

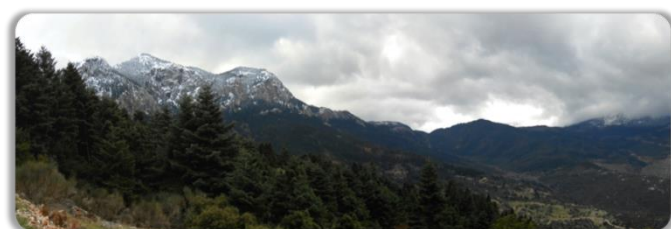
**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ-ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ**  
**Δ.Π.Μ.Σ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ**



## Βαρυτική Έρευνα για τον εντοπισμό τεκτονικών δομών σε μεταλλευτική Περιοχή της “Δελφοί- Δίστομον Α.Μ.Ε.”

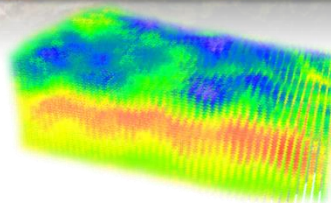
---

Εργαστήριο Εκμετάλλευσης Υδρογονανθράκων και Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής  
**Καραϊσκος Δημήτριος**



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΑΠΟΣΤΟΛΟΠΟΥΛΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ



**ΑΘΗΝΑ**  
**ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ, 2021**

Copyright © ΚΑΡΑΪΣΚΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ, 2021

Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All rights reserved.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

|   |    |
|---|----|
| Πρόλογος.....   | 8  |
| Περίληψη .....  | 10 |
| Extended Abstract .....   | 11 |
| 1 Εισαγωγή.....   | 17 |
| 1.1 ΒΩΞΙΤΗΣ – ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ - ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΕΙΣ .....  | 18 |
| 1.1.1 ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΒΩΞΙΤΙΚΕΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΕΙΣ .....  | 19 |
| Κοιτασματολογία .....   | 20 |
| 1.1.2 Η γένεση του βωξίτη.....  | 20 |
| 1.2 Γερολέκας - Η περιοχή Μελέτης.....  | 23 |
| 1.3 Δελφοί Δίστομο Α.Μ.Ε.....   | 26 |
| 2 Οι Γεωφυσικές Μέθοδοι .....   | 27 |
| 2.1 Η βαρυτική Δύναμη.....  | 28 |
| 2.1.1 Η επιτάχυνση της βαρύτητας .....  | 29 |
| 2.1.2 Συσχετισμός της Επιτάχυνσης της Βαρύτητας με τη Γεωλογία .....  | 30 |
| 2.1.3 Μεταβολή στην πυκνότητα των υλικών της Γης.....   | 32 |
| 2.2 Μέτρηση της βαρύτητας .....   | 34 |
| 2.2.1 Μετρήσεις Με Βαρυτόμετρο.....   | 35 |
| 2.3 Μετρήσεις Βαρύτητας στο ύπαιθρο και παράγοντες που επηρεάζουν την Επιτάχυνση της Βαρύτητας.....   | 37 |
| 2.3.1 Βαρυτικές Διορθώσεις.....   | 38 |
| 2.3.1.1 Διόρθωση της Πορείας και των παλιρροιών .....   | 38 |
| 2.3.1.2 Διόρθωση Γεωγραφικού πλάτους .....  | 39 |
| 2.3.1.3 Διόρθωση Ελεύθερου Αέρα : Υπολογισμός μεταβολών λόγω υψομέτρου .....  | 41 |
| 2.3.1.4 Διορθώσεις για την περίσσεια μάζας: Διόρθωση Bouguer .....  | 43 |
| 2.3.1.5 Τοπογραφικές Διορθώσεις .....   | 45 |
| 2.3.2 Περίληψη των τύπων βαρύτητας .....  | 47 |
| 2.3.3 Τοπικές και Μεγάλης Κλίμακας βαρυτικές ανωμαλίες .....  | 49 |
| 2.3.3.1 Διαχωρισμός της τοπικής από τη μεγάλης κλίμακας βαρυτική ανωμαλία.....  | 50 |
| 3 Εφαρμογή βαρυτικών Γεωφυσικών Διασκοπήσεων για το χαρακτηρισμό τεκτονικής στη Διεθνή Βιβλιογραφία .....                                   | 51 |
| 3.1 Ανάλυση δεδομένων βαρύτητας για τον καθορισμό τεκτονικών χαρακτηριστικών που ελέγχουν το Γεωθερμικό σύστημα στο Eburru, στην Κένυα..... | 51 |
| 3.1.1 Η περιοχή Έρευνας .....   | 51 |
| 3.1.2 Επεξεργασία δεδομένων και Αποτελέσματα.....   | 53 |

|  |    |
|--|----|
| 3.1.3 Συμπεράσματα .....   | 56 |
| 3.2 Γεωφυσική έρευνα με τη χρήση βαρυτικών δεδομένων στο γεωθερμικό πεδίο Kínigi, βορειοδυτική Ρουάντα ..... | 57 |
| 3.2.1 Η περιοχή Έρευνας .....  | 57 |
| 3.2.2 Επεξεργασία δεδομένων και Αποτελέσματα.....  | 58 |
| 3.2.3 Συμπεράσματα .....   | 60 |
| 4 Μεταλλευτική Έρευνα.....   | 61 |
| 4.1 Χωρική ανάλυση Γεωτρήσεων .....  | 63 |
| 5 Βαρυτικές Μετρήσεις: Επεξεργασία Δεδομένων και Ερμηνεία .....  | 66 |
| 5.1 Βαρυτικές Μετρήσεις στο ύπαιθρο .....  | 66 |
| 5.2 Βαρυτικές Διορθώσεις.....  | 67 |
| 5.3 Βαρυτικοί Χάρτες .....   | 69 |
| 5.4 Βαρυτικό Μοντέλο .....   | 73 |
| 5.4.1 Αρχικό Μοντέλο Πυκνοτήτων.....   | 74 |
| 5.4.2 Εισαγωγή δεδομένων στο λογισμικό και η αντιστροφή τους .....   | 78 |
| 5.4.3 Τελικό Μοντέλο Πυκνοτήτων και η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων .....                                   | 80 |
| 6 Συμπεράσματα .....   | 84 |
| 7 Βιβλιογραφία .....   | 85 |
| Ελληνική Βιβλιογραφία: .....   | 85 |
| Διεθνής Βιβλιογραφία:.....   | 85 |

|  |    |
|--|----|
| Εικόνα 1 : Geologic Tectonics Map (left) , stratigraphy of Parnassus Gkiona Zone(right up) and Gerolekas (right down) .....            | 13 |
| Εικόνα 2 : Boreholes(left), and the 3D density models as a result of interpolating the Boreholes(right) .....                          | 13 |
| Εικόνα 3 : (Up Left) Gravimeter, (Up right) gravity stations, (down) spreadsheet for the gravity corrections.....                      | 14 |
| Εικόνα 4 : Gravity Maps: (up right) Bouguer Map, (up left) Regional, (Down) Residual Gravity Map gridded as 250x250 .....              | 14 |
| Εικόνα 5 : (right) ascii file of initial file imported, (left) Grablox software and the initial model .....                            | 15 |
| Εικόνα 6 : (up) 3d Block Density Model , (Down) sections of the 3D Model to define the stratigraphy and tectonics of the area .....    | 16 |
| Εικόνα 7 : Βωξίτης .....   | 18 |
| Εικόνα 8 : Παγκόσμιος Χάρτης Απεικόνισης Βωξιτικών Εκμετελλεύσεων .....  | 18 |
| Εικόνα 9 Στρωματογραφία Ζώνης Παρνασσού - Γκιώνας .....  | 21 |
| Εικόνα 10 : Χάρτης Γεωτεκτονικών ζωνών στον ελλαδικό χώρο με $P_k$ είναι η ζώνη Παρνασσού Γκιώνας.....                                 | 23 |
| Εικόνα 11 : Γωλογικοί Χάρτες του Γερολέκα .....  | 24 |
| Εικόνα 12: Ο γερολέκας και η ευρύτερη περιοχή (Googleearth) .....  | 24 |
| Εικόνα 13 : Αριστερά Isaac Newton και η χρήση του 2 <sup>ου</sup> νόμου και τα προϊόντα της.....                                       | 28 |
| Εικόνα 14 : Γραφική Απεικόνιση σημασίας της βαρυτικής δύναμης .....  | 28 |
| Εικόνα 15 : Γραφική απεικόνιση της διαφοράς πυκνότητας εντός στρώματος .....   | 30 |
| Εικόνα 16 : Γραφική απεικόνιση της παρατήρησης της βαρυτικής επιτάχυνσης και ο συσχετισμός της με την πυκνότητα που αντικειμένον ..... | 31 |
| Εικόνα 17 : Γραφική Απεικόνιση της λειτουργίας του βαρυτομέτρου με ελατήριο .....  | 35 |
| Εικόνα 18 Απεικόνιση του εσωτερικού του βαρυτομέτρου Lacoste Romberg .....   | 36 |
| Εικόνα 19 : Απεικόνιση του ελλειψοειδούς της γής και της επιρροής που έχει το γεωγραφικό πλάτος στις μετρήσεις .....                   | 39 |
| Εικόνα 20 : Απεικόνιση του ελλειψοειδούς της γης και της μεταβολής από σημείο Α σε Β .....   | 40 |
| Εικόνα 21 : Μαθηματική Απεικόνιση του τύπου για τη διόρθωση γεωγραφικού πλάτους .....  | 40 |
| Εικόνα 22 απεικόνιση της επίδρασης του αναγλύφου της περιοχής μέτρησης και η αναγωγή σε επίπεδο (Bouguer slab) .....                   | 43 |
| Εικόνα 23 : Απεικόνιση της επίδρασης της τοπογραφίας στις βαρυτικές μετρήσεις .....  | 45 |
| Εικόνα 24 Απεικόνιση Regional(αριστερά)- Residual(δεξιά) .....   | 49 |
| Εικόνα 25 : Κατανομή βαρυτικών πεδίων (Bonvalot,2012).....   | 49 |
| Εικόνα 26 Χάρτης της μελετηθείσας περιοχής μαζί με υψομετρικό γεωλογικό χάρτη του Κενυάτικου "θόλου"(Maithya et al.,2020).....         | 52 |
| Εικόνα 27 : Γεωλογικός χάρτης του Eburru (Thomson, 1963) .....   | 52 |
| Εικόνα 28 Χάρτης Bouguer (Maithya et al.,2020).....  | 53 |
| Εικόνα 29: Χάρτης Residual (Maithya et al.,2020).....  | 54 |
| Εικόνα 30 κάθετη τομή του μοντέλου στο ύψος της θάλασσας (Maithya et al.,2020) .....   | 55 |
| Εικόνα 31 Ολοκληρωμένο Γεωλογικό μοντέλο πυκνοτήτων (Maithya et al.,2020).....   | 55 |
| Εικόνα 32 : Χάρτες της περιοχής και χάρτης βαρυτικών σταθμών στην περιοχή ενδιαφέροντος(Uwiduhaye, 2017) .....                         | 58 |
| Εικόνα 33 Βαρυτικός Χάρτης Bouguer (Uwiduhaye, 2017) .....   | 59 |

|  |    |
|--|----|
| Εικόνα 34 Χάρτης Residual 3 <sup>ης</sup> τάξης (Uwiduhaye, 2017) .....  | 59 |
| Εικόνα 35 Tilt angle χάρτης από τις τιμές Residual με εμφανή τα όρια των δομών (Uwiduhaye, 2017) .....   | 60 |
| Εικόνα 36 : γεωλογικός χάρτης με κάναβο γεωτρήσεων (500x500) .....   | 61 |
| Εικόνα 37 οι γεωτρήσεις στην περιοχή ενδιαφέροντος( GoogleEarth).....  | 62 |
| Εικόνα 38: οι γεωτρήσεις στην περιοχή ενδιαφέροντος (surfer, goldenSoftware) .....   | 62 |
| Εικόνα 39: Cross section (2D) γεωτρήσεων με αποληψιμότητα >300m για να γίνει ένας αρχικός χαρακτηρισμός των στρωμάτων στην περιοχή (starter, goldensoftware) .....   | 64 |
| Εικόνα 40: Τριδιάστατη απεικόνιση μοντέλου(fence) πυκνοτήτων με βάση τις γεωτρήσεις (Voxler, goldensoftware) .....   | 65 |
| Εικόνα 41 : Τριδιάστατη απεικόνιση μοντέλου(fence) πυκνοτήτων με βάση τις γεωτρήσεις (Voxler, goldensoftware) .....  | 65 |
| Εικόνα 42 : Βαρυτόμετρο Lacoste Romberg G580, με το οποίο έγιναν και οι μετρήσεις. ....  | 66 |
| Εικόνα 43 : Ο κάναβος των μετρήσεων ( GoogleEarth)(wgs84) .....  | 67 |
| Εικόνα 44 : Ενδεικτικά το φύλλο υπολογισμού βάση του οποίου έλαβαν χώρα οι αναγκαίες διορθώσεις για την αξιοποίηση των βαρυτικών δεδομένων και η εξαγωγή της διορθωμένης βαρυτικής τιμής (Bouguer).....  | 68 |
| Εικόνα 45 : Διορθωμένος Βαρυτικός Χάρτης (Bouguer) ( Surfer, Golden software) .....  | 69 |
| Εικόνα 46 : Χάρτες Bouguer και βαρυτικού πεδίου του ελλαδικού χώρου και η κατευθυντικότητα του βαρυτικού πεδίου (Makris, 2013) .....   | 70 |
| Εικόνα 47 : Ο χάρτης Regional της περιοχής (Surfer, GoldenSoftware) .....  | 71 |
| Εικόνα 48 : Χάρτης Residual της Περιοχής (Surfer, Golden Software), με κυκλωμένα τα κομμάτια όπου φαίνεται εναλλαγή και πιθανόν ρηγματογόνες ζώνες με εφάνιση στρωμάτων σε αλληλουχία. ....  | 72 |
| Εικόνα 49: Το λογισμικό Grablox2(Oulou University, Markku Pirttijärvi) και η κάτοψη του μοντέλου για υψόμετρο 1500m.....   | 74 |
| Εικόνα 50 Το λογισμικό Grablox2(Oulou University, Markku Pirttijärvi) και το 9 <sup>ο</sup> προφίλ του μοντέλου στον άξονα Y. ....   | 75 |
| Εικόνα 51 : Το αρχείο ascii βάση του οποίου έγιναν οι παρεμβάσεις στο αρχικό μοντέλο ...   | 76 |
| Εικόνα 52 ; Σεισμική τομή PARV-1 η οποία χρησιμοποιήθηκε κατά την εισαγωγή αρχικού μοντέλου (GoogleEarth) .....  | 77 |
| Εικόνα 53 : Σεισμική Τομή PARV-1,επαναεπεξεργασμένη (Michal Malinowski,2019) .....   | 77 |
| Εικόνα 54 : Τα Βαρυτικά δεδομένα (residual gravity map) προκειμένου να γίνει η αντιστροφή Grablox2(Oulou University, Markku Pirttijärvi) .....   | 79 |
| Εικόνα 55 : Προφίλ από τομή(no 6 στο x) στο μοντέλο, μετά την επαναληπτική διαδικασία της αντιστροφής, όπου φαίνεται που η υπολογιζόμενη με την μετρούμενη τιμή της βαρύτητας ταυτίζονται Grablox2(Oulou University, Markku Pirttijärvi) ..... | 79 |
| Εικόνα 56 : Τομή από χωρικό μοντέλο όπου φαίνεται η επαφή ασβεστολίθου πατώματος με ταβάνι, υπό γωνία BA-NA ( voxler, goldenSoftware) .....  | 80 |
| Εικόνα 57 : Μοντέλο 3D πυκνοτήτων σε τομές (ανατολή δύση),Voxler( goldenSoftware) ....   | 81 |
| Εικόνα 58 : Μοντέλο 3D πυκνοτήτων σε τομές (ανατολή δύση),Voxler( goldenSoftware) ....   | 81 |
| Εικόνα 59 : Μοντέλο 3D πυκνοτήτων σε τομές (νότος βοράς),Voxler( goldenSoftware) .....   | 82 |
| Εικόνα 60 : Μοντέλο 3D πυκνοτήτων σε τομές (νότος βοράς),Voxler( goldenSoftware) .....   | 82 |
| Εικόνα 61 : Απεικόνιση Μοντέλου 3D(κύβου) πυκνοτήτων με τα βέλη να δείχνουν πιθανές ζώνες ρηγματώσεως,Voxler( goldenSoftware) .....  | 83 |



|   |    |
|---|----|
| Πίνακας 1 Παραγωγή βωξίτη και αξία πωλήσεων και εξαγωγών για την Ελλάδα<br>( <a href="https://www.sme.gr/">https://www.sme.gr/</a> )..... | 19 |
| Πίνακας 2 : Περιεκτικότητες οξειδίων σε κοιτάσματα βωξίτη ανάλογα με τον ορίζοντα που ανήκουν.....  | 22 |
| Πίνακας 3 : Γεωφυσικές Μέθοδοι.....   | 27 |
| Πίνακας 4 : Πίνακας Πυκνοτήτων για υλικά.....   | 32 |



## Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία περατώθηκε κατά το πέρας και στα πλαίσια των μεταπτυχιακών σπουδών μου στη σχολή Μηχανικών Μεταλλείων- Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσοβείου Πολυτεχνείου και στα πλαίσια του Δ.Π.Μ.Σ. Σχεδιασμός και κατασκευή Υπογείων έργων.

Ο κύριος στόχος της παρούσης ερευνητικής διαδικασίας είναι η προσπάθεια για να βελτιστοποιηθεί η αξιολόγηση των τεκτονικών και στρωματογραφικών αλληλουχιών προκειμένου τα αποτελέσματα των γεωφυσικών ερευνών να μπορούν να βοηθήσουν στην μεταλλευτική δραστηριότητα. Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζονται αποτελέσματα από τη βαρυτική μέθοδο με σκοπό την αξιολόγησή τους και την εφαρμογή τους στην παραγωγική διαδικασία.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια αναφορά για το βωξίτη και τη γεωλογία του Γερολέκα και μια εισαγωγή στο υπόλοιπο κείμενο.

Στο δεύτερο Κεφάλαιο υπάρχει μια εκτενής αναφορά για το θεωρητικό υπόβαθρο των βαρυτικών μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης .

Στο τρίτο Κεφάλαιο υπάρχουν δύο περιπτώσεις από τη διεθνή βιβλιογραφία χρήσης βαρυτικών μεθόδων για μέσα βάθη για χαρακτηρισμό τεκτονικής .

Στο τέταρτο κεφάλαιο υπάρχει το αρχικό μοντέλο γεωτρήσεων και στοιχεία της μεταλλευτικής έρευνας της εταιρείας.

Στο πέμπτο κεφάλαιο υπάρχει η εκτενής εμφάνιση της έρευνας που διεξήχθη για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας και τα αποτελέσματά της. Παρατίθενται όλες οι μέθοδοι και όλα τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν και βάση των οποίων προέκυψαν τα αποτελέσματα.

Στο έκτο κεφάλαιο υπάρχουν τα συμπεράσματα και κάποια σχόλια, που βοηθούν στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της έρευνας.

Η διαδικασία της συγγραφής του έργου αυτού αποτέλεσε μια πολύτιμη εμπειρία, τα ευεργετήματα της οποίας θα αποτελούν εφόδια για την μετέπειτα εξέλιξή μου. Δεδομένου, ότι ακόμα και το σύμπαν από κάπου προήλθε, υπακούοντας στο αξίωμα του αιτίου-αιτιατού , η προσπάθεια αυτή δε θα είχε ολοκληρωθεί χωρίς τη συμβολή και τη βοήθεια συγκεκριμένων ανθρώπων.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κάτωθι:

Τον Κ. Γεώργιο Αποστολόπουλο , καθηγητή του Ε.Μ.Π .

Τον Σταύρο Καριζώνη, Μηχ. Μετ. Μετ. και Υ.Δ. του εργαστηρίου Εκμετάλλευσης Υδρογονανθράκων και εφαρμοσμένης Γεωφυσικής

Τον Κ. Γεώργιο Αμολοχίτη, Γεωφυσικό και μέλος Ε.ΔΙΠ. του Ε.Μ.Π, μέλος του εργαστηρίου Εκμετάλλευσης Υδρογονανθράκων και εφαρμοσμένης Γεωφυσικής.

Τους Δρ.Κωνσταντίνο Λεονταράκη και Δρ. Χρήστο Ορφανό, μέλη του Εργαστηρίου Εκμετάλλευσης Υδρογονανθράκων και Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής

Την Εταιρεία “Δελφοί Δίστομον ΑΜΕ”

**Και σαφώς τους Δικούς μου ανθρώπους, που ήταν εκεί σε κάθε βήμα μου.**

*Η παρούσα διπλωματική εργασία έλαβε χώρα στα πλαίσια του ερευνητικού έργου **Smart Exploration (Horizon2020)**, το οποίο χρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση και με διαφορετικούς εταίρους με στόχο την ανάπτυξη εφαρμογών και τεχνολογιών για την εκμετάλλευση μεταλλευτικών κοιτασμάτων.*

## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική αυτή εργασία εξετάζεται η περίπτωση της χρήσης και της εφαρμογής της γεωφυσικής μεθόδου της βαρυτικής διασκόπησης στην μεταλλευτική δραστηριότητα με σκοπό το χαρακτηρισμό της τεκτονικής στην περιοχή ενδιαφέροντος. Η εταιρεία "Δελφοί-Δίστομον Α.Μ.Ε." έχει εκμεταλλεύσεις βωξίτη στην περιοχή του Παρνασσού και δραστηριοποιείται στην περιοχή για την αξιοποίηση του ορυκτού πλούτου της περιοχής. Η εμφάνιση του βωξίτη σε φακούς και σε στρώσεις μικρού πάχους δημιουργούν πρόβλημα στο σχεδιασμό της μεταλλευτικής μελέτης για συνέχιση της δραστηριότητας, και άρα καθίσταται αναγκαία η χωρική αποτύπωση του υπεδάφους.

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας αποτελεί η διερεύνηση της δυνατότητας βελτιστοποίησης της εκμετάλλευσης και η συνέχιση της διαδικασίας παραγωγής στο δυτικό μέρος του Παρνασσού, στο Γερολέκα. Για το σκοπό αυτό εφαρμόστηκαν in situ γεωφυσικές μετρήσεις (βαρυτικές) και αξιοποιήθηκαν και όλες οι διαθέσιμες πληροφορίες, όπως γεωλογικά, διατρητικά και παλαιότερα γεωφυσικά δεδομένα, με στόχο τη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου μοντέλου πυκνοτήτων στο οποίο θα εγκλείεται πληροφορία για την τεκτονική και πιθανόν για την αλληλουχία της στρωματογραφίας. Οι βαρυτικές μετρήσεις έλαβαν όλες τις απαραίτητες διορθώσεις και επεξεργάστηκαν με τον πλέον ενδεδειγμένο τρόπο, όπως και παρουσιάζεται στην εργασία.

Με το πέρας της επεξεργασίας των δεδομένων δημιουργήθηκε ένα τρισδιάστατο μοντέλο, στο οποίο έχουν εφαρμοστεί όλοι οι δυνατοί περιορισμοί με τη χρήση όλων των διαθέσιμων δεδομένων, ώστε αυτό να καθίσταται όσο το δυνατόν πιο ακριβές και να μπορεί να αποδοθεί όλη η πληροφορία των βαρυτικών μετρήσεων.

Από την αξιολόγηση της βαρυτικής μεθόδου, των μετρήσεων και της διαδικασίας επεξεργασίας των δεδομένων, προέκυψε ένα περιεκτικό μοντέλο, το οποίο μπορεί να δώσει πληροφορία στην εταιρεία για την ύπαρξη ζωνών ρηγμάτωσης και για την επαφές του φλύσχη με τον αβεστόλιθο, όπου υπάρχει και η στρώση του βωξίτη.

## Extended Abstract

This Thesis is a research concerning the tectonics of a mining interest site, where a cost efficient approach was implemented. An integrated approach using gravity is evaluated with all the a priori data for geological differentiation in mining surveys. Gravity Geophysics are used for explorative purposes, such as geothermic, but in this research geophysics were used for the identification of the subsurface.

The scope of the entire research is to specify an optimized strategy for the implementation of cost effective and environmentally friendly passive geophysical methods in a challenging environment. This work describes a contribution to the Bauxite Deposits Investigation at Gerolekas area.

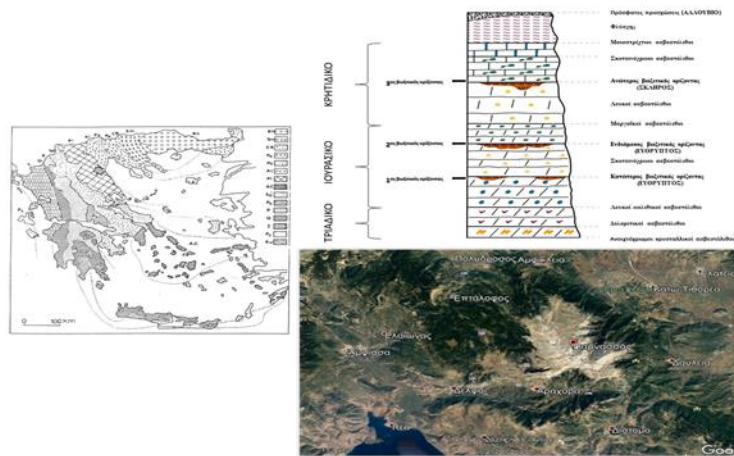
In the first part of the Thesis the geology of Gerolekas is analyzed and more information about bauxite, and bauxite mining in Greece is presented. As Europe is in need of fresh aluminum (and alumina: aluminum oxide) for its vast variety of developments and Greece has the potential to deliver. The exploitation of bauxite ore found in the Greek territory bears an important mining tradition going back to early 1930s. It is a major asset of the Greek mining industry and for years bauxite was the most important Greek mineral commodity, in terms of value of production and export sale values, being a consistent pillar of the national economy of Greece. Delphi-Distomon S.A., a subsidiary of Aluminum of Greece S.A., is one of the largest bauxite producers in Greece and in Europe. The bauxite deposits are totally underground exploited due to strict environmental using the tunneling method of chambers and pillars.

The area investigated, Gerolekas, lies within the overlap of the geological structure of Parnassus– Gkiona zone situated between Gkiona and Parnassus mountains. Currently, there is no information below the elevation of 400m on the continuation of the bauxite deposits and knowing this will be of a great help in future planning and sustaining mining activities in the site. So far, costly 2D active seismic have been implemented, in specific areas because of the rough topography, with limited success mainly due to the 3D geological complexity. Although, getting a direct geophysical response from bauxite horizons is almost impossible because of the small size in respect of the depth of possible deposits, indirect ore indications may occur through geophysics observations associated to the bauxite host rocks or particular geological structures.

The construction of a reliable 3D geological-geophysical model would be of great interest for the mining planning. The Greek bauxite deposits are mainly hosted within carbonate rocks and are part of the wider Mediterranean karstic bauxite belt. They are mainly found within the Parnassus-Gkiona geotechnical zone, in the mountainous areas of Parnassus, Helikon and Gkiona. Bauxite horizons are deposited in the underlying irregularly shaped karstic limestone formation, having a pocket-like, lenticular form, which is usually interrupted by faults at depths varying from 70 to 400m in the wider target area. The materials that are explored and exploited are: (i) upper cretaceous limestone as hanging wall of bauxite, (ii) mid cretaceous limestone as the footwall of bauxite, and (iii) bauxite diasporic (monohydrated)

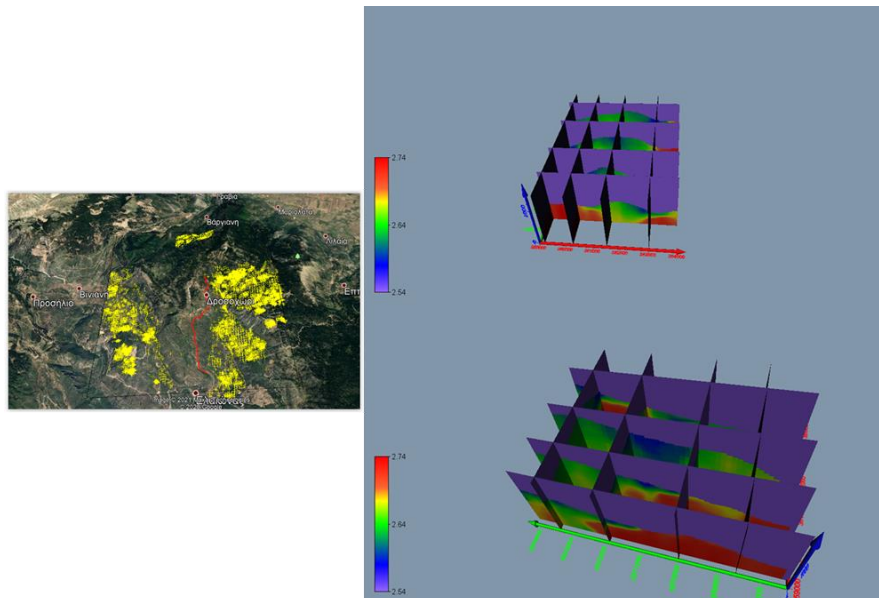
for metallurgical purposes. The deposits are considered to be allochthonous (Aronis, 1955) as a product of the laterisation of ophiolites found in eastern Greece, which were transported and deposited into karstic cavities of the underlying limestone in the Parnassus region. This took place during different geological periods and thus three separate bauxite horizons have been formed (Benardos and Katopodis, 2011), “b1” (lower) horizon between the calcareous Middle and Upper Jurassic units, “b2” (intermediate) between the Upper Jurassic- Kimmeridian and Tithonian limestone formations and “b3” (upper) bauxite deposits found between Cenomanian and Turonian-Senonian units (Middle and Upper Cretaceous). From the three bauxite horizons, only the two upper ones (b2, b3) present significant value in terms of mineable reserves. The upper horizon (b3) is the most important one and contains bauxite of diasporic type, while the bauxite of the intermediate horizon is characterized as boehemite. An extensive underground mining exploitation of the confirmed bauxite deposits using room and pillar method has been implemented and is in progress by Delphi-Distomon S.A.. Actually it is an overthrust zone, the kinematic behavior of which is probably being controlled by the activity of tensile faults that force it to sink relatively to the surrounding flysch of Parnassus-Gkiona unit. Three different geological scenarios have been so far suggested as predominant for the study area . Geological reconnaissance of the study area Fieldwork was guided by the relevant geological map of the Institute of Geological and Mining (IGME, Amfissa Sheet), accompanying literature, Gerolekas nappe consists of various Jurassic-Cretaceous carbonate series (Wigniolle, 1977; Richter et al., 1994, 1996) that were merged in a single unit during the Late Jurassic - Early Cretaceous due to the widespread deposition of an early flysch that was common for all series and it is termed as the “first flysch” (Papanikolaou and Sideris, 1979). This geological structure owes its formation to the specific mechanical deformation processes that occurs in the interface between the propagating Gerolekas nappe (allochthon) over the underlying Parnassus-Gkiona unit (autochthon).

Thrust faults and folds are frequent in the Parnassus flysch, a direct consequence of which is the increase of the apparent thickness of the flysch west of Gerolekas (current fieldwork; Richter, 1994; Gouliotis, 2014; Delphi-Distomon staff pers. comm.). This field observation is in accordance with recent stratigraphic information retrieved through coring by Delphi-Distomon S.A. Specifically, the company conducted three cores in the Parnassus flysch immediately southwest of Gerolekas to depths ranging from 688, 901 to 1224 meters. Therefore, both field observations, carried out specifically for this project, and independent evidence from coring converge on the fact that the overall thickness of the Parnassus unit increases underneath Gerolekas nappe by several but unknown times through the thrust-sheet tectonic emplacement mechanism, pushing any bauxite deposits below the usual hypsometric levels encountered in the area. In addition to thrust tectonics, the margins of Gerolekas nappe have undergone additional, neotectonic deformation. Apparently, the geotectonic analysis, though thorough, cannot indicate which of the geological scenarios under Gerolekas nappe exists.



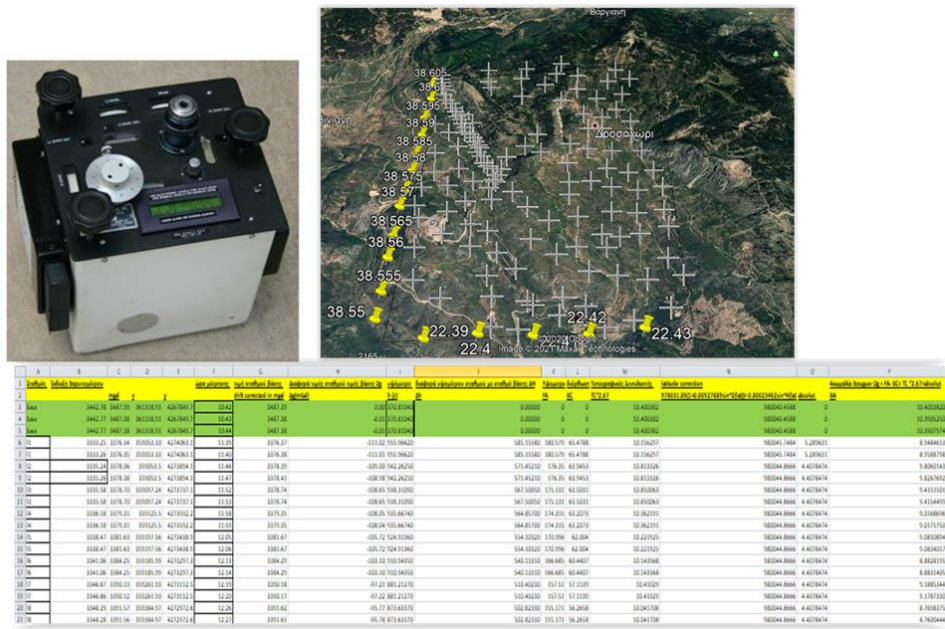
Εικόνα 1 : Geologic Tectonics Map (left) , stratigraphy of Parnassus Gkiona Zone(right up) and Gerolekas (right down)

The specific strategy is starting from building the lithology model of the area by exploiting more than four thousand boreholes, as well as in-situ geological observations and the official geological mapping. The 3D lithology model is then converted to the equivalent geophysical models, based on in-situ measurements, both on the surface and inside the galleries, as well on previous studies in the literature. This method is applied, in order to set the optimum parameterization and to control and constraint the final 3D density model.



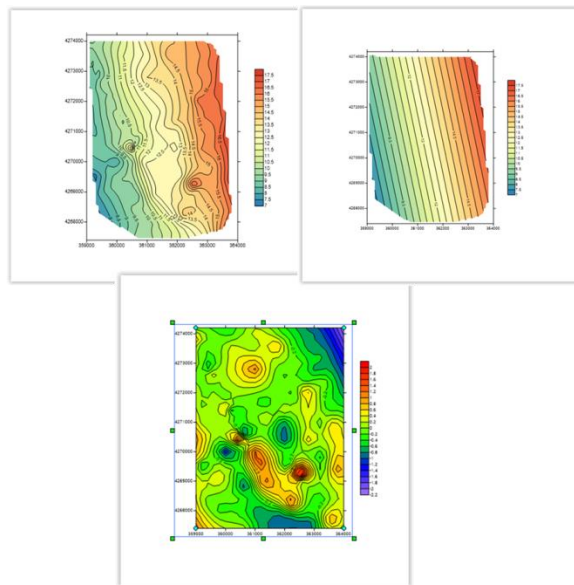
Εικόνα 2 : Boreholes(left), and the 3D density models as a result of interpolating the Boreholes(right)

The Geophysical survey took place in the summer of 2018 using a Lacoste- Romberg G580 Gravimeter, and a grid of stations was conducted in order to achieve a coverage of such an extent as to obtain a reasonable 3D model.



