη παράγωγο. Έτσι η πρώτη παράγωγος της επιτάχυνσης της βαρύτητας, μπορεί να αποδώσει τους στόχους, οι οποίοι βρίσκονται σε μικρότερο βάθος με μεγαλύτερη ευκρίνεια σε σχέση με αυτούς που βρίσκονται σε μεγαλύτερο βάθος. Η συγκεκριμένη διαδικασία αποτελεί μια μέθοδο «φιλτραρίσματος» αλλά και ενίσχυσης του σήματος, για τον προσδιορισμό της θέσης δομών που βρίσκονται σε μικρότερο βάθος.

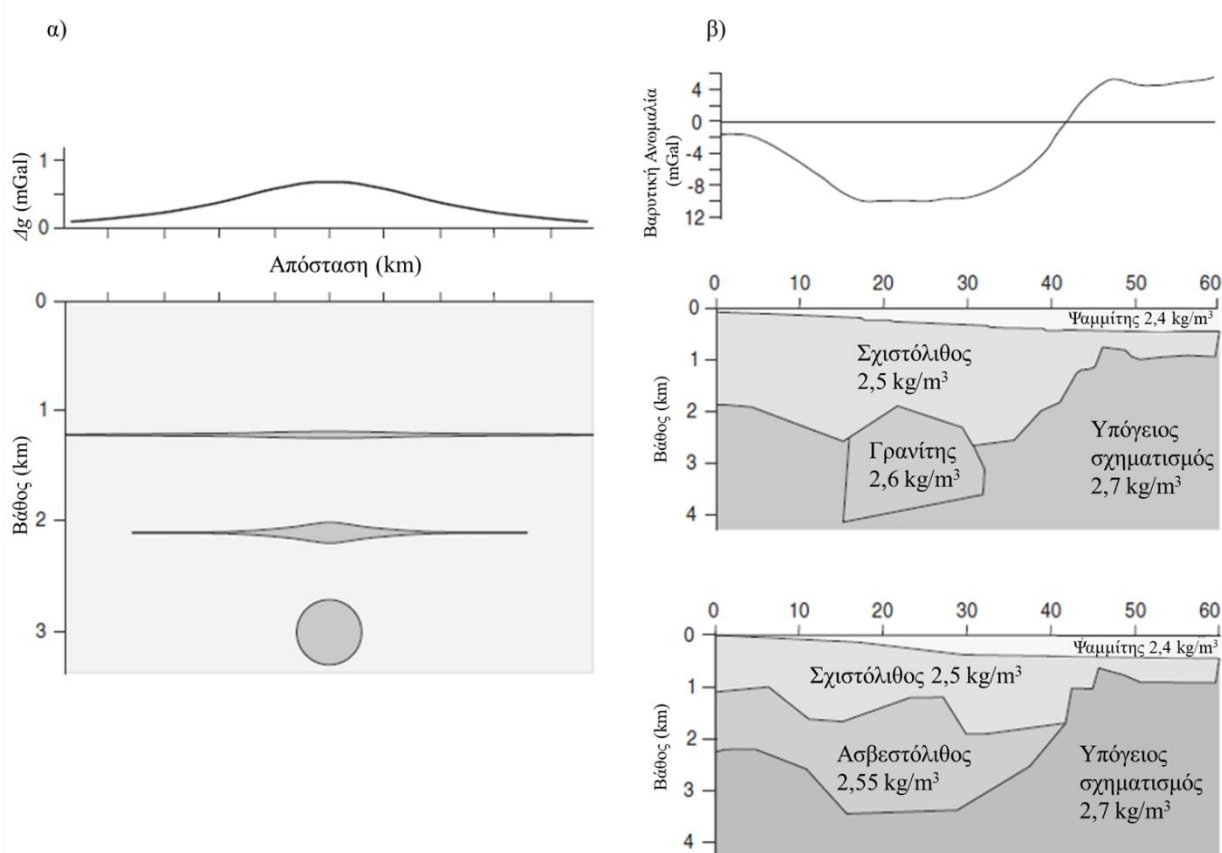
Ωστόσο η συγκεκριμένη μέθοδος έχει κάποια μειονεκτήματα. Αρχικά, οι μετρήσεις είναι αναγκαίο να μην απέχουν πολύ μεταξύ τους, ενώ ακόμη ένα μειονέκτημα συναντάται και στα αποτελέσματα του «φιλτραρίσματος», με τις τιμές των αποτελεσμάτων να έχουν εύρος από μηδέν έως άπειρο. Στη παρακάτω εικόνα (*Εικόνα 10*) παρουσιάζεται ένα μοντέλο της παραπάνω μεθόδου.



Εικόνα 10 – Μοντέλο απεικόνισης υπεδάφου και βαρυτικής ανωμαλίας μαζί με τη πρώτη παράγωγο.

2.7. Ερμηνεία Βαρυτικών Δεδομένων

Η ερμηνεία των βαρυτικών μετρήσεων συνοδεύεται, ωστόσο, από ένα ποσοστό αβεβαιότητας, λόγω των άπειρων πιθανών συνδυασμών που μπορούν να απεικονιστούν από την ερμηνεία των βαρυτικών μετρήσεων. Στην Εικόνα 11.α και Εικόνα 11.β δίνεται ένα παράδειγμα για δύο βαρυτικές ανωμαλίες, οι οποίες μπορεί να έχουν διαφορετικές ερμηνείες ως προς τους στόχους τους.



Εικόνα 11 - α) Στόχοι υπεδάφους με όμοια βαρυτική ανωμαλία, β) Διάφορες ερμηνείες πετρωμάτων με όμοια βαρυτική ανωμαλία

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

3. Εφαρμογές Βαρυτομετρικής Μεθόδου για την εύρεση της τεκτονικής στη Διεθνή Βιλιογραφία

3.1. Ανίχνευση ήπιων ρηγμάτων του υποβάθρου, με βαρυτικά και μαγνητικά δεδομένα στη λεκάνη της Αλμπέρτα, του Καναδά. (Lyatsky et. al., 2004)

3.1.1. Γενικά

Η γνώση της θέσης αλλά και της ηλικίας των ρηγμάτων, μπορεί να παίξει καταλυτικό παράγοντα στην εύρεση κοιτάσματος, αφού κοιτάσματα όπως αυτά των υδρογονανθράκων επηρεάζονται από τα ρήγματα. Συγκεκριμένα για την λεκάνη Alberta, του δυτικού Καναδά, αναγνωρίζονται δύο θεμελιωδώς διαφορετικοί τύποι υπόγειων δομών.

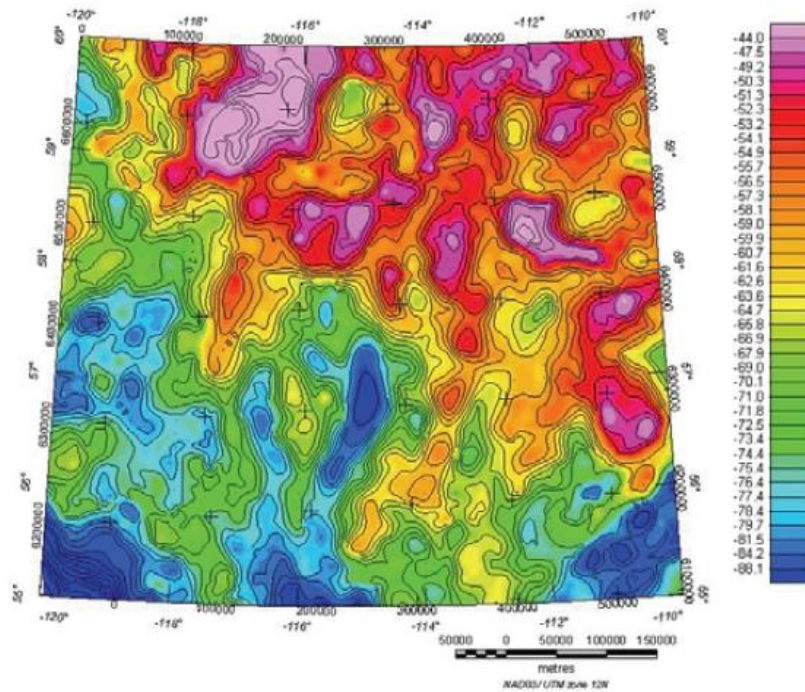


Εικόνα 12 - Τοπικά γεωλογικά χαρακτηριστικά της ερευνητικής περιοχής της Αλμπέρτα

- Αρχαίο Προτεροζωική
- και Μέσο Προτεροζωική

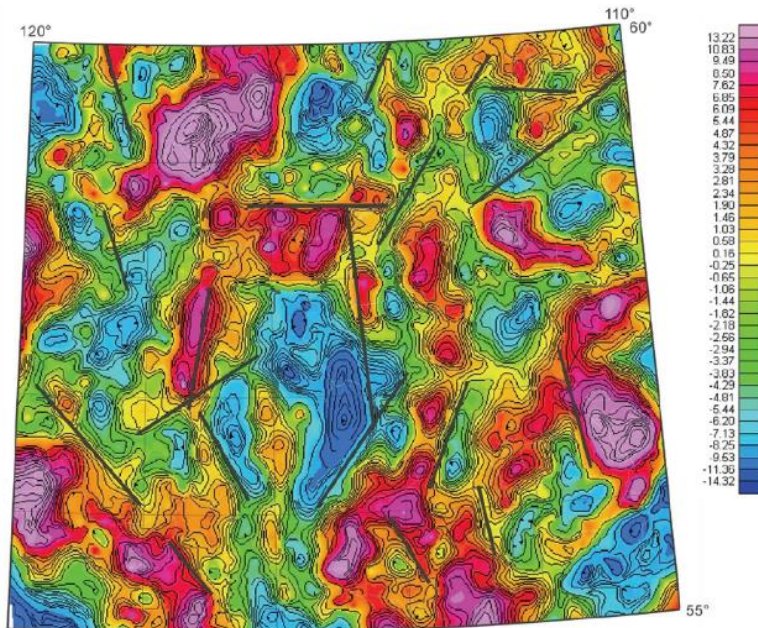
Η γεωφυσική τους έκφραση εμπεριέχει μεγάλες μαγνητικές και βαρυτικές ανωμαλίες, οι οποίες συχνά κρύβουν την επιρροή των ρηγμάτων σε αυτές.

Τα απότομα υπόγεια ρήγματα στη Δυτική πλατφόρμα του Καναδά και στις Κορδιλιέρες, είχαν σημαντική επίδραση στην απόθεση του Φανεροζωικού ιζηματογενούς καλύμματος.



Εικόνα 13 - Χάρτης βαρυντικής ανωμαλίας Bouguer της βόρειας Αλμπέρτα

Τα ρήγματα ακολουθούν τις παλαιότερες ορογενετικές δομές του υποβάθρου, αλλά συνήθως τις διασχίζουν. Πολλά ρήγματα έχουν συνεισφέρει στην ιζηματογένεση και την διαγένεση της λεκάνης, χωρίς αυτό να σημαίνει όμως, πως η συνεισφορά ήταν εκτενής. Τα απότομα ρήγματα, εκφράζονται στο δυναμικό πεδίο ως στοιχεία, τα οποία είναι επιθυμητά για την εξερεύνηση των δομών του υποβάθρου.



Εικόνα 14 - Χάρτης βαρυντικής ανωμαλίας Bouguer της βόρειας Αλμπερτα, έχοντας αφαιρεθεί τοπικά στοιχεία. Οι γραμμές αποτελούν στοιχεία εκφρασμένα από τον χάρτη.

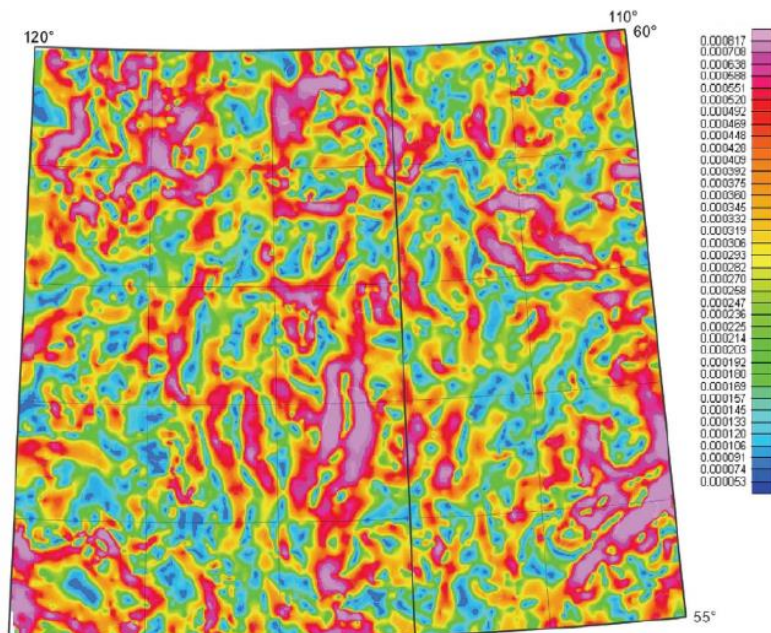
Για να βελτιστοποιηθούν οι τεχνικές της ανίχνευσης των υπόγειων ρηγμάτων και για να βοηθηθεί η έρευνα, δημιουργήθηκε βαρυντικός και μαγνητικός χάρτης της βόρειας Alberta, αφού τα δεδομένα έχουν υποστεί επεξεργασία έτσι ώστε να εντοπιστούν γραμμικές δομές.

3.1.2. Στόχοι της Επεξεργασίας Δεδομένων

Οι ήπιες ενδείξεις του δυναμικού πεδίου για τα ρήγματα, απαιτούν τεχνικές ενίσχυσης των ανωμαλιών για την απεικόνισή τους. Η επιλογή των τεχνικών για την παραπάνω επεξεργασία δεν είναι εύκολη και εξαρτάται από το είδος των δομών που επιδιώκονται να ενισχυθούν αλλά και από πειραματισμούς οι οποίοι αποδίδουν ευδιάκριτα τα γεωλογικά αποτελέσματα.

Η επεξεργασία των δεδομένων αποτελεί αναγκαία συνθήκη, ωστόσο με την ενίσχυση των ανωμαλιών, δεν μπορεί να αποφευχθεί και η ενίσχυση ανωμαλιών που αποτελούν «θόρυβο», με αποτέλεσμα να μην είναι ευδιάκριτες οι επιθυμητές ανωμαλίες. Για την βέλτιστη επεξεργασία λοιπόν, η ενίσχυση των ανωμαλιών, γίνεται σε γεωλογικά

στοχευμένα δεδομένα. Οι ενισχυμένες ανωμαλίες θα πρέπει να είναι εύκολα συσχετίσιμες με τα αρχικά δεδομένα των ανωμαλιών, χωρίς περίπλοκες τεχνικές.



