

## ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΕΠΑΦΩΝ ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΒΑΘΟΥΣ ΤΑΦΗΣ ΤΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΠΗΓΩΝ ΑΠΟ ΤΑ ΑΕΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΣΤΗΝ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ ΚΑΙ ΘΡΑΚΗ

Σταμπολίδης Α. και Τσόκας Γ.

Τομέας Γεωφυσικής, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ. 541 24 Θεσσαλονίκη,  
astamp@lemnos.geo.auth.gr, gtsokas@geo.auth.gr

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή παρουσιάζουμε την επεξεργασία που έγινε στα ψηφιοποιημένα αερομαγνητικά δεδομένα της Μακεδονίας και Θράκης. Η επεξεργασία αυτή έγινε με σκοπό τον υπολογισμό των μαγνητικών επαφών και των βαθών ταφής των μαγνητικών πηγών στην περιοχή μελέτης. Τρεις μέθοδοι εφαρμόστηκαν για τους υπολογισμούς αυτούς: η μέθοδος της οριζόντιας βαθμίδας, η μέθοδος του αναλυτικού σήματος και η μέθοδος του τοπικού κυματαριθμού.

Για τον υπολογισμό του βάθους ταφής των μαγνητικών πηγών από τα αερομαγνητικά δεδομένα, είναι πρώτα απαραίτητο να υπολογισθούν οι θέσεις των μαγνητικών επαφών. Αυτό γίνεται με την κατασκευή κατάλληλης συνάρτησης, η οποία θα παρουσιάζει ακρότατα πάνω από τις επαφές. Αρκετές τέτοιες συναρτήσεις υπάρχουν στην βιβλιογραφία, όπως η συνάρτηση του μεγέθους της οριζόντιας βαθμίδας (Cordell & Grauch 1982, Cordell & Grauch 1985, Blakely & Simpson 1986), η συνάρτηση του μεγέθους του αναλυτικού σήματος (Nabighian 1972, Roest et al. 1992, Roest & Pilkington 1993), και ο τοπικός κυματαριθμός (Thurston & Smith 1997, Smith et al. 1998). Σε κάθε περίπτωση, η ίδια συνάρτηση που χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό των θέσεων των επαφών, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την εκτίμηση του βάθους ταφής των μαγνητικών πηγών στις θέσεις αυτές.

Οι θέσεις των μαγνητικών επαφών που υπολογίστηκαν για κάθε μια από τις τρεις μεθόδους ανάλυσης συνδυάζονται σε ένα χάρτη για να βοηθήσουν στην ερμηνεία των προτεινόμενων θέσεων μαγνητικών επαφών. Αν και οι επικαλυπτόμενες επαφές μπορεί να θεωρηθούν πιο αξιόπιστες, αυτό δεν είναι κριτήριο για την επιλογή των προτεινόμενων επαφών.

Και οι τρεις μέθοδοι ανάλυσης ήταν επιτυχείς τόσο στον εντοπισμό βαθύτερων μαγνητικών πηγών μέσα σε λεκάνες όσο και επιφανειακών πηγών σε περιοχές με επιφανειακές εκδηλώσεις του κρυσταλλικού υποβάθρου. Ανάλογα με το μετασχηματισμό του μαγνητικού πεδίου που χρησιμοποιούμε σαν εισαγωγή στις μεθόδους οριζόντιας βαθμίδας και αναλυτικού σήματος μπορούμε να υπολογίζουμε τα ελάχιστα και μέγιστα βάθη ταφής των μαγνητικών επαφών. Τα βάθη της μεθόδου του τοπικού κυματαριθμού είναι γενικά βαθύτερα από τα ελάχιστα που υπολογίσαμε στις προηγούμενες μεθόδους, και οφείλεται στο ότι η μέθοδος του τοπικού κυματαριθμού είναι ανεξάρτητη του μοντέλου των πηγών.

### 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα μαγνητικά δεδομένα συνήθως χρησιμοποιούνται για την χαρτογράφηση μαγνητικών ελασμάτων και/ή επαφών, όπως τα ρήγματα. Η ερμηνεία των μαγνητικών δεδομένων περιπλέκεται λόγω της διπολικής φύσης του μαγνητικού πεδίου, των ασυμμετρικών ανωμαλιών που δημιουργούνται από μη κατακόρυφες διευθύνσεις μαγνητίσεων, ασυμμετρικών ανωμαλιών λόγω μη κατακόρυφων μαγνητικών επαφών και πιθανών μετατοπίσεων μεταξύ των άκρων των μαγνητικών πηγών και των χαρακτηριστικών σημείων του μαγνητικού πεδίου (μέγιστα, ελάχιστα και σημείων μετάβασης).

Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι που έχουν σχεδιαστεί για να απλοποιήσουν τα μαγνητικά δεδομένα, αφαιρώντας μια ή περισσότερες από τις παραπάνω αιτίες πολυπλοκότητας. Ο μετασχηματισμός της αναγωγής στον πόλο (Baranov 1957), σε συντομογραφία RTP, αφαιρεί την ασυμμετρία που οφείλεται σε μη κατακόρυφη μαγνήτιση, ενώ ο μετασχηματισμός της ψευδοβαρύτητας (Baranov

1957), σε συντομογραφία PSG, μετατρέπει το διπολικό μαγνητικό πεδίο σε μονοπολικό, ανάλογο του βαρυτικού.

Οι Blakely & Simpson (1986) δημοσίευσαν την πρώτη αυτόματη μέθοδο για τον εντοπισμό των οριζόντιων θέσεων μαγνητικών επαφών σε κανονικοποιημένα (gridded) μαγνητικά δεδομένα. Η μέθοδος τους βασίζεται στην παρατήρηση των Cordell & Grauch (1985) ότι τα μέγιστα της οριζόντιας βαθμίδας του μετασχηματισμού της ψευδοβαρύτητας ενός μαγνητικού πεδίου, βρίσκονται πάνω από κατακόρυφες μαγνητικές επαφές. Ένα παράθυρο 3x3 περνά πάνω από τον κάρναβο (grid) των τιμών της οριζόντιας βαθμίδας, σε συντομογραφία HGM, και γίνεται προσπάθεια να εντοπιστούν οι κορυφές (horizontal gradient maxima) που αντιστοιχούν στα όρια των μαγνητικών επαφών.

Οι Roest & Pilkington (1993) πρότειναν την χρήση του HGM για τον υπολογισμό βαθών από την κορυφή των μαγνητικών επαφών. Άλλες συναρτήσεις οι οποίες έχουν μέγιστα πάνω από τις μαγνητικές επαφές και μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην εκτίμηση των βαθών τους είναι το τετράγωνο του πλάτους του αναλυτικού σήματος (Roest et al. 1992) και ο τοπικός κυματάρθρωτος (Thurston & Smith 1997, Smith et al. 1998). Οι παραπάνω μέθοδοι χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση των αερομαγνητικών δεδομένων της Μακεδονίας και Θράκης για τον εντοπισμό των μαγνητικών επαφών και την εκτίμηση του βάθους ταφής τους.