Εικόνα 3 : (Up Left) Gravimeter, (Up right) gravity stations, (down) spreadsheet for the gravity corrections

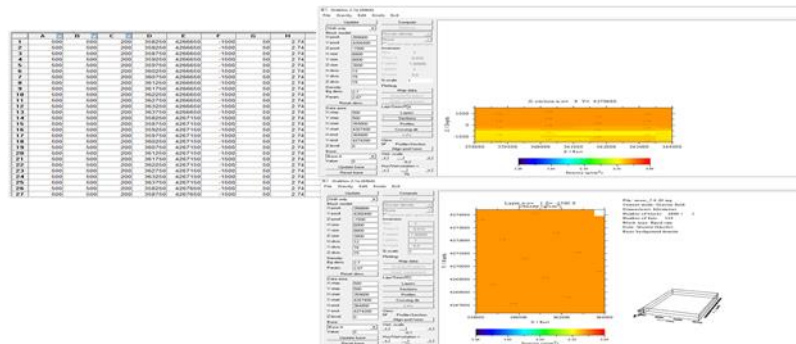
After, the in situ survey corrections where made in order to obtain the corrected value of gravity, the Bouguer anomaly. All, the necessary corrections where made such as drift correction, latitude correction, free air, bouguer slab correction and topography correction. The results of the correction were plotted and gravity maps were obtained, at first the full bouguer map, then using the polynomial fitting method (Telford, 1990) the regional gravity was decided and plotted, and finally the residual map was plotted as a result of the difference of the two before- mentioned.



Εικόνα 4 : Gravity Maps: (up right) Bouguer Map, (up left) Regional, (Down) Residual Gravity Map gridded as 250x250

The upper Purpose of this research is the extract of a full 3D density model, based on gravity values and by combining all the previously known data. Based on previous studies, the results of drilling were translated into densities (Economopoulos, 1993). According to these studies, as well as various laboratory observations from samples from flysch and limestone from the north side of the Parnassus-Giona zone and from zones away from Gerolekas (Apostolopoulos, 1993), the values given to flysch is from 2.55 to 2.6 gr / cm<sup>3</sup> and for limestone from 2.67 to 2.74, in this way a smoother application of the densities in the model is made and it is even more representative for the subsoil of the area.

So, an initial model containing all the constraints was created in order to invert the gravity data using Grablox software, and occam inversion method in order to have the most accurate model.

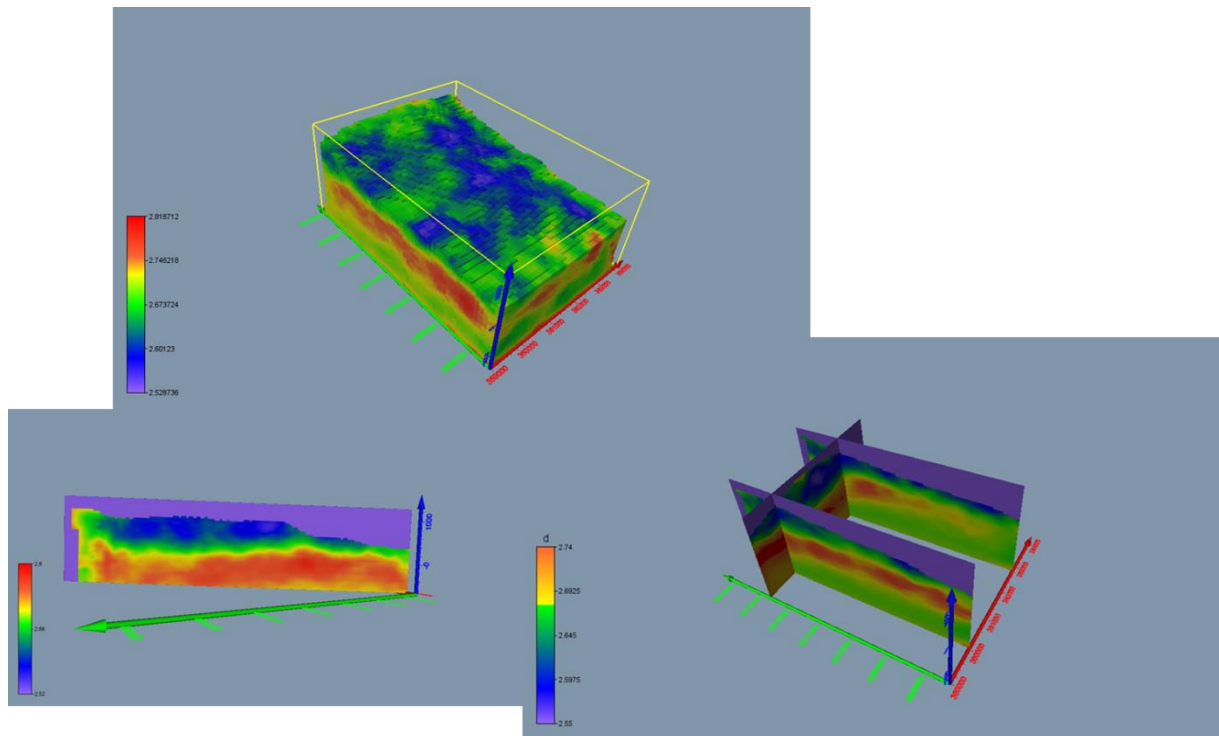


Εικόνα 5 : (right) ascii file of initial file imported, (left) Grablox software and the initial model

The steps to complete the process are as follows:

- 1) Introduction of an initial density model, which acts as a constraint on the inversion process
- 2) Data entry in the software (Grablox2)
- 3) Definition of restrictions on the densities to be taken into account in the resulting model (2.2-2.9 grs / cm<sup>3</sup>)
- 4) Inversion and define iterative procedures until the measured data match the model and the program error is within acceptable limits (less than 10%)
- 5) Visualization of the inverted Data (Voxler)





**Εικόνα 6 : (up) 3d Block Density Model , (Down) sections of the 3D Model to define the stratigraphy and tectonics of the area**

As a result, the integrated approach followed in this work all available a priori data were used and geotectonic image of the studied area was captured as accurately as possible.

The success of the methodology followed proves the applicability of geophysical methods in solving such problems, reducing uncertainty during mining research, and helping to understand the spatial subsoil, tectonics and the assessment and placement of the deposit in space. The use of geophysics in mining is becoming more and more frequent and often becomes necessary and economically advantageous.

The use of constraints and the introduction of an initial reliable model is considered necessary for the correct evaluation of gravitational measurements and the creation of a final density model.

At the end of the creation of the gravitational model and all the previous information collected and utilized during it, the following conclusions were drawn for utilization and further scientific discussion:

- 1) Three fault zones were identified ( $B \rightarrow N$ ,  $A \rightarrow \Delta$ )
- 2) The contact of the limestone of the ceiling with that of the floor, as it has been characterized, appears, in most of the spatial model, at sea level or at a slightly higher altitude ( $\approx 70\text{-}400\text{m}$ ).
- 3) The continuation of research projects can be done in specific places, where it will be deemed appropriate and will be designed more precisely.

## 1 Εισαγωγή

Ένα από τα πιο σημαντικά μέταλλα στην εποχή μας είναι το αλουμίνιο. Το αλουμίνιο δεν υπάρχει αυτοφυές στη φύση και προέρχεται μόνο μέσω της επεξεργασίας του βωξίτη. Για αυτό το λόγο τα κοιτάσματα του βωξίτη είναι ιδιαίτερα σημαντικά για την οικονομία μιας χώρας. Στο ελληνικό υπέδαφος, και ιδιαίτερα στην ευρύτερη περιοχή της Γκιώνας και του Παρνασσού, η οποία είναι η κύρια βωξιτοφόρος περιοχή της Ελλάδας, τα κοιτάσματα του βωξίτη είναι πολλά ποσοτικά και πλούσια ποιοτικά.

Σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι να ξεπεραστεί εάν είναι δυνατόν η συμβατική τεχνική σχεδιασμού μεταλλευτικής εκμετάλλευσης και συνέχιση των υπόγειων έργων εκμετάλλευσης του κοιτάσματος και προσπέλασης. Με την αξιοποίηση γεωφυσικών μεθόδων και λοιπών στοιχείων (γεωλογική αξιολόγηση, γεωτρήσεις κτλ) μπορεί να αποτυπωθεί η τεκτονική της περιοχής και να προταθεί ο σχεδιασμός του υπόγειου μεταλλείου με την λιγότερη δυνατή απόκλιση από το κοίτασμα. Με τον τρόπο αυτό η συνεχείς και πολυέξοδες δειγματοληπτικές γεωτρήσεις μειώνονται στον αναγκαίο βαθμό, μιας και παρέχουν στοιχεία σε μια διάσταση, ενώ ένα εφαρμοσμένο και ολοκληρωμένο μοντέλο είναι χωρικό (3D) και μας δίνει ολοκληρωμένη την εικόνα της τεκτονικής και της στρωματογραφίας.

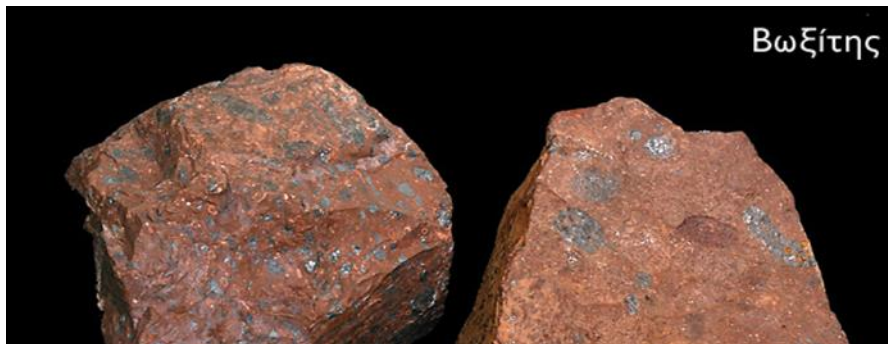
Για την εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας ελήφθησαν υπόψη όλα τα στοιχεία που παραδόθηκαν από την εταιρεία "Δελφοί Δίστομον Α.Μ.Ε.", όπως:

- Ο τοπογραφικός χάρτης της περιοχής, προκειμένου να σχεδιαστεί το ανάγλυφο σε τρισδιάστατη μορφή.
- Οι δειγματοληπτικές γεωτρήσεις που έγιναν στην περιοχή για την ανεύρεση του κοιτάσματος.
- Δεδομένα για την χρήση των εκρηκτικών υλών.
- Στοιχεία για τις διαστάσεις των προσπελαστικών και των στοών εκμετάλλευσης, που ακολουθούνται σε μια τυπική υπόγεια βωξιτική εκμετάλλευση.
- Γεωλογικοί χάρτες της περιοχής.

Επιπλέον, από την πλευρά του εργαστηρίου Εκμετάλλευσης Υδρογονανθράκων και εφαρμοσμένης Γεωφυσικής διεξάχθησαν βαρυτικές μετρήσεις, επεξεργάστηκαν και αξιολογήθηκαν με τα υπόλοιπα διαθέσιμα στοιχεία.

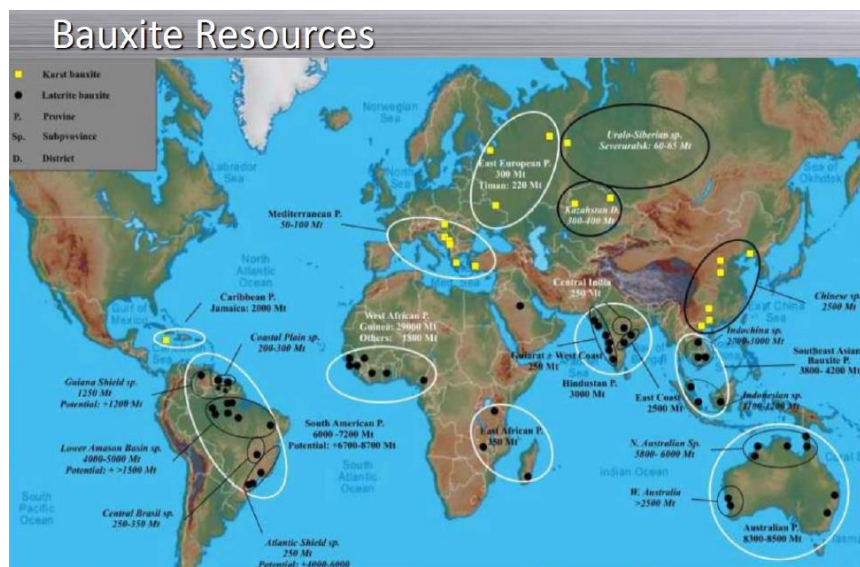
## 1.1 ΒΩΞΙΤΗΣ – ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ - ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΕΙΣ

Ο βωξίτης είναι πέτρωμα το οποίο έχει γαιώδη όψη, και αποτελεί το κυριότερο μέταλλευμα αργιλίου. Σχηματίζεται από την αποσάθρωση αργιλοπυριτικών πετρωμάτων (κυρίως μαγματογενούς προελεύσεως), γι' αυτό θεωρείται ιζηματογενές.



Εικόνα 7 : Βωξίτης

Ο βωξίτης αποτελείται κυρίως από υδροξείδια του αργιλίου, υδροξείδια ή οξείδια του σιδήρου και αργιλοπυριτικά ορυκτά. Το χρώμα του είναι συνήθως κοκκινωπό ή κίτρινο, και σε κάποιες περιπτώσεις γκρι. Τα διάφορα χρώματα του βωξίτη οφείλονται στις διαφορετικές περιεκτικότητες των οξειδίων του σιδήρου. Ακόμα, το ειδικό βάρος του βωξίτη κυμαίνεται μεταξύ 2.7 – 3.5 ανάλογα με την περιεκτικότητα του σε οξείδια του σιδήρου. Η υφή του είναι στιφρή, ωλιθική ή πρισολιθική. Είναι ανθεκτικός σε υψηλές θερμοκρασίες, αδιάλυτος στο νερό και διαλυτός σε οξέα ή καυστικά αλκάλια υψηλών συγκεντρώσεων.



Εικόνα 8 : Παγκόσμιος Χάρτης Απεικόνισης Βωξιτικών Εκμετελλεύσεων

Οικονομικά εκμεταλλεύσιμος θεωρείται ο βωξίτης ο οποίος έχει περιεκτικότητα περισσότερο από το 45-50% σε  $Al_2O_3$ , λιγότερο από το 20%  $Fe_2O_3$  και μέχρι 5% σε Si (σε διάφορες μορφές).

Τέλος, τα ελληνικά κοιτάσματα βωξίτη έχουν μορφή φακών, κοιτών, θυλάκων ή ακανόνιστων μαζών μέσα σε ασβεστολιθικούς σχηματισμούς.

### 1.1.1 ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΒΩΞΙΤΙΚΕΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΕΙΣ

Τα κοιτάσματα βωξίτη του Ελλαδικού χώρου είναι «καρστικού» τύπου και τα μεγαλύτερα από αυτά βρίσκονται στην περιοχή Παρνασσού-Γκιώνας (Γκιώνα – Ελικώνας, Οίτη, Παρνασσός). Η εξόρυξη αυτών των κοιτασμάτων γίνεται πλέον μόνο με υπόγειες εκμεταλλεύσεις.

Η Ελλάδα κατέχει σημαντική θέση όχι μόνο στην Ευρωπαϊκή Ένωση αλλά και παγκοσμίως, καθώς είναι μία από τις σημαντικότερες βωξιτοπαραγωγές χώρες, συγκεκριμένα σύμφωνα με πρόσφατη μελέτη του IOBE (Ίδρυμα Οικονομικών & Βιομηχανικών Ερευνών) για το 2019, η Ελλάδα κατέχει την 1η θέση στην Ευρώπη σε παραγωγή και αποθέματα βωξίτη. Τα βέβαια αποθέματα βωξίτη της Ελλάδας υπολογίζονται περίπου σε 130.000.000 tη και σύμφωνα με τα τελευταία στοιχεία του ΣΜΕ (Σύνδεσμος Μεταλλευτικών Επιχειρήσεων), η συνολική παραγωγή βωξίτη της χώρας για το έτος του 2018 ανέρχεται τις 1.607.444 tη μεταλλεύματος. Ο ελληνικός βωξίτης εξάγεται συνολικά σε 20 χώρες 4 ηπείρων και οι εξαγωγές είναι του ύψους των 17.446.465 € (για το 2017 σύμφωνα με ΣΜΕ).

Οι ελληνικές εταιρείες που δραστηριοποιούνται στον χώρο είναι δυο. Η «ΕΛΜΙΝ ΒΩΞΙΤΕΣ Α.Ε.» και η «Δελφοί – Δίστομον Α.Ε.», με την πρώτη να είναι ο βασικός προμηθευτής μεταλλουργικού βωξίτη στο Αλουμίνιον της Ελλάδος και την δεύτερη με την δραστηριοποίηση τις στην εξόρυξη και παραγωγή βωξίτη να καλύπτει το 45% των απαιτήσεων μεταλλουργίας και η ετήσια παραγωγή να είναι περίπου 650.000 tη μεταλλεύματος. Η εκμετάλλευση των βωξιτικών κοιτασμάτων αποτελεί έναν παράγοντα μεγάλης σημασίας για την Ελλάδα καθώς η συνολική συνεισφορά του κλάδου του αλουμινίου στην εθνική οικονομία ανέρχεται στο 2,3% του ΑΕΠ. (IOBE, 2019)

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται η παραγωγή και η αξία των πωλήσεων και των εξαγωγών του βωξίτη για τα έτη 2016, 2017.

Πίνακας 1 Παραγωγή βωξίτη και αξία πωλήσεων και εξαγωγών για την Ελλάδα (<https://www.sme.gr/>)

| ΕΤΟΣ | ΠΑΡΑΓΩΓΗ ( tη ) | ΠΩΛΗΣΕΙΣ ( € ) | ΕΞΑΓΩΓΕΣ ( € ) |
|------|-----------------|----------------|----------------|
| 2016 | 1.880.000       | 62.918.000     | 16.980.000     |
| 2017 | 1.927.000       | 63.059.000     | 17.446.465     |

## Κοιτασματολογία

### 1.1.2 Η γένεση του βωξίτη

Σχετικά με την γένεση των βωξιτικών κοιτασμάτων επικρατούν σήμερα δύο θεωρίες. Η θεωρία της αλλόχθονης γενέσεως, και η θεωρία της αυτόχθονης γενέσεως (Ορφανουδάκη Α, 2005). Πιο συγκεκριμένα, οι θεωρίες αυτές αναλύονται λεπτομερώς παρακάτω.

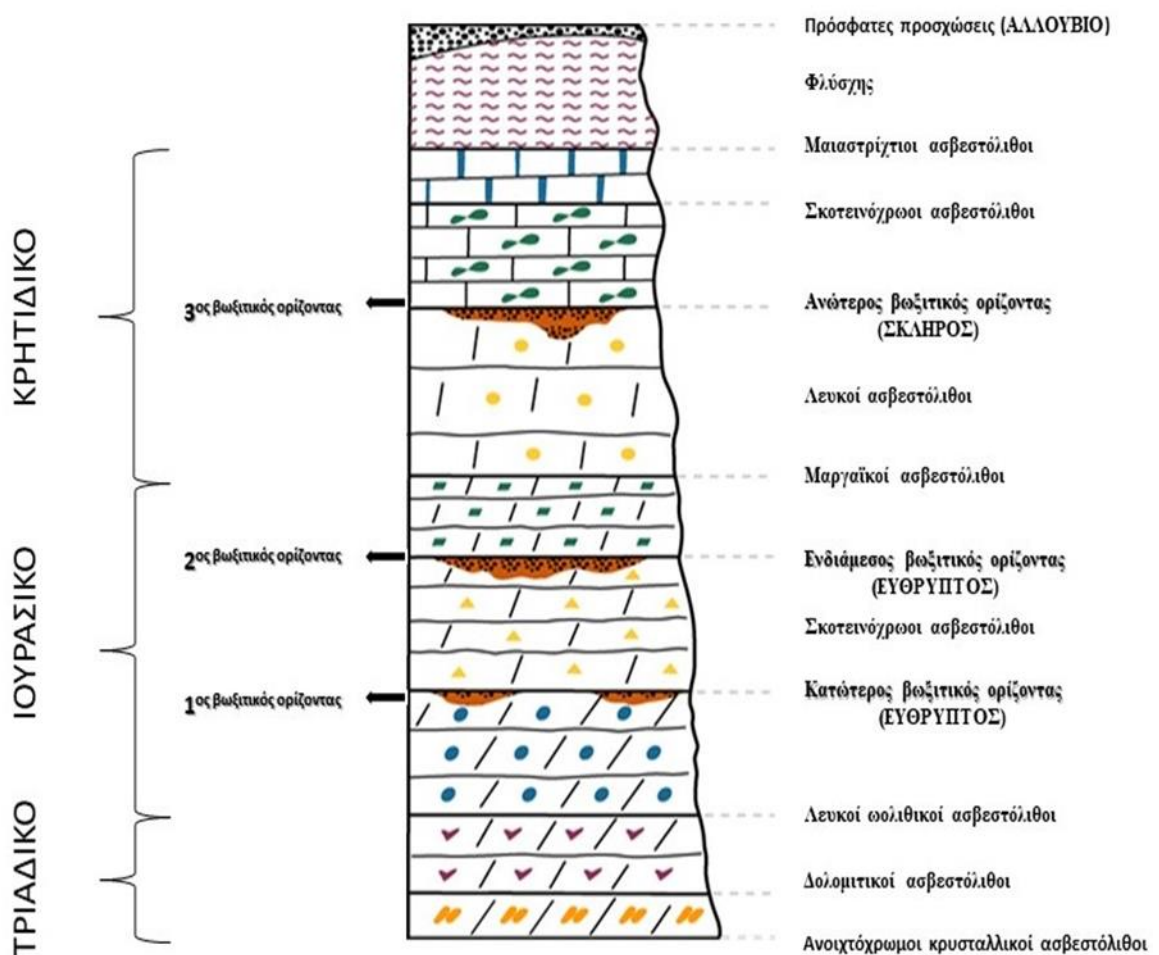
Α) Η θεωρία της αλλόχθονης γενέσεως: Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, το βωξιτικό κοιτάσμα σχηματίστηκε σε κάποιο άλλο μέρος από όπου βρίσκεται σήμερα με τη βοήθεια της λατεριτικής αποσάθρωσης και ύστερα υπέστη διάβρωση, μεταφορά και απόθεση στην σημερινή του θέση, σε μορφή αλλουβιακή. Από τον σχηματισμό του αυτό προκύπτει ότι ο βωξίτης αυτός είναι ίζημα λατεριτικό και αλλόχθονο. Τα κοιτάσματα αυτά χαρακτηρίζονται ως λατεριτικά (Ερχάτ, 1950). Μετά από μια περίοδο βιοστασίας, που στη διάρκεια της σχηματίστηκαν τα λατεριτικά *profil* σε περιοχές αργιλοπυριτικών πετρωμάτων, ακολούθησε μια περίοδος ρηξιστασίας, η οποία προκάλεσε την καταστροφή και την απόθεση τους σε γειτονικές περιοχές, με έντονα και πολλά καρστικά έγκοιλα. Κατά τη φάση αυτή έγινε και ο διαφορισμός και ο εμπλουτισμός σε υδροξείδια του αργιλίου, με αποτέλεσμα να σχηματισθούν βωξιτικά κοιτάσματα πλούσια σε άργιλο. Η λατεριτίωση πιθανώς να συνεχίστηκε και να τερματίστηκε στη νέα θέση των καρστικών εγκοίλων, εκεί όπου συγκεντρώθηκε το βωξιτικό υλικό.

Β) Η θεωρία της αυτόχθονης γενέσεως: Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, ο βωξίτης προήλθε από την επί τόπου αποσάθρωση των ανθρακικών πετρωμάτων και ειδικότερα των ασβεστόλιθων. Από την αποσάθρωση αυτή, που είχε ως αποτέλεσμα τη διάλυση και απομάκρυνση των ανθρακικών ορυκτών, παρέμειναν σαν υπόλειμμα τα αδιάλυτα αργιλοπυριτικά ορυκτά, τα οποία στη συνέχεια υποβλήθηκαν σε λατεριτίωση, με αποτέλεσμα την δημιουργία των βωξιτικών κοιτασμάτων. Συνεπώς πρόκειται για έναν αλλουβιακό σχηματισμό σε συνθήκες τροπικού κλίματος. Η θεωρία αυτή υποστηρίχθηκε από τους επιστήμονες Λαπαρέντ και Ντόλφους σε διάφορες εργασίες τους. Επικρατέστερη θεωρία γενέσεως των βωξιτών της περιοχής Παρνασσού-Γκιώνας είναι η πρώτη για τους εξείς τρεις λόγους (Ντάτσης Π, Χαρχαλάκης Σ, 1989):

- Το αργίλιο συμμετέχει σε ελάχιστο ποσοστό στη σύνθεση των ασβεστόλιθων, ενώ είναι το κύριο συστατικό της σύνθεσης των βωξιτών. Για τη γένεση ενός κοιτάσματος βωξίτη πάχους 3 m και μήκους 20 m θα έπρεπε να λατεριτωθούν ολόκληρα βουνά ασβεστόλιθων για να δώσουν το εγκλειόμενο ποσό αργιλίου στο κοιτάσμα. Αυτό όμως δεν είναι δυνατό, γιατί το κενό μεταξύ οροφής και πατώματος των βωξιτών δεν είναι τόσο μεγάλο, ώστε να δικαιολογείται μια τέτοια εξέλιξη.
- Η υπόθεση της προέλευσης των βωξιτών από ασβεστόλιθους δεν θα μπορούσε να ερμηνεύσει την παρουσία ορισμένων στοιχείων στον βωξίτη όπως τιτάνιο, γάλλιο, βανάδιο κ.λ.π.
- Η δεύτερη θεωρία δε θα μπορούσε να εξηγήσει την ύπαρξη διαφοράς στη σύσταση του βωξίτη από δυτικά προς ανατολικά. Τέλος, χωρίς να μπορεί να αποδειχθεί

φαίνεται πιθανό για τον Ελληνικό χώρο ότι οι βωξίτες προήλθαν από λατεριτική αποσάθρωση οφειολίθων, οι οποίοι είναι πολύ εξαπλωμένοι στην Ελλάδα. Υπέρ της άποψης αυτής συνηγορεί το γεγονός ότι βρέθηκαν μικρά κοιτάσματα βωξίτη πάνω σε σερπεντίνες και διαβασικούς τόφφους. Αυτά τα κοιτάσματα θεωρούνται αυτόχθονα.

Η κύρια περιοχή εκμετάλλευσης εμφάνισης και εκμετάλλευσης του ελληνικού βωξίτη ανήκει στην γεωτεκτονική ζώνη ΠΑΡΝΑΣΣΟΥ-ΓΚΙΩΝΑΣ. Η ζώνη αυτή παρεμβάλλεται μεταξύ της Υποπελαγονικής και της ζώνης Ολωνού-Πίνδου που περιορίζεται στην Κεντρική Στερεά Ελλάδα. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της ζώνης αυτής είναι η παρεμβολή των τριών κυρίως βωξιτικών οριζόντων και αντιπροσωπεύει υποθαλάσσιο ιζημα με συνεχή ιζηματογένεση από το Ανώτερο Τριαδικό μέχρι το Ηώκαινο.



Εικόνα 9 Στρωματογραφία Ζώνης Παρνασσού - Γκιώνας

Τα βωξιτικά κοιτάσματα (φακοί) είναι δευτερογενή και καταλαμβάνουν έγκοιλα τις παλαιογεωγραφικής μορφολογίας που διαμορφώθηκαν από καρστική και τεκτονική δραστηριότητα κατά την προβωξιτική περίοδο. Οι έντονες εφαπτομενικές τάσεις που αναπτύχθηκαν κατά την αλπική ορογένεση προκάλεσαν την οριστική ανάδυση τις ζώνης και

την πτύχωση τις ενώ κατά την φάση της εκτόνωσης που ακολούθησε δημιουργήθηκαν συστήματα ορθών ρηγμάτων. Οι επιπτώσεις των παραπάνω ορυκτών φάσεων είναι καθοριστικές όσον αφορά την θέση των φακών μέσα στο σημερινό μορφολογικό ανάγλυφο της περιοχής και την μηχανική αντοχή των γεωλογικών σχηματισμών που τα περιβάλλουν.

Καθώς η πλειοψηφία των εκμεταλλεύσεων αφορά φακούς του 3ου βωξιτικού οριζοντα, αναφέρεται ότι οι αμέσως υπερκείμενοι του 2ου βωξιτικού οριζοντα ασβεστόλιθοι είναι λευκόχρωοι του Τιθωνίου-Νεοκομίου. Οι ασβεστόλιθοι αυτοί αποτελούν πάτωμα του 3ου βωξιτικού οριζοντα. Επειδή οι ασβεστόλιθοι αυτοί παρεμβάλλονται μεταξύ των δυο βωξιτικών οριζόντων λέγονται «ενδιάμεσοι». Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται οι περιεκτικότητες των βωξιτικών κοιτασμάτων σε  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $Fe_2O_3$  και  $CaO$  και το μέγεθος αυτών, ανάλογα τον βωξιτικό οριζοντα όπου ανήκουν.

**Πίνακας 2 : Περιεκτικότητες οξειδίων σε κοιτάσματα βωξίτη ανάλογα με τον οριζοντα που ανήκουν**

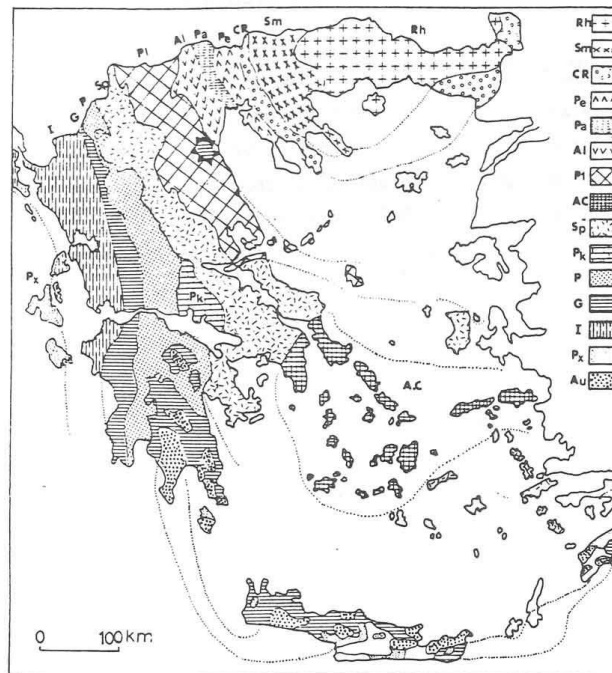
| <b>ΒΩΞΙΤΙΚΟΣ ΟΡΙΖΟΝΤΑΣ</b> | <b><math>Al_2O_3</math> %</b> | <b><math>SiO_2</math> %</b> | <b><math>Fe_2O_3</math> %</b> | <b><math>CaO</math> %</b> | <b>Μέγεθος κοιτασμάτων</b> |
|----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|---------------------------|----------------------------|
| <b>Ανώτερος</b>            | 55-60                         | 2-3                         | 15-30                         | 0.5-1                     | Μικρά έως πολύ μεγάλα      |
| <b>Ενδιάμεσος</b>          | 50-55                         | 5-15                        | 15-30                         | 0.2-0.5                   | Μικρά έως πολύ μεγάλα      |
| <b>Κατώτερος</b>           | 45-50                         | 15-25                       | 5-15                          | 0.1-0.5                   | Πολύ μικρά                 |

Τα περιβάλλοντα πετρώματα των βωξιτικών κοιτασμάτων είναι ασβεστολιθικά, και ειδικότερα οι ασβεστόλιθοι της οροφής είναι ηλικίας Τουρωνίου-Σενωνίου, ενώ του δαπέδου είναι Κενομανίου ηλικίας.

Ο βωξίτης του 3ου οριζοντα που είναι και ο σημαντικότερος από άποψη εκμεταλλευσιμότητας, είναι συνήθως ερυθροκαστανόχρωμος ωλιθικής υφής και κατά κύριο λόγο διασπορικού τύπου, έχει περιεκτικότητα 55-60% σε  $Al_2O_3$ , 2-3% σε  $SiO_2$ , 15-30 % σε  $Fe_2O_3$  και 0.5-1% σε  $CaO$  και το μέγεθος των κοιτασμάτων του χαρακτηρίζεται από μικρό έως πολύ μεγάλο. Την οροφή (ταβάνι) αποτελούν ασβεστόλιθοι λεπτοί ή παχυστρωματώδεις σκούρου χρώματος του Τουρωνίου με miliolidea. Στην συνέχεια συναντώνται άστρωτοι ή παχυστρωματώδεις ασβεστόλιθοι με Rodistae, Hipporites κ.ά. και κλείνει η ασβεστολιθική σειρά με λεπτοστρωματώδεις λευκόχρωους Glombotronsana κ.ά. Η σειρά Παρνασσού-Γκιώνας ολοκληρώνεται με τις τρεις ενότητες του παλαιογενούς Φλύσχη. Τα παραπάνω αναγνωρίζονται από τις γεωλογικούς χάρτες της περιοχής σύμφωνα με την τεχνική μελέτη της Δελφοί-Δίστομον Α.Μ.Ε. (Ιούνιος 2018).

## 1.2 Γερολέκας - Η περιοχή Μελέτης

Η περιοχή που θα διερευνηθεί στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής, ο Γερολέκας, βρίσκεται εντός της αλληλεπικάλυψης της γεωλογικής δομής της ζώνης Παρνασσού-Γκιώνας που βρίσκεται μεταξύ των βουνών Γκιώνα και Παρνασσού, βρίσκεται στα δυτικά του Παρνασσού. Η περιοχή του Γερολέκα, στην οποία βρίσκεται η περιοχή μελέτης, ανήκει στην γεωλογική ζώνη Παρνασσού-Γκιώνας. Η ονομασία της ζώνης οφείλεται στα βουνά του Παρνασσού και της Γκιώνας της Στερεάς Ελλάδας, τα οποία συγκροτούν την ζώνη. Η ζώνη Παρνασσού-Γκιώνας θεωρήθηκε το δυαδικό σύστημα εναλλασσόμενων αυλακών και ράχων ως ύβωμα τοπικά παρεμβαλλόμενο μεταξύ της κατωφέρειας της Υποπελαγονικής ζώνης και της αύλακας της Πίνδου. Η συγκεκριμένη ζώνη περιορίζεται στην κεντρική Ελλάδα. Επί του παρόντος, δεν υπάρχουν πληροφορίες κάτω από το υψόμετρο των 400 μέτρων σχετικά με τη συνέχιση των αποθέσεων βωξίτη και γνωρίζοντας ότι αυτό θα συμβάλει σημαντικά στο μελλοντικό σχεδιασμό και τη διατήρηση των εξορυκτικών δραστηριοτήτων στην περιοχή.



Εικόνα 10 : Χάρτης Γεωτεκτονικών ζωνών στον ελλαδικό χώρο με P<sub>κ</sub> είναι η ζώνη Παρνασσού Γκιώνας

Η προσβασιμότητα, τα περιβαλλοντικά ζητήματα και το υψηλό κόστος αποτελούν βασικά εμπόδια στην παροχή γεωφυσικών αποτελεσμάτων υψηλής ευκρίνειας χρησιμοποιώντας μια πλήρη τρισδιάστατη ενεργητική σεισμική έρευνα στον Γερολέκα. Μέχρι στιγμής, έχουν εφαρμοστεί δαπανηρά 2D ενεργά σεισμικά (Active seismic), σε συγκεκριμένες περιοχές λόγω της τραχιάς τοπογραφίας, με περιορισμένη επιτυχία κυρίως λόγω της τρισδιάστατης γεωλογικής πολυπλοκότητας. Στην περιοχή μελέτης, ο Γερολέκας τοποθετείται τεκτονικά στην αλληλουχία του φλύσχη της ζώνης Παρνασσού-Γκιώνας και αντιπροσωπεύεται κυρίως από τα ανώτερου κρητιδικού γεωτεκτονικά κομμάτια του, που αντιστοιχούν κυρίως σε ανθρακικά πετρώματα, όπως παρατηρήθηκε από τον Γκουλιώτη (2014) και επιβεβαιώθηκε σε αυτή τη μελέτη. Περιλαμβάνουν εναλλαγή ασβεστολιθικών στρωμάτων τα οποία είναι



είτε λεπτοστρωματώδη είτε είναι ρουδιοστιοφόροι , σύμφωνα με το Richter et al. (1994; 996), τα οποία χρονολογούνται στο Μαιστρίχτειο (Upper Cretaceous). Τα ανθρακικά στρώματα του Γερολέκα είναι γενικά κεκλιμένα προς τα δυτικά, εκθέτοντας τα με βάση την χρονολογική απόθεση και σχηματισμό τους στις ανατολικές πλαγιές του Ασβεστολίθου χαρακτηρισμένου ως Γερολέκα, γύρω από το χωριό Δροσοχώρι. Οι δύο κυρίαρχες όψεις του Φλύσχη της ζώνης Παρνασσού Γκιώνας , δηλαδή ο πελετικός ψαμμίτης και ο κόκκινος πελίτης, είτε εναλλάσσονται στρατηγικά (τακτική επαφή) είτε έρχονται σε επαφή μέσω τεκτονικών πτυχών (ώσεις). Στην τελευταία περίπτωση η τεκτονική δομή του Φλύσχη του Παρνασσού χαρακτηρίζεται από ξεχωριστά ωστικά φύλλα.