Εικόνα 15 - Χάρτης ανωμαλίας Bouguer οριζόντιας κλίσης της βόρειας Αλμπέρτα

Η ανίχνευση των υπόγειων δομών στη λεκάνη της Αλμπέρτα μπορεί να γίνει με μεθόδους μικρότερου κόστους, όπως οι μαγνητικές ή οι βαρυτικές μέθοδοι. Τα βαρυτικά δεδομένα παρασχέθηκαν από τη Γεωλογική Υπηρεσία του Καναδά (GSC) (*Εικόνα 13 έως 16*). Τα δεδομένα αυτά παρουσιάζουν μια ευαισθησία στις τοπικές κατακόρυφες μετατοπίσεις και σε μεγάλης γωνίας ρήγματα. Ωστόσο, τα δεδομένα μπορούν να διαστρεβλωθούν από ιζηματογενή πετρώματα της περιοχής, μεγάλης πυκνότητας, που βρίσκονται πάνω από το υπόβαθρο, αλλά και από την αραιή κάλυψη των δεδομένων της περιοχής.

Μέσα από τα δεδομένα της βαρύτητας παρατηρήθηκε σταδιακή μείωση προς στα νοτιοδυτικά, λόγω της λεκάνης της Αλμπέρτα η οποία βαθαίνει με τον ίδιο προσανατολισμό.

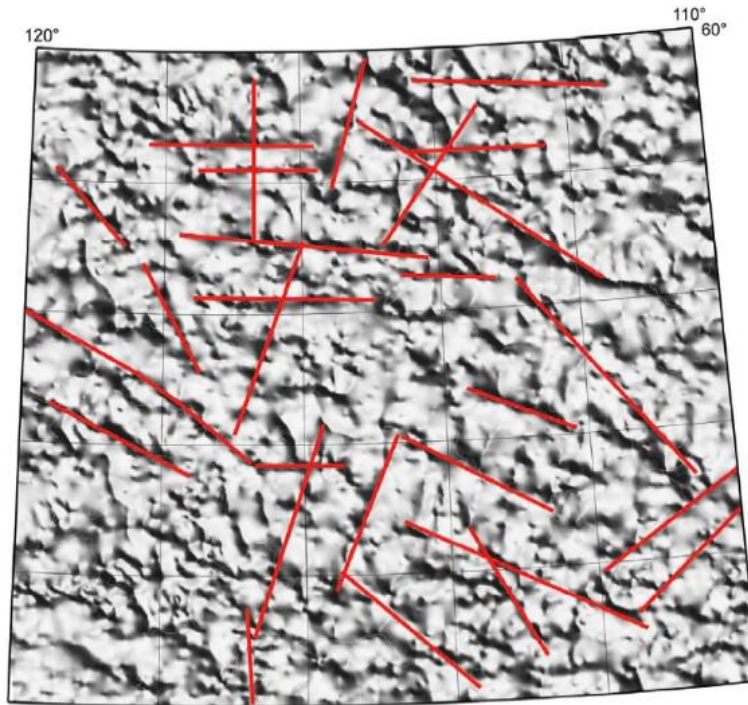
3.1.3. Προετοιμασία Δεδομένων

Το βέλτιστο πλέγμα για την λεπτομερή απεικόνιση της βαρυτικής ανωμαλίας επιλέχθηκε στα 1000m. Η ενίσχυση των ανωμαλιών μικρού μήκους κύματος, μπορούν να επηρεάσουν τα αποτελέσματα των γεωλογικών στοιχείων, είτε διευκολύνοντας την απεικόνιση των στόχων, είτε παρεμποδίζοντας την, δημιουργώντας «θόρυβο». Ο «θόρυβος» αυτός θα πρέπει να καταστέλλεται πριν την επεξεργασία, ακόμη και με την αφαίρεση πληροφοριών βαρυτικής ανωμαλίας. Πιο συγκεκριμένα, αυτή η καταστολή του θορύβου, μπορεί να επιτευχθεί με μία διαδικασία upward continuation.

3.1.4. Χρησιμότητα Βημάτων Επεξεργασίας

Οι οριζόντιας κλίσης χάρτες (Εικόνα 15) περιγράφουν την απότομη κλίση του ανάγλυφου της ανωμαλίας, τα μέγιστα των οποίων εμφανίζονται στα πιο απότομα σημεία των ανωμαλιών ενώ τα ελάχιστα στα πιο επίπεδα σημεία. Οι κατακόρυφης κλίσης χάρτες αναδεικνύουν τις μικρού μήκους κύματος ανωμαλίες ενώ υποβαθμίζουν τις μεγάλου μήκους κύματος ανωμαλίες, με αποτέλεσμα να τονίσουν γεωλογικές λεπτομέρειες. Ωστόσο, η αραϊή λήψη των δεδομένων δεν βοηθάει στην επεξεργασία των δεδομένων με αυτό τον τρόπο.

Οι χάρτες ολικής κλίσης χρησιμοποιήθηκαν για την εύρεση της φύσης της ανωμαλίας καθώς και για την έμφαση των ασυνεχειών. Οι χάρτες αυτοί παρουσιάζουν μεγάλη ομοιότητα με τους χάρτες οριζόντιας κλίσης, ωστόσο είναι αποτελεσματικοί στην ανάδειξη ανεπαίσθητων και τοπικών ανωμαλιών. Για την ανάδειξη των τοπικών ανωμαλιών η περιφερειακή συνιστώσα του βαρυτικού πεδίου αφαιρείται από τα δεδομένα δημιουργώντας έναν υπολειμματικό χάρτη. Η ερμηνεία των βαρυτικών ανωμαλιών βοηθήθηκε από την παραπάνω διαδικασία (Εικόνα 15).



Εικόνα 16 – Χάρτης φωτοσκίασης βαρυτικής ανωμαλίας Bouguer της βόρειας Αλπέρτα, φωτισμένος από τον βορά. Οι κόκκινες γραμμές αντιπροσωπεύουν τοπικά γραμμικά στοιχεία

Οι χάρτες φωτοσκίασης (*Εικόνα 16*) αποκαλύπτουν διαφορές στην υφή της ανωμαλίας, τα μήκη κύματος και στις τάσεις μεταξύ των περιοχών. Αυτό επιτυγχάνεται με την γωνία με την οποία το φως του «ηλίου» φωτίζει το ανάγλυφο, με αποτέλεσμα να τονίζονται τοπικές και μικρού μήκους κύματος ανωμαλίες. Ο φωτισμός υπό καθορισμένη γωνία λειτουργεί ως φίλτρο και ενισχύει ανωμαλίες που δεν είναι παράλληλες με το αζιμούθιο του ηλίου.

Η μεγάλης κλίμακας ανωμαλίας, μπορεί να γίνει πιο ευκρινής με την μέθοδο upward continuation, η οποία προσομοιώνει τους χάρτες εάν τα δεδομένα είχαν μετρηθεί σε μεγαλύτερο υψόμετρο, με αποτέλεσμα μικρού μήκους κύματος ανωμαλίες να καταστέλλονται όσο το δυνατόν περισσότερο.

Η σύγκριση των δεδομένων από την upward continuation διαδικασία και των ακατέργαστων δεδομένων, αποκαλύπτει από ποιες ανωμαλίες, μετά το φιλτράρισμα, μπορεί να γίνει εξαγωγή συμπεράσματος. Τα γεωλογικά χαρακτηριστικά του φλοιού φανερώνονται μέσα από τον προσανατολισμό των ανωμαλιών του δυναμικού πεδίου στους χάρτες από την upward continuation διεργασία.

3.1.5. Ανίχνευση Χαρακτηριστικών

Ο αξιόπιστος εντοπισμός των γραμμώσεων γίνεται από έμπειρο ερμηνευτή, ο οποίος γνωρίζει τους γεωλογικούς στόχους και τις ιδιαιτερότητες της περιοχής των ανωμαλιών. Μία οπτική μέθοδος για τον εντοπισμό των γραμμώσεων αποτελεί η προβολή υπό γωνία των χαρτών ή η προβολή του χάρτη από ψηλά. Κατ' αυτόν τον τρόπο, μπορούν να εντοπιστούν διάφορα μοτίβα ανωμαλιών. Επιπλέον, ασυνέχειες οι οποίες μπορεί να σχετίζονται με αρχαίες ελατές δομές, είναι οπτικά έντονες. Γραμμικά χαρακτηριστικά δυναμικών πεδίων που διατρέχουν χιλιόμετρα, κυρίως αντιπροσωπεύουν ζώνες διάτμησης και ρήγματα του φλοιού.

Η απεικόνιση ενός ρήγματος στο δυναμικό πεδίο μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με την τοπική γεωλογία. Η γεωλογική σημασία των γραμμώσεων του δυναμικού πεδίου επιβεβαιώνεται με την γνωστή γεωλογία της επιφάνειας του εδάφους, του υποβάθρου και του ιζηματογενούς καλύμματος.

3.2. Βαρυτικά δεδομένα ως μέσο για τον εντοπισμό ρηγμάτων. Υπόγεια ρήγματα στην περιοχή Almada, Βραζιλία. (Valeria C. F. Barbosa et. al., 2007)

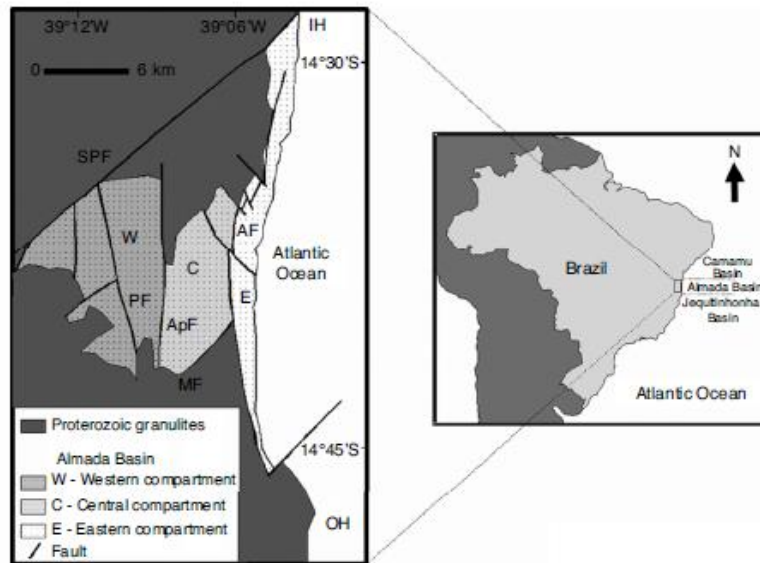
3.2.1. Γενικά

Η ανίχνευση των ρηγμάτων, είναι αρκετά δύσκολη, μόνο από τα βαρυτικά δεδομένα. Ωστόσο ο προσδιορισμός τους μπορεί να γίνει με μεγαλύτερη ευκολία, εφόσον υπάρχει μία απότομη βαρυτική μεταβολή και η πυκνότητα παρουσιάζει κάποια κατακόρυφη μεταβολή. Συνήθως, η ανίχνευση των τεκτονικών δομών και των ρηγμάτων πραγματοποιείται με τεχνικές επεξεργασίας, όπως για παράδειγμα, με τον χάρτη της πρώτης παραγώγου. Όμως, ο προσδιορισμός ρηγμάτων σε μεγάλα βάθη συνεχίζει να αποτελεί πρόβλημα. Γι' αυτό το λόγο, οι μετρήσεις για τον προσδιορισμό της γεωμετρίας των ρηγμάτων γίνεται μέσω της σεισμικής μεθόδου. Παρ' όλα αυτά, οι μέθοδοι της αναστροφής των βαρυτικών μετρήσεων έχουν ικανοποιητικά αποτελέσματα, αλλά έχουν κάποιες αδυναμίες έντονα ανομοιογενούς υπεδάφους.

Η γεωλογική χαρτογράφηση της περιοχής έρευνας είχε αρχίσει ήδη από τις αρχές της δεκαετίας του 1960, ενώ την δεκαετία του 1970 πραγματοποιήθηκαν και γεωτρήσεις στο παράλιο κομμάτι της λεκάνης Almada. Στην περιοχή δεν υπήρξε κάποια περεταίρω ερευνητική εργασία μέχρι το 1997, όπου και έγινε χρήση της σεισμικής μεθόδου για μετρήσεις, με σκοπό την εύρεση δομών που σχετίζονται με υδρογονάνθρακες. Διευκρινίζεται πως ρήγματα είναι δυνατόν να απεικονιστούν με την βαρυτική μέθοδο, η οποία είναι αρκετά πιο οικονομική σε σχέση με την σεισμική μέθοδο.

3.2.2. Γεωλογική Δομή

Το ηπειρωτικό μέρος της λεκάνης Almada, βρίσκεται βορειοανατολικά των ακτών της Βραζιλίας (Εικόνα 17) και οριοθετείται από ένα κανονικό ρήγμα διεύθυνσης νοτιοδυτικά-βορειοανατολικά. Η ιζηματογενής τεκτονική εξέλιξη της λεκάνης Almada είναι συνδεδεμένη με το άνοιγμα του Νότιου Ατλαντικού Ωκεανού. Η στρωματογραφία της



Εικόνα 17 - Λεκάνη Almada, Βραζιλία

διαιρείται σε πέντε κύρια τμήματα-στάδια: 1) προ-ρήγματος, 2) ρήγματος, 3) μεταβατικό, 4) θαλάσσιο επικλυσιογενές και 5) θαλάσσιο υποχώρησης. Η λεκάνη Almada έχει χρονολογηθεί στο κατώτερο Προτεροζωικό.

Τα πετρώματα του υποβάθρου περιλαμβάνουν υψηλής ποιότητας μεταμορφωμένες φάσεις, κυρίως γρανουλίτες και αμφιβολίτες της λεγόμενης ζώνης Itabuna. Υφίσταται ένα τεκτονικό πλαίσιο της χερσαίας λεκάνης Almada που αποτελείται από τρία μέρη: δυτικό, κεντρικό και ανατολικό (*Εικόνα 17*). Αυτό το δομικό πλαίσιο ορίζεται από δύο μεγάλα συστήματα ρηγμάτων. Το πρώτο σύστημα ρηγμάτων έχει διεύθυνση από βορειο-βορειοανατολικά προς βορειοανατολικά και συνδέεται με την Προτεροζωική διατμητική ζώνη Itabuna-Itaju do Colônia, ενώ το δεύτερο σύστημα ρήγματος έχει διεύθυνση βορειοδυτικά.

