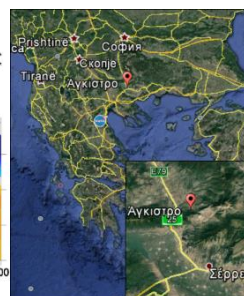
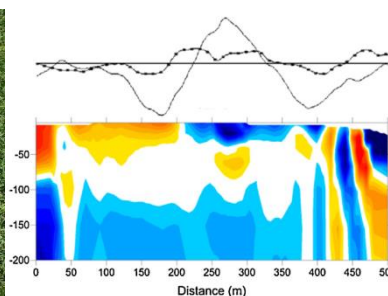




Εφαρμογή της μεθόδου του VLF στον εντοπισμό αγώγιμων ζωνών που συνδέονται με τις θερμές πηγές Αγκίστρου νομού Σερρών



ΚΟΡΔΑΤΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

Επιβλέπων Καθηγητής
Γεώργιος Βαργεμέζης
Αν. Καθηγητής Α.Π.Θ.

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2016

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη	5
Πρόλογος	7
1. Η περιοχή της μελέτης	9
1.1 Γεωλογία της ευρύτερης περιοχής.....	10
1.2 Γεωλογική σύσταση Αγκίστρου	15
2. Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος VLF	18
2.1 Ηλεκτρομαγνητική θεωρία.....	19
2.2 Μαγνητική συνιστώσα του H/M πεδίου	23
2.3 Πραγματική και φανταστική συνιστώσα δευτερογενούς πεδίου	24
2.4 Δέκτης VLF και διαδικασίες μέτρησης	26
3. Συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων	29
3.1 Συλλογή δεδομένων VLF	29
3.2 Επεξεργασία δεδομένων VLF	30
3.3 Αποτελέσματα επεξεργασμένων δεδομένων	33
4. Συμπεράσματα	56
5. Βιβλιογραφία.....	57

Περίληψη

Οι θερμές πηγές αποτελούσαν ανέκαθεν σημείο ενδιαφέροντος για τον άνθρωπο. Στην μελέτη αυτών συμβάλλει τόσο η επιστήμη της γεωθερμίας, όσο και της γεωφυσικής, με σκοπό την καλύτερη κατανόηση των μηχανισμών λειτουργίας τους, μεγιστοποιώντας παράλληλα την εκμετάλλευση και την προστασία τους.

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι η μελέτη της γεωφυσικής δομής της περιοχής του Άγκιστρου νομού Σερρών, όπου αναβλύζουν οι πηγές, καθώς και ο εντοπισμός πιθανών ρηξιγενών δομών με τις οποίες συνδέεται η δράση τους. Πιο συγκεκριμένα, η μελέτη αυτή πραγματοποιήθηκε με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο του VLF, η οποία επιτρέπει τον εντοπισμό ζωνών καταπόνησης καθώς και ρηγμάτων, τα οποία δεν έχουν επιφανειακές ενδείξεις, μέσα στα οποία λαμβάνει χώρα η κίνηση υπόγειου νερού.

Το γεγονός ότι η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος του VLF είναι μία σχετικά ανέξοδη, εύκολη, γρήγορη στη λήψη δεδομένων μέθοδος, καθώς και το ότι εντοπίζει με μεγάλη ακρίβεια αγωγίμες ζώνες, όπως είναι τα ρήγματα, την καθιστά τον καλύτερο υποψήφιο για την διεξαγωγή αυτής της μελέτης.

Abstract

Hot springs have always been a landmark for humanity. Studying them is not only a job for the geothermal science, but for geophysics as well, in order to better understand their function mechanisms, while maximizing their exploitation and protection.

The aim of this thesis is to study the geophysical structure in Aggistro of Serres prefecture, where the hot springs gush out, as well as track potential fault structures, with which their action is associated. More specifically, this study was conducted with the electromagnetic method of VLF, which allows the detection of stress zones as well as faults, which do not show any surface signs, within which groundwater flow takes place.

The fact that the electromagnetic method of VLF is a relatively inexpensive, easy, fast-obtaining data method, as well as the fact that it tracks conductive zones with high precision, such as cracks and faults, renders it the best candidate for the conduction of this study.

Πρόλογος

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η εφαρμογή της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου του VLF, ώστε να μελετηθεί η γεωφυσική δομή στην περιοχή του Αγκίστρου και να εντοπιστούν πιθανές αγώγιμες ζώνες, όπως είναι τα ρήγματα, με τα οποία συνδέεται η δράση των θερμών πηγών στην περιοχή.

Στο 1^ο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση της περιοχής μελέτης στο σύνολό της και πιο συγκεκριμένα περιγράφεται η γεωλογική δομή της ευρύτερης περιοχής του Αγκίστρου στον ελληνικό χώρο αρχικά, ενώ στη συνέχεια αναλύεται η γεωλογική σύσταση και δομή της περιοχής της μελέτης ειδικότερα.

Στο 2^ο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις έννοιες που διέπουν την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο του VLF με σκοπό την κατανόηση του πως αυτή λειτουργεί, καθώς και στις απαραίτητες διαδικασίες που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.

Στο 3^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα στοιχεία που συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, οι ενέργειες που πραγματοποιήθηκαν για την επεξεργασία τους, καθώς και τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ερμηνεία τους.

Στο 4^ο κεφάλαιο αναφέρονται κάποια βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν από τις μετρήσεις πεδίου και από την διπλωματική αυτή εργασία.

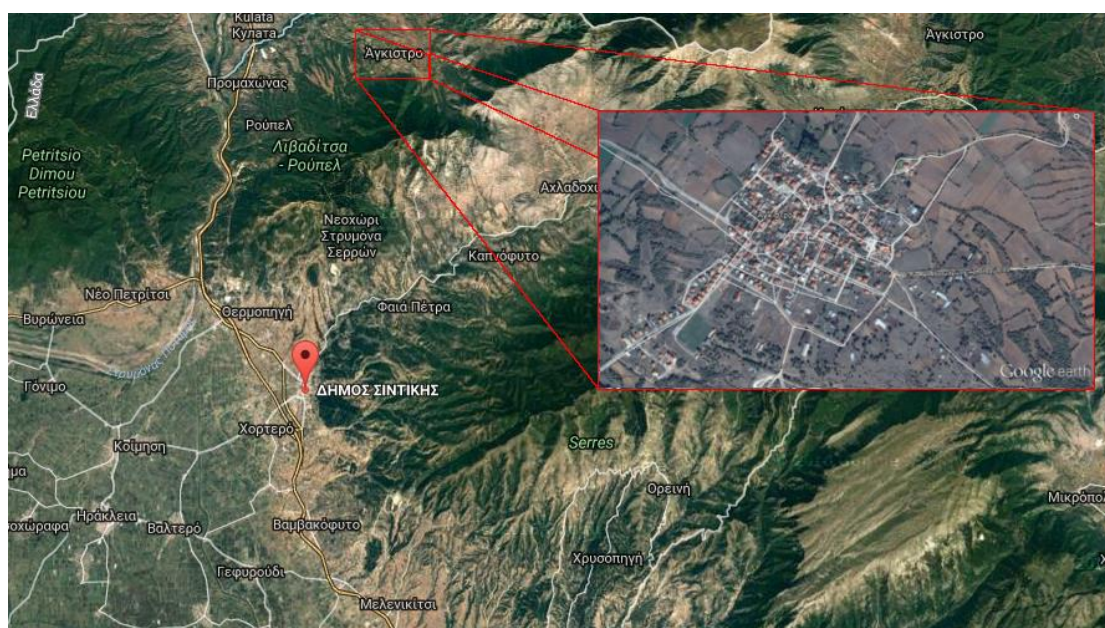
Στο 5^ο και τελευταίο κεφάλαιο παρατίθεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε στη δημιουργία της εργασίας.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υπεύθυνο της πτυχιακής μου εργασίας, κ. Βαργεμέζη Γεώργιο, Αν. Καθηγητή του Α.Π.Θ., για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του προς την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, καθώς και για τις συμβουλές του τόσο κατά τη διάρκεια των σπουδών μου, όσο και στο ύπαιθρο. Τον κ. Τσούρλο Παναγιώτη, Καθηγητή του Α.Π.Θ., επίσης για την πολύτιμη βοήθειά του όσον αφορά την παρούσα εργασία, αλλά και στον χώρο της εφαρμοσμένης γεωφυσικής γενικότερα. Τον κ. Τσόκα Γρηγόριο, Καθηγητή του Α.Π.Θ., για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου στα πρώτα μου βήματα, μυώντας με στον χώρο της εφαρμοσμένης γεωφυσικής. Τέλος, θα ήθελα να

ευχαριστήσω τους γονείς μου για την στήριξη και την εμπιστοσύνη τους σε μένα και τις επιλογές μου μέχρι σήμερα.

1. Η περιοχή της μελέτης

Το Άγκιστρο ανήκει στον Δήμο Σιντικής, στην δημοτική ενότητα Αγκίστρου του νομού Σερρών. Είναι χτισμένο στους πρόποδες του ομώνυμου όρους (ή αλλιώς όρος Τσιγκέλι), το οποίο είναι προέκταση του όρους Όρβηλος που διατρέχει τα Ελληνοβουλγαρικά σύνορα και είναι ισάξια καταναμεμημένο στις δύο χώρες. Φημίζεται για το φυσικό λουτρό που υπάρχει στην περιοχή, το οποίο είναι το παλαιότερο στον ελληνικό χώρο, και χρονολογείται από τη Βυζαντινή περίοδο (~950 μ.Χ.), αποτέλεσμα γεωθερμικής δράσης χαμηλής ενθαλπίας (~40°C). Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται αρχικά η περιοχή του Άγκιστρου μέσα από τον χάρτη του Google Earth, η οποία βρίσκεται 33 χιλιόμετρα βόρεια-βορειοδυτικά του νομού Σερρών και 7 χιλιόμετρα ανατολικά του Μεθοριακού Σταθμού Προμαχώνα, καθώς και το χαμάμ που βρίσκεται στην περιοχή. Αξίζει να σημειωθεί πως στη βόρεια Ελλάδα, και πιο συγκεκριμένα στο νομό Σερρών, εμφανίζεται η μεγαλύτερη ανάπτυξη γεωθερμικών πεδίων χαμηλής ενθαλπίας ($T < 100^{\circ}\text{C}$) στον ελληνικό χώρο.



Εικόνα 1-1 : Η περιοχή του Αγκίστρου μέσα από δορυφορική εικόνα του Google Earth



Εικόνα 1-2 : Το παλαιότερο φυσικό χαμάμ της Ελλάδας (950 μ.Χ.) (<http://www.agistro.com/toxamam.html/>)

1.1 Γεωλογία της ευρύτερης περιοχής

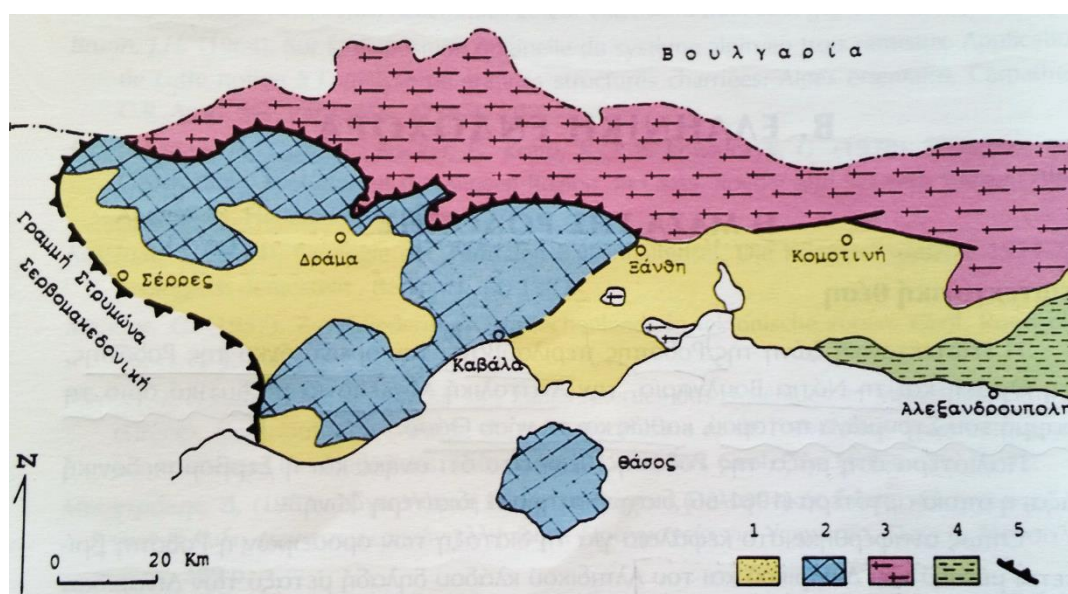
Όσον αφορά την γεωλογία της περιοχής, το Άγκιστρο ανήκει γεωτεκτονικά στη λεκάνη του Στρυμόνα, στο όριο δηλαδή μεταξύ της Ροδοπικής μάζας στα Ανατολικά και της Σερβομακεδονικής μάζας στα Δυτικά. Πιο συγκεκριμένα τοποθετείται στο νοτιοδυτικό κομμάτι της λεκάνης του Στρυμόνα, ποταμού που ρέει από τη Βουλγαρία και καταλήγει στο Βόρειο Αιγαίο Πέλαγος. Η λεκάνη αυτή είναι μία τυπική μετα-ορογενετική λεκάνη, η οποία σχηματίστηκε εξαιτίας τεκτονικών διεργασιών, και πιο συγκεκριμένα της εφίπνευσης της Σερβομακεδονικής μάζας πάνω στην Ροδοπική κατά το Ολιγόκαινο.

Η Ροδοπική μάζα αποτελείται από δύο τεκτονικές ενότητες : την κατώτερη ενότητα του Παγγαίου, και την ανώτερη του Σιδηρόνερου. Το Παγγαίο χωρίζεται σε τρεις ορίζοντες, έναν κατώτερο που αποτελείται κυρίως από ορθογνεύσιους, ο μεσαίος ο οποίος αποτελείται από μάρμαρα με μεγάλο πάχος, ο ανώτερος που αποτελείται από εναλλαγές μαρμάρων και σχιστολίθων, με την ηλικία της ενότητας

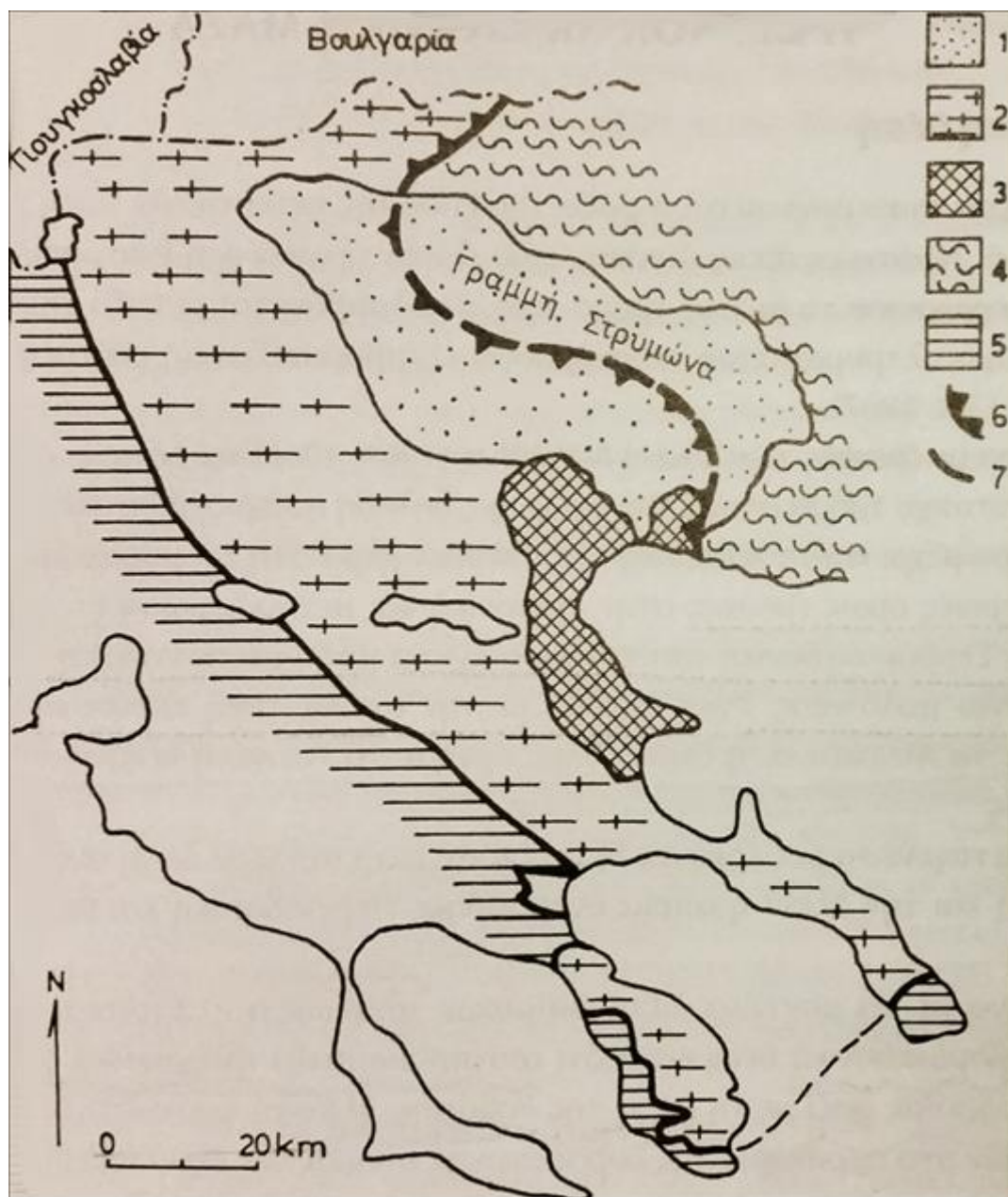
να είναι Ανώτερο Παλαιοζωικό (Πέρμιο). Το Σιδηρόνερο αποτελείται από σχιστόλιθους, μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους, ορθογνεύσιους, αμφιβολίτες, μιγματίτες και ενστρώσεις μαρμάρων, ηλικίας Λιθανθρακοφόρου. Οι ενότητες του Παγγαίου και του Σιδηρόνερου χωρίζονται μεταξύ τους με ένα ανάστροφο ρήγμα, το ρήγμα του Νέστου, το οποίο τοποθετεί το Σιδηρόνερο πάνω στο Παγγαίο κατά το Τριτογενές.

Σημαντική επίσης είναι η παρουσία ηφαιστιτών και πλουτωνιτών στην Ροδοπική μάζα, με ραδιοχρονολογήσεις να προσδιορίζουν την ηλικία αυτών από Ηώκαινο μέχρι Ολιγόκαινο, δηλαδή 50 με 25 εκατομμύρια χρόνια. Όσον αφορά τους ηφαιστίτες, είναι ρυόλιθοι, δακίτες, δολερίτες και ανδεσίτες με κύρια εμφάνισή τους στην περιοχή των Φερρών-Σαπών στον Έβρο και στα ελληνοβουλγαρικά σύνορα βόρεια της Ξάνθης. Οι πλουτωνίτες είναι γρανίτες (κεροστιλβικοί, βιοτιτικοί, μοσχοβιτικοί), διορίτες, γρανοδιορίτες, μονζονίτες και χαλαζιακοί μονζονίτες με κύρια εμφάνισή τους στην περιοχή του Παγγαίου, της Ξάνθης, της Βροντούς, του Παρανεστίου και του Πανοράματος. Ο γρανίτης της Βροντούς είναι αυτός ο οποίος σχετίζεται με τη δημιουργία του γεωθερμικού πεδίου στην περιοχή του Αγκίστρου.

Παρακάτω παραθέτονται εικόνες με το σκαρίφημα της μάζας της Ροδόπης, καθώς και των πλουτωνικών και ηφαιστειακών εμφανίσεων στην ευρύτερη περιοχή.