Gerolekas site, leaving its main body completely inaccessible.

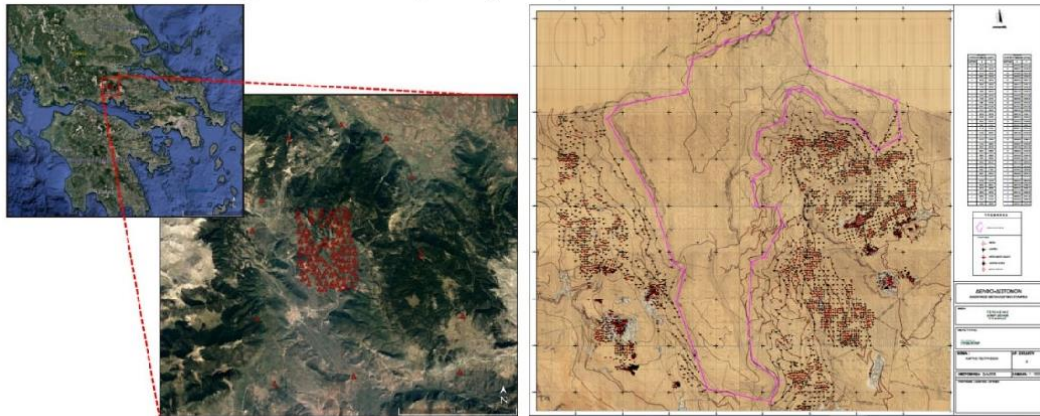
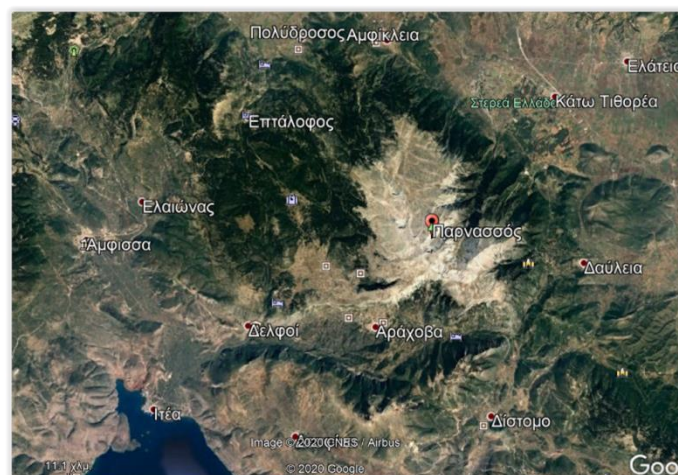


Fig. 1 The Geroleka Cenozoic mining site. Left: Location of the study area. The red rectangle

Εικόνα 11 : Γεωλογικοί Χάρτες του Γερολέκα

Ρήγματα ώθησης και, ως εκ τούτου, τεκτονική ώθησης, κυριαρχούν στη γεωλογική δομή του φλύσχη του Παρνασσού στα δυτικά του Καλύμματος του Γερολέκα. Αυτή η γεωλογική δομή οφείλει το σχηματισμό της στις συγκεκριμένες μηχανικές διεργασίες παραμόρφωσης που συμβαίνουν στη διεπαφή μεταξύ της δομής του Γερολέκα (αλλόχθονη) πάνω από την υποκείμενη ζώνη του παρνασσού Γκιώνας (Αυτόχθονη). Ρήγματα ώθησης και πτυχώσεις εμφανίζονται κατ' επανάληψη και με σχετική εμμόνη στο φλύσχη του Παρνασσού , άμεση συνέπεια της οποίας είναι η αύξηση του φαινομένου πάχους του Φλύσχη στα δυτικά του Γερολέκα (In situ παρατηρήσεις ; Richter, 1994; Gouliotis, 2014; Δελφοί Δίστομον ΑΜΕ ) .



Εικόνα 12: Ο Γερολέκας και η ευρύτερη περιοχή (Google Earth)

Αυτή η επιτόπια παρατήρηση είναι σύμφωνη με τις πρόσφατες στρωματογραφικές πληροφορίες που ανακτήθηκαν μέσω των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων που διεξήχθησαν από την εταιρεία Δελφοί-Δίστομον Α.Μ.Ε. . Συγκεκριμένα, η εταιρεία διεξήγαγε τρεις Γεωτρήσεις στην επαφή του Φλύσχη του Παρνασσού νοτιοδυτικά του Γερολέκα σε βάθη που κυμαίνονται από 688, 901 έως 1224 μέτρα. Καμία γεώτρηση δεν αποκάλυψε αποθέσεις βωξίτη. Αντιθέτως, φάνηκε ότι το κρεμαστό τοίχωμα (ασβεστόλιθος - Μαιστρίχτιο ) που τυπικά καλύπτει τα αποθέματα βωξίτη προς τα πάνω επαναλαμβάνεται αρκετές φορές προς τα κάτω, υποδηλώνοντας ότι ο άνω φλοιός της περιοχής είναι πράγματι δομημένος από πολλαπλά ωστικά φύλλα.

Ως εκ τούτου, τόσο οι παρατηρήσεις πεδίου, που πραγματοποιήθηκαν ειδικά για αυτό το έργο, όσο και ανεξάρτητα στοιχεία από το γεωτρητικό έργο της εταιρείας, όπως και από τις γεωφυσικές μεθόδους που εφαρμόστηκαν συγκλίνουν στο γεγονός ότι το συνολικό πάχος της ζώνης του Παρνασσού αυξάνεται κάτω από τον “καπάκι” του Γερολέκα μέσω του τεκτονικών συμβάντων και εποχών , ωθώντας τυχόν αποθέσεις βωξίτη κάτω από τα συνηθισμένα υψομετρικά επίπεδα που συναντώνται στην ευρύτερη περιοχή και στις ήδη αξιοποιήσιμες αποθέσεις . Εκτός από την τεκτονική ώθησης, τα όρια της ζώνης του Γερολέκα έχουν υποστεί επιπλέον, νεοτεκτονική παραμόρφωση και παραμορφώσεις στο τεταρτογενές . Στα νότια, έχουμε την ύπαρξη ρηγμάτων με διευθύνσεις τόσο προς δυτικά όσο και προς νότια. Τα ρήγματα έρχονται σε επαφή με ένα τεκτονικό πόδι που αποτελείται από ιουρασικούς ασβεστόλιθους (δηλαδή το δάπεδο που περιέχει το βωξίτη) με ένα κρεμαστό τοίχωμα που αποτελείται από το φλύσχη του Παρνασσού Γκιώνας . Η επαφή μεταξύ παλαιών (ιουρασικού) και νεότερων (παλαιωκένου) αποθέσεων κατά μήκος της εμφάνισης των ρηγμάτων υποδηλώνει ότι ο το “καλυμα” του Γερολέκα υποχωρεί συνολικά κατά μήκος αυτών των νεοτεκτονικών ρηγμάτων. Είναι, συνεπώς, σαφές ότι το ύψος της κατακόρυφης πτώσης των νεοτεκτονικών εναλλαγών αυξάνει τις ούτως ή άλλως διογκωμένες εναποθέσεις φλύσχη λόγω ώθησης, αναγκάζοντας πιθανές αποθέσεις βωξίτη πολύ κάτω από τα ύψη που οριοθετούνται στην περιοχή. Προφανώς, η γεω-τεκτονική ανάλυση, αν και διεξοδική, δεν μπορεί να δείξει από μόνη της την περιοχή όπου βρίσκεται η επαφή του φλύσχη με τον ασβεστόλιθο και τις εναλλαγές τους, και άρα το κοίτασμα του βωξίτη, που είναι αναγκαίο για την συνέχιση των έργων της εταιρείας.

### 1.3 Δελφοί Δίστομο Α.Μ.Ε

Η εταιρεία ιδρύθηκε το 1972 ως θυγατρική της εταιρείας Αλουμίνιον της Ελλάδος, με την επωνυμία Ελληνικοί Βωξίτες Διστόμου. Το 1975 δημιουργήθηκε η εταιρεία Δελφοί- Δίστομο Α.Μ.Ε προκειμένου να ελέγχει τις μεταλλευτικές παραχωρήσεις της εταιρείας Βωξίτες Δελφών. Το 1989 οι εταιρείες Ελληνικοί Βωξίτες Διστόμου και Βωξίτες Δελφών συγχωνεύτηκαν στη Δελφοί-Δίστομο Α.Μ.Ε. Το 1995 η εταιρεία μετέφερε το κέντρο των δραστηριοτήτων της από το Δίστομο της Βοιωτίας στην Άμφισσα της Φωκίδας, στην περιοχή Άνω Κουνουκλιά, στο δημοτικό διαμέρισμα του Ελαιώνα. Από το 2007 η εταιρεία αποτελεί ανεξάρτητο μέλος του ομίλου Μυτιληναίος. Σήμερα η εταιρεία δραστηριοποιείται στους νομούς Φωκίδας και Βοιωτίας, στα βουνά του Παρνασσού, της Γκιώνας και του Ελικώνα σε 63 παραχωρήσεις μεταλλείων και είναι η δεύτερη μεγαλύτερη παραγωγός εταιρεία βωξίτη στην Ελλάδα, με ετήσια παραγωγή που ανέρχεται στους 900.000 tn. Το σύνολο της παραγωγής του βωξίτη διατίθεται στο εργοστάσιο παραγωγής αλουμινίου στα Άσπρα Σπίτια Βοιωτίας. Το βιομηχανικό αυτό συγκρότημα της εταιρείας Αλουμίνιον Α.Ε έχει δυναμικότητα παραγωγής 750.000 tn αλουμίνας και 160.000 tn αλουμινίου ανά έτος, ενώ απασχολεί 1250 άτομα. Από το 2005 είναι μέλος των εταιρειών του ομίλου Μυτιληναίος. Τέλος, τα υπολογισμένα εκμεταλλεύσιμα αποθέματα της εν λόγω εταιρείας ανέρχονται σήμερα στους 9.100.000 tn. Η εκμετάλλευση των κοιτασμάτων βωξίτη γίνεται μόνο με υπόγειες εκμεταλλεύσεις.

## 2 Οι Γεωφυσικές Μέθοδοι

Οι γεωφυσικές μέθοδοι χωρίζονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες

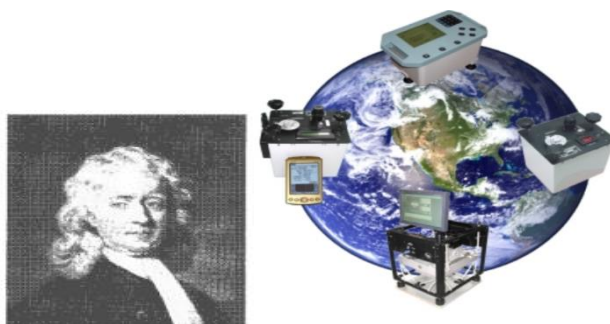
1. Σε αυτές που χρησιμοποιούν τα φυσικά πεδία της γης. Οι οποίες αξιοποιούν τα βαρυτικά, μαγνητικά, ηλεκτρικά και ηλεκτρομαγνητικά πεδία της γης, ερευνώντας για τοπικές αλλοιώσεις στα φυσικά σχηματιζόμενα αυτά πεδία, οι οποίες προκαλούνται από τους διαφόρους γεωλογικούς σχηματισμούς.
2. Σε αυτές που απαιτείται η διοχέτευση τεχνητά παραγόμενης ενέργειας στο έδαφος, προκειμένου να γίνει δυνατή η γεωφυσική διασκόπηση. Σε αυτήν την κατηγορία περιλαμβάνεται η δημιουργία τοπικών τεχνητών ηλεκτρικών ή ηλεκτρομαγνητικών πεδίων ή κυμάτων, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν παράλληλα με τα φυσικά πεδία, αλλά και την ιδιαίτερα σημαντική σεισμική μέθοδο, κατά την οποία λαμβάνεται υπόψη η ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων που έχουν δημιουργηθεί τεχνητά.

Πίνακας 3 : Γεωφυσικές Μέθοδοι

| Μέθοδος   | Μετρούμενο Μέγεθος  | Φυσική Ιδιότητα που μετράται                       |
|---|---|--|
| <b>Σεισμική</b>   | Χρόνος διάδοσης των ανακλούμενων ή των διαθλούμενων κυμάτων     | Πυκνότητα και ελαστικότητα                         |
| <b>Βαρυτική</b>   | Χωρικές μεταβολές της έντασης του βαρυτικού πεδίου της Γης      | Πυκνότητα  |
| <b>Μαγνητική</b>  | Χωρικές μεταβολές της έντασης του γεωμαγνητικού πεδίου          | Μαγνητική επιδεκτικότητα και παραμένων μαγνητισμός |
| <b>Ηλεκτρική</b>  |   |  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Ειδική Αντίσταση</b></li> </ul>     | Ηλεκτρική αντίσταση της Γης                                     | Ηλεκτρική αγωγιμότητα                              |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Επαγόμενη Πολικότητα</b></li> </ul> | Ένταση πολικότητας / συχνοτικά εξαρτώμενη αντίσταση του εδάφους | Ηλεκτρική χωρητικότητα                             |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Φυσικό Δυναμικό</b></li> </ul>      | Ηλεκτρικά δυναμικά  | Ηλεκτρική αγωγιμότητα                              |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Ηλεκτρομαγνητική</b></li> </ul>     | Απόκριση σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία                        | Ηλεκτρική αγωγιμότητα και επαγωγή                  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Γεωραντάρ</b></li> </ul>            | Χρόνος διάδοσης των ανακλώμενων παλμών του Γεωραντάρ            | Διηλεκτρική σταθερά                                |

## 2.1 Η βαρυτική Δύναμη

Οι γεωφυσικές ερμηνείες από τις έρευνες της βαρύτητας βασίζονται στην αμοιβαία έλξη που ασκείται μεταξύ δύο μαζών, όπως εκφράστηκε από τον Isaac Newton στην εργασία του *Philosophiæ naturalis principia mathematica* (οι μαθηματικές αρχές της Φυσικής).



Εικόνα 13 : Αριστερά Isaac Newton και η χρήση του 2<sup>ου</sup> νόμου και τα προϊόντα της

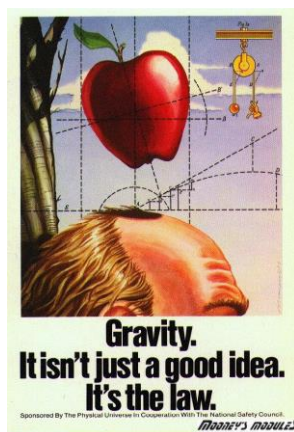
Ο νόμος του Newton για την παγκόσμια έλξη αναφέρει ότι η αμοιβαία έλξη που ασκείται μεταξύ δύο σημειακών μαζών,  $m_1$  και  $m_2$ , είναι αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης μεταξύ τους. Η σταθερά της αναλογίας συνήθως ορίζεται ως  $G$ , παγκόσμια σταθερά της βαρύτητας ( $G = 6.672 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 / (\text{g} \cdot \text{s}^2)$ ). Επομένως, ο νόμος της βαρύτητας (ή ο νόμος της παγκόσμιας έλξης του Νεύτωνα) γράφεται όπως φαίνεται ακολούθως :

$$F = \frac{G * m_1 * m_2}{r^2}$$

, όπου  $F$  είναι η ελκτική δύναμη,

$G$  η Παγκόσμια σταθερά της βαρύτητας και

$r$  η απόσταση μεταξύ των δύο μαζών,  $m_1$  και  $m_2$ .



Εικόνα 14 : Γραφική Απεικόνιση σημασίας της βαρυτικής δύναμης

### 2.1.1 Η επιτάχυνση της βαρύτητας

Όταν κάνουμε μετρήσεις της βαρύτητας της γης, συνήθως δεν μετράμε τη δύναμη της βαρύτητας,  $F$ . Κατά προτίμηση μετράμε την επιτάχυνση της βαρύτητας,  $g$ . Η επιτάχυνση της βαρύτητας είναι ο ρυθμός μεταβολής της ταχύτητας ενός σώματος υπό την επίδραση της βαρυτικής δύναμης. Αυτό σημαίνει ότι, αν ρίξουμε μια πέτρα από έναν γκρεμό, όχι μόνο θα πέσει, αλλά η ταχύτητα της θα αυξάνεται καθώς πέφτει.

Ο Newton όρισε τη σχέση μεταξύ της δύναμης και της επιτάχυνσης με το Δεύτερο Νόμο του Newton σύμφωνα με τον οποίο η δύναμη είναι ανάλογη της επιτάχυνσης. Σταθερά της αναλογία αυτής της μάζας του αντικειμένου.

$$F = m_2 * g$$

Συνδυάζοντας το Δεύτερο Νόμο του Newton με το Νόμο της παγκόσμιας έλξης, προκύπτει ότι η επιτάχυνση της βαρύτητας της μάζας  $m$  ισούται με τη μάζα του ελκυόμενου σώματος,  $m_1$ , δια το τετράγωνο της απόστασης μεταξύ των κέντρων μάζας αυτών,  $r$ .

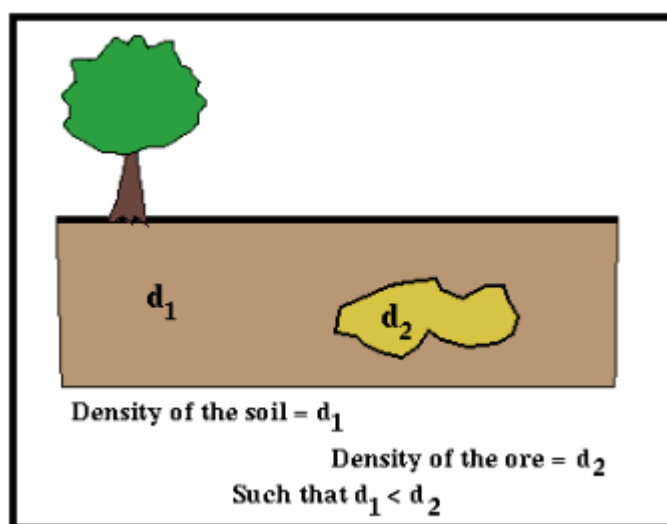
$$g = \frac{G * m_1}{r^2}$$

Στη βαρυτομετρική διασκόπηση ως μονάδα μέτρησης της επιτάχυνσης της βαρύτητας ( $g$ ) χρησιμοποιείται το 1 gal ( $=\text{cm}/\text{sec}^2$ ), που λόγω του μεγάλου μεγέθους του, πιο συχνά χρησιμοποιείται το 1 mgal ( $=10^{-3}\text{cm}/\text{sec}^2$ ) και το 1 gu (gravity unit), όπου  $1\text{gu} = 1\text{mgal}$ . Επομένως η Γήινη επιτάχυνση της βαρύτητας ισούται με 980 Gals περίπου. Η μονάδα Gal πήρε το όνομά της από τον Galileo Galilei.

## 2.1.2 Συσχετισμός της Επιτάχυνσης της Βαρύτητας με τη Γεωλογία

Η πυκνότητα ( density ) ορίζεται ως μάζα ανά μονάδα όγκου. Για παράδειγμα, αν έπρεπε να υπολογίσουμε την πυκνότητα ενός δωματίου γεμάτου με ανθρώπους, η πυκνότητα θα προέκυπτε από τον μέσο αριθμό ανθρώπων ανά μονάδα χώρου (για παράδειγμα, ανά κυβικό μέτρο) και θα είχε ανθρώπους ανά κυβικό μέτρο για μονάδα. Όσο μεγαλύτερος ο αριθμός, τόσο πιο γεμάτος είναι ο χώρος από ανθρώπους. Οι μονάδες που χρησιμοποιούνται κατά κανόνα για να περιγράψουν την πυκνότητα των υλικών είναι γραμμάρια ανά κυβικό εκατοστό ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ), δηλαδή μάζα ανά μονάδα όγκου. Αν συσχετίσουμε την αναλογία του δωματίου μας με τα υλικά, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις σημειακές μάζες όπως χρησιμοποιήσαμε το πλήθος των ανθρώπων.

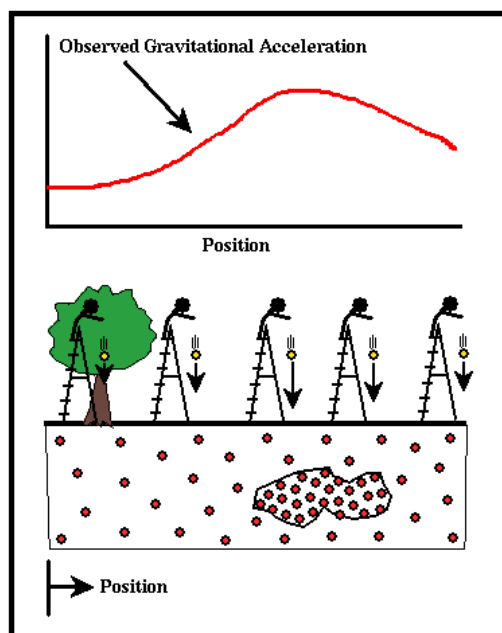
Η πυκνότητα ενός υλικού μπορεί να θεωρηθεί ως ένας αριθμός που καθορίζει την ποσότητα των σημειακών μαζών που απαιτούνται για να παρασταθεί η ύλη ανά μονάδα όγκου του υλικού, όπως ο αριθμός των ανθρώπων ανά κυβικό μέτρο του δωματίου στο προηγούμενο παράδειγμα, που περιέγραφε πόσο συνωστισμένο ήταν ένα συγκεκριμένο δωμάτιο. Επομένως, για να αναπαραστήσουμε ένα υψηλής πυκνότητας κοίτασμα, χρειαζόμαστε περισσότερες σημειακές μάζες ανά μονάδα όγκου από ό,τι θα χρειαζόμασταν για ένα χαμηλότερης πυκνότητας έδαφος (στη συζήτησή μας δεχόμαστε ότι όλες οι σημειακές μάζες έχουν την ίδια μάζα).



Εικόνα 15 : Γραφική απεικόνιση της διαφοράς πυκνότητας εντός στρώματος

Σε αντίθεση με ό,τι μπορεί να πιστεύει κανείς αρχικά, το σχήμα της καμπύλης που περιγράφει τη μεταβολή της επιτάχυνσης της βαρύτητας δεν εξαρτάται από την απόλυτη πυκνότητα των πετρωμάτων. Εξαρτάται μόνο από την διαφορά ή αντίθεση πυκνότητας (density contrast) μεταξύ του κοιτάσματος και του περιβάλλοντος εδάφους. Αυτό σημαίνει ότι η χωρική μεταβολή στην επιτάχυνση της βαρύτητας που παράγεται από το προηγούμενο παράδειγμα θα είναι ακριβώς η ίδια, αν δεχτούμε διαφορετικές πυκνότητες για το κοίτασμα και το περιβάλλον έδαφος, αρκεί η αντίθεση πυκνότητας,  $d_2 - d_1$ , μεταξύ του κοιτάσματος και του περιβάλλοντος πετρώματος να είναι σταθερή. Παράδειγμα μοντέλου

που ικανοποιεί τη συνθήκη αυτή είναι να δεχτούμε την πυκνότητα του εδάφους ίση με μηδέν και την πυκνότητα του κοιτάσματος ίση με  $d_2-d_1$



Εικόνα 16 : Γραφική απεικόνιση της παρατήρησης της βαρυτικής επιτάχυνσης και ο συσχετισμός της με την πυκνότητα που αντικειμένου

Η μόνη διαφορά στην επιτάχυνση της βαρύτητας που παράγεται από τις δύο δομές των παραπάνω σχημάτων είναι μία μετατόπιση της καμπύλης που προκύπτει από τα δύο μοντέλα. Η μετατόπιση είναι τέτοια, ώστε σε μεγάλες αποστάσεις από το κοιτάσμα, η επιτάχυνση της βαρύτητας προσεγγίζει το μηδέν στο μοντέλο που χρησιμοποιεί πυκνότητα εδάφους ίση με μηδέν αντί για την διαφορετική του μηδενός σταθερή τιμή επιτάχυνσης του πραγματικού μοντέλου. Για την αναγνώριση της θέσης του κοιτάσματος, το γεγονός ότι η επιτάχυνση της βαρύτητας προσεγγίζει το μηδέν μακριά από το κοιτάσμα αντί για μια διάφορη του μηδενός τιμή είναι ασήμαντο. Αυτό που είναι σημαντικό είναι το μέγεθος της διαφοράς της επιτάχυνσης της βαρύτητας κοντά και μακριά από το κοιτάσμα καθώς και το σχήμα της χωρικής μεταβολής της επιτάχυνσης. Επομένως, το τελευταίο μοντέλο που χρησιμοποιεί μόνο την αντίθεση πυκνότητας του κοιτάσματος και του περιβάλλοντος εδάφους περιλαμβάνει όλες τις σχετικές πληροφορίες που απαιτούνται για να αναγνωριστούν η θέση και το σχήμα του κοιτάσματος.



### 2.1.3 Μεταβολή στην πυκνότητα των υλικών της Γης

Οι βαρυτικές ανωμαλίες είναι αποτέλεσμα της διαφοράς στην πυκνότητα ενός σώματος και του περιβάλλοντος χώρου. Το πρόσημο της διαφοράς καθορίζει και το πρόσημο της βαρυτικής ανωμαλίας.

Μέχρι στιγμής, φαίνεται απλό να εκτιμήσει κανείς τη μεταβολή της πυκνότητας της γης λόγω τοπικών μεταβολών της γεωλογίας. Υπάρχουν, ωστόσο, αρκετές σημαντικές δυσκολίες. Η πρώτη έχει να κάνει με τις αντιθέσεις πυκνότητας που έχουν μετρηθεί για διάφορα υλικά της γης. Οι πυκνότητες που σχετίζονται με διάφορα υλικά της γης παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4 : Πίνακας Πυκνοτήτων για υλικά

| Υλικό                   | Πυκνότητα (gr/ cm <sup>3</sup> ) |
|-------------------------|----------------------------------|
| Αέρας                   | ≈0                               |
| Νερό                    | 1                                |
| Ιζήματα                 | 1.7-2.3                          |
| Ψαμμίτης                | 2-2.6                            |
| Αργιλικός Σχιστόλιθος   | 2-2.7                            |
| Ασβεστόλιθος            | 2.5-2.8                          |
| Γρανίτης                | 2.5-2.8                          |
| Βασάλτης                | 2.7-3.1                          |
| Μεταμορφωμένα Πετρώματα | 2.6-3.0                          |

Αυτή η μικρή μεταβολή στην πυκνότητα του πετρώματος, επίσης υποδεικνύει ότι η χωρική μεταβολή που παρατηρείται στην επιτάχυνση της βαρύτητας, η οποία οφείλεται στις γεωλογικές δομές, θα είναι αρκετά μικρή και επομένως δύσκολο να ανιχνευθεί. Οι πυκνότητες των πετρωμάτων είναι από τις λιγότερο μεταβαλλόμενες γεωφυσικές παραμέτρους, συνήθως κυμαίνονται μεταξύ 1.6 και 3.2 gr/ cm<sup>3</sup> και κυρίως εξαρτώνται από την ορυκτολογική σύσταση και το πορώδες.

Η πυκνότητα των ιζηματογενών πετρωμάτων καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από το πορώδες και από την πυκνότητα του ρευστού που τυχόν υπάρχει στους πόρους, γιατί οι πυκνότητες των κόκκων των βασικών τους υλικών δεν διαφέρουν σημαντικά. Έτσι, ο χαλαζίας (SiO<sub>2</sub>) και ο ασβεστίτης (CaCO<sub>3</sub>) έχουν κι οι δύο πυκνότητα ίση με 2,65 gr/ cm<sup>3</sup>. Υπάρχουν, όμως, πετρώματα των οποίων η πυκνότητα καθορίζεται αποκλειστικά σχεδόν από τη χημική σύσταση των βασικών υλικών τους, όπως είναι οι αλατούχοι δόμοι (2,2 gr/ cm<sup>3</sup>) που ουσιαστικά δεν έχουν πόρους και συχνά συνυπάρχουν με κοιτάσματα πετρελαίου. Η ιστορία τους και το βάθος όπου βρίσκονται τα ιζηματογενή πετρώματα είναι επίσης παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η πυκνότητα τους. Η πυκνότητα τους αυξάνει με την ηλικία τους και το βάθος ταφής τους. Έχουν γενικά μικρότερη πυκνότητα

από τα πυριγενή και τα μεταμορφωμένα πετρώματα. Γειτονικοί σχηματισμοί ιζηματογενών πετρωμάτων έχουν συνήθως πυκνότητες των οποίων οι διαφορές είναι μικρότερες από τις διαφορές πυκνότητας που προκύπτουν από τον πίνακα.

Τα πυριγενή πετρώματα έχουν, γενικά, μεγαλύτερες πυκνότητες από τα ιζηματογενή πετρώματα αλλά υπάρχει ορισμένος βαθμός επικάλυψης. Έτσι, η λάβα έχει μικρή σχετικά πυκνότητα. Οι πυκνότητες των όξινων πυριγενών πετρωμάτων κυμαίνονται μεταξύ 2,30 και 3,11 gr/ cm<sup>3</sup> με μία μέση τιμή 2,61 gr/ cm<sup>3</sup>, ενώ οι πυκνότητες των βασικών πετρωμάτων κυμαίνονται μεταξύ 2,09 και 3,17 gr/ cm<sup>3</sup> με μέση τιμή ίση με 2,79 gr/ cm<sup>3</sup>.

Η πυκνότητα των μεταμορφωμένων πετρωμάτων αυξάνει με το βαθμό μεταμόρφωσης. Αυτά είναι γενικά πυκνότερα από τα αντίστοιχα ιζηματογενή ή πυριγενή πετρώματα από τα οποία προέρχονται. Το μάρμαρο π.χ. από το γρανίτη. Τα διαστήματα μεταβολής της πυκνότητας των μεταμορφωμένων πετρωμάτων είναι μεγαλύτερα από τα διαστήματα μεταβολής των ιζηματογενών και πυριγενών πετρωμάτων, επειδή τα μεταμορφωμένα πετρώματα βρέθηκαν σε πολυπλοκώτερες συνθήκες κατά τη γεωλογική τους ηλικία. Τα βασικά μεταμορφωμένα πετρώματα έχουν επίσης μεγαλύτερη πυκνότητα από τα όξινα μεταμορφωμένα πετρώματα.

## 2.2 Μέτρηση της βαρύτητας

Είναι προφανές, ότι είναι δύσκολο να κατασκευαστούν όργανα ικανά να μετρήσουν βαρυτικές ανωμαλίες της τάξης του ενός μέρους στα 40 εκατομμύρια. Υπάρχουν, ωστόσο, κάποιοι άλλοι τρόποι με τους οποίους μπορεί να γίνει αυτό, όπως:

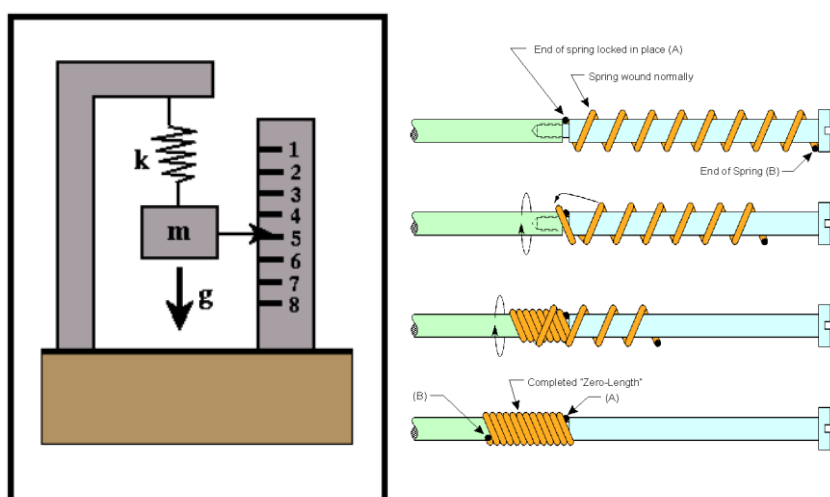
- Μετρήσεις πίπτοντος σώματος. Αυτός είναι ο τύπος μετρήσεων που έχουμε περιγράψει μέχρι στιγμής. Αφήνουμε ένα σώμα να πέσει και υπολογίζουμε απ' ευθείας την επιτάχυνση του σώματος μετρώντας προσεκτικά την απόσταση και το χρόνο πτώσης.
- Μετρήσεις με εκκρεμές. Σε αυτόν τον τύπο μέτρησης, η επιτάχυνση της βαρύτητας υπολογίζεται μετρώντας την περίοδο ταλάντωσης του εκκρεμούς.
- Μετρήσεις μάζας σε ελατήριο. Κρεμώντας μια μάζα από ένα ελατήριο και παρατηρώντας πόσο παραμορφώνεται υπό την επίδραση της βαρύτητας, μπορεί να επιτευχθεί μία εκτίμηση της επιτάχυνσης της βαρύτητας.
- Στρεπτός ζυγός Αυτός αποτελείται από ευθύγραμμη ή τεθλασμένη δοκό, στα άκρα της οποίας βρίσκονται δυο βάρη. Η δοκός κρεμιέται από το μέσο της με κατακόρυφο νήμα και μπορεί να περιστρέφεται στο οριζόντιο επίπεδο υπό την επίδραση της ροπής που οφείλεται στη νευτώνια έλξη που ασκούν τα πετρώματα στις δύο μάζες και της ροπής στρέψης του νήματος. Όταν η δοκός είναι ευθύγραμμη και οριζόντια, οπότε οι μάζες απέχουν ορισμένη οριζόντια μόνο απόσταση, έχουμε το γνωστό ζυγό Gavendich με τον οποίο μετρήθηκε η σταθερά,  $G$ , της παγκόσμιας έλξης, ενώ όταν οι δύο μάζες βρίσκονται στα άκρα τεθλασμένης δοκού που βρίσκεται στο κατακόρυφο επίπεδο ή ευθύγραμμης αλλά κεκλιμένης δοκού, οπότε οι δύο μάζες εκτός από την οριζόντια απόσταση τους απέχουν και ορισμένη κατακόρυφη απόσταση, έχουμε το ζυγό Eötvös που έχει χρησιμοποιηθεί για γεωδαιτικούς και γεωφυσικούς σκοπούς.

Στις βαρυτομετρικές διασκοπήσεις, οι παρατηρήσεις υπαίθρου συνήθως δεν αποδίδουν μετρήσεις απόλυτης τιμής της επιτάχυνσης, αλλά δίνουν μόνο εκτιμήσεις των μεταβολών της. Ο κύριος λόγος για αυτό είναι ότι είναι δύσκολο να ρυθμίσουμε το όργανο καταγραφής αρκετά καλά ώστε να μετράει απόλυτες τιμές βαρύτητας έως και 1 μέρος στα 50 εκατομμύρια. Αυτό, ωστόσο, δεν αποτελεί περιορισμό των ερευνητικών διασκοπήσεων, εφόσον μόνο η σχετική μεταβολή της βαρύτητας χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της μεταβολής της γεωλογικής δομής.

