

## ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΑΡΟΔΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ ΣΤΗΝ ΕΡΕΥΝΑ ΤΟΥ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΑΡΙΣΤΙΝΟΥ ΑΛΕΞ/ΛΗΣ

Π. Κάρμης<sup>1</sup>, Γ. Βαργεμέζης<sup>2</sup>, Η. Παπαδόπουλος<sup>2</sup>, και Π. Τσούρλος<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Δ/νση Γεωφυσικής, Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, Μεσογείων 70, 11527 Αθήνα

<sup>2</sup> ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ, ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ, ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ, 54124 ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή εξετάζονται οι δυνατότητες της Ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου παροδικών πεδίων (Transient EM), στην έρευνα γεωθερμικών πεδίων και τη μελέτη της γεωλογικής στρωματογραφίας. Η μέθοδος εφαρμόστηκε στο γεωθερμικό πεδίο του Αρίστινου Αλεξανδρούπολης, δυτικά της Τραϊανούπολης, όπου υπάρχουν οι γνωστές θερμές πηγές. Η ΗΜ μέθοδος και ειδικότερα η μαγνητοτελλουρική (MT), έχει εφαρμοσθεί στο παρελθόν στην Ελλάδα από διάφορους ερευνητές (Λάγιος 1992, Τζάνης 1993), αλλά είναι η πρώτη φορά που δοκιμάζεται η εφαρμογή της TEM μεθόδου.

Όπως έχει καταδειχθεί από την εκτέλεση ερευνητικού προγράμματος του ΙΓΜΕ (Κολιός κ.α. 2001), στην ευρύτερη περιοχή του Αρίστινου αναπτύσσεται ένα σημαντικό γεωθερμικό κοίτασμα με γεωθερμικά ρευστά θερμοκρασίας 30<sup>0</sup>-95<sup>0</sup> και υψηλής περιεκτικότητας διαλυμένων αλάτων της τάξης των 10 gr/lit. Οι παραπάνω παράγοντες έχουν σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση γεωηλεκτρικών οριζόντων ισχυρής αγωγιμότητας που σχετίζονται άμεσα με το γεωθερμικό πεδίο της περιοχής. Η ύπαρξη δυο γεωτρήσεων στην περιοχή επέτρεψε την βαθμονόμηση της ΗΜ έρευνας και τον έλεγχο της αποτελεσματικότητας της TEM μεθόδου.

Από τα αποτελέσματα της γεωφυσικής έρευνας οριοθετείται ζώνη τοπικού γεωθερμικού ενδιαφέροντος που διαμορφώνεται από θερμό υδροφόρο ορίζοντα μικρού σχετικά βάθους, επεκτεινόμενο Βόρεια του Αρίστινου και μεταξύ των κύριων ρηγμάτων της περιοχής. Τα δυο κύρια ρήγματα είναι υπεύθυνα για τη δημιουργία τεκτονικού βυθίσματος στην ενδιάμεση περιοχή και είναι επίσης υπεύθυνα για την ανάπτυξη του ισχυρά αγωγίμου σχηματισμού που συνδέεται με το θερμό υδροφόρο ταμιευτήρα των γεωτρήσεων. Το γεωθερμικό ρευστό ανέρχεται από το σύστημα των ρηγμάτων της περιοχής έχοντας αποκτήσει μεγάλη θερμοκρασία από την επαφή με μαγματικές μάζες. Η εφαρμογή της TEM μεθοδολογίας απέδειξε τα επιχειρησιακά της πλεονεκτήματα στην έρευνα γεωθερμικών πεδίων. Ο μικρός αριθμός των μετρήσεων δεν επιτρέπει την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων σε ότι αφορά το γεωθερμικό πεδίο της ευρύτερης περιοχής, αλλά η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων με βάση τα γεωλογικά και γεωτρητικά δεδομένα της περιοχής είναι άκρως ενθαρρυντικά και δικαιολογούν τη χρήση της μεθόδου στη συστηματική μελέτη και χαρτογράφηση γεωθερμικών πεδίων.

### 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην περιοχή του Αρίστινου Αλεξανδρούπολης (σχήμα 1), διεξήχθη γεωφυσική έρευνα με τη μέθοδο TEM, σε συνεργασία με τον Φορέα Ν<sup>0</sup> 2, με σκοπό την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας της μεθόδου στην έρευνα γεωθερμικών πεδίων και τη μελέτη της γεωλογικής στρωματογραφίας της περιοχής.

Η περιοχή βρίσκεται βορειοανατολικά της Αλεξανδρούπολης και δυτικά της Τραϊανούπολης, όπου υπάρχουν οι γνωστές θερμές πηγές με επιφανειακές εκδηλώσεις θερμότητας.

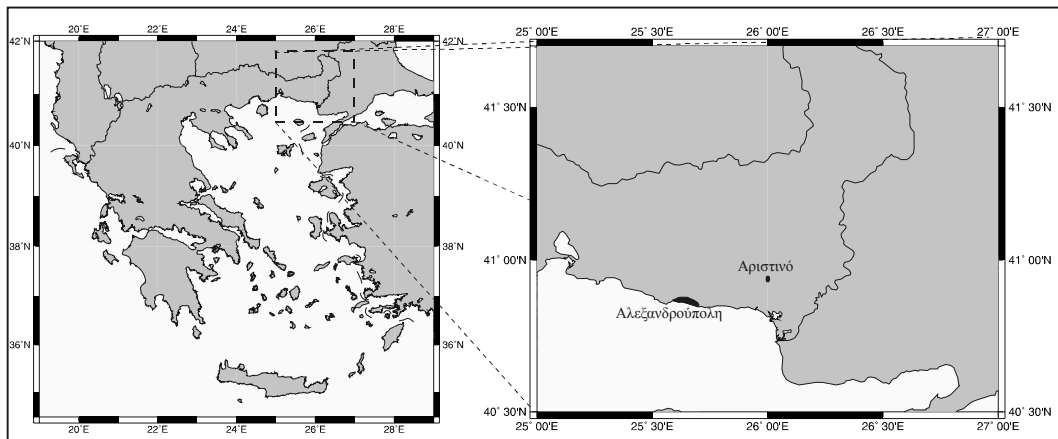
Η αποτελεσματική εφαρμογή της Ηλεκτρομαγνητικής (MT, TEM) μεθόδου σε έρευνες γεωθερμικών πεδίων, γίνεται δυνατή εξαιτίας των ακόλουθων παραγόντων :

- Αυξημένο πορώδες των υδροπερατών σχηματισμών που φιλοξενούν τα γεωθερμικά ρευστά
- Η μεγάλη θερμοκρασία των ρευστών που συμβάλλει στη μείωση της ειδικής αντίστασης.