3.2.3. Βαρυτομετρικά Δεδομένα και Μετρήσεις Πυκνότητας

❖ Λήψη Δεδομένων

Τα βαρυτομετρικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα έρευνα αποτελούνται από 1,183 βαρυτικά σημεία Bouguer. Η *Εικόνα 18.α* παρουσιάζει 969 παλιά βαρυτικά σημεία στα οποία προστέθηκαν 214 καινούργια (γκρι και κόκκινες τελείες, αντίστοιχα). Για την λήψη των δεδομένων, χρησιμοποιήθηκε ένα βαρυτόμετρο LaCoste

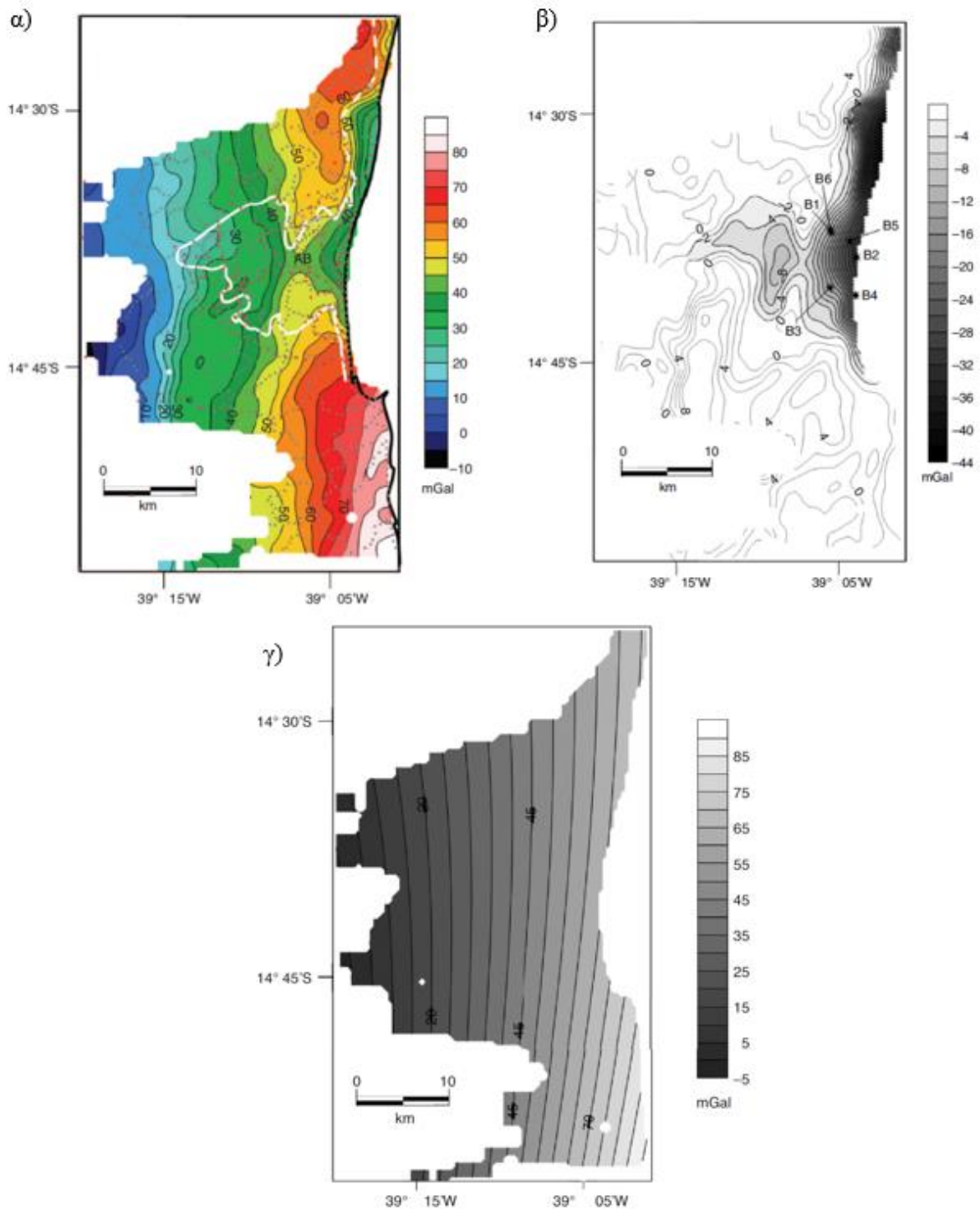
Romberg G622, ενώ γεωγραφικές συντεταγμένες και υψόμετρο λήφθηκαν από διαφορικό GPS, με ακρίβεια μεγαλύτερη του 1m.

❖ Επεξεργασία Δεδομένων

Τα δεδομένα διορθώθηκαν ως προς το γεωγραφικό του πλάτος, με την χρήση της διεθνούς βαρυτικής φόρμουλας:

$$g = 978.03185(1 + 0.005278895 \sin^2\varphi + 0.000023462 \sin^4\varphi)$$

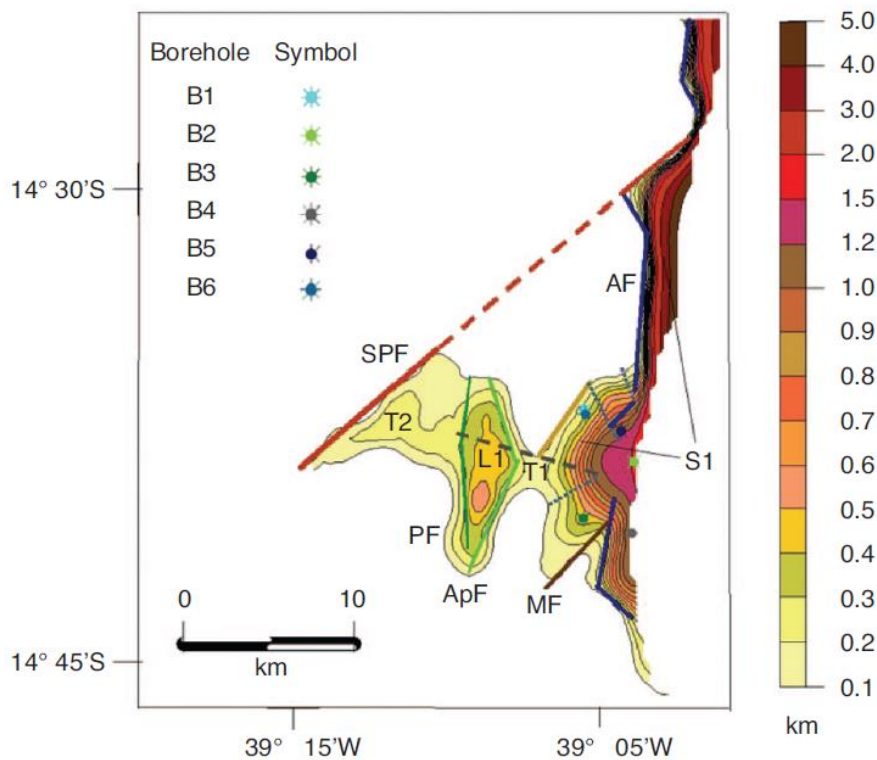
Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε και η διόρθωση Bouguer με πυκνότητα 2.2 g/cm³. Ο τελικός χάρτης για την ανωμαλία Bouguer δίνεται στην Εικόνα 18.α, στην οποία μπορούν να εντοπιστούν εύκολα κάποιες ευδιάκριτες βαρυτικές ανωμαλίες. Η ευρέως μήκους κύματος ανωμαλία υπολογίστηκε μέσω του χάρτη της Εικόνα 18.α με πολωνυμική προσέγγιση 2ου βαθμού (Εικόνα 18.γ), όπου αφαιρώντας την από τον χάρτη ανωμαλίας Bouguer, προκύπτει ο χάρτης της (Εικόνα 18.β), όπου φαίνεται η τοπική βαρυτική ανωμαλία Bouguer του παράλιου μέρους της λεκάνης Almada, διορθωμένη από το φαινόμενο της μείωσης του πάχους του φλοιού, με διεύθυνση προς δυτικά που προσεγγίζει ο χάρτης της Εικόνα 18.γ.



Εικόνα 18 - α) Χάρτης ανωμαλίας Bouguer της παράλιας περιοχής, της λεκάνης Almada, β) Χάρτης ανωμαλίας Bouguer, της λεκάνης Almada, διορθω μένος από την μεγάλης κλίμακας ανωμαλία, γ) Χάρτης ευρέως μήκους κύματος (regional) ανωμαλίας Bouguer, της λεκάνης Almada

3.2.4. Αποτελέσματα Αντιστροφής

Οι εκτιμήσεις του βραχώδους υποβάθρου Almada έγιναν με την 3D απεικόνιση της τοπογραφίας του, η οποία αποκτήθηκε χρησιμοποιώντας την μέθοδο Barbosa (1997) στην ερμηνεία της βαρυτικής ανωμαλία της Εικόνα 18.γ. Τα αποτελέσματα της αντιστροφής



Εικόνα 19 - Χάρτης λεκάνης Almada, για τα εκτιμώμενα αποτελέσματα του βάθους με την μέθοδο αντιστροφής κατά Barbosa (1997).

απεικονίζονται στην Εικόνα 19 και δείχνουν πως το υπέδαφος της λεκάνης Almada ελέγχεται από αρκετά ρήγματα που είναι σε συμφωνία με τις γεωλογικές πληροφορίες που είχαν δημοσιοποιηθεί κατά Netto και Sanches (1991).

3.2.5. Συμπεράσματα

Η συγκεκριμένη έρευνα αποδεικνύει πως τα βαρυτικά δεδομένα αποτελούν ένα χρήσιμο και οικονομικά αποδοτικό εργαλείο, για την απεικόνιση της γεωμετρίας των ρηγματομένων περιοχών σε σχέση με τις σεισμικές μεθόδους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο
ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο: ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

4. Βαρυτομετρική έρευνα σε παράκτια περιοχή της Αλεξανδρούπολης

4.1. Γενική Περιγραφή Προβλήματος

Το αντικείμενο της διπλωματικής, όπως προαναφέρθηκε, αφορά στην γεωφυσική έρευνα στο πλαίσιο της κατασκευής ενός αγωγού φυσικού αερίου, ο οποίος θα περνά από την περιοχή έρευνας (περιοχή Απαλού, νοτιοανατολικά της Αλεξανδρούπολης). Το συγκεκριμένο έργο αποτελεί μέρος ενός ευρύτερου project, κατασκευής και λειτουργίας μιας Πλωτής Μονάδας Αποθήκευσης και Αεροποίησης, για το φυσικό αέριο (FSRU- Floating Storage Regasification Unit) .



Εικόνα 20- Δορυφορική εικόνα της περιοχής Απαλού, Αλεξανδρούπολης μέσω του προγράμματος Google Earth

Ο αγωγός της μεταφοράς του φυσικού αερίου έχει μήκος περίπου 28 χλμ, εκ των οποίων 24 χλμ βρίσκονται υποθαλάσσια και 4 χλμ εκτείνονται βόρεια από την περιοχή του Απαλού και έπειτα. Εκεί, ο αγωγός θα συνδέεται με το Εθνικό Σύστημα Μεταφοράς Φυσικού Αερίου (περιοχή της Αμφιτρίτης) και θα μπορεί να συνδεθεί και με άλλους

αγωγούς της περιοχής, όπως ο TAP (Trans Adriatic Pipeline-Διαδριατικός Αγωγός Φυσικού Αερίου).

Η περιοχή ενδιαφέροντος, λοιπόν, είναι αναγκαίο να ερευνηθεί, καθώς ενδέχεται ο αγωγός να διαπερνά κάποιο ρήγμα, το οποίο και θα επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό την προσέγγιση της κατασκευής του.

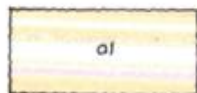
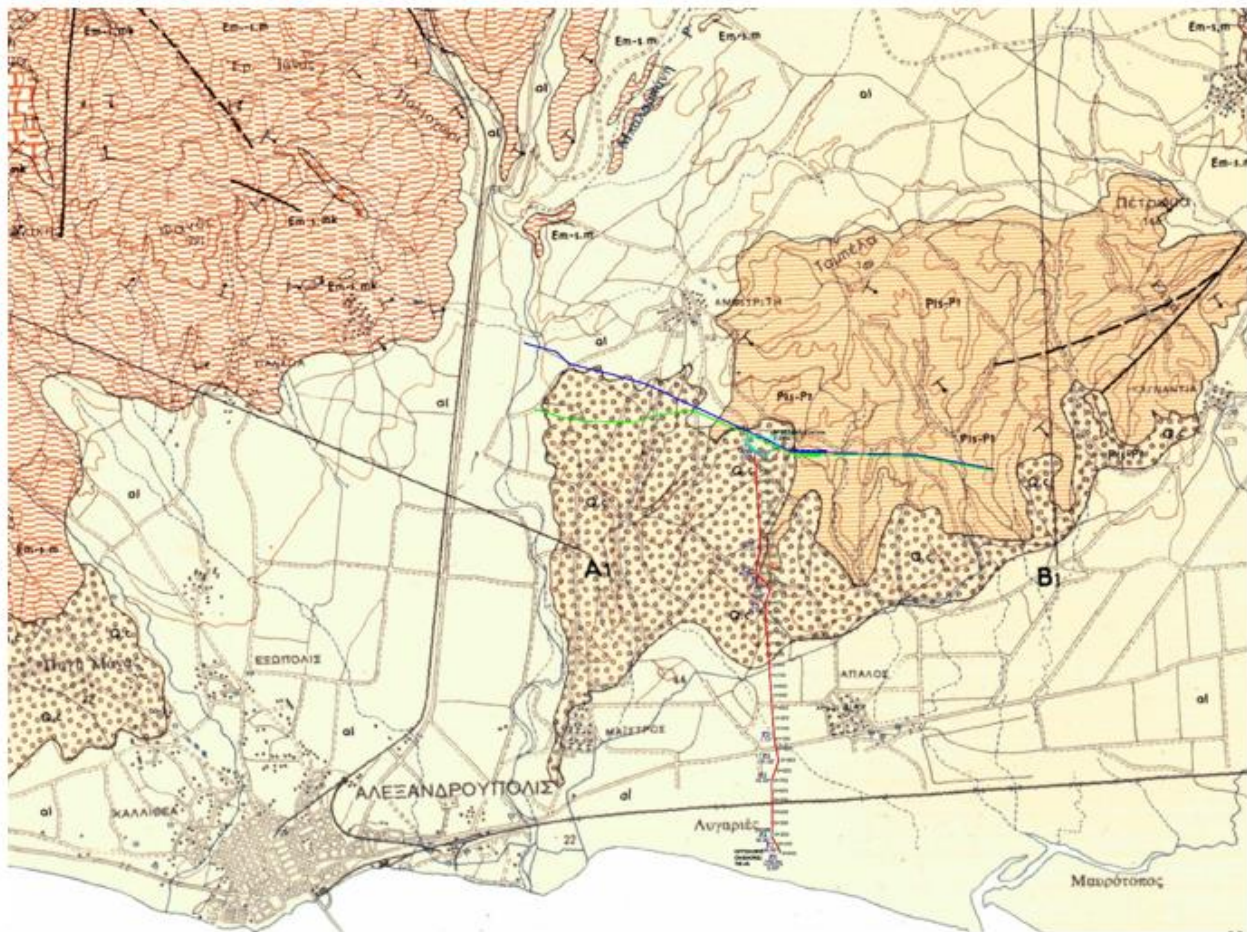
4.2. Γεωλογία Περιοχής

Θα ερευνηθεί, για τη συγκεκριμένη διπλωματική λοιπόν, η παράκτια περιοχή της Αλεξανδρούπολης, η οποία βρίσκεται στην λεκάνη της Θράκης (Thrace Basin-THB) και αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες τριτογενείς λεκάνες στο Βόρειο Αιγαίο. Αναλυτικότερα, η λεκάνη της Θράκης έχει σχηματιστεί από μεταμορφωμένα πετρώματα της μάζας της Ροδόπης, Βόρεια της Ελλάδας και Νότια της Βουλγαρίας, ενώ γενικότερα, η μάζα της Ροδόπης, αποτελεί τμήμα της ορογενετικής ζώνης των Άλπεων και των Ιμαλαΐων.