## 2 ΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Τα μαγνητικά δεδομένα της παρούσας μελέτης προέρχονται από τις από αέρος καταγραφές του ολικού μαγνητικού πεδίου που πραγματοποίησε η εταιρία ABEM (AB Elektrisk Malmletning) το 1966, για λογαριασμό του ελληνικού Ινστιτούτου Γεωλογικών και Υπεδάφινων Ερευνών, σημερινό ΙΓΜΕ.

Η κάλυψη της ΒΑ Ελλάδας έγινε στο διάστημα μεταξύ 23 Ιουνίου και 13 Οκτωβρίου 1966 (ABEM 1967). Συνολικά, πραγματοποιήθηκαν 30192.9 Km γραμμών πτήσεων, καλύπτοντας μια έκταση 22.000 Km<sup>2</sup> περίπου. Τα όρια της περιοχής διασκόπησης περιορίζονται, στα δυτικά από την εθνική οδό Θεσσαλονίκης-Ευζώνων και τα σύνορα με την πρώην Γιουγκοσλαβική Δημοκρατία της Μακεδονίας (F.Y.R.O.M.), στα ανατολικά από την οδό Αλεξανδρούπολης – Διδυμοτείχου, στα νότια από την θάλασσα του Β. Αιγαίου και στα βόρεια από τα σύνορα με Βουλγαρία και F.Y.R.O.M.

Η μαγνητική διασκόπηση έγινε με πτήσεις σταθερού ύψους πτήσης 275 ± 75 m, πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, ακολουθώντας την τοπογραφία (terrain clearance), ενώ η απόσταση μεταξύ των γραμμών πτήσης ήταν περίπου 800 m. Η διεύθυνση των γραμμών πτήσης ήταν ΔΝΔ-ΑΒΑ, κάθετη στην κύρια διεύθυνση των Ελληνίδων. Κάθετα στις προηγούμενες έγιναν οι γραμμές ελέγχου (tie lines), με μέση απόσταση 30 km, περίπου.

Τα δεδομένα αυτά είναι πλέον διαθέσιμα σε ηλεκτρονική μορφή, αφού ψηφιοποιήθηκαν και υπέστησαν τις αναγκαίες διορθώσεις (Σταμπολίδης 1999).

## 3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Και οι τρεις μέθοδοι που εφαρμόζονται στην παρούσα εργασία έχουν μια κοινή προσέγγιση στον προσδιορισμό των οριζόντιων θέσεων και του βάθους ταφής των μαγνητικών επαφών. Για μονοδιάστατα δεδομένα ένα παράθυρο τριών σημείων κινείται κατά μήκος του προφίλ της παραγωγού και γίνεται προσπάθεια να προσαρμοστεί μια παραβολική κορυφή σε κάθε τριάδα δεδομένων. Αν εντοπιστεί μια κορυφή, η οριζόντια θέση της κορυφής ορίζεται ως θέση της μαγνητικής επαφής. Για κάθε μια μέθοδο η παράγωγος κοντά στην κορυφή δίνεται από μια σχέση της μορφής

$$Z(h) = \frac{K_Z Z}{(h - h_0)^2 + z_0^2} \quad (1),$$

όπου Z είναι το πλάτος της παραγωγού, K<sub>Z</sub> είναι μια σταθερά που εξαρτάται από την μέθοδο, z<sub>0</sub> είναι το βάθος, h<sub>0</sub> είναι η οριζόντια συντεταγμένη της κορυφής και |h - h<sub>0</sub>| είναι η οριζόντια απόσταση από την κορυφή.

Για δεδομένα δύο διαστάσεων χρησιμοποιείται η προσέγγιση των Blakely & Simpson (1986) με την χρήση ενός παραθύρου 3x3, μέσα στο οποίο αναζητούνται τα τοπικά μέγιστα. Αν βρεθούν τουλάχιστον δύο τοπικά μέγιστα, η τοπική παράταξη υπολογίζεται αναζητώντας πρόσθετα

μέγιστα στην περιφέρεια του παραθύρου 3x3, ή μέσα σε ένα μεγαλύτερο παράθυρο 5x5 και προσαρμόζοντας στην συνέχεια μια ευθεία ελαχίστων τετραγώνων στα εσωτερικά και περιφερειακά μέγιστα. Τα δεδομένα στο παράθυρο (συμπεριλαμβανομένων και των υπολογισμένων μεγίστων) εξάγονται μέσα σε μια ζώνη κάθετα στην διεύθυνση της παράταξης και το βάθος υπολογίζεται με την χρήση ελαχίστων τετραγώνων.

Η **μέθοδος της οριζόντιας βαθμίδας** χρησιμοποιεί την τιμή της οριζόντιας βαθμίδας,  $H$ , (HGM) που για τις δύο διαστάσεις δίνεται από τη σχέση

$$|H(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial M}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial y}\right)^2} \quad (2),$$

όπου  $M$  είναι το μαγνητικό πεδίο, είτε ανηγμένο στον πόλο, (RTP), είτε αφού υποστεί το μετασχηματισμό της ψευδοβαρύτητας, (PSG).

Η μέθοδος της οριζόντιας βαθμίδας όταν εφαρμόζεται στο ανηγμένο στον πόλο μαγνητικό πεδίο (RTP) εντοπίζει με ακρίβεια τις κορυφές απομονωμένων κατακόρυφων μαγνητικών επαφών μεγάλου πάχους, ενώ όταν εφαρμόζεται στον πεδίο του μετασχηματισμού της ψευδοβαρύτητας (PSG) δίνει με ακρίβεια τις θέσεις των απομονωμένων κορυφών οριζόντιων λεπτών ελασμάτων (Phillips, 2000). Οι Roest & Pilkington (1993) έδειξαν ότι στην τελευταία περίπτωση το,  $H$ , (HGM) δίνεται από την σχέση

$$|H(h)| = \frac{K_H}{(h - h_0)^2 - z_0^2} \quad (3)$$

όπου  $K_H = 2kFz_0$ ,  $k$  είναι η διαφορά μαγνητικής επιδεκτικότητας και  $F$  η ένταση του γεωμαγνητικού πεδίου, ενώ παρόμοια σχέση ισχύει και στην περίπτωση που το  $M$  είναι το ανηγμένο στον πόλο μαγνητικό πεδίο. Αν οι πηγές έχουν κλίση, τότε οι θέσεις των επαφών που προσδιορίζονται από την μέθοδο είναι μετατεθειμένες προς την διεύθυνση της κλίσης, σε σχέση με τις πραγματικές θέσεις των κορυφών (Grauch & Cordel 1987).