- Η παρουσία τεκτονικής δράσης με επακόλουθο τη δημιουργία αγωγίμων αργιλικών υλικών λόγω των συνοδών υδροθερμικών εξαλλοιώσεων.
- Η αυξημένη περιεκτικότητα των διαλυμένων αλάτων των γεωθερμικών ρευστών, που έχουν ως άμεση συνέπεια την αυξημένη αγωγιμότητα.

Η περιοχή του Αρίστινου όπου εφαρμόστηκε δοκιμαστικά η μέθοδος παρουσιάζει έντονη τεκτονική με σημαντική ανάπτυξη Τριτογενούς ηφαιστειότητας και σημαντικές εκχύσεις μαγματικών μαζών. Όπως έχει καταδειχθεί (Κολιός κ. α. 2001), στη περιοχή αναπτύσσεται ένα σημαντικό γεωθερμικό κοίτασμα με γεωθερμικά ρευστά θερμοκρασίας 30<sup>0</sup>-95<sup>0</sup>C και υψηλής περιεκτικότητας διαλυμένων αλάτων της τάξης των 10 gr/lit.

Οι παραπάνω παράγοντες έχουν σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση γεωηλεκτρικών οριζόντων ισχυρής αγωγιμότητας που σχετίζονται άμεσα με το γεωθερμικό πεδίο της περιοχής.



Σχήμα 1 Χάρτης της ευρύτερης περιοχής έρευνας.

## 2 ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η περιοχή του Αρίστινου και των Λουτρών Τραϊνανούπολης ανήκει στην ιζηματογενή λεκάνη Δυτικά του ποταμού Εβρου, η οποία αναπτύσσεται στο Νότιο τμήμα της Ροδοπικής μάζας, με μεγάλο πάχος Παλαιογενών ιζημάτων του Ηωκαίνου και Ολιγοκαίνου που κάθονται ασύμφωνα είτε σε Μεσοζωϊκά πετρώματα, είτε σε αμφιβολίτες, γνευσίους της Ροδοπικής μάζας.

Η ανάπτυξη της ιζηματογενούς λεκάνης ακολούθησε την πορεία του ευρύτερου Περιροδοπικού ιζηματογενούς χώρου από το Ανώτερο Κρητιδικό μέχρι σήμερα, με την ιζηματογένεση να ακολουθεί την Τεκτονική ορογενετική διαδικασία των τελευταίων φάσεων των Αλπικών πτυχωσεων.

Αποτέλεσμα των διαρρήξεων και της εφελκυστικής τεκτονικής ήταν η δημιουργία μεγάλων ταφροειδών λεκανών, που αποτέλεσαν το χώρο απόθεσης τριτογενών μολασσικών ιζημάτων. Αυτά επικάθονται στο φυλλικό υπόβαθρο της σειράς της Μάκρης, που αποτελείται από Κρητιδικούς αργιλικούς – σερικιτικούς σχιστόλιθους.

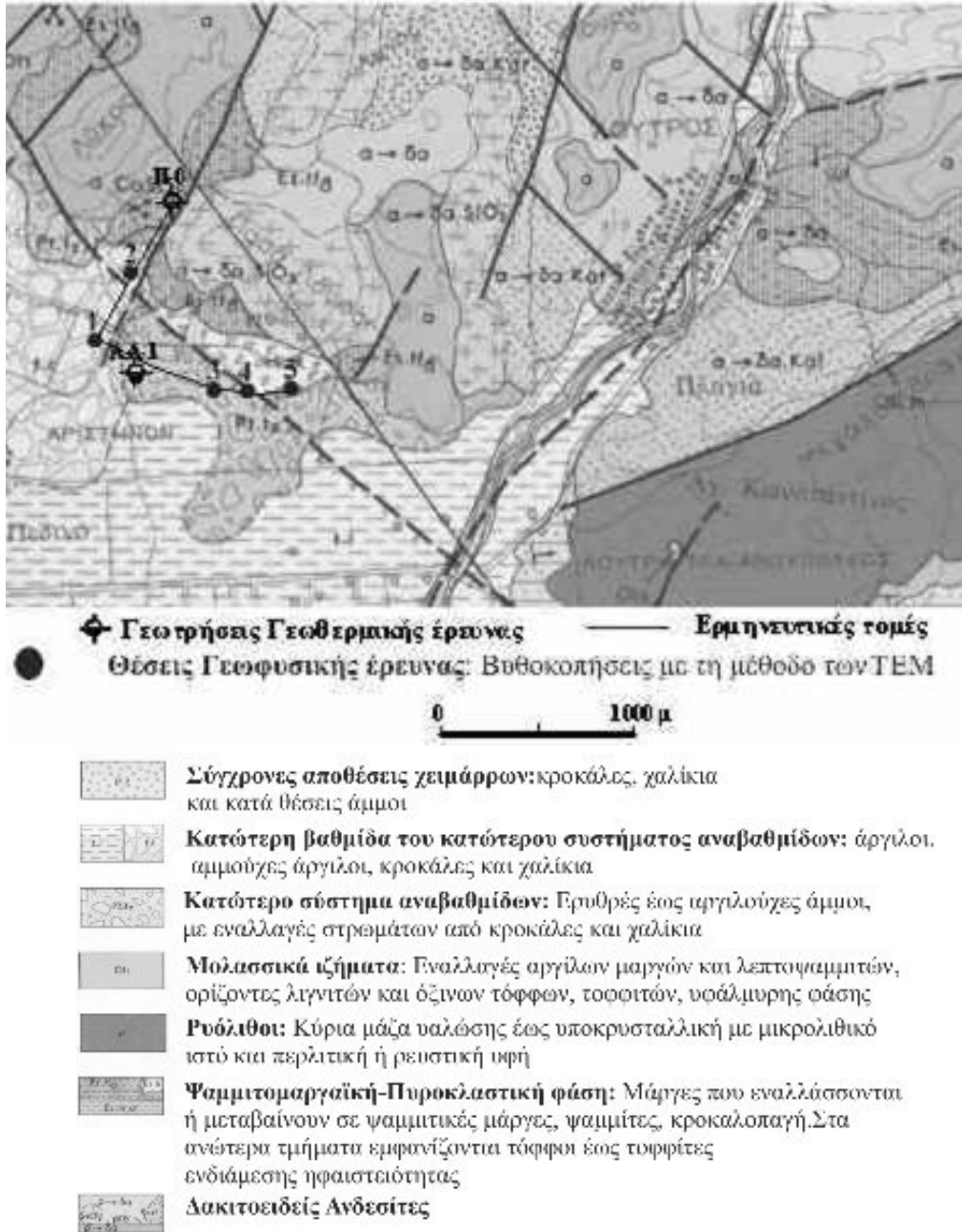
Στο Μέσο Ηώκαινο (Λουτήσιο) εμφανίζεται η βασική κλαστική σειρά ιζημάτων, αποτελούμενη από λατυπο-κροκαλοπαγή, ψαμμίτες και ασβεστοψαμμιτικούς ως μαργαϊκούς ορίζοντες.