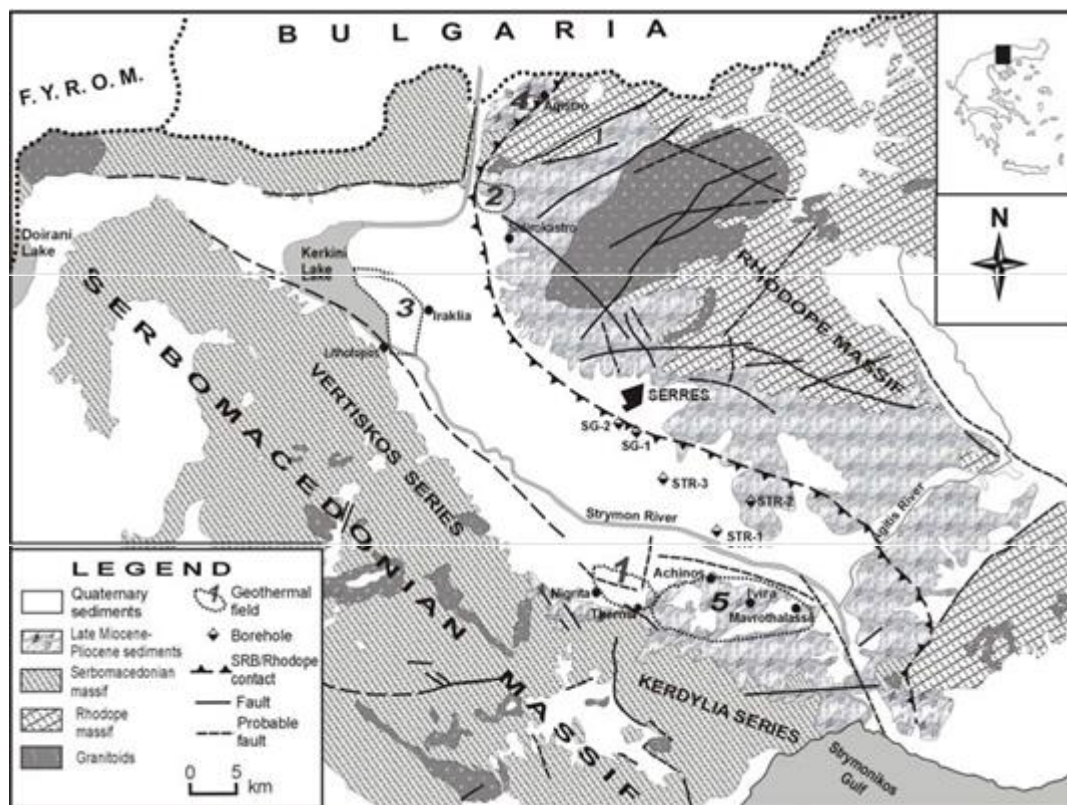
Εικόνα 1-3 : Σκαρίφημα Ροδοπικής μάζας. 1: μεταλλικά ιζήματα, 2: ενότητα Παγγαίου, 3: ενότητα Σιδηρόνερου, 4: σχηματισμοί Περιροδοπικής ζώνης, 5: γραμμή επώθησης (Μουντράκης, 2010)



Εικόνα 1-5 : Σκαρίφημα Σερβομακεδονικής μάζας. 1: μεταλικά ιζήματα κοιλάδας Στρυμώνα, 2: ενότητα Βερτίσκου, 3: ενότητα Κερδυλλίων, 4: Ροδοπική μάζα, 5: Περιροδοπική ζώνη, 6: ανατολικό όριο Σερβομακεδονικής μάζας (ή Γραμμή Στρυμώνα), 7: δυτικό όριο Σερβομακεδονικής μάζας (Μουντράκης, 2010)

Η λεκάνη του Στρυμώνα, όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, είναι μια τυπική μετα-ορογενετική ενεργή λεκάνη, με τα ιζήματα που βρίσκονται στο κέντρο της να φτάνουν τα 4 χιλιόμετρα. Τα ιζήματα αυτά είναι ηλικίας Νεογενούς και Τεταρτογενούς, ενώ η στρωματογραφική στήλη της λεκάνης του Στρυμώνα αποτελείται γενικότερα από κάτω προς τα πάνω από :

- κρυσταλλικό υπόβαθρο
- ψαμμίτες, ιλύολιθοι, άργιλοι, κροκαλοπαγή και λατυποπαγή, σκούρες καφέ μάργες, πετρελαιοφόροι ασβεστόλιθοι και στρώματα λιγνίτη ηλικίας Κάτω Μειοκαίνου
- στρώματα εβαποριτών, τραβερντίνες, μάργες, ψαμμίτες, ιλύολιθοι, κόκκινοι άργιλοι, κροκαλοπαγή, λιγνίτες και ασβεστόλιθοι ηλικίας Πλειοκαίνου και πάχους 700-800 μέτρων
- σχιστόλιθοι, ψαμμίτες, μάργες, κροκαλοπαγή, άργιλοι, άμμοι και ασβεστόλιθοι σε εναλλαγές ηλικίας Πλειστοκαίνου και πάχους 900-1000 μέτρων

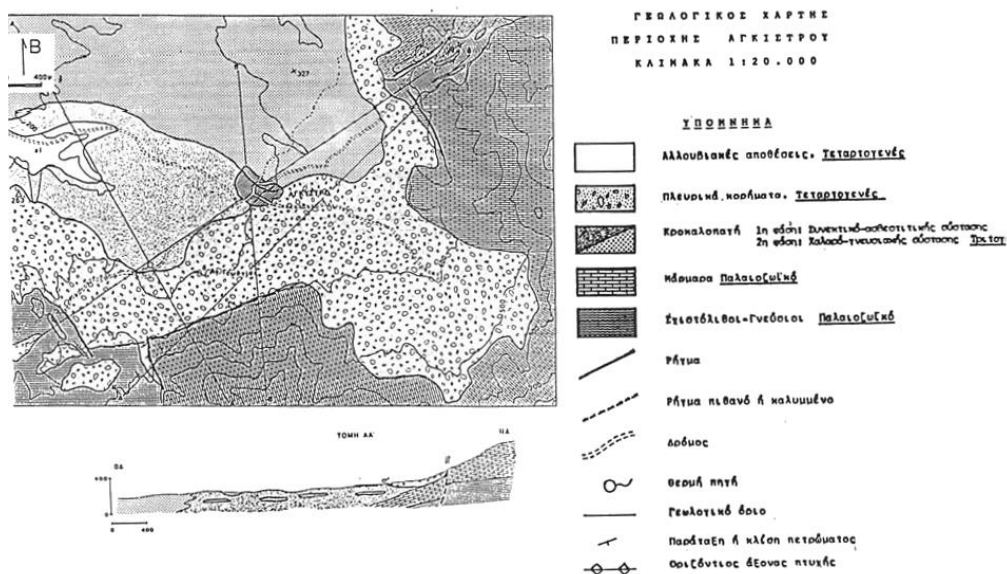


Εικόνα 1-6 : Γεωλογικός χάρτης της λεκάνης του Στρυμόνα με κύριες τεκτονικές δομές και τοποθεσίες γνωστών γεωθερμικών πεδίων. 1: Θερμά-Νιγρίτα, 2: Σιδηρόκαστρο, 3: Λιθότοπος-Ηράκλεια, 4: Αγκιστρο, 5: Αχινός-Ίβηρα-Μαυροθάλασσα (Karydakis et al., 2005)

1.2 Γεωλογική σύσταση Αγκίστρου

Το γεωθερμικό πεδίο του Αγκίστρου πηγάζει από την Ροδοπική μάζα, με τον γεωθερμικό ταμιευτήρα να βρίσκεται στο κατακερματισμένο και μεταμορφωμένο υπόβαθρο της μάζας. Πάνω από το υπόβαθρο αυτό υπάρχει μια ακολουθία Νεογενών και Τεταρτογενών ιζημάτων, με τα Νεογενή ιζήματα να αποτελούνται κυρίως από λιμναίες και ποτάμιες αποθέσεις (άμμους, αργιλώδεις άμμους με παρεμβολές κροκαλών, αμμοχάλικα, λατύπες, κροκάλες και βότσαλα), ενώ τα Τεταρτογενή ιζήματα που έχουν αποθεθεί πάνω από τα Νεογενή, αποτελούνται από πλημμυρικές αποθέσεις (κόκκινη άργιλο, βότσαλα, χαλίκια, κροκαλοπαγή και λατυποπαγή). Τα ιζήματα αυτά αποτελούν ένα περατό κάλυμμα, που σε συνδυασμό με τα μεγάλα ρήγματα που φτάνουν μέχρι το βάθος, επιτρέπουν την διάχυση της θερμότητας των γεωθερμικών ρευστών, καθώς και την ελεύθερη κίνηση και ανάμιξή τους με τα ψυχρά και αβαθή υπόγεια νερά.

Παρακάτω παρατίθενται οι γεωλογικοί χάρτες της περιοχής του Αγκίστρου και της περιοχής του Ρούπελ αντίστοιχα, όπου φαίνονται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια οι σχηματισμοί και οι δομές που συγκροτούν την περιοχή.



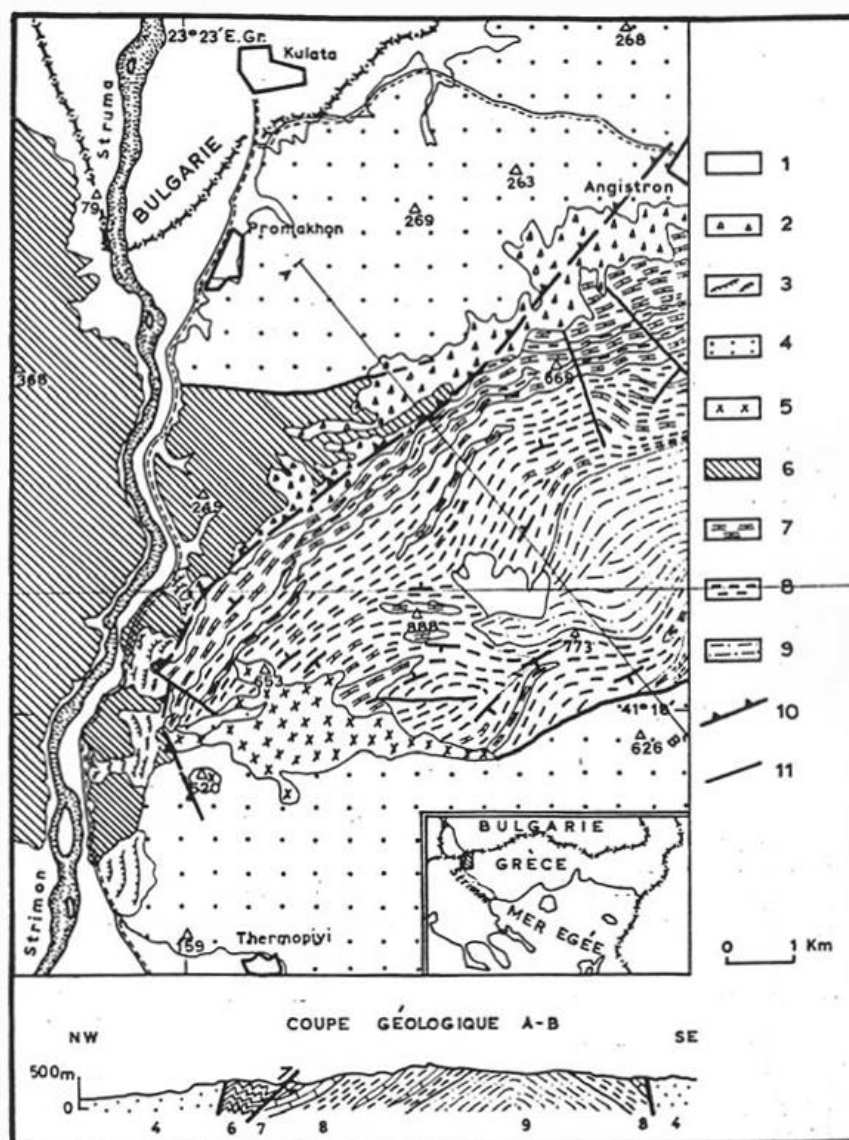


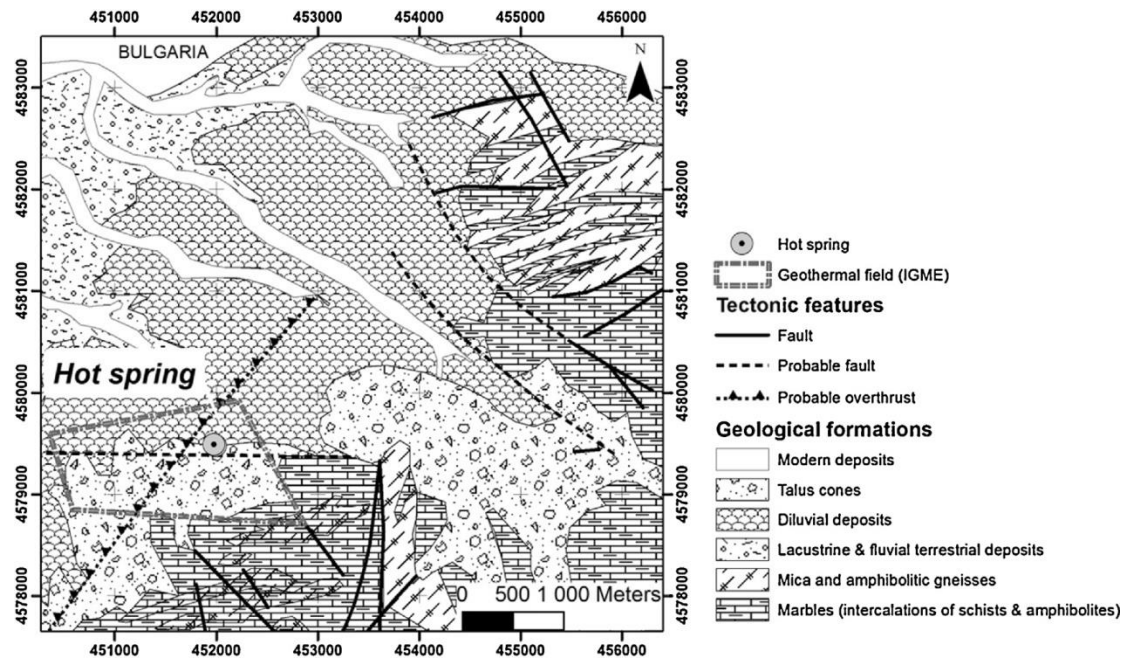
Fig. 1: Carte géologique de la région Roupel.
 1 à 3: Quaternaire (1: alluvions récentes; 2: éboulis; 3: travertins);
 4: Néogène (conglomérats polygéniques, grès, marnes et argiles);
 5: rhyolites et tufs volcaniques; 6: roches métamorphiques du massif serbo-macédonien;
 7 à 9: roches métamorphiques du massif Rila-Rhodope (7: marbres et cipolins; 8: schistes
 et gneiss en alternances; 9: gneiss à biotite et gneiss à deux micas);
 10: chevauchement; 11: failles.

Εικόνα 1-8 : Γεωλογικός χάρτης περιοχής Ρούπελ (Koukouzas, 1972)

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον από τον παραπάνω χάρτη παρουσιάζει η επώθηση που ξεκινάει από το Σιδηρόκαστρο και διέρχεται και από την περιοχή του Αγκίστρου, καθώς πιθανότατα συνδέεται με την κίνηση του υπόγειου νερού στις πηγές.

Παλαιότερες έρευνες στην περιοχή από Karydakis et al. (2005) και γεωτρήσεων του Ι.Γ.Μ.Ε., καταλήγουν στο συμπέρασμα πως υπάρχουν δύο

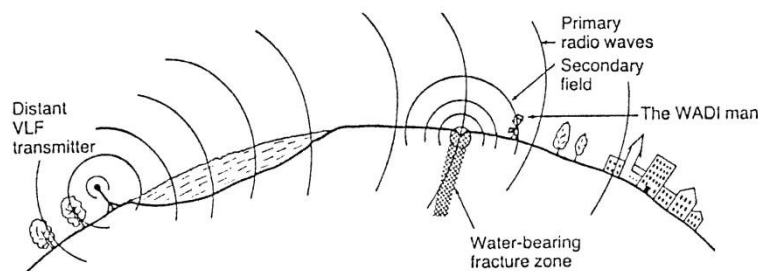
υδροφόροι ορίζοντες στην περιοχή, ένας ρηχός με βάθος έως 50m και ένας βαθύτερος στα 70-130m, οι οποίοι επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω διακλάσεων και ρηγμάτων στο ενδιάμεσο στρώμα που τους χωρίζει (στα 50-70m). Με βάση τα παραπάνω προτάθηκε η ύπαρξη δύο πιθανών ρηγμάτων τα οποία διασχίζουν το ένα το άλλο στην περιοχή των πηγών, η δομή των οποίων φαίνεται στην παρακάτω εικόνα :



Εικόνα 1-9 : Πιθανή θέση δομών ενδιαφέροντος (Karydakis et al., 2005)

2. Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος VLF

Η μέθοδος VLF (Very Low Frequency) είναι μια ηλεκτρομαγνητική μέθοδος στην γεωφυσική έρευνα, η οποία εκμεταλλεύεται τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που εκπέμπονται από διάφορους πομπούς πάνω στη Γη, κυρίως για στρατιωτικούς, επικοινωνιακούς και ναυσιπλοϊκούς σκοπούς και καταγράφονται σε ένα δέκτη. Παρότι στη γεωφυσική έρευνα και πιο συγκεκριμένα στις ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους χρησιμοποιούνται εναλλασσόμενα Η/Μ ρεύματα χαμηλών συχνοτήτων (συνήθως 1000 έως 10000 Hz), η μέθοδος του VLF χρησιμοποιεί κύματα τα οποία βρίσκονται στο φάσμα των 15-30 KHz, πράγμα που έρχεται σε αντίθεση με το όνομά της (Very Low Frequency = πολύ χαμηλές συχνότητες), το οποίο προήλθε από τη ραδιοφωνική τεχνολογία και χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα.



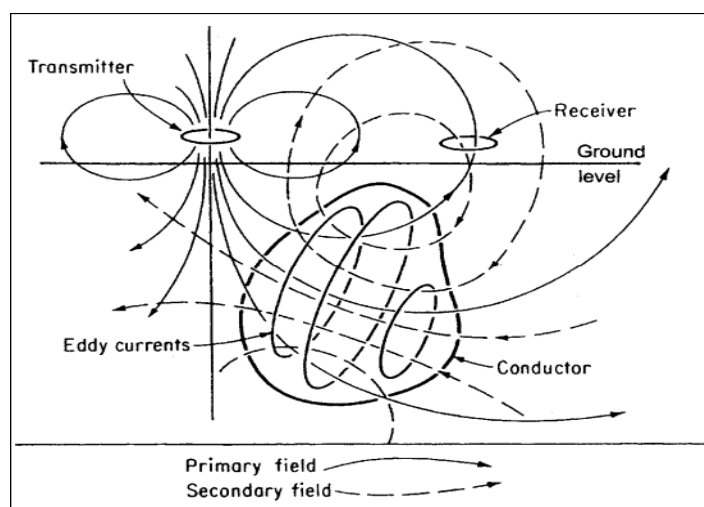
Εικόνα 2-1 : Εκπομπή, λήψη και αξιοποίηση του σήματος κατά τη μέθοδο του VLF

[\(http://terrafogdestam.se/om-vlf-metoden/\)](http://terrafogdestam.se/om-vlf-metoden/)

Βασικό πλεονέκτημα στη μέθοδο του VLF, και στις ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους γενικότερα, είναι το γεγονός ότι οι μετρήσεις γίνονται χωρίς ο εξοπλισμός να έρχεται σε επαφή με το έδαφος, σε αντίθεση με τις ηλεκτρικές μεθόδους, με αποτέλεσμα την ταχύτερη λήψη μετρήσεων, καθώς επίσης και το γεγονός ότι ένα μόνο άτομο είναι αρκετό για την λήψη δεδομένων, χωρίς περαιτέρω βοήθεια.