Η απόθεση της λεκάνης της Θράκης, αποτελείται από ιζηματογενείς μολλασικούς σχηματισμούς από την Παλαιογενή εποχή, οι οποίοι επικαλύπτονται από μια παχιά (1-2 km) Νεογενή-Τεταρτογενή ιζηματογενή ακολουθία. Ειδικότερα, πάνω από το 90% της συνολικής επιφάνειας της λεκάνης της Θράκης είναι καλυμμένη από νεότερα Νεογενή ιζήματα αλλά και από τη θάλασσα του Αιγαίου. Επιπλέον, περίπου το 10% των σχηματισμών, οι οποίοι εμφανίζονται στην επιφάνεια, αποτελούν παλαιογενείς σχηματισμούς.

Το ευρύτερο περιβάλλον, όπως και η περιοχή της έρευνας, βρίσκεται μέσα σε εδαφικούς σχηματισμούς, οι οποίοι με την σειρά τους βρίσκονται πάνω από το βραχώδες υπόβαθρο. Το βραχώδες υπόβαθρο, στην προκειμένη περίπτωση, βρίσκεται σε μεγάλο βάθος, με αποτέλεσμα ο αγωγός να μην έχει πιθανότητες να το συναντήσει.

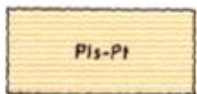
Η περιοχή έρευνας (περιοχή του Νότιου αγωγού), σύμφωνα με το γεωλογικό χάρτη της Ελλάδας (Εικόνα 21), αποτελείται κυρίως από άργιλο, άμμο, αδρανή υλικά, σύγχρονες χερσαίες και παράκτιες αποθέσεις, ενώ στην ευρύτερη περιοχή συναντώνται χειμαρρώδεις αποθέσεις αποτελούμενες από κόκκινες αργίλους, άμμους και κροκαλοπαγή. Επιπλέον, στην ευρύτερη περιοχή παρουσιάζονται γκρίζοι άργιλοι, καθώς και χαλαρά κροκαλοπαγή.



Loam, sand, aggregate: recent terrestrial and coastal deposits.



Torrential deposits: red loam, sand, conglomerate, mainly of small calcareous pebbles. Terraces of conglomerates in the region Nea Chili-Mairos-Agnantia. Conglomerates and sandstones at the beaches.



Gray clays: often with plant remnants; locally sandy, compact. **Loose conglomerates:** of volcanites of different types and tuffs with volcanic or reddish to yellowish clayey-sandy matrix. They lie unconformably on the Eocene basement with a constant gentle dip to SE. They occur in the area between the villages Agnantia and Amphitriti.

Εικόνα 21 – Γεωλογικός χάρτης Αλεξανδρούπολης

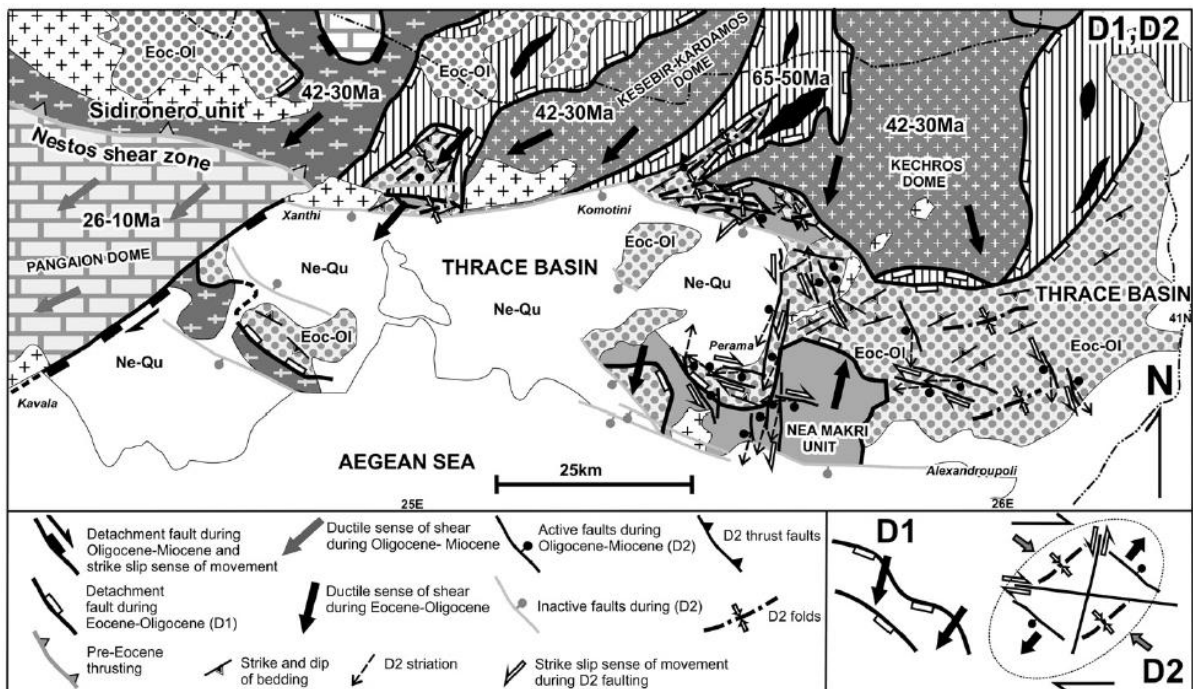
4.3. Τεκτονική Περιοχής

Για την πλήρη εκτίμηση της περιοχής, είναι απαραίτητη και η γνώση της τεκτονικής της, καθώς μπορεί να συμβάλει ενεργά στον προσδιορισμό κάποιου πιθανού στόχου.

Σύμφωνα με τα παραπάνω λοιπόν, η δομική εξέλιξη της λεκάνης της Θράκης καταγράφεται σε πέντε τεκτονικά γεγονότα D1 έως D5, από το Ηώκαινο έως το Τεταρτογενές (Kilias et. al. 2013).

❖ Πρώτο τεκτονικό γεγονός-D1

Το πρώτο γεγονός -D1- χαρακτηρίζεται από κανονικά ρήγματα απόσπασης, στα τεκτονικά όρια της Παλαιογενούς λεκάνης με τα πετρώματα του υποβάθρου. Τα ρήγματα αποκόλληση D1 διατρέχουν με διεύθυνση από Α-Δ έως ΒΔ-ΝΑ και έχουν ως κύρια κατεύθυνση βύθισης Ν-ΝΔ. Ωστόσο, σε διάφορα τμήματα παρατηρούνται αποκλίσεις, με την κατεύθυνση βύθισης να παρατηρείται έως και Β-ΒΑ.



Εικόνα 22 – Κύριες δομές και κινητική των τεκτονικών γεγονότων D1 και D2 (A. Kilias et. Al.)

❖ Δεύτερο τεκτονικό γεγονός-D2

Η εξέλιξη του δεύτερου τεκτονικού γεγονότος -D2- , συνέβη κατά τη διάρκεια του Ολιγόκαινου-Μειόκαινου. Το D2 σχετίζεται με τον σχηματισμό συζυγών ρηγμάτων ολίσθησης και ρηγμάτων επέκτασης, καθώς και με ρήγματα και πτυχές με κατεύθυνση κίνησης B-BΔ ή N-NA.

❖ Τρίτο τεκτονικό γεγονός-D3

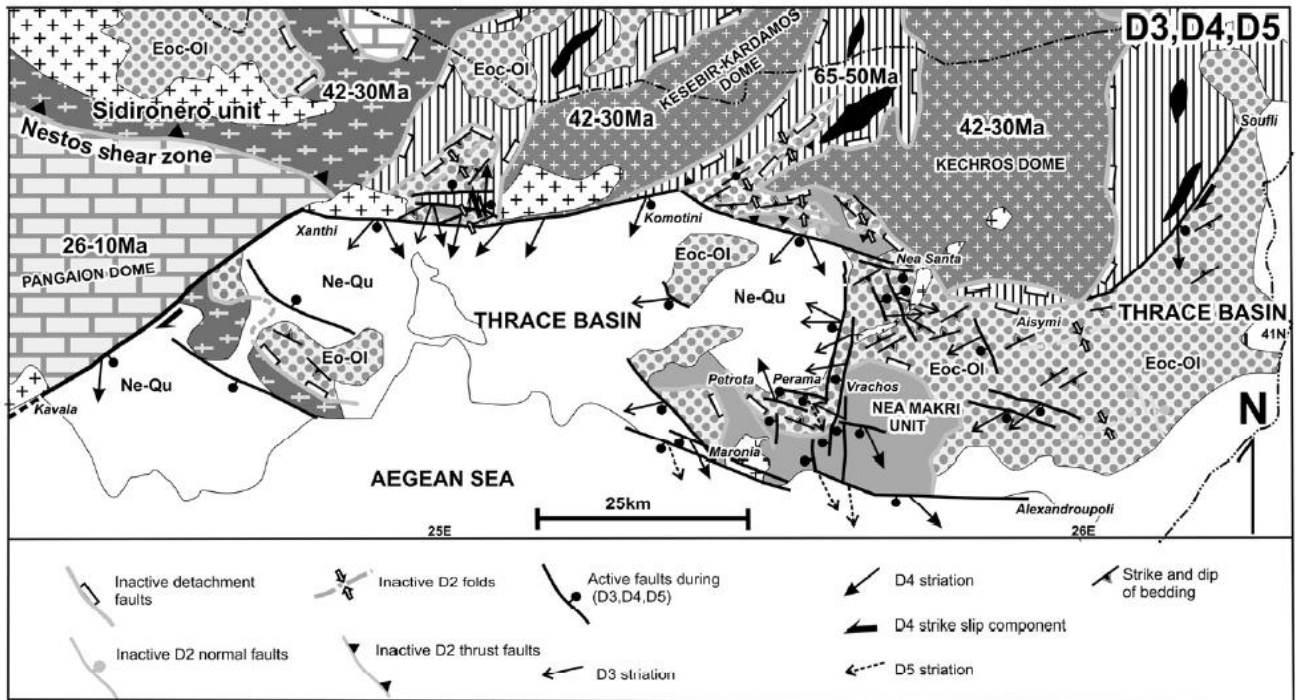
Το D3 (τρίτο τεκτονικό γεγονός) λαμβάνει χώρα κατά την διάρκεια του Μειόκαινου-Πκείόκαινου και ευθύνεται για τα κανονικά ρήγματα μεγάλης γωνίας, που διαμελίζουν τη μολασσική λεκάνη του Ηώκαινου-Ολιγόκαινου, σε νεογενείς τάφρους. Επίσης, ορισμένα ρήγματα ολίσθησης του D2 ενεργοποιούνται εκ νέου κατά την διάρκεια του D3. Όπως και με τα γεγονότα D1 και D2, που προηγήθηκαν, η επέκταση του D3 ακολουθεί περίπου τον ίδιο προσανατολισμό BA-NΔ έως και ABA-ΔNΔ.

❖ Τέταρτο τεκτονικό γεγονός-D4

Το τέταρτο τεκτονικό γεγονός -D4- σχετίζεται με μεγάλες ζώνες ρηγμάτων, κατεύθυνσης ΔBΔ-ANA με BA-NΔ, κάποιες από τις οποίες είναι παλαιότερες και είχαν επανενεργοποιηθεί κατά την διάρκεια του D4. Οι δομές του τέταρτου τεκτονικού γεγονότος, υπολογίζονται από το Πλειόκαινο και χαρακτηρίζονται από μικρά ανάστροφα ρήγματα ενώ κατά την διάρκεια του γεγονότος, ο προσανατολισμός της επέκτασης αλλάζει ελαφρώς σε BBA-NNA.

❖ Πέμπτο τεκτονικό γεγονός-D5

Ορισμένες από τις ζώνες ρήγματος του D4 παραμένουν ενεργές μέχρι σήμερα (D5) και αποτελούν μεγάλα ενεργά ρήγματα, που επαναδραστηριοποιούνται. Η αρχή του D5 εκτιμάται από το Πλειστόκαινο έως τη σημερινή εποχή, ενώ το συγκεκριμένο τεκτονικό γεγονός αντιπροσωπεύει την ενεργή ζώνη ρηγμάτων Μαρώνειας στην Αλεξανδρούπολη. Η συγκεκριμένη ζώνη αποτελείται από δύο παράλληλα ρήγματα με κατεύθυνση A-Δ.



Εικόνα 23- Κύριες δομές και κινητική των τεκτονικών γεγονότων D3, D4 και D5 (A. Kiliadis et al.)

4.4. Γεωφυσική Έρευνα – Μετρήσεις Υπαίθρου

4.4.1. Μέθοδος Γεωφυσικής Έρευνας

Η μέθοδος που επιλέγεται για μία γεωφυσική έρευνα, επιλέγεται με σκοπό την κάλυψη των αναγκών της έρευνας αλλά και των χαρακτηριστικών του γεωλογικού υποβάθρου, όπου αυτή θα πραγματοποιηθεί. Έτσι, για την έρευνα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η μέθοδος που επιλέχθηκε, όπως έχει προαναφερθεί, είναι η **Βαρυτομετρική Μέθοδος**. Η συγκεκριμένη μέθοδος αποτελεί ένα αξιόπιστο εργαλείο για τον εντοπισμό βαθέων γεωλογικών δομών, όπως είναι τα ρήγματα, το οποίο αποτελεί και το ζητούμενο στην συγκεκριμένη έρευνα.

4.4.2. Βαρυτικές μετρήσεις στο ύπαιθρο

Οι βαρυτικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν τον Ιούνιο του 2022 σε περιοχή, νότια του Απαλού Αλεξανδρούπολης. Για τον εντοπισμό του στόχου (στην συγκεκριμένη έρευνα, του ρήγματος), οι μετρήσεις της βαρύτητας έγιναν με διεύθυνση κάθετη ως προς την εκτιμώμενη διεύθυνση του ρήγματος. Το ρήγμα εκτιμάται ότι βρίσκεται νότια της περιοχής έρευνας και έχει διεύθυνση ανατολής-δύσης, συνεπώς, οι μετρήσεις έγιναν με προσανατολισμό κάθετο (βοράς-νότος). Η συγκεκριμένη μέθοδος προσανατολισμού, για τη λήψη των μετρήσεων αποτελεί ένα «κανόνα» για την ευκολότερη εμφάνιση στόχων, μέσα από τις μετρήσεις, όπως το ρήγμα.

Επιπρόσθετα οι μετρήσεις βαρύτητας έγιναν με βαρυτόμετρο τύπου LaCoste Romberg G580, αλλά και με διαφορικό GPS για τις ακριβείς θέσεις των μετρήσεων, εξοπλισμός ο οποίος ανήκει στο εργαστήριο της Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής της Σχολής των Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών του ΕΜΠ (Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου).



Εικόνα 24 - Βαρυτόμετρο τύπου LaCoste Romberg G580 (αριστερά) και διαφορικό GPS (δεξιά)

Οι μετρήσεις, όπως απεικονίζεται και από την Εικόνα 25, γίνανε ως τρεις παράλληλες ευθείες, με διεύθυνση B-N, όπως προαναφέρθηκε. Αναλυτικότερα, οι μετρήσεις σε κάθε ευθεία, έγιναν με βήμα είκοσι μέτρων (20 m) περίπου, ενώ οι ευθείες απέχουν μεταξύ τους περίπου στο ένα χιλιόμετρο (1 km).