Στο Ανω Ηώκαινο, κατά τον ίδιο χρόνο με την απόθεση των μολασσικών ιζημάτων, εμφανίζεται ηφαιστειακή – μαγματική δράση με ηφαιστειακά πετρώματα ανδεσιτικής σύστασης, λάβες, τόφους και ηφαιστειακά λατυποπαγή, τοπικά έντονα εξαλλοιωμένα. Τα ηφαιστειακά πετρώματα εναλλάσσονται με μολασσικά ιζήματα ψαμμιτομαργαϊκού και ασβεστοψαμμιτικού τύπου.

Στο Ολιγόκαινο τα ιζήματα αποτελούνται από εναλλαγές μαργών με ψαμμίτες. Παράλληλα εμφανίζεται ηφαιστειότητα ρυολιθικού τύπου, με την ανάπτυξη όξινων δόμων, τόφων και τοφίτων.

Στα ιζήματα του Νεογενούς της περιοχής έρευνας συγκαταλέγονται εναλλαγές ψαμμιτών, άμμων, αμμούχων αργίλων – αργίλων, στα οποία επικάθονται συστήματα αναβαθμιδίων, αποτελούμενα από ερυθρές άμμους, αργιλόχους άμμους, κροκάλες και χαλίκια. Στο σχήμα 2 παρουσιάζεται τμήμα του γεωλογικού χάρτη Φέρρες (IGME 1980) με τη στενή περιοχή του χώρου έρευνας.

Η περιοχή χαρακτηρίζεται από Νότια γεωλογική κλίση και έντονη τεκτονική, με κυρίαρχο γεγονός το διασταυρούμενο σύστημα ρηγμάτων BBA-NNΔ, BBA-NNA.



Σχήμα 2. Γεωλογικός χάρτης της περιοχής έρευνας (απόσπασμα χάρτη ΙΓΜΕ, 1980 Φύλλο ΦΕΡΡΕΣ, Παπαδόπουλος, Π., 1982). Σημειώνονται οι θέσεις των TEM βυθοσκοπήσεων και των γεωτρήσεων Π0, ΑΑ1.

### 3 ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Πέρα από τις επιφανειακές εκδηλώσεις στις θερμές πηγές της Τραϊανούπολης, το γεωθερμικό ενδιαφέρον προκαλείται από την ύπαρξη υδροθερμικών γεωλογικών σχηματισμών, την κατάλληλη τεκτονική με ενεργά ρήγματα, τις εναλλαγές ηφαιστιτών και πυροκλαστικών προϊόντων και τη ρυθμική ηφαιστειότητα. Οι ηφαιστειακές μάζες του υποβάθρου λειτουργούν ως θερμικές αποθήκες και σε συνδυασμό με τα ενεργά ρήγματα επιτρέπουν τη δημιουργία επαγωγικών ρευμάτων μεταφοράς και συσσώρευσης θερμικής ενέργειας σε περατούς σχηματισμούς. (Κολιός κλπ. 2001).

Στην περιοχή του Αρίστινου έχουν γίνει κατά το παρελθόν έρευνες φορέων της τοπικής αυτοδιοίκησης και έχει ανορυχθεί ιδιωματική γεώτρηση ( $\Pi_0$ ), της οποίας τα αποτελέσματα εμφανίζονται στο σχήμα 3. Έχουν διατηρηθεί ιζήματα και ηφαιστειακά πετρώματα του Ανώτερου Ηώκαινου (Πριαμπόνιου), με αργιλικά ιζήματα πάχους 55 μέτρων να επικάθονται τόφων, εξαλλοιωμένων ηφαιστειακών, δακτιοειδούς ανδεσίτη με

μεταλλοφορία  $\text{FeS}_2$  και τέλος δακίτη σε βάθος 116 μέτρων.

Σε βάθος μεταξύ 55 και 115 μέτρων, αντλήθηκε το γεωθερμικό ρευστό με θερμοκρασία  $80^\circ$  και η χημική ανάλυση το χαρακτηρίζει ως Cl-Na-Ca-K-Li-Sr –ούχο, (Κυριακίδης-Τσόκας 1988).

Στην ίδια περιοχή στο παρελθόν είχε πραγματοποιηθεί ανεξάρτητη γεωλογική – γεωφυσική μελέτη με τη χρήση ηλεκτρικών βυθοσκοπήσεων VES, (Κυριακίδης - Τσόκας 1988), για τη μελέτη του γεωθερμικού πεδίου. Σύμφωνα με αυτή, ορίζεται ως πιθανός χώρος που περιέχει γεωθερμικό ρευστό μια περιοχή BBA-NNA διεύθυνσης, ακριβώς πάνω στο κυρίαρχο ρήγμα της περιοχής, όπως φαίνεται στο γεωλογικό χάρτη του σχήματος 2.

Σε χρόνο μεταγενέστερο της γεωφυσικής έρευνας TEM που παρουσιάζεται στη παρούσα μελέτη, λήφθηκαν υπόψη στοιχεία από έρευνα του ΙΓΜΕ στην ευρύτερη περιοχή (Κολιός κ.α. 2001) και ειδικότερα για τη στενή περιοχή έρευνας τα γεωτρητικά αποτελέσματα της θέσης AA1(σχήμα 4).