Η βασική αρχή που διέπει τις ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους είναι η εξής : όταν ένα μεταβαλλόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο παράγεται κοντά στην επιφάνεια της

Γης, παράγει ηλεκτρομαγνητικά κύματα, τα οποία καταγράφονται σε δέκτη στην επιφάνεια και διαδίδονται και μέσα στη Γη. Όταν αυτά συναντήσουν έναν αγωγό στο υπέδαφος, επάγουν ηλεκτρικό ρεύμα στον αγωγό με συνέπεια τη δημιουργία ενός δευτερογενούς ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, ίδιας συχνότητας με το πρωτογενές, το οποίο επίσης καταγράφεται στο δέκτη. Το δευτερογενές αυτό κύμα παρότι έχει ίδια συχνότητα με το πρωτογενές, φτάνει στο δέκτη από διαφορετική διεύθυνση και παρουσιάζει μια διαφορά φάσης. Η διαδικασία αυτή αναπαριστάται στο παρακάτω σχήμα :



Εικόνα 2-2 : Σχηματική απεικόνιση της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου (Reynolds, 1997)

Τον πομπό των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, το αγωγίμο σώμα στο υπέδαφος καθώς και τον δέκτη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μπορούμε να τα θεωρήσουμε ως πηνία.

2.1 Ηλεκτρομαγνητική θεωρία

Όλες οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι βασίζονται κυρίως σε δύο νόμους : τον νόμο του Faraday και τον νόμο του Ampere.

Σύμφωνα με το νόμο του Faraday, “η χρονική μεταβολή του μαγνητικού πεδίου σε ένα χώρο έχει ως συνέπεια τη γένεση στο χώρο αυτό ηλεκτρικού πεδίου, τέτοιου ώστε η παραγόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη να είναι ανάλογη αλλά αντίθετη προς το ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής” (Παπαζάχος, 1996). Η μαθηματική διατύπωση του νόμου αυτού, εκφράζεται μέσα από την εξίσωση του Maxwell :

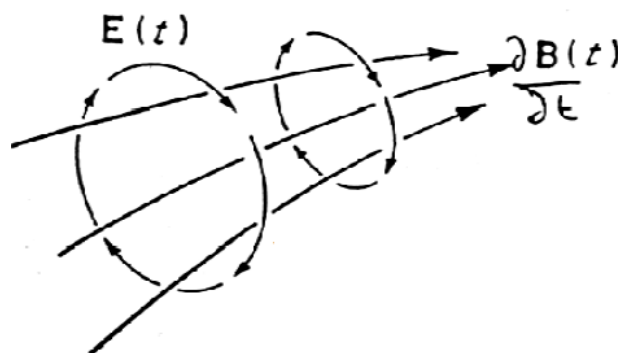
$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{d\vec{B}}{dt}$$

όπου E η ένταση του επαγόμενου ηλεκτρικού πεδίου σε V/m

B είναι η μαγνητική επαγωγή σε Tesla

t ο χρόνος

Από αυτή τη σχέση προκύπτει ότι όταν η χρονική μεταβολή της μαγνητικής ροής είναι κάθετη στο επίπεδο ενός πηνίου, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που επάγεται στο πηνίο αυτό και το ηλεκτρικό ρεύμα που το διαρρέει (εφόσον $I = \sigma E$) θα έχουν τη μέγιστη τιμή, ενώ αντίθετα όταν η μεταβολή της μαγνητικής ροής είναι παράλληλη, το ηλεκτρικό πεδίο και το ηλεκτρικό ρεύμα στο πηνίο μηδενίζονται.



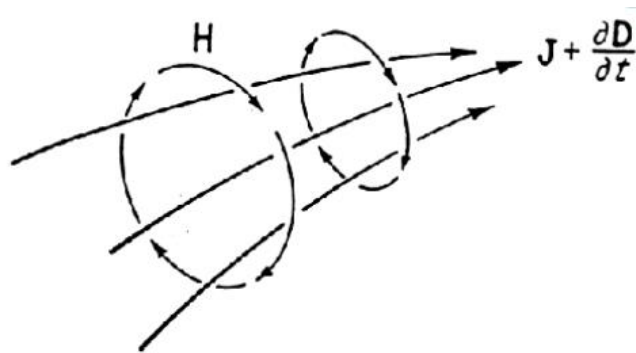
Εικόνα 2-3 : Δημιουργία ηλεκτρικού πεδίου λόγω της χρονικής μεταβολής μαγνητικού πεδίου (Grant and West, 1965)

Ο δεύτερος νόμος, του Ampere, ορίζει πως “όταν ένας χώρος διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, παράγεται μαγνητικό πεδίο του οποίου η ένταση είναι ανάλογη του ολικού ρεύματος που διαρρέει το χώρο και έχει διεύθυνση κάθετη προς τη διεύθυνση ροής του ρεύματος” (Παπαζάχος, 1996). Η μαθηματική διατύπωση του νόμου αυτού εκφράζεται μέσα από την ακόλουθη εξίσωση του Maxwell :

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{d\vec{D}}{dt}$$

όπου J η πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος σε A/m^2 , και $D = \varepsilon * H$ για ισότροπο και ομογενές μέσο, με ε να είναι η διηλεκτρική σταθερά του μέσου αυτού.

Από αυτή τη σχέση προκύπτει πως σε έναν ευθύγραμμο αγωγό που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, οι μαγνητικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου που παράγεται γύρω από αυτόν βρίσκονται κάθετα στη διεύθυνση του αγωγού.



Εικόνα 2-4 : Δημιουργία μαγνητικού πεδίου εξαιτίας της ροής ηλεκτρικού ρεύματος (Grant and West, 1965)

Όταν το μέσο είναι καλός αγωγός, ισχύουν οι παρακάτω δύο εξισώσεις :

$$\nabla^2 \vec{H} = i\omega\sigma\vec{H}$$

$$\nabla^2 \vec{E} = i\omega\sigma\vec{E}$$

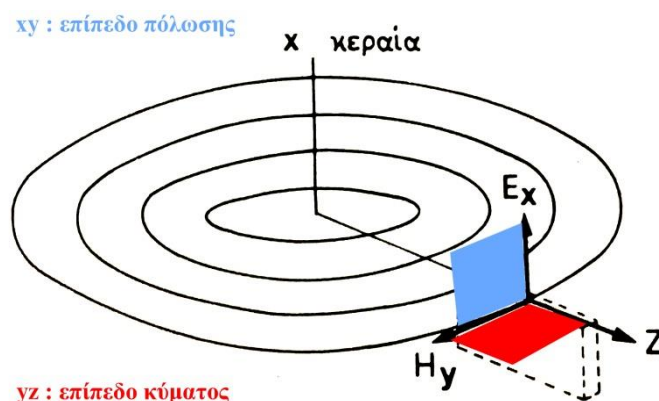
Λύνοντας τις διαφορικές αυτές εξισώσεις μπορούμε να καθορίσουμε τον τρόπο με τον οποίο διαδίδεται το ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Για να λυθούν πιο εύκολα αυτές, θεωρούμε ότι το κύμα είναι πολωμένο σε επίπεδο, δηλαδή τα διανύσματα H και E βρίσκονται μονίμως σε επίπεδο κάθετο στη διεύθυνση που διαδίδεται το ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Έτσι, αν το ηλεκτρομαγνητικό κύμα διαδίδεται κατά τον άξονα z , το επίπεδο xy θα είναι το επίπεδο πόλωσης. Εάν η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου έχει ίδια διεύθυνση με τον άξονα x ($E=E_x$) και η ένταση του μαγνητικού πεδίου με τον άξονα y ($H=H_y$), τότε η ένταση του μαγνητικού πεδίου και η ένταση της πυκνότητας του ρεύματος θα είναι αντίστοιχα :

$$H_y = H_0 e^{-\alpha z} \sin(\omega t - \alpha z)$$

$$I_x = \sqrt{\omega \mu \sigma} H_0 e^{-\alpha z} \sin(\omega t - \alpha z + \frac{\pi}{4})$$

όπου $\alpha = \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma}{2}}$

Η παραπάνω διαδικασία αναπαριστάται και στο ακόλουθο σχήμα των Kearey και Brooks (1984):



Εικόνα 2-5 : Παραγωγή ΗΜ κύματος από κεραία με διεύθυνση ίδια με την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, E_x , (άξονας x), ένταση μαγνητικού πεδίου, H_y , (άξονας y) και διάδοση κύματος κατά τον άξονα z (τροποποιημένο από Kearey and Brooks, 1984)

2.2 Μαγνητική συνιστώσα του H/M πεδίου

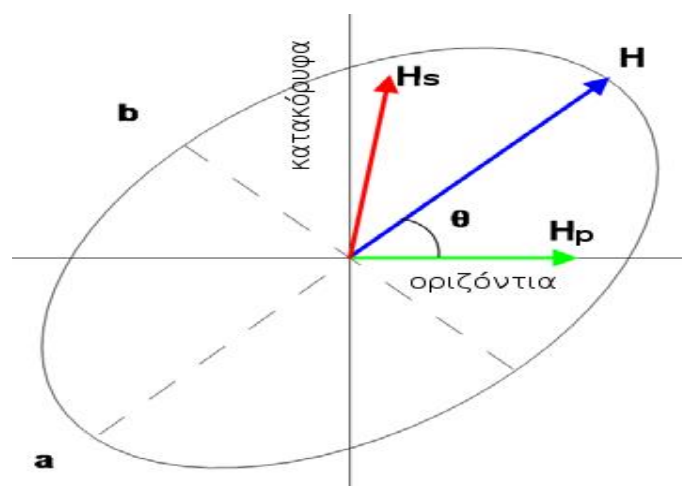
Το πρωτεύον και το δευτερεύον μαγνητικό πεδίο που καταγράφονται στον δέκτη, μεταβάλλονται αρμονικά με το χρόνο σύμφωνα με τις σχέσεις :

$$H_p = A\eta\mu\omega t$$
$$H_s = B\sigma\upsilon\nu(\omega t - \Phi)$$

Εφόσον μιλάμε για αρμονική μεταβολή με το χρόνο, η συνισταμένη ένταση του μαγνητικού πεδίου, H , θα διαγράφει έλλειψη, η οποία ονομάζεται έλλειψη πόλωσης, και θα κινείται σε επίπεδο, το οποίο ονομάζεται επίπεδο πόλωσης. Το μέτρο της συνισταμένης έντασης του μαγνητικού πεδίου δίνεται από τη σχέση :

$$H = H_p + H_s$$

Σχηματική απεικόνιση της έλλειψης πόλωσης δίνεται στο παρακάτω σχήμα :



Εικόνα 2-6 : Έλλειψη πόλωσης και γωνία θ μεταξύ της οριζόντιας έντασης του πρωτογενούς πεδίου, H_p , με το συνιστάμενο πεδίο, H . (τροποποιημένο από Keary and Brooks, 1984)

Αναφέραμε νωρίτερα πως τον δέκτη τον θεωρούμε ως πηνίο. Όταν το πηνίο αυτό είναι παράλληλο με το επίπεδο ελλειπτικής πόλωσης, τότε δεν διαρρέεται από ρεύμα, δηλαδή έχουμε μηδενισμό του σήματος. Αυτό έχει ως συνέπεια το γεγονός ότι όταν μεταβάλλουμε τον προσανατολισμό του δέκτη και έχουμε μηδενικό σήμα, θα έχουμε βρει το επίπεδο ελλειπτικής πόλωσης.

Θα πρέπει, τέλος, να αναφερθεί μία πολύ σημαντική έννοια, αυτή της ελλειπτικότητας, η οποία είναι ο λόγος a/b και είναι πολύ σημαντική κατά τη λήψη μετρήσεων με τη μέθοδο του VLF.

2.3 Πραγματική και φανταστική συνιστώσα δευτερογενούς πεδίου

Η διαφορά φάσης, Φ , μεταξύ του αρχικού και του δευτερογενούς μαγνητικού πεδίου εξαρτάται από τη γεωηλεκτρική δομή στο υπέδαφος, και δίνεται από τη σχέση:

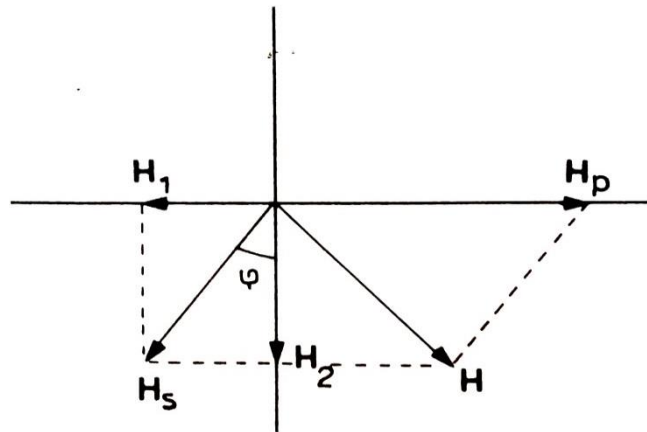
$$\Phi = \frac{\pi}{2} + \tan^{-1}(2\pi f \frac{L}{R})$$

όπου f είναι η συχνότητα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος

L είναι η επαγωγική αντίσταση του αγωγίμου σώματος

R είναι η Ωμική αντίσταση του αγωγίμου σώματος

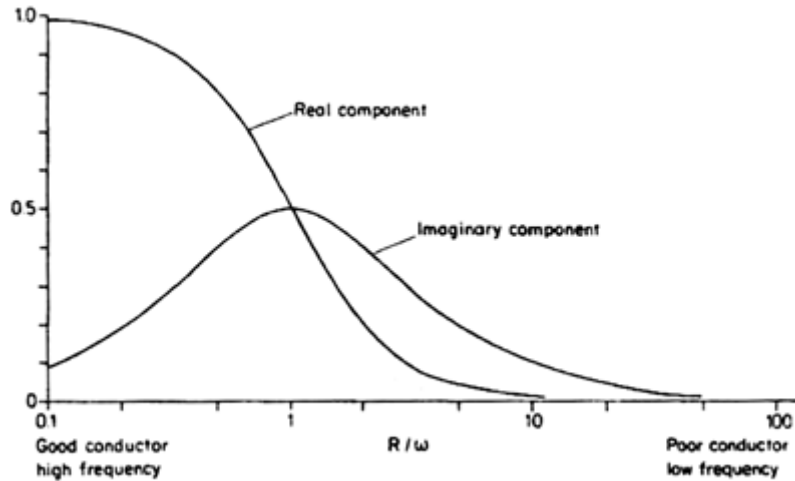
Το παρακάτω σχήμα δείχνει μέσω διανυσμάτων την ταλάντωση της έντασης του αρχικού μαγνητικού πεδίου, H_p , της έντασης του δευτερογενούς μαγνητικού πεδίου, H_s , καθώς και της συνισταμένης έντασης, H , των δύο πεδίων σε ένα τρισορθογώνιο σύστημα αξόνων.



Εικόνα 2-7 : Σχέση φάσης μεταξύ της έντασης του δευτερογενούς και του πρωτογενούς μαγνητικού πεδίου
(Παπαζάχος, 1996)

Προβάλλοντας την ένταση του δευτερογενούς πεδίου στη διεύθυνση του πρωτογενούς, παίρνουμε το διάνυσμα H_1 , το οποίο ονομάζεται πραγματική συνιστώσα του δευτερογενούς πεδίου, έχει διαφορά φάσης π σε σχέση με την ένταση του πρωτογενούς πεδίου και μέτρο $H_1 = H_s \eta\mu\varphi$, όπου $\varphi = \text{τοξε}\varphi(2\pi f \frac{L}{R})$. Προβάλλοντας στη συνέχεια την ένταση του δευτερογενούς πεδίου στην κάθετη της διεύθυνσης του πρωτογενούς, παίρνουμε το διάνυσμα H_2 , το οποίο λέγεται φανταστική συνιστώσα του δευτερογενούς πεδίου, έχει διαφορά φάσης $\pi/2$ σε σχέση με την ένταση του πρωτογενούς πεδίου και μέτρο $H_2 = H_s \sigma\upsilon\nu\varphi$.

Το πλάτος της πραγματικής και της φανταστικής συνιστώσας του δευτερογενούς πεδίου εξαρτάται από τον λόγο R/ω , δηλαδή της ειδικής αντίστασης προς την κυκλική συχνότητα.



Εικόνα 2-8 : Πλάτη πραγματικής και φανταστικής συνιστώσας σε σχέση με τον λόγο R/ω (Parasnis, 1995)

Μελετώντας το παραπάνω διάγραμμα, βλέπουμε πως η τιμή της πραγματικής συνιστώσας ελαττώνεται, όσο αυξάνεται η κυκλική συχνότητα (ω), ενώ η φανταστική συνιστώσα αυξάνεται, από μία αρχική της τιμή, στο μέγιστο όταν $R \approx \omega$, και στη συνέχεια μειώνεται όσο αυξάνει η κυκλική συχνότητα. Επιπρόσθετα, στην περίπτωση που έχουμε καλό αγωγό, η πραγματική συνιστώσα είναι πολύ μεγαλύτερη από την φανταστική, ενώ αντίθετα όταν ο αγωγός είναι κακός η πραγματική συνιστώσα είναι μικρότερη της φανταστικής. Λαμβάνοντας υπόψη τον λόγο πραγματικής με φανταστική συνιστώσα, μπορούμε να πούμε πως αν αυτός είναι μεγαλύτερος της μονάδας, ο αγωγός είναι καλός, ενώ αν είναι μικρότερος της μονάδας, ο αγωγός είναι κακός.

2.4 Δέκτης VLF και διαδικασίες μέτρησης

Ο δέκτης VLF αποτελείται από δύο πηνία κάθετα μεταξύ τους, ένα οριζόντιο το οποίο προσανατολίζεται στη διεύθυνση της οριζόντιας συνιστώσας του ηλεκτρικού πεδίου, δηλαδή στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος, και ένα κάθετο στο πρώτο, το οποίο προσανατολίζεται όσο το δυνατόν καλύτερα στη συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου.

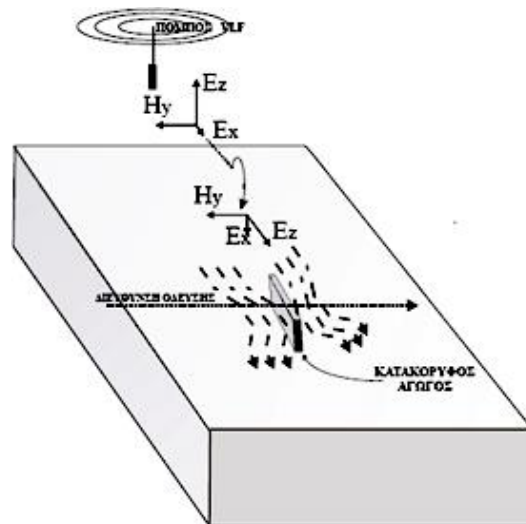
Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, κατά τη λήψη μίας μέτρησης, ο δέκτης καταγράφει τόσο το πρωταρχικό, όσο και το δευτερογενές ηλεκτρομαγνητικό κύμα, με μία διαφορά φάσης. Αυτό το οποίο μετριέται στην ουσία, είναι δύο χαρακτηριστικά του μαγνητικού πεδίου, τα οποία δεν είναι άλλα από την γωνία κλίσης, θ , και την ελλειπτικότητα a/b .

Αφού καθοριστεί η διεύθυνση του πομπού στον χώρο, λαμβάνονται μετρήσεις σε διάφορα σημεία, τα οποία είναι διατεταγμένα σε μία τομή, η οποία είναι κάθετη στην διεύθυνση διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος και καταγράφεται η γωνία κλίσης. Εφόσον οι καταγεγραμμένες τιμές των γωνιών κλίσης παρουσιάζουν μεγάλες αυξομειώσεις, έχουμε ένδειξη για ύπαρξη δομών υψηλής ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Στην περίπτωση της παρούσας εργασίας, αυτή η δομή είναι το πιθανό ρήγμα στο οποίο γίνεται η μετακίνηση υπόγειων ρευστών.

Οι οδεύσεις που πραγματοποιούνται, θα πρέπει να πληρούν κάποιες προϋποθέσεις :

- να πραγματοποιούνται κατά το δυνατό σε ευθεία γραμμή
- να πραγματοποιούνται σε βατό και προσβάσιμο μέρος
- να πραγματοποιούνται μακριά από πηγές θορύβου, όπως είναι τα μεταλλικά αντικείμενα, τα καλώδια και οι γειώσεις ηλεκτρικού ρεύματος κλπ.
- να πραγματοποιούνται όσο το δυνατόν κάθετα στον στόχο που ψάχνουμε
- ο πομπός στον οποίο θα συντονιστεί το όργανο μέτρησης να είναι όσο το δυνατό πιο παράλληλος σε σχέση με τον στόχο που ψάχνουμε.