Τα βάθη ταφής των οροφών των μαγνητικών πηγών που υπολογίζονται από την μέθοδο της οριζόντιας βαθμίδας είναι ακριβή στην περίπτωση που στο πεδίο έχει γίνει αναγωγή στον πόλο (RTP) και οι μαγνητικές επαφές έχουν μεγάλο πάχος, ενώ στις υπόλοιπες περιπτώσεις επαφών παίρνουμε ελάχιστα βάθη ταφής. Όταν τα δεδομένα είναι ψευδοβαρυτικά τότε η εκτίμηση του βάθους ταφής είναι ακριβής για λεπτά οριζόντια ελάσματα, ενώ για τις υπόλοιπες πηγές τα βάθη που υπολογίζονται είναι τα μέγιστα (Phillips 2000).

Η **μέθοδος του αναλυτικού σήματος** χρησιμοποιεί το τετράγωνο του πλάτους του αναλυτικού σήματος, το οποίο για τις δύο διαστάσεις δίνεται από τη σχέση

$$|A(x, y)|^2 = \left(\frac{\partial M}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial z}\right)^2 \quad (4)$$

όπου  $M$  είναι το μαγνητικό πεδίο. Συνήθως οι οριζόντιες βαθμίδες υπολογίζονται στο πεδίο του χώρου, ενώ η κατακόρυφη βαθμίδα υπολογίζεται με την χρήση του μετασχηματισμού Fourier στο πεδίο των κυματαρίθμων.

Αν το  $M$  είναι το μαγνητικό πεδίο μιας απομονωμένης μαγνητικής επαφής που εκτείνεται σε μεγάλο βάθος, τότε το τετράγωνο του πλάτους του αναλυτικού σήματος σύμφωνα με τον Nabighian (1972) δίνεται από τη σχέση

$$|A(h)|^2 = \frac{K_A}{(h - h_0)^2 - z_0^2} \quad (5)$$

όπου  $K_A = [2kF(1 - \cos^2 i \sin^2 \alpha) \sin \alpha]^2$ ,  $d$  η κλίση της επαφής,  $i$  η έκλιση του γεωμαγνητικού πεδίου, και  $\alpha$  η γωνία μεταξύ του προφίλ των μετρήσεων και του μαγνητικού βορρά. Όταν η μέθοδος εφαρμόζεται σε δεδομένα ολικού μαγνητικού πεδίου (MAG) δίνει καλές εκτιμήσεις των οριζοντίων θέσεων των μαγνητικών επαφών και λεπτών ελασμάτων ανεξάρτητα από την κλίση τους ή την κλίση του γεωμαγνητικού πεδίου. Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί εκτός από τα μαγνητικά δεδομένα ολικού πεδίου και σε δεδομένα PSG, καθώς και σε τιμές πρώτου κατακόρυφου ολοκληρώματος (FVI), του μαγνητικού πεδίου. Οι εκτιμήσεις βάθους στην πρώτη περίπτωση, (MAG), είναι ακριβείς

για μαγνητικές επαφές, αλλά υποεκτιμημένες για άλλου είδους πηγές, ενώ στην περίπτωση που το μαγνητικό πεδίο είναι στην μορφή του πρώτου κατακόρυφου ολοκληρώματος (FVI), έχουμε καλύτερες εκτιμήσεις βάθους για πηγές με μορφή λεπτών ελασμάτων.

Η μέθοδος του τοπικού κυματάριθμου (Thurston & Smith 1997, Smith et al. 1998) δίνει αρκετά καλές εκτιμήσεις για την θέση, το βάθος ταφής, την κλίση και την διαφορά μαγνητικής επιδεκτικότητας, επαφών απλών μαγνητικών πηγών. Ο τοπικός κυματάριθμος για κάρναβο μαγνητικού πεδίου  $M(x,y)$  δίνεται (Phillips 2000) από την σχέση

$$\kappa(x,y) = \frac{1}{|A(x,y)|^2} \left( \frac{\partial^2 M}{\partial x \partial z} \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial^2 M}{\partial y \partial z} \frac{\partial M}{\partial y} + \frac{\partial^2 M}{\partial z^2} \frac{\partial M}{\partial z} \right) \quad (6)$$

όπου το  $|A(x,y)|^2$  δίνεται από την σχέση (4). Οι Smith et al. (1998) έδειξαν ότι για απομονωμένες γραμμικές πηγές, ο τοπικός κυματάριθμος  $\kappa$  συνδέεται με το βάθος ταφής  $z_0$  με τη σχέση

$$\kappa(h) = \frac{K_L}{(h - h_0)^2 - z_0^2} \quad (7)$$

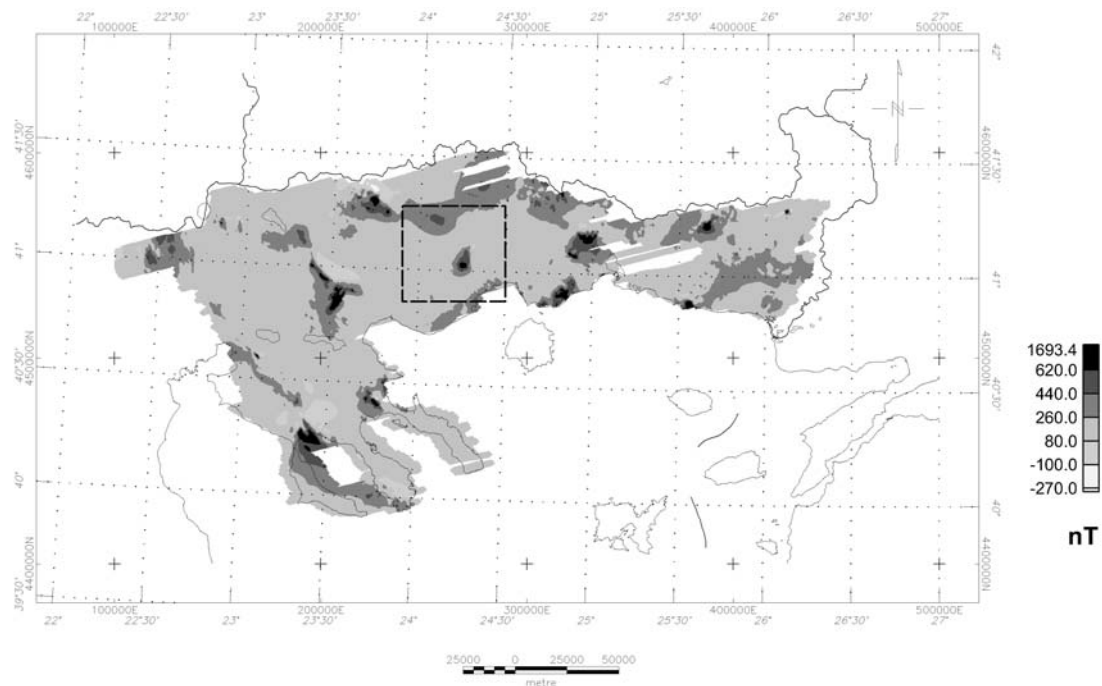
Το  $K_L$  εξαρτάται μόνο από το είδος της μαγνητικής πηγής (π.χ. μαγνητική επαφή, λεπτό έλασμα, κύλινδρος, σφαίρα). Οι εκτιμήσεις, λοιπόν, για τις θέσεις και τα βάθη ταφής είναι ανεξάρτητες των κλίσεων των μαγνητικών πηγών, των στοιχείων του γεωμαγνητικού πεδίου (έγκλιση, απόκλιση) και της παραμένουσας μαγνήτισης τους.