Η γεώτρηση AA1 τοποθετήθηκε BA του χωριού Αρίστινο με τελικό βάθος 465 μέτρων. Διατηρήθηκαν αργιλικό σχηματισμοί μέχρι βάθους 110 μέτρων, ακολούθως αργιλοψαμμιτικό σχηματισμοί μέχρι βάθους 170 μέτρων, παρεμβολή εξαλλοιωμένων ηφαιστειακών μέχρι βάθος 210 μέτρων, ακολουθούμενα από αργιλοψαμμιτικό ορίζοντα μέχρι βάθος 430 μέτρων, όπου και διατηρήθηκαν υγιείς ηφαιστίτες ιγνιμβρικής φύσης με υψηλή υδροφορία. Στη σχετική έκθεση (Κολιός κ.α.2001), αναφέρεται σαν αξιοσημείωτο το γεγονός της ύπαρξης των ηφαιστειακών μεταξύ 170 και 210 μέτρων, που αποτελούν ισχυρό υδροφόρο σχηματισμό με θερμοκρασία  $50^\circ\text{C}$ . Η θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού φθάνει θερμοκρασία  $72.3^\circ\text{C}$  σε βάθος 360 μέτρα. Τα ηφαιστειακά χαρακτηρίζονται σαν λατυποπαγή από τους δακτιοειδείς δόμους της Βορειότερης περιοχής. Τα γεωθερμικά ρευστά είναι  $(\text{Ca})\text{Na}-\text{Cl}(\text{SO}_4)$  σύστασης, με σύνολο διαλυμένων αλάτων 10 gr/lit και υψηλή αγωγιμότητα 12200  $\mu\text{s}/\text{cm}$  (Κολιός κ.α. 2001).

### 4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ TEM ΜΕΘΟΔΟΥ

Στην περιοχή αυτή εφαρμόστηκε δοκιμαστικά η TEM μέθοδος με σκοπό την εκτίμηση των δυνατοτήτων της μεθόδου σε γεωθερμικά πεδία. Η έρευνα υπαίθρου ολοκληρώθηκε σε μια μέρα και ως εκ τούτου δεν είχε τακτικό ερευνητικό χαρακτήρα, αλλά προσέφερε τη δυνατότητα να εκτιμηθεί η συμβολή της μεθόδου σε ένα γνωστό γεωθερμικό κοίτασμα.

Στην προηγηθείσα γεωλογική μελέτη είχαν πραγματοποιηθεί πέντε βυθοσκοπήσεις με τη μέθοδο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

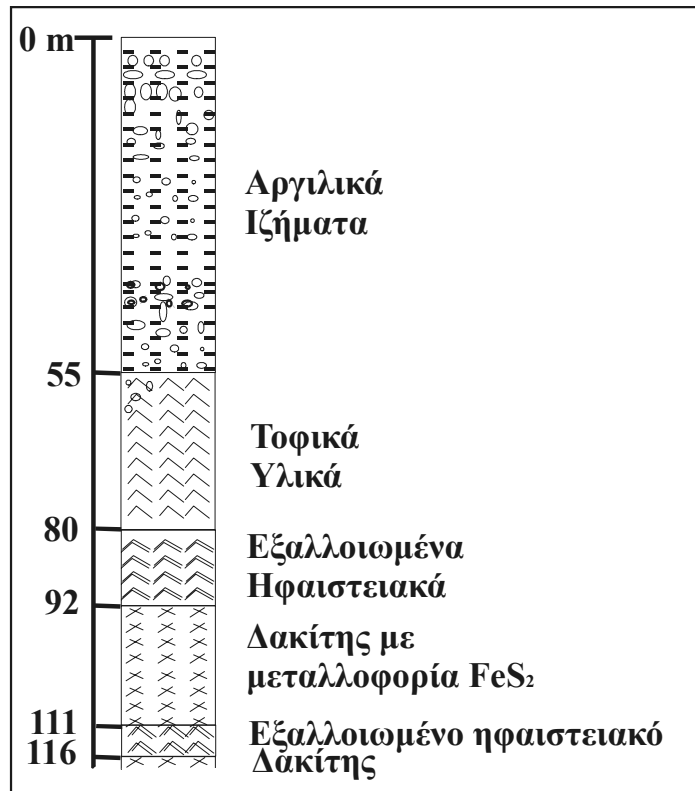
Η μέθοδος των ηλεκτρικών βυθοσκοπήσεων δεν αποδείχθηκε ικανή να διαγνώσει το υπόβαθρο της περιοχής, λόγω του μικρού βάθους διασκόπησης, που ήταν αποτέλεσμα της μεγάλης αγωγιμότητας του υπεδάφους. Οι μεγάλες τιμές της αγωγιμότητας έχουν ως αποτέλεσμα πολύ μικρές τιμές του μετρούμενου Δυναμικού που φθάνουν τα 0.1 mV και σε συνδυασμό με την ισχυρή επίδραση των ρηγμάτων της περιοχής στις μετρήσεις, που παραμορφώνουν πολλές φορές καταστροφικά τις καμπύλες ειδικής αντίστασης, με άμεση συνέπεια η ερμηνεία να έχει περισσότερο ποιοτικό παρά ποσοτικό χαρακτήρα. Οι θέσεις των TEM βυθοσκοπήσεων τοποθετήθηκαν κοντά στις θέσεις των αντίστοιχων VES βυθοσκοπήσεων.

Το μέγιστο βάθος της βυθοσκόπησης έφθασε τα 200 περίπου μέτρα και αυτό επιτεύχθηκε με μετρούμενο χρονικό φάσμα 10 msec, κατά πολύ μικρότερου των δυνατοτήτων της συσκευής. Το βάθος αυτό είναι μεγαλύτερο μεν από το αντίστοιχο των Ηλεκτρικών VES βυθοσκοπήσεων (Κυ-

ριακίδης, Τσόκας 1989), αλλά πολύ μικρότερο των δυνατοτήτων της TEM μεθοδολογίας σε έρευνες γεωθερμικών πεδίων.

Η μεγάλη αγωγιμότητα του υπεδάφους επιτρέπει τη διασκόπηση αρκετών εκατοντάδων μέτρων και η εφαρμογή της TEM μεθόδου στη γεωθερμική έρευνα προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι της VES μεθόδου.

Η ερμηνεία των δεδομένων έγινε με αυτοματοποιημένη μέθοδο επιλογής στρωμάτων και παραμέτρων (Κάρμης 2003). Τα αποτελέσματα των αντιστροφών φαίνονται γραφικά στο σχήμα 4 και στον πίνακα 1 όπου παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της ερμηνείας των TEM διασκοπήσεων για τα δεδομένα των πρώτων χρόνων.