Οι δύο τελευταίες προϋποθέσεις συνδέονται μεταξύ τους, καθώς συντονίζοντας τον πομπό παράλληλα με το στόχο που ψάχνουμε, όχι μόνο μεγιστοποιούμε το σήμα που λαμβάνεται, αλλά μπορούμε πλέον να πραγματοποιήσουμε την όδευση κάθετα στον στόχο. Η διαδικασία αυτή αναπαριστάται και στο ακόλουθο σχήμα :

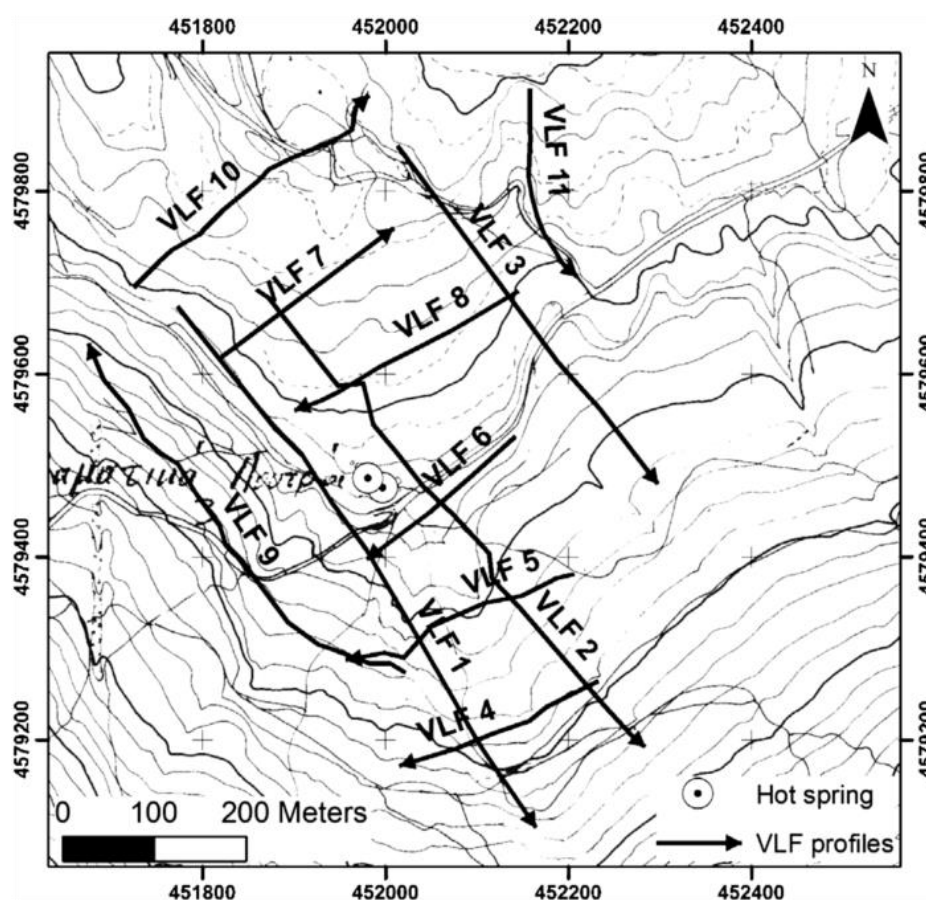


Εικόνα 2-9 : Ορθή φορά όδευσης VLF (http://www.geo.auth.gr/courses/ggp/ggp762e/PDF/LEC7_NEW.pdf)

3. Συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων

3.1 Συλλογή δεδομένων VLF

Για τη συλλογή των δεδομένων στην περιοχή της μελέτης, πραγματοποιήθηκαν 11 οδεύσεις με το όργανο ABEM WADI. Το συνολικό μήκος των οδεύσεων έφτασε τα 3850m, με την μικρότερη όδευση να φτάνει τα 200m ενώ η μεγαλύτερη τα 640m. Η διεύθυνση των μετρήσεων ακολούθησε δύο κύριες φορές, κάθετες μεταξύ τους, λαμβάνοντας υπόψη τα υπάρχοντα γεωλογικά στοιχεία, δεδομένα προηγούμενων ερευνών, καθώς και την αναμενόμενη θέση των τεκτονικών δομών ενδιαφέροντος. Η ακριβής θέση των οδεύσεων εξασφαλίστηκε με τη χρήση GPS, ενώ σχηματική απεικόνισή τους φαίνεται παρακάτω :



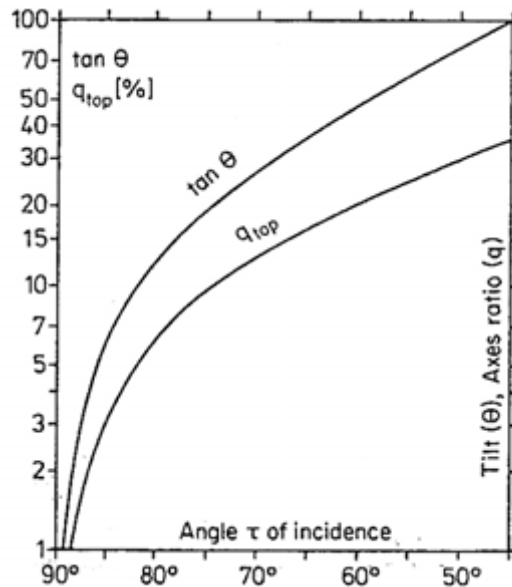
Εικόνα 3-1 : Διάταξη των οδεύσεων VLF στην περιοχή έρευνας (Vargemezis, 2014)

Για τις οδεύσεις με φορά BA-NA χρησιμοποιήθηκαν πομποί οι οποίοι εκπέμπουν σήμα στα 18.1, 18.3 και 19.6 kHz, με την θέση τους να βρίσκεται στο Μούρμανσκ της Ρωσίας, στο Le Blanc της Γαλλίας και στο Ράγκμπι της Αγγλίας αντίστοιχα, ενώ για τις οδεύσεις με φορά BA-NA το σήμα των πομπών ήταν στα 20.9 και τα 23.4 kHz, στην Ταβολάρα της Ιταλίας και στην περιοχή του Περλ Χάρμπορ της Χαβάης αντίστοιχα.

3.2 Επεξεργασία δεδομένων VLF

Αφού ληφθούν τα δεδομένα, σειρά έχει η επεξεργασία τους. Προτού, ακόμη, όμως αναφερθούμε στην επεξεργασία των δεδομένων, πρέπει να γίνει μια άλλη διαδικασία, αυτή της διόρθωσης της τοπογραφίας. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας του γεγονότος ότι ενώ το ηλεκτρικό πεδίο ακολουθεί την τοπογραφία, το μαγνητικό συναντώντας κεκλιμένη επιφάνεια επάγει ρεύμα και δημιουργεί δευτερογενές πεδίο ίδιας φάσης με το πρωτογενές. Ως εκ τούτου, δημιουργούνται ανωμαλίες που οφείλονται στην μεταβολή του αναγλύφου, οι οποίες και πρέπει να αφαιρεθούν.

Το πρόβλημα αυτό λύνεται με τη χρήση των πρότυπων καμπυλών που δημιούργησε ο D. Eberle, οι οποίες φαίνονται σχηματικά παρακάτω:



Εικόνα 3-2 : Καμπύλες επίδρασης του αναγλύφου στην κλίση και την ελλειπτικότητα σε μετρήσεις VLF (Eberle, 1981)

Με βάση τις πρότυπες αυτές καμπύλες διορθώνεται τόσο η γωνία κλίσης, θ , όσο και η ελλειπτικότητα, a/b . Όπως φαίνεται και από το σχήμα, είναι απαραίτητο να υπολογιστεί και η γωνία πρόσπτωσης του HM κύματος στην επιφάνεια του εδάφους, τ , με βάση τη σχέση (Parasnis, 1995) :

$$\tan \tau = \frac{\cot \beta' \sin \xi_2}{\sin \xi_1}$$

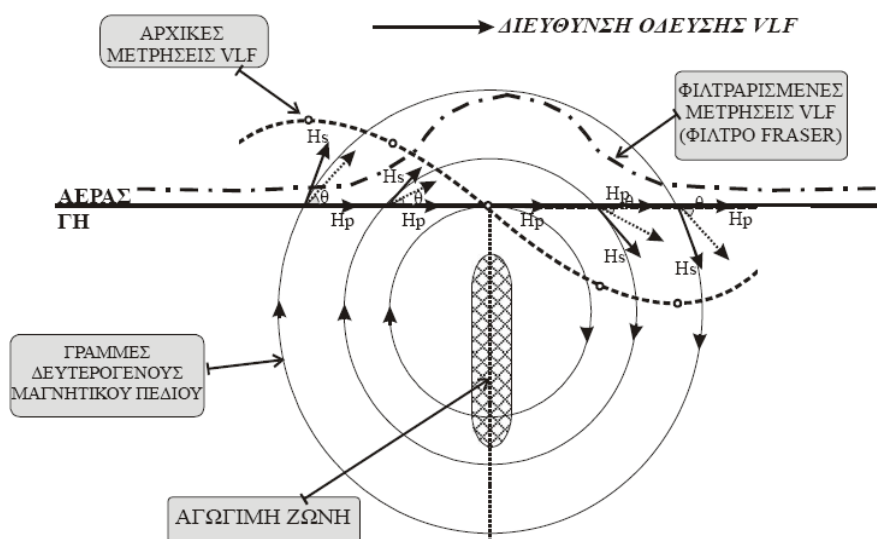
όπου β' η κλίση του εδάφους στο σημείο της μέτρησης και ξ_1, ξ_2 οι γωνίες μεταξύ της διεύθυνσης του μαγνητικού πεδίου και της όδευσης σε σχέση με την παράταξη της μορφολογίας.

Η αρχική, ανεπεξέργαστη μορφή στην οποία παίρνουμε τα δεδομένα από μία όδευση VLF είναι μία διπολική ανωμαλία της πραγματικής και της φανταστικής συνιστώσας, με την πραγματική να είναι ανάλογη της γωνίας κλίσης και η φανταστική ανάλογη της ελλειπτικότητας. Στις γεωφυσικές μεθόδους, όμως, προτιμάται οι ανωμαλίες να αποτυπώνονται σε μονοπολική μορφή, για ευκολότερη αναγνώριση των στοιχείων τους, καθώς και καλύτερη ερμηνεία τους στο σύνολο. Για το λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί ειδικά φίλτρα, τα οποία μετατρέπουν τη διπολική

μορφή των δεδομένων σε μονοπολική. Ένα από αυτά, το οποίο χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την εργασία, είναι το φίλτρο Fraser 7 σημείων (Frazer, 1969), το οποίο μετατρέπει τα δεδομένα σύμφωνα με τη σχέση:

$$F_{\alpha} = 0,102H_{\alpha-3} - 0,05902H_{\alpha-2} + 0,56H_{\alpha-1} + H_{\alpha} - 0,56H_{\alpha+1} + 0,05902H_{\alpha+2} - 0,102H_{\alpha+3}$$

όπου H η τιμή της μέτρησης και α το σημείο που φιλτράρεται κάθε φορά. Αποτέλεσμα της εφαρμογής του φίλτρου Fraser και μετατροπή της διπολικής ανωμαλίας σε μονοπολική, φαίνεται παρακάτω :

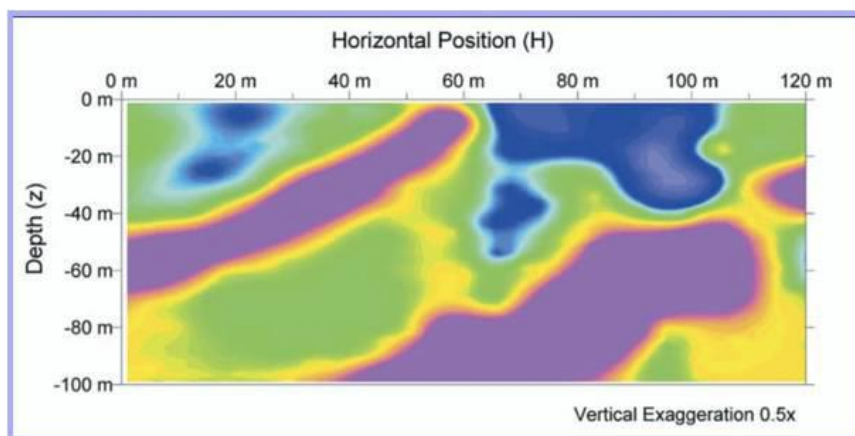


Εικόνα 3-3 : Μετατροπή της διπολικής ανωμαλίας σε μονοπολική, μέσα από την εφαρμογή του φίλτρου Fraser (http://www.geo.auth.gr/courses/ggp/ggp762e/PDF/LEC7_NEW.pdf)

Για να εκτιμηθεί το βάθος της πηγής, χρησιμοποιούμε το φίλτρο Karous-Hjelt (Karous and Hjelt, 1983), το οποίο εισάγει τον παράγοντα του βάθους στις μετρήσεις, εξάγοντας ως αποτέλεσμα την πυκνότητα του ρεύματος κατά μήκος της όδευσης, και υπολογίζεται από τη σχέση :

$$I_{\alpha} = \frac{2\pi(-0,102H_{-3} + 0,059H_{-2} - 0,561H_{-1} + 0,561H_{+1} - 0,059H_{+2} + 0,102H_{+3})}{z}$$

όπου I_α η πυκνότητα του ρεύματος και z τα βάθη τα οποία εισάγονται. Σχηματική απεικόνιση της εφαρμογής του φίλτρου Karous-Hjelt φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:

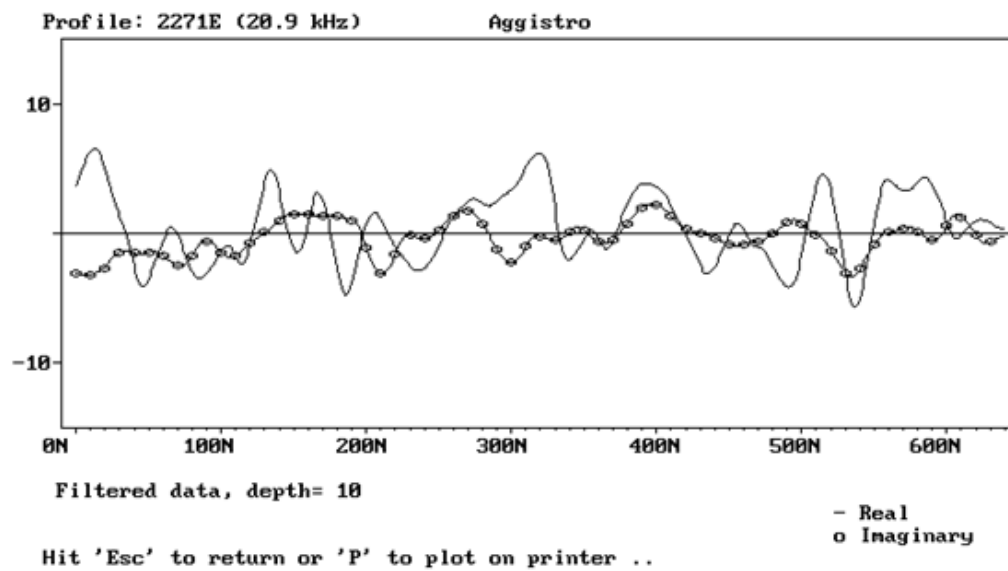
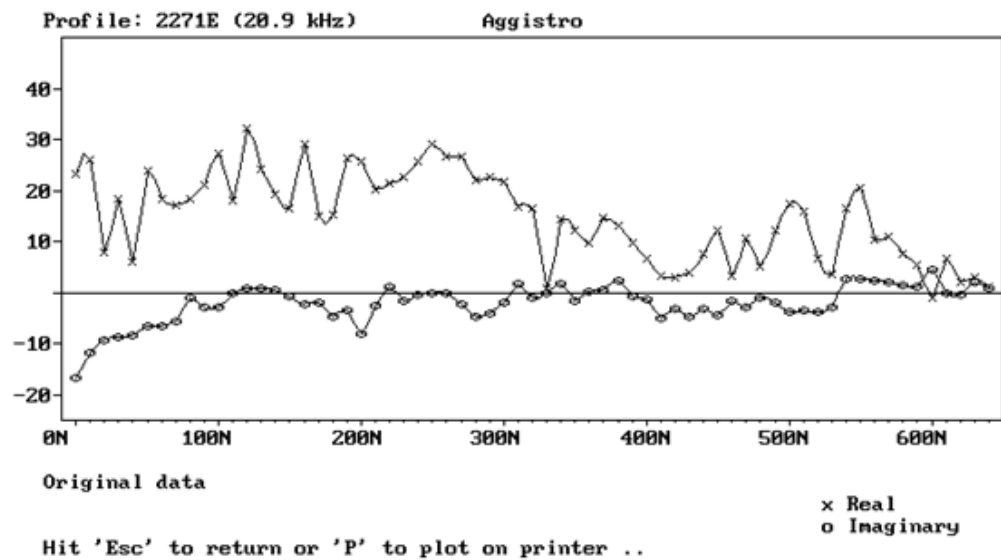


Εικόνα 3-4 : Εφαρμογή του φίλτρου Karous-Hjelt και σχηματική αποτύπωση του αποτελέσματος (Huchinson and Barta, 2002)

3.3 Αποτελέσματα επεξεργασμένων δεδομένων

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία των δεδομένων για τις 11 οδεύσεις παρατίθενται στη συνέχεια. Στα διαγράμματα σημειώνονται με X οι τιμές της πραγματικής συνιστώσας κατά τη διάρκεια της όδευσης και με O οι τιμές της φανταστικής συνιστώσας. Στη συνέχεια παρατίθενται διαγράμματα με τις αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν σε διαφορετικά βάθη και τέλος διαγράμματα με την κατανομή της πυκνότητας του ρεύματος τόσο για την πραγματική, όσο και για τη φανταστική συνιστώσα.