## 2.2.1 Μετρήσεις Με Βαρυτόμετρο

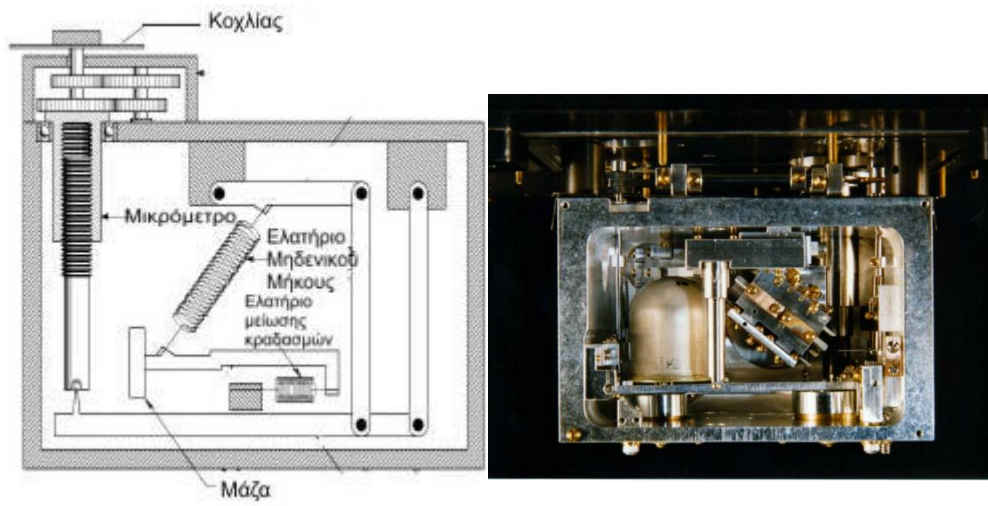
Ο πιο κοινός τύπος βαρυτόμετρου που χρησιμοποιείται σήμερα στις ερευνητικές διασκοπήσεις βασίζεται σε ένα απλό σύστημα μάζας-ελατηρίου. Αν κρεμάσουμε μία μάζα από ένα ελατήριο, η δύναμη της βαρύτητας θα τεντώσει το ελατήριο κατά ένα ποσό ανάλογο της βαρυτικής δύναμης. Μπορούμε να δείξουμε ότι η αναλογία μεταξύ της επιμήκυνσης και της επιτάχυνσης της βαρύτητας είναι το μέγεθος της μάζας που κρέμεται από το ελατήριο δια μία σταθερά,  $k$ , η οποία περιγράφει την σκληρότητα του ελατηρίου. Όσο μεγαλύτερο είναι το  $k$ , τόσο πιο άκαμπτο είναι το ελατήριο και τόσο λιγότερο θα τεντωθεί για μία δεδομένη τιμή επιτάχυνσης.

$$\delta s = \frac{m * \delta g}{k}$$



Εικόνα 17 : Γραφική Απεικόνιση της λειτουργίας του βαρυτόμετρου με ελατήριο

Δεν μπορούμε να καθορίσουμε το  $k$  με αρκετή ακρίβεια ώστε να υπολογίσουμε την απόλυτη τιμή της επιτάχυνσης. Μπορούμε, ωστόσο, να υπολογίσουμε μεταβολές της επιτάχυνσης από μέρος σε μέρος εντός αποδεκτών ορίων ακρίβειας. Για να γίνει αυτό, όμως, χρησιμοποιείται ένα εξειδικευμένο σύστημα μάζας-ελατηρίου, το οποίο τοποθετεί τη μάζα πάνω σε μία ακτίνα και χρησιμοποιεί έναν ειδικό τύπο ελατηρίου, το οποίο ονομάζεται ελατήριο μηδενικού μήκους (zero-length spring). Όργανα αυτού του τύπου παράγονται από διάφορους κατασκευαστές: LaCoste and Romberg, Texas Instruments (Worden Gravity Meter) και Scintrex. Τα σύγχρονα βαρυτόμετρα είναι ικανά να μετρήσουν μεταβολές στη επιτάχυνση της βαρύτητας έως 1 μέρος στα 100 εκατομμύρια. Αυτό μεταφράζεται σε ακρίβεια περίπου 0,01mgal. Τέτοια ακρίβεια λαμβάνεται μόνο κάτω από ιδανικές συνθήκες, όταν οι προτεινόμενες διαδικασίες στην ύπαιθρο ακολουθούνται προσεκτικά.



Εικόνα 18 Απεικόνιση του εσωτερικού του βαρυτομέτρου Lacoste Romberg

## 2.3 Μετρήσεις Βαρύτητας στο ύπαιθρο και παράγοντες που επηρεάζουν την Επιτάχυνση της Βαρύτητας

Οι αποστάσεις των σημείων μέτρησης σε μια βαρυτική διασκόπηση κυμαίνεται μεταξύ μερικών μέτρων, όπως στην περίπτωση έρευνας για ορυκτά μεταλλεύματα ή γεωτεχνικών μελετών, έως εκατοντάδων μέτρων για τεκτονική ή για ευρύτερη μελέτη γεωλογικών χαρακτηριστικών. Η πυκνότητα των σταθμών γίνεται μεγαλύτερη όταν το βαρυτικό πεδίο αλλάζει απότομα, μιας και τέτοιου είδους μεταβολές επηρεάζουν την ερμηνεία των βαρυτικών ανωμαλιών. Επειδή οι μεταβολές αυτές είναι τόσο μικρές, πρέπει να λάβουμε υπόψη μας και άλλους παράγοντες που προκαλούν μεταβολές στην επιτάχυνση της βαρύτητας ίσες ή και μεγαλύτερες από το αναμενόμενο γεωλογικό σήμα. Οι παράγοντες αυτοί υποδιαιρούνται σε δύο κατηγορίες: σε αυτούς που προκαλούν προσωρινές μεταβολές και σε αυτούς που προκαλούν χωρικές μεταβολές στην επιτάχυνση.

1) Προσωρινές μεταβολές – Αυτές είναι μεταβολές που εξαρτώνται από το χρόνο, τις οποίες παρατηρούμε ακόμα και όταν δεν μετακινούμε το βαρυτόμετρο.

- Πορεία του οργάνου (drift) – μεταβολές στην παρατηρούμενη επιτάχυνση που οφείλονται στην απόκριση (response) του βαρυτόμετρου με την πάροδο του χρόνου. Η μεταφορά του από θέση σε θέση και την πάροδο του χρόνου εκτέλεσης των μετρήσεων, το ελατήριο επιμηκύνεται αλλάζοντας ενδείξεις. Επίσης, επειδή όλος ο μηχανισμός του βαρυτόμετρου βρίσκεται μέσα σε λάδι υπό σταθερή θερμοκρασία, αλλαγές στη θερμοκρασία με το χρόνο επηρεάζουν τις τιμές της μέτρησης.
- Παλιρροϊκές επιδράσεις (tidal affects) – μεταβολές στην παρατηρούμενη επιτάχυνση που οφείλονται στη βαρυτική έλξη ηλίου και σελήνης. Τα φαινόμενα αυτά είναι περιοδικά και δίνουν πλάτη της τάξης των 0.3 mgal.

2) Χωρικές μεταβολές – Αυτές είναι μεταβολές εξαρτώμενες από το χώρο, δηλαδή η επιτάχυνση αλλάζει από μέρος σε μέρος, όπως συμβαίνει και στην περίπτωση των γεωλογικών επιδράσεων

- Γεωγραφικό πλάτος (latitude) – μεταβολές στην παρατηρούμενη επιτάχυνση που οφείλονται στο ελλειψοειδές σχήμα και την περιστροφή της γης.
- Υψόμετρο (elevation) – μεταβολές στην παρατηρούμενη επιτάχυνση που οφείλονται στη διαφορά υψομέτρου των σημείων παρατήρησης.
- Επιδράσεις πλάκας (slab effects) – μεταβολές στην παρατηρούμενη επιτάχυνση που οφείλονται στην επιπλέον μάζα που υπόκειται των ανυψωμένων σημείων παρατήρησης.
- Τοπογραφία (topographic effects) – μεταβολές στην παρατηρούμενη επιτάχυνση που σχετίζονται με την τοπογραφία κοντά στο σημείο παρατήρησης.

## 2.3.1 Βαρυτικές Διορθώσεις

### 2.3.1.1 Διόρθωση της Πορείας και των παλιρροιών

Αν και το βαρυτόμετρο έχει κατασκευαστεί με πρότυπα υψηλής ακρίβειας και είναι ικανό να μετρήσει μεταβολές στην επιτάχυνση της βαρύτητας της τάξης του 0,001 mgal, παρόλα αυτά υπάρχουν προβλήματα κατά τη χρήση αυτού του ευαίσθητου οργάνου. Ακόμα κι αν χειριστούμε το όργανο με μεγάλη προσοχή, οι ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του ελατηρίου μπορεί να μεταβληθούν με το χρόνο. Οι μεταβολές αυτές μπορεί να οφείλονται στη μεγάλη διάρκεια της επιμήκυνσης του ελατηρίου ή σε μεταβολές της θερμοκρασίας. Για να περιοριστεί η επίδραση της θερμοκρασίας, να βαρυτόμετρα μονώνονται θερμικά ή κατασκευάζονται από υλικά που δεν επηρεάζονται από τη θερμοκρασία. Παρόλα αυτά, τα βαρυτόμετρα μπορεί να αποκλίνουν έως και 0,1 mgal ανά ημέρα.

Επιπρόσθετα στην πορεία του οργάνου, υπάρχει ένας ακόμα παράγοντας μεταβολής της βαρύτητας. Αντίθετα με την πορεία του οργάνου, η οποία είναι αποτέλεσμα της προσωρινής αλλαγής των χαρακτηριστικών του βαρυτόμετρου, ο παράγοντας αυτός αντιπροσωπεύει πραγματικές μεταβολές στην επιτάχυνση της βαρύτητας. Αυτές είναι μεταβολές που δεν σχετίζονται με την τοπική γεωλογία και αποτελούν, επομένως, ένα είδος θορύβου για τις παρατηρήσεις μας.

Το αποτέλεσμα της πορείας και της παλιρροίας στις παρατηρήσεις της βαρύτητας, είναι επαναλαμβανόμενες μετρήσεις στην ίδια τοποθεσία να αποδίδουν διαφορετικές τιμές για την επιτάχυνση της βαρύτητας. Το κλειδί για να διεξαχθούν αποτελεσματικές διορθώσεις στους παράγοντες αυτούς είναι να παρατηρηθεί ότι και οι δύο μεταβάλουν το βαρυτικό πεδίο το ίδιο αργά. Ως βάση για τη διόρθωση των μετρήσεων που πήραμε με τη βαρυτομετρική σύνδεση, χρησιμοποιούμε την γραμμική παρεμβολή, με την οποία δημιουργούμε μια πρόβλεψη για το πώς πρέπει να φαίνεται μια χρονικά μεταβαλλόμενη συνιστώσα του πεδίου βαρύτητας.

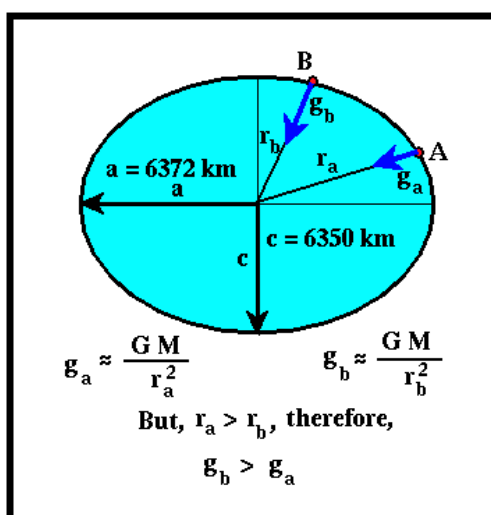
Η Διαδικασία διόρθωσης που εφαρμόζεται, λέγεται Dift Correction και γίνεται ως εξής:

- 1) Επιλέγουμε μια θέση στην περιοχή έρευνας, βάση, όπου επιστρέφουμε σε τακτά χρονικά διαστήματα κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, μετρούμε ξανά και καταγράφουμε
- 2) Σε κάθε σταθμό μέτρησης καις τη βάση μετρούμε με το βαρυτόμετρο την τιμή του g και καταγράφουμε το χρόνο μέτρησης. Επιβάλλεται η χρήση διαφορικού GPS για τον προσδιορισμό του απόλυτου υψομέτρου της κάθε μέτρησης.
- 3) Για να διορθώσουμε τις μετρήσεις λόγω διαφορετικής συμπεριφοράς του βαρυτομέτρου με τον χρόνο, καταγράφουμε τις μετρήσεις στη βάση σε σχέση με τον χρόνο, θεωρώντας την αρχική μέτρηση στη βάση ως τη σωστή και γνωρίζοντας τον χρόνο,t, σε κάθε σταθμό μέτρησης μπορούμε και βρίσκουμε τη διόρθωση dg.

Ένας τρόπος να ελέγξουμε ότι οι διορθώσεις που εφαρμόστηκαν είναι σωστές, είναι να κοιτάξουμε τη μέτρηση της βαρύτητας στο σταθμό βάσης. Μετά την εφαρμογή των διορθώσεων όλες οι καταγραφές στο σταθμό βάσης πρέπει να είναι μηδέν.

### 2.3.1.2 Διόρθωση Γεωγραφικού πλάτους

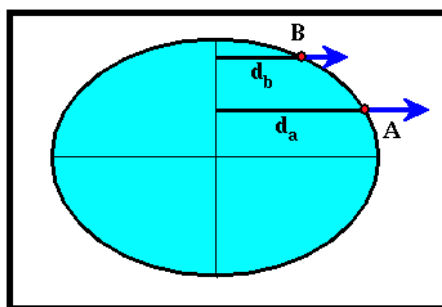
Δύο χαρακτηριστικά της δομής μεγάλης κλίμακας και της δυναμικής της γης επηρεάζουν τις βαρυτομετρικές μετρήσεις: το σχήμα και η περιστροφή της. Για να εξετάσουμε τις επιδράσεις αυτές, έστω ότι τεμαχίζουμε τη γη σε φέτες, από το βόρειο προς το νότιο πόλο. Η δική μας φέτα είναι κάθετη στον ισημερινό και ακολουθεί μια γραμμή σταθερού γεωγραφικού μήκους μεταξύ των πόλων.



Εικόνα 19 : Απεικόνιση του ελλειψοειδούς της γής και της επιρροής που έχει το γεωγραφικό πλάτος στις μετρήσεις

Το ελλειπτικό σχήμα της γης έχει ως αποτέλεσμα να μεταβάλλεται η επιτάχυνση με το γεωγραφικό πλάτος επειδή η απόσταση του βαρυτόμετρου με το κέντρο της γης επίσης μεταβάλλεται με το γεωγραφικό πλάτος. Το μέγεθος την επιτάχυνσης μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα του τετραγώνου της απόστασης από το κέντρο της γης μέχρι το βαρυτόμετρο. Επομένως είναι αναμενόμενο η επιτάχυνση να είναι μικρότερη στον ισημερινό από ό,τι στους πόλους. Επιπρόσθετα στο σχήμα, το γεγονός ότι η γη περιστρέφεται επίσης προκαλεί μεταβολή στην επιτάχυνση με το γεωγραφικό πλάτος. Η επίδραση αυτή σχετίζεται με το γεγονός ότι το βαρυτόμετρο περιστρέφεται μαζί με τη γη καθώς κάνουμε τη βαρυτομετρική καταγραφή.





Εικόνα 20 : Απεικόνιση του ελλειψοειδούς της γης και της μεταβολής από σημείο A σε B

Δεχόμενοι ότι η γη είναι ελλειπτική με κατάλληλες διαστάσεις, περιστρέφεται με κατάλληλο ρυθμό και δεν περιέχει πλευρικές μεταβολές στη γεωλογική δομή (δηλαδή δεν περιέχει ενδιαφέρουσα δομή), μπορούμε να κατασκευάσουμε μία μαθηματική διατύπωση για την επιτάχυνση της βαρύτητας που να εξαρτάται μόνο από το γεωγραφικό πλάτος της παρατήρησης. Αφαιρώντας την επιτάχυνση που προκύπτει με τη μαθηματική διατύπωση από την επιτάχυνση που μετρήσαμε, μπορούμε να απομακρύνουμε αποτελεσματικά την επίδραση του σχήματος και της περιστροφής.

Η μαθηματική σχέση που χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη των συνιστωσών της επιτάχυνσης της βαρύτητας, που παράγονται από το σχήμα και την περιστροφή της γης, ονομάζεται Γεωδαιτική Σχέση Αναφοράς του 1967) . Η προβλεπόμενη βαρύτητα καλείται κανονική βαρύτητα (normal gravity) (International Association of Geodesy, IAGE 1967).

$$g_n = 978.03185 (1.0 + 0.005278895 \sin^2 \phi - 0.000023462 \sin^4 \phi) \text{ (cm/s}^2 \text{)}$$

**$g_n$  = Normal Gravity: Gravitational acceleration expected for a rotating ellipsoidal earth without any geologic complications and no surface features**

**$\phi$  = Latitude**

Εικόνα 21 : Μαθηματική Απεικόνιση του τύπου για τη διόρθωση γεωγραφικού πλάτους

Σε γεωγραφικό πλάτος 45°, η επιτάχυνση της βαρύτητας μεταβάλλεται περίπου κατά 0,81 mgals ανά χιλιόμετρο. Για να πετύχουμε ακρίβεια της τάξης του 0,01 mgals, πρέπει να γνωρίζουμε τη θέση του σταθμού στη γραμμή βορράς-νότος με ακρίβεια 12 μέτρων.

### 2.3.1.3 Διόρθωση Ελεύθερου Αέρα : Υπολογισμός μεταβολών λόγω υψόμετρου

Για να ερμηνεύσουμε τις μεταβολές που παρατηρούνται στην επιτάχυνση της βαρύτητας, οι οποίες συνδέονται με υψομετρικές μεταβολές, εισάγουμε μια νέα διόρθωση στα δεδομένα μας, την Διόρθωση Ελεύθερου Αέρα (Free-Air Elevation) . Κατά την εφαρμογή της, ανάγουμε μαθηματικά τις τιμές βαρύτητας που μετρήσαμε στις αντίστοιχες τιμές βαρύτητας που θα προέκυπταν αν η μετρήσεις είχαν γίνει στο ίδιο υψόμετρο το οποίο είναι συνήθως αλλά όχι πάντοτε το επίπεδο της επιφάνειας της θάλασσας. Με τον τρόπο αυτό απομονώνουμε ακόμα περισσότερο τη γεωλογική συνιστώσα του βαρυτικού πεδίου.

Θεωρώντας, όπως και νωρίτερα αναφέραμε, ότι η μάζα της γης είναι συγκεντρωμένη στο κέντρο της η ένταση της βαρύτητας  $g_0$  στην επιφάνεια της θάλασσας, υποθέτοντας την γη ως σφαίρα, δίδεται από την σχέση:

$$g_0 = G * \left(\frac{M}{R^2}\right)$$

όπου  $M$  είναι η μάζα της γης και  $R$  η ακτίνα της και  $G$  η παγκόσμια σταθερά.

Η τιμή της έντασης της βαρύτητας  $g_h$  σε υψόμετρο  $h$  πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, δηλαδή σε απόσταση  $(R+h)$  από το κέντρο της γης δίνεται από την σχέση:

$$g_h = G * \left(\frac{M}{(R+h)^2}\right)$$

η ως άνω σχέση με πολυωνυμική ανάπτυξη κατά Taylor γράφεται:

$$g_h = G * \left(\frac{M}{R^2}\right) * \left(1 - \left(\frac{2h}{R}\right)\right)$$

και αγνοώντας τους μεγαλύτερους της πρώτης τάξης όρους η σχέση με μια πρώτης τάξης προσέγγιση γράφεται:

$$g_h = g_0 * \left(1 - \left(\frac{2h}{R}\right)\right)$$

Ή

$$g_h - g_0 = \Delta g_h = \left(\frac{2g_0 h}{R}\right)$$

Στον υπολογισμό αυτής της έκφρασης δεν λήφθηκε υπόψη το γεγονός ότι το σχήμα της γης είναι ελλειψοειδές και όχι σφαιρικό, αλλά το αποτέλεσμα αυτής της απλοποίησης είναι αμελητέο. Αντικαθιστώντας στην τελευταία σχέση τις μέσες τιμές της κανονικής έντασης του πεδίου βαρύτητας  $g_0$  στην επιφάνεια της θάλασσας καθώς και της ακτίνας της γης  $R$  προκύπτει η σχέση:

$$\Delta g_h = -0.3086 * h$$

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι σε μία πρώτης τάξης προσέγγιση, η παρατηρούμενη επιτάχυνση στην επιφάνεια της γης μεταβάλλεται κατά  $-0,3086 \text{ mgal}$  ανά μέτρο υψομετρικής διαφοράς. Το πρόσημο μείον (-) υποδεικνύει ότι καθώς το υψόμετρο αυξάνει, η βαρυτική επιτάχυνση μειώνεται. Το μέγεθος του νούμερου δείχνει ότι αν δύο βαρυτομετρικές καταγραφές πραγματοποιηθούν στην ίδια θέση, αλλά η μία βρίσκεται ένα μέτρο ψηλότερα από την άλλη, η μέτρηση στο ψηλότερο σημείο θα είναι  $0,3086 \text{ mgal}$  μικρότερη από την μέτρηση στο χαμηλότερο. Αν τη συγκρίνουμε με το μέγεθος της βαρυτικής ανωμαλίας που υπολογίστηκε από το μοντέλο του κοιτάσματος,  $0,025 \text{ mgal}$ , η επίδραση του υψομέτρου είναι τεράστια.

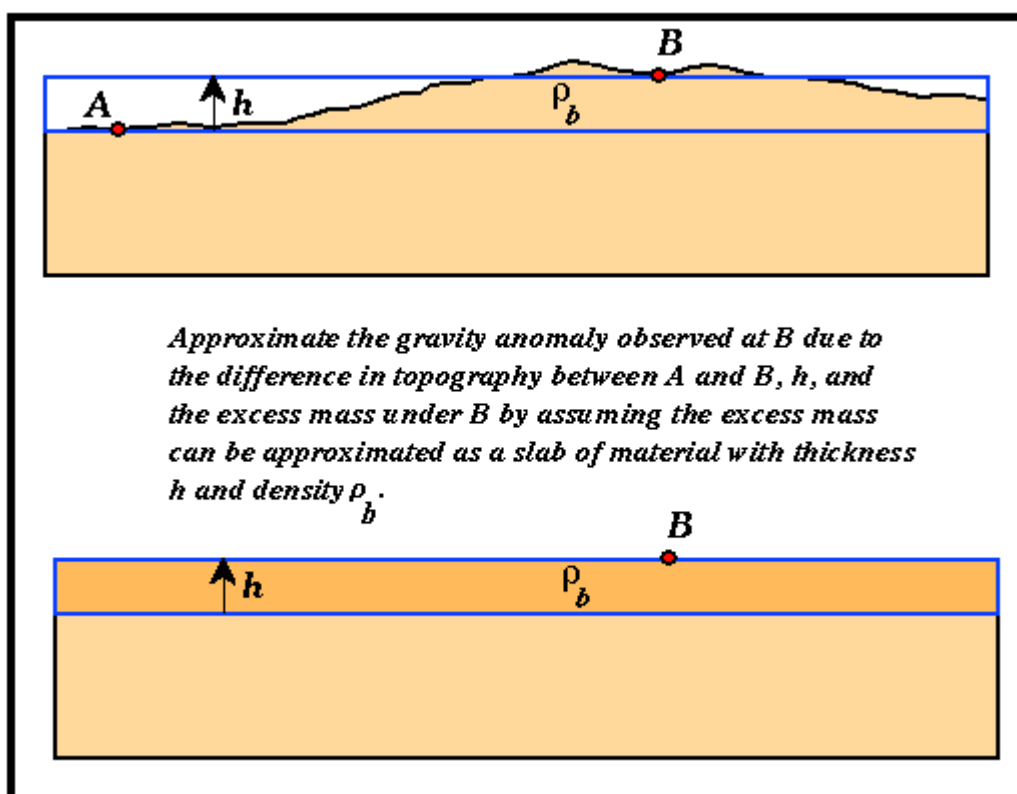
Για να εφαρμόσουμε τη διόρθωση υψομέτρου στη μέτρηση της βαρύτητας, πρέπει να γνωρίζουμε το υψόμετρο σε όλους τους σταθμούς βαρύτητας. Τότε μπορούμε να μετατρέψουμε τις μετρήσεις σε τιμές κοινού υψομέτρου, προσθέτοντας  $-0,3086$  φορές το υψόμετρο του σταθμού (σε μέτρα) σε κάθε μέτρηση. Το κοινό υψόμετρο συχνά αναφέρεται ως επίπεδο αναφοράς ( datum elevation) και συνήθως επιλέγεται να είναι το επίπεδο της θάλασσας.

Επειδή το μέγεθος των διορθώσεων είναι μεγάλο, απαιτείται να γνωρίζουμε το υψόμετρο του σταθμού με μεγάλη ακρίβεια. Αν ζητούμε ακρίβεια  $0,01 \text{ mgal}$ , πρέπει να γνωρίζουμε τα σχετικά υψόμετρα των σταθμών με ακρίβεια  $3 \text{ cm}$ . Για να πετύχουμε τόσο μεγάλη ακρίβεια, πρέπει πρώτα να πραγματοποιηθεί μια πολύ προσεκτική τοπογραφική μελέτη για τη μέτρηση των σχετικών υψομέτρων.

### 2.3.1.4 Διορθώσεις για την περίσσεια μάζας: Διόρθωση Bouguer

Αν και υπάρχουν προφανή μειονεκτήματα στην απλή προσέγγιση της πλάκας για τις διαφορές υψομέτρου και μάζας κάτω από τους βαρυτομετρικούς σταθμούς, υπάρχουν δύο σαφή πλεονεκτήματα συγκριτικά με τα πιο πολύπλοκα (ρεαλιστικά) μοντέλα.

- 1) Επειδή το μοντέλο είναι τόσο απλό, είναι αρκετά εύκολο να κατασκευάσουμε προβλέψεις για την βαρύτητα που παράγει, και να κάνουμε μια αρχική, πρώτης τάξης διόρθωση υψομέτρου και περίσσειας μάζας.
- 2) Επειδή η επιτάχυνση της βαρύτητας μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα του τετραγώνου της απόστασης από την πηγή της ανωμαλίας και επειδή μετρούμε μόνο την κατακόρυφη συνιστώσα της βαρύτητας, η μεγαλύτερη συνεισφορά στις βαρυτικές ανωμαλίες που μετράει το βαρυτόμετρο γίνεται ακριβώς ένα μέτρο κάτω από το όργανο και αρκετά κοντά του.



Εικόνα 22 απεικόνιση της επίδρασης του αναγλύφου της περιοχής μέτρησης και η αναγωγή σε επίπεδο (Bouguer slab)

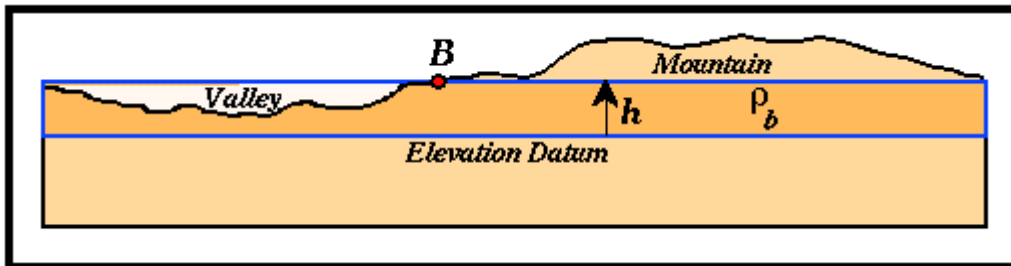
Οι διορθώσεις που βασίζονται στην απλή προσέγγιση της πλάκας αναφέρονται ως διορθώσεις Bouguer (Bouguer Slab Correction). Μπορεί να δειχθεί ότι η κατακόρυφη βαρυτική επιτάχυνση που σχετίζεται με μια επίπεδη πλάκα μπορεί να γραφτεί απλά ως  $-0,04193 \rho h$ . Όταν η διόρθωση δίνεται σε mgals,  $\rho$  είναι η πυκνότητα της πλάκας σε  $\text{g/cm}^3$ , και  $h$  είναι η υψομετρική διαφορά σε μέτρα μεταξύ των σημείων παρατήρησης. Το  $h$  είναι θετικό για σημεία πάνω από το επίπεδο αναφοράς και αρνητικό για τα σημεία κάτω από αυτό.

Παρατηρούμε ότι το πρόσημο της διόρθωσης Bouguer έχει συγκεκριμένο νόημα. Αν το σημείο παρατήρησης βρίσκεται σε μεγαλύτερο υψόμετρο από το επίπεδο αναφοράς, υπάρχει περίσσεια μάζας κάτω από το σημείο παρατήρησης, που δεν θα υπήρχε εκεί αν μπορούσαμε να κάνουμε όλες μας τις μετρήσεις στο υψόμετρο του επιπέδου αναφοράς. Επομένως, η καταγραφή της βαρύτητας είναι μεγαλύτερη εξαιτίας της περίσσειας μάζας, και θα πρέπει, επομένως, να εισάγουμε έναν παράγοντα για να μεταφέρουμε το σημείο παρατήρησης στο επίπεδο αναφοράς.

Παρατηρούμε ότι το πρόσημο στη διόρθωση αυτή είναι αντίθετο του πρόσημου που χρησιμοποιήθηκε στην υψομετρική διόρθωση. Παρατηρούμε, επίσης, ότι για να εφαρμόσουμε τη διόρθωση Bouguer, πρέπει να γνωρίζουμε τα υψόμετρα όλων των σημείων παρατήρησης και την πυκνότητα της πλάκας που χρησιμοποιείται για την προσέγγιση της περίσσειας μάζας. Για την επιλογή της μάζας, χρησιμοποιούμε τη μέση πυκνότητα των πετρωμάτων της περιοχής. Για πυκνότητα  $2,67 \text{ g/cm}^3$ , η διόρθωση Bouguer είναι περίπου  $0,11 \text{ mgals/m}$ .

### 2.3.1.5 Τοπογραφικές Διορθώσεις

Όπως και με τις διορθώσεις Bouguer, όταν υπολογίζουμε τοπογραφικές διορθώσεις, πρέπει να δεχτούμε μια μέση πυκνότητα για τα περιβάλλοντα πετρώματα. Συνήθως, χρησιμοποιείται η ίδια πυκνότητα για τις διορθώσεις Bouguer και εδάφους. Μέχρι στιγμής, φαίνεται η διόρθωση εδάφους να γίνεται το ίδιο εύκολα με τη διόρθωση Bouguer. Δυστυχώς, κάτι τέτοιο δεν ισχύει.



Εικόνα 23 : Απεικόνιση της επίδρασης της τοπογραφίας στις βαρυτικές μετρήσεις

Για τον υπολογισμό της βαρυτικής έλξης που παράγεται από την τοπογραφία, πρέπει να υπολογίσουμε την μάζα του περιβάλλοντος εδάφους και την απόστασή της από το σημείο παρατήρησης. Τα χαρακτηριστικά αυτού του υπολογισμού θα διαφέρουν για κάθε σημείο παρατήρησης της διασκόπησης επειδή οι αποστάσεις των διαφόρων τοπογραφικών χαρακτηριστικών διαφέρουν καθώς η θέση του σταθμού παρατήρησης αλλάζει. Είναι προφανές ότι επιπροσθέτως στην εκτίμηση της πυκνότητας των περιβαλλόντων πετρωμάτων, για να εφαρμόσουμε τη διόρθωση πρέπει να έχουμε γνώση των θέσεων των βαρυτομετρικών σταθμών και του σχήματος της τοπογραφίας της περιβάλλουσας περιοχής.

Η εκτίμηση της διανομής της τοπογραφίας γύρω από το σταθμό παρατήρησης δεν είναι ασήμαντη εργασία. Πρέπει κάποιος να αποτυπώσει τη θέση κάθε σταθμού βαρύτητας στον τοπογραφικό χάρτη, να μετρήσει την μεταβολή στο τοπογραφικό ανάγλυφο (relief) γύρω από το σταθμό σε διάφορες αποστάσεις, να υπολογίσει την επιτάχυνση της βαρύτητας λόγω τοπογραφίας σε διάφορες αποστάσεις και να εφαρμόσει τη διόρθωση που προκύπτει στην παρατηρούμενη βαρυτική επιτάχυνση. Μια συστηματική μεθοδολογία για την εκτέλεση αυτής της εργασίας διατυπώθηκε από τον Hammer το 1939 (Hammer, Sigmund, 1939, Terrain corrections for gravimeter stations, Geophysics, 4, 184-194). Η χρήση της μεθοδολογίας του Hammer με το χέρι είναι βαρετή και χρονοβόρα. Αν τα υψόμετρα γύρω από την περιοχή έρευνας είναι διαθέσιμα σε ψηφιακή μορφή, η εφαρμογή της μεθόδου του Hammer μπορεί να γίνει με υπολογιστή, οπότε μειώνεται σημαντικά ο χρόνος που απαιτείται για τον υπολογισμό και την εφαρμογή των διορθώσεων.

Παρόλο που οι βάσεις ψηφιακών τοπογραφικών δεδομένων είναι ευρέως διαθέσιμες, συνήθως η δειγματοληψία δεν είναι αρκετά λεπτομερής για τον υπολογισμό των Τοπογραφικών Διορθώσεων της κοντινής ζώνης σε περιοχές έντονου τοπογραφικού ανάγλυφου ή όπου απαιτούνται βαρυτομετρικές παρατηρήσεις υψηλής ανάλυσης

(λιγότερο από 0,5 mgals). Οι διορθώσεις της κοντινής ζώνης είναι εδαφικές διορθώσεις που παράγονται από την πολύ κοντινή στο σταθμό τοπογραφία (λιγότερο από 558 ft). Αν η τοπογραφία κοντά στο σταθμό είναι ακανόνιστης φύσης, μία ακριβής εδαφική διόρθωση πιθανόν να απαιτεί μία δαπανηρή και χρονοβόρα τοπογραφική έρευνα. Για παράδειγμα, υψομετρικές μεταβολές της τάξης του ενός μέτρου που βρίσκονται λιγότερο από 55 ft μακριά από μπορούν να παράγουν Εδαφικές Διορθώσεις έως και 0,04 mgals.

### 2.3.2 Περίληψη των τύπων βαρύτητας

Οι τύποι βαρύτητας και οι βαρυτικές διορθώσεις είναι αναγκαίες στην αξιολόγηση και στην ερμηνεία των βαρυτικών μετρήσεων, παρακάτω παρατίθενται όλες οι διορθώσεις που εφαρμόζονται στις βαρυτικές παρατηρήσεις που συλλέγονται κατά τις ερευνητικές γεωφυσικές διασκοπήσεις, θα ορίσουμε τη σειρά με την οποία πρέπει να πραγματοποιούνται και θα αναφέρουμε τα ονόματα με τα οποία συναντώνται οι διορθωμένες τιμές βαρύτητας.