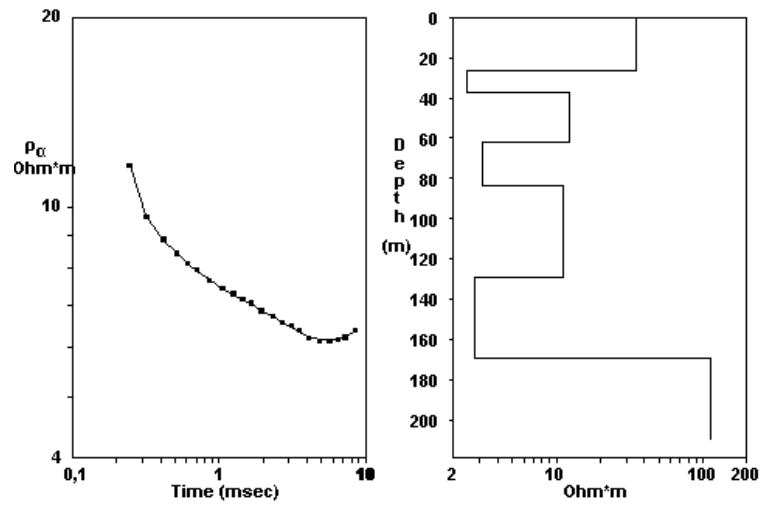


Σχήμα 3. Στρωματογραφική στήλη γεώτρησης στη θέση Π0.

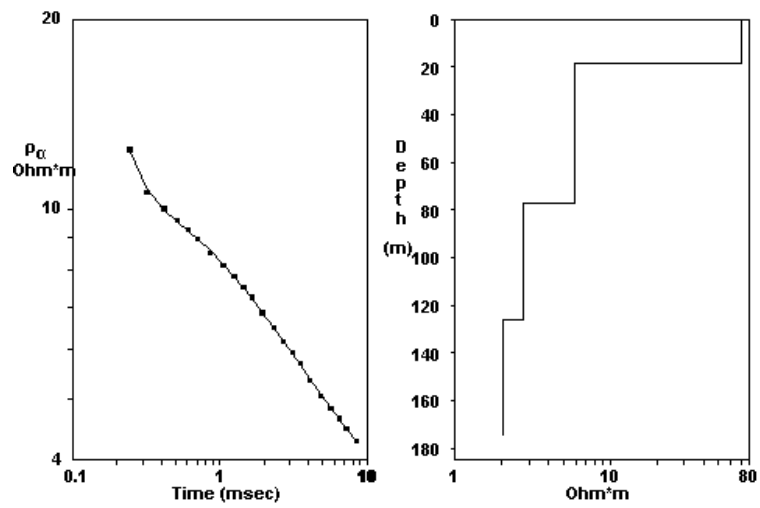
Πίνακας 1. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα TEM διασκοπήσεων από την περιοχή Αρισινό Αλεξανδρούπολης. Οι αντιστάσεις των στρωμάτων είναι σε Ωm και τα πάχη των στρωμάτων σε μ.

| Παράμετροι | 1          |           | 2        |    | 3        |    | 4          |           | 5          |           |
|------------|------------|-----------|----------|----|----------|----|------------|-----------|------------|-----------|
|            | ρ          | h         | ρ        | h  | ρ        | h  | ρ          | h         | ρ          | h         |
| Στρώμα 1   | 35         | 27        | 70       | 19 | 38       | 21 | 41         | 23        | 38         | 21        |
| Στρώμα 2   | 3.2        | 10        | 5.9      | 59 | 4.3      | 23 | 3.5        | 19        | 3.2        | 17.5      |
| Στρώμα 3   | 12.3       | 25        | 2.8      | 49 | 13.7     | 27 | 11.3       | 17        | 9.7        | 13        |
| Στρώμα 4   | 3.1        | 22        | <b>2</b> |    | 4.2      | 43 | 4.1        | 37        | 3.7        | 39        |
| Στρώμα 5   | 11.2       | 45.5      |          |    | 8        | 39 | 9.1        | 45        | 7          | 36        |
| Στρώμα 6   | <b>2.8</b> | <b>40</b> |          |    | <b>3</b> |    | <b>2.9</b> | <b>44</b> | <b>2.7</b> | <b>47</b> |
| Στρώμα 7   | 110        |           |          |    |          |    | 76         |           | 50         |           |