ΟΔΕΥΣΗ 1



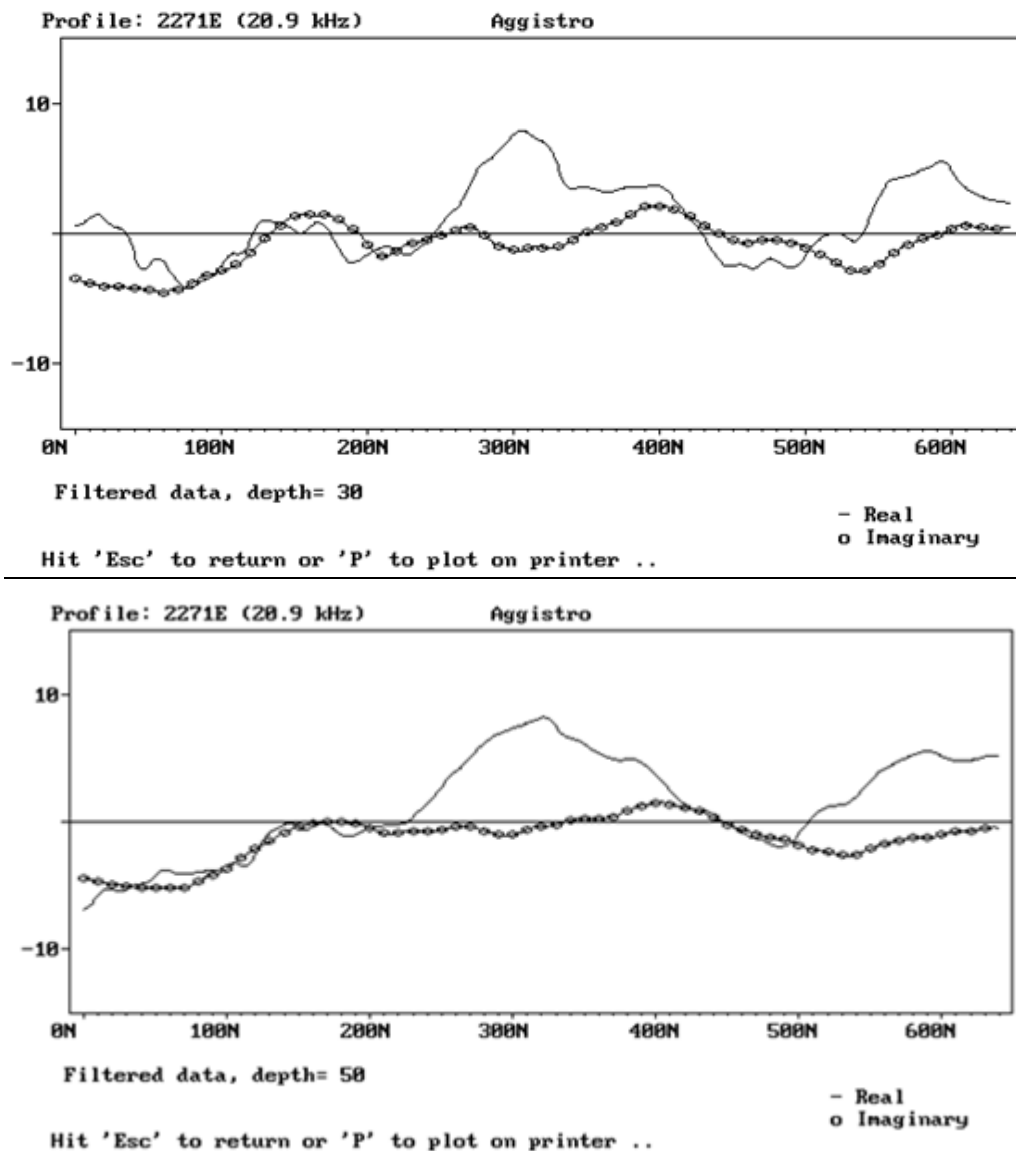


Figure 3:1 : Αποτελέσματα της 1ης όδευσης. Το πρώτο διάγραμμα δείχνει την μεταβολή της πραγματικής και φανταστικής συνιστώσας του δευτερογενούς μαγνητικού πεδίου, ενώ το δεύτερο, το τρίτο και το τέταρτο τις φιλτραρισμένες τιμές στα 10m, στα 30m και στα 50m αντίστοιχα

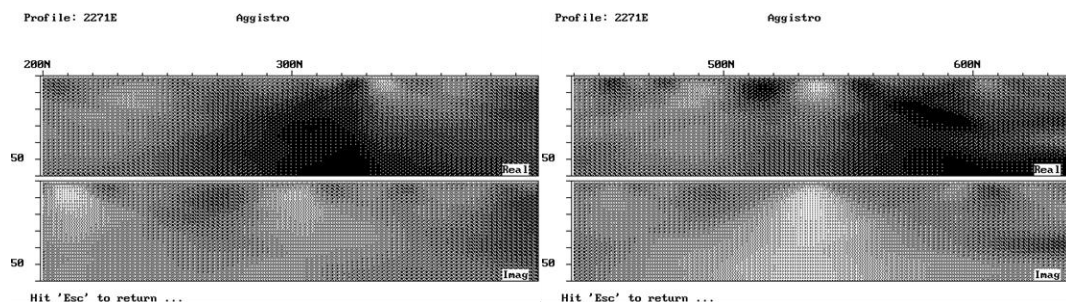
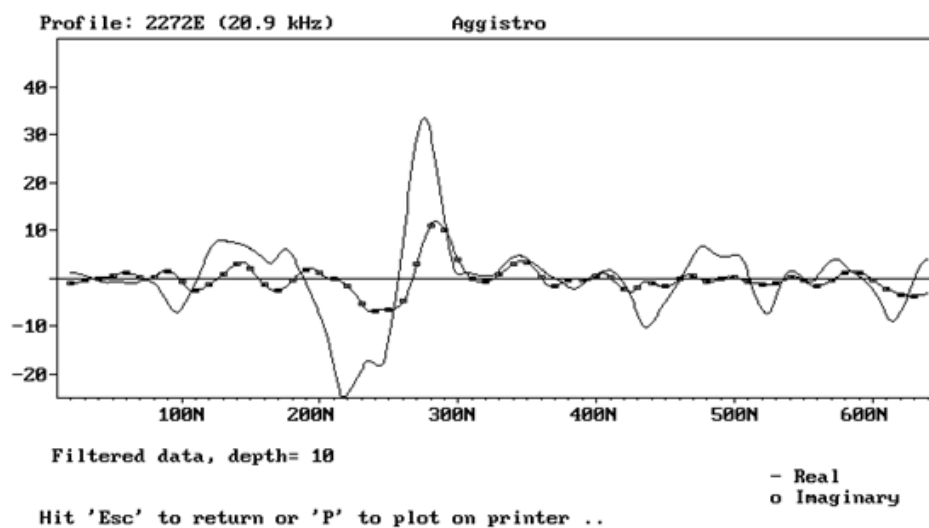
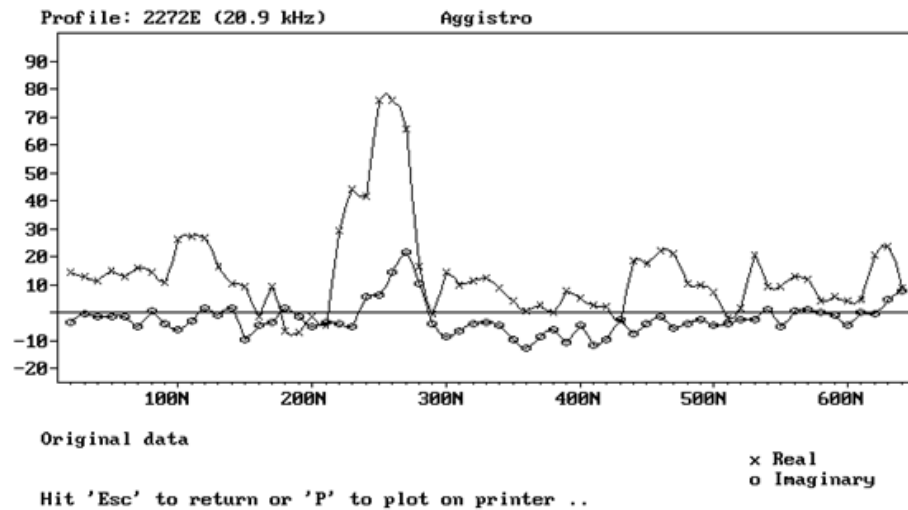


Figure 3:2 : Κατανομή της πυκνότητας του ρεύματος της πραγματικής και της φανταστικής συνιστώσας αντίστοιχα κατά την 1^η όδευση

ΟΔΕΥΣΗ 2



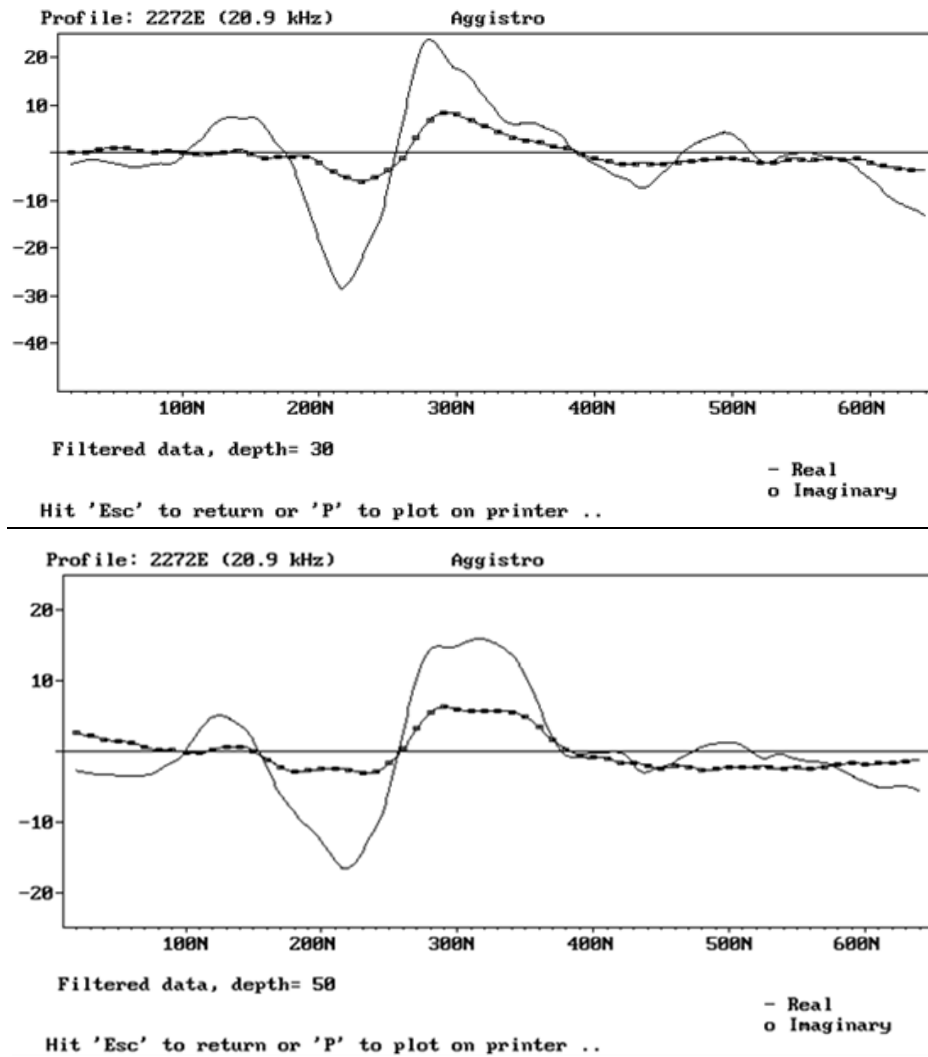


Figure 3:3 : Αποτελέσματα της 2ης όδευσης. Το πρώτο διάγραμμα δείχνει την μεταβολή της πραγματικής και φανταστικής συνιστώσας του δευτερογενούς μαγνητικού πεδίου, ενώ το δεύτερο, το τρίτο και το τέταρτο τις φιλτραρισμένες τιμές στα 10m, στα 30m και στα 50m αντίστοιχα

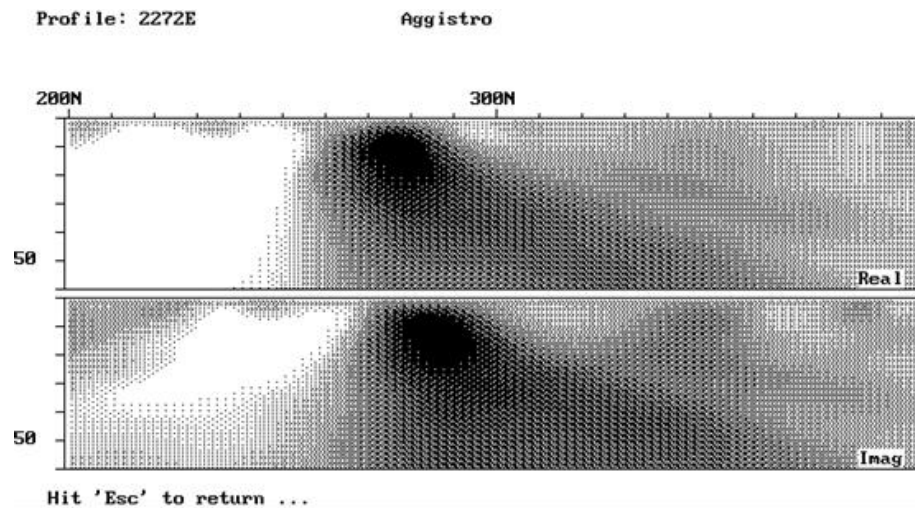
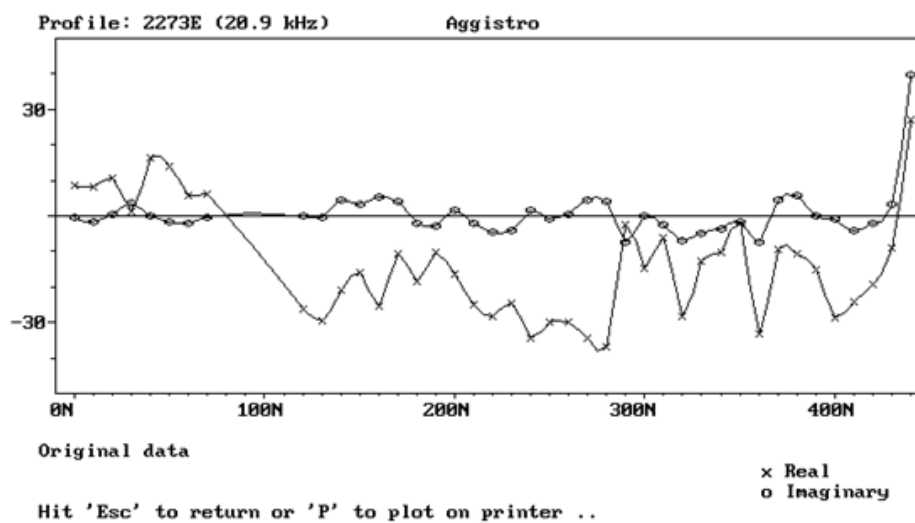


Figure 3:4 : Κατανομή της πυκνότητας του ρεύματος της πραγματικής και της φανταστικής συνιστώσας αντίστοιχα κατά την 2^η όδευση

ΟΔΕΥΣΗ 3



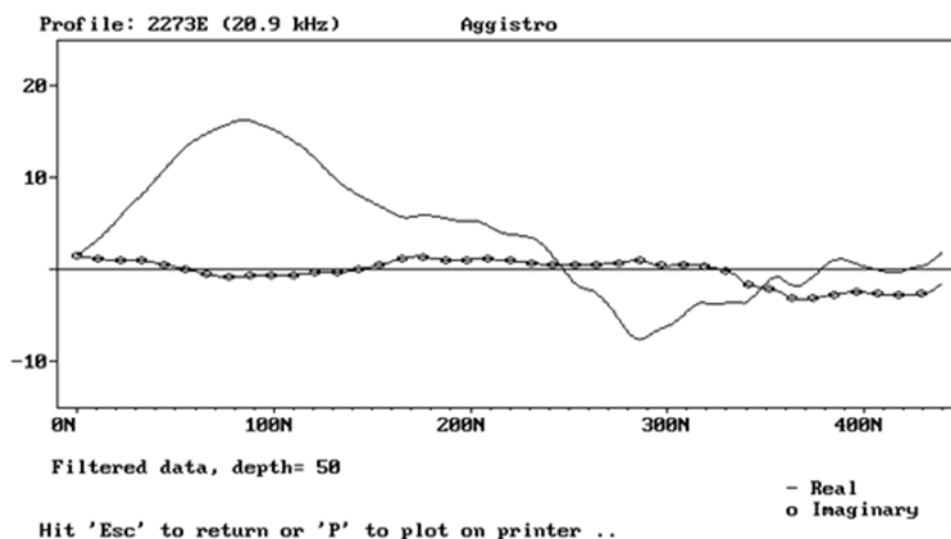
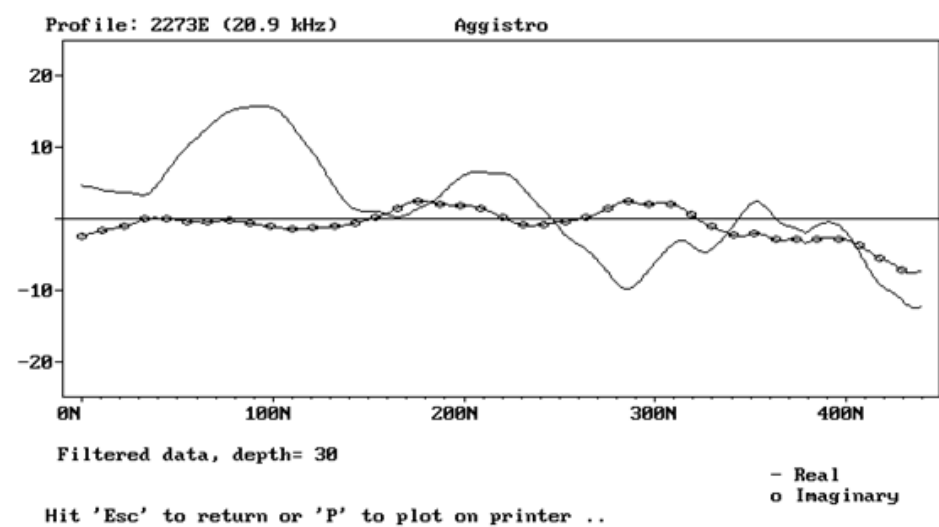
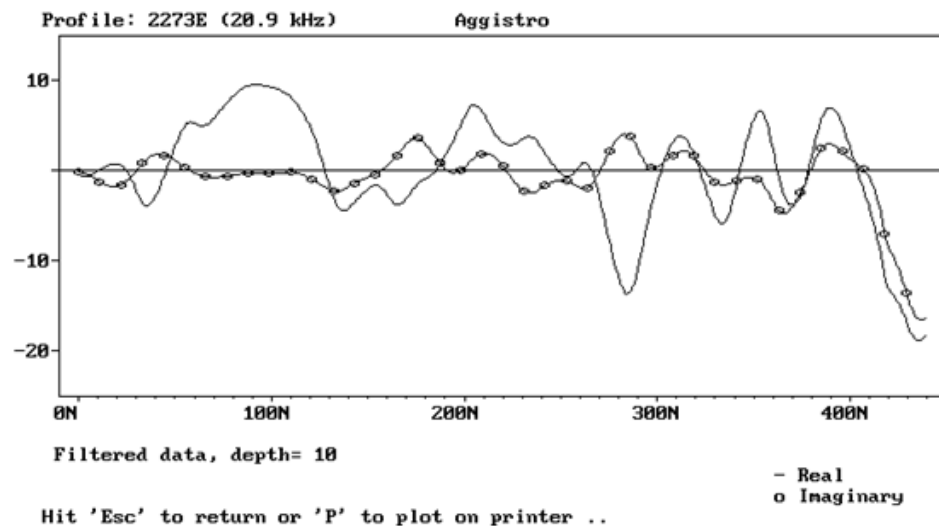


Figure 3:5 : Αποτελέσματα της 3ης όδευσης. Το πρώτο διάγραμμα δείχνει την μεταβολή της πραγματικής και φανταστικής συνιστώσας του δευτερογενούς μαγνητικού πεδίου, ενώ το δεύτερο, το τρίτο και το τέταρτο τις φιλτραρισμένες τιμές στα 10m, στα 30m και στα 50m αντίστοιχα