#### 4 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Το υπολειμματικό μαγνητικό πεδίο της Μακεδονίας και Θράκης (Σχ. 1), δηλαδή το ολικό μαγνητικό πεδίο μετά τις διορθώσεις και την αφαίρεση του μαθηματικού μοντέλου του διπολικού πεδίου της Γης IGRF (International Geomagnetic Reference Field) για την περίοδο των μετρήσεων, είναι η βάση της παραπέρα ανάλυσης που παρουσιάζουμε παρακάτω.

Επιλέξαμε ένα αντιπροσωπευτικό τμήμα του χάρτη (Σχ. 1) για την καλύτερη παρουσίαση της επεξεργασίας που κάναμε στο σύνολο των δεδομένων. Η έντονη μαγνητική ανωμαλία που εμφανίζεται στο κέντρο του σχήματος (2A) προκαλείται από το γρανίτη των Φιλιππών, ο οποίος δεν έχει επιφανειακή εκδήλωση, η γραμμική ανωμαλία με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ, στο νοτιοανατολικό τμήμα του οφείλεται στον γρανίτη του Συμβόλου, ενώ αυτή στα βορειοδυτικά αντιστοιχεί στον πλουτωνίτη του Φαλακρού όρους.

Η μέθοδος της οριζόντιας βαθμίδας εφαρμόστηκε στα μαγνητικά δεδομένα μετά την αναγωγή τους στο πόλο (RTP) με στόχο να εντοπιστούν οι θέσεις των μαγνητικών επαφών και τα ελάχιστα βάθη των μαγνητικών πηγών. Στο σχήμα 2 παρουσιάζεται η ακολουθία επεξεργασίας για το επιλεγμένο τμήμα του αερομαγνητικού χάρτη (Σχ. 1). Η αναγωγή στον πόλο (Σχ. 2B) αφαιρεί την ασυμμετρία που οφείλεται σε μη κατακόρυφη μαγνήτιση. Στο σχήμα 2Γ παρουσιάζεται ο μετασχηματισμός της επιπεδοποίησης (TER-RTP) ο οποίος χωρίζει την εικόνα του πεδίου σε περιοχές ίσης μαγνήτισης με απότομα όρια (Cordell & McCafferty 1989, Phillips 1992, Phillips 1997). Οι περιοχές που δημιουργούνται αντιστοιχούν σε γεωλογικούς σχηματισμούς με διαφορετικές μαγνήσεις και η μορφή του "επιπεδοποιημένου" πεδίου δίνει την εντύπωση γεωλογικού χάρτη. Στο σχήμα 2Δ παρουσιάζεται το μέγεθος της οριζόντιας βαθμίδας (HGM-RTP), ενώ στο σχήμα 2Ε έχουν τοποθετηθεί οι υπολογισμένες κορυφές των μαγνητικών πηγών και σύμφωνα με αυτά που αναφέρθηκαν προηγουμένως αντιστοιχούν στα ελάχιστα βάθη από την κορυφή των πηγών, με σφάλμα μικρότερο ή ίσο του 20 % (HGM-HDEP). Στο σχήμα 2ΣΤ οι προηγούμενες εκτιμήσεις έχουν τοποθετηθεί στο χάρτη του "επιπεδοποιημένου" πεδίου (TER-RTP-HDEP). Ο κώδικας των συμβόλων για τα εκτιμώμενα βάθη παρουσιάζεται στον πίνακα 1.



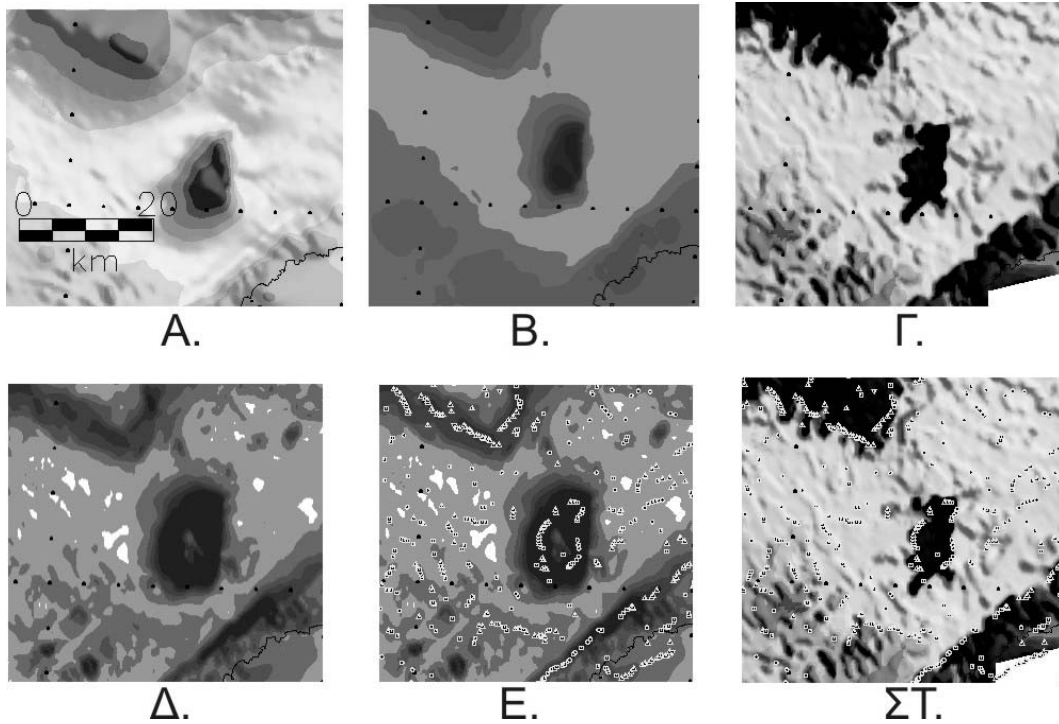
Σχήμα 1. Το υπολειμματικό μαγνητικό πεδίο στην Μακεδονία και Θράκη. Αερομαγνητικός χάρτης με μέσο ύψος πτήσης 275 μέτρα. Οι διακεκομμένες γραμμές οριοθετούν το τμήμα του χάρτη που επιλέχθηκε για την παρουσίαση της επεξεργασίας.

Πίνακας 1. Ο κώδικας των συμβόλων για τα εκτιμώμενα βάθη ταφής μαγνητικών επαφών.