Παρακάτω, παρουσιάζεται ο κάρναβος των μετρήσεων, που περιέχει όλες τις θέσεις μετρήσεων καθώς και τη βάση των μετρήσεων. Οι θέσεις μετρήσεων της βαρύτητας συμβολίζονται με μάρνους ρόμβους, ενώ με κόκκινο συμβολίστηκε η θέση της βάσης, στην οποία, ανά τακτά χρονικά διαστήματα γινόταν η εκ νέου μέτρηση της βαρύτητας, για τις μετέπειτα διορθώσεις των δεδομένων.



Εικόνα 25 – Δορυφορική εικόνα των θέσεων η οποία απεικονίστηκε με την βοήθεια των προγραμμάτων Google Earth και Surfer Golden Software

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

5. Επεξεργασία Δεδομένων και Βαρυτικοί Χάρτες

5.1. Επεξεργασία Δεδομένων

5.1.1. Βαρυτικές Διορθώσεις

Όπως έχει αναφερθεί και στο **2^ο Κεφάλαιο**, τα δεδομένα από τις βαρυτικές μετρήσεις είναι απαραίτητο να διορθωθούν, έτσι ώστε να γίνει σωστή ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά όλες οι διορθώσεις που έγιναν στα δεδομένα των μετρήσεων:

❖ **Drift Correction**

Διόρθωση λόγω της αλλαγής των μετρούμενων τιμών σε μία σταθερή θέση, η οποία μπορεί να οφείλεται σε διαφορετική συμπεριφορά του βαρυτόμετρου σε σχέση με το χρόνο αλλά και λόγω παλιρροιακών φαινομένων. Η τιμή που προκύπτει αποτελεί την παρατηρούμενη βαρυτική ανωμαλία (g_{obs})

❖ **Διόρθωση Γεωγραφικού Πλάτους**

Λόγω του σχήματος της Γης (σφαιροειδής), το βαρυτικό πεδίο της μεταβάλλεται από θέση σε θέση, καθώς υπάρχει διόγκωση στον ισημερινό και επιπεδοποίηση στους πόλους της. Επιπλέον, σημαντικό ρόλο παίζει και η μάζα που βρίσκεται στον ισημερινό, με αποτέλεσμα να είναι αναγκαία η διόρθωση γεωγραφικού πλάτους (g_{ϕ})

❖ Διόρθωση Ελεύθερου Αέρα

Οι υψομετρικές μεταβολές, στα σημεία των μετρήσεων, αποτελούν κι αυτές με την σειρά τους έναν παράγοντα ο οποίος επηρεάζει τις μετρήσεις. Η διόρθωση ελεύθερου αέρα (g_{FA}) έχει καταλυτικό ρόλο στην αναγωγή των μετρήσεων στο ίδιο επίπεδο.

❖ Διόρθωση Bouguer

Η διόρθωση Bouguer (g_B) λαμβάνει υπόψη τη μάζα η οποία υπάρχει μεταξύ επιπέδου αναφοράς και της θέσεως μέτρησης. Στην περίπτωση όπου η μέτρηση είναι σε μεγαλύτερο υψόμετρο από το επίπεδο αναφοράς τότε η διόρθωση αφαιρείται, αντίθετα στη περίπτωση που η μέτρηση βρίσκεται σε μικρότερο υψόμετρο η διόρθωση προστίθεται.

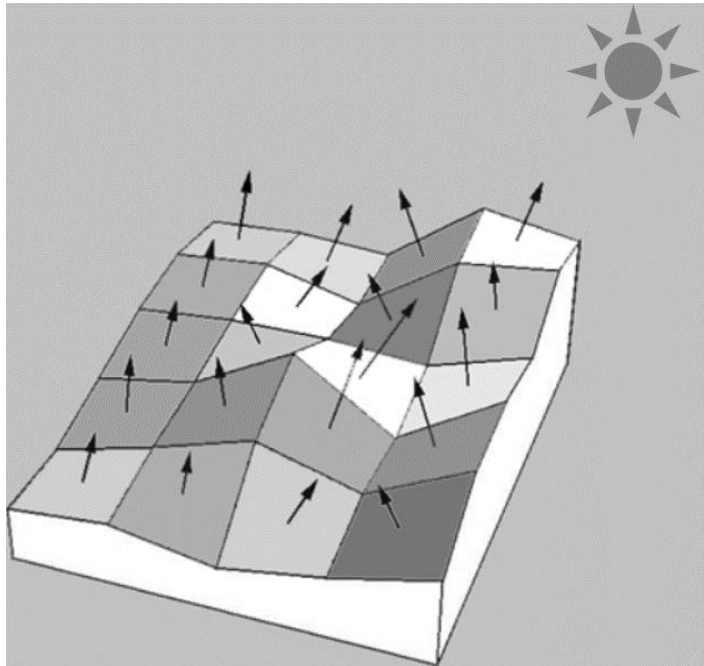
❖ Τοπογραφική Διόρθωση

Το τοπογραφικό ανάγλυφο γύρω από τα σημεία των μετρήσεων, έχει θεωρηθεί ως επίπεδο, κάτι το οποίο συμβαίνει σε λίγες περιπτώσεις. Η τοπογραφική διόρθωση (g_t) αναλαμβάνει την εισαγωγή και αυτής της παραμέτρου στις διορθώσεις, με αποτέλεσμα να λαμβάνεται υπόψη η τοπογραφία στις μεταβολές της επιτάχυνσης.

5.1.2. Μέθοδος Φωτοσκίασης

Πέρα από τις βαρυτικές διορθώσεις, η επόμενη μέθοδος η οποία θα χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του ρήγματος αποτελεί η μέθοδος της φωτοσκίασης. Η φωτοσκίαση αποτελεί μέθοδο η οποία προσομοιώνει την επίδραση του φωτισμού σε ένα ανάγλυφο. Η πληροφορία που αποτυπώνεται στο ανάγλυφο ποικίλει και μπορεί να είναι διαφόρων ειδών. Αναλυτικότερα, το γνωστότερο ανάγλυφο αποτελεί αυτό της τοπογραφίας η οποία χρησιμοποιεί τις τιμές του υψομέτρου για την δημιουργία ενός χάρτη ισοψών καμπύλων. Ωστόσο ένας χάρτης με ισοκαμπύλες, για την επιστήμη της γεωφυσικής, μπορεί να απεικονισθεί για κάθε μετρούμενο μέγεθος, όπως η βαρύτητα, η ηλεκτρική αγωγιμότητα ή η μαγνητική επιδεκτικότητα, με το αποτέλεσμα των μετρήσεων να μπορεί να αποτυπωθεί ως ανάγλυφο σε έναν χάρτη με μέγιστα και ελάχιστα των εκάστοτε μεγεθών.

Σε κάθε περίπτωση, η φωτοσκίαση αποτυπώνει την υφή αλλά και τις τάσεις του αναγλύφου ενός χάρτη. Επιπρόσθετα, ο φωτισμός που επιδέχεται ένα ανάγλυφο, συνήθως είναι υπό γωνία ως προς το επίπεδο του αναγλύφου και υπό συγκεκριμένο γεωγραφικό προσανατολισμό, ενώ είναι πιθανό να είναι χρήσιμη η ανύψωση αλλά και η περιστροφή του φωτισμού. Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι η δημιουργία ενός χάρτη με σκιές στα σημεία τα οποία δεν μπορεί το φως να φτάσει, η ανάκλαση ή η υψηλή φωτεινότητα σε σημεία που το φως φτάνει με μεγάλη ευκολία, αλλά και η μεταξύ τους περιοχές που έχουν ενδιάμεσους τόνους φωτεινότητας.



Εικόνα 26 - Μοντέλο αναπαράστασης χάρτη φωτοσκίασης, με διάφορα τμήματα σε διάφορους τόνους φωτεινότητας.

5.2. Βαρυτικοί Χάρτες

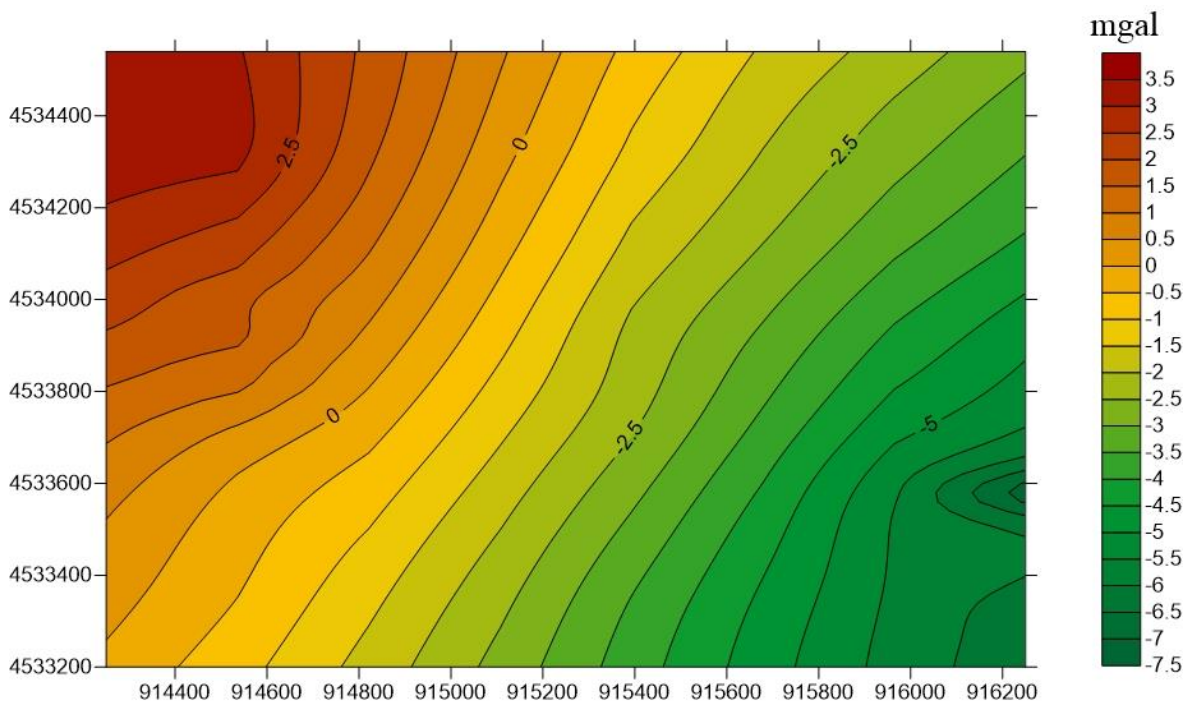
5.2.1. Γενικά

Η επεξεργασία των βαρυτικών δεδομένων μέσω των διορθώσεων, που προαναφέρθηκαν, αποδίδουν τις τιμές της ανωμαλίας Bouguer. Οι συγκεκριμένες τιμές αποτελούν και τα κύρια δεδομένα, στα οποία στηρίζεται η έρευνα για την τεκτονική της περιοχής ενδιαφέροντος.

Έπειτα από τη διόρθωση, τα δεδομένα εισήχθησαν σε ειδικό λογισμικό, το οποίο είναι κατάλληλο για την δημιουργία και την αποτύπωση ισοκαμπύλων των βαρυτικών τιμών, σε χάρτες. Η δημιουργία των ισοϋψών καμπυλών μπορεί να γίνει με διάφορες μεθόδους-αλγορίθμους, η επιλογή των οποίων πραγματοποιείται ανάλογα με τη χρήση του εκάστοτε

χάρτη. Παρακάτω, παρουσιάζονται οι χάρτες που δημιουργήθηκαν και οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιήθηκαν, με το συγκεκριμένο πρόγραμμα.

5.2.2. Χάρτης Ανωμαλίας Bouguer



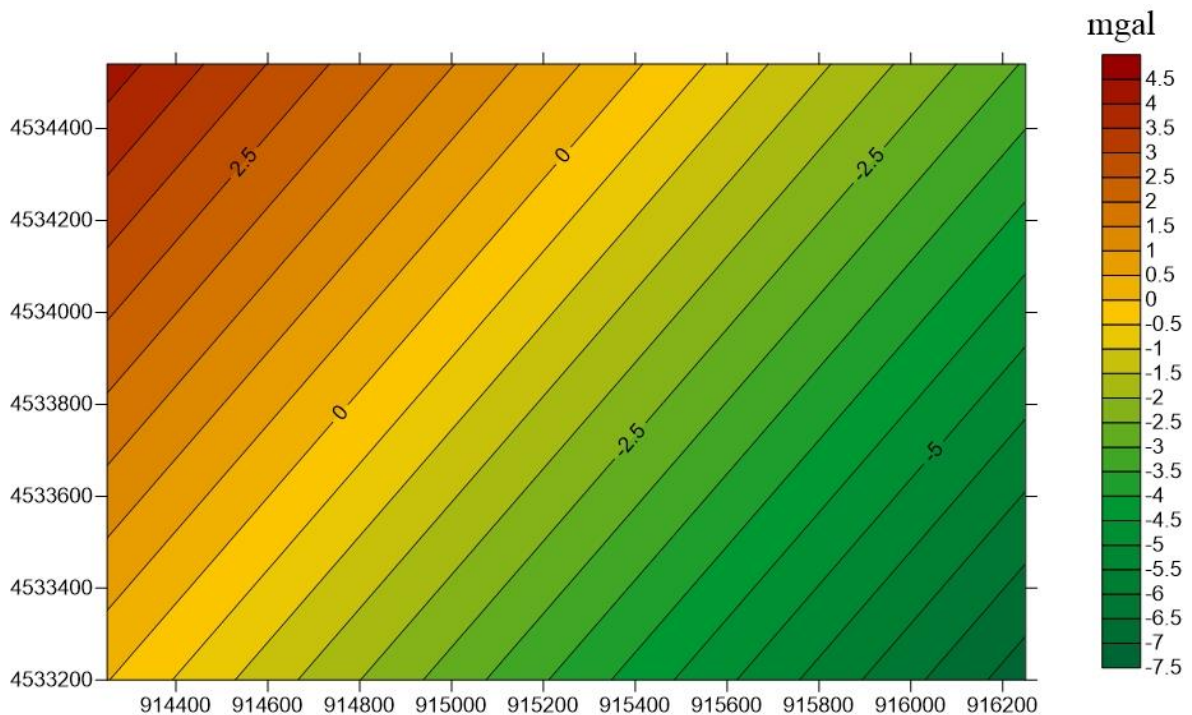
Εικόνα 27 – Χάρτης ανωμαλίας Bouguer (με γεωγραφικές συντεταγμένες utm24N)

Παραπάνω, απεικονίζεται ο χάρτης της Ανωμαλίας Bouguer, ο οποίος δημιουργήθηκε με την βοήθεια του ειδικού λογισμικού Surfer, στο οποίο εισήχθησαν τα διορθωμένα δεδομένα. Η μέθοδος-αλγόριθμος δημιουργίας του πλέγματος που χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία του χάρτη της Ανωμαλίας Bouguer ονομάζεται **Kriging**, ενώ σαν βήμα καννάβου θεωρήθηκαν για τον άξονα x τα 300m και για τον άξονα y τα 20m (300x20).

Για τον αρχικό χάρτη της Ανωμαλίας Bouguer παρατηρείται μία σταδιακή διακύμανση της βαρυτικής ανωμαλίας με διεύθυνση ΒΔ-ΑΝΑ καθώς επίσης παρατηρούνται και τοπικές διακυμάνσεις στα ΒΔ και ΝΑ του παραπάνω χάρτη.