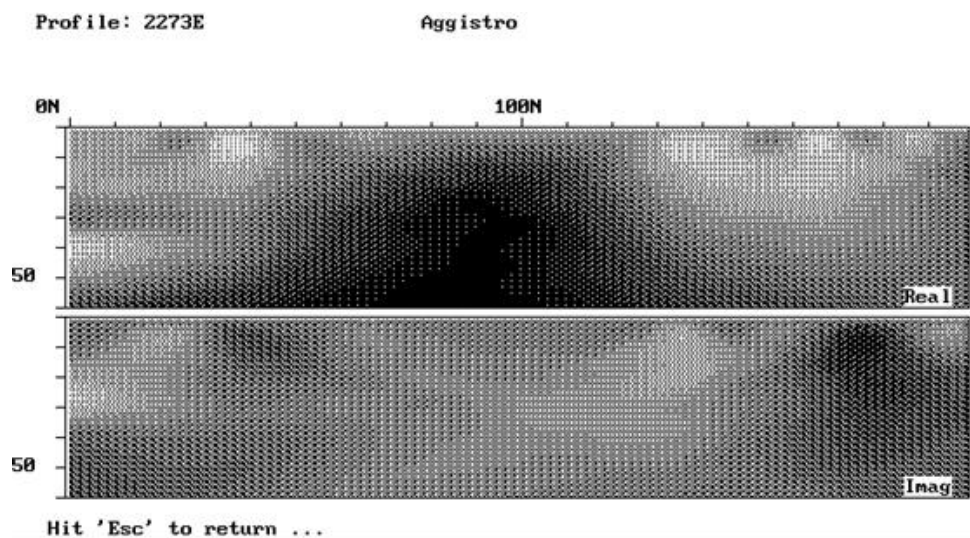
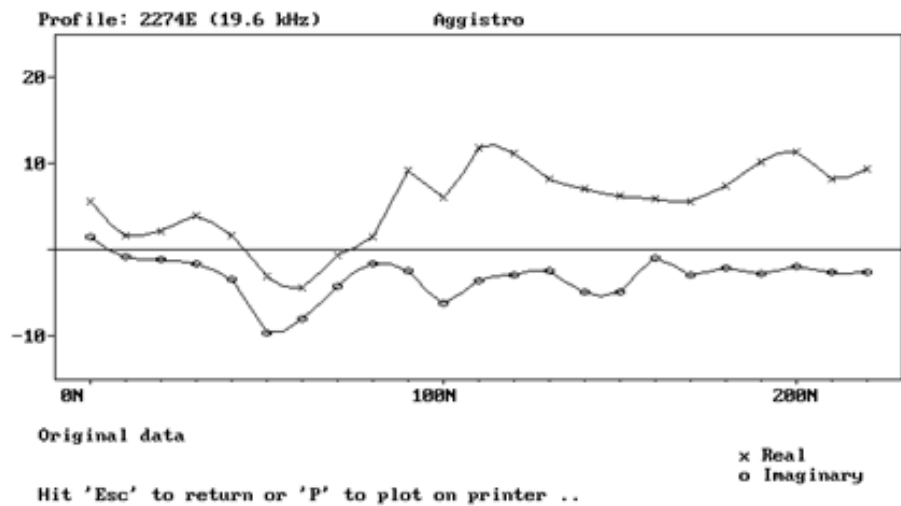


Figure 3:6 : Κατανομή της πυκνότητας του ρεύματος της πραγματικής και της φανταστικής συνιστώσας αντίστοιχα κατά την 3^η όδευση

ΟΔΕΥΣΗ 4



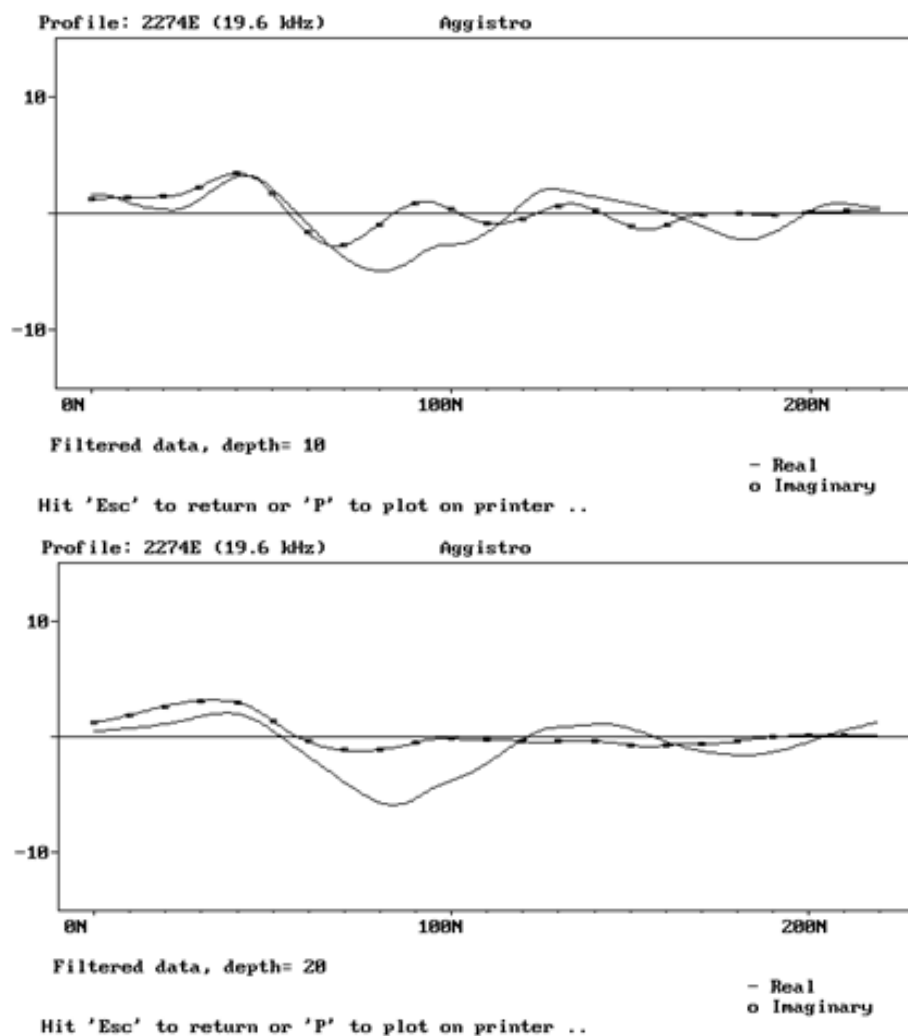


Figure 3:7 : Αποτελέσματα της 4ης όδευσης. Το πρώτο διάγραμμα δείχνει την μεταβολή της πραγματικής και φανταστικής συνιστώσας του δευτερογενούς μαγνητικού πεδίου, ενώ το δεύτερο και το τρίτο τις φιλτραρισμένες τιμές στα 10m και στα 20m αντίστοιχα

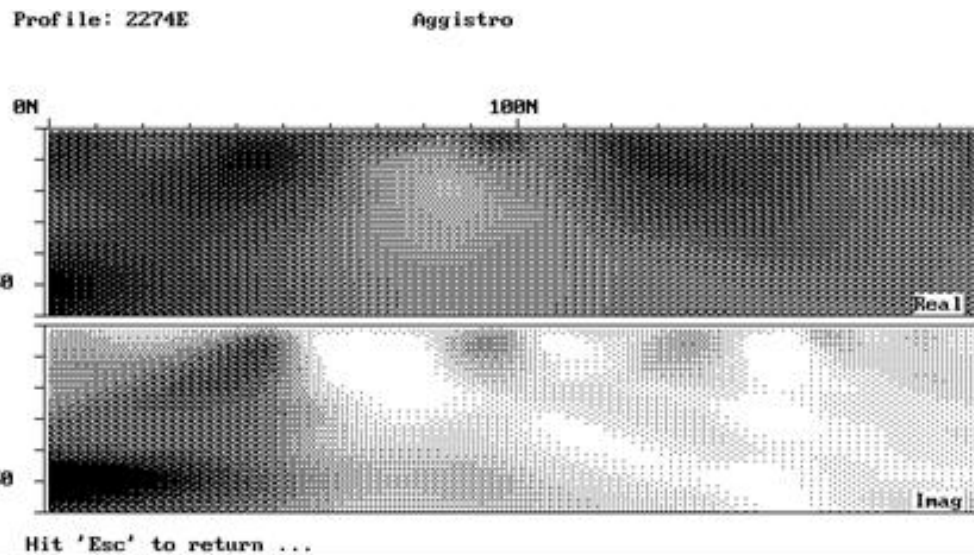
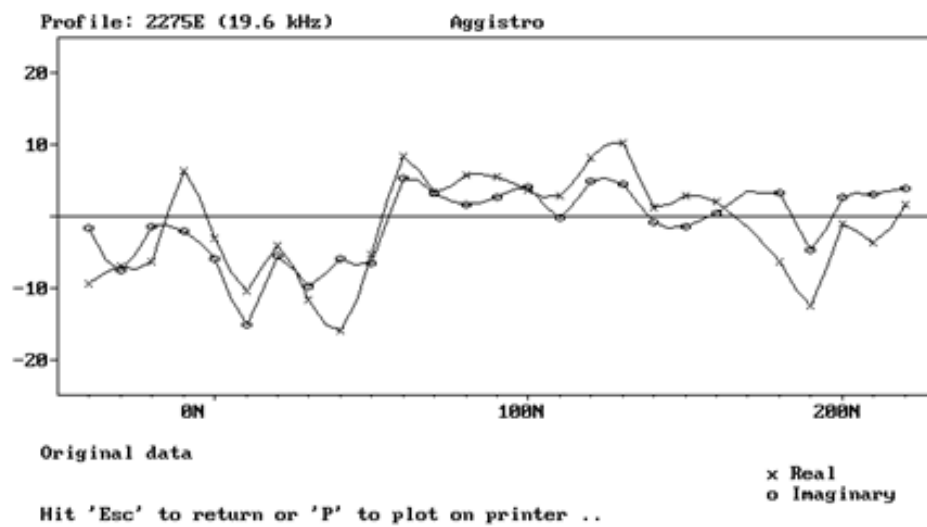


Figure 3:8 : Κατανομή της πυκνότητας του ρεύματος της πραγματικής και της φανταστικής συνιστώσας αντίστοιχα κατά την 4^η όδευση

ΟΔΕΥΣΗ 5



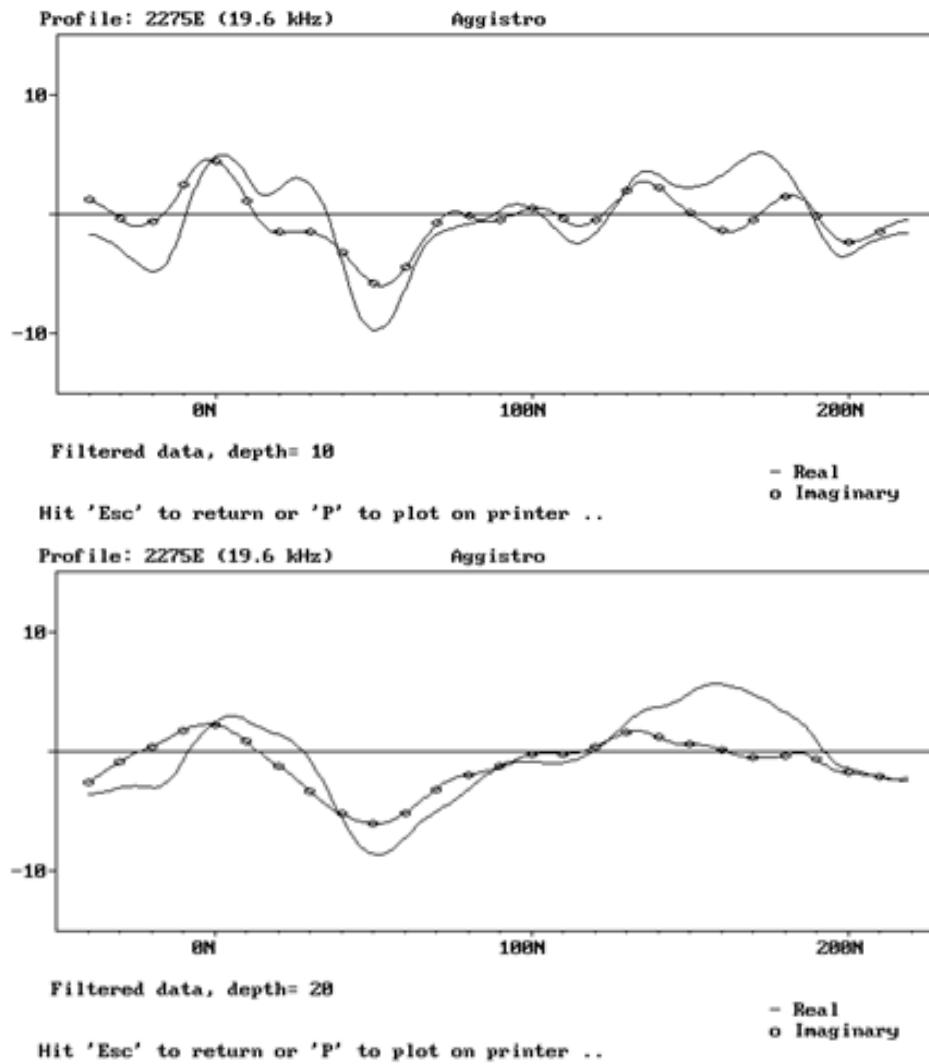


Figure 3:9 : Αποτελέσματα της 5ης όδευσης. Το πρώτο διάγραμμα δείχνει την μεταβολή της πραγματικής και φανταστικής συνιστώσας του δευτερογενούς μαγνητικού πεδίου, ενώ το δεύτερο και το τρίτο τις φιλτραρισμένες τιμές στα 10m και στα 20m αντίστοιχα

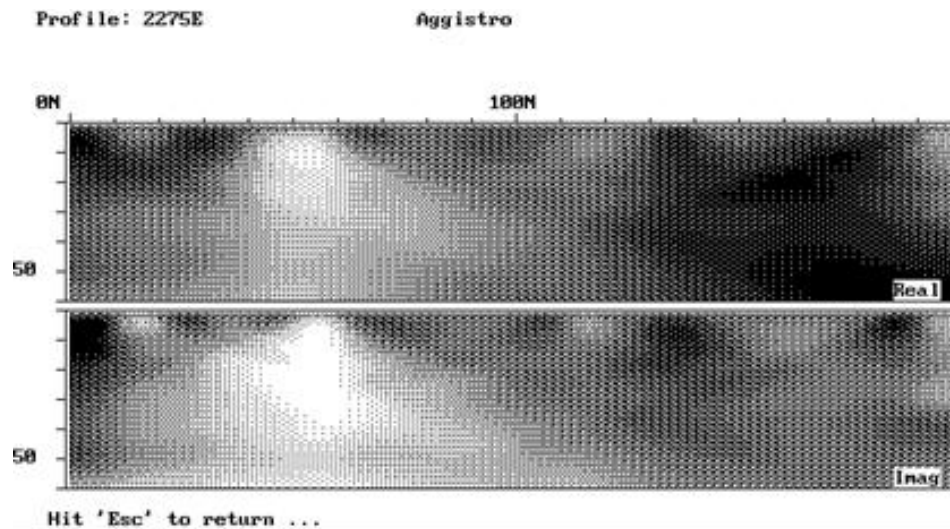
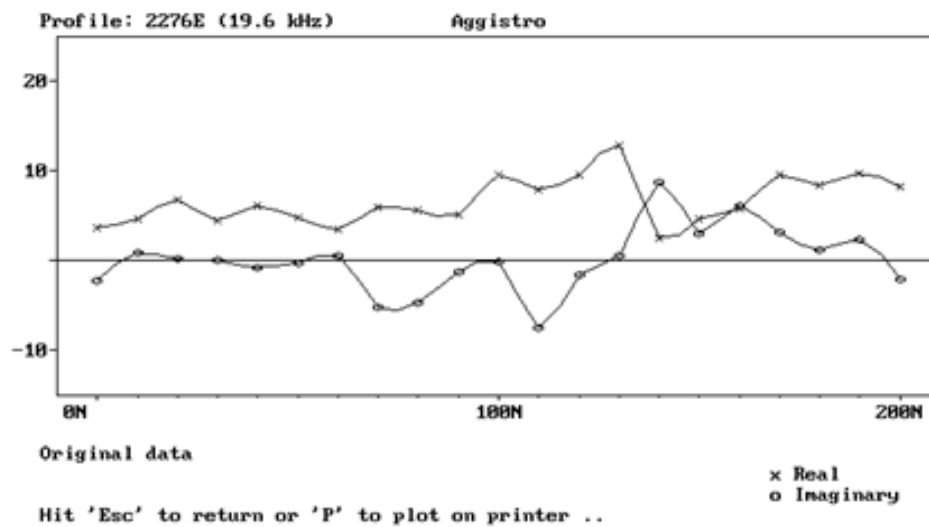


Figure 3:10 : Κατανομή της πυκνότητας του ρεύματος της πραγματικής και της φανταστικής συνιστώσας αντίστοιχα κατά την 5^η όδευση

ΟΔΕΥΣΗ 6



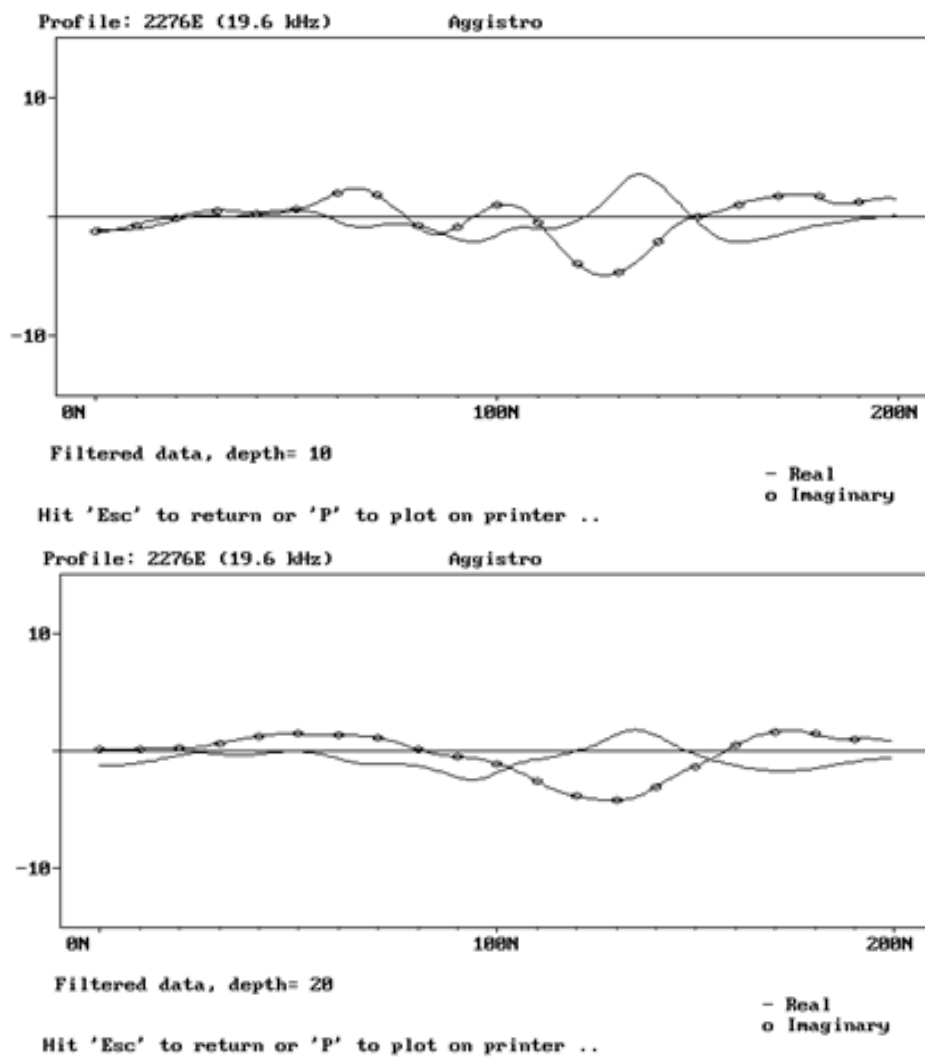


Figure 3:11 : Αποτελέσματα της 6ης όδευσης. Το πρώτο διάγραμμα δείχνει την μεταβολή της πραγματικής και φανταστικής συνιστώσας του δευτερογενούς μαγνητικού πεδίου, ενώ το δεύτερο και το τρίτο τις φιλτραρισμένες τιμές στα 10m και στα 20m αντίστοιχα