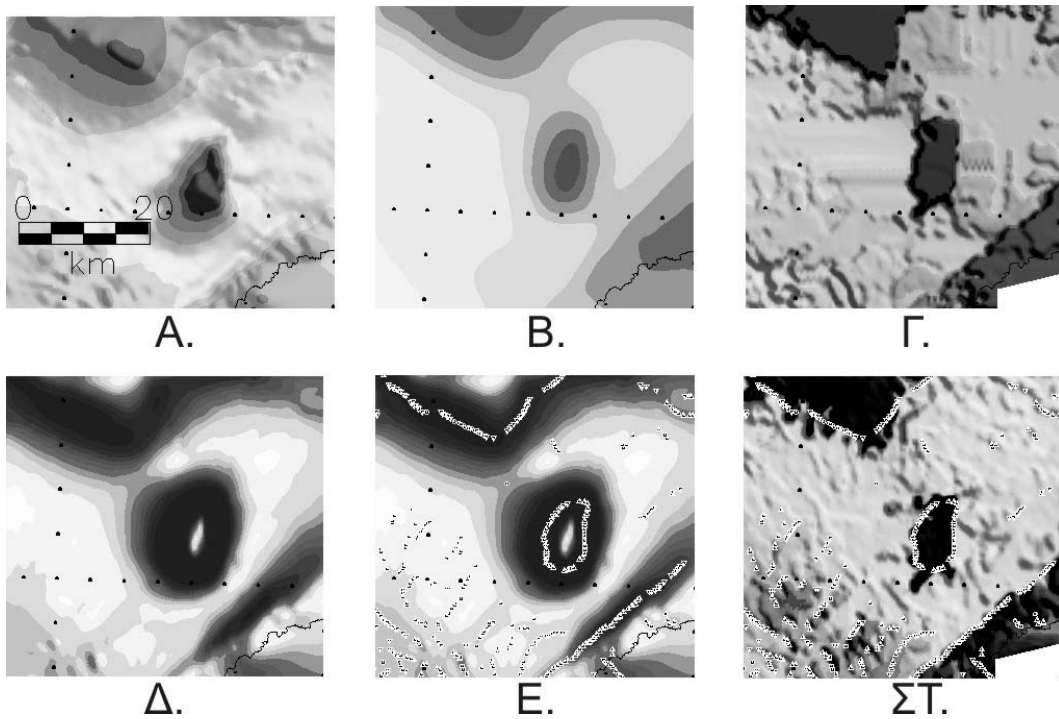
Σύμβολο	Ελάχιστο βάθος (km)	Μέγιστο βάθος (km)
Κύκλος	0.0	0.5
Τετράγωνο	0.5	1.0
Τρίγωνο	1.0	2.5
Ανεστραμένο τρίγωνο	2.5	5.0
Οκτάγωνο	5.0	20

Η μέθοδος της οριζόντιας βαθμίδας εφαρμόστηκε ξανά στα μαγνητικά δεδομένα, αυτή τη φορά μετά τον μετασχηματισμό της ψευδοβαρύτητας, (PSG), ο οποίος μετατρέπει το διπολικό μαγνητικό πεδίο σε μονοπολικό, με στόχο να εντοπιστούν οι θέσεις των μαγνητικών επαφών και τα μέγιστα βάθη τους. Παρόμοια επεξεργασία με αυτή που εφαρμόστηκε στο ανηγμένο στον πόλο μαγνητικό πεδίο, εφαρμόστηκε και στο πεδίο της ψευδοβαρύτητας. Έτσι, στο σχήμα 3Α παρουσιάζεται το αρχικό πεδίο, στο σχήμα 3Β ο μετασχηματισμός της ψευδοβαρύτητας (PSG), στο σχήμα 3Γ το επιπεδοποιημένο πεδίο του μετασχηματισμού της ψευδοβαρύτητας (TER-PSG), στο σχήμα 3Δ παρουσιάζεται το μέγεθος της οριζόντιας βαθμίδας του πεδίου της ψευδοβαρύτητας (HGM-PSG), ενώ στα σχήματα 3Ε και 3ΖΤ παρουσιάζονται τα μέγιστα βάθη που υπολογίσθηκαν με την μέθοδο της οριζόντιας βαθμίδας στους χάρτες του μεγέθους της οριζόντιας βαθμίδας (HGM-PSG-HDEP) και επιπεδοποιημένου πεδίου (TER-PSG-HDEP), αντίστοιχα. Ο κώδικας των συμβόλων για τα εκτιμώμενα βάθη είναι αυτός του πίνακα 1.

Η μέθοδος του αναλυτικού σήματος εφαρμόστηκε αρχικά στα δεδομένα ολικού μαγνητικού πεδίου (MAG) με σκοπό να υπολογισθούν με ακρίβεια τα βάθη ταφής, και στην συνέχεια στο πεδίο του πρώτου κατακόρυφου ολοκληρώματος (FVI) του μαγνητικού πεδίου. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω οι εκτιμήσεις για το βάθος ταφής στην πρώτη περίπτωση (MAG) είναι ακριβείς για μαγνητικές επαφές, αλλά υποεκτιμημένες για άλλου είδους πηγές, ενώ στην δεύτερη περίπτωση (FVI) έχουμε καλύτερες εκτιμήσεις βάθους για πηγές με μορφή λεπτών ελασμάτων.



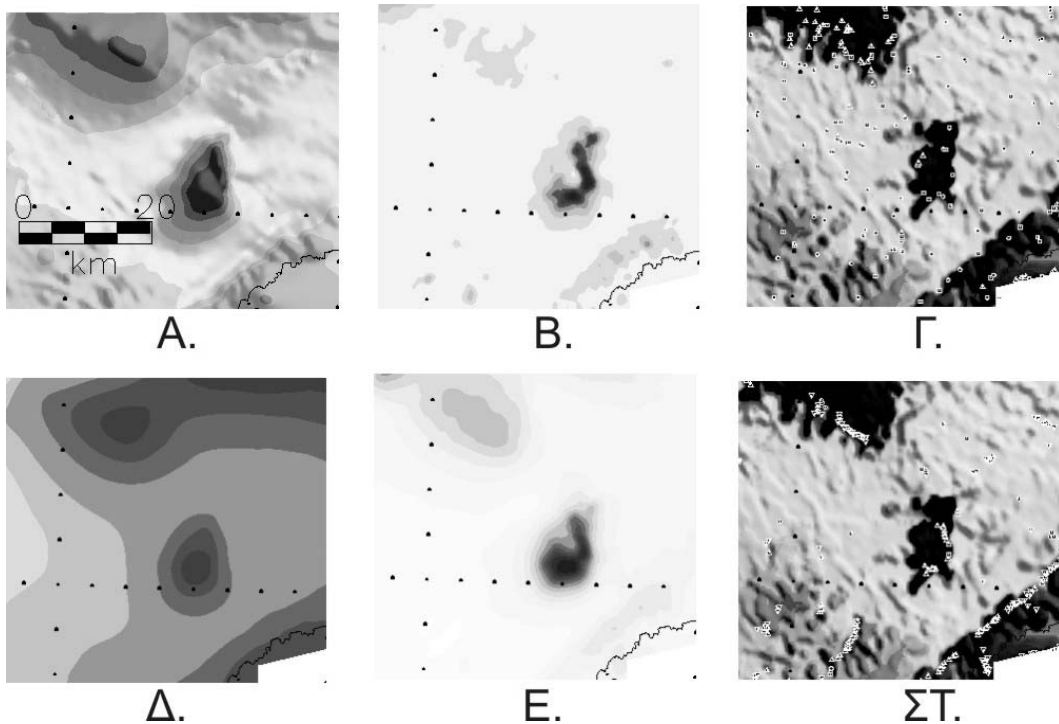
Σχήμα 2. Επεξεργασία μαγνητικών δεδομένων με την μέθοδο της οριζόντιας βαθμίδας στο ανηγμένο στον πόλο μαγνητικό πεδίο (RTP). Επεξήγηση στο κείμενο. Υψηλές τιμές αντιστοιχούν σε σκούρα χρώματα.