- Παρατηρούμενη Βαρύτητα ( $g_{obs}$  – Observed Gravity): η τιμή της βαρύτητας που παρατηρείται μετά την εφαρμογή των διορθώσεων της πορείας του οργάνου και της παλίρροιας.
- Διόρθωση Γεωγραφικού Πλάτους ( $g_n$  – Latitude Correction): διόρθωση που αφαιρείται από την  $g_{obs}$ , η οποία οφείλεται στο ελλειπτικό σχήμα της γης και την περιστροφή της. Η τιμή της βαρύτητας που θα παρατηρούσαμε αν η γή ήταν ένα τέλειο ελλειψοειδές εκ περιστροφής (χωρίς γεωλογικές ή τοπογραφικές περιπλοκές) ονομάζεται κανονική βαρύτητα.
- Διόρθωση Ελεύθερου Αέρα ( $g_{fa}$  – Free Air Correction): η διόρθωση αυτή ερμηνεύει τις βαρυτικές μεταβολές λόγω διαφορών του υψόμετρου στις θέσεις παρατήρησης. Η τιμή της διόρθωσης του ελεύθερου αέρα δίνεται από τον τύπο:

$$g_{fa} = g_{obs} - g_n + 0,3086h \text{ (mgal)}$$

,όπου  $h$  είναι το υψόμετρο του στάθμου πάνω από το επίπεδο αναφοράς που έχει επιλεγεί για την έρευνα (συνήθως είναι το επίπεδο της θάλασσας)

- Διόρθωση Bouguer ( $g_b$  – Bouguer Slab Correction): η διόρθωση Bouguer είναι μία πρώτης τάξης διόρθωση για την περίσσεια μάζας που υπόκειται των σταθμών παρατήρησης που βρίσκονται ψηλότερα από το επίπεδο αναφοράς. Αντίστροφα, υπολογίζει το έλλειμμα μάζας των σταθμών παρατήρησης που βρίσκονται κάτω από το επίπεδο αναφοράς. Ο τύπος που δίνει την ανωμαλία Bouguer είναι:

$$g_b = g_{obs} - g_n + 0,3086h - 0,04193\rho h \text{ (mgal)}$$

,όπου  $\rho$  είναι η μέση πυκνότητα των πετρωμάτων που υπόκεινται της περιοχής έρευνας.

- Τοπογραφική Διόρθωση ( $g_t$  – Terrain Corrected Bouguer Gravity): η διόρθωση εδάφους λαμβάνει υπόψη τις μεταβολές στην επιτάχυνση που οφείλονται σε μεταβολές της τοπογραφίας κοντά σε κάθε σημείο παρατήρησης. Η διόρθωση εδάφους είναι θετική ανεξάρτητα αν η τοπική τοπογραφία αποτελείται από ένα βουνό ή μία κοιλάδα. Η διόρθωση του εδάφους δίνεται από τον τύπο:

$$g_t = g_{obs} - g_n + 0,3086h - 0,04193\rho h + TC \text{ (mgal)}$$

όπου  $TC$  είναι η τιμή της υπολογισμένης τοπογραφικής διόρθωσης.

Αν δεχτούμε ότι οι διορθώσεις αυτές έχουν ερμηνεύσει σωστά τις μεταβολές της επιτάχυνσης που θέλαμε να διορθώσουμε, τότε κάθε απομένονσα μεταβολή στην

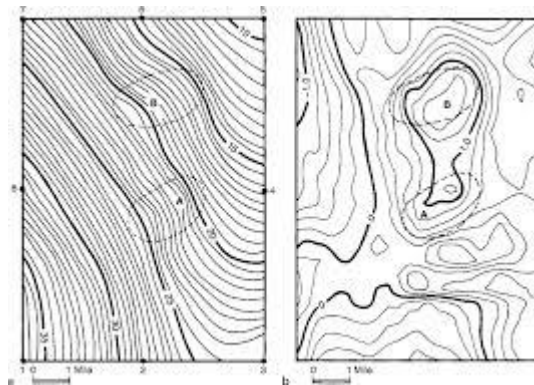


επιτάχυνση της βαρύτητας που σχετίζεται με τη διόρθωση εδάφους μπορεί να θεωρηθεί ότι προκαλείται από τη γεωλογική δομή.

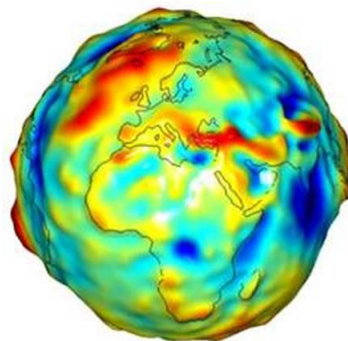
### 2.3.3 Τοπικές και Μεγάλης Κλίμακας βαρυτικές ανωμαλίες

Εκτός από τους τύπους βαρυτικών ανωμαλιών που προσδιορίζονται κατά τη φάση επεξεργασίας που εκτελείται για να απομονωθούν οι γεωλογικές συνεισφορές, υπάρχουν επίσης και ειδικοί τύποι βαρυτικών ανωμαλιών που προσδιορίζονται από τη φύση των γεωλογικών συνεισφορών. Για να ορίσουμε τις διάφορες γεωλογικές συνεισφορές, έχουμε ήδη εξετάσει το μοντέλο όπου προσπαθούμε να προσδιορίσουμε την έκταση και τη θέση ενός θαμμένου σφαιρικού κοιτάσματος, και της βαρυτικής ανωμαλίας που περιμένουμε να παρουσιάζει αυτό.

Παρατηρούμε ότι η μεγάλης κλίμακας βαρυτική ανωμαλία είναι μία συνάρτηση θέσης που μεταβάλλεται αργά κατά μήκος της γραμμής του προφίλ. Αυτό το στοιχείο είναι χαρακτηριστικό για όλες τις μεγάλης κλίμακας πηγές. Αυτό σημαίνει ότι, πηγές βαρυτικής ανωμαλίας που είναι μεγάλες σε έκταση (λέγοντας μεγάλες εννοούμε μεγάλες ως προς το μήκος του προφίλ) πάντα παράγουν βαρυτικές ανωμαλίες που μεταβάλλονται αργά με τη θέση κατά μήκος του προφίλ. Οι τοπικές βαρυτικές ανωμαλίες ορίζονται ως ανωμαλίες που αλλάζουν τιμή γρήγορα κατά μήκος του προφίλ. Οι πηγές των ανωμαλιών αυτών πρέπει να είναι μικρές σε έκταση και κοντά στην επιφάνεια.



Εικόνα 24 Απεικόνιση Regional(αριστερά)- Residual(δεξιά)



Εικόνα 25 : Κατανομή βαρυτικών πεδίων (Bonvalot,2012)

### 2.3.3.1 Διαχωρισμός της τοπικής από τη μεγάλης κλίμακας βαρυτική ανωμαλία

Επειδή η μεγάλης κλίμακας ανωμαλία μεταβάλλεται αργά κατά μήκος του προφίλ και η τοπική μεταβάλλεται πιο γρήγορα, οποιαδήποτε μέθοδος που μπορεί να αναγνωρίσει και να απομονώσει την αργά μεταβαλλόμενη αναλογία του βαρυτικού πεδίου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το διαχωρισμό της μεγάλης κλίμακας από την τοπική βαρυτική ανωμαλία. Οι μέθοδοι γενικά εντάσσονται σε τρεις κατηγορίες.

- 1) Απ' ευθείας υπολογισμός – ο υπολογισμός της μεγάλης κλίμακας ανωμαλίας γίνεται από ένα ανεξάρτητο σύνολο δεδομένων. Για παράδειγμα, αν η βαρυτομετρική μελέτη πραγματοποιείται εντός της ηπειρωτικής περιοχής των Η.Π.Α. , βαρυτομετρικές παρατηρήσεις που έχουν συλλεχθεί με σχετικά μεγάλες αποστάσεις μεταξύ των σταθμών είναι διαθέσιμες από το National Geophysical Data Center. Χρησιμοποιώντας αυτές τις μετρήσεις, μπορούμε να καθορίσουμε πώς το μεγάλου μήκους κύματος βαρυτικό πεδίο μεταβάλλεται γύρω από την περιοχή έρευνας και έτσι να αφαιρέσουμε τη συνεισφορά του από τα δεδομένα μας.
- 2) Γραφικός υπολογισμός – οι υπολογισμοί αυτοί βασίζονται στην αποτύπωση των παρατηρήσεων (ή σχεδίαση των μετρήσεων), στη σχεδίαση των εκτιμήσεων του ερευνητή που ερμηνεύει την μεγάλης κλίμακας βαρυτική ανωμαλία, και στην αφαίρεση της μεγάλης κλίμακας ανωμαλίας που υπολογίστηκε από τις μη επεξεργασμένες παρατηρήσεις, έτσι ώστε να προκύψει η τοπική ανωμαλία.
- 3) Μαθηματικός υπολογισμός – οι υπολογισμοί αυτοί αντιπροσωπεύονται από μία μεγάλη ποικιλία μεθόδων για τον καθορισμό της μεγάλης κλίμακας συνεισφοράς από τα δεδομένα που έχουμε συλλέξει, μέσω μαθηματικών διαδικασιών.

Παραδείγματα για το πώς μπορεί να γίνει αυτό περιλαμβάνουν:

- Μετακινούμενοι μέσοι όροι (moving averages) – με την τεχνική αυτή,
- υπολογισμός της μεγάλης κλίμακας ανωμαλίας σε κάποιο σημείο του προφίλ καθορίζεται από τον υπολογισμό του μέσου όρου των τιμών βαρύτητας που καταγράφεται σε αρκετά κοντινά σημεία. Με τον τρόπο αυτό εντείνεται η μεγάλου μήκους κύματος συνεισφορά στην καταγραφή του βαρυτικού πεδίου ενώ καταστέλλονται οι μικρότερου μήκους κύματος συνεισφορές.
- Προσαρμογή συναρτήσεων (Function Fitting) – με την τεχνική αυτή, ομαλά μεταβαλλόμενες μαθηματικές συναρτήσεις προσαρμόζονται στα δεδομένα και χρησιμοποιούνται ως υπολογισμοί της μεγάλης κλίμακας ανωμαλίας. Η πιο απλή, πιθανή συνάρτηση που μπορεί να προσαρμοστεί στα δεδομένα είναι η ευθεία.
- Φιλτράρισμα και προς τα πάνω συνεχεία (Filtering and Upward Continuation) – πρόκειται για εξειδικευμένες μαθηματικές τεχνικές για τον καθορισμό της μεγάλου μήκους κύματος αναλογίας του συνόλου δεδομένων.

## 3 Εφαρμογή βαρυτικών Γεωφυσικών Διασκοπήσεων για το χαρακτηρισμό τεκτονικής στη Διεθνή Βιβλιογραφία

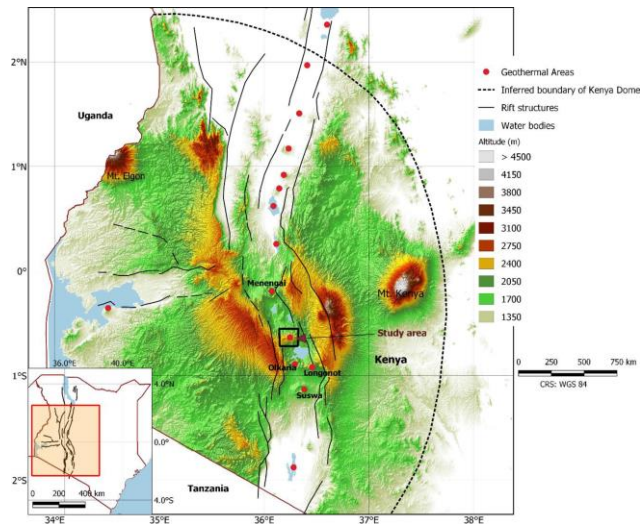
### 3.1 Ανάλυση δεδομένων βαρύτητας για τον καθορισμό τεκτονικών χαρακτηριστικών που ελέγχουν το Γεωθερμικό σύστημα στο Eburru, στην Κένυα

*(Justus Maithya, Yasuhiro Fujimitsu , Jun Nishijima )*

Στην παρούσα ερευνητική διαδικασία της διεθνούς βιβλιογραφίας, κρίθηκε αναγκαίο η δημιουργία μοντέλου της περιοχής του Eburru πραγματοποιήθηκε σε μια προσπάθεια να οριοθετήσει τον έλεγχο των γεωλογικών δομών και το γεωθερμικό σύστημα και να εκτιμήσει την έκταση του γεωθερμικού ταμειυτήρα. Χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 375 σημεία δεδομένων και Πυκνότητα για τη διόρθωση Bouguer  $2,27 \text{ g/cm}^3$  για τη δημιουργία ενός πλήρους χάρτη ανωμαλίας Bouguer της περιοχής. Τα δεδομένα βαρύτητας χωρίζονται σε regional και residuals για την ενίσχυση των τεκτονικών χαρακτηριστικών από τα ιζηματογενή και βραχώδους υποβάθρου στην περιοχή μελέτης. Τελικός σκοπός της έρευνας είναι ο χαρακτηρισμός του γεωθερμικού πεδίου, προς μεταγενέστερη εκμετάλλευση.

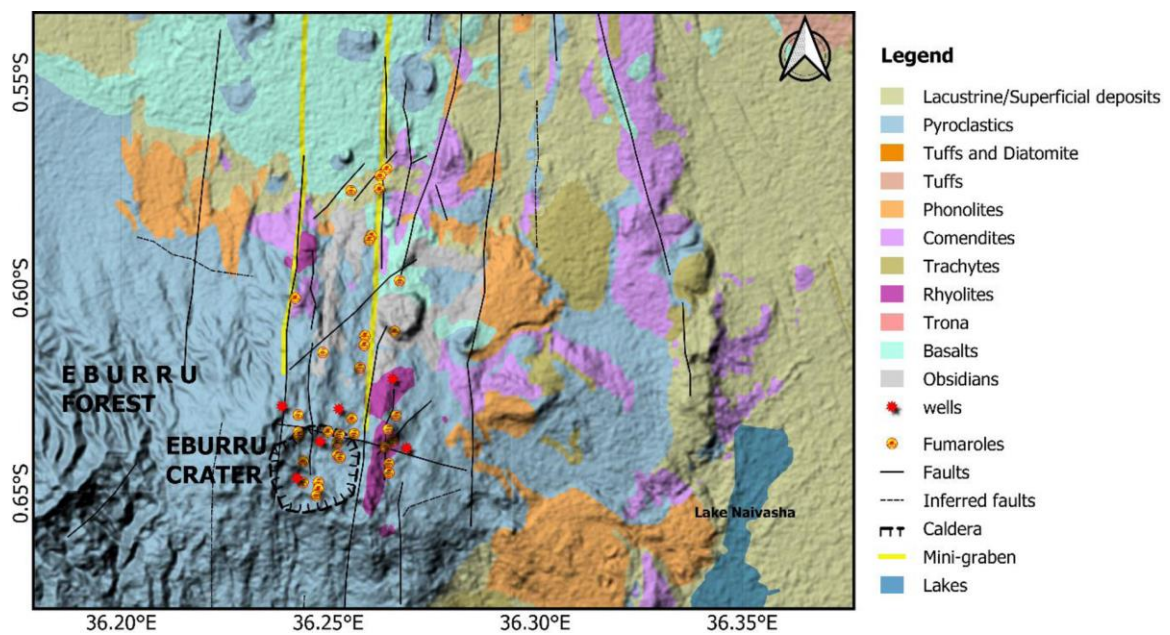
#### 3.1.1 Η περιοχή Έρευνας

Το γεωθερμικό σύμπλεγμα του Eburru βρίσκεται στο κεντρικό τμήμα της Κένυα πλάκας και ανήκει στο σύμπλεγμα των ηφαιστειών που σχηματίζουν το "θόλο" της Κένυας, όπου φιλοξενούνται και διάφορα γεωθερμικά πεδία. Ο θόλος της Κένυας αποτελείται από τριών δομών καλντέρας, τις Menengai, Longonot και Suswa, και δύο αδρανοποιημένα ηφαιστειακά συγκροτήματα, τα Olkaria και Eburru. Το Eburru σχηματίστηκε από ροές παντελεριτικής και τραχειτικής λάβας (Leat, 1984; Omenda, 1997; Williams, 1972). Το Eburru διαθέτει πλήθος από διάφορες γεωθερμικές εκδηλώσεις, που περιλαμβάνουν φουμαρόλες και θερμές πηγές. Στο δυτικό τμήμα της περιοχής, υπάρχει πυκνόφυτο δάσος που εκτείνεται στον κρατήρα.



Εικόνα 26 Χάρτης της μελετηθείσας περιοχής μαζί με υψομετρικό γεωλογικό χάρτη του Κενυάτικου “θόλου”(Maithya et al.,2020)

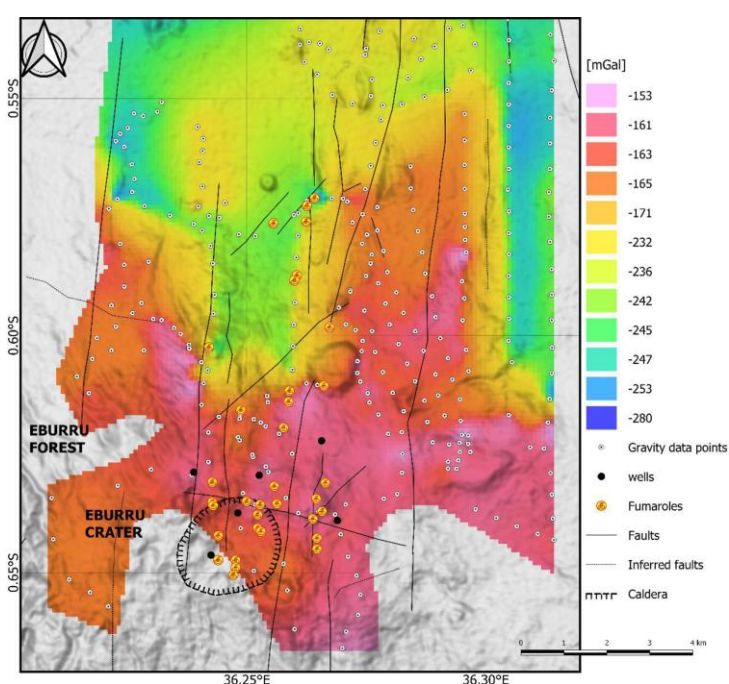
Διεξήχθησαν διερευνητικές μελέτες στο γεωθερμικό πεδίο Eburru το 1980, η οποία οδήγησε στη γεώτρηση έξι φρεατίων εξερεύνησης μεταξύ του 1989 και 1991 (Simiyu, 2010). Η μέθοδος βαρύτητας διασκόπησης εφαρμόστηκε για να συμπεράνουμε τη γεωμετρία της γεωθερμικής δεξαμενής και οριοθετεί τη γεωλογική αλληλουχία των δομών που ελέγχουν το σύστημα. Η μέθοδος της βαρύτητας χρησιμοποιείται συνήθως για την περιγραφή τεκτονικών παραθύρων και χαρακτηρισμό, λόγω της πυκνότητας, του βραχώδους υποβάθρου και του ταμιευτήρα.



Εικόνα 27 : Γεωλογικός χάρτης του Eburru (Thomson, 1963)

### 3.1.2 Επεξεργασία δεδομένων και Αποτελέσματα

Οι μετρήσεις διεξήχθησαν χρησιμοποιώντας ένα Scintrex CG-5, το οποίο έχει ακρίβεια επαναληψιμότητας 0,005 mGal και ανάλυση ανάγνωσης 0,001 mGal (Scintrex, 2012). Τα σημεία δεδομένων τοποθετήθηκαν με τη χρήση του διαφορικού GPS (D-GPS), του οποίου η κάθετη αβεβαιότητα ήταν χαμηλότερη από 0,03 μ. Ο κλίμακος αντιστροφής 3-D Gravity που χρησιμοποιήθηκε για όλη τη διαδικασία έχει μέγεθος 250m × 250m × 50m, με το στοιχείο ύψους να αυξάνεται για κάθε διαδοχικά βαθύτερο στρώμα από έναν παράγοντα από 1.08. Ο έγχρωμος χάρτης αντιπροσωπεύει την πλήρη ανωμαλία Bouguer (CBA) με τιμές που κυμαίνονται από -177 mGal έως -159 mGal.

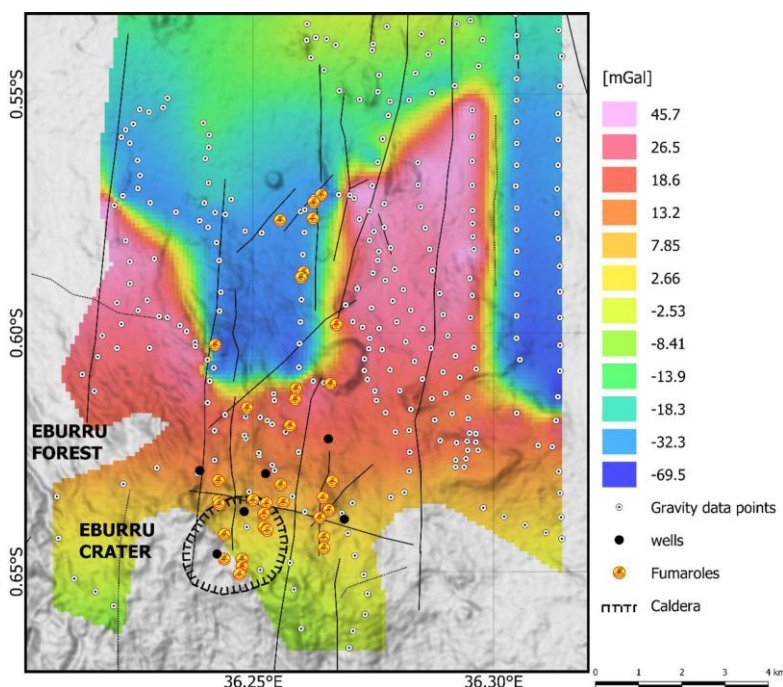


Εικόνα 28 Χάρτης Bouguer (Maithya et al.,2020)

Σε αυτή τη μελέτη, εφαρμόστηκαν μαθηματικές μέθοδοι στα μετρημένα δεδομένα για να επιτευχθεί καλύτερη προσέγγιση της πυκνότητας Bouguer. Αυτές οι μέθοδοι περιλαμβάνουν τη μέθοδο F-H (Parasnis, 1952, 1986) και προς τα πάνω διόρθωση (Upward continuation) και έδωσε πυκνότητες Bouguer  $2,29 \text{ g/cm}^3$  και  $2,25 \text{ g/cm}^3$  αντίστοιχα. Για τις διορθώσεις Bouguer και εδάφους, υποτιθέμενη πυκνότητα  $2,270 \text{ g/cm}^3$  χρησιμοποιήθηκε και θεωρήθηκε από τον μέσο όρο των δύο μεθόδων αρκετή για να παράγει μια ομαλή ανωμαλία. Η ανωμαλία Bouguer περιέχει συνεισφορές από μια περιφερειακή τάση προκύπτει από την παρουσία βαθιών και μεγάλων κατασκευών.

Σε αυτό το άρθρο, χρησιμοποιήθηκε η ελάχιστη καμπυλότητα ως τη μέθοδο πλέγματος. Η μέθοδος παρεμβάλλει τα δεδομένα που πρέπει να είναι πλέγματα με επιφάνεια που έχει συνεχή δεύτερη παράγωγο και ελάχιστη συνολική τετραγωνική καμπυλότητα. Η επιφάνεια

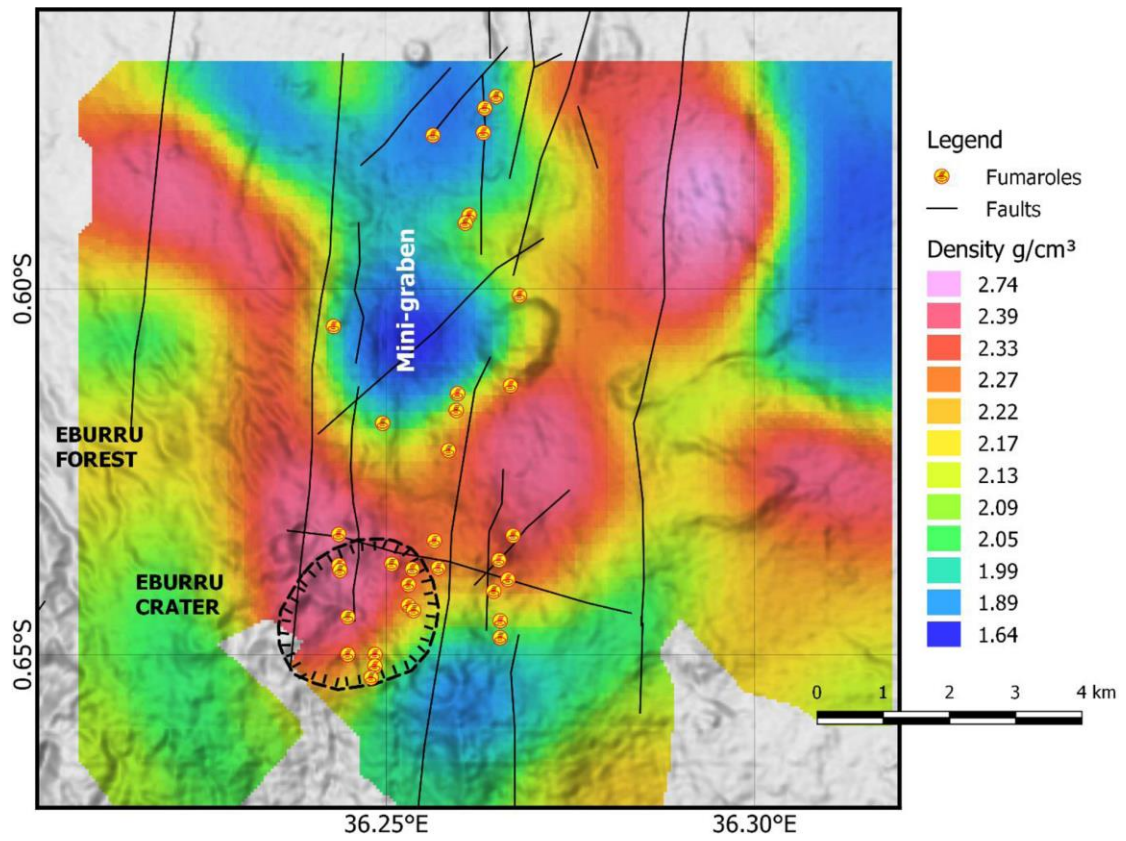
ελάχιστης καμπυλότητας έχει αναλογία κάμψης ελαστικής πλάκας και προσεγγίζει το σχήμα που υιοθετήθηκε από μια λεπτή πλάκα που κάμπτεται για να περάσει μέσω των σημείων δεδομένων. Οι επιφάνειες ελάχιστης καμπυλότητας μπορεί να έχουν μεγάλες ταλαντώσεις και εξωτερικά σημεία καμπής, που τα καθιστούν κατάλληλα για εφαρμογή. Αυτά τα εξωτερικά σημεία καμπής μπορούν να εξαλειφθούν με προσθέτοντας τάση στην εξίσωση κάμψης ελαστικής πλάκας (Smith and Wessel, 1990).



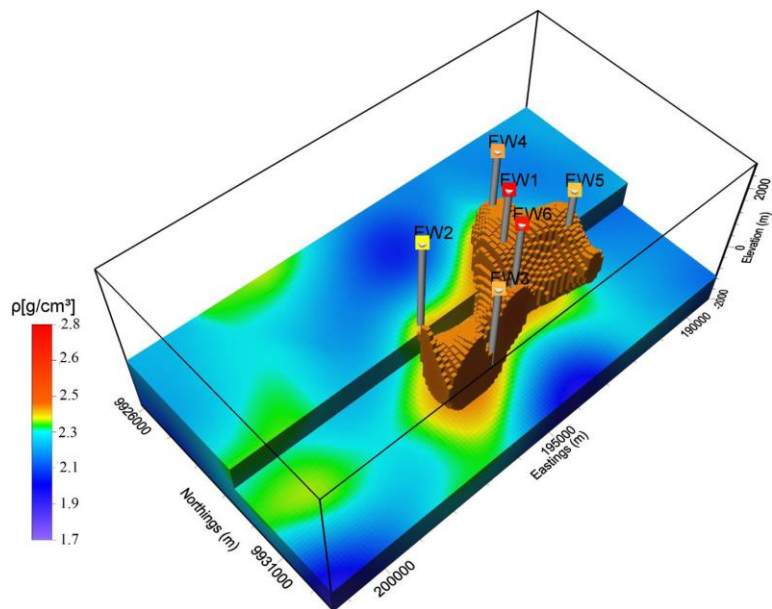
Εικόνα 29: Χάρτης Residual (Maithya et al.,2020)

Η αντιστροφή των βαρυτικών δεδομένων στοχεύει στον προσδιορισμό της κατανομής πυκνότητας που θα εξηγούσε τις μετρήσεις ή το σχήμα και τις διαστάσεις του παραλλαγή πυκνότητας. Ωστόσο, η αντιστροφή των δεδομένων βαρύτητας πεδίου είναι μία από τα πιο διαφορούμενες διαδικασίες στη διερεύνηση γεωφυσικών μελετών (Ολντενμπουργκ, 1974). Λόγω θορύβου δεδομένων και ανομοιογένειας γεωλογικών σώματα, η αντιστροφή των δεδομένων βαρύτητας είναι συνήθως γεμάτη ακόμη και με δυσκολίες με λογικά ακριβείς μετρήσεις βαρύτητας και μείωση δεδομένων.

Σε αυτή τη μελέτη, χρησιμοποιήθηκαν λιθολογικά και λοιπά γεωλογικά στοιχεία. Τα πηγάδια βρίσκονται εντός της περιοχής καλντέρας με ελάχιστο βάθος 2221 m και μέγιστο βάθος 2791 μ.



Εικόνα 30 Οριζόντια τομή του μοντέλου στο ύψος της θάλασσας (Maithya et al.,2020)



Εικόνα 31 Ολοκληρωμένο Γεωλογικό μοντέλο πυκνότητας (Maithya et al.,2020)



### 3.1.3 Συμπεράσματα

Το χωρικό μοντέλο της βαρύτητας (3-D) αποκάλυψε μια πυκνή δομή, η οποία μπορεί να είναι η υδροθερμική δεξαμενή με όγκο περίπου  $3,0 \text{ km}^3$  και μέση τιμή πυκνότητας μπλοκ  $2,45 \text{ g/cm}^3$ . Η πυκνή δομή επικαλύπτει ένα υψηλό πυκνό σώμα, το οποίο πιθανώς παρέχει θερμότητα στη γεωθερμική δεξαμενή. Υπάρχει μια στενή σχέση μεταξύ η εμφάνιση της πυκνής ανώμαλης δομής και η θέση του ρήγματος που εντοπίζεται. Αυτές οι δομές βλαβών προσφέρουν ένα μονοπάτι ώστε τα υγρά να ανεβαίνουν στην επιφάνεια, δείχνοντας ζώνες υδροθερμικής ανύψωσης. Τα αποτελέσματα πριν απεσταλμένα δείχνουν ότι η μέθοδος αναστροφής βαρύτητας είναι πολύτιμη μέθοδος που βελτιώνει την πρόβλεψη της θέσης των συσχετιζόμενων σωμάτων υψηλής πυκνότητας με ζώνες αλλαγής.

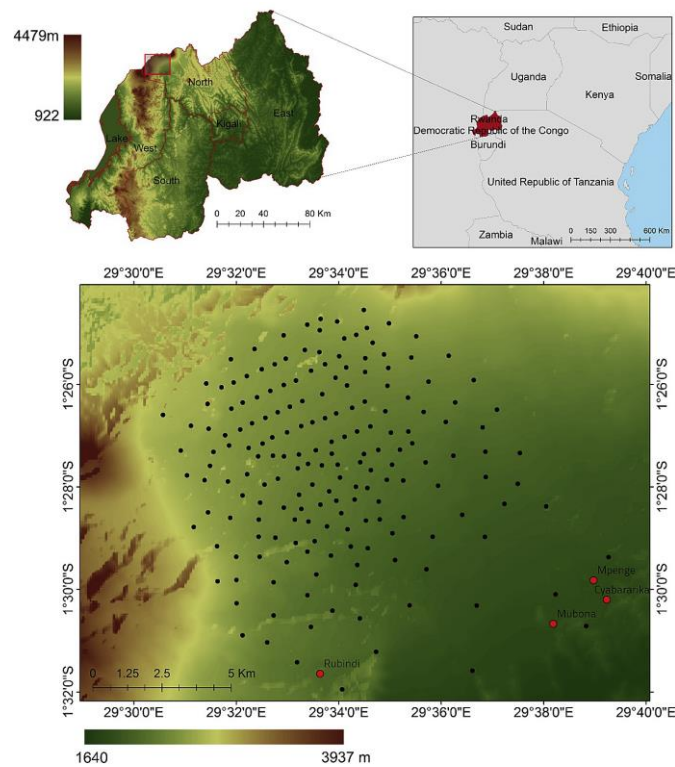
## 3.2 Γεωφυσική έρευνα με τη χρήση βαρυτικών δεδομένων στο γεωθερμικό πεδίο Kinigi, βορειοδυτική Ρουάντα

*(Jean d'Amour Uwiduhaye, Hideki Mizunaga, Hakim Saibi)*

Στην παρούσα ερευνητική διαδικασία της διεθνούς βιβλιογραφίας, πραγματοποιήθηκε έρευνα βαρυτικών διασκοπήσεων στο γεωθερμικό πεδίο Kinigi, στη βορειοδυτική Ρουάντα χρησιμοποιώντας 184 βαρυτικούς σταθμούς κατά τον Αύγουστο και τον Σεπτέμβριο του 2015. Ο στόχος της έρευνας βαρύτητας ήταν να κατανοηθεί η τεκτονική και η σχέση της με τις παρατηρούμενες επιφανειακές εκδηλώσεις στην περιοχή μελέτης. Η πλήρης ανωμαλία Bouguer δημιουργήθηκε με πυκνότητα μείωσης  $2,4 \text{ g/cm}^3$ . Παρατηρήθηκαν ανωμαλίες που κυμαίνονται από -52 έως και -35 mGals στην περιοχή μελέτης με σχετικά υψηλά επίπεδα στην ανατολική και βορειοδυτική ζώνη, ενώ χαμηλές ανωμαλίες παρατηρούνται στη νοτιοδυτική πλευρά του στην περιοχή μελέτης. Τα ολοκληρωμένα αποτελέσματα της βαρύτητας και οι μέθοδοι ερμηνείας οριοθέτησαν μια κυρίαρχη γεωλογική δομή στα ΒΔ-ΝΑ, που συμφωνεί με την περιφερειακή γεωλογική τάση. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης βοήθησαν σε μελλοντική γεωθερμική εξερεύνηση και ανάπτυξη στο γεωθερμικό πεδίο Kinigi.

### 3.2.1 Η περιοχή Έρευνας

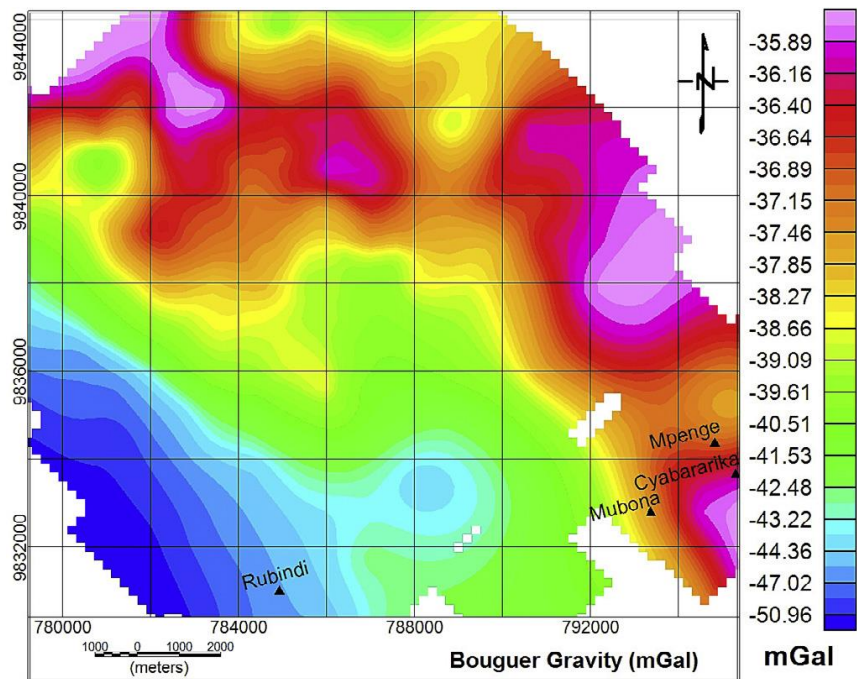
Το γεωθερμικό πεδίο Kinigi βρίσκεται στην πλαγιά του Bisoke, Sabyinyo και ανάμεσα από τα ηφαίστεια Gahinga και Muhabura στο βόρειο τμήμα της Ρουάντα. Η τοπογραφία του Kinigi κυριαρχείται από ένα ψηλό οροπέδιο, κοιλάδες, ηφαιστειακοί κώνοι και ηφαίστεια με υψόμετρο που κυμαίνονται από 2000 έως πάνω από 4000 μέτρα πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας (Jolie et al., 2009). Το Kinigi περιβάλλεται από ηφαίστεια και το εθνικό πάρκο, το οποίο περιλαμβάνει το Mt. Karisimbi (4507 μ.), στα δυτικά, το Όρος Visoke (3711 μ.), στα βορειοδυτικά, το Όρος Sabyinyo (3674m) στα βόρεια, το όρος Gahinga (3474 μ.) στα βορειοανατολικά (Jolie et al., 2009). Υπάρχουν τέσσερις επιφανειακές εκδηλώσεις που παρατηρούνται στο γεωθερμικό πεδίο Kinigi, οι οποίες είναι Ποταμός Mrenge, Cyabararika, Mubona και Rubindi.