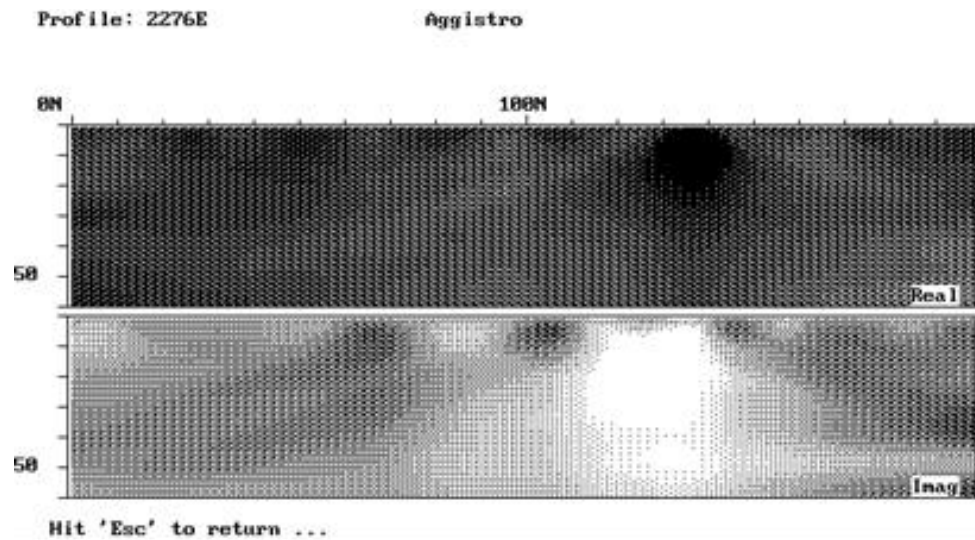
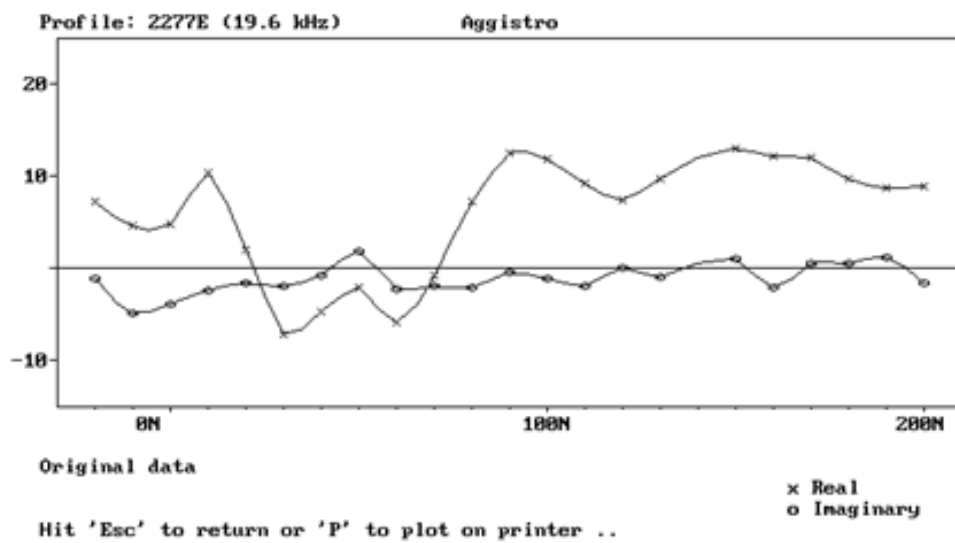


Figure 3:12 : Κατανομή της πυκνότητας του ρεύματος της πραγματικής και της φανταστικής συνιστώσας αντίστοιχα κατά την 6^η όδευση

ΟΔΕΥΣΗ 7



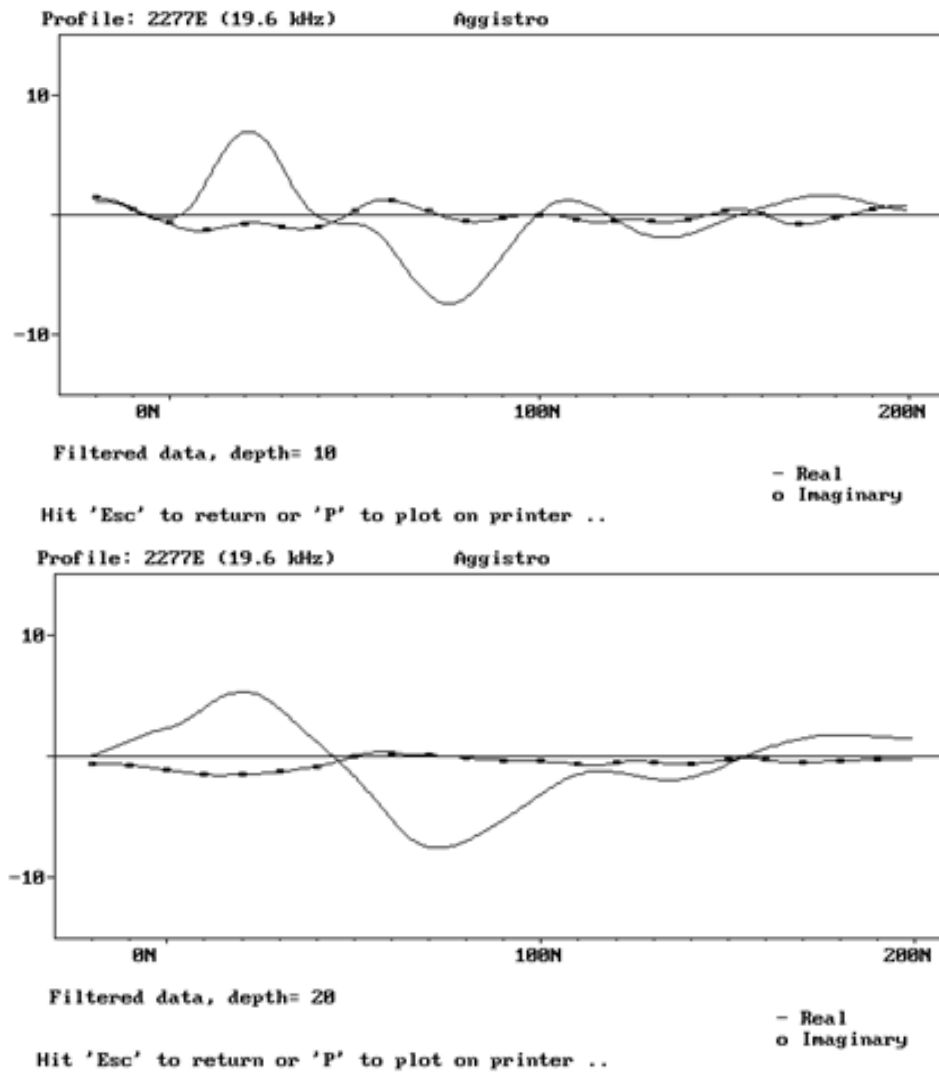


Figure 3:13 : Αποτελέσματα της 7ης όδευσης. Το πρώτο διάγραμμα δείχνει την μεταβολή της πραγματικής και φανταστικής συνιστώσας του δευτερογενούς μαγνητικού πεδίου, ενώ το δεύτερο και το τρίτο τις φιλτραρισμένες τιμές στα 10m και στα 20m αντίστοιχα

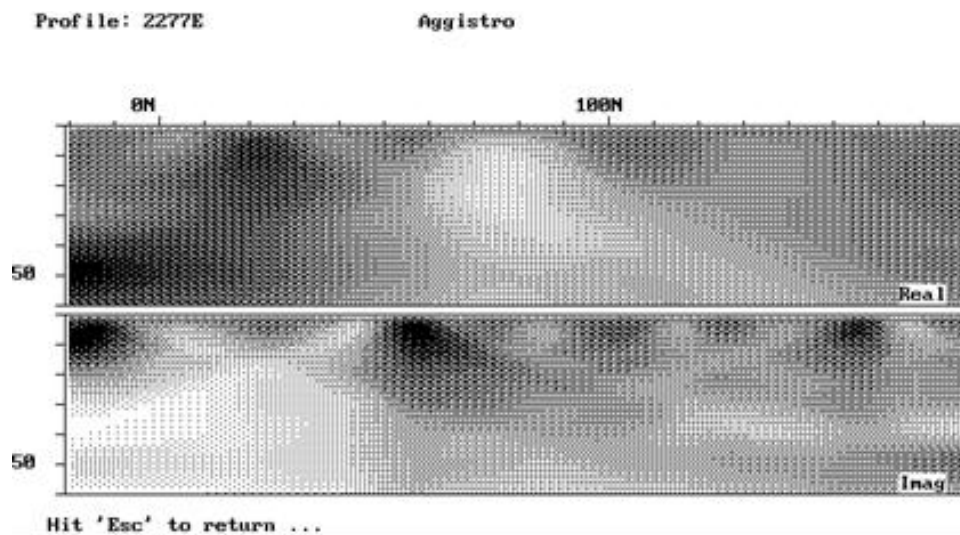
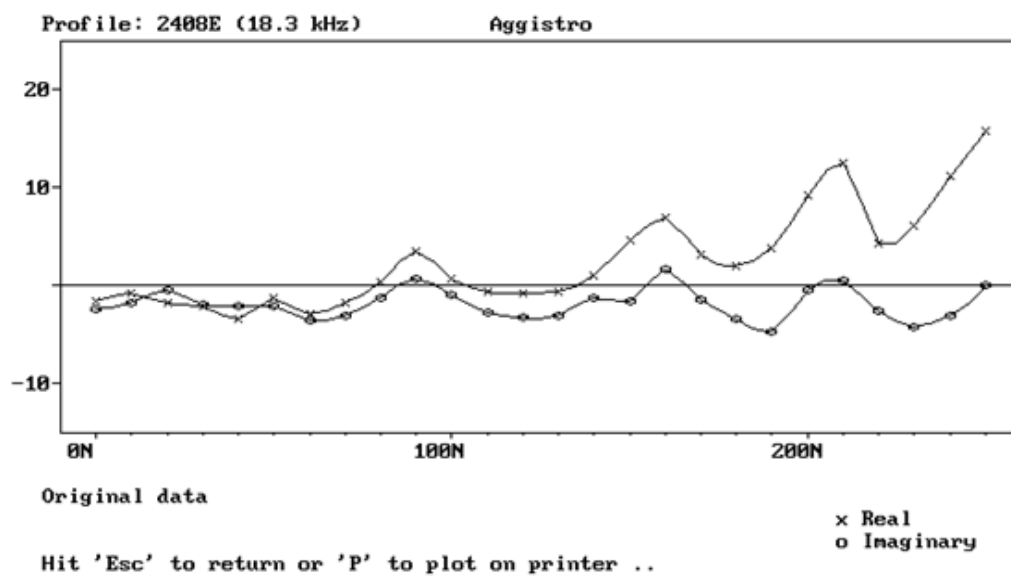


Figure 3:14 : Κατανομή της πυκνότητας του ρεύματος της πραγματικής και της φανταστικής συνιστώσας αντίστοιχα κατά την 7^η όδευση

ΟΔΕΥΣΗ 8



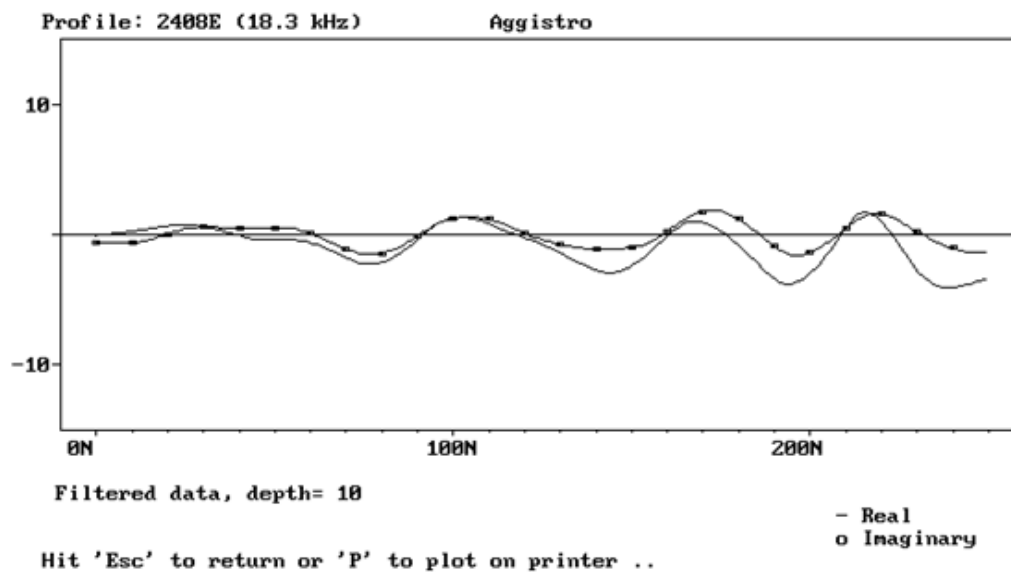


Figure 3:15 : Αποτελέσματα της 8ης όδευσης. Το πρώτο διάγραμμα δείχνει την μεταβολή της πραγματικής και φανταστικής συνιστώσας του δευτερογενούς μαγνητικού πεδίου, ενώ το δεύτερο τις φιλτραρισμένες τιμές στα 10m

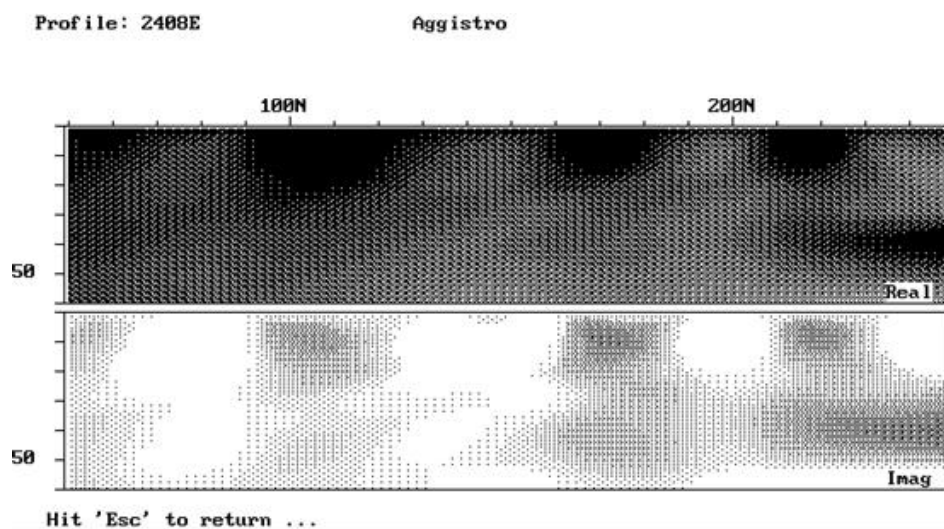


Figure 3:16 : Κατανομή της πυκνότητας του ρεύματος της πραγματικής και της φανταστικής συνιστώσας αντίστοιχα κατά την 8^η όδευση

ΟΔΕΥΣΗ 9

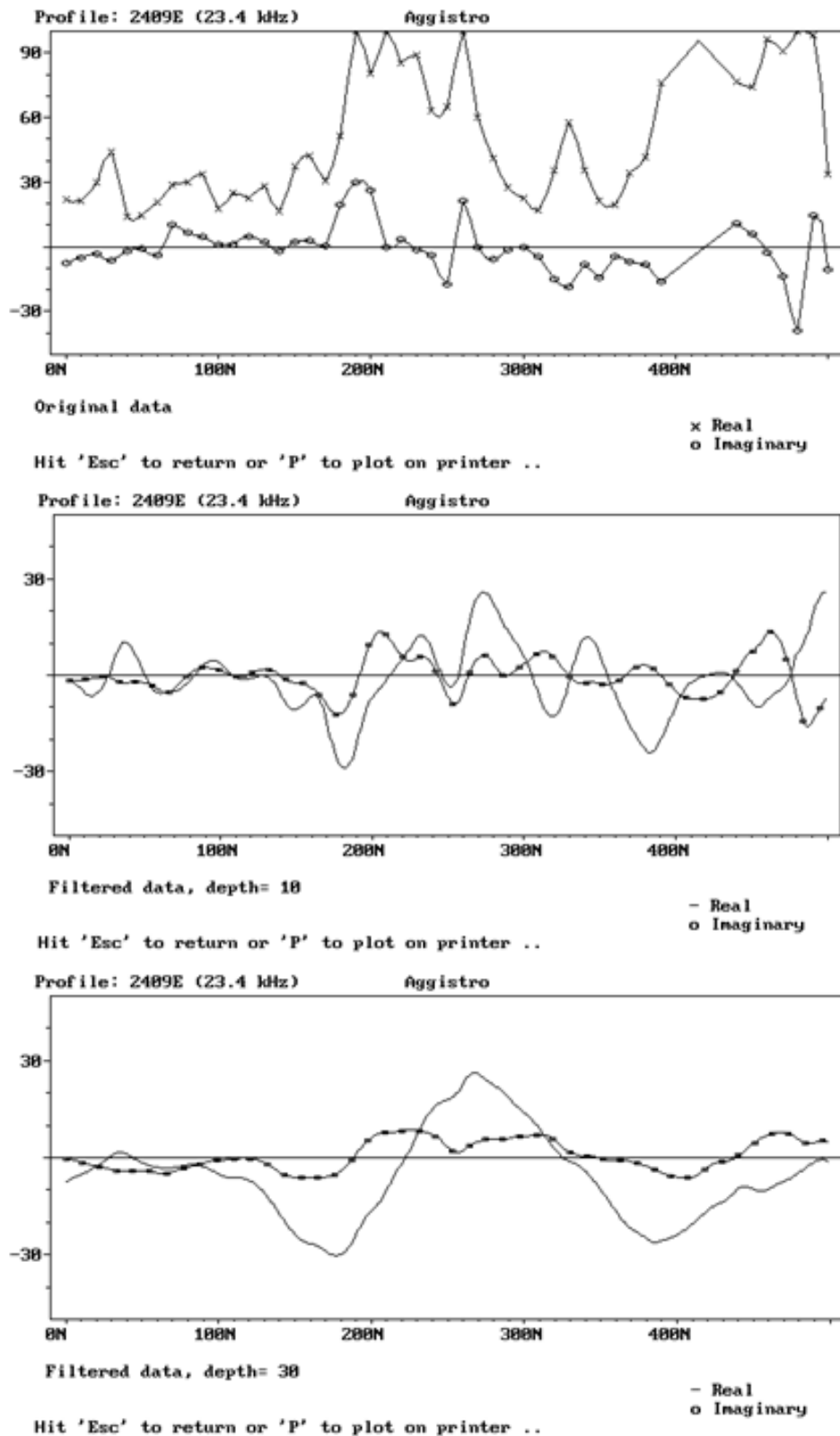


Figure 3:17 : Αποτελέσματα της 9ης όδευσης. Το πρώτο διάγραμμα δείχνει την μεταβολή της πραγματικής και φανταστικής συνιστώσας του δευτερογενούς μαγνητικού πεδίου, ενώ το δεύτερο και το τρίτο τις φίλτραρισμένες τιμές στα 10m και στα 30m αντίστοιχα

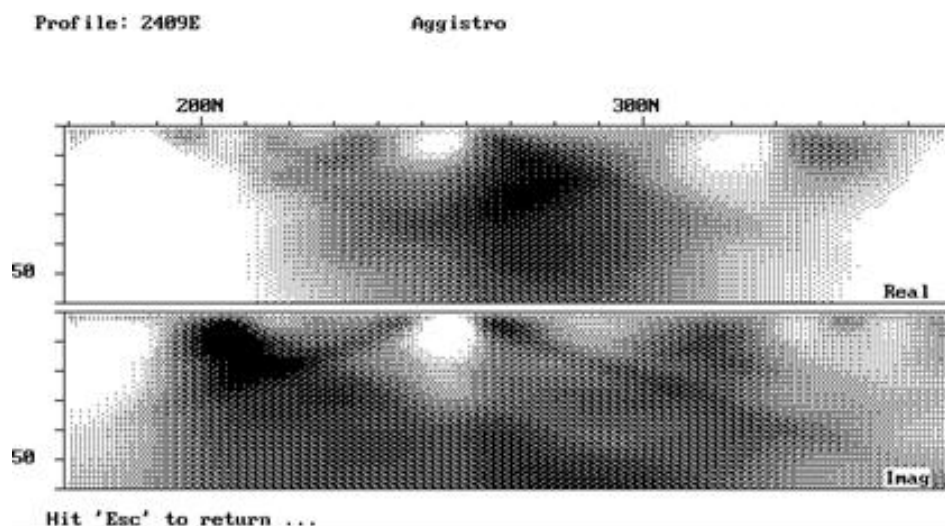
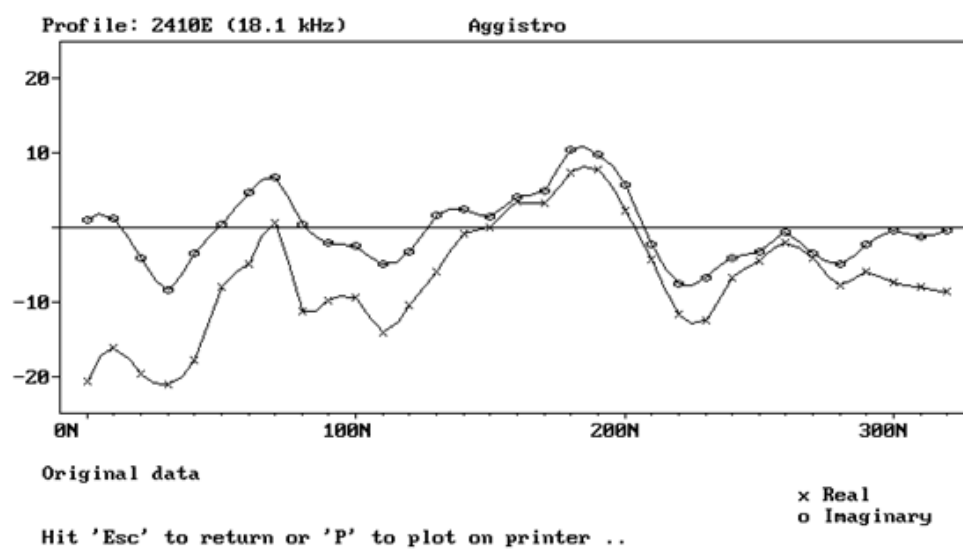