Σχήμα 3. Επεξεργασία μαγνητικών δεδομένων με την μέθοδο της οριζόντιας βαθμίδας στο πεδίο της ψευδοβαρύτητας (PSG). Επεξήγηση στο κείμενο. Υψηλές τιμές αντιστοιχούν σε σκούρα χρώματα.

Στο σχήμα 4 παρουσιάζεται η ακολουθία της επεξεργασίας με την μέθοδο του αναλυτικού σήματος στο τμήμα του αερομαγνητικού χάρτη (Σχ. 1) που ορίζεται από τις διακεκομμένες γραμμές. Το σχήμα 4Α είναι το ολικό μαγνητικό πεδίο (MAG), το σχήμα 4Β είναι το πλάτος του αναλυτικού σήματος για το προηγούμενο πεδίο (AS-MAG), ενώ το σχήμα 4Γ παρουσιάζονται οι θέσεις των μαγνητικών επαφών και οι εκτιμήσεις βάθους της μεθόδου, τοποθετημένες πάνω στο χάρτη της επιπεδοποίησης της αναγωγής στον πόλο (TER-RTP-ASDEP-MAG). Ο κώδικας των συμβόλων για τα εκτιμώμενα βάθη παρουσιάζεται στον πίνακα 1.

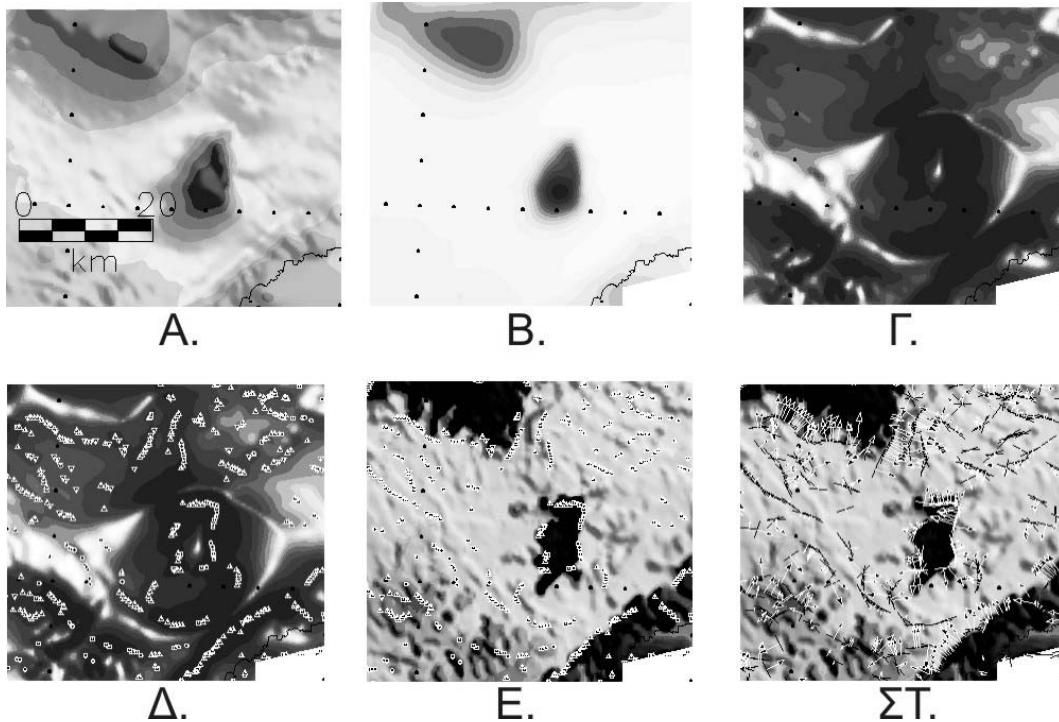
Αντίστοιχα, στα σχήματα 4Δ, 4Ε και 4ΣΤ παρουσιάζονται το πεδίο του πρώτου κατακόρυφου ολοκληρώματος (FVI), του πλάτους του αναλυτικού σήματος του πεδίου αυτού (AS-FVI) και οι θέσεις των μαγνητικών επαφών και οι εκτιμήσεις βάθους της μεθόδου, τοποθετημένες πάνω στο χάρτη της επιπεδοποίησης της αναγωγής στον πόλο (TER-RTP-ASDEP-FVI).



Σχήμα 4. Επεξεργασία μαγνητικών δεδομένων με την μέθοδο του αναλυτικού σήματος (AS). Επεξήγηση στο κείμενο. Υψηλές τιμές αντιστοιχούν σε σκούρα χρώματα.

Τελευταία εφαρμόστηκε η μέθοδος του τοπικού κυματάριθμου. Η μέθοδος αυτή επειδή χρησιμοποιεί δευτερές παραγώγους είναι πολύ ευαίσθητη στον θόρυβο που τυχών υπάρχει στα δεδομένα. Για να βελτιώσουμε τον λόγο του σήματος προς θόρυβο στα δεδομένα είναι συνήθως απαραίτητο να συνεχίσουμε το πεδίο προς τα πάνω πριν την εφαρμογή της μεθόδου. Η επεξεργασία αυτή είναι ανάλογη με την εφαρμογή φίλτρου αποκοπής των υψηλών συχνοτήτων, που συνήθως περιέχουν και το μεγαλύτερο ποσοστό του θορύβου των δεδομένων. Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης έγινε άνω συνέχεια του πεδίου κατά 725 μέτρα πάνω την επιφάνεια των μετρήσεων με την μέθοδο Chessboard (Cordell 1985), οπότε το συνολικό υψόμετρο από την επιφάνεια του εδάφους του νέου πεδίου που δημιουργήθηκε είναι 1km (1km terrain clearance). Στο σχήμα 5 παρουσιάζεται η ακολουθία της επεξεργασίας με την μέθοδο του αναλυτικού σήματος στο τμήμα του αερομαγνητικού χάρτη (Σχ. 1) που ορίζεται από τις διακεκομμένες γραμμές. Το σχήμα 5Α είναι το ολικό μαγνητικό πεδίο (MAG), το σχήμα 5Β είναι το συνεχισμένο προς τα πάνω πεδίο (UP), το σχήμα 5Γ είναι ο τοπικός κυματάριθμος (LW-UP), στο σχήμα 5Δ παρουσιάζονται οι θέσεις των μαγνητικών επαφών και οι εκτιμήσεις βάθους της μεθόδου, τοποθετημένες πάνω στο χάρτη του τοπικού κυματάριθμου (LW-UP-LOCDEP) και για σύγκριση με τις προηγούμενες μεθόδους (Σχ. 5Ε) στο χάρτη της επιπεδοποίησης της αναγωγής στον πόλο (TER-RTP-LOCDEP). Ο κώδικας των τιμών για τις εκτιμήσεις βάθους είναι αυτός του πίνακα 1. Στο σχήμα 5ΣΤ παρουσιάζονται δύο ακόμη παράγωγα της μεθόδου.