5.2.3. Χάρτης Μεγάλης Κλίμακας Ανωμαλίας

Ο χάρτης Μεγάλη Κλίμακας Ανωμαλίας (Regional Gravity Anomaly), αποτελεί σημαντικό κομμάτι για την μετέπειτα επεξεργασία των δεδομένων, καθώς με την αφαίρεση της μεγάλης κλίμακας βαρυτικής επιρροής μπορεί να απεικονιστεί η τοπική βαρυτική ανωμαλία. Στην Εικόνα 28, παρουσιάζεται ο χάρτης της Μεγάλης Κλίμακας Ανωμαλίας, ο οποίος προέκυψε μετά την εφαρμογή της μεθόδου της Πολυωνυμικής Προσέγγισης (Αποστολόπουλος, 2015) και από την επιλογή του αλγορίθμου **Polynomial Regression** στο πρόγραμμα Surfer.

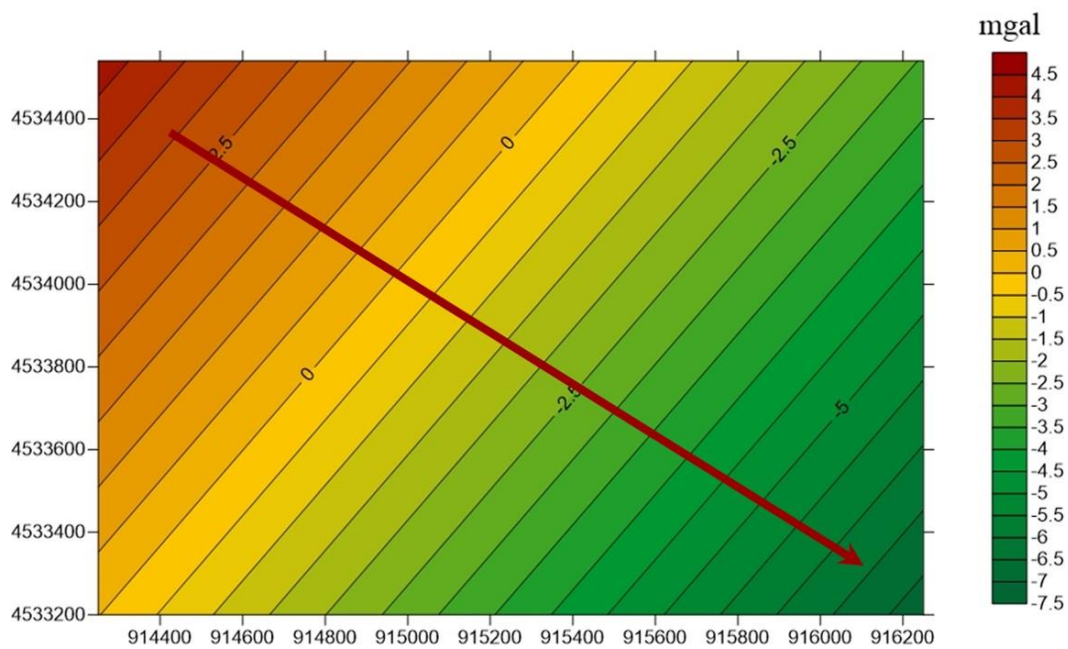


Εικόνα 28 – Χάρτης μεγάλης κλίμακας ανωμαλίας (με γεωγραφικές συντεταγμένες utm24N)

Για τον υπολογισμό και την έκφραση της υπολειπόμενης βαρυτικής ανωμαλίας-τοπικής βαρυτικής ανωμαλίας, αφαιρούνται οι τιμές της ευρέως κλίμακας ανωμαλίας από την ανωμαλία Bouguer με αποτέλεσμα οι τιμές που προκύπτουν να απεικονίζουν μόνο τις τιμές της τοπικής ανωμαλίας.

5.2.4. Παρατηρήσεις Χάρτη Μεγάλης Κλίμακας Ανωμαλίας

Όπως αποτυπώνεται και στον χάρτη της Εικόνας 28 η διεύθυνση της μεταβολής του βαρυτικού πεδίου (για την μεγάλη μήκους κύματος ανωμαλίας) είναι ΒΔ-ΝΑ, με την μείωση της επιτάχυνσης του βαρυτικού πεδίου προς τα ΝΑ, η οποία απεικονίζεται και από το βέλος της Εικόνας 29. Η συγκεκριμένη διεύθυνση της μεταβολής της βαρύτητας, δεν έρχεται σε αντιπαράθεση με τη γεωλογία της περιοχής του γεωλογικού χάρτη της

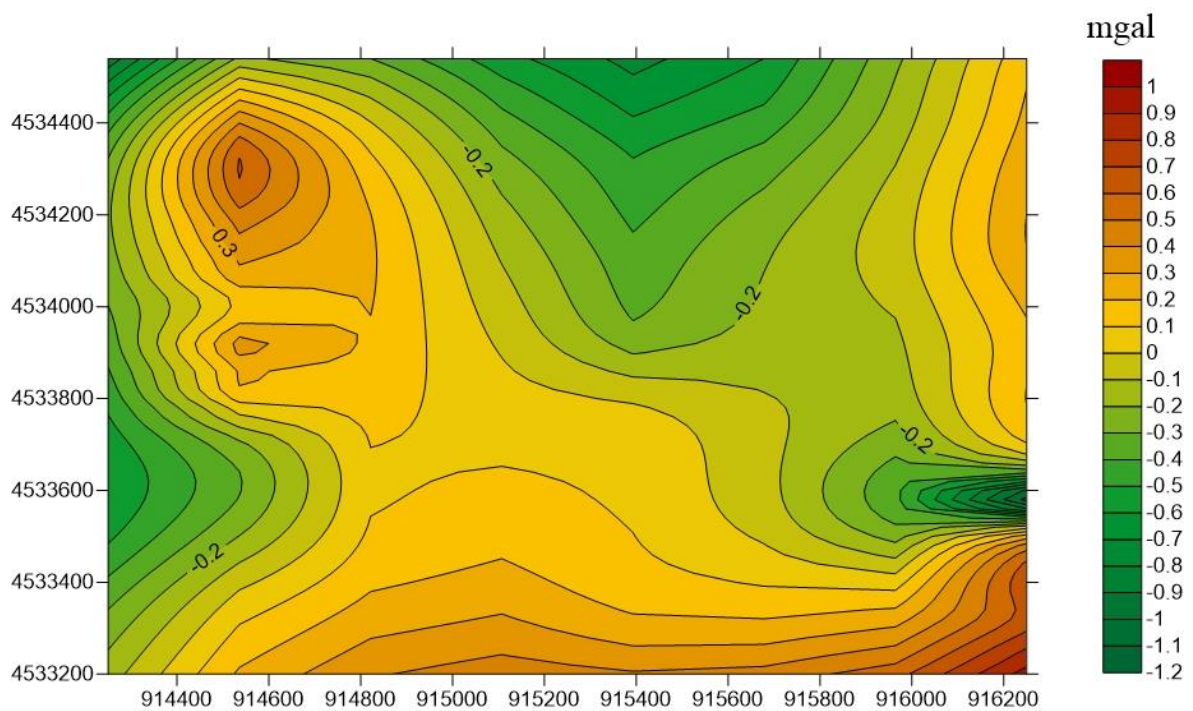


Εικόνα 29 – Χάρτης μεγάλης κλίμακας ανωμαλίας και βέλος που υποδεικνύει την κατεύθυνση της μείωσης των τιμών της βαρυτικής ανωμαλίας (με γεωγραφικές συντεταγμένες utm24N)

Αλεξανδρούπολης, που παρουσιάστηκε στην Εικόνα 20 και απεικονίζει, βορειοδυτικά σχηματισμούς με μεγαλύτερη πυκνότητα, κυρίως κόκκινες αργίλους, άμμους και κροκαλοπαγή ενώ, νοτιοανατολικά συναντώνται αλουβιακοί και αργιλικοί σχηματισμοί.

5.2.5. Χάρτης Μικρής Κλίμακας Ανωμαλίας

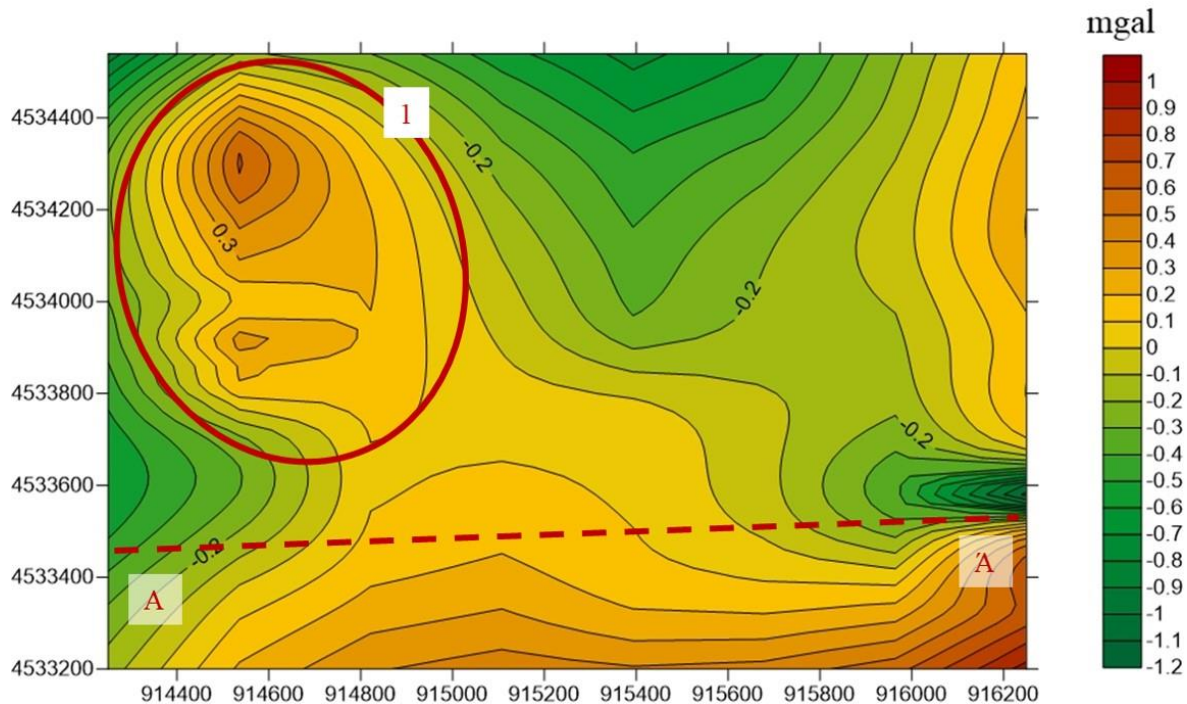
Μέσω της διαδικασίας αφαίρεσης της Μεγάλης Κλίμακας Ανωμαλίας (Regional Anomaly) από την Ανωμαλία Bouguer (Παρατηρούμενη Ανωμαλία), οι τιμές αντικατοπτρίζουν πλέον την Μικρής Κλίμακας Ανωμαλία-Υπολειπόμενη Ανωμαλία (Residual Anomaly). Στην Εικόνα 30, απεικονίζεται ο βαρυτικός χάρτης της Μικρής Κλίμακας Ανωμαλίας, για την περιοχή έρευνας, ο οποίος, όπως προαναφέρθηκε, έχει δημιουργηθεί με την αφαίρεση του χάρτη της Μεγάλης Κλίμακας Ανωμαλίας (Regional Anomaly) από τον χάρτη της Ανωμαλίας Bouguer (Bouguer Anomaly).



Εικόνα 30 - Χάρτης μικρής κλίμακας ανωμαλίας (με γεωγραφικές συντεταγμένες utm24N)

5.2.6. Παρατηρήσεις Χάρτη Μικρής Κλίμακας Ανωμαλίας

Σύμφωνα με την Εικόνα 30 του χάρτη Μικρής Κλίμακας Ανωμαλίας, μπορούν να παρατηρηθούν δύο κύριες δομές ενδιαφέροντος, για την συγκεκριμένη έρευνα.



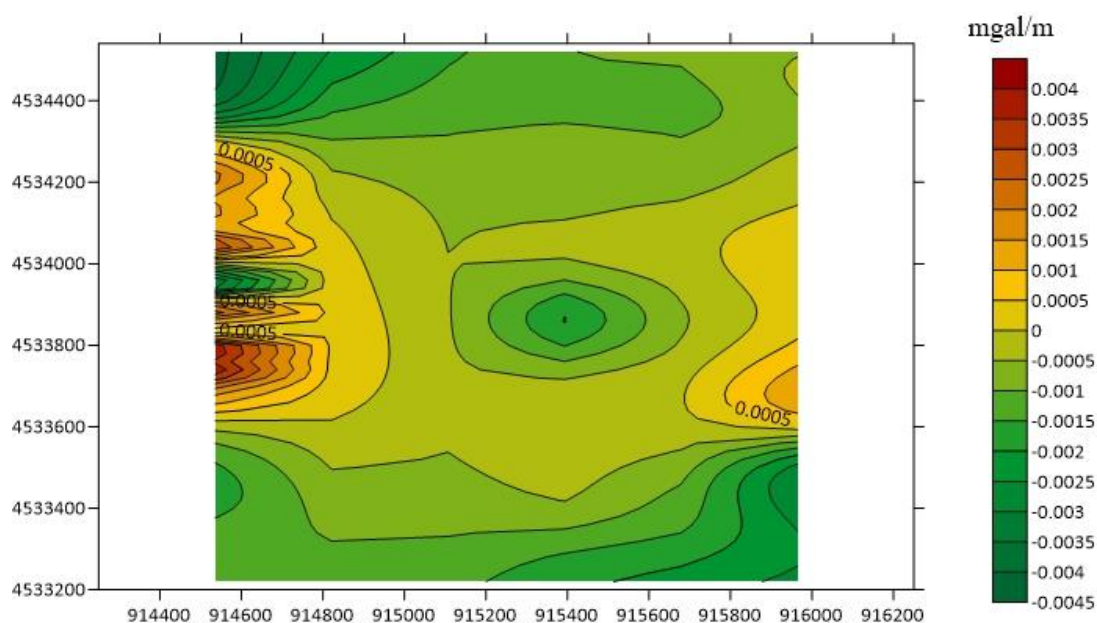
Εικόνα 31 - Χάρτης μικρής κλίμακας ανωμαλίας με την περιοχή ενδιαφέροντος «1» και την τομή «ΑΑ» (με γεωγραφικές συντεταγμένες utm24N).

Η πρώτη περιοχή ενδιαφέροντος, απεικονίζεται στην Εικόνα 31 με κόκκινο και με την σήμανση «1» και βρίσκεται βορειοδυτικά της περιοχής έρευνας. Στη συγκεκριμένη περιοχή, παρατηρείται μια δομή με μεγαλύτερες τιμές βαρυτικής επιτάχυνσης, σε σχέση με τις τιμές βαρυτικής επιτάχυνσης για την ευρύτερη περιοχή περίξ της δομής «1». Η δεύτερη δομή ενδιαφέροντος, απεικονίζεται ως τομή «ΑΑ» και διαχωρίζει τις τιμές οι οποίες βρίσκονται βόρεια (χαμηλές βαρυτικές τιμές) από τις τιμές οι οποίες βρίσκονται νότια (υψηλές βαρυτικές τιμές). Η περιοχή ενδιαφέροντος «1» παρατηρείται πως βρίσκεται σε ασυμφωνία με την ευρύτερη τάση των βαρυτικών τιμών του χάρτη, η οποία αποτυπώνει μικρότερες βαρυτικές τιμές στο βόρειο-βορειοδυτικό μέρος της περιοχής ενδιαφέροντος και υψηλές στο νότιο-νοτιοανατολικό μέρος.