Figure 3:18 : Κατανομή της πυκνότητας του ρεύματος της πραγματικής και της φανταστικής συνιστώσας αντίστοιχα κατά την 9^η όδευση

ΟΔΕΥΣΗ 10



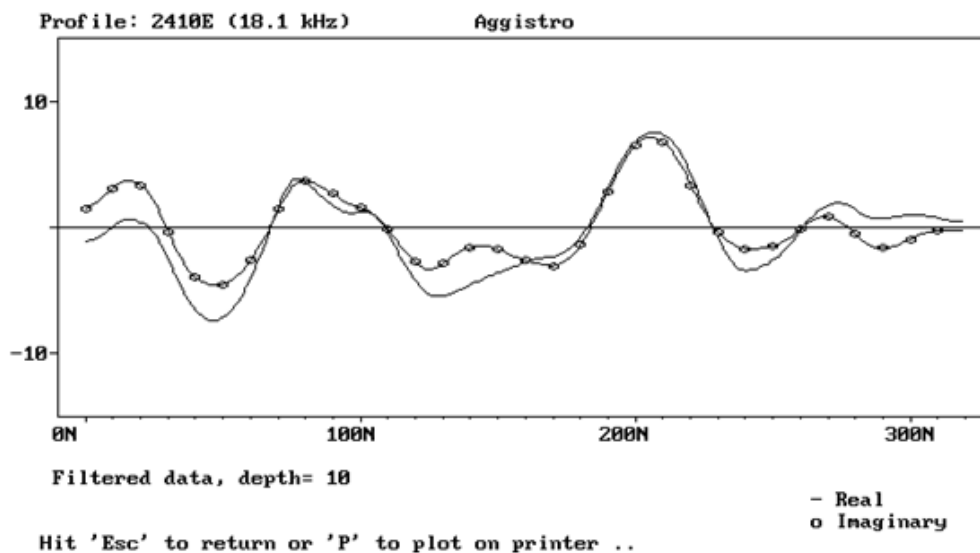


Figure 3:19 : Αποτελέσματα της 10ης όδευσης. Το πρώτο διάγραμμα δείχνει την μεταβολή της πραγματικής και φανταστικής συνιστώσας του δευτερογενούς μαγνητικού πεδίου, ενώ το δεύτερο τις φιλτραρισμένες τιμές στα 10m

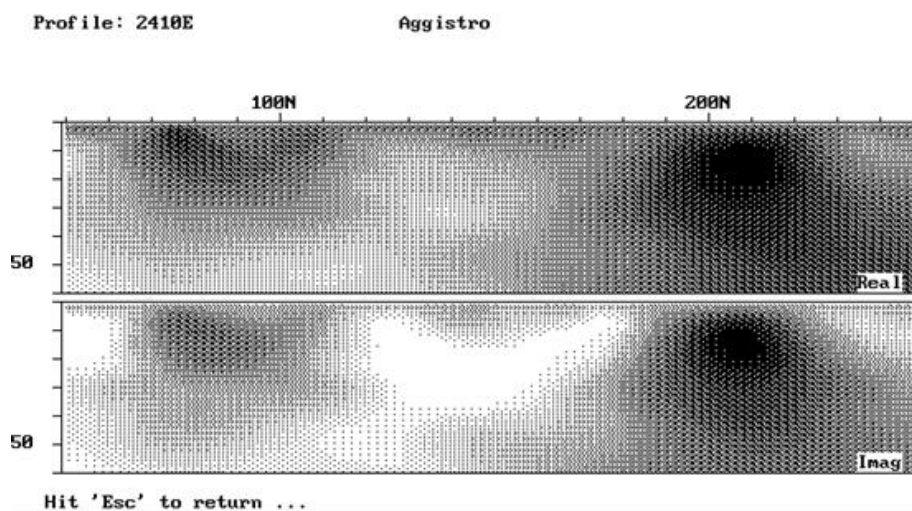


Figure 3:20 : Κατανομή της πυκνότητας του ρεύματος της πραγματικής και της φανταστικής συνιστώσας αντίστοιχα κατά την 10^η όδευση

ΟΔΕΥΣΗ 11

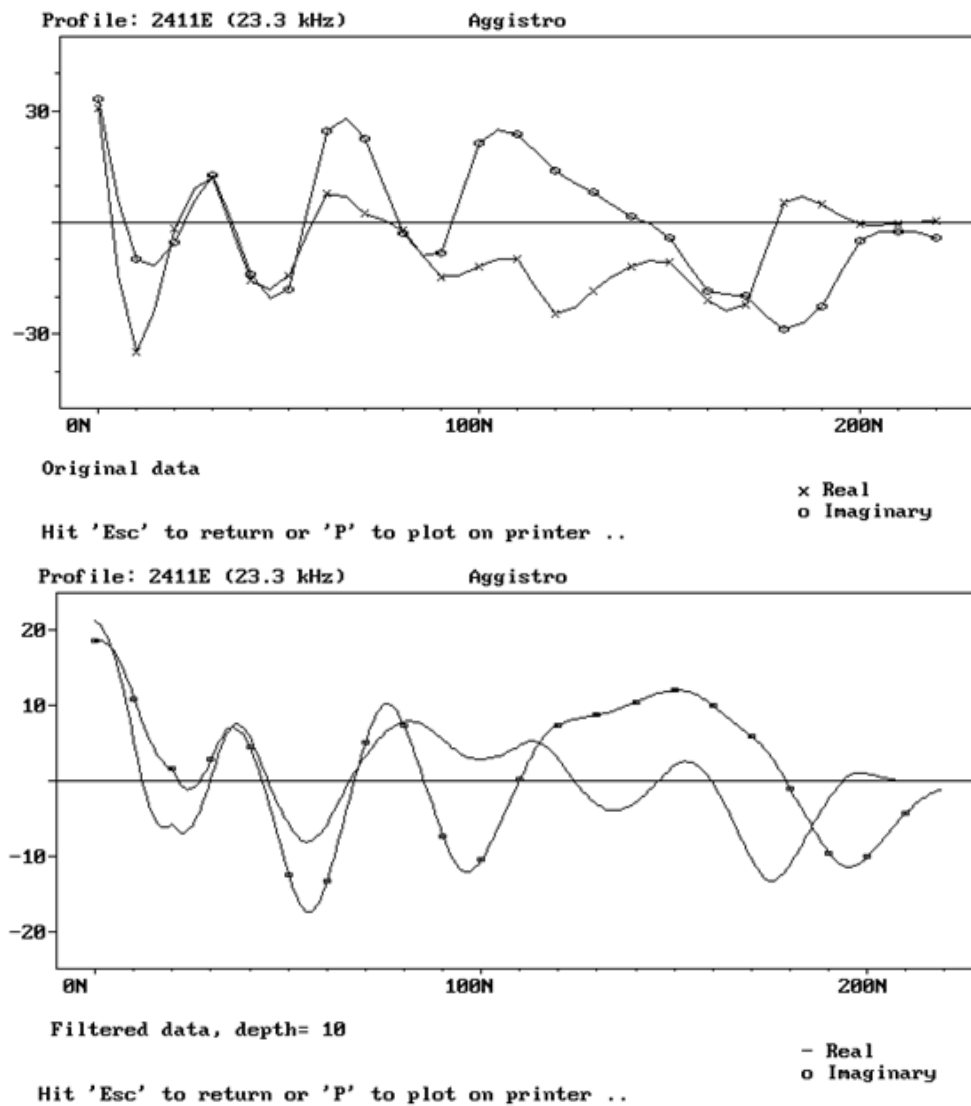


Figure 3:21 : Αποτελέσματα της 11ης όδευσης. Το πρώτο διάγραμμα δείχνει την μεταβολή της πραγματικής και φανταστικής συνιστώσας του δευτερογενούς μαγνητικού πεδίου, ενώ το δεύτερο τις φιλτραρισμένες τιμές στα 10m

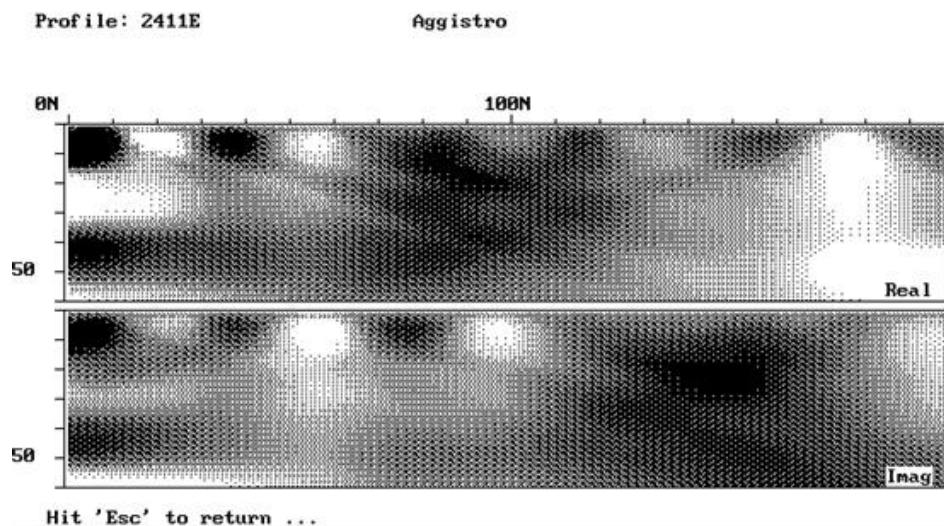
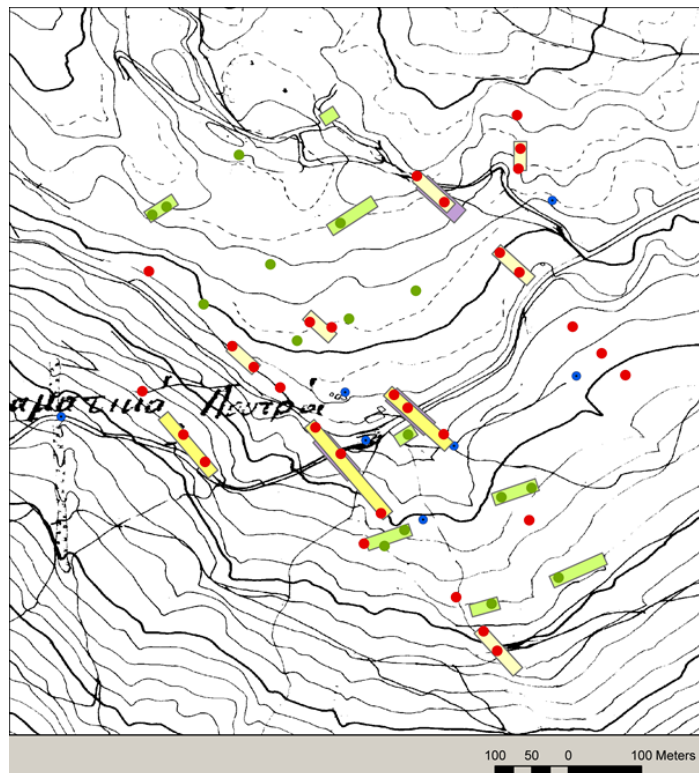


Figure 3:22 : Κατανομή της πυκνότητας του ρεύματος της πραγματικής και της φανταστικής συνιστώσας αντίστοιχα κατά την 11^η όδευση

Με βάση την αξιολόγηση των μετρήσεων VLF προκύπτει ο παρακάτω χάρτης, ο οποίος παρουσιάζει την ύπαρξη αγώγιμων ζωνών, οι οποίες αντιστοιχούν σε τεκτονικά καταπονημένες ζώνες, δηλαδή ρήγματα.



Εικόνα 3-5 : Χάρτης αποτελεσμάτων της γεωφυσικής μελέτης στην περιοχή

Κάθε κύκλος στον χάρτη αντιστοιχεί σε ανωμαλία στις μετρήσεις VLF ενώ τα παραλληλόγραμμα σε αγωγίμες ζώνες οι οποίες σχετίζονται μεταξύ τους βάσει στοιχείων γειτονικών οδεύσεων. Οι κόκκινοι κύκλοι και τα κίτρινα παραλληλόγραμμα αντιστοιχούν σε ανωμαλίες και αγωγίμες ζώνες, αντίστοιχα, στις οδεύσεις με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ, ενώ οι πράσινοι κύκλοι και τα πράσινα παραλληλόγραμμα σε ανωμαλίες και αγωγίμες ζώνες των οδεύσεων με διεύθυνση (Α)ΒΑ-(Δ)ΝΔ. Τέλος, τα μωβ παραλληλόγραμμα αντιστοιχούν στην κατά βάθος συνέχεια των αγωγίμων αυτών ζωνών σε βάθη μεγαλύτερα των 50 μέτρων, τα οποία προέκυψαν από την εφαρμογή φίλτρων σε σχέση με αυτό το βάθος.

Με τη βοήθεια του χάρτη παρατηρούνται δύο συστήματα ρηγμάτων, ένα με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ και ένα με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ, με τις σημαντικότερες ρηξιγενείς ζώνες να συμβάλλουν στην θέση των πηγών του λουτροθεραπευτηρίου.

4. Συμπεράσματα

Από τη γεωφυσική έρευνα που διεξήχθη στην περιοχή του Αγκίστρου του νομού Σερρών προκύπτουν κάποια βασικά συμπεράσματα.

Αρχικά, επιβεβαιώνεται το γεγονός ότι η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος VLF είναι αποτελεσματική σε υδρογεωλογικά περιβάλλοντα, όπως είναι το γεωθερμικό αυτό πεδίο του Αγκίστρου. Το γεγονός ότι τα περιβάλλοντα αυτά είναι γενικότερα αγωγίμα μπορεί να θεωρηθεί σαν μειονέκτημα σε μία μέθοδο όπως είναι το VLF, λόγω του ότι ιδανικά χρειάζεται ένα αντιστατικό περιβάλλον για να εντοπίσει ένα αγωγίμο σώμα, δηλαδή στην περίπτωσή μας τις ρηξιγενείς ζώνες, όμως τα αποτελέσματα της μελέτης διαψεύδουν αυτή την αντίληψη.

Η παρούσα έρευνα εντόπισε δύο κύρια συστήματα τεκτονικά καταπονημένων ζωνών, τα οποία συνδέονται τόσο με τη δημιουργία των πηγών, όσο και με τη λειτουργία τους, καθώς και με τη συνεχή τροφοδοσία των λουτρών του Αγκίστρου. Οι ρηξιγενείς αυτές ζώνες αναπτύσσονται ΑΒΑ-ΔΝΔ και ΒΔ-ΝΑ αντίστοιχα, συμβάλλοντας στην περιοχή των πηγών, γεγονός το οποίο αποτελεί ισχυρή ένδειξη για τον σημαντικό ρόλο τους στο μηχανισμό λειτουργίας των πηγών.

Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί πως η παρούσα εργασία με τη χρήση της μεθόδου VLF, εκτός του ότι είναι μια ανέξοδη και γρήγορη στη λήψη δεδομένων μέθοδος, έδωσε επίσης αξιόπιστες πληροφορίες σε σχέση με τη γεωφυσική δομή της περιοχής των πηγών οι οποίες μπορούν να ληφθούν υπόψη τόσο στην περαιτέρω μελέτη της περιοχής με γεωτρητικά προγράμματα όσο και σε σχέδια προστασίας των πηγών στο σύνολό τους.

5. Βιβλιογραφία

- Eberle, D. (1981). A method of reducing terrain relief effects from VLF-EM data, *Geoexploration*, vol. 19.
- Fraser, D. C. (1969). Contouring of VLF-EM data, *Geophysics*.
- Fytikas, M., Andritsos, N., Karydakis, G., Kolios, N., Mendrinou, D., and Papachristou, M. (2000). Geothermal exploration and development activities in Greece during 1995-1999, *Proceedings World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan, May 28-June 10, 2000.*, pp. 199-208.
- Grant, F. S. and West, G. F. (1965). *Interpretation Theory in Applied Geophysics*, New York-London, MacGraw Hill Book Comp. Inc.
- Hutchinson, P. J., Barta, L. S. (2002). VLF surveying to delineate longwall mine-induced fractures, *The Leading Edge*.
- Karous, M., and Hjelt, S. E. (1983). Linear-filtering of VLF dip-angle measurements: *Geophys. Prosp.*, 31.
- Καρυδάκης, Γ, Ανδρίτσος, Ν., και Φυτίκας, Μ. (1999). Εξελίξεις στην Ανάπτυξη της Γεωθερμικής Ενέργειας στο Ν. Σερρών. Πρακτικά 6ου Συν. Ηλιακής Τεχνικής, Βόλος, 3-5 Νοεμβρίου 1999, Τόμος Α, σελ. 427-434.
- Karydakis, F., Arvanitis, A., Andritsos, N., and Fytikas M. (2005). Low enthalpy geothermal fields in the Strymon basin (Northern Greece), *Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, 24-29 April 2005*, 1-12.
- Kearey, P., and Brooks, M. (1984). *Introduction to Geophysical Exploration*, Oxford-London-Boston, Blackwell Scientific Publications.
- Koukoulas, C. (1972). Le chevauchement de Strymon dans la region de la frontier Greco-Bulgare, *Z. Deutsch. Geol. Ges.*, Band 123, S. 343-347.
- Mendrinou, D., Choropanitis, I., Polyzou, O., Karytsas, C. (2010). Exploring for geothermal resources in Greece, *Geothermics* 39, 124-137.
- Μουντράκης, Δ. Μ. (2010). Γεωλογία και γεωτεκτονική εξέλιξη της Ελλάδας, Θεσσαλονίκη: UNIVERSITY STUDIO PRESS.

- Μπάλλας, Δ. (2009). Συμβολή στη μελέτη υπόγειας υδροφορίας με συνδυασμένη ερμηνεία μετρήσεων ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου VLF και φυσικού δυναμικού (SP), Διατριβή Ειδίκευσης, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωλογίας.
- Παναγιώτη, Ε., Χρήστου, Οδ. (1990). Γεωλογικά και Υδρογεωλογικά στοιχεία από τη μελέτη των ιαματικών πηγών του Δήμου Σιδηροκάστρου και της κοινότητας Αγκίστρου Σερρών, 2^ο Συνέδριο για τα θερμο-μεταλλικά νερά, ΣΔΚΙΠΕ, Θεσσαλονίκη, 7-9 Οκτωβρίου 1988.
- Παπαζάχος, Β. Κ. (1996). Εισαγωγή στην Εφαρμοσμένη Γεωφυσική, Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις ΖΗΤΗ.
- Parasnis, D. S. (1995). Principles of Applied Geophysics fifth edition, London, Chapman & Hall.
- Reynolds, J. M. (1997). An Introduction to Applied and Environmental Geophysics, John Willey & Sons Ltd, Buffins Lane, Chichester, England.
- Vargemezis, G. (2014). 3D geoelectrical model of geothermal spring mechanism derived from VLF measurements: A case study from Aggistro (Northern Greece), Geothermics 51, 1-8.

Ιστοσελίδες

www.geo.auth.gr