Εικόνα 32 : Χάρτες της περιοχής και χάρτης βαρυτικών σταθμών στην περιοχή ενδιαφέροντος(Uwiduhaye, 2017)

### 3.2.2 Επεξεργασία δεδομένων και Αποτελέσματα

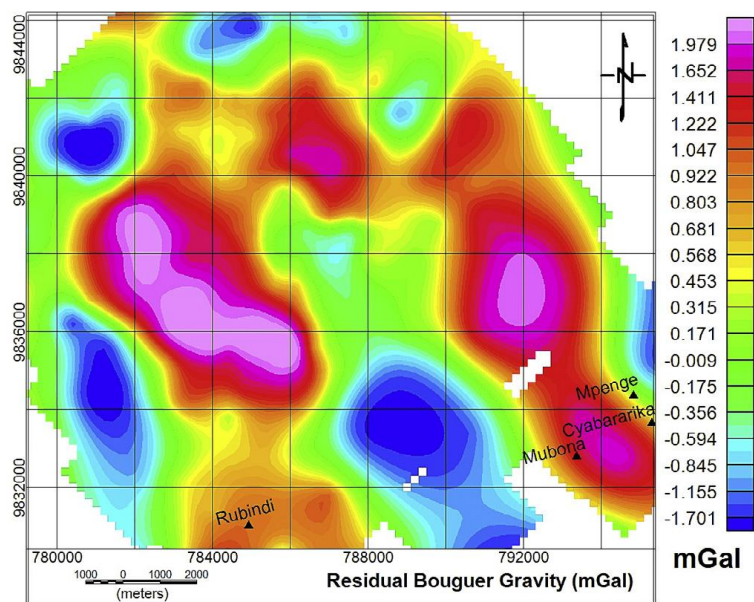
Στις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε το βαρυτόμετρο Scintrex CG-5 με ανάλυση ανάγνωσης 1 m Gal και χρησιμοποιήθηκαν συστήματα GPS. Τα δεδομένα διορθώθηκαν για τον υπολογισμό της ανωμαλίας Bouguer, εφαρμόζοντας τυπικές διορθώσεις στα μετρούμενα σε κάθε σταθμό. Είναι επιτακτική η ανάγκη της εκτίμησης της πυκνότητας των υπογείων στρωμάτων για να μπορέσουν οι διορθώσεις Bouguer και εδάφους και η ερμηνεία των παρατηρούμενων δεδομένων βαρύτητας. Η πλήρης ανωμαλία Bouguer προκαλείται από την ετερογένεια της κατανομής πυκνότητας κάτω από την επιφάνεια. Μόλις τα δεδομένα βαρύτητας είναι διορθωμένα στην πλήρη ανωμαλία Bouguer, το επόμενο βήμα συνήθως περιλαμβάνει τα φίλτρα που θα μπορούσαν να εφαρμοστούν σε αυτό πριν από την ερμηνεία. Ως εκ τούτου, η ερμηνεία των δεδομένων βαρύτητας βασίζεται στην πλήρη ανωμαλία Bouguer.



Εικόνα 33 Βαρυτικός Χάρτης Bouguer (Uwiduhaye, 2017)

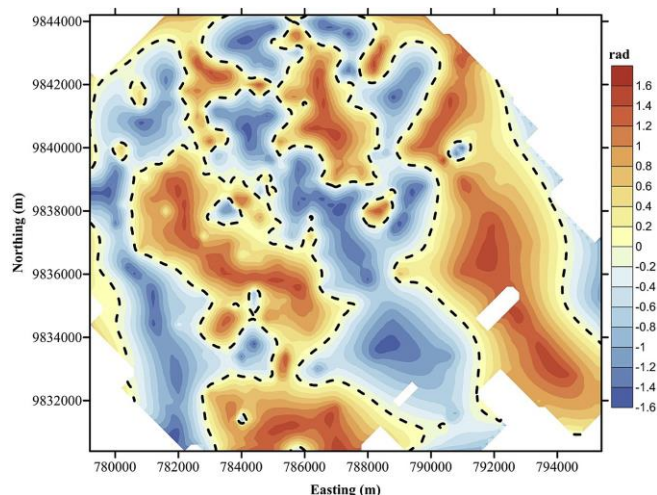
Εφαρμόζεται καναβοποίηση των δεδομένων και με το επόμενο βήμα που ακολουθεί είναι ο διαχωρισμός της ανωμαλίας Bouguer με τις περιφερειακά και τις τοπικού μήκους ανωμαλίες. Ο διαχωρισμός regional- residual χρειάζεται να επιλυθεί πριν προχωρήσει η ανάλυση και ερμηνεία δεδομένων. Η μέθοδος Parasnis, γνωστή ως μέθοδος F-H, εφαρμόστηκε και προσδιορίστηκε και η πυκνότητα που χρειάζεται να γίνει απομείωση  $2,4 \text{ g/cm}^3$  και υπολογίστηκε ως η προκύπτουσα κλίση της γραμμής.

Για το χάρτη Residual και η επιλογή του έγινε με την παράγωγο της τρίτης τάξης και αυτό οφειλόταν στην προηγούμενη γνώση σχετικά με τη γεωλογική γνώση στην περιοχή μελέτης. Ο χάρτης υπολειπόμενης βαρύτητας χαρακτηρίζεται από θετικές και αρνητικές τιμές.



Εικόνα 34 Χάρτης Residual 3<sup>ης</sup> τάξης (Uwiduhaye, 2017)

Στην παρούσα ερευνητική διαδικασία αξιοποιήθηκε η γωνία κλίσης του χάρτη και χρησιμοποιείται τεχνική για τον εντοπισμό ορίων πυκνότητας εντοπίζοντας τιμές πάνω από τα άκρα της πηγής και, ως εκ τούτου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως περίγραμμα των άκρων.



Εικόνα 35 Tilt angle χάρτης από τις τιμές Residual με εμφανή τα όρια των δομών (Uwiduhaye, 2017)

### 3.2.3 Συμπεράσματα

Από την ανάλυση βαρύτητας τοποθετήθηκαν τα ρήγματα προσανατολισμένα κατά προσέγγιση στην τάση ΒΔ-ΝΑ. Ο χάρτης γωνίας κλίσης τόνισε σαφή όρια με παρόμοιο προσανατολισμό. Η τοποθεσία των ρηγμάτων είναι το όριο μεταξύ υψηλών και χαμηλών τιμών, δηλαδή μηδέν. Αυτό το αποτέλεσμα δείχνει ότι οι δομές Mrenge, Cyabararika και Mubona ελέγχονται από αυτά τα ρήγματα. Ο ενσωματωμένος χάρτης οριζόντιας κλίσης, γωνίας κλίσης δείχνουν μια συμφωνία μεταξύ των ρηγμάτων. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για τους γεωεπιστήμονες για να περιγράψουν την οριζόντια θέση της γεωλογικής θέσης των ορίων των ρηγμάτων, συμπεριλαμβανομένων επαφών και άλλων γεωλογικών δομών στην περιοχή μελέτης.

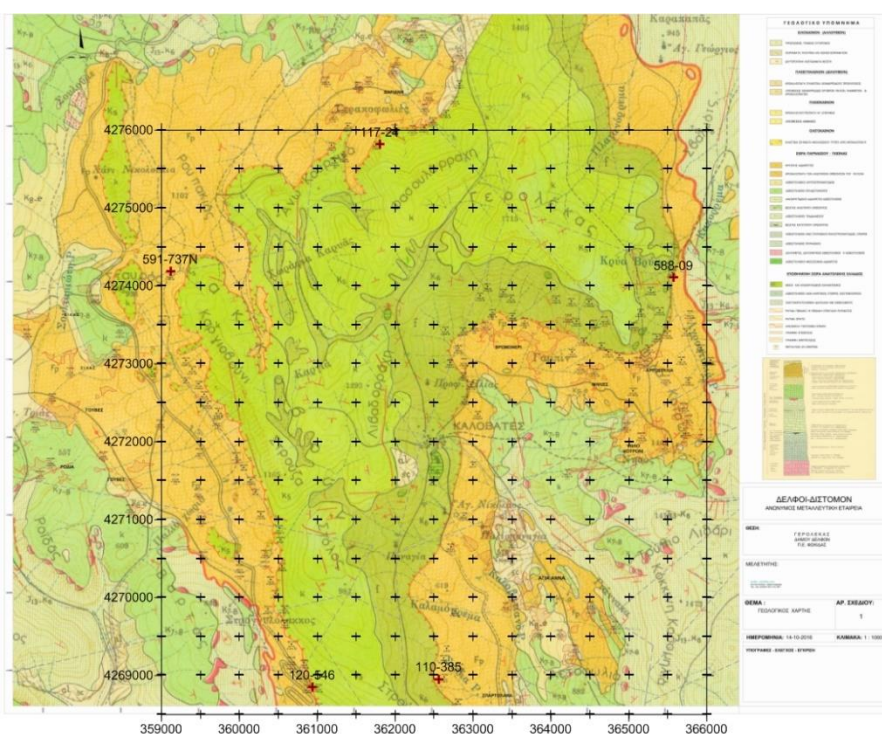
## 4 Μεταλλευτική Έρευνα

Ο χαρακτηρισμός της τεκτονικής του Γερολέκα πέρα από την γεωλογική μελέτη έγινε μέσω γεωτρήσεων. Είναι γνωστό ότι κατά τη διενέργεια της μεταλλευτικής έρευνας, η πυκνότητα των γεωτρήσεων και επομένως το μέγεθος του καννάβου εξαρτώνται από πλήθος παραγόντων σημαντικότεροι των οποίων είναι οι παρακάτω:

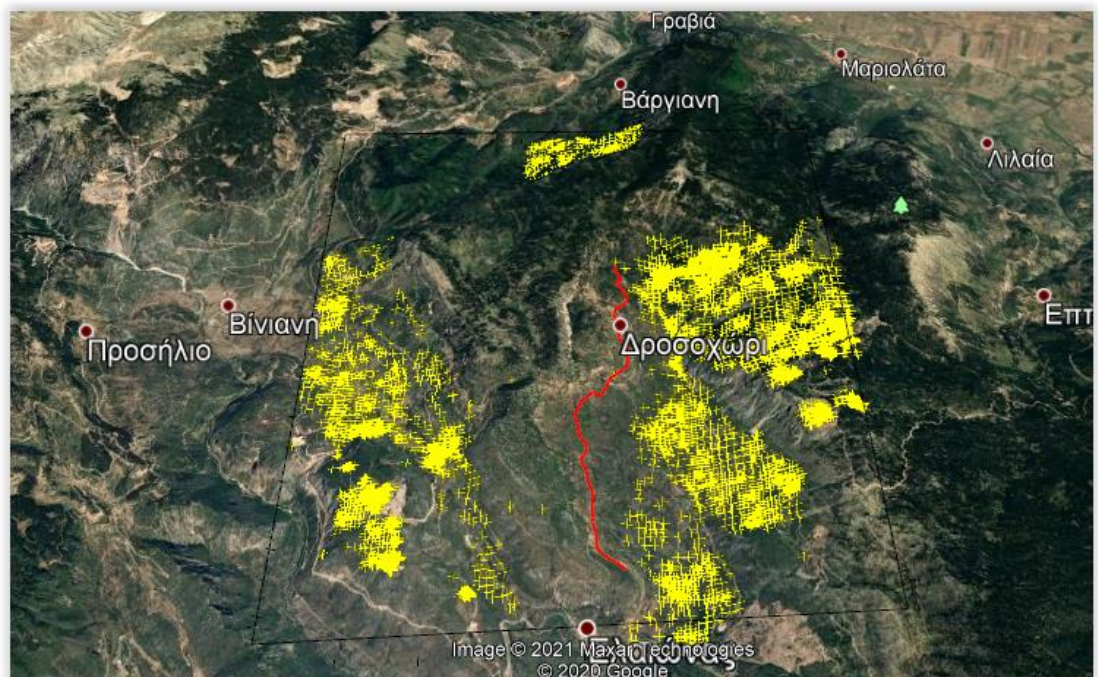
- Η μεταλλευτική αξία του κοιτάσματος
- Ο τρόπος μεταλλογένεσης του κοιτάσματος
- Τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υπερκείμενων του κοιτάσματος πετρωμάτων
- Το ανάγλυφο της περιοχής

Οι δειγματοληπτικές γεωτρήσεις έγιναν με τη βοήθεια δύο περιστροφικών δειγματοληπτικών γεωτρυπάνων τύπου Atlas Corco Boyles επί ελκύθρου με μήκος στελεχών 3m. Ο κάνναβος των γεωτρήσεων δεν ήταν ιδιαίτερα ικανοποιητικός και συμμετρικός, λόγω του έντονου αναγλύφου και του πυκνού ελατοδάσους της περιοχής. Τέλος, να σημειωθεί ότι οι καρταρίες του συγκεκριμένου γεωτρυπάνου ήταν του μεγέθους των 75mm.

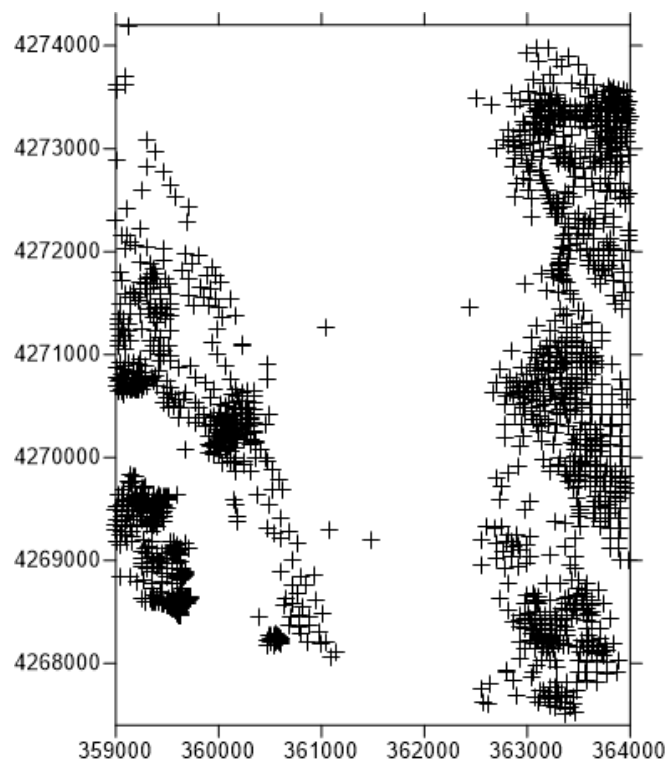
Κρίθηκε σκόπιμο για λόγους οικονομίας, αλλά και ουσίας να παρουσιαστούν τα κυριότερα στοιχεία μόνο των θετικών γεωτρήσεων και όχι και των αρνητικών. Το απόλυτο υψόμετρο, το πάχος των στρωμάτων και το μήκος των γεωτρήσεων είναι εκφρασμένα σε m.



Εικόνα 36 : γεωλογικός χάρτης με κάνναβο γεωτρήσεων (500x500)



Εικόνα 37 οι γεωτρήσεις στην περιοχή ενδιαφέροντος( GoogleEarth)



Εικόνα 38: οι γεωτρήσεις στην περιοχή ενδιαφέροντος (surfer, goldenSoftware)

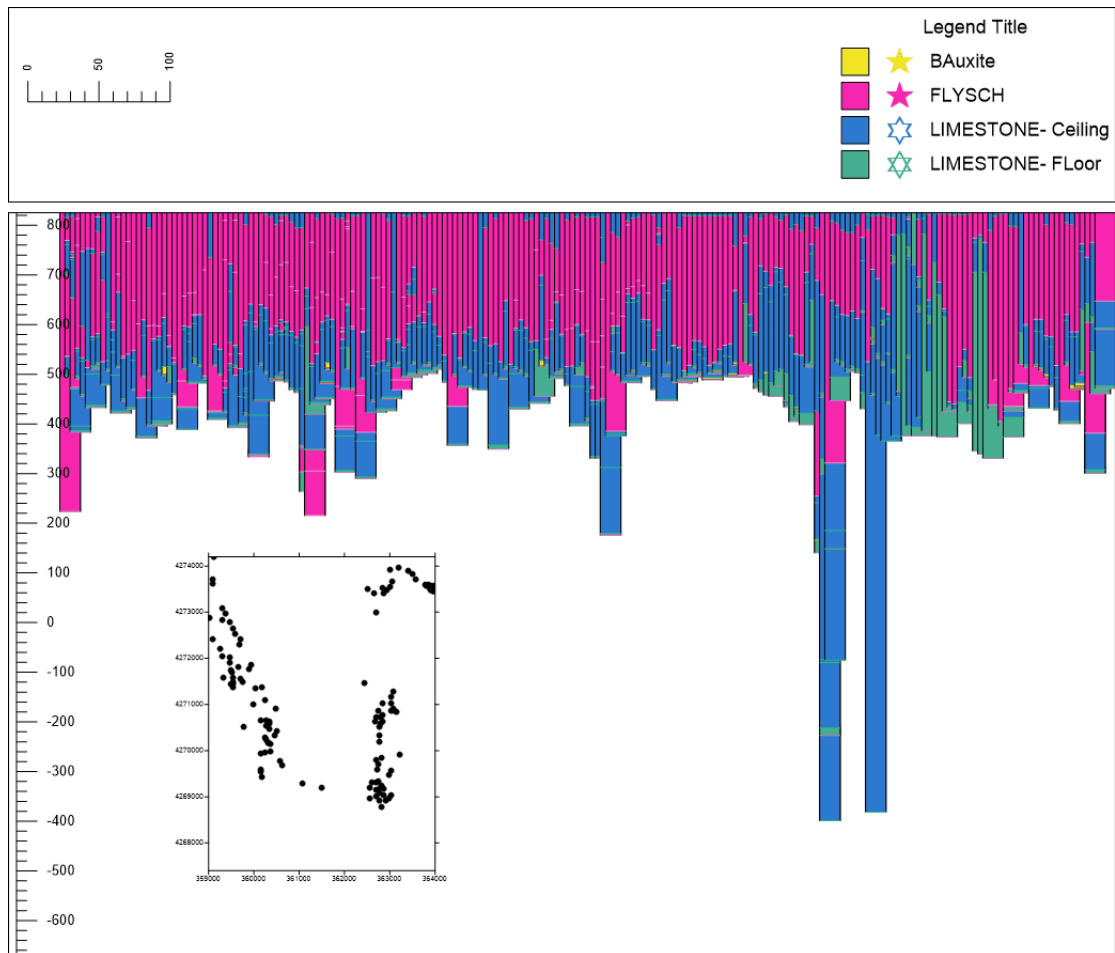
## 4.1 Χωρική ανάλυση Γεωτρήσεων

Οι δοθείσες γεωτρήσεις από την εταιρεία "Δελφοί- Δίστομον Α.Μ.Ε." επεξεργάστηκαν και μοντελοποιήθηκαν σε χωρικό μοντέλο (3D) προκειμένου να δοθεί μια πρώτη απεικόνιση του υπεδάφους και της αλληλουχίας των στρωμάτων, με σκοπό και την εφαρμογή περιορισμών στο βαρυτικό μοντέλο της περιοχής.

Για λόγους οικονομίας τα στρώματα χωρίστηκαν με βάση τις πυκνότητές τους και χωρίστηκαν στις βασικές αναλλαγές που συναντώνται, σε ασβεστόλιθο ταβανιού και πατώματος και φλύσχη ταβανιού και πατώματος, προκειμένου να δοθεί ένα αρχικό μοντέλο με τις εναλλαγές των στρωμάτων και μετέπειτα πληροφορίες να χρησιμοποιηθούν στο τελικό γεωφυσικό μοντέλο.

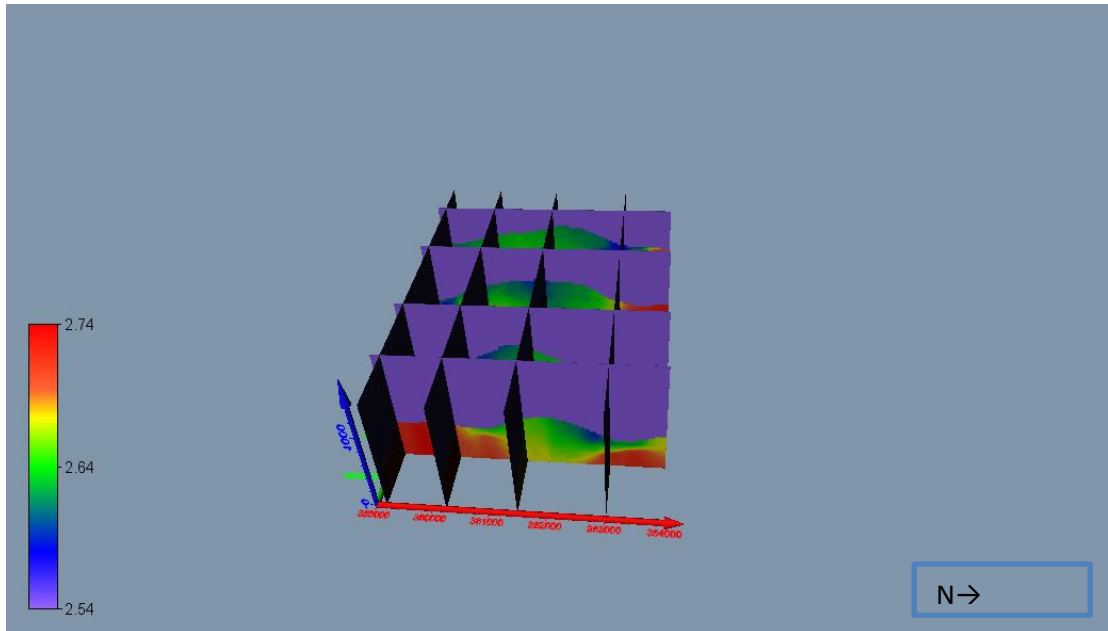
Με βάση προηγούμενες μελέτες τα αποτελέσματα των γεωτρήσεων μεταφράστηκαν σε πυκνότητες (Οικονομόπουλος, 1993). Σύμφωνα, με τις μελέτες αυτές, όπως και με διάφορες εργαστηριακές παρατηρήσεις από δείγματα από το φλύσχη και τον ασβεστόλιθο από τη βορινή πλευρά της ζώνης του Παρνασσού- Γκιώνας και από ζώνες μακριά από το Γερολέκα (Αποστολόπουλος, 1993), οι τιμές που δόθηκαν στο φλύσχη είναι από 2.55 ως 2.6  $\text{gr}/\text{cm}^3$  και για τον ασβεστόλιθο από 2.67 ως 2.74, με τον τρόπο αυτό γίνεται μια πιο ομαλή εφαρμογή των πυκνοτήτων στο μοντέλο και είναι και πιο αντιπροσωπευτικό για το υπέδαφος της περιοχής.



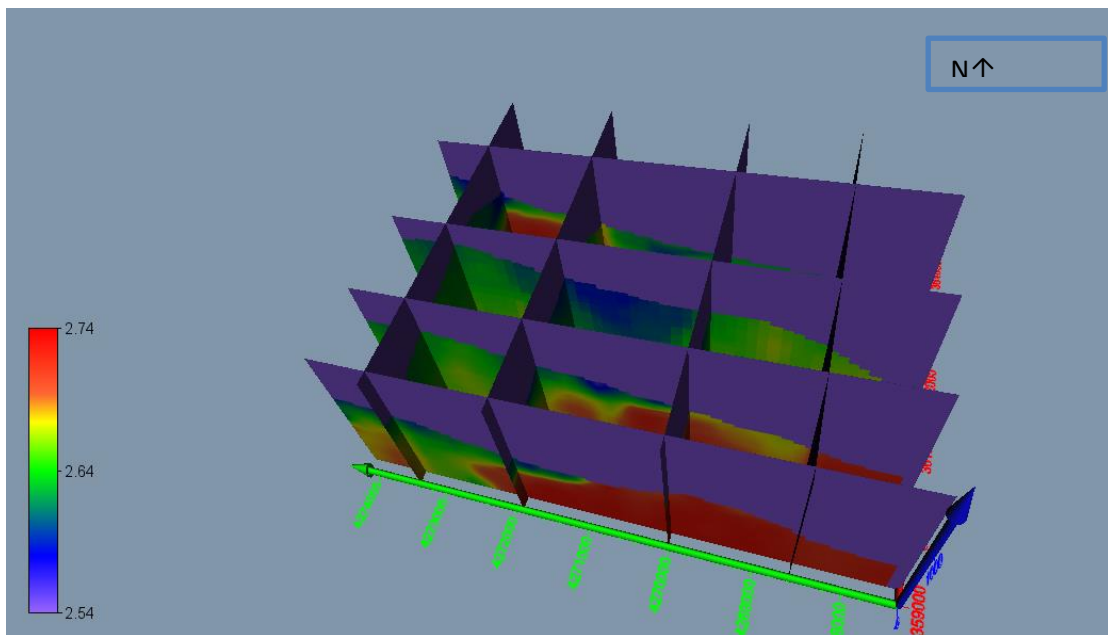


Εικόνα 39: Cross section (2D) γεωτρήσεων με αποληψιμότητα >300m για να γίνει ένας αρχικός χαρακτηρισμός των στρωμάτων στην περιοχή (starter, goldensoftware)

Αρχικά έγινε η εισαγωγή των δεδομένων των γεωτρήσεων σε ειδικό πρόγραμμα επεξεργασίας και έγινε μια αρχική επεξεργασία προκειμένου να μπορέσουμε να δούμε ένα αρχικό μοντέλο με τις αλληλουχίες των στρωμάτων και τυχόν τεκτονικά φαινόμενα που παρατηρούνται μέσω αυτών των μοντέλων.



Εικόνα 40: Τριδιάστατη απεικόνιση μοντέλου(fence) πυκνοτήτων με βάση τις γεωτρήσεις (Voxler, goldensoftware)



Εικόνα 41 : Τριδιάστατη απεικόνιση μοντέλου (fence) πυκνοτήτων με βάση τις γεωτρήσεις (Voxler, goldensoftware)

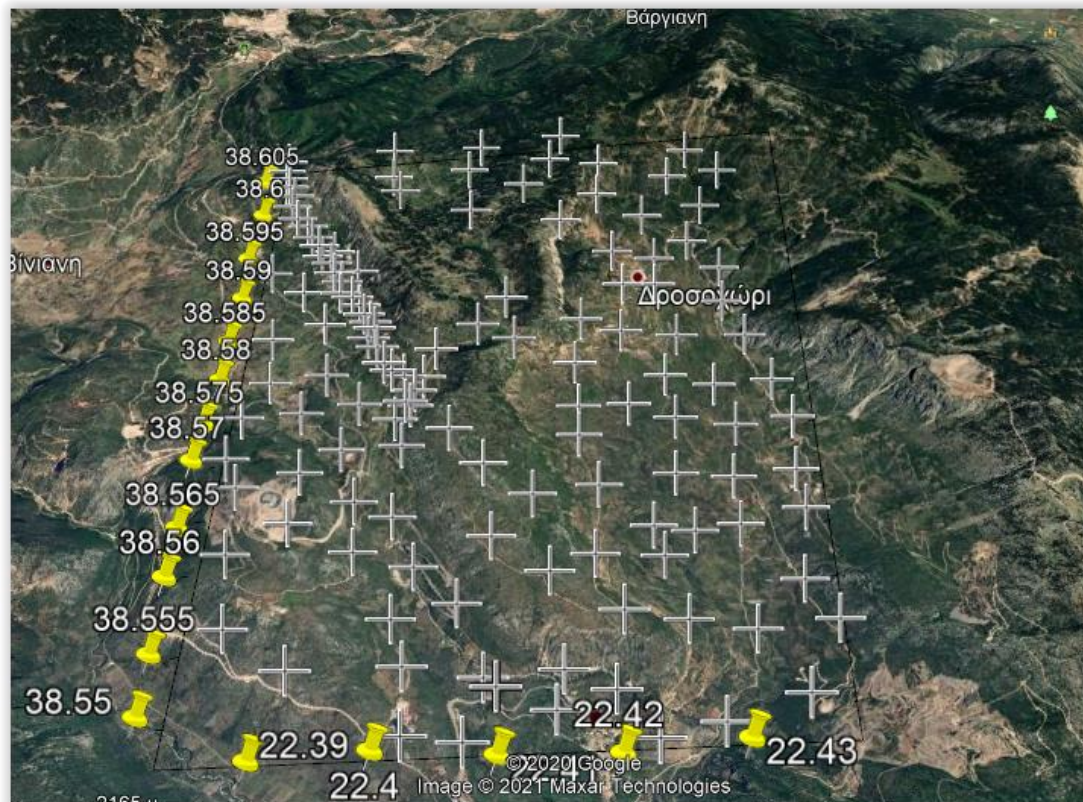
## 5 Βαρυτικές Μετρήσεις: Επεξεργασία Δεδομένων και Ερμηνεία

### 5.1 Βαρυτικές Μετρήσεις στο ύπαιθρο

Οι βαρυτικές μετρήσεις έλαβαν χώρα τον Ιούνιο του 2018 από τους Δρ. Κ.Λεονταράκη και Δρ. Χ. Ορφανό, μέλη του εργαστηρίου εκμετάλλευσης υδρογονανθράκων και εφαρμοσμένης γεωφυσικής, όπου ακολουθήθηκε το κατά δύναμην κάρναβος μετρήσεων και ορίστηκε ως βάση αναφοράς σημείο το οποίο επέτρεπε την πρόσβασή του ενδιάμεσα των μετρήσεων και κατά το τέλος της κάθε ημέρας. Οι μετρήσεις έλαβαν χώρα με το βαρυτόμετρο που υπάρχει στο εργαστήριο τύπου Lacoste Romberg g580.



Εικόνα 42 : Βαρυτόμετρο Lacoste Romberg G580, με το οποίο έγιναν και οι μετρήσεις.



Εικόνα 43 : Ο κάναβος των μετρήσεων ( GoogleEarth)(wgs84)

## 5.2 Βαρυτικές Διορθώσεις

Στις βαρυτικές μετρήσεις εφαρμόστηκαν οι αναγκαίες διορθώσεις για την αξιολόγηση και την ερμηνεία των βαρυτικών μετρήσεων, παρακάτω παρατίθενται όλες οι διορθώσεις που εφαρμόστηκαν στις βαρυτικές παρατηρήσεις

- Παρατηρούμενη Βαρύτητα (  $g_{obs}$  – Observed Gravity ): η τιμή της βαρύτητας που παρατηρείται μετά την εφαρμογή των διορθώσεων της πορείας του οργάνου (Drift correction).
- Διόρθωση Γεωγραφικού Πλάτους (  $g_n$  – Latitude Correction ): διόρθωση που αφαιρείται από την  $g_{obs}$ , η οποία οφείλεται στο ελλειπτικό σχήμα της γης και την περιστροφή της. Η τιμή της βαρύτητας που θα παρατηρούσαμε αν η γή ήταν ένα τέλειο ελλειψοειδές εκ περιστροφής (χωρίς γεωλογικές ή τοπογραφικές περιπλοκές) ονομάζεται κανονική βαρύτητα .
- Διόρθωση Ελεύθερου Αέρα (  $g_{fa}$  – Free Air Correction ): η διόρθωση αυτή ερμηνεύει τις βαρυτικές μεταβολές λόγω διαφορών του υψόμετρου στις θέσεις παρατήρησης. Η τιμή της διόρθωσης του ελεύθερου αέρα δίνεται από τον τύπο:

$$g_{fa} = g_{obs} - g_n + 0,3086h \text{ (mgal)}$$

,όπου h είναι το υψόμετρο του στάθμου πάνω από το επίπεδο αναφοράς που έχει επιλεγεί για την έρευνα (συνήθως είναι το επίπεδο της θάλασσας)

- Διόρθωση Bouguer ( gb – Bouguer Slab Correction ): η διόρθωση Bouguer είναι μία πρώτης τάξης διόρθωση για την περίσσεια μάζας που υπόκειται των σταθμών παρατήρησης που βρίσκονται ψηλότερα από το επίπεδο αναφοράς. Αντίστροφα, υπολογίζει το έλλειμμα μάζας των σταθμών παρατήρησης που βρίσκονται κάτω από το επίπεδο αναφοράς. Ο τύπος που δίνει την ανωμαλία Bouguer είναι:

$$g_b = g_{obs} - g_n + 0,3086h - 0,04193\rho h \text{ (mgal)}$$

,όπου ρ είναι η μέση πυκνότητα των πετρωμάτων που υπόκεινται της περιοχής έρευνας.

- Τοπογραφική Διόρθωση ( g t – Terrain Corrected Bouguer Gravity ): η διόρθωση εδάφους λαμβάνει υπόψη τις μεταβολές στην επιτάχυνση που οφείλονται σε μεταβολές της τοπογραφίας κοντά σε κάθε σημείο παρατήρησης. (Συντελεστής πυκνότητας 2.67 g/cm<sup>3</sup>)

$$g_t = g_{obs} - g_n + 0,308h - 0,04193\rho + TC \text{ (mgal)}$$

όπου TC είναι η τιμή της υπολογισμένης τοπογραφικής διόρθωσης.