5.2.7. Χάρτης Πρώτης Παραγώγου

Μετά την δημιουργία του χάρτη της υπολειπόμενης ανωμαλίας (Residual), μπορεί να υπολογιστεί ο χάρτης της Πρώτης Παραγώγου (First Directional Derivative), ως προς γωνία 90° , κάθετα ως προς τη διεύθυνση της εκτιμώμενης τομής «ΑΑ» της Εικόνας 31. Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει μεγαλύτερη ευαισθησία ως προς τον εντοπισμό περιοχών μεγάλων παράπλευρων μεταβολών στις τιμές της Μικρής Κλίμακας Ανωμαλίας (ή Υπολειπόμενη Ανωμαλία), που μπορεί να σχετίζεται με την πιθανή θέση ρήγματος.

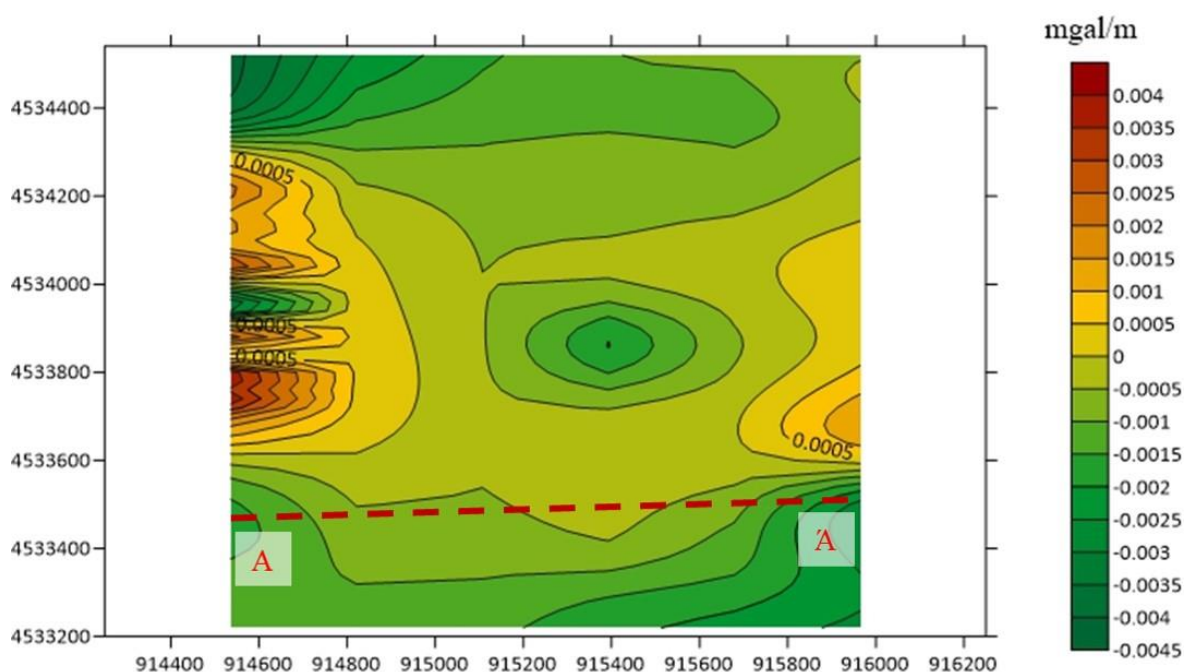
Στην Εικόνα 32 απεικονίζεται ο χάρτης της Πρώτης Παραγώγου και με την συγκεκριμένη μεθοδολογία μπορεί να αποτυπωθεί, με την κατανομή των τιμών, οι παράπλευρες μεταβολές των τιμών της Υπολειπόμενης Ανωμαλίας.



Εικόνα 32 - Χάρτης πρώτης παραγώγου των τιμών της Υπολειπόμενης Ανωμαλίας (με γεωγραφικές συντεταγμένες utm24N).

5.2.8. Παρατηρήσεις Χάρτη Πρώτης Παραγώγου

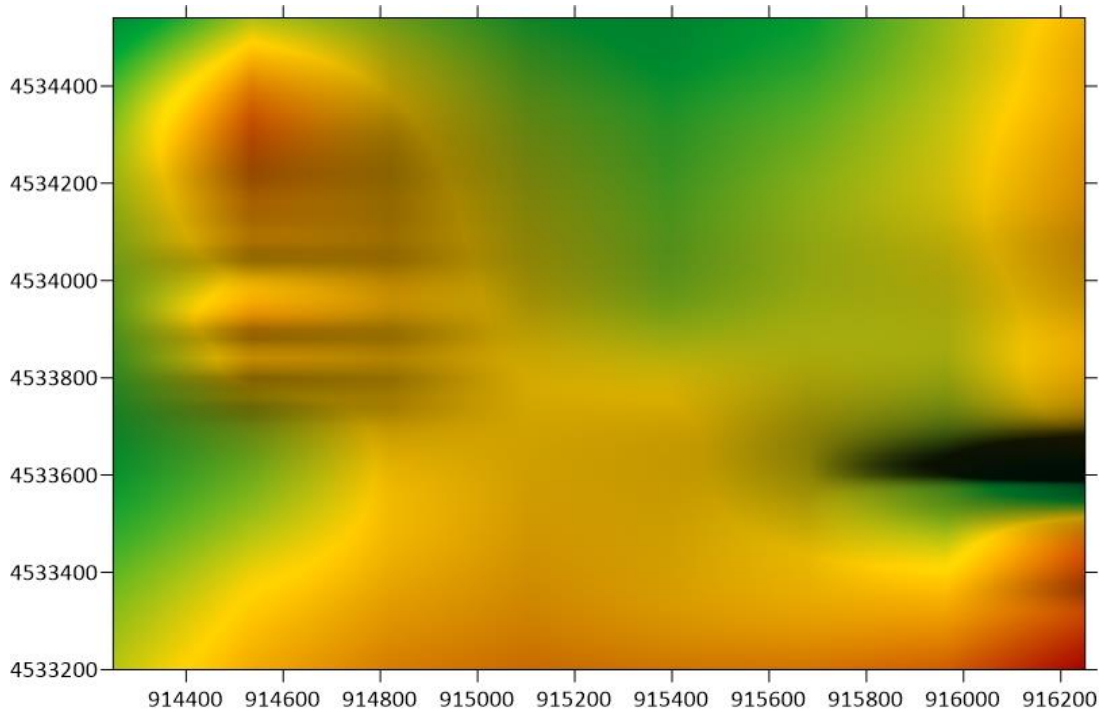
Στον χάρτη της πρώτης παραγώγου της Εικόνας 32, μπορούν να παρατηρηθούν διάφορες ανωμαλίες. Πιο συγκεκριμένα, όπως παρουσιάζεται και από την Εικόνα 33, η δομή ενδιαφέροντος, που για την παρούσα διπλωματική αποτελεί το ρήγμα, θα μπορούσε να εκτιμηθεί ότι είναι με διεύθυνση Α-Δ, στην γεωγραφική συντεταγμένη $y=4533450$, όπου και παρατηρούνται μεγάλες αρνητικές τιμές της παραγώγου.



Εικόνα 33 - Χάρτης πρώτης παραγώγου των τιμών της Υπολειπόμενης Ανωμαλίας με την τομή «ΑΑ» (με γεωγραφικές συντεταγμένες utm24N)

5.2.9. Χάρτης Φωτοσκίασης Μικρής Κλίμακας Ανωμαλίας

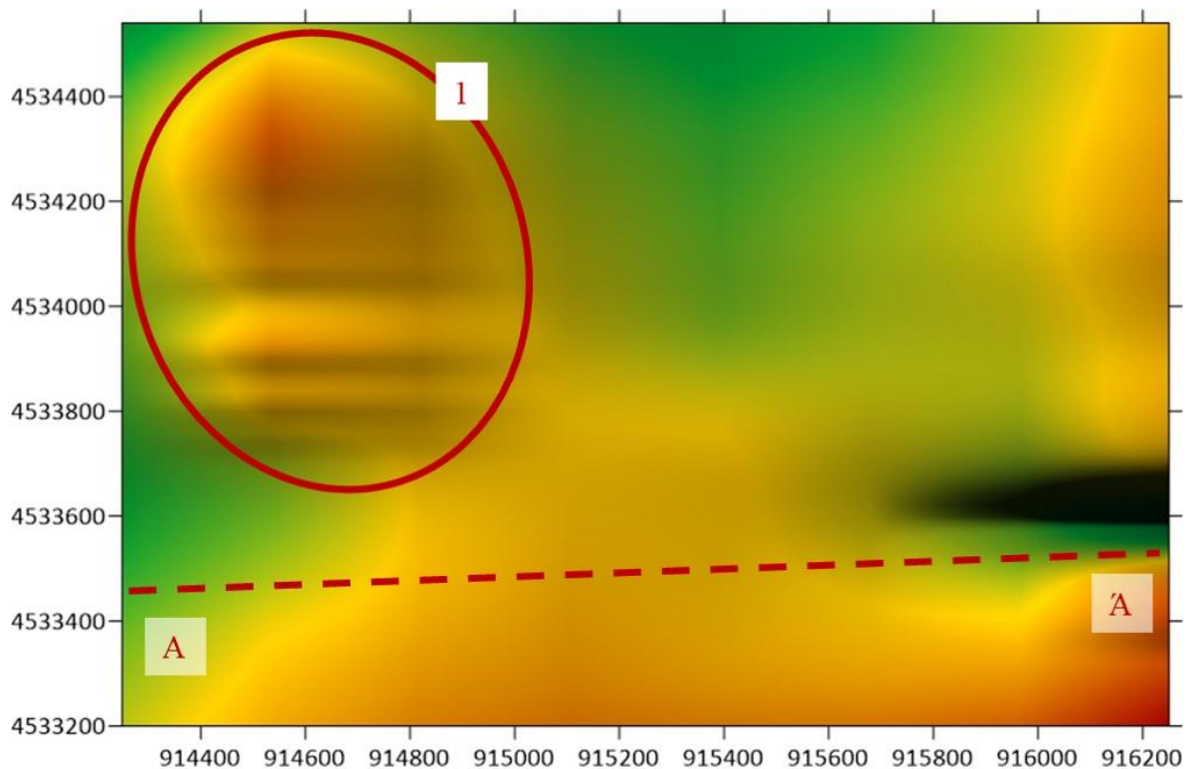
Στην Εικόνα 34 παρουσιάζεται ο χάρτης της φωτοσκίασης, με το φως στον χάρτη να προσπίπτει με γωνία 45° ως προς το επίπεδο αναφοράς, ενώ η διεύθυνση του είναι από βοριοδυτικά προς νοτιοανατολικά (ΒΔ-ΝΑ). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι δομές, οι οποίες δεν είναι παράλληλες ως προς τη διεύθυνση που διαχέεται το φως, να δημιουργούν διάφορους τόνους σκιών.



Εικόνα 34 – Χάρτης φωτοσκίασης της υπολοιπόμενης ανωμαλίας (με γεωγραφικές συντεταγμένες utm24N).

5.2.10. Παρατηρήσεις Χάρτη Φωτοσκίασης Μικρής Κλίμακας Ανωμαλίας

Από τον χάρτη της φωτοσκίασης της μικρής κλίμακας ανωμαλίας (*Εικόνα 34*), παρατηρείται με καλύτερο και εμφανή τρόπο οι παρατηρήσεις που κάναμε για τον χάρτη της *Εικόνας 31*. Το συγκεκριμένο φαινόμενο είναι αναμενόμενο, καθώς στις συγκεκριμένες περιοχές αποτυπώνονται μέγιστα και ελάχιστα στους παραπάνω χάρτες.



Εικόνα 35 - Χάρτης φωτοσκίασης της υπολοιπούμενης ανωμαλίας με την περιοχή ενδιαφέροντος «1» και την τομή «ΑΑ» (γεωγραφικές συντεταγμένες utm24N)

Έπειτα από τη χρήση της μεθόδου της φωτοσκίασης για την υπολειπούμενη ανωμαλία, μπορεί να εκτιμηθεί με καλύτερη αποτύπωση η κύρια δομή ενδιαφέροντος, που αποτελεί το ρήγμα. Η συγκεκριμένη περιοχή (τομή «ΑΑ»), παρουσιάζει μια έντονη σκίαση με τον αναμενόμενο προσανατολισμό του ρήγματος (Α-Δ).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6. Σχόλια και Συμπεράσματα

Ο κύριος σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η έρευνα των υπεδαφικών δομών που υπάρχουν στην περιοχή ενδιαφέροντος, ως προς την πιθανή εύρεση ρήγματος, στην περιοχή του οποίου θα διέρχεται ο αγωγός της Πλωτής Μονάδας Αποθήκευσης και Αεροποίησης, νοτιοανατολικά του Απαλού, Αλεξανδρούπολης.

Η μέθοδος της βαρυτικής επιτάχυνσης, που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα έρευνα, αποτελεί μία αξιόπιστη μέθοδο για την έρευνα υπεδαφικών δομών όπως τα ρήγματα, λόγω της φύσης του στόχου ενώ επίσης, αποτελεί κατάλληλο εργαλείο για την αποτύπωση δομών σε μεγάλα βάθη. Για την εκτίμηση του ρήγματος η λήψη των μετρήσεων έγινε σε τρεις ευθείες, κάθετα ως προς την εκτιμώμενη διεύθυνση του ρήγματος και κατά μήκος της περιοχής έρευνας, η οποία έχει περίπου έκταση 2,65km², με απόσταση μεταξύ τους περίπου 900m η πρώτη με την δεύτερη ευθεία μετρήσεων και 600m η δεύτερη με την τρίτη ευθεία μετρήσεων (*Εικόνα 25*).

Αναλυτικότερα, η συγκεκριμένη έρευνα στηρίχθηκε σε εφαρμογές που έχουν παρουσιαστεί από την διεθνή βιβλιογραφία (case studies). Οι δύο εφαρμογές που εξετάστηκαν είχαν παρόμοιους στόχους με την έρευνα της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η πρώτη εφαρμογή έλαβε χώρα στον Καναδά και πιο συγκεκριμένα στην επαρχία Αλμπερτα ενώ η δεύτερη στη περιοχή της λεκάνης Almada, νότια του Σαλβαδόρ, της Βραζιλίας. Η ανάλυση και χρήση των τεχνικών τους, έγινε η βάση για την έρευνα και την εκτίμηση των αποτελεσμάτων. Τόσο η πρώτη παράγωγος όσο και η μέθοδος της φωτοσκίασης αποτέλεσαν χρήσιμες μέθοδοι-εργαλεία, για τις εκτιμήσεις της θέσης και της διεύθυνσης του ρήγματος, στην περιοχή του Απαλού.