του του τοπικού κυματάριθμου, η παράταξη και η κλίση των μαγνητικών επαφών. Η παράταξη μιας μαγνητικής επαφής παρουσιάζεται με τμήμα ευθείας γραμμής, ενώ η κλίση της με βέλος το οποίο δείχνει την διεύθυνση της κλίσης της επαφής και έχει μέγεθος ανάλογο της γωνίας κλίσης της. Το μέγεθος είναι μέγιστο όταν η γωνία κλίσης είναι  $90^\circ$ , ενώ ελάχιστο όταν η γωνία πλησιάζει στην οριζόντιο ( $0^\circ$ ).



Σχήμα 5. Επεξεργασία μαγνητικών δεδομένων με την μέθοδο του τοπικού κυματάριθμου (LW). Επεξήγηση στο κείμενο. Υψηλές τιμές αντιστοιχούν σε σκούρα χρώματα.

## 5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

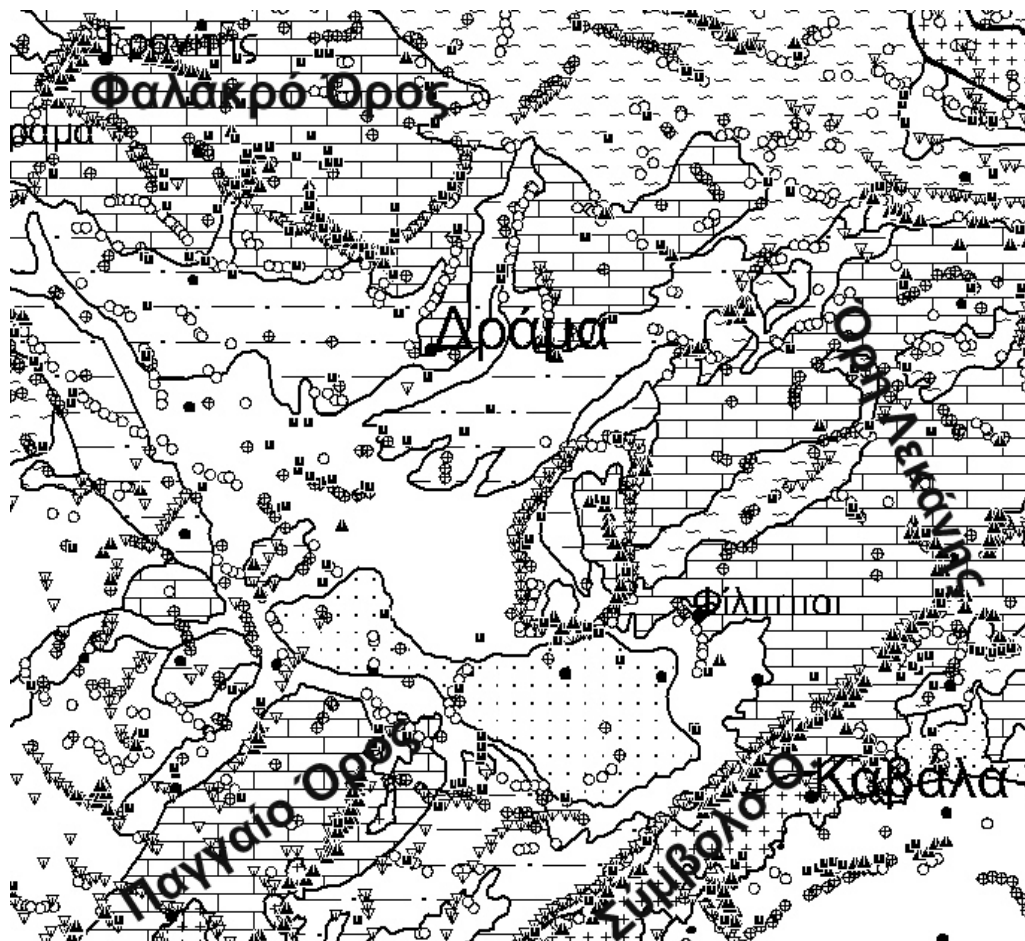
Γενικά, τα ακόλουθα κριτήρια χρησιμοποιήθηκαν για την επιλογή των τελικών θέσεων των επαφών από το σύνολο αυτών που υπολογίσθηκαν από τις μεθόδους: (1) Όπου οι επαφές της οριζόντιας βαθμίδας είναι απομονωμένες, αντιπροσωπεύουν την καλύτερη διαθέσιμη θέση επαφών. (2) Όπου οι επαφές της οριζόντιας βαθμίδας είναι παράλληλες και μετατεθειμένες ελαφρώς από τις επαφές του αναλυτικού σήματος, η επαφή του αναλυτικού σήματος αντιπροσωπεύει την αληθινή θέση επαφών και η επαφή της οριζόντιας βαθμίδας δείχνει την διεύθυνση βύθισης. (3) Όπου οι επαφές του αναλυτικού σήματος είναι απομονωμένες και δεν είναι ευθυγραμμισμένες γνωστές κατευθύνσεις θορύβου, παρέχουν τις αξιόπιστες θέσεις επαφών. (4) Όπου οι επαφές του αναλυτικού σήματος είναι ασυνεχές, μπορούν να συμπληρωθούν από τις επαφές του τοπικού κυματάριθμου.

Τα ελάχιστα και μέγιστα βάθη ταφής των μαγνητικών επαφών που υπολογίσθηκαν από τις μεθόδους της οριζόντιας βαθμίδας και αναλυτικού σήματος, καθώς και οι εκτιμήσεις βάθους ταφής της μεθόδου του τοπικού κυματάριθμου μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή αξιόπιστων μοντέλων των μαγνητικών πηγών. Για απομονωμένες μαγνητικές επαφές και λεπτά ελάσματα, ανεξάρτητα από την κλίση τους (π.χ. ρήγματα) η μέθοδος του τοπικού κυματάριθμου δίνει τα πιο αξιόπιστα αποτελέσματα, πρέπει όμως η λύση να βρίσκεται μεταξύ των ελαχίστων και μεγίστων που δίνουν οι άλλες μεθόδους. Οι εκτιμήσεις της μεθόδου του τοπικού κυματάριθμου δεν είναι ακριβής στην περίπτωση πιο πολύπλοκων σωμάτων, οπότε χρησιμοποιούμε τις ελάχιστες και μέγιστες εκτιμήσεις βαθών των άλλων μεθόδων.