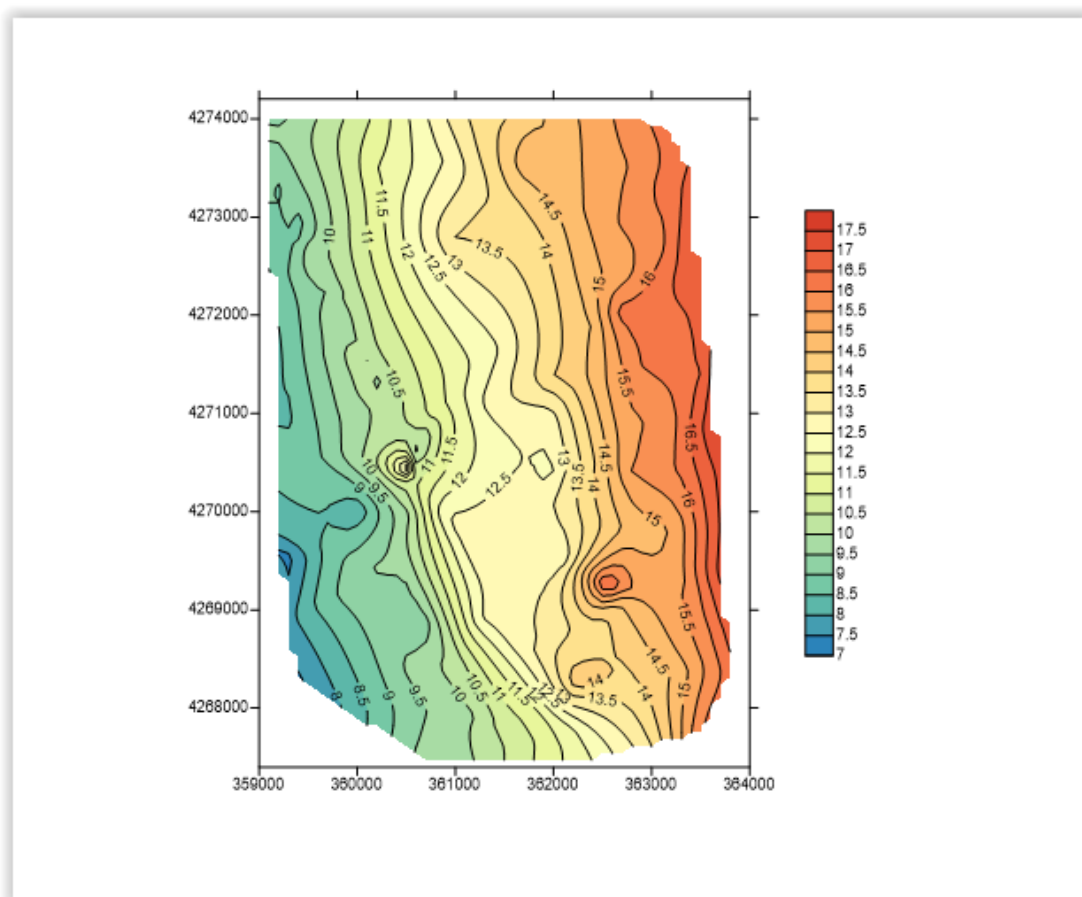
Αν δεχτούμε ότι οι διορθώσεις αυτές έχουν ερμηνεύσει σωστά τις μεταβολές της επιτάχυνσης που θέλαμε να διορθώσουμε, τότε κάθε απομένουσα μεταβολή στην επιτάχυνση της βαρύτητας που σχετίζεται με τη διόρθωση εδάφους μπορεί να θεωρηθεί ότι προκαλείται από τη γεωλογική δομή και τεκτονικά φαινόμενα.

| Α       | Β                   | Γ        | Δ            | Ε         | ΣΤ        | Ζ        | Η        | Θ         | Ι         | Κ         | Λ           | Μ         | Ν           | Ξ         |            |
|---------|---------------------|----------|--------------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|------------|
| Επίπεδο | Επίπεδο Παρατήρησης | από αέρα | τιμή σταθμού | Βόρεια    | Ανατολικά | Απόσταση | Απόσταση | Απόσταση  | Απόσταση  | Απόσταση  | Απόσταση    | Απόσταση  | Απόσταση    | Απόσταση  |            |
| α       | α                   | α        | α            | α         | α         | α        | α        | α         | α         | α         | α           | α         | α           | α         |            |
| 1       | 3442.78             | 3447.39  | 361318.91    | 4267849.7 | 10.42     | 3447.39  | 0.0000   | 0         | 0         | 10.403982 | 980040.4588 | 0         | 10.403982   | 10.403982 |            |
| 2       | 3442.77             | 3447.38  | 361318.91    | 4267849.7 | 10.42     | 3447.38  | 0.0000   | 0         | 0         | 10.403982 | 980040.4588 | 0         | 10.403982   | 10.403982 |            |
| 3       | 3442.77             | 3447.38  | 361318.91    | 4267849.7 | 10.42     | 3447.38  | 0.0000   | 0         | 0         | 10.403982 | 980040.4588 | 0         | 10.403982   | 10.403982 |            |
| 4       | 3325.25             | 3376.34  | 350953.32    | 4274062.1 | 11.20     | 3376.37  | -111.02  | 955.99620 | 585.15580 | 180.579   | 65.4788     | 10.156207 | 980045.7484 | 5.289531  | 8.54846137 |
| 5       | 3325.26             | 3376.35  | 350953.32    | 4274062.1 | 11.40     | 3376.38  | -111.01  | 955.99620 | 585.15580 | 180.579   | 65.4788     | 10.156207 | 980045.7484 | 5.289531  | 8.55887988 |
| 6       | 3325.24             | 3376.36  | 350953.32    | 4273894.1 | 11.40     | 3376.39  | -109.00  | 942.26250 | 578.45210 | 176.35    | 63.9453     | 10.813126 | 980044.8666 | 4.4078474 | 9.82601432 |
| 7       | 3325.26             | 3376.38  | 350953.32    | 4273894.1 | 11.40     | 3376.41  | -108.98  | 942.26250 | 578.45210 | 176.35    | 63.9453     | 10.813126 | 980044.8666 | 4.4078474 | 9.82679121 |
| 8       | 3325.58             | 3378.70  | 350907.24    | 4273737.1 | 11.53     | 3378.74  | -108.65  | 938.31000 | 567.50050 | 175.131   | 63.5031     | 10.850063 | 980044.8666 | 4.4078474 | 9.41515011 |
| 9       | 3325.58             | 3378.70  | 350907.24    | 4273737.1 | 11.53     | 3378.74  | -108.65  | 938.31000 | 567.50050 | 175.131   | 63.5031     | 10.850063 | 980044.8666 | 4.4078474 | 9.41544091 |
| 10      | 3325.58             | 3378.70  | 350907.24    | 4273737.1 | 11.53     | 3378.74  | -108.65  | 938.31000 | 567.50050 | 175.131   | 63.5031     | 10.850063 | 980044.8666 | 4.4078474 | 9.41544091 |
| 11      | 3325.58             | 3378.70  | 350907.24    | 4273737.1 | 11.53     | 3378.74  | -108.65  | 938.31000 | 567.50050 | 175.131   | 63.5031     | 10.850063 | 980044.8666 | 4.4078474 | 9.41544091 |
| 12      | 3325.58             | 3378.70  | 350907.24    | 4273737.1 | 11.53     | 3378.74  | -108.65  | 938.31000 | 567.50050 | 175.131   | 63.5031     | 10.850063 | 980044.8666 | 4.4078474 | 9.41544091 |
| 13      | 3325.58             | 3378.70  | 350907.24    | 4273737.1 | 11.53     | 3378.74  | -108.65  | 938.31000 | 567.50050 | 175.131   | 63.5031     | 10.850063 | 980044.8666 | 4.4078474 | 9.41544091 |
| 14      | 3325.58             | 3378.70  | 350907.24    | 4273737.1 | 11.53     | 3378.74  | -108.65  | 938.31000 | 567.50050 | 175.131   | 63.5031     | 10.850063 | 980044.8666 | 4.4078474 | 9.41544091 |
| 15      | 3325.58             | 3378.70  | 350907.24    | 4273737.1 | 11.53     | 3378.74  | -108.65  | 938.31000 | 567.50050 | 175.131   | 63.5031     | 10.850063 | 980044.8666 | 4.4078474 | 9.41544091 |
| 16      | 3325.58             | 3378.70  | 350907.24    | 4273737.1 | 11.53     | 3378.74  | -108.65  | 938.31000 | 567.50050 | 175.131   | 63.5031     | 10.850063 | 980044.8666 | 4.4078474 | 9.41544091 |
| 17      | 3325.58             | 3378.70  | 350907.24    | 4273737.1 | 11.53     | 3378.74  | -108.65  | 938.31000 | 567.50050 | 175.131   | 63.5031     | 10.850063 | 980044.8666 | 4.4078474 | 9.41544091 |
| 18      | 3325.58             | 3378.70  | 350907.24    | 4273737.1 | 11.53     | 3378.74  | -108.65  | 938.31000 | 567.50050 | 175.131   | 63.5031     | 10.850063 | 980044.8666 | 4.4078474 | 9.41544091 |
| 19      | 3325.58             | 3378.70  | 350907.24    | 4273737.1 | 11.53     | 3378.74  | -108.65  | 938.31000 | 567.50050 | 175.131   | 63.5031     | 10.850063 | 980044.8666 | 4.4078474 | 9.41544091 |
| 20      | 3325.58             | 3378.70  | 350907.24    | 4273737.1 | 11.53     | 3378.74  | -108.65  | 938.31000 | 567.50050 | 175.131   | 63.5031     | 10.850063 | 980044.8666 | 4.4078474 | 9.41544091 |
| 21      | 3325.58             | 3378.70  | 350907.24    | 4273737.1 | 11.53     | 3378.74  | -108.65  | 938.31000 | 567.50050 | 175.131   | 63.5031     | 10.850063 | 980044.8666 | 4.4078474 | 9.41544091 |

Εικόνα 44 : Ενδεικτικά το φύλλο υπολογισμού βάση του οποίου έλαβαν χώρα οι αναγκαίες διορθώσεις για την αξιοποίηση των βαρυτικών δεδομένων και η εξαγωγή της διορθωμένης βαρυτικής τιμής (Bouguer).

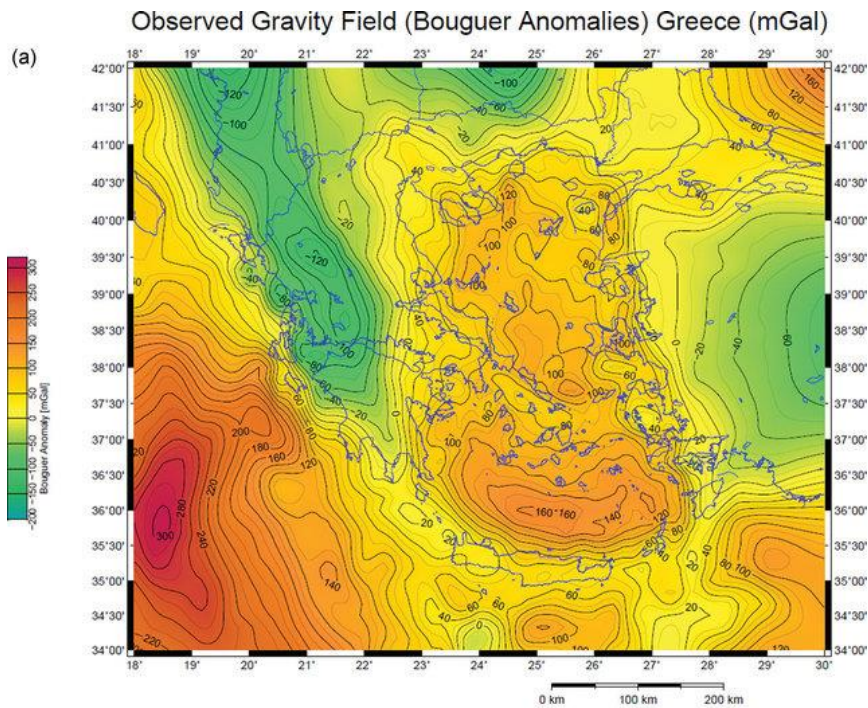
## 5.3 Βαρυτικοί Χάρτες

Αρχικά από την επεξεργασία των βαρυτικών δεδομένων βγήκε ο διορθωμένος βαρυτικός χάρτης (Bouguer) , προς ερμηνεία και αξιολόγηση. Η διαδικασία έλαβε χώρα σε ειδικό λογισμικό (surfer, Golden Software) , όπου τα δεδομένα εισάχθηκαν και επεξεργάστηκαν, ο γεωστατιστικός αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε είναι αυτός του Kriging για την εξαγωγή κανάβου αναφοράς (250x250).

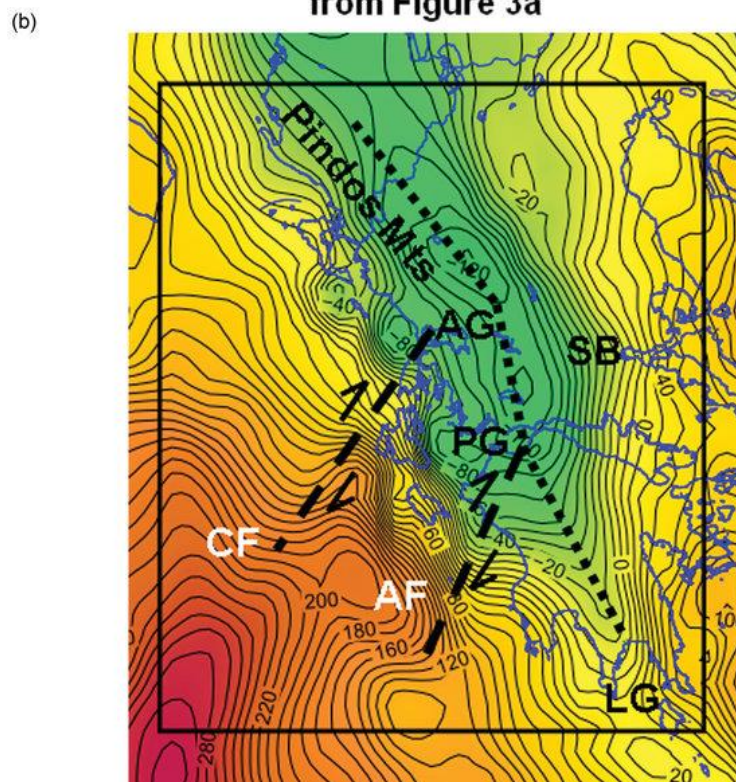


Εικόνα 45 : Διορθωμένος Βαρυτικός Χάρτης (Bouguer) ( Surfer, Golden software)

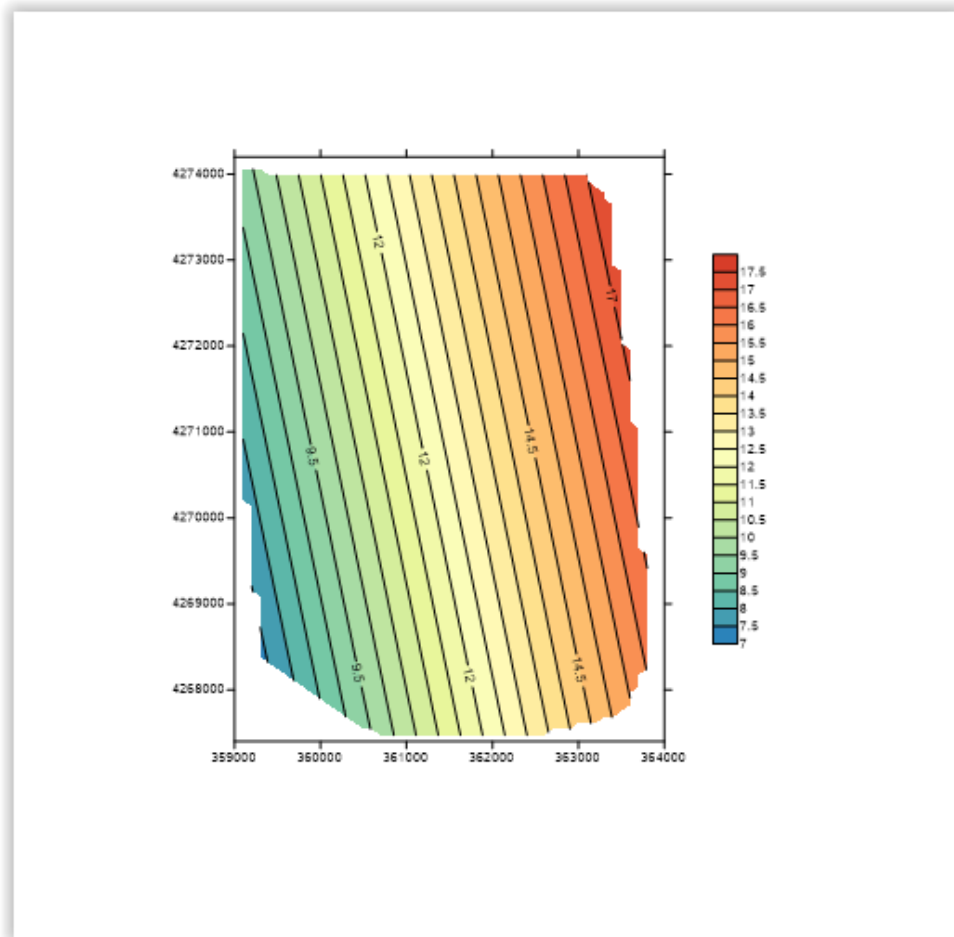
Έπειτα, με βάση τον βαρυτικό χάρτη της Ελλάδας επιλέχθηκε η μεγάλης κλίμακας βαρυτικής ανωμαλίας χάρτης, ο οποίος βγήκε με βάση την εφαρμογή της μεθόδου Polynomial Fitting (Telford, 1990) και με αλγόριθμο (polynomial regression) που παρέχει το πρόγραμμα Surfer.



**Detail of Observed Gravity Field from Figure 3a**



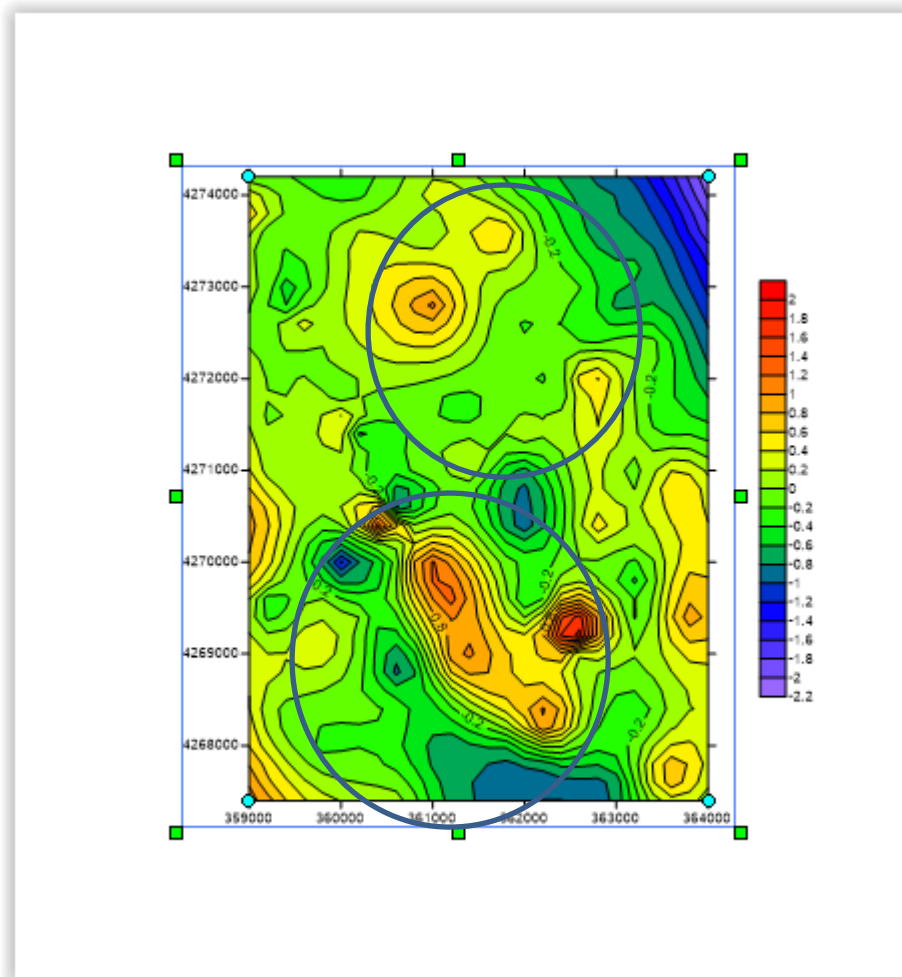
Εικόνα 46 : Χάρτες Bouguer και βαρυντικού πεδίου του ελλαδικού χώρου και η κατευθυντικότητα του βαρυντικού πεδίου (Makris, 2013)



Εικόνα 47 : Ο χάρτης Regional της περιοχής (Surfer, GoldenSoftware)

Για την εύρεση του βαρυτικού χάρτη Residual της περιοχής ενδιαφέροντος γίνεται η αφαίρεση του χάρτη regional από το χάρτη Bouguer και το υπόλοιπο είναι η μικρής κλίμακας ανωμαλία και φαίνονται τα τεκτονικά και γεωλογικά παράθυρα που επηρεάζουν τις μετρήσεις και τα αποτελέσματά τους. Με βάση το χάρτη Residual μπορούν να βγούν και τα πρώτα συμπεράσματα για τυχόν τεκτονικά φαινόμενα. Χαρακτηριστικά φαίνονται δύο ζώνες που πιθανά είναι ρηγματογόνες ζώνες.





Εικόνα 48 : Χάρτης Residual της Περιοχής (Surfer, Golden Software), με κυκλωμένα τα κομμάτια όπου φαίνεται εναλλαγή και πιθανόν ρηματογόνες ζώνες με εφάνιση στρωμάτων σε αλληλουχία.

## 5.4 Βαρυτικό Μοντέλο

Στη συνέχεια του ερευνητικού έργου ακολουθήθηκε η διαδικασία για τη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου χωρικού(3D) γεω-μοντέλου πυκνοτήτων, με στόχο το χαρακτηρισμό των στρωμάτων και των ρηγματογόνων ζωνών.

Η εξαγωγή τελικού μοντέλου πυκνότητας προήλθε από διαδικασία η οποία περιγράφεται, σε ακόλουθα βήματα:

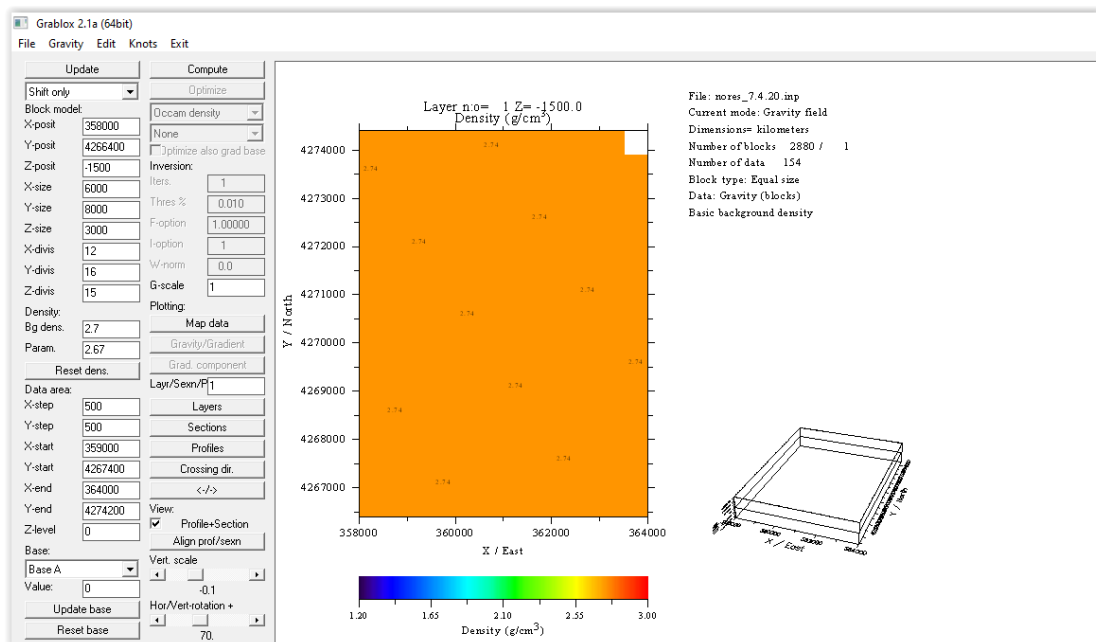
- 1) Ορισμός αρχικού μοντέλου πυκνοτήτων(Background initial model) στο οποίο χρησιμοποιούνται περιορισμοί και όλες οι αρχικές πληροφορίες στο λογισμικό Grablox2(Oulou University, Markku Pirttijärvi)
- 2) Εισαγωγή μετρήσεων (residuals) στο πρόγραμμα Grablox2(Oulou University, Markku Pirttijärvi) η αντιστροφή τους( inversion) και η επιλογή του κατάλληλου αποτελέσματος για την εξαγωγή μοντέλου πυκνοτήτων.
- 3) Τελικό Μοντέλο Πυκνοτήτων και η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων(Voxler, Golden Software)

## 5.4.1 Αρχικό Μοντέλο Πυκνοτήτων

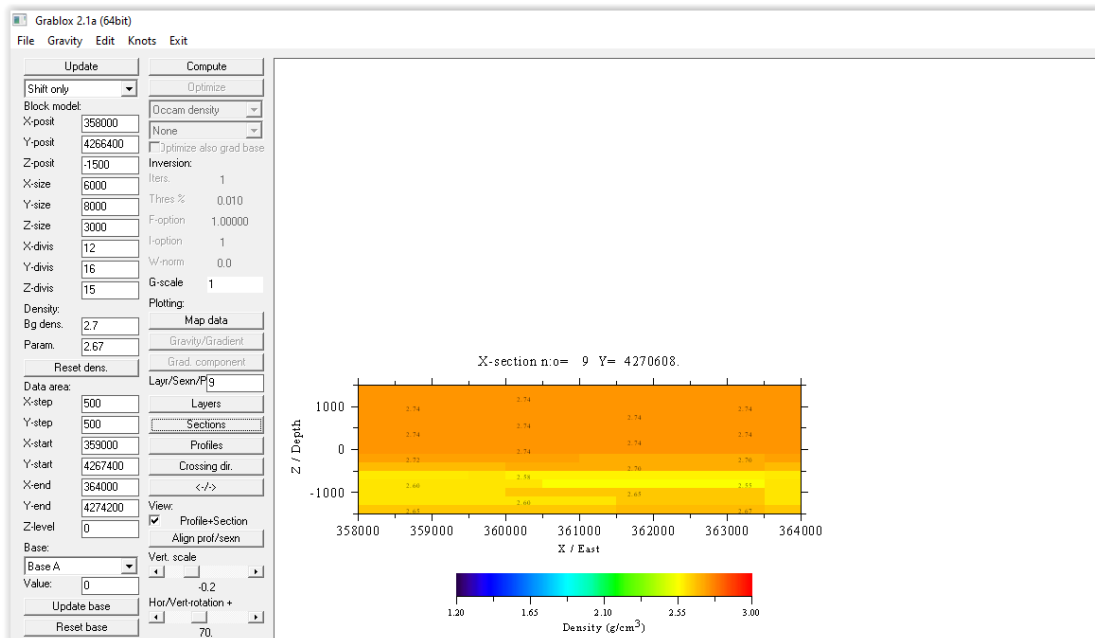
Ο σκοπός της δημιουργίας ενός αρχικού μοντέλου είναι η όσο το δυνατόν καλύτερη και ακριβέστερη απόδοση των βαρυτικών μετρήσεων, στο τελικό μοντέλο πυκνοτήτων.

Το αρχικό μοντέλο δημιουργήθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού Grablox2(Ουλου University, Markku Pirttijärvi) και σε αυτό εισήχθησαν οι ακόλουθες παρατηρήσεις και περιορισμοί.

Αρχικά μέσω του λογισμικού δημιουργείται ένα robust (αρχικό ) μοντέλο στο οποίο ορίζονται τα όρια του μοντέλου, οι διαστάσεις του κανάβου και η αρχική πυκνότητα που επικρατεί στο μοντέλο. Από αυτή τη διαδικασία αποθηκεύεται ένα αρχείο Ascii, το οποίο περιλαμβάνει τις προς επεξεργασία στήλες για τους περιορισμούς που θα εισαχθούν.



Εικόνα 49: Το λογισμικό Grablox2(Ουλου University, Markku Pirttijärvi) και η κάτοψη του μοντέλου για υψόμετρο 1500m.



Εικόνα 50 Το λογισμικό Grablox2(Oulou University, Markku Pirttijärvi) και το 9<sup>ο</sup> προφίλ του μοντέλου στον άξονα Y.

Ο τρόπος που εισήχθησαν οι τελικοί περιορισμοί στο λογισμικό είναι μέσω του αρχείου ascii(.txt), που αποθηκεύτηκε, το οποίο έχει συγκεκριμένες ιδιότητες και δίνει στο πρόγραμμα τις αναγκαίες πληροφορίες. Στις πρώτες 3 στήλες του αρχείου υπάρχουν οι διαστάσεις και ο διαχωρισμός του κανάβου (x,y,z), στις επόμενες τρεις υπάρχουν τα όρια κατά όλες τις διαστάσεις (x,y,z) με βάση τις συντεταγμένες και το διαχωρισμό από τον κανάβο.

Στην επόμενη στήλη υπάρχει η βαρύτητα της τιμής που δίνεται ως πυκνότητα στο αρχικό μοντέλο, η τιμή αυτή λαμβάνει τιμές που χαρακτηρίζουν και τη βαρύτητα των δοθείσων τιμών. Οι τιμές αυτές μπορούν να είναι:

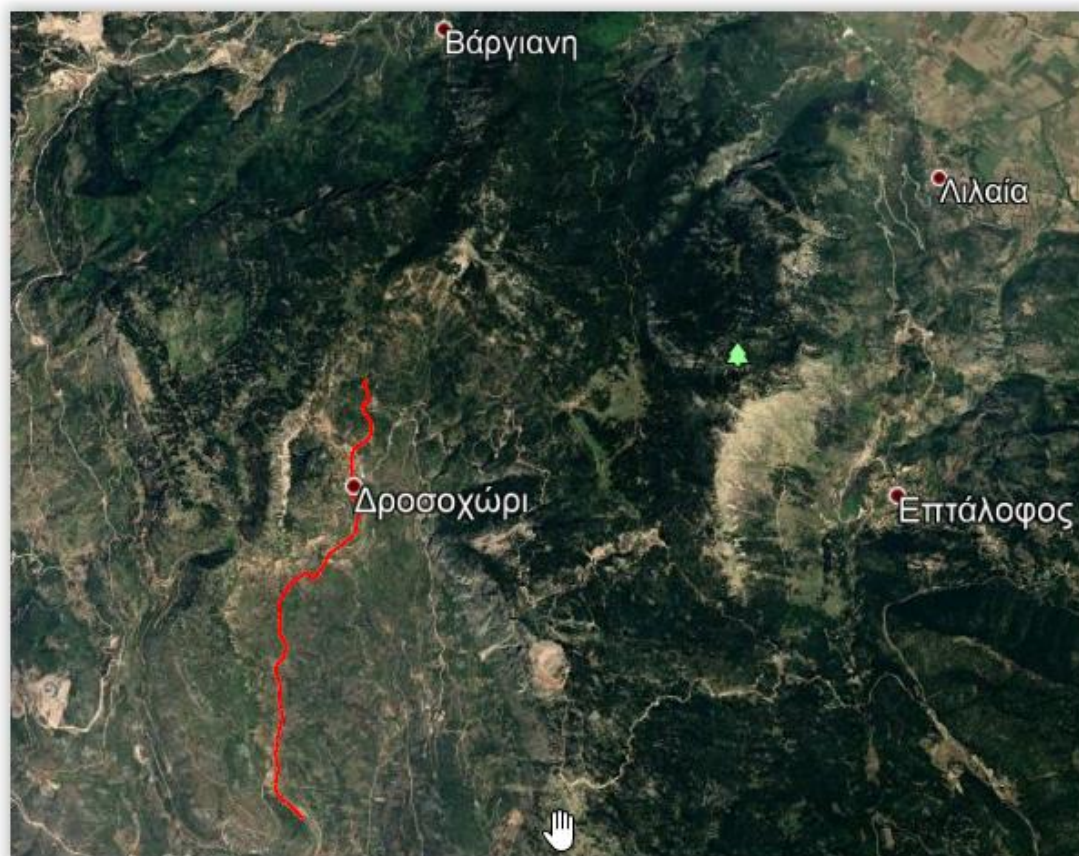
- 1, δηλαδή η πυκνότητα παραμένει αμετάβλητη και δεν λαμβάνονται υπόψιν οι μετρήσεις (π.χ. σε γεωτρήσεις)
- 2-99(weighted value),δηλαδή έχουμε συντελεστή βαρύτητας, με όσο μικρότερη τιμή να είναι και λιγότερη η επιρροή στο μοντέλο (γειτονικά κελιά από γεωτρήσεις, γεωλογικές παρατηρήσεις)
- 100, έχουμε μια αρχική τιμή πυκνότητας, η οποία όμως δεν λειτουργεί ως περιορισμός και το πρόγραμμα λειτουργεί ελεύθερα με τη διαδικασία της αντιστροφής (
- 0, όπου σε εκείνο το κελί το πρόγραμμα αντιλαμβάνεται κενό και δεν δίνει κανένα αποτέλεσμα.

Τέλος, στην επόμενη και τελευταία στήλη δίνεται η τιμή της πυκνότητας, όπου δόθηκαν τιμές αντίστοιχες με τις τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στο χωρικό μοντέλο πυκνοτήτων των γεωτρήσεων.

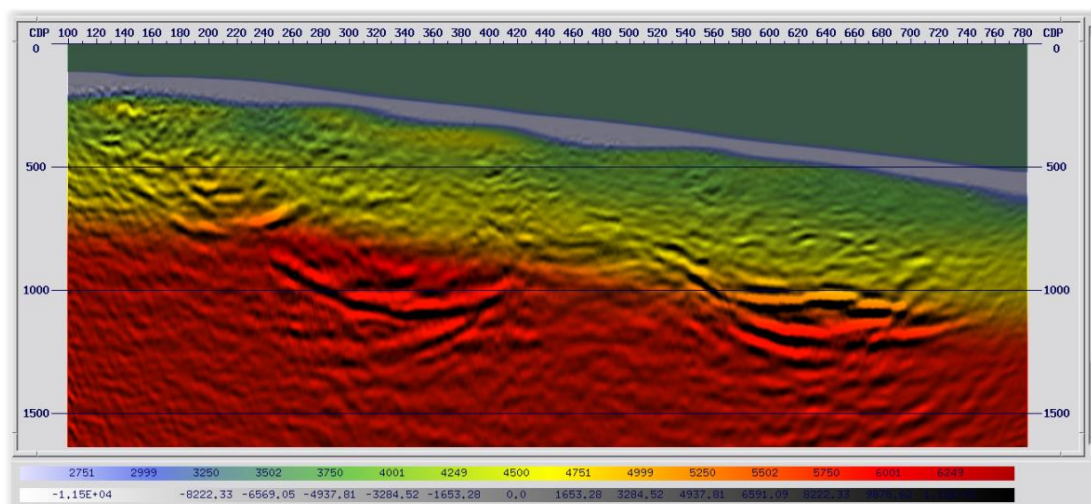
|    | A   | x | B   | y | C   | z | D      | E       | F     | G  | H    | I |
|----|-----|---|-----|---|-----|---|--------|---------|-------|----|------|---|
| 1  | 500 |   | 500 |   | 200 |   | 358250 | 4266650 | -1500 | 50 | 2.74 |   |
| 2  | 500 |   | 500 |   | 200 |   | 358250 | 4266650 | -1500 | 50 | 2.74 |   |
| 3  | 500 |   | 500 |   | 200 |   | 358750 | 4266650 | -1500 | 50 | 2.74 |   |
| 4  | 500 |   | 500 |   | 200 |   | 359250 | 4266650 | -1500 | 50 | 2.74 |   |
| 5  | 500 |   | 500 |   | 200 |   | 359750 | 4266650 | -1500 | 50 | 2.74 |   |
| 6  | 500 |   | 500 |   | 200 |   | 360250 | 4266650 | -1500 | 50 | 2.74 |   |
| 7  | 500 |   | 500 |   | 200 |   | 360750 | 4266650 | -1500 | 50 | 2.74 |   |
| 8  | 500 |   | 500 |   | 200 |   | 361250 | 4266650 | -1500 | 50 | 2.74 |   |
| 9  | 500 |   | 500 |   | 200 |   | 361750 | 4266650 | -1500 | 50 | 2.74 |   |
| 10 | 500 |   | 500 |   | 200 |   | 362250 | 4266650 | -1500 | 50 | 2.74 |   |
| 11 | 500 |   | 500 |   | 200 |   | 362750 | 4266650 | -1500 | 50 | 2.74 |   |
| 12 | 500 |   | 500 |   | 200 |   | 363250 | 4266650 | -1500 | 50 | 2.74 |   |
| 13 | 500 |   | 500 |   | 200 |   | 363750 | 4266650 | -1500 | 50 | 2.74 |   |
| 14 | 500 |   | 500 |   | 200 |   | 358250 | 4267150 | -1500 | 50 | 2.74 |   |
| 15 | 500 |   | 500 |   | 200 |   | 358750 | 4267150 | -1500 | 50 | 2.74 |   |
| 16 | 500 |   | 500 |   | 200 |   | 359250 | 4267150 | -1500 | 50 | 2.74 |   |
| 17 | 500 |   | 500 |   | 200 |   | 359750 | 4267150 | -1500 | 50 | 2.74 |   |
| 18 | 500 |   | 500 |   | 200 |   | 360250 | 4267150 | -1500 | 50 | 2.74 |   |
| 19 | 500 |   | 500 |   | 200 |   | 360750 | 4267150 | -1500 | 50 | 2.74 |   |
| 20 | 500 |   | 500 |   | 200 |   | 361250 | 4267150 | -1500 | 50 | 2.74 |   |
| 21 | 500 |   | 500 |   | 200 |   | 361750 | 4267150 | -1500 | 50 | 2.74 |   |
| 22 | 500 |   | 500 |   | 200 |   | 362250 | 4267150 | -1500 | 50 | 2.74 |   |
| 23 | 500 |   | 500 |   | 200 |   | 362750 | 4267150 | -1500 | 50 | 2.74 |   |
| 24 | 500 |   | 500 |   | 200 |   | 363250 | 4267150 | -1500 | 50 | 2.74 |   |
| 25 | 500 |   | 500 |   | 200 |   | 363750 | 4267150 | -1500 | 50 | 2.74 |   |
| 26 | 500 |   | 500 |   | 200 |   | 358250 | 4267650 | -1500 | 50 | 2.74 |   |
| 27 | 500 |   | 500 |   | 200 |   | 358750 | 4267650 | -1500 | 50 | 2.74 |   |

Εικόνα 51 : Το αρχείο ascii βάση του οποίου έγιναν οι παρεμβάσεις στο αρχικό μοντέλο

Στα πλαίσια του Smart Exploration επεξεργάστηκαν και σεισμικά δεδομένα από παλαιότερες γεωφυσικές έρευνες, χαρακτηριστική είναι η περίπτωση των σεισμικών ανάκλασης που είχαν διεξαχθεί κατά την περασμένη περίοδο. Σε συγκεκριμένο κομμάτι της περιοχής έγινε και η αξιοποίηση αυτών των δεδομένων χρησιμοποιώντας τα και σαν περιορισμό, αξιοποιώντας και επιπλέον προϋπάρχοντα δεδομένα ( legacy data) .