Η εφαρμογή και των δύο μεθόδων επεξεργασίας δεδομένων (πρώτη παράγωγος και φωτοσκίαση), συμβάλει σε μία ολοκληρωμένη προσέγγιση για την απεικόνιση των παράπλευρων ανομοιογενειών του υποβάθρου και κατ' επέκταση μίας καλύτερης εκτίμησης για το ρήγμα.

Συνοπτικά τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την πραγματοποίηση της έρευνας ήταν:

- ❖ Η μελέτη της γεωλογίας και της τεκτονικής της περιοχής.
- ❖ Ο σχεδιασμός της γεωφυσικής έρευνας και η επιλογή κατάλληλης μεθόδου για τις μετρήσεις, η οποία θα αποτελούσε την καταλληλότερη για το προσδιορισμό των δομών-στόχων.
- ❖ Η εύρεση παρόμοιων εφαρμογών γεωφυσικής έρευνας στην διεθνή βιβλιογραφία.

Με βάση τα παραπάνω βήματα, δημιουργήθηκαν χάρτες βαρυτικών τιμών και χάρτες φωτοσκίασης της περιοχής έρευνας, όπως παρουσιάζεται και από τις εφαρμογές στη διεθνή βιβλιογραφία. Τα αποτελέσματα, οι παρατηρήσεις και οι εκτιμήσεις, της έρευνας έχουν αποτυπωθεί παρακάτω, μαζί με τους χάρτες τοποθετημένους πάνω στη περιοχή.

Όπως έχει προαναφερθεί για τους χάρτες, παρατηρούνται δύο κύριες δομές ενδιαφέροντος. Η εφαρμογή του χάρτη της μικρή κλίμακας ανωμαλίας, του χάρτη της πρώτης παραγωγού της ανωμαλίας Bouguer αλλά και του χάρτη φωτοσκίασης της μικρής κλίμακας ανωμαλίας, στην επιφάνεια της περιοχής, μέσω του προγράμματος Google Earth, μπορεί να αποτελέσει εργαλείο για την εκτίμηση των στόχων αλλά και για την εκτίμηση χαρακτηριστικών γεωμετρίας των παρατηρούμενων περιοχών ενδιαφέροντος.



Εικόνα 36- Χάρτης μικρής κλίμακας ανωμαλίας με την περιοχή ενδιαφέροντος «1» και την τομή «ΑΑ» τοποθετημένος στην περιοχή Απαλού, Αλεξανρούπολης

Αρχικά, ο χάρτης μικρής κλίμακας ανωμαλίας, τοποθετείται στην δορυφορική εικόνα της περιοχής νότια του Απαλού, Αλεξανδρούπολης (Εικόνας 36). Αναλυτικότερα, στο τμήμα της περιοχής «1», παρατηρούνται υψηλότερες τιμές βαρυτικής ανωμαλίας σε σχέση με την ευρύτερη τάση που παρουσιάζεται στη συγκεκριμένη περιοχή του χάρτη, ενώ παρατηρείται και μία μορφή ύβωσης με βορειοδυτική κατεύθυνση.

Η τομή «ΑΑ» στη παραπάνω εικόνα, εκτιμάται και αποτυπώνεται από το διαχωρισμό των υψηλών τιμών της βαρυτικής επιτάχυνσης, που βρίσκονται στο νότιο μέρος της περιοχής έρευνας, σε σχέση με τις χαμηλές τιμές βαρυτικής επιτάχυνσης που απεικονίζονται στην ευρύτερη περιοχή του βόρειου τμήματος του χάρτη. Ωστόσο, είναι αναγκαία η επεξεργασία και των υπόλοιπων δεδομένων για την εκτίμηση ενός σεναρίου που θα ανταποκρίνεται στη φύση του υποβάθρου.

Μέσω, λοιπόν, της αποτύπωσης του χάρτη της πρώτης παραγωγού, στη περιοχή, με τη βοήθεια του προγράμματος Google Earth (Εικόνα 37), γίνεται απόπειρα εκτίμησης και παράλληλης ερμηνείας των προηγούμενων δομών από τον χάρτη της υπολειπόμενης ανωμαλίας στον χάρτη της πρώτης παραγωγού.

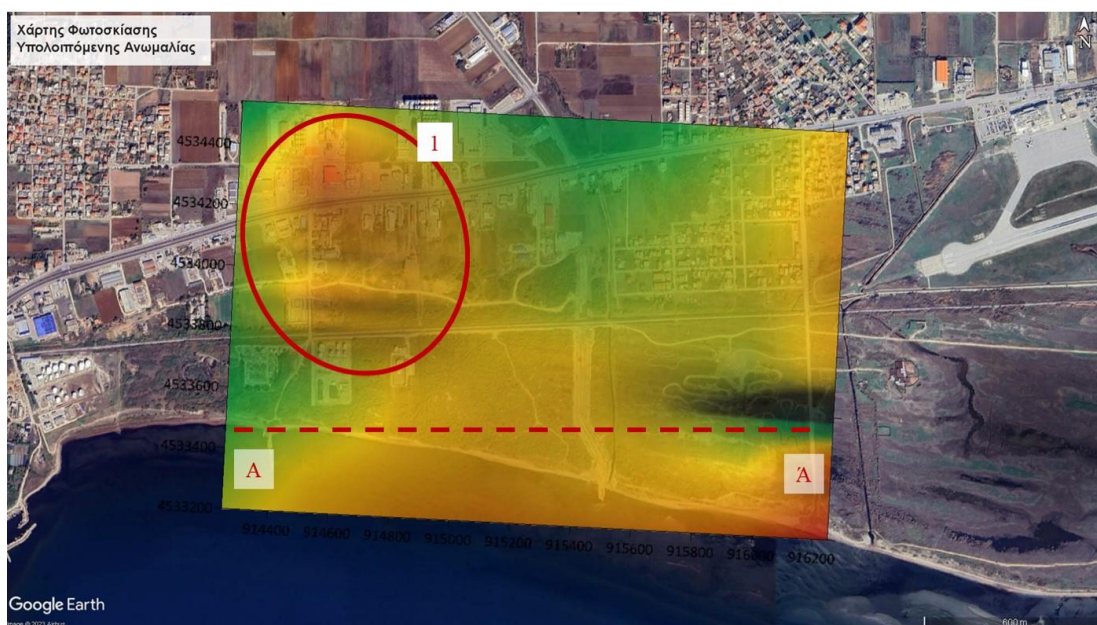


Εικόνα 37- Χάρτης πρώτης παραγωγού των τιμών της Υπολειπόμενης Ανωμαλίας με την τομή «ΑΑ» τοποθετημένος στην περιοχή Απαλού, Αλεξανδρούπολης

Μέσω, της παράλληλης εκτίμησης των δεδομένων που απεικονίζονται στους χάρτες υπολειπόμενης ανωμαλίας και πρώτης παραγώγου της ανωμαλίας Bouguer, παρουσιάζεται στην ίδια τοποθεσία (νότια της περιοχής με προσανατολισμό Α-Δ), παρόμοια με την τομή «ΑΑ» μία δομή στον χάρτη της πρώτης παραγώγου.

Ακόμη μία μέθοδος η οποία χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση κάποιου ρήγματος, για την περιοχή νότια του Απαλού της Αλεξανδρούπολης, αποτελεί η μέθοδος της φωτοσκίασης των τιμών της μικρής κλίμακας ανωμαλίας. Η συγκεκριμένη μέθοδος, όπως έχει αναλυθεί παραπάνω, χρησιμοποιεί τον τρόπο, με τον οποίο το φως προσπίπτει στην επιφάνεια του χάρτη, για τον εντοπισμό διάφορων δομών. Η απόδοση του χάρτη της φωτοσκίασης πάνω στη δορυφορική εικόνα της περιοχής (*Εικόνα 38*), με τα προγράμματα που προαναφέρθηκαν, μπορεί να μας αποδώσει κάποιες πληροφορίες για την εύρεση κάποιου ρήγματος.

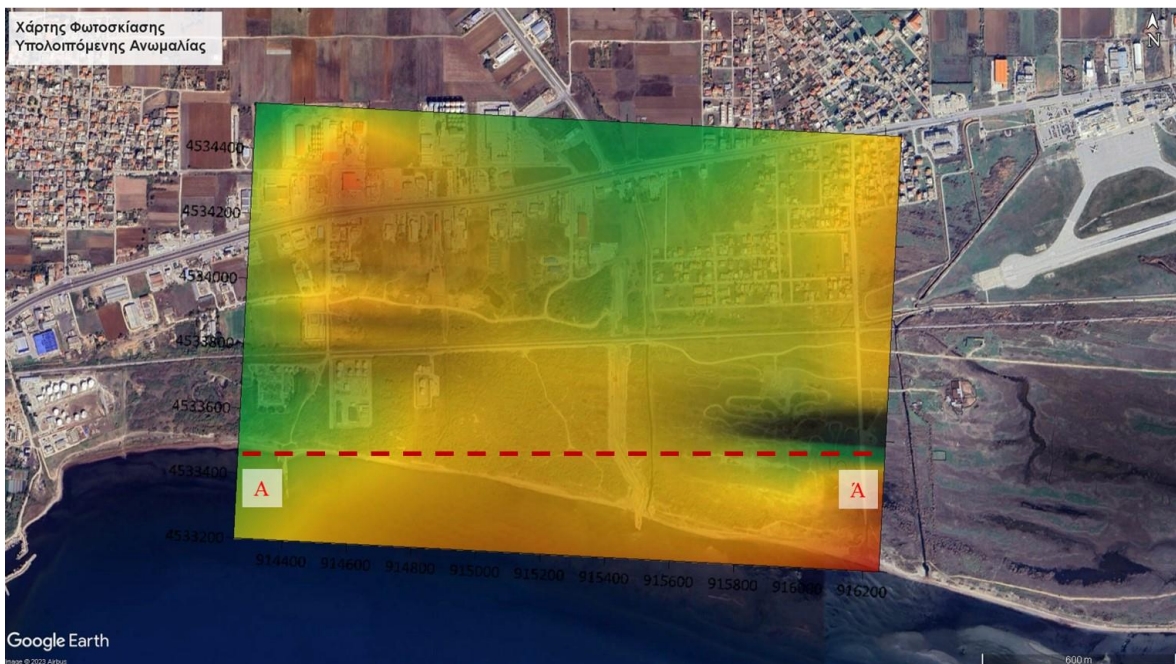
Η νότια περιοχή του χάρτη, που αποτελεί και τη κύρια περιοχή ενδιαφέροντος, όπως προαναφέρθηκε, αποδίδει, μέσα από την φωτοσκίαση της περιοχής έρευνας μία δομή με αρκετές ομοιότητες όπως αυτή του ρήγματος αλλά και όπως αυτή της τομής «ΑΑ» που έχει προαναφερθεί, ενώ παρατηρείται, επίσης, και προσανατολισμός Α-Δ, γεγονός που έρχεται σε συμφωνία με την εκτίμηση της διεύθυνσης του αναμενόμενου ρήγματος.



Εικόνα 38 – Αποτύπωση του χάρτη φωτοσκίασης της μικρής κλίμακας ανωμαλίας την περιοχή ενδιαφέροντος «I» και την τομή «ΑΑ» τοποθετημένος στην περιοχή Απαλού, Αλεξανδρούπολης

Σύμφωνα, λοιπόν, με την απεικόνιση της Εικόνας 38, μπορεί να αποδοθεί μία εκτίμηση για το ρήγμα που μπορεί να υπάρχει, στη περιοχή ενδιαφέροντος, για την παρούσα διπλωματική εργασία. Όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 39, εκτιμάται κάποιο πιθανό σενάριο για την θέση αλλά και για τον προσανατολισμό του εκτιμώμενου ρήγματος στην περιοχή, που αναπαρίσταται από την τομή «ΑΑ», που απεικονίζεται με κόκκινη διακεκομμένη γραμμή.

Η τομή ΑΑ που εκτιμήθηκε, παρατηρείται πως έχει διεύθυνση ανατολής-δύσης, ενώ, παράλληλα, διαχωρίζει τις τιμές μικρότερης βαρυτικής ανωμαλίας που αποτυπώνονται στο βόρειο τμήμα της περιοχής έρευνας με τις υψηλότερες οι οποίες βρίσκονται στο νότιο τμήμα, όπως απεικονίζεται και στον χάρτη της υπολειπόμενης ανωμαλίας (Εικόνα 30). Η συγκεκριμένη θεώρηση, λοιπόν, παρεμβαίνει στο ευρύτερο πλάνο, της κατασκευής του αγωγού, ο οποίος περνάει από την περιοχή του Απαλού, Αλεξανδρούπολης, καθώς η παρακάτω εικόνα εκτίμησης της πιθανής θέσης του ρήγματος, το τοποθετεί σε θέση από την οποία διέρχεται ο αγωγός του φυσικού αερίου.



Εικόνα 39 - Αποτύπωση του χάρτη φωτοσκίασης της μικρής κλίμακας ανωμαλίας, με τη τομή «ΑΑ», η οποία αποτελεί τη εκτίμηση της θέσης και της διεύθυνσης του ρήγματος, για την περιοχή του Απαλού, Αλεξανδρούπολης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Αποστολόπουλος, Γ. (2015). *Σημειώσεις Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Barbosa, V.C., Menezes, P.T. and Silva, J.B. (2007). Gravity data as a tool for detecting faults: In-depth enhancement of subtle Almada's basement faults, Brazil. *GEOPHYSICS*, 72(3), pp.B59–B68. doi:10.1190/1.2713226.

Donald Harrison Griffiths and Roy Farell King (1981). *Applied geophysics for geologists and engineers. 2. ed.* Frankfurt: Pergamon Press.

Elkins, T.A. (1951). THE SECOND DERIVATIVE METHOD OF GRAVITY INTERPRETATION. *GEOPHYSICS*, 16(1), pp.29–50. doi:10.1190/1.1437648.

Hinze, W.J., Saad, A.H. and R Von Frese (2013). *Gravity and magnetic exploration : principles, practices, and applications*. New York: Cambridge University Press.

Kearey, P., Brooks, M. and Hill, I. (2011). *An introduction to geophysical exploration*. Malden, Mass. Blackwell.

Kilias, A., Falalakis, G., Sfeikos, A., Papadimitriou, E., Vamvaka, A. and Gkarlaouni, C. (2013). The Thrace basin in the Rhodope province of NE Greece — A tertiary supradetachment basin and its geodynamic implications. *Tectonophysics*, 595-596, pp.90–105. doi:10.1016/j.tecto.2012.05.008.

LaFehr, T.R. and Nabighian, M.N. (2012). *Fundamentals of Gravity Exploration*. SEG Books.

Lyatsky, H., Pana, D., Olson, R. and Godwin, L. (2004). Detection of subtle basement faults with gravity and magnetic data in the Alberta Basin, Canada. *The Leading Edge*, 23(12), pp.1282–1288. doi:10.1190/leedff.23.1282_1.

Mallick, K., A. Vasanthi and Sharma, K.K. (2011). *Bouguer Gravity Regional and Residual Separation*. Springer.

McDowell, P.W. (2002). *Geophysics in engineering investigations*. London: Ciria.

Parasnis, D.S. (1979). *Principles of Applied Geophysics*. Chapman & Hall.

Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sheriff, R.E. (1990). *Applied geophysics*. Cambridge: Cambridge University Press.

Valenta, J. (2015). *Introduction to Geophysics – Lecture Notes*. Czech Republic Development Cooperation.