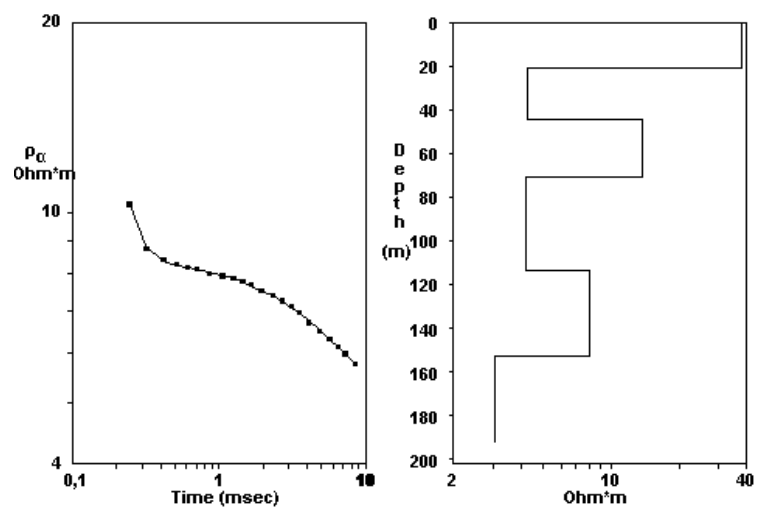
### ΒΥΘΟΣΚΟΠΗΣΗ 1



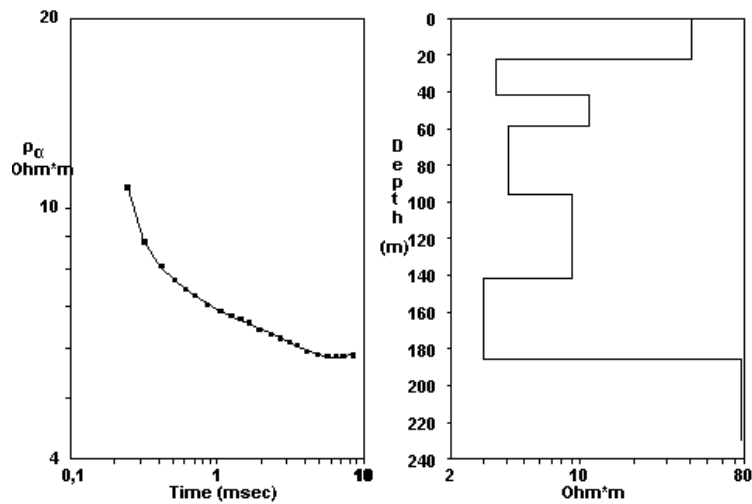
### ΒΥΘΟΣΚΟΠΗΣΗ 2



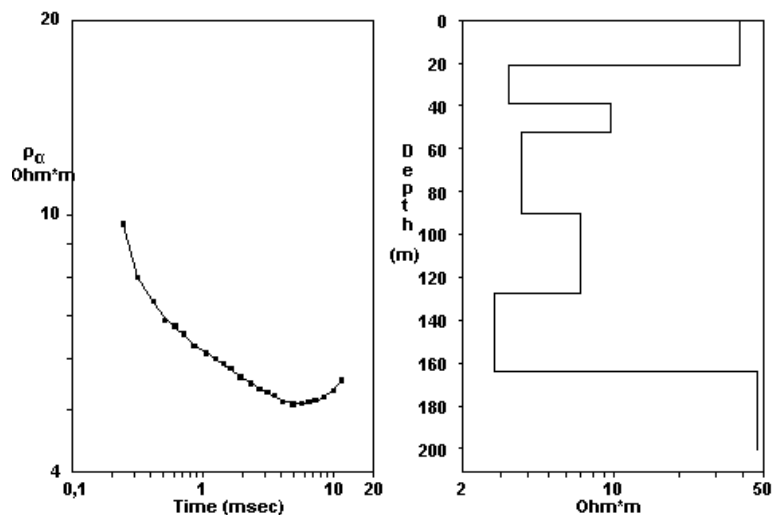
### ΒΥΘΟΣΚΟΠΗΣΗ 3



#### ΒΥΘΟΣΚΟΠΗΣΗ 4



#### ΒΥΘΟΣΚΟΠΗΣΗ 5



Σχήμα 4 Ερμηνεία των βυθοσκοπήσεων TEM 1-5

## 5 ΕΡΜΗΝΕΙΑ

Από τα αποτελέσματα της ερμηνείας γίνονται αμέσως εμφανή τα κοινά χαρακτηριστικά των βυθοσκοπήσεων. Σε όλες τις θέσεις εμφανίζεται επιφανειακό στρώμα ειδικής αντίστασης 35-41 Ωm και πάχους 21-27 μέτρων. Υποκείμενοι αυτού εμφανίζονται εναλλαγές σχηματισμών μικρότερης αντίστασης, οι οποίοι έχουν κατηγοριοποιηθεί στον πίνακα γεωηλεκτρικής στρωματογραφίας σε σχέση με τις τιμές ειδικής αντίστασης.

Το ενδιαφέρον και κυρίαρχο στοιχείο, που είναι κοινό σε όλες τις βυθοσκοπήσεις είναι η παρουσία ισχυρά αγώγιμου σχηματισμού (στρώμα 6), με παραπλήσιες τιμές αντίστασης περί τα 2-3 Ωm.

Ο σχηματισμός αυτός έχει πάχος 40 περίπου μέτρα στις βυθοσκοπήσεις 1, 4 και 5 και υπέρκειται αντιστατικού υποβάθρου με αντίσταση μεγαλύτερη των 50 Ωm.

Στις βυθοσκοπήσεις 2 και 3 δεν κατέστη δυνατό να ανιχνευθεί το αντιστατικό υπόβαθρο. Το Ηλεκτρομαγνητικό σήμα παρέμεινε εγκλωβισμένο στο ισχυρά αγώγιμο μέσο του τελευταίου στρώματος, με επακόλουθο να περιορισθεί το βάθος διασκόπησης σε σχέση με τις θέσεις 1, 4 και 5.

#### Βυθοσκόπηση 2

Ειδικότερα για τη θέση 2 τα αποτελέσματα είναι και τα πλέον εντυπωσιακά. Η βυθοσκόπηση εκτελέστηκε περί τα 400 μέτρα Νότια της ιδιωτικής γεώτρησης Π<sub>0</sub>, η οποία και διέτρησε από το βάθος 55 έως και 116 μέτρων ηφαιστειακά υλικά, συμπεριλαμβανομένων τόφφων και εξαλλοιωμένων ηφαιστειακών, με υδροφορία σε θερμοκρασία 80°C. Βρίσκεται κοντά στη διασταύρωση των κύριων ρηγμάτων Διεύθυνσης Β160 και Β070 της περιοχής.

Τα αποτελέσματα της ερμηνείας δείχνουν την ύπαρξη κροκαλοπαγών και αργιλικών ιζημάτων μέχρι βάθους 78 μέτρων, τα οποία λαμβανομένης υπόψη της Νότιας γεωλογικής κλίσης της περιοχής, έρχονται σε συμφωνία με το πάχος των 55 μέτρων επιφανειακών αργιλικών ιζημάτων που διατρήθηκε στη γεώτρηση Π<sub>0</sub>. Στη θέση αυτή και σε βάθος 78 μέτρων εντοπίζεται σχηματισμός ειδικής αντίστασης 2.8 Ωm, του οποίου υπόκειται σχηματισμός αντίστασης 2 Ωm σε βάθος 125 μέτρων. Ο σχηματισμός των 2 Ωm συνεχίζεται μέχρι βάθους τουλάχιστον 170 μέτρων περίπου. Τα στρώματα αυτά αντιστοιχούν στους τόφφους και στα εξαλλοιωμένα ηφαιστειακά της γεώτρησης Π<sub>0</sub>.

Συμπεραίνεται λοιπόν η άμεση συσχέτιση των στρωμάτων αυτών με το γεωθερμικό ταμιευτήρα που εντοπίστηκε στο γεωτρητικό πρόγραμμα του ΙΓΜΕ (Κολιός κ.α. 2001).

#### Βυθοσκόπηση 3

Η βυθοσκόπηση της θέσης 3 εκτελέστηκε περί τα 300 μ Ανατολικά της γεώτρησης ΑΑ1 του ΙΓΜΕ (Κολιός 2001), η οποία και κατέδειξε ότι σε βάθος 360 μέτρων αναπτύσσεται μέσα σε πυροκλαστικά ηφαιστειακά προϊόντα γεωθερμικός ταμιευτήρας με θερμοκρασίες άνω των 86°C. Εκτός αυτού όμως από τη γεώτρηση ΑΑ1 διαπιστώθηκε η ύπαρξη ορίζοντα εξαλλοιωμένων ηφαιστειακών υλικών από το βάθος των 170 έως και 210 μέτρων, όπου και αναπτύσσεται δεύτερος υδροφόρος ορίζοντας με θερμοκρασίες 50°C.

Τα πρώτα 4 γεωηλεκτρικά στρώματα της ερμηνείας του πίνακα 28 και μέχρι βάθους 114 μέτρων αντιστοιχούν στα αργιλικά ιζήματα της γεώτρησης ΑΑ1, αποτελούμενα από εναλλαγές κροκαλοπαγών και μαργών. Υποκείμενος βρίσκεται αργιλοψαμμιτικός σχηματισμός πάχους 40 μέτρων περίπου με αντίσταση 8 Ωm.

Το πλέον ενδιαφέρον στοιχείο που προκύπτει από την ερμηνεία της βυθοσκόπησης 3 είναι η ύπαρξη αγώγιμου στρώματος σε βάθος 153 μέτρων με τιμή ειδικής αντίστασης 3 Ωm, παραπλήσια των τιμών που αντιστοιχούν στα αγώγιμα στρώματα 3 και 4 της διασκόπησης 2. Από τα παραπάνω συνάγεται η πιθανή συνέχεια προς τα Ανατολικά του επιφανειακού θερμού υδροφόρου ορίζοντα της γεώτρησης ΑΑ1.

#### Βυθοσκόπηση 1

Η βυθοσκόπηση εκτελέστηκε Δυτικά του ρήγματος διεύθυνσης ΒΒΑ-ΝΝΔ που παρεμβάλλεται μεταξύ των βυθοσκοπήσεων 1 και 3. Από την ερμηνεία προκύπτει ανάλογη στρωματογραφία με τη θέση 3, με την ύπαρξη αντίστοιχων αργιλικών ιζημάτων πάχους 84 μέτρων, υπερκείμενων αργιλοψαμμιτικού σχηματισμού μέχρι βάθους 130 μέτρων περίπου. Στο βάθος αυτό εμφανίζεται αγώγιμο στρώμα πάχους 40 μέτρων με τιμή ειδικής αντίστασης 2.8 Ωm αντίστοιχης των τιμών του θερμού υδροφόρου στρώματος των θέσεων 2 και 3.

Το πάχος του αγώγιμου αυτού στρώματος είναι το ίδιο με αυτό των εξαλλοιωμένων ηφαιστειακών που διατρήθηκαν από τη γεώτρηση ΑΑ1, τα οποία βεβαίως εντοπίζονται σε μεγαλύτερο βάθος λόγω της δράσης του ρήγματος διεύθυνσης ΒΒΑ-ΝΝΔ. Τέλος ο αντιστατικός ημιχώρος που εντοπίζεται αποδίδεται σε συμπαγείς δακτιτικούς ανδεσίτες.

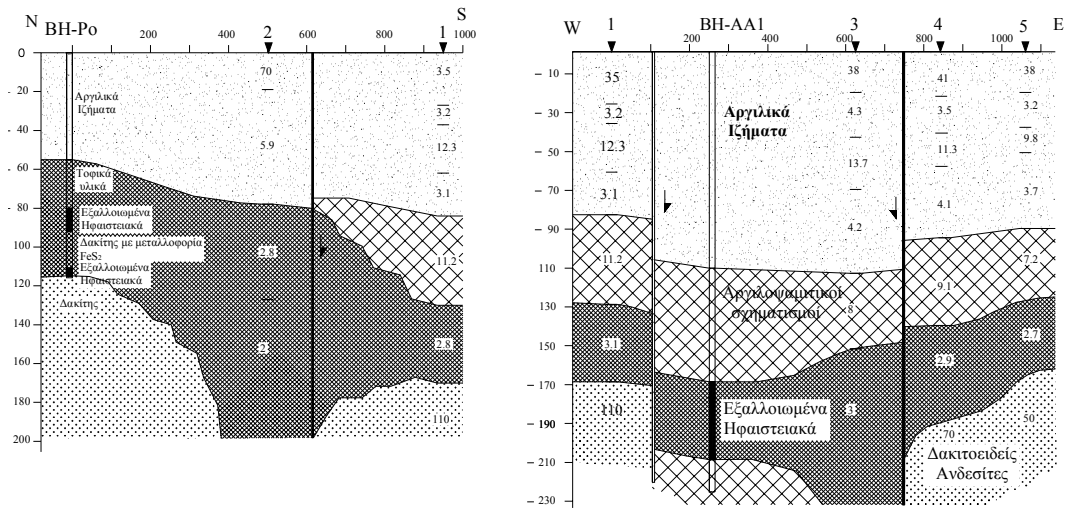
#### Βυθοσκοπήσεις 4 και 5

Όπως προαναφέρθηκε η ερμηνεία των υπολοίπων βυθοσκοπήσεων έδειξε κοινά χαρακτηριστικά με σημαντικό στοιχείο την ύπαρξη αγώγιμου στρώματος πάχους 37-44 μέτρων και τιμές ειδικής αντίστασης 2.7-2.9 Ωm. Οι τιμές αυτές της αντίστασης είναι οι ίδιες με αυτές του αγώγιμου στρώματος που εντοπίζεται στις άλλες βυθοσκοπήσεις και αποδίδεται στο στρώμα των εξαλλοιωμένων ηφαιστειακών και το οποίο αποτελεί το στόχο της έρευνας.

Τα αποτελέσματα της ερμηνείας σχεδιάστηκαν σε 2 τομές, εκ των οποίων η πρώτη διεύθυνση Δ-Α περιλαμβάνει τις βυθοσκοπήσεις 1, 3, 4, 5 και τη γεώτρηση ΑΑ1 και η δεύτερη διεύθυνση Β-Ν



τις βυθοσκοπήσεις 2, 1 και τη γεώτρηση Π<sub>0</sub>. Από τις τομές διαφαίνεται η συμφωνία της γεωλογικής στρωματογραφίας των γεωτρήσεων με τη γεωηλεκτρική στρωματογραφία της TEM μεθόδου. Με διαπιστωμένη την αξιοπιστία της γεωφυσικής πληροφόρησης προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα για το γεωθερμικό καθεστώς της περιοχής.



Σχήμα 5 Ερμηνευτικές τομές γεωθερμικού πεδίου Αρίστινου

## 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Διαπιστώνεται η ύπαρξη θερμού υδροφόρου ορίζοντα μεταξύ της γεώτρησης Π<sub>0</sub>, που επεκτείνεται ως τη θέση της βυθοσκόπησης 1, παρακολουθείται στη γεώτρηση AA1 και συνεχίζει πέραν της θέσης 3, του ρήγματος διεύθυνσης BBA-NNA ως τις θέσεις 4 και 5.

Τα δυο κύρια ρήγματα της περιοχής διεύθυνσης BBA-NNA και BBA-NNA, είναι υπεύθυνα για τη δημιουργία τεκτονικού βυθίσματος (graben) στην ενδιάμεση περιοχή και είναι επίσης υπεύθυνα για την ανάπτυξη του ισχυρά αγωγίμου σχηματισμού που συνδέεται με το θερμό υδροφόρο ταμιευτήρα των γεωτρήσεων AA1 και Π<sub>0</sub>. Η ύπαρξη των ρηγμάτων κοντά στις θέσεις των βυθοσκοπήσεων 1 και 2 δικαιολογεί την αδυναμία προσδιορισμού αντιστατικού υποβάθρου στις θέσεις αυτές.

Το γεωθερμικό ρευστό που πληροί τον υδροπερατό σχηματισμό των εξαλλοιωμένων ηφαιστειακών των δυο γεωτρήσεων βρίσκεται σε υδραυλική επικοινωνία με το βαθύ θερμό υδροφόρο που εντοπίστηκε σε βάθος 430 μέτρων στη γεώτρηση AA1. Το γεωθερμικό ρευστό ανέρχεται από το σύστημα των ρηγμάτων της περιοχής έχοντας αποκτήσει μεγάλη θερμοκρασία από την επαφή με μαγματικές μάζες. Τα ρήγματα είναι και οι τελικοί συλλέκτες, καθώς παρατηρήθηκαν πολύ υψηλές αγωγιμότητες, και περιορίζονται σε ζώνη ενδιάμεση των ρηγμάτων με ANA διεύθυνση.

Αποτέλεσμα είναι η δημιουργία του επιφανειακού θερμού υδροφόρου ορίζοντα που επεκτείνεται Βόρεια του Αρίστινου και μεταξύ των κύριων ρηγμάτων, διαμορφώνοντας ζώνη τοπικού γεωθερμικού ενδιαφέροντος.

Η εφαρμογή της TEM μεθοδολογίας απέδειξε τα επιχειρησιακά της πλεονεκτήματα στην έρευνα γεωθερμικών πεδίων. Ο μικρός αριθμός των μετρήσεων δεν επιτρέπει την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων σε ότι αφορά το γεωθερμικό πεδίο της ευρύτερης περιοχής. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια του ελέγχου της αξιοπιστίας του προγράμματος αυτοματοποιημένης ερμηνείας και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων με βάση τα γεωλογικά και γεωτρητικά δεδομένα της περιοχής είναι άκρως ενθαρρυντικά και δικαιολογούν τη χρήση της μεθόδου στη συστηματική μελέτη και χαρτογράφηση γεωθερμικών πεδίων.

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Κάρμης Π. 2003 Αυτοματοποιημένη ερμηνεία Ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου παροδικών πεδίων, Διδακτορική διατριβή, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα
- Κυριακίδης Ε. , Τσόκας Γ., 1988, Γεωηλεκτρική μελέτη περιοχής λουτρών Αλεξανδρούπολης (Σύνδεσμος Δήμων και Κοινοτήτων Ιαματικών Πηγών Ελλάδος)
- Κολιός Ν., Καρυδάκης Γ., Κουτσίνος Σ., Ζηκόπουλος Κ., 2001 Έρευνα και ανάπτυξη Γεωθερμικής ενέργειας στην Ανατολική Μακεδονία και Θράκη. Έργο 9531519 ΠΕΠ – Β' ΚΠΣ, Τεχνική έκθεση ΙΓΜΕ
- Λάγιος Ε., 1992 Μαγνητοτελλουρικές διασκοπήσεις στις γεωθερμικού ενδιαφέροντος περιοχές Σουσακίου και Μεθάνων, Τόμοι Ι και ΙΙ. Τεχνική έκθεση, ΔΕΜΕ/ΔΕΗ, Αθήνα
- Tzanis A., Lagios E., 1993 Magnetotelluric exploration of Sousaki geothermal prospect, Corinth prefecture, Greece: The first results, 2<sup>nd</sup> Congress of Hell. Geophysical Union, Florina, Greece

## ABSTRACT

### THE APPLICATION OF THE TRANSIENT EM METHOD INTO THE GEOTHERMAL FIELD EXPLORATION

Karmis P.<sup>1</sup>, Vargemezis G.<sup>2</sup>, Papadopoulos I.<sup>2</sup>, and Tsourlos P.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *I.G.M.E. Dept. of Geophysics, 70 Mesogion, 11527 Athens, Greece*

<sup>2</sup> *Department of Geophysics, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki, 546 21, Thessaloniki, Greece*

In this work we examine the potential of the time-domain electromagnetic method (Transient EM) in the exploration of geothermal field and the study of the geological environment. The method was applied in the geothermal field of Aristino (Alexandroupolis), westwards of the Traianoupolis, where the known hot springs exist. The EM method and more specifically magnetotellurics (MT), it has been applied in the past in Greece by various researchers, but it is the first time the TEM method is applied for geothermal exploration purposes.

As it has been shown by previous works, in the wider region of Aristino an important geothermal field is developed, with geothermal fluid temperature of 30<sup>0</sup>-90<sup>0</sup> and high content of dissolved salts of 10gr/lit. These factors result to the appearance of highly conductive geoelectrical anomalies which are directly related to the geothermal field. The existence of two drillholes in the region allowed the calibration and the control of the effectiveness of the TEM method. The geophysical survey has delimited the area of local geothermal interest that is formed by hot aquifer at a relatively shallow depth, extended North of Aristino and between the main faults of the region. The two main faults are responsible for the creation of a tectonic graben in the intermediary region and the development of a highly conductive formation which correlates well with the hot aquifer tank. The geothermal fluid circulates through the faulting system having high temperature caused by the contact with magmatic masses.

The application of TEM proved the operational advantages of the method in the geothermal field exploration. The relatively limited number of TEM soundings presented here does not allow the export of safe conclusions regarding the geothermal field of the wider region, although the evaluation of results based on the geological and geoelectrical data of the region is extremely encouraging and justifies the use of the TEM method in the systematic study and mapping of geothermal fields.