Εικόνα 52 ; Σεισμική τομή PARV-1 η οποία χρησιμοποιήθηκε κατά την εισαγωγή αρχικού μοντέλου (GoogleEarth)



Εικόνα 53 : Σεισμική Τομή PARV-1,επαναεπεξεργασμένη (Michal Malinowski,2019)

## 5.4.2 Εισαγωγή δεδομένων στο λογισμικό και η αντιστροφή τους

Η περίφημη παραπομπή από τον Wilhelm of Occam από τον 14ο αιώνα αναφέρει: "Non sunt multiplicanda entia praeter requitatem", το οποίο μεταφράζεται ως "Κάποιος δεν πρέπει να περιπλέκει τα πράγματα πέρα από το αναγκαίο", με αυτό συνοψίζεται και η πρακτική της γεωφυσικής αντιστροφής των δεδομένων.

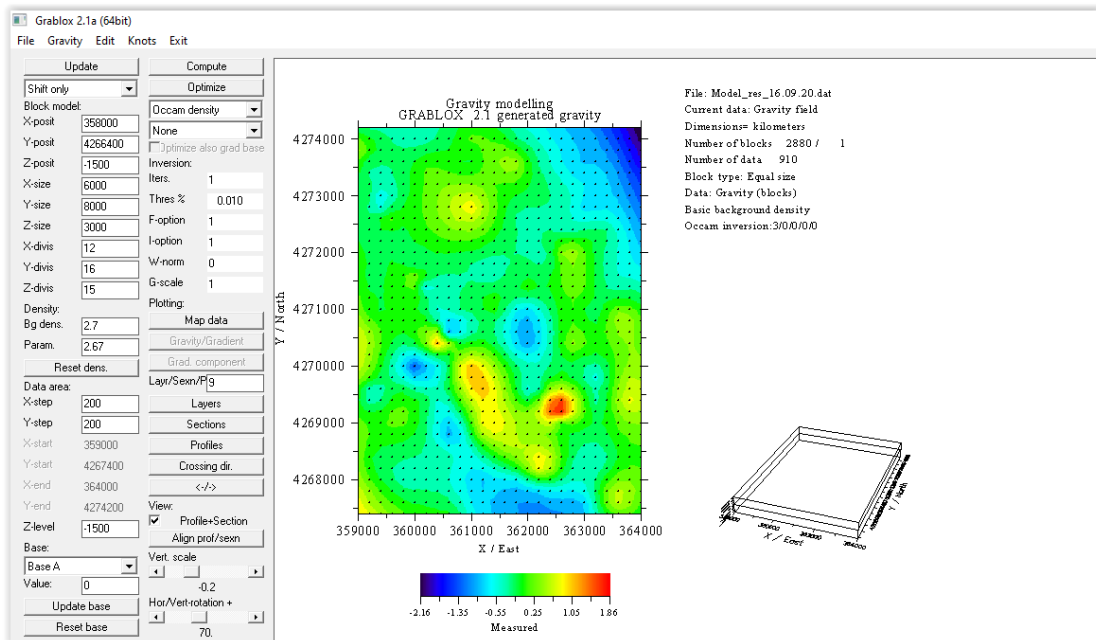
Με την μέθοδο Occam, εκτός από την ελαχιστοποίηση της προσαρμογής μεταξύ των μετρημένων και υπολογιζόμενων δεδομένων επίσης ελαχιστοποιείται η τραχύτητα του μοντέλου. Η μέθοδος του Occam δημιουργεί μοντέλα, τα οποία δεν ταιριάζουν με τα δεδομένα, αλλά οι οποίες είναι ομαλά μεταβαλλόμενες επειδή χρησιμοποιούνται τιμές γειτονικών παραμέτρων, όπως οι περιορισμοί. Χρησιμοποιείται ο λεγόμενος πολλαπλασιαστής Lagrange χρησιμοποιείται (χειροκίνητα) για να καθορίσει εάν το σφάλμα δεδομένων είναι περισσότερης βαρύτητας από το σφάλμα του μοντέλου ή το αντίστροφο. Αυτό που είναι σημαντικό στην αντιστροφή Occam είναι ότι εάν τα a priori δεδομένα είναι διαθέσιμα και διορθωμένα (όχι βελτιστοποιημένα) σε κάποιο σημείο, τότε η μέθοδος Occam θα περιορίσει το περιβάλλον ώστε να ταιριάζει σε αυτό σημείο. Για παράδειγμα, τα πετροφυσικά δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον περιορισμό της πυκνότητας στην επιφάνεια. Παρομοίως, δεδομένα γεωτρήσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον καθορισμό του βάθους σε συγκεκριμένα σημεία, με τον τρόπο αυτό έγινε και η επεξεργασία των δεδομένων στη συγκεκριμένη ερευνητική διαδικασία.

Η ικανότητα περιορισμού των τιμών των παραμέτρων αποκαλύπτει ένα άλλο πλεονέκτημα της μεθόδου της Occam. Ακόμα κι αν τα μετρημένα δεδομένα απέχουν ακανόνιστα ή δεν καλύπτουν την ορθογώνια περιοχή των ορίων του χώρου, η αντιστροφή Occam μπορεί ακόμα να δημιουργήσει ομαλά και συνεχή μοντέλα. Η διαδικασία αντιστροφής Occam χωρίς περιορισμούς μπορεί να δημιουργήσει ασταθή και αναξιόπιστα μοντέλα.

Δεδομένου ότι ο αριθμός των τιμών δεδομένων είναι συνήθως ίσος (ή μικρότερος) από τον αριθμό των μπλοκ στο ανώτερο στρώμα, η διάσταση του γραμμικού συστήματος αυξάνεται αρκετά δραστικά. Επειδή θα ήταν πάρα πολύ αργή, η αντιστροφή Occam χρησιμοποιεί μέθοδο συζυγούς διαβάθμισης για την επίλυση του μητρικού συστήματος για τα βήματα παραμέτρων.

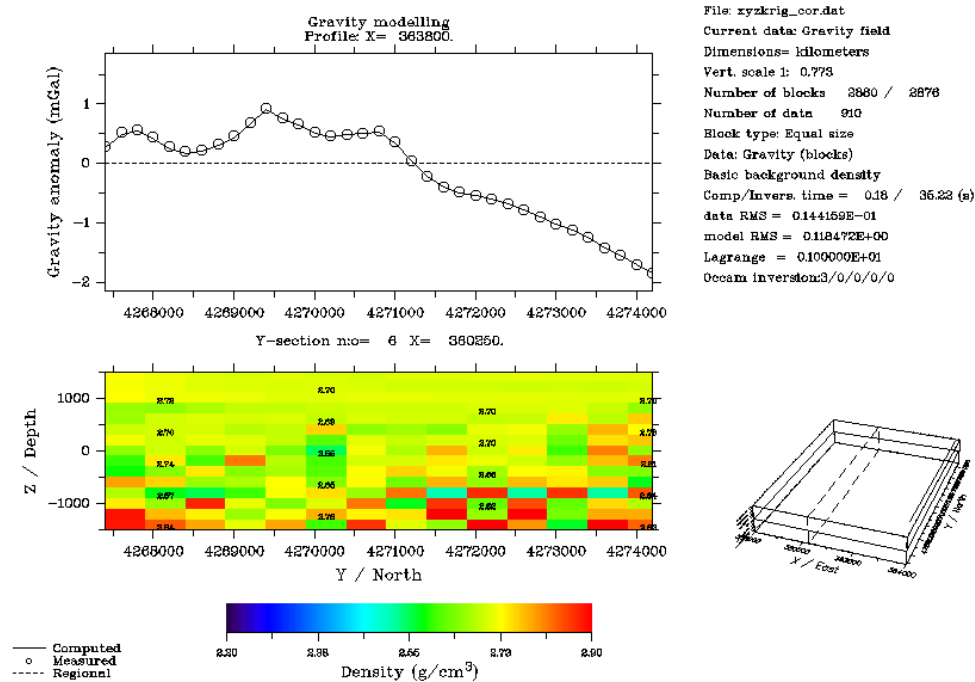
Τα βήματα για την ολοκλήρωση της διαδικασίας είναι τα ακόλουθα:

- 1) Εισαγωγή αρχικού μοντέλου πυκνοτήτων, το οποίο λειτουργεί ως περιορισμός στη διαδικασία της αντιστροφής
- 2) Εισαγωγή των δεδομένων στο λογισμικό ( Grablox2)



Εικόνα 54 : Τα Βαρυτικά δεδομένα (residual gravity map) προκειμένου να γίνει η αντιστροφή Grablox2(Oulu University, Markku Pirttijärvi)

- 3) Ορισμός περιορισμών στις πυκνότητες που θα ληφθούν υπόψιν στο μοντέλο που θα προκύψει ( 2.2- 2.9 grs/cm<sup>3</sup>)
- 4) Αντιστροφή και ορισμός επαναληπτικών διαδικασιών μέχρις ότου τα δεδομένα τα μετρούμενα να ταιριάζουν με του μοντέλου και το λάθος του προγράμματος να είναι σε αποδεκτά όρια (μικρότερο του 10%)



Εικόνα 55 : Προφίλ από τομή(no 6 στο x) στο μοντέλο, μετά την επαναληπτική διαδικασία της αντιστροφής, όπου φαίνεται που η υπολογιζόμενη με την μετρούμενη τιμή της βαρύτητας ταυτίζονται Grablox2(Oulu University, Markku Pirttijärvi)



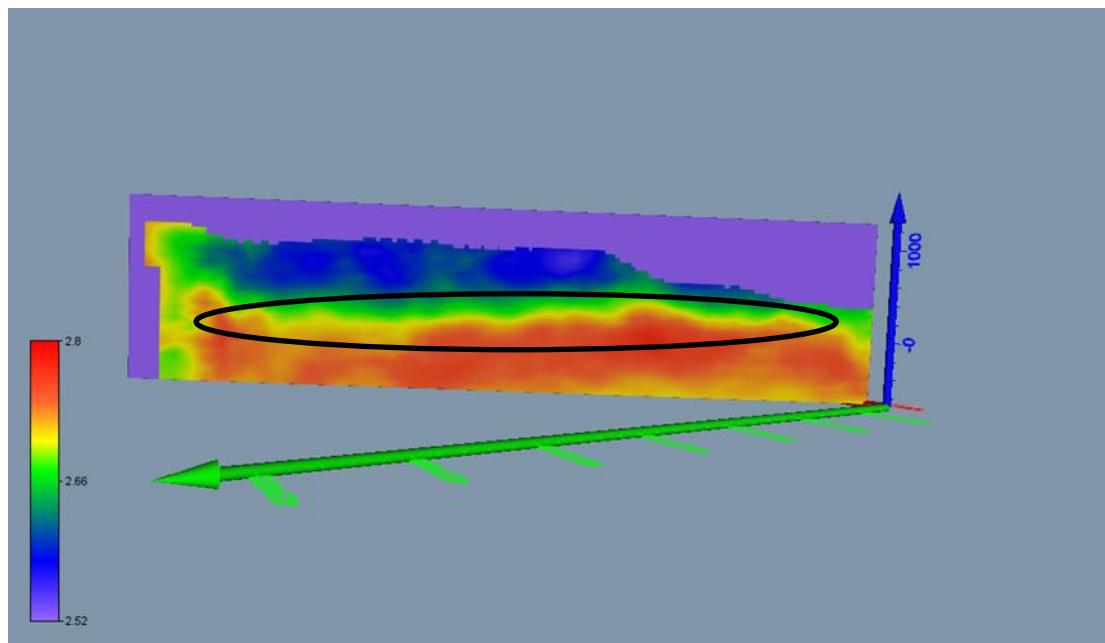
### 5.4.3 Τελικό Μοντέλο Πυκνοτήτων και η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων

Με το πέρας της διαδικασίας της αντιστροφής, εξάχθηκε αρχείο κειμένου από το λογισμικό Grablox2(Oulou University, Markku Pirttijärvi) και εισάχθηκε στο λογισμικό Voxler(goldenSoftware).

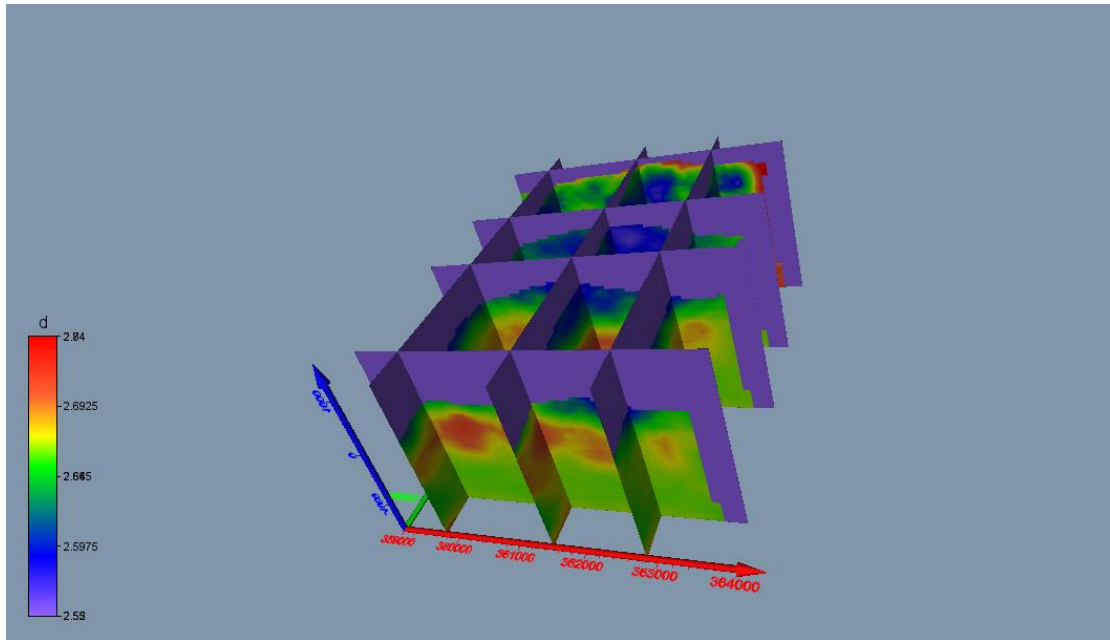
Το πρόγραμμα Voxler( goldenSoftware) μπορεί να οπτικοποιήσει δεδομένα με βάση χωρικά όρια(xyz) και μια μεταβλητή, όπου στην περίπτωση της παρούσης ερευνητικής εργασίας είναι η πυκνότητα.

Με την εισαγωγή των δεδομένων δημιουργείται ένα χωρικό μοντέλο, έπειτα εισάγεται η τοπογραφία και ως τελικό μοντέλο πυκνοτήτων δημιουργείται ένα τριδιάστατο μοντέλο, το οποίο έχει ως δεδομένα τα όρια και τις συντεταγμένες, τις πυκνότητες ανά σημείο και η τοπογραφία της περιοχής. Το πρόγραμμα με τη διαδικασία της παρεμβολής(interpolation) συμπληρώνει το μοντέλο μέσω γεωστατιστικού αλγορίθμου( Natural neighbor) και δημιουργεί ένα ολοκληρωμένο μοντέλο.

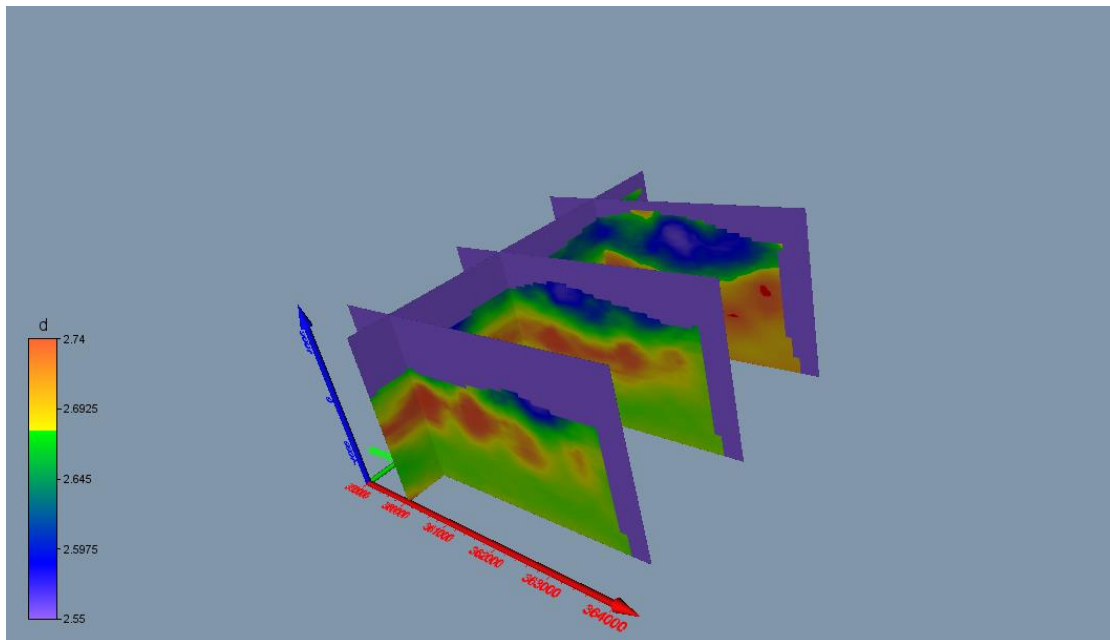
Έπειτα, ορίστηκε ανά πυκνότητα και περιοχή χρωματικών αποχρώσεων ώστε οι εναλλαγές των στρωμάτων να είναι εμφανείς και να μπορεί να χαρακτηριστεί και να εντοπιστεί η αλληλουχία των στρωμάτων και η τεκτονική της περιοχής.



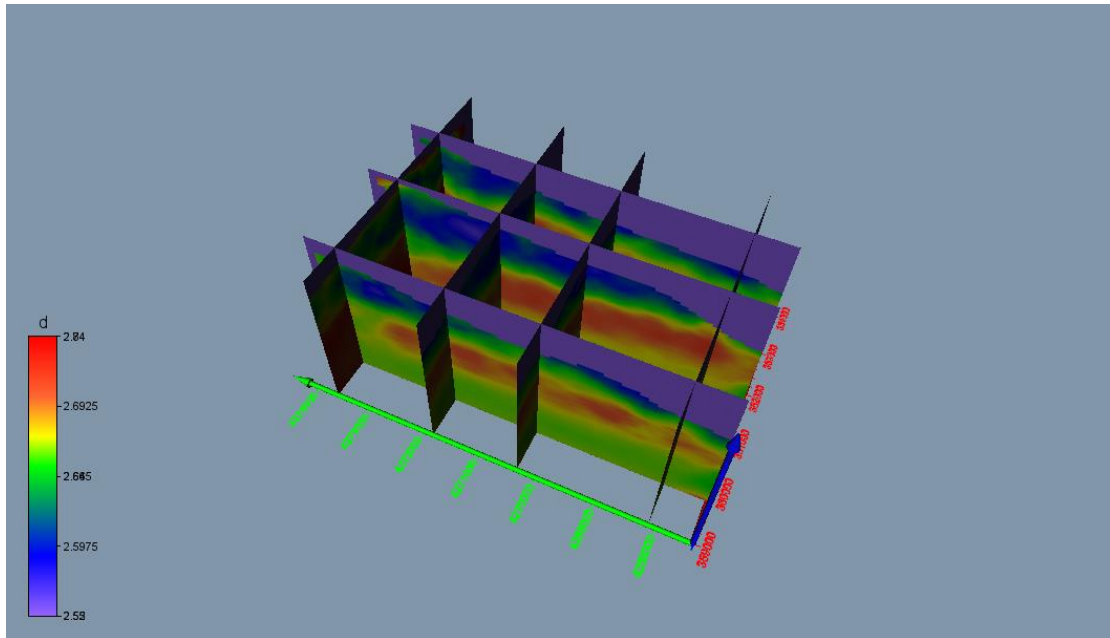
Εικόνα 56 : Τομή από χωρικό μοντέλο όπου φαίνεται η επαφή ασβεστολίθου πατώματος με ταβάνι, υπό γωνία BA-NA ( voxler, goldenSoftware)



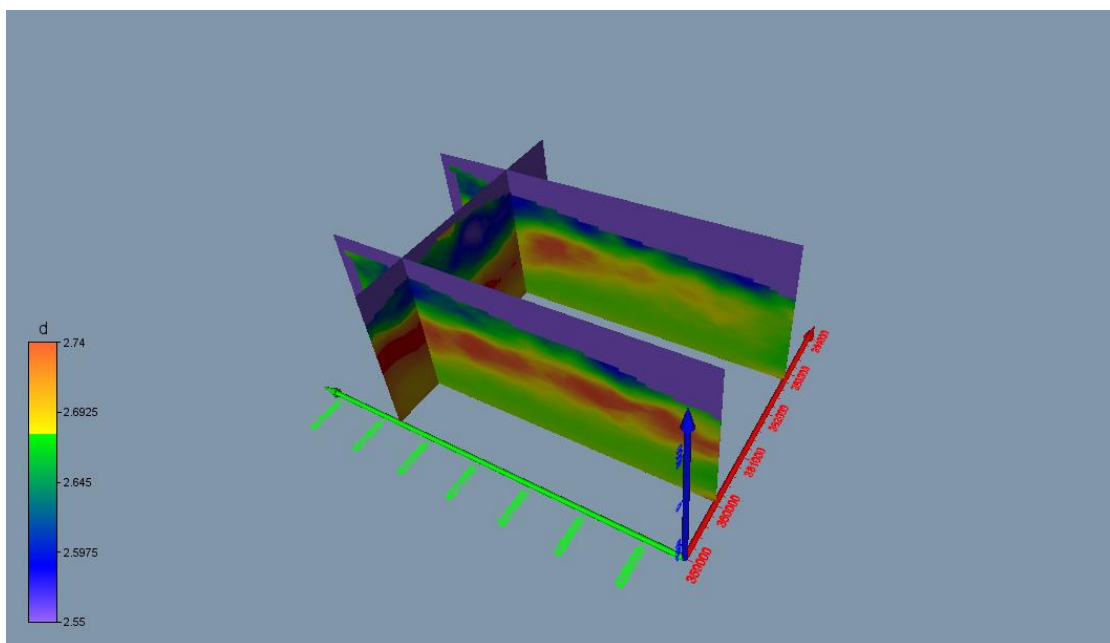
Εικόνα 57 : Μοντέλο 3D πυκνοτήτων σε τομές (ανατολή δύση),Voxler( goldenSoftware)



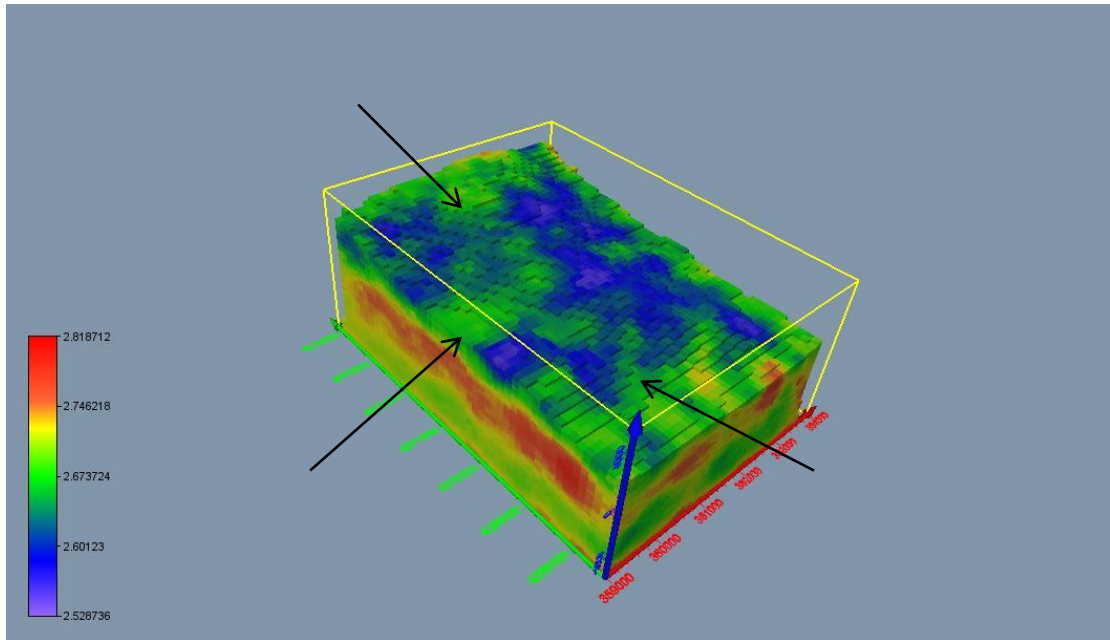
Εικόνα 58 : Μοντέλο 3D πυκνοτήτων σε τομές (ανατολή δύση),Voxler( goldenSoftware)



Εικόνα 59 : Μοντέλο 3D πυκνοτήτων σε τομές (νότος βοράς) ,Voxler( goldenSoftware)



Εικόνα 60 : Μοντέλο 3D πυκνοτήτων σε τομές (νότος βοράς) ,Voxler( goldenSoftware)



Εικόνα 61 : Απεικόνιση Μοντέλου 3D(κύβου) πυκνοτήτων με τα βέλη να δείχνουν πιθανές ζώνες ρηγματώσης, Voxler( goldenSoftware)

## 6 Συμπεράσματα

Η παρούσα ερευνητική διαδικασία είχε ως αποτέλεσμα την εξαγωγή ενός ολοκληρωμένου τριδιάστατου γεωφυσικού βαρυτικού μοντέλου (density), από όπου προέκυψαν συγκεκριμένες παρατηρήσεις, βάσει των οποίων μπορεί να δοθεί μια περιγραφή της τεκτονικής της περιοχής, η οποία μπορεί να επιτρέψει στην εταιρεία να συνεχίσει την μεταλλευτική της δραστηριότητα προς την περιοχή του Γερολέκα στην ήδη εκμεταλλευόμενη περιοχή της Αγίας Άννας.

Σημαντική είναι η εφαρμογή όσο τον δυνατόν περισσότερων γεωφυσικών μεθόδων καθώς η μια μέθοδος έρχεται και επιβεβαιώνει τα αποτελέσματα της επόμενης και συνεπώς παρέχει παραπάνω ασφάλεια στην εξαγωγή συμπερασμάτων, παρόλα αυτά με την ολοκληρωμένη προσέγγιση που ακολουθήθηκε κατά την παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν όλα τα διαθέσιμα αργιστά δεδομένα, όπως οι γεωτρήσεις, τα γεωλογικά δεδομένα και αποτελέσματα σεισμικών γεωφυσικών μετρήσεων, και έγινε όσο το δυνατόν πιο ακριβής αποτύπωση της γεωτεκτονικής.

Η χρήση περιορισμών και η εισαγωγή ενός αρχικού αξιόπιστου μοντέλου κρίνεται ως αναγκαία για την ορθή αξιολόγηση των βαρυτικών μετρήσεων και τη δημιουργία ενός τελικού μοντέλου πυκνοτήτων. Βέβαια, χρειάζεται και η προσεκτική διόρθωση των δεδομένων, όπως και το ορθό φιλτράρισμά τους, για την εξαγωγή του residual χάρτη.

Με το πέρας της δημιουργίας του βαρυτικού μοντέλου και όλων των προηγούμενων πληροφοριών που συλλέχθηκαν και αξιοποιήθηκαν, εξάχθηκαν τα ακόλουθα συμπεράσματα προς αξιοποίηση και περαιτέρω επιστημονική συζήτηση:

- 1) Εντοπίστηκαν τρεις ζώνες ρηγμάτων ( $B \rightarrow N$ ,  $A \rightarrow \Delta$ ), όπου γίνεται εμφανής η διάκριση της ζώνης του ασβεστολίθου του Γερολέκα σε σχέση με το φλύσχη της ζώνης Παρνασσού Γκιώνας στην επιφάνεια, μέσω του μηχανισμού της εφίπτευσης (γωνία  $> 45^\circ$ ).
- 2) Η επαφή του ασβεστολίθου του ταβανιού με αυτόν του πατώματος, όπως έχει χαρακτηριστεί εμφανίζεται, στο μεγαλύτερο μέρος του χωρικού μοντέλου, σε υψόμετρο λίγο υψηλότερο από το επίπεδο της θάλασσας ( $\approx 70-400\mu$ ).
- 3) Λόγω της τεκτονικής της περιοχής κάποιες από τις προηγούμενες γεωτρήσεις είχαν απόληψη μόνο φλύσχη ή μεγάλο πάχος φλύσχη. Με την βοήθεια του τελικού μοντέλου, η συνέχιση των ερευνητικών έργων μπορούν να γίνουν σε συγκεκριμένα σημεία, όπου θα κριθεί σκόπιμο και θα σχεδιαστούν με περισσότερη ακρίβεια.

Η επιτυχία της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε αποδεικνύει τη δυνατότητα εφαρμογής των γεωφυσικών μεθόδων στην επίλυση τέτοιου είδους προβλημάτων, μειώνοντας την αβεβαιότητα κατά την μεταλλευτική έρευνα, και βοηθώντας στην χωρική κατανόηση του υπεδάφους, της τεκτονικής και της αξιολόγησης και τοποθέτησης του κοιτάσματος στο χώρο. Η χρήση των γεωφυσικών στην μεταλλευτική δραστηριότητα γίνεται όλο και πιο συχνή και πολλές φορές καθίσταται ως αναγκαία και ως οικονομικά συμφέρουσα.

## 7 Βιβλιογραφία

### Ελληνική Βιβλιογραφία:

- Αποστολόπουλος Γ., 2013. Σημειώσεις Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής. Αθήνα : Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2013.
- Αποστολόπουλος Γ., 1993, ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΕΡΕΥΝΕΣ ΣΤΗ ΛΕΚΑΝΗ ΤΟΥ ΣΠΕΡΧΕΙΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ, Διδακτορική Διατριβή, Ε.Κ.Π.Α., 10.12681/eadd/2667
- Γουλιώτης Λ., 2014. Η τεκτονική δομή του όρους Γκιώνα και οι υδρολογικές του εφαρμογές. Μη δημοσιευμένο διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Αθηνών
- Λούης Ιω., 2002, Εισαγωγή στη Γεωφυσική Έρευνα, Εθνικό Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών
- Ορφανός Χ., 2011, Συνδυαστική γεωφυσική διερεύνηση υπεδάφους για τον εντοπισμό υπόγειων ανοιγμάτων, διδακτορική διατριβή, Ε.Μ.Π. , [dx.doi.org/10.26240/heal.ntua.441](https://dx.doi.org/10.26240/heal.ntua.441)

### Διεθνής Βιβλιογραφία:

- Aronis G. A. 1955. Geographical distribution, geological placing and aspects on the genesis of the Greek bauxites. Bull. Geol. Soc. Greece, 2, 55-79.
- Benardos A. and Katopodis D. 2011. Design of an underground bauxite exploitation in Greece. MPES 2011, 115-126
- Boyd Thomas M., 1999, Introduction to Geophysical Exploration. [mines.edu/fs\\_home/tboyd/GP311](https://mines.edu/fs_home/tboyd/GP311)
- Constable S.C., Parker R.L. and Constable C.G. 1989. Occam's inversion - A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. Geophysics, 52 (03), 289-300.
- Economopoulos J.N., Koronakis N.J., Sofianos A.I. 1993. Roof Failure Mechanisms In Greek Underground Bauxite Mines, ISRM International Symposium - EUROCK 93, Lisboa, Portugal.
- Griffin, W.P., 1949. Residual gravity in theory and practice. Geophysics 14:39-56
- Griffiths D. H. and R. F. King, 1976, Applied Geophysics For Engineers and Geologists , Pergamon Press
- Kang Liu a,b,c , Tianyao Hao a,b,c,e , \* , Hui Yang d , Baihong Wen d , Weijian Hu a,b , Enyuan He f , Ya, 2018, 3D gravity anomaly separation method taking into account the gravity response of the inhomogeneous mantle , Journal of Asian Earth Sciences 163 (2018) 212-223
- Lagios, E. and Hipkin, R.G., 1980. Density Determination by Applying Trend Surfaces to the Bouguer Anomaly. Edinburgh Univ., Dep. Geophys. Publ., &O/2, 30 pp.
- Makris I., 2013, A 3-D density model of Greece constrained by gravity and seismic data, Geophysical Journal International, Volume 194, Issue 1, July 2013, Pages 1-17

- Mandal Animesh , Niyogi Shankho, 2018, Filter assisted bi-dimensional empirical mode decomposition: a hybrid approach for regional-residual separation of gravity anomaly, *Journal of Applied Geophysics* 159 (2018) 218–227
- Maithya Justus , Yasuhiro Fujimitsu , Jun Nishijima,2020, Analysis of gravity data to delineate structural features controlling the Eburru geothermal system in Kenya, *Geothermics* 85 (2020) 101795
- Orfanos C., Leontarakis K., Apostolopoulos G., Athanassas K., and Kofakis P. 2018. Preparation Study Based on Borehole Data for Delphi-Distomon Mining Area to Better Design Geophysical Works. 2nd EAGE Conference on Geophysics for Mineral Exploration and Mining, Porto, Portugal.
- Parasnis, D.S., 1952. A study of rock densities in the English Midlands. *Geophys. Suppl. Mon. Not. R. Astron. Soc.* 6 (5), 252–271.
- Parasnis D. S. 1979, *Principles of Applied Geophysics* , London, Chapman and Hall
- Parasnis, D.S., 1986. *Principles of Applied Geophysics*. Chapman and Hall.
- Pawlowski, R.S., Hansen, R.O., 1990. Gravity anomaly separation by Wiener filtering. *Geophysics* 55, 539–548.
- Pirttijärvi M. 2008. GRABLOX: Gravity interpretation and modeling software based on 3-D block models. University of Oulu Department of Physics.
- Telford W. M., L. P. Geldart, R. E. Sheriff and D. A. Keys, 1976, *Applied Geophysics* , Cambridge University Press
- Telford, W.M., Geldart, L.P., et al., 1990. *Applied Geophysics*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Uwiduhaye Jean d’Amour et al. ,2018, Geophysical investigation using gravity data in Kinigi geothermal field, northwest Rwanda *Journal of African Earth Sciences* 139 (2018) 184e192