Οι μαγνητικές επαφές που εντοπίστηκαν με τις διάφορες μεθόδους από την παραπάνω επεξεργασία τοποθετήθηκαν στο γεωλογικό χάρτη της περιοχής (Σχ. 6). Τα σημαντικότερα στοιχεία που



μπορούμε να διακρίνουμε στο σχήμα αυτό είναι α) τα πλευρικά όρια του γρανίτη των Φιλιππων, ο οποίος εμφανίζεται κάτω από τα ιζήματα και τα ανθρακικά πετρώματα της περιοχής, β) την συνέχεια του πλουτωνίτη της Καβάλας προς τα ΒΑ, κάτω από τα μάρμαρα στα Όρη Λεκάνης, γ) την κλίση προς τα ΒΔ που έχει το όριο του πλουτωνίτη, δ) τα πλευρικά όρια του πλουτωνίτη που εντοπίζεται κάτω από τα ανθρακικά πετρώματα του Φαλακρού όρους και ε) ένα πλήθος τεκτονικών γραμμών, μερικές από τις οποίες ταυτίζονται με χαρτογραφημένα ρήγματα όπως για παράδειγμα το ρήγμα ΒΑ των Φιλιππων μέσα στα μεταμορφωμένα πετρώματα.



Σχήμα 6. Εντοπισμός μαγνητικών επαφών με την επεξεργασία των μαγνητικών δεδομένων. Κωδικοί μεθόδων: ⊕-(HGM-RTP), ▽-(HGM-PSG), ■-(AS-MAG), ▲-(AS-FVI) και ○-(LW-UP). Γεωλογικοί σχηματισμοί: - μεταμορφωμένα, -ανθρακικά, -γρανίτες, -ιζήματα.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ABEM, 1967, Final Report on an Airborne Geophysical Survey carried out for the Greek Institute for Geology and Subsurface Research during the year 1966 by ABEM-AB Elektrisk Malmletning, Stockholm.
- Baranov, V., 1957, A new method for interpretation of aeromagnetic maps—pseudogravity anomalies; *Geophysics*, v. 22, p. 359-383.
- Blakely, R.J., and Simpson, R.W., 1986, Approximating edges of source bodies from magnetic or gravity anomalies; *Geophysics*, v.51, no.7, p.1494-1498.
- Cordell, L., 1985, Applications and problems of analytical continuation of New Mexico aeromagnetic data between arbitrary surfaces of very high relief, in *Proceedings of the International Meeting on Potential Fields in Rugged Topography*, Bulletin 7, 96-101, Institut de Geophysique de Universite de Lausanne, Lausanne, Switzerland.

- Cordell, Lindrith, and Grauch, V.J.S., 1982, Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data in the San Juan Basin, New Mexico: Society of Exploration Geophysicists, 52<sup>nd</sup> Annual Meeting, Abstracts and Bibliographies, p.246-247.
- Cordell, Lindrith, and Grauch, V.J.S., 1985, Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data in the San Juan basin, New Mexico *in* Hinze, W.J., ed., The utility of regional gravity and magnetic anomaly maps: Society of Exploration Geophysicists, p.181-197.
- Cordell, Lindrith, and McCafferty, A.E., 1989, A terracing operator for physical property mapping with potential field data: *Geophysics*, v.54, no.5, p.621-634.
- Grauch, V.J.S., and Cordell, Lindrith, 1987, Limitations on determining density or magnetic boundaries from the horizontal gradient of gravity or pseudogravity data: *Geophysics*, v.52, no.1, p.118-121.
- Nabighian, M.N., 1972, The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: its properties and use for automated anomaly interpretation: *Geophysics*, v.37, no.3, p.507-517.
- Phillips, J.D., 1992, TERRACE: A terracing procedure for gridded data, with Fortran programs, and VAX command procedure, Unix C-shell and DOS batch file implementations: U.S. Geological Survey Open-File Report 92-5, 27p., 1 diskette.
- Phillips, J.D., 1997, Potential-field geophysical software for the PC, version 2.2: U.S. Geological Survey Open-File Report 97-725, 34p.
- Phillips, J.D., 2000, Locating magnetic contacts: a comparison of the horizontal gradient, analytic signal, and local wavenumber methods: Society of Exploration Geophysicists, Expanded Abstracts with Biographies, 2000 Technical Program, v.1, p.402-405.
- Roest, W.R., and Pilkington, Mark, 1993, Identifying remanent magnetization effects in magnetic data: *Geophysics*, v.58, no.5, p.653-659.
- Roest, W.R., Verhoef, Jacob, and Pilkington, Mark, 1992, Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal: *Geophysics*, v.57, no.1, p.116-125.
- Smith, R.S., Thurston, J.B., Dai, Ting-Fan, and MacLeod, I.N., 1998, iSPI<sup>m</sup> - the improved source parameter imaging method: *Geophysical Prospecting*, v.46, p.141-151.
- Σταμπολίδης Α., 1999, Το Γεωμαγνητικό πεδίο στην Μακεδονία και την Θράκη και η σχέση του με την γεωφυσική και γεωλογική δομή της περιοχής». Διδακτορική διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, σελ.258.
- Syberg, F.J.R., 1972, A Fourier method for the regional-residual problem of potential fields: *Geophysical Prospecting*, v.20, p.47-75.
- Thurston, J.B., and Smith, R.S., 1997, Automatic conversion of magnetic data to depth, dip, and susceptibility contrast using the SPI<sup>m</sup> method: *Geophysics*, v.62, no.3, p.807-813

## ABSTRACT

### **LOCATION OF MAGNETIC CONTACTS AND DEPTH ESTIMATES FOR THE MAGNETIC SOURCES FROM THE AEROMAGNETIC DATA OF MACEDONIA AND THRACE**

Stampolidis A. and Tsokas G.

*Department of Geophysics, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki, 541 24, Thessaloniki, astamp@lemnos.geo.auth.gr, gtsokas@geo.auth.gr*

In this work we present the processing that applied to digitised aeromagnetic data from Macedonia and Thrace. This processing was aiming the calculation of magnetic contacts and depths of burial of magnetic sources in the region of study. Three methods were applied for these calculations: the method of horizontal gradient, the method of analytical signal and the method of local wavenumber.

All methods were successful in locating the deeper magnetic sources in basins and surface sources in regions with surface outcrops of the crystalline basement. Depending on the transformation of magnetic field we use as input for the methods of the horizontal gradient and analytical signal, we could calculate the minimum and maximum depths of burial for the magnetic contacts.

The locations of magnetic contacts that were calculated for every method of analysis were combined in a map in order to help in the interpretation of proposed magnetic contacts.