

## ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΙΣ ΚΙΜΩΛΟΥ ΑΠΟ ΜΑΓΝΗΤΟΤΕΛΛΟΥΡΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ\*

ΛΑΓΙΟΣ<sup>1</sup> Ε. & ΓΑΛΑΝΟΠΟΥΛΟΣ<sup>2</sup> Δ.

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Προκειμένου να καθοριστεί η υπόγεια ηλεκτρική δομή (<10 km) της γεωθερμικού ενδιαφέροντος νήσου της Κίμωλου, εφαρμόστηκε η Μαγνητοτελλουρική (MT) μέθοδος στο εύρος περιόδων 0.01-100 s. για το οποίο είναι γνωστή και ως Ακουστο-Μαγνητοτελλουρική (AMT). 26 συνολικά AMT διασκοπήσεις έλαβαν χώρα στην Κίμωλο. Η επεξεργασία και η ανάλυση των δεδομένων περιέλαβε έλεγχο γεωηλεκτρικών διαστάσεων. Ο έλεγχος αυτός οδήγησε στο συμπέρασμα ότι, στο εύρος περιόδων 0.01-1 s. η ηλεκτρική δομή της Κίμωλου για τη πλειοψηφία των διασκοπήσεων δύναται να προσεγγισθεί ικανοποιητικώς με την κατασκευή μονοδιάστατων γεωηλεκτρικών μοντέλων, τα οποία και έγιναν με την εφαρμογή δύο ανεξαρτήτων αναλυτικών μεθόδων. Οι περιοχές όπου έγιναν οι παραπάνω διασκοπήσεις στην Κίμωλο, μέχρι του βάθους των 10 km χαρακτηρίζονται από σχετικά χαμηλές ειδικές αντιστάσεις (1-300 Ohm.m) και έντονες πλευρικές γεωηλεκτρικές ασυνέχεις. Οι παρατηρούμενες χαμηλές ειδικές αντιστάσεις συμπαρομαρτούν στην ύπαρξη ενός γεωθερμικού πεδίου. Οι περιοχές, όπου παρατηρούνται οι χαμηλότερες ειδικές αντιστάσεις (1-10 Ohm.m), κατά πάσα πιθανότητα αντιστοιχούν σε ζώνες διάρρηξης με πιθανότατη κυκλοφορία γεωθερμικών ρευστών, αλλά και σε περιοχές όπου πιθανόν υφίστανται φαινόμενα υδροθερμικής εξαλλοίωσης των διαφόρων γεωλογικών σχηματισμών ηφαιστειακής προέλευσης (χωρίς να αποκλείεται η πιθανή παρουσία αργιλικών). Οι γεωθερμικού ενδιαφέροντος περιοχές εντοπίζονται κατά κύριο λόγο στο νότιο και ΒΑ τμήμα της Κίμωλου, με βάση τις θέσεις των AMT διασκοπήσεων.

### ABSTRACT

An Audio-Magnetotelluric (AMT) survey was carried out in Kimolos (an island of geothermal prospect) to investigate its geoelectric structure with depth. 26 AMT soundings were performed in the period range of 0.01-100 secs. The AMT data analysis included dimensionality tests. The latter have shown that one-dimensional (1-D) models can satisfactorily approximate the geoelectric structure of the island, for periods 0.01-1 sec. 1-D geoelectric models were constructed applying two analytical techniques. These models have shown that Kimolos, down to depths of about 10 km, is characterized by relatively low resistivities (1-300 ohm.m) and intense lateral geoelectric discontinuities. The observed low resistivity values indicate the existence of a geothermal system. The regions where the lower resistivity values (1-10 ohm.m) occur, correspond rather to fracture and faulting zones with geothermal fluid circulation, as well as possibly to areas of hydrothermal alteration (not excluding the case of clays). Based on the existing AMT survey, the areas of geothermal interest are located on the north-eastern and southern part of the island, where important faulting zones occur.

\* MAGNETOTELLURIC GEOTHERMAL EXPLORATION OF KIMOLOS ISLAND (GREECE).

<sup>1</sup> Assoc. Prof. Department of Geophysics & Geothermy, University of Athens, Panepistimiopolis, Ilissia, Athens 157 84, Greece.

<sup>2</sup> Dr. Department of Geophysics & Geothermy, University of Athens, Panepistimiopolis, Ilissia, Athens 157 84, Greece.  
Ψηφιακή Βιβλιοθήκη "Θεόφραστος" - Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΣΥΝΤΟΜΗ ΓΕΩΤΕΚΤΟΝΙΚΗ

Η Κίμωλος ανήκει στο νησιωτικό σύμπλεγμα των Κυκλάδων. Η γειτονική της θέση ως προς την Μήλο, όπου έχει μελετηθεί (Fytikas et al. 1989, Galanopoulos et al. 1991) η ύπαρξη ενός σημαντικής δυναμικότητας γεωθερμικού πεδίου μεγάλης ενθαλπίας, αφ' ενός δικαιολογεί τα όμοια χαρακτηριστικά, τα οποία παρατηρούνται από πλευράς γεωτεκτονικής κατάστασης σε σχέση με αυτά της Μήλου, αφ' ετέρου καθιστά ενδιαφέρουσα την γεωλογική και γεωφυσική τους εξερεύνηση με σκοπό την διερεύνηση πιθανών ευνοϊκών συνθηκών για την ύπαρξη ανάλογης δυναμικότητας γεωθερμικών πεδίων. Τα στοιχεία για τη γεωτεκτονική κατάσταση της Κιμώλου προέρχονται κυρίως από τους Φυτίκα και Βουγιουκαλάκη (1994). Οι γεωλογικοί σχηματισμοί, οι οποίοι εμφανίζονται κατά στρωματογραφική ακολουθία, από τους νεωτέρους προς τους παλαιότερους, είναι οι εξής:

- Οι προσχώσεις του Τεταρτογενούς, οι οποίες αποτελούνται από πλευρικά κορήματα, ποταμοχειμαροάοις και παράκτιες αποθέσεις, καθώς και ποταμιολιμνικά κροκαλοπαγή.

- Τα ηφαιστειακά πετρώματα Πλειστοκαινικής-Πλειοκαινικής ηλικίας. Στην Κίμωλο τα πετρώματα αυτά αποτελούνται από σειρές τόφων, τοφαϊτών, ρεψμάτων ζίσωσης όξινης σύστασης και ρεψμάτων λάβας ανδευσιτικής-δαιυτικής σύστασης. Οι δακίτες αντιστοιχούν στην δεύτερη περίοδο εκρήξεων της Μήλου και οι ανδευίτες στη τρίτη (Μηνόπουλος, 1981). Η Κίμωλος διασχίζεται από πολλές φλέβες εκρηξιγενών πετρωμάτων (Φυτίκας & Βουγιουκαλάκη 1993), και υπάρχει βεβαιότητα για την ύπαρξη μιάς όξινης γρανιτικής παρουσίας στο κέντρο του νησιού (Σχ. 1), απόδειξη της οποίας αποτελούν πρόσφατοι γρανιτικοί ξενόλιθοι, που απαντώνται στην **επιφάνεια** και αποδίδονται σε μία σχετικώς παλαιά εκρηκτική ηφαιστειακή φάση. Ο γρανίτης αυτός **αντιπροσωπεύει** την ενδογενή φάση των διαφοροποιημένων ριολιθικών μαγμάτων, που ετροφοδότησαν **πολλές** φάσεις της ηφαιστειότητας και στα τρία νησιά του συμπλέγματος.

- Το Μεσοζωικής ηλικίας μεταμορφωμένο υπόβαθρο (Φυτίκας, 1977), το οποίο αποτελείται από σύστημα πράσινων σχιστολίθων, φυλλίτες, μεταβασάλτες και σπανιότερα μάγμαρα, ως και φλέβες χαλαζία. Το κρυσταλλικό υπόβαθρο έχει επιφανειακές εκδηλώσεις μόνο στις βόρειες ακτές της Πολύαγο, στην δε Κίμωλο η ύπαρξη του πιστοποιείται μόνο από **τεμαχία** του υποβάθρου, τα οποία ενθίζονται μέσα στους ηφαιστειακούς σχηματισμούς.

Από το γεωτεκτονικό σκασίφημα της Κιμώλου (Σχ.1) προκύπτει ότι, οι διευθύνσεις των κυρίων ζωνών διάρρηξης, στο μεν νότιο τμήμα του νησιού είναι ΒΔ-ΝΑ, ΒΑ-ΝΔ, στο δε βόρειο Β-Ν, Α-Δ, αλλά και ΒΔ-ΝΑ.

## 2. ΜΑΓΝΗΤΟΤΕΛΛΟΥΡΙΚΗ (ΑΜΤ) ΕΡΕΥΝΑ

### 2.1 Σύλλογή Δεδομένων

Η αξιή της Μαγνητοτελλουρικής (ΜΤ) μεθόδου, που, όταν οι **μετρήσεις** γίνονται στις περιόδους από 0.01-100 sec, ονομάζεται και Ακουστο-Μαγνητοτελλουρική (ΑΜΤ), δεν θα εκτεθεί στην παρούσα εργασία. Εκτενής περιγραφή των αναφέρεται στους Kaufmann & Keller (1981).

Οι εργασίες υπαίθρου περιέλαβαν την διεξαγωγή 28 συνολικά διασκοπήσεων, εκ των οποίων οι δύο έλαβαν χώρα στη Πολύαγο (Σχ. 2). Η εκτέλεση ΑΜΤ διασκοπήσεων στην Πολύαγο είχε αναγνωριστικό χαρακτήρα λόγω του απροσπέλαστου της νήσου. Οι θέσεις των διασκοπήσεων στη Κίμωλο κατανέμεται κατά μήκος τεσσάρων γεωφυσικών τομών, οι οποίες ενθίζονται ανά δύο στο ΒΑ και νότιο τμήμα του νησιού, αντίστοιχα (Σχ.2), και ουσιαστικά υπεδείχθησαν από το υφιστάμενο οδικό δίκτυο.

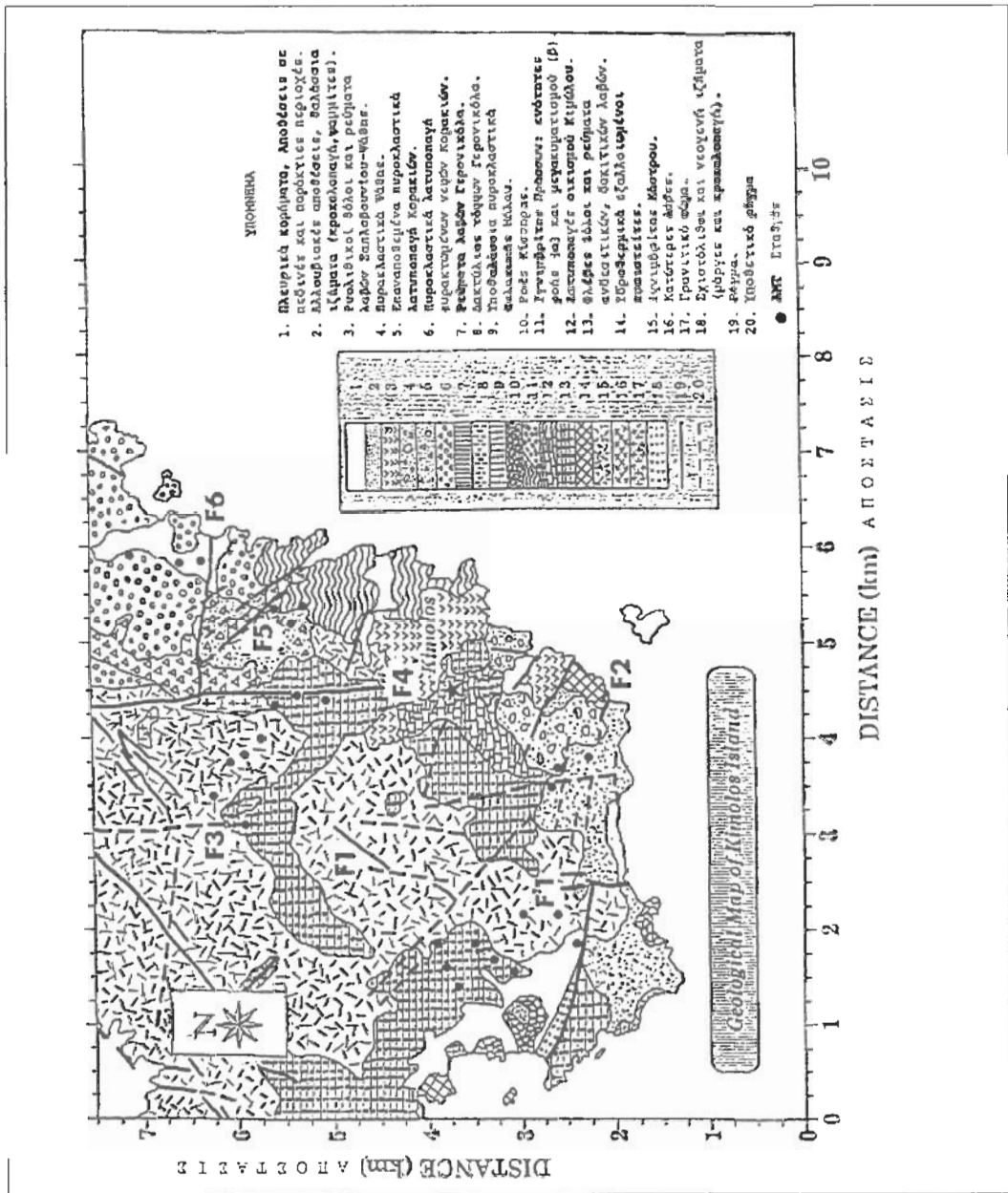
Οι οριζόντιες συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου εμετρήθησαν κατά μήκος των διευθύνσεων Β-Ν και Α-Δ με την χρήση στερεοκωνικών πηνίων. Οι οριζόντιες συνιστώσες του ηλεκτρικού πεδίου εμετρήθησαν επίσης κατά μήκος των διευθύνσεων Β-Ν και Α-Δ με την χρήση μη-πολυπόμενων

ηλεκτροδίων Pb/PbCl<sub>2</sub>, με μέγιστο ανάπτυγμα τελλουρικών γραμμών 100 m σε διάταξη σχήματος σταυρού ή γραμμιστός L.

## 2.2 Επεξεργασία - Ανάλυση Δεδομένων

Η επεξεργασία και η ανάλυση των AMT δεδομένων περιέλαβε τα κατωτέρω:

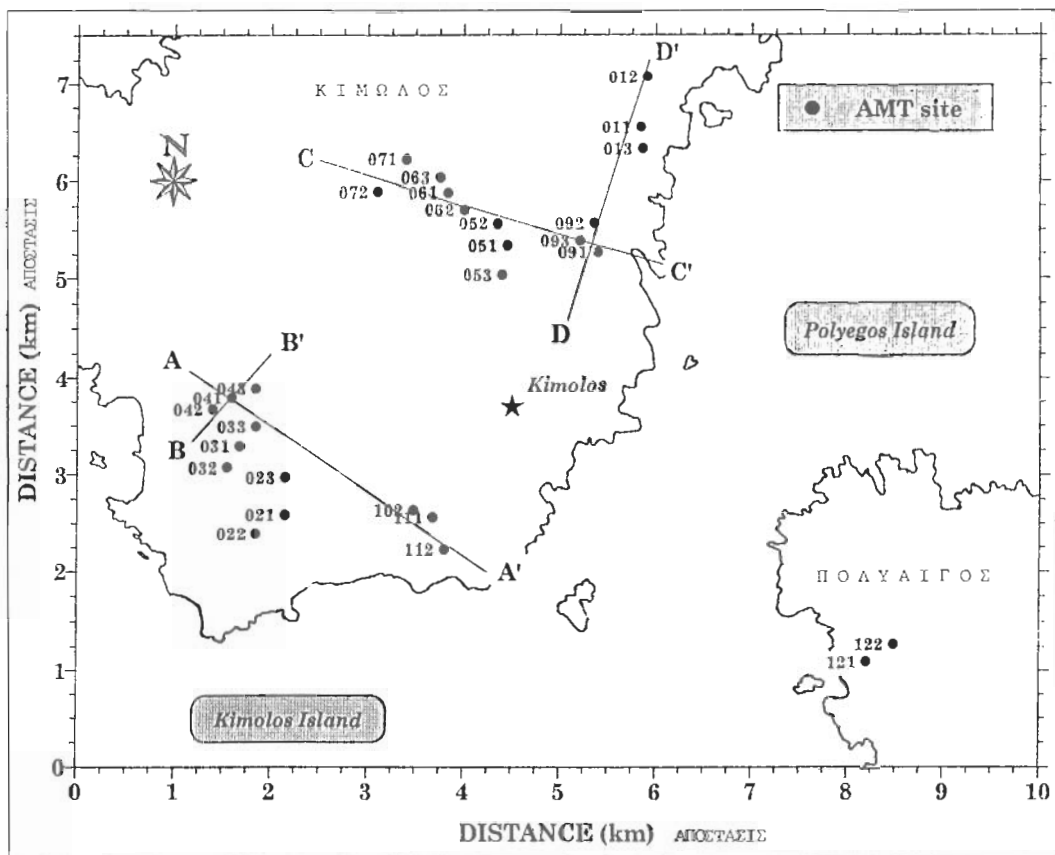
- Υπολογισμό των στοιχείων του ταυτιστή της εμπέδησης με χρήση της μεθόδου των Ritter-Yunge (Ritter, 1995).



Σχήμα 1: Γεωλογικός χάρτης Κιμωλον (Φιτίζας & Βουγιουκλάζης (1994)).

Figure 1: Geological Map of Kifissos (Φιτίζας & Βουγιουκλάζης) (1994).

Ηφίσια Βιβλιοθήκη Θεόδωρος Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.



Σχήμα 2: Κατανομή τομών και AMT θέσεων στην Κιμωλό – Πολύαγγο.

Figure 2: AMT stations and profiles in Kimolos – Polyagos.

- Καθορισμό των προτεινόμενων διευθύνσεων, περιστροφή του τανυστή της εμπέδησης και υπολογισμό των στοιχείων του νέου περιστραμμένου τανυστή, που σχετίζεται με τις διευθύνσεις αυτές. Η περιστροφή του τανυστή έγινε με την κλασική μέθοδο των Word et al. (1970). Το αξιμούθιο, που ορίζει την προτιμώμενη διεύθυνση ροής των τελλουριζών ρευσμάτων, υπελογίσθη με την μέθοδο του Swift (1967).
- Έλεγχο γεωηλεκτρικών διαστάσεων με χρήση των παραμέτρων της διασποράς και εκκιντρότητας (Word et al. 1971) και των τριών δεικτών D1, D2 και D3 των Kao and Orr (1982).
- Κατασκευή χωρτών της χωρικής κατανομής του αξιμούθιου του μέγιστου και ελάχιστου άξονα της έλλειψης του τανυστή της εμπέδησης.

Η επεξεργασία και η ανάλυση των δεδομένων οδήγησε σε αποτελέσματα, που σχετίζονται άμεσα με το εύρος μεταβολής και την χωρική κατανομή της ειδικής αντίστασης, την χωρική κατανομή των γεωηλεκτρικών διαστάσεων της γεωλογικής δομής του υπεδάφους και την χωρική κατανομή των προτιμώμενων διευθύνσεων ροής των τελλουριζών ρευσμάτων (Λάριος & Γαλανόπουλος, 1996).

### 2.3 Κατασκευή Μονοδιάστατων AMT Μοντέλων

Η μελέτη των διαφόρων παραμέτρων έλεγχου των γεωηλεκτρικών διαστάσεων έδειξε ότι, στο εύρος περιόδων 0.01-1 s, η ηλεκτρική δομή της Κιμώλου για τη πλειοψηφία των θέσεων των AMT διασπολήσεων δύναται να προσεγγισθεί ικανοποιητικά με την κατασκευή μονοδιάστατων (1-Δ) γεωηλεκτρικών μοντέλων, ενώ διδιάστατα (2-Δ) ή ακόμη και τριδιάστατα (3-Δ) μοντέλα απαιτούνται.

προzeυμένων να δοθεί πληρέστερη ερμηνεία των χαμηλών της φαινόμενης  $\rho$  και φάσης ( $\varphi$ ) για περιόδους μεγαλύτερες από 1 s, που αντιστοιχεί σε σαφώς μεγαλύτερα βάθη. Η κατασκευή 1- $\Delta$  γεωηλεκτρικών μοντέλων πραγματοποιήθηκε με εφαρμογή δύο μαθηματικών μεθόδων. Αυτές ήταν ο μετασχηματισμός των Niblett-Bostick (Jones, 1983) και η μέθοδος των Jupp and Vozoff (1975).

Στη πρώτη περίπτωση δεν έχουμε υπολογισμό της πραγματικής κατανομής της  $\rho$  σε συνάρτηση με το βάθος ( $z$ ), αλλά μετασχηματισμό της φαινόμενης  $\rho$  και  $\varphi$  σε  $\rho_B$  και  $z_B$  γνωστά ως "ειδική ηλεκτρική αντίσταση και βάθος Niblett-Bostick". Παρά το γεγονός ότι τα  $\rho_B$  και  $z_B$  δεν εκπροσωπούν την πραγματική κατανομή της  $\rho$  σε συνάρτηση με το βάθος, είναι αποδεκτό ότι αποτελούν ικανοποιητική προσέγγιση της πραγματικότητας. Στην δεύτερη περίπτωση, της μεθόδου των Jupp and Vozoff (1975), έχουμε υπολογισμό της πραγματικής κατανομής της  $\rho$  σε συνάρτηση με το βάθος  $z$ , υπό την μορφή στρωμάτων διαφορετικού πάχους και διαφορετικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Συνδυασμός των 1- $\Delta$  μοντέλων, που προέκυψαν από την εφαρμογή κάθε μεθόδου κατά μήκος των γραμμών AA', BB', CC' και DD' (Σχ.2), οδήγησε στην κατασκευή 1- $\Delta$  γεωηλεκτρικών τομών, οι οποίες απεικονίζονται στο σχήμα 3. Ενδεικτικά παρουσιάζονται για την μικρή σε μήκος τομή BB' τα αποτελέσματα του μετασχηματισμού Niblett-Bostick, προzeυμένων να εκτεθεί μία σχετική άποψη με την εφαρμογή της εν λόγω μεθόδου.

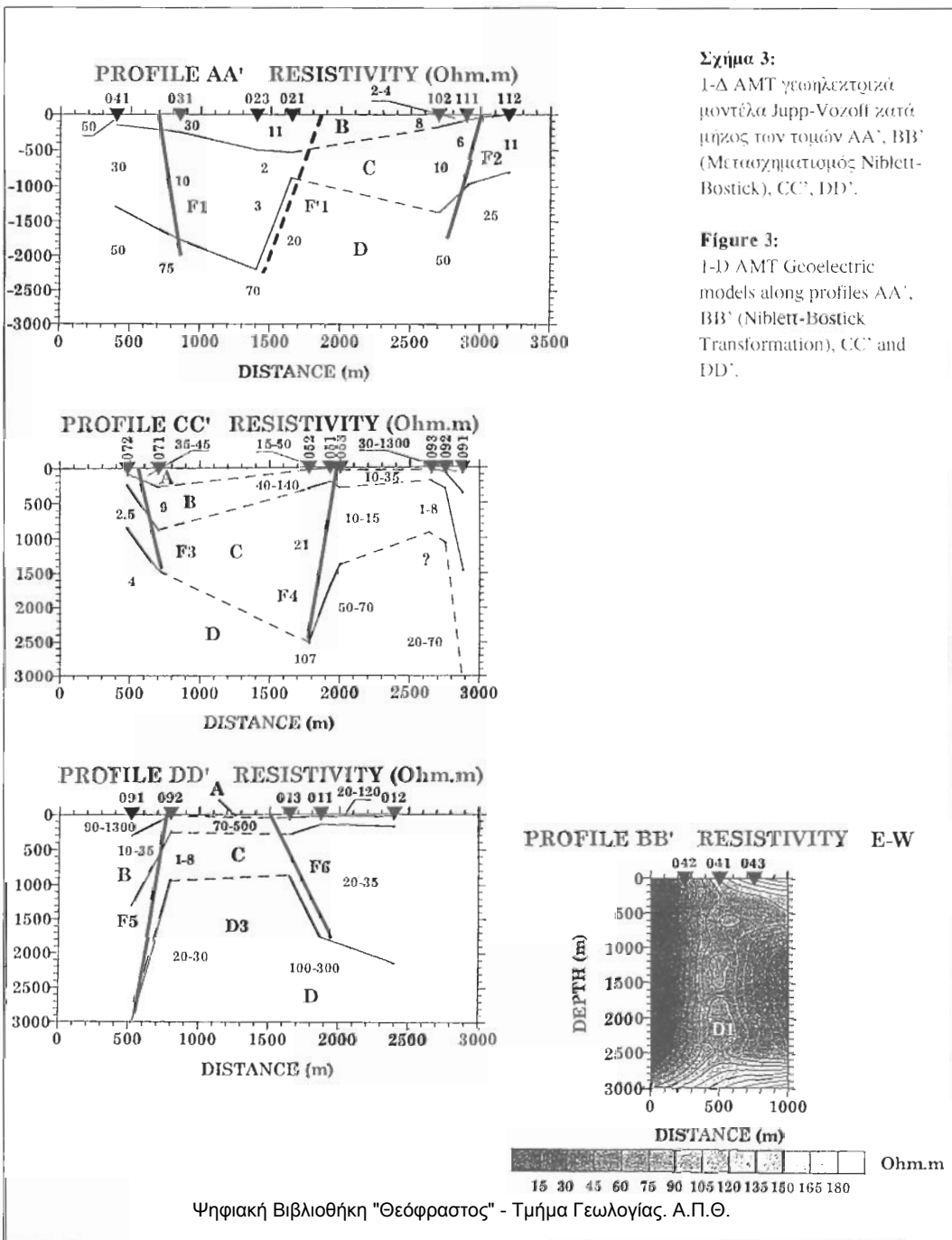
Όπως διαφάνεται από τα παραπάνω (Σχ. 3), η Κιμώλος μέχρι τον βάθους των 10 km χαρακτηρίζεται γενικά από χαμηλές ειδικές αντιστάσεις (1-300 Ohm.m). Εξάρθρωση αποτελεί το βορειοανατολικό τμήμα του νησιού, όπου παρατηρούνται σε σχετικά μικρά βάθη (μέχρι 500 m) αρετά υψηλότερες αντιστάσεις (500-1300 Ohm.m.).

Το νότιο τμήμα της Κιμώλου, μέχρι τον βάθους των 3000 m, παρουσιάζει τις χαμηλότερες ειδικές αντιστάσεις (2-70 Ohm.m), χαρακτηρίζεται δε από τρεις πλευρικές γεωηλεκτρικές ασυνέχειες, οι οποίες παρατηρούνται κατά μήκος της γεωφυσικής τομής AA' και σημειώνονται ως ευθείες ή διακεκομμένες γραμμές F1, F1' και F2. Κατά μήκος της γεωφυσικής τομής BB' (Σχ. 3) παρατηρούνται άλλες δύο πλευρικές γεωηλεκτρικές ασυνέχειες, οι οποίες προσδιορίζουν την ύπαρξη ενός σώματος υψηλής σχετικά ειδικής αντίστασης (60-120 Ohm.m), σε σχέση με τον περιβάλλοντα χώρο (<60 Ohm.m). Ο αντιστάτης αυτός σημειώνεται στο ίδιο σχήμα ως D1.

Η γεωηλεκτρική δομή στο νότιο τμήμα (Τομές AA', BB') της Κιμώλου, μέχρι του βάθους των 3000 m (Σχ. 3), χαρακτηρίζεται από τέσσερα γεωηλεκτρικά στρώματα. Το πρώτο στρώμα έχει ειδική αντίσταση, που κυμαίνεται από 0,7-3,5 Ohm.m κάτω από τις θέσεις των διασκοπήσεων 041, 031, και 27-60 Ohm.m κάτω από τις θέσεις όλων των υπολοίπων διασκοπήσεων. Το πάχος του στρώματος αυτού είναι πολύ μικρό (<10 m) και για τον λόγο αυτόν δεν απεικονίζεται στη γεωφυσική τομή του σχήματος 3 (AA'). Τα υπόλοιπα τρία βαθύτερα στρώματα απεικονίζονται στο ίδιο σχήμα με τα γραμμάτια B, C και D. Το δεύτερο στρώμα (B) έχει ειδική αντίσταση, που μειώνεται βαθμιαία κατά μήκος της τομής, από 30-50 Ohm.m σε 2-4 Ohm.m, από το ΒΔ στο ΝΑ άκρο της, αντιστοίχως. Το στρώμα αυτό έχει μέγιστο πάχος, περίπου 500 m, κάτω από το κεντρικό τμήμα της τομής και σχεδόν απουσιάζει κάτω από τα δύο άκρα της.

Το στρώμα C παρουσιάζει τις μικρότερες ειδικές αντιστάσεις 2-11 Ohm.m, συγκριτικά με τα υπόλοιπα, με εξάρθρωση το ΒΔ άκρο του, όπου έχει αντίσταση 30 Ohm.m. Το πάχος του στρώματος αυτού διαφοροποιείται σημαντικά κατά μήκος της τομής AA', γίνεται μέγιστο 1500-1750 m κάτω από το ΒΔ και κεντρικό τμήμα της τομής και ελάχιστο 350-750 m κάτω από το κεντρικό και ΝΑ τμήμα της τομής, αντιστοίχως. Από όλα τα στρώματα, το τέταρτο στρώμα D παρουσιάζει τις μεγαλύτερες ειδικές αντιστάσεις 20-70 Ohm.m. Το στρώμα αυτό έχει πάχος που μειώνεται βαθμιαία κατά μήκος της τομής AA' από 5000 m σε 2000 m περίπου, από το ΒΔ προς το ΝΑ άκρο της, αντιστοίχως. Στο σχήμα 3, το στρώμα αυτό εμφανίζεται υπό τη μορφή ημιχώρου για λόγους, που συνδέονται άμεσα με την επιλεγείσα κλίμακα παρουσίασης των 1- $\Delta$  τομών Jupp-Vozoff. Η τελευταία ετελέγη με βάση τα κριτήρια ότι η ηλεκτρική δομή για βάθη μεγαλύτερα από 3000 m δεν φαίνεται να συνδέεται άμεσα με την ύπαρξη ενός πιθανού γεωηλεκτρικού αντικείμενου.

Το βόρειο τμήμα της Κιμόλου, μέχρι του βάθους των 3000 m, χαρακτηρίζεται από τέσσερες πλευρικές γεωηλεκτρικές ασυνέχειες, οι οποίες παρατηρούνται ανά δύο κατά μήκος των γεωφυσικών τομών CC' και DD' (Σχ. 3), που σημειώνονται ως F3, F4 και F5, F6, αντιστοίχως. Οι ασυνέχειες αυτές κατά μήκος και των δύο γεωφυσικών τομών CC' και DD' (Σχ. 3), προσδιορίζουν την ύπαρξη δύο σομάτων υψηλής σχετικής ειδικής αντίστασης (60-120 Ohm.m) σε σχέση με τον περιβάλλοντα χώρο (<60 Ohm.m). Οι αντιστάτες αυτοί σημειώνονται στις τομές BB' και DD' ως D1 και D3, αντιστοίχως.



**Σχήμα 3:**

1-Δ AMT γεωηλεκτρικά μοντέλα Jupp-Vozoff κατά μήκος των τομών AA', BB' (Μετασχηματισμός Niblett-Bostick), CC', DD'.

**Figure 3:**

1-D AMT Geoelectric models along profiles AA', BB' (Niblett-Bostick Transformation), CC' and DD'.

Η γεωηλεκτρική δομή του βόρειου τμήματος της Κιμώλου, μέχρι του βάθους των 3000 m (Σχ. 3, Τομή DD'), χαρακτηρίζεται από τέσσερα γεωηλεκτρικά στρώματα. Τα στρώματα αυτά διακρίνονται και στις δύο γεωφυσικές τομές CC' και DD' και σημειώνονται με Α, Β, C και D. Το πρώτο στρώμα Α έχει ειδικές αντιστάσεις, που κυμαίνονται από 90-1300 Ohm.m, κάτω από τις θέσεις των ΑΜΤ διασπολήσεων 091, 092, και 15-120 Ohm.m κάτω από τις θέσεις όλων των υπολοίπων διασπολήσεων. Το πάχος του στρώματος αυτού είναι γενικώς μικρότερο από 100 m, με εξαίρεση τις θέσεις των διασπολήσεων 091, 071 και 072, όπου γίνεται περίπου 250-400 m. Το δεύτερο στρώμα Β έχει ειδικές αντιστάσεις, που κυμαίνονται από 9 Ohm.m έως 500 Ohm.m. Οι μεγαλύτερες αντιστάσεις παρατηρούνται κάτω από τις θέσεις των διασπολήσεων 052 (40-140 Ohm.m), 013, 011 και 012 (70-500 Ohm.m). Το στρώμα αυτό εμφανίζει μέγιστο πάχος 500-700 m, κάτω από τις θέσεις των διασπολήσεων 071 και 091, Τομή CC' και DD', αντιστοίχως. Από όλα τα στρώματα, το στρώμα C, όπως και στο νότιο τμήμα του νησιού, παρουσιάζει τις μικρότερες ειδικές αντιστάσεις 1-15 Ohm.m, με εξαίρεση το ΒΑ άκρο της τομής DD', όπου έχει τιμές 20-35 Ohm.m. Το πάχος του στρώματος αυτού και εδώ διαφοροποιείται αρκετά κατά μήκος των τομών CC' και DD', γίνεται μέγιστο 2000-2500 m κάτω από το κεντρικό τμήμα της τομής CC' και το ΒΑ τμήμα της τομής DD', και ελάχιστο 500-750 m κάτω από τις θέσεις των διασπολήσεων 071 και 092, αντιστοίχως. Το τέταρτο στρώμα D παρουσιάζει σχετικώς μεγάλες ειδικές αντιστάσεις 20-300 Ohm.m, με εξαίρεση το ΒΑ άκρο της τομής CC' (4 Ohm.m). Το στρώμα αυτό, σύμφωνα με τα I-Δ μοντέλα Jupp-Vozoff, έχει πάχος, που διαφοροποιείται σημαντικά κατά μήκος των δύο τομών γεγονός, που απαιτεί ιδιαίτερη ερμηνεία πέραν της παρουσιάζομενης μονοδιάστατης. Στις τομές CC' και DD', το στρώμα αυτό εμφανίζεται υπό την μορφή ημιχώρου για τους ίδιους λόγους που αφορούν την περίπτωση της γεωηλεκτρικής δομής του νότιου τμήματος του νησιού.

## 2.4 Ερμηνεία Αποτελεσμάτων

Η ηλεκτρική δομή, όπως προκύπτει από τα I-Δ γεωηλεκτρικά μοντέλα της Κιμώλου, διαθέτει τα γενικά χαρακτηριστικά, τα οποία έχουν παρατηρηθεί σε προηγούμενες μελέτες γειτονικών γεωθερμικών πεδίων (π.χ. Μήλος (Galapopoulos, 1989; Galapopoulos et al., 1991)) καθώς και σε περιοχές γεωθερμικού ενδιαφέροντος (π.χ. Κως (Lagios et al. 1994, Lagios et al. 1998a, 1998b), Νίσυρος (Αλάγιος 1991, Dawes and Lagios, 1991; Lagios & Apostolopoulos 1995, Apostolopoulos et al. 1997), Σουσαζι και Μέθανα (Αλάγιος, 1992)), που ανήκουν στο ίδιο ευρύτερο γεωτεκτονικό καθεστώς με αυτό της Κιμώλου. Τα χαρακτηριστικά αυτά επιβεβαιώνονται κυρίως στο γεγονός ότι και στη Κίμωλο παρατηρούνται πολύ χαμηλές ειδικές αντιστάσεις (<10 Ohm.m) σε βάθη μικρότερα από 3000 m. Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης συμφωνούν σε γενικές γραμμές με τα αποτελέσματα παλαιότερων γεωφυσικών ερευνών (Τσόζας, 1985), συμβάλλουν όμως με νέες και πρόσθετες πληροφορίες για την εκτίμηση των γεωτεκτονικών και γεωθερμικών συνθηκών της Κιμώλου.

Τα πρώτα 10 km του φλοιού στην Κίμωλο έχουν σχετικώς μικρές ειδικές αντιστάσεις (1-300 Ohm.m). Όπως ήδη έχει αναφερθεί, αυτό πρέπει να αποδοθεί σε μεγάλο βαθμό στην ανώμαλη αύξηση της γεωθερμικής βαθμίδας. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, αυτό θα ήταν πιθανώς και αναμενόμενο, λόγω της γειτονικής θέσης του νησιού με το υψηλής ενθαλπίας γεωθερμικό πεδίο της γειτονικής Μήλου. Οι παρατηρούμενες ειδικές αντιστάσεις στη Κίμωλο μας επιτρέπουν να ομιλήσουμε για την πιθανότητα ύπαρξης ενός γεωθερμικού πεδίου. Εν τούτοις, λόγω των υψηλότερων αντιστάσεων, που παρατηρούνται στη Κίμωλο σε σχέση με αυτές που παρατηρούνται σε παρόμοια βάθη στη Μήλο (0.3-30 Ohm.m), το γεωθερμικό πεδίο της Κιμώλου εκτιμάται αναλογικώς ότι θα πρέπει να είναι μικρότερης ενθαλπίας από αυτό της Μήλου.

Οι προσδιορισθέντες αντιστάτες D1 και D3 (Σχ. 3) αποδίδονται ερμηνευτικώς το πιθανότερο σε φλέβες, θόλους ή ρεώματα ανδεδιτιστών και δακτυλιζών λαβών.

Οι τρεις πλευρικές γεωηλεκτρικές ασυνέχειες F1, F'1 και F2, οι οποίες παρατηρούνται κατά μήκος της γεωφυσικής τομής AA' (Σχ. 3), πιθανώς αντιστοιχούν σε ισόρριθα ρήγματα, τα οποία σημειώνονται με τον ίδιο αριθμό στον γεωλογικό χάρτη της Κιμώλου (Σχ. 4), αλλά και στον χάρτη του

σχήματος 4. Ειδικότερα, η γεωηλεκτρική ασυνέχεια F1 έχει τον εντονότερο χαρακτήρα και αντιστοιχεί σε νοτιοδυτική προέκταση του ρήγματος F1, η οποία όμως δεν φαίνεται να έχει επιφανειακή εκδήλωση στον γεωλογικό χάρτη (Σχ. 1). Η γεωηλεκτρική ασυνέχεια F2 φαίνεται στα ίδια σχήματα να είναι σχετικώς ωρισμένη καλώς και αντιστοιχεί στο υποθετικό ρήγμα F2 (Σχ. 1). Το ρήγμα αυτό, όπως διακρίνεται στο σχήμα 3 (AA'), φαίνεται να συνεχίζεται μέχρι το βάθος των 6000 m (Λάγιος & Γαλανόπουλος 1996). Η γεωηλεκτρική ασυνέχεια F'1 (όπως προσδιορίζεται εννοιωδέστερα από τους μετασχηματισμούς Niblett-Bostick (Λάγιος & Γαλανόπουλος 1996)), δεν φαίνεται να είναι κατά τον ίδιο τρόπο καλώς ωρισμένη, όσο οι προηγούμενες, εν τούτοις, η θέση της αντιστοιχεί στο μικρό ρήγμα F'1, το οποίο έχει διεύθυνση Β-Ν (Σχ. 1). Στη γεωηλεκτρική τομή AA' (Σχ. 3) είναι προφανές ότι κατά μήκος των μετώπων των ρηγμάτων παρατηρούνται οι μικρότερες αντιστάσεις (2-10 Ohm.m), οι οποίες πρέπει να αποδοθούν στην κυκλοφορία των γεωθερμικών ρευστών.

Οι τέσσερις πλευρικές γεωηλεκτρικές ασυνέχειες F3, F4, F5 και F6, οι οποίες παρατηρούνται στο βόρειο τμήμα της Κιμώλου, κατά μήκος των γεωφυσικών τομών DD' και CC' (Σχ. 3), αντιστοιχούν επίσης σε ισάριθμα ρήγματα, τα οποία σημειώνονται με τον ίδιο κωδικό στους χάρτες των σχημάτων 1 και 4. Ειδικότερα, οι γεωηλεκτρικές ασυνέχειες F3 και F4 αντιστοιχούν σε δύο ρήγματα με διεύθυνση Β-Ν. Το ρήγμα F3 φαίνεται να συνεχίζεται μέχρι το βάθος των 6000 m (Λάγιος & Γαλανόπουλος 1996). Η γεωηλεκτρική ασυνέχεια F5 φαίνεται να είναι καλώς ωρισμένη και αντιστοιχεί στο ρήγμα F5, με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ (Σχ. 1). Η γεωηλεκτρική ασυνέχεια F6 δεν φαίνεται να είναι το ίδιο καλώς ωρισμένη, εν τούτοις, δύναται να συσχετισθεί με το ρήγμα F6 του γεωλογικού χάρτη (Σχ. 1), το οποίο έχει διεύθυνση Α-Λ.

Στα παρακάτω γίνεται προσπάθεια αντιστοιχίας των διαφόρων γεωηλεκτρικών προσδιορισθέντων "στρωμάτων" με γεωλογικούς σχηματισμούς γνωστών ηλικιών, οι οποίοι στηρίζονται σε γεωλογικές εκτιμήσεις (Φυτίκας 1977, Φυτίκας & Βουγιουκαλάκης 1993), όπου αυτό βεβαίως καθίσταται εφικτό. Τούτο, διότι δεν είναι πάντοτε δυνατός ο γεωηλεκτρικός διαχωρισμός των διαφόρων γεωλογικών σχηματισμών, ιδιαίτερα όταν έχουν μικρά σχετικώς πάχη, όπως συνήθως τα επιφανειακά στρώματα (π.χ. νεογενή ιζήματα μικρών παχών που δεν γίνεται αναφορά).

Οι μικρές ειδικές αντιστάσεις (0.7-120 Ohm.m) του στρώματος Α πρέπει μάλλον να αντιστοιχούν σε μικρού πάχους (<10 m) προσχώσεις του Τεταρτογενούς (ΝΔ και ΒΑ τμήμα), οι δε μεγαλύτερες αντιστάσεις (90-1300 Ohm.m) σε ηφαιστειακά πετρώματα Πλειστοκαινικής ηλικίας (π.χ. λάβες, γυμνιβρίτες), των οποίων το πάχος κατά τόπους είναι σημαντικό (μέχρι 400 m).

Τα στρώματα Β και C (Σχ. 3) πρέπει να αντιστοιχούν σε σειρές ηφαιστειακών πετρωμάτων Πλειστο-Πλειοκαινικής ηλικίας (π.χ. τοφφους, τοφφίτες, ρεΐματα ζύσεσης, γλέβες, θόλους και ρεΐματα ανδευσιτικών και δακτυλικών λαβίων). Οι πολύ μικρές ειδικές αντιστάσεις (1-10 Ohm.m), που παρατηρούνται εντός του στρώματος C, αντιστοιχούν σε ζώνες διάρρηξης με κυκλοφορία γεωθερμικών ρευστών, αλλά και περιοχές όπου πιθανώς απαντώνται φαινόμενα υδροθερμικής εξαλλοίωσης των διαφόρων ηφαιστειακών σχηματισμών, λόγω της κυκλοφορίας των γεωθερμικών ρευστών.

Το στρώμα D έχει σχετικώς μεγάλες αντιστάσεις (μέχρι 300 Ohm.m) και πρέπει να αντιστοιχεί στο Μεσοζωικής ηλικίας μεταμορφωμένο υπόβαθρο. Όπως φαίνεται (Σχ. 3), ο σχηματισμός αυτός συναντάται σε μικρότερα βάθη, περίπου 1000 m, στο ανατολικό τμήμα της Κιμώλου προς την Πολύαγο, γεγονός συμβατό με την επιφανειακή εμφάνιση του υποβάθρου στην Πολύαγο, ενώ, αντιθέτως, φαίνεται να βυθίζεται μέχρι τα 2000 m προς τα βόρεια (DD' - Σχ. 3). Το μεταμορφωμένο υπόβαθρο πρέπει να εμφανίζει κάποιο βαθμό αποσάθρωσης στο ανώτερο τμήμα του, πλησίον της επαφής του με τα υπερχείμνα ηφαιστειακά πετρώματα και ειδικότερα πλησίον των παρατηρούμενων ζωνών διάρρηξης, λόγω της κυκλοφορίας γεωθερμικών ρευστών, γεγονός που υποδεικνύεται από τις σχετικώς μικρές παρατηρούμενες ειδικές αντιστάσεις (4-25 Ohm.m).



### 3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την παρούσα έρευνα διαφαίνεται ότι κατέστη δυνατό να εκτελεστούν AMT μετρήσεις στην Κιμώλο, όπου ήταν εφικτό από πλευράς πρόσβασης οδικού δικτύου, αλλά και της καλλίτερα ενδεδειγμένης τοπογραφίας.

Οι περιοχές, όπου έλαβε χώρα η γεωφυσική έρευνα, μέχρι του βάθους των 10 km χαρακτηρίζονται γενικώς από χαμηλές ειδικές αντιστάσεις (1-300 Ohm.m). Εξάιρεση αποτελεί το ΒΑ τμήμα του νησιού, όπου παρατηρούνται σε σχετικώς μικρά βάθη (μέχρι 500 m) αρκετά υψηλότερες αντιστάσεις (500-1300 Ohm.m). Οι αντιστάσεις, οι οποίες παρατηρούνται στην Κιμώλο είναι γενικώς μεγαλύτερες από αυτές που παρατηρούνται (0.3-30 Ohm.m) στα ίδια βάθη στην γειτονική Μήλο. Η εν λόγω συγκριτική παρατήρηση δεν αποκλείει την θεώρηση ενός πιθανότατου γεωθερμικού πεδίου, χαμηλότερης όμως ενθαλπίας από αυτό της Μήλου.

Από την ανάλυση των AMT δεδομένων κατέστη δυνατή, στην παρούσα φάση της έρευνας, η κατασκευή μοντέλων (I-Δ) της γεωηλεκτρικής κατανομής με το βάθος, όπου έγινε προσπάθεια εντοπισμού του άνω μέρους του κρυσταλλικού υποβάθρου της περιοχής (50-70 Ohm.m). Καθίσταται φανερό (Σχ. 3) ότι υφίσταται μία βύθιση του εν λόγω σχηματισμού από τα ανατολικά προς τα βόρεια (κυρίως), στις θέσεις όπου σημειώνονται οι γεωφυσικές τομές (Σχ. 3). Η τοπογραφία του εν λόγω σχηματισμού, ο οποίος ερμηνευτικώς εκλαμβάνεται ως υπόβαθρο, διαμορφώνεται μέσω των αλιμάτων των κανονικών ρημάτων, όπως διαφαίνεται από τα γεωηλεκτρικά μοντέλα (Σχ. 3). Συγκεκριμένα από το βάθος των 1000 m. περίπου, κάτωθεν της τομής DD' (Σχ. 3), έχουμε καταβύθισή του μέχρι το βάθος μεγαλύτερο των 2000 m κάτωθεν της τομής CC'. Η διακρίμηση των ανωτέρω βαθών είναι χαρακτηριστική για δύο κυρίως λόγους: (i) διότι συνήθως αποτελούν το μέγιστο όριο ενδεχομένων μελλοντικών γεωτρήσεων, και (ii) διότι συνιστούν εκτιμήσεις βαθών διείσδυσης των γεωθερμικών ρευστών, όπως εμμέσως προκύπτει από τις προσδιορισθείσες τιμές ειδικής αντίστασης.

Πράγματι, πολύ μικρές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (1-10 Ohm.m) ανιχνεύονται σε βάθη υπερχείμματα του εκτιμηθέντος ως κρυσταλλικού υποβάθρου (Σχ. 3), οι οποίες κατά πάσα πιθανότητα πρέπει να οφείλονται στην έντονη παρουσία υδροθερμικών ρευστών, ιδιαίτερα δε εκεί, όπου υφίστανται ρηξιγενείς ζώνες, οι οποίες προσδιορίζονται είτε γεωλογικώς, είτε από την κατασκευή AMT μοντέλων. Σε γενικές γραμμές, τα προσδιορισθέντα βάθη μικρών τιμών (1-10 Ohm.m) των υπολογισθείσων ειδικών αντιστάσεων στην Κιμώλο είναι περίπου 500-1500 m.

Με βάση τα ανωτέρω αποτελέσματα, παρουσιάζονται στο σχήμα 4 περιοχές γεωθερμικού ενδιαφέροντος (πιθανότατη κυκλοφορία γεωθερμικών ρευστών σε βάθη 500-1500 m, χωρίς απολύτως να αποκλείεται το ενδεχόμενο ύπαρξης αργιλικών) μαζί με τις προσδιορισθείσες "γεωθερμικώς ενεργές ρηξιγενείς ζώνες", δηλαδή ρηξιγενείς ζώνες, όπου πιθανότατα αναμένεται έντονη κυκλοφορία γεωθερμικών ρευστών. Εξ αυτών, άλλες ταυτίζονται με τις ήδη προσδιορισθείσες ρηξιγενείς ζώνες από επιφανειακές γεωλογικές παρατηρήσεις, άλλες δε από την ανάλυση των AMT δεδομένων.

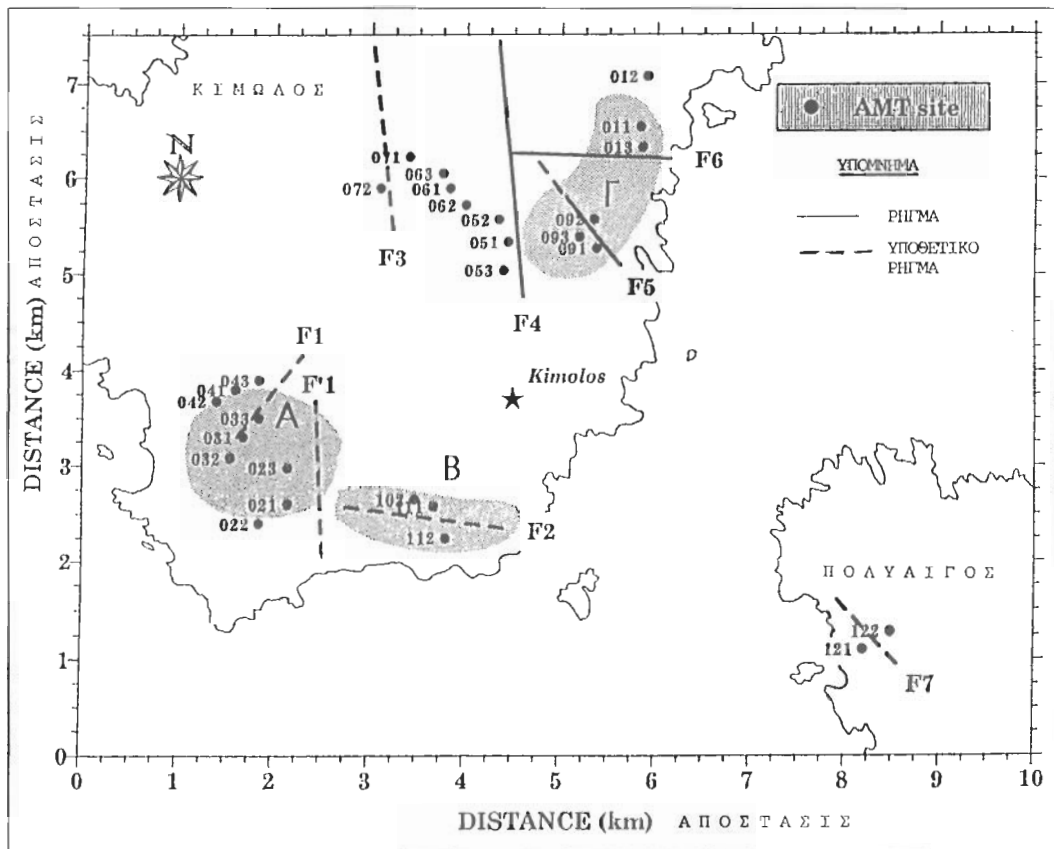
Συμπερασματικώς, η ευρύτερη περιοχή (των Πράσων) στο ανατολικό τμήμα της Κιμώλου, παρουσιάζει γεωθερμικό ενδιαφέρον, όπως διαπιστώνεται από την παρούσα έρευνα. Ομοιως περιοχές, όπως οι Α και Β (Σχ. 4) στο νότιο τμήμα της Κιμώλου, παρουσιάζουν εξ ίσου έντονο ενδιαφέρον. Ιδιαίτερη έμφαση θα πρέπει να δοθεί στα "γεωθερμικά ρήγματα" (Σχ. 4). Στο νότιο τμήμα της Κιμώλου, το ενδιαφέρον εστιάζεται στα "γεωθερμικά ρήγματα" F1, F1 και F2, στο δε ΒΑ τμήμα στα "γεωθερμικά ρήγματα" F4, F5 και F6. Στο κεντρικό τμήμα της Κιμώλου, ενδιαφέρον επίσης παρουσιάζει το ρήγμα F3.

Επομένως, με βάση τα παραπάνω, προδιαγράφονται και οι εννοϊκές εζείνες περιοχές, στις οποίες συνιστάται η εκτέλεση γεωτρήσεων. Τα σημειωγραφημένα τμήματα (Σχ. 4) κατά μήκος σχεδόν των "γεωθερμικώς ενεργών" προσδιορισθέντων ρημάτων συνιστούν περιοχές, όπου, θεωρητικώς τουλάχιστον, τυχόν εκτέλεση μελλοντικών γεωτρήσεων αναμένεται ότι θα απέδιδε τα καλλίτερα συγκριτικά αποτελέσματα, αναφορικά με τις περιοχές εκείνες, όπου διεξήχθη γεωφυσική έρευνα.

Η ύπαρξη υδροθερμικώς εξαιλλιομένων ηφαιστειακών (αδιαπέρατων) σχηματισμών, οι οποίοι σε ωρισμένα σημεία έχουν σημαντικά πάχη, σε συνδυασμό με τις παρατηρούμενες ανάλογες τιμές των ειδικών αντιστάσεων, δεν αποκλείει το ενδεχόμενο ύπαρξης ενός στεγανού γεωθερμικού καλιμματος.

#### 4. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα έρευνα χρηματοδοτήθηκε από την Γενική Γραμματεία Έρευνας Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ) του Υπουργείου Ανάπτυξης και την Διεύθυνση Εναλλακτικών Μορφών Ενέργειας (ΔΕΜΕ) της ΔΕΗ.



**Σχήμα 4:** Περιοχές (σκιασμένες) γεωθερμικού ενδιαφέροντος και θέσεις “γεωθερμικός εντοχών” ρηξιγενών ζωνών.  
**Figure 4:** Areas (shaded) of geothermal interest and geothermally active fracture zones.

#### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- APOSTOLOPOULOS G., LOUIS J. & LAGIOS E. 1997. The self-potential method in the geothermal exploration of Greece. *Geophysics* **62/6**, 17115-1723.
- DAWES G.J.K. and LAGIOS E. 1991. A Magnetotelluric Survey of the Nisyros Geothermal Field (Greece). *Geothermics* **20**, 225-235.
- GALANOPOULOS D. 1989. Magnetotelluric studies in geothermal areas of Greece and Kenya. Ph.D. thesis, University of Edinburgh (U.K.). 309 p.
- GALANOPOULOS D., HUTTON V.R.S. & DAWES G.J.K. 1991. The Milos Geothermal Field: Modelling and Interpretation of Electromagnetic Induction Studies. *Phys.Earth.Planet.Int.* **66**, 76-91.
- JONES A.G. 1983. On the Equivalence of the ‘Niblett’ and ‘Bostick’ Transformations in the Magnetotelluric Method. *J.Geophys.* **53**, 72-73.
- JUPP D.L.B. & VOZOFF K. 1975. Stable Iterative Methods for Inversion of Geophysical Data. *Geophys.J.R.astr.Soc.* **42**, 957-976.
- KAO D. & ORR D. 1982. Magnetotelluric Studies in the Market Weighton Area of Eastern England. *Geophys.J.R.astr.Soc.* **70**, 323-327.

- KAUFMANN A. & KELLER J. 1981. The Magnetotelluric sounding method. (Elsevier), 590 p.
- ΛΑΓΙΟΣ Ε. 1991. Μαγνητοτελλουρική Έρευνα Δομής του Γεωθερμικού Πεδίου Νισύρου. Πρακτ. 5ου Επιστ. Συν. Δελτ. Ελλην Γεωλ. Εταιρ. **25/3**, 393-407.
- ΛΑΓΙΟΣ Ε. 1992. Μαγνητοτελλουρικές Διασκοπήσεις στις Γεωθερμικού Ενδιαφέροντος Περιοχές Σουσαζίου και Μεθάνων. Τόμοι I & II. Έκθεση Υποβληθείσα στη Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ) του Υπ.Αν. Τομέας Γεωφυσικής-Γεωθερμίας, Πανεπιστήμιον Αθηνών, 272 σελ. & 191 σελ.
- ΛΑΓΙΟΣ Ε. & ΓΑΛΑΝΟΠΟΥΛΟΣ Α. 1996. Μαγνητοτελλουρικές διασκοπήσεις στις Γεωθερμικού ενδιαφέροντος περιοχές Κιμώλου και Πολυαίου. Έκθ. υποβλ. ΓΓΕΤ/ΥΠΙΑΝ και ΔΕΜΕ/ΔΕΗ. Τομέας Γεωφυσικής-Γεωθερμίας, Παν. Αθηνών, 286 σελ.
- LAGIOS E. & APOSTOLOPOULOS G. 1995. Integrated geophysical study of the geothermal system in the southern part of Nisyros Island, Greece. Jour. Applied Geophysics **34**, 55-61.
- LAGIOS E., TZANIS A., DELIBASIS N., DRACOPOULOS J. & DAWES G.J.K. 1994. Geothermal Exploration of Kos Island, Greece: Magnetotelluric and Microseismicity Studies. Geothermics **23**, No. 3, 267-281.
- LAGIOS E., GALANOPOULOS D., HOBBS B. & DAWES G.J.K. 1998a. The geothermal exploration of Kos Island, Greece. Tectonophysics (in press).
- LAGIOS E., PAPANIKOLAOU D. & APOSTOLOPOULOS G. 1998b. Geophysical studies relating to the tectonic structure of Kos Island (Greece). Proc. 8<sup>th</sup> Intern. Congress (Patra, May 27-29) Geol. Soc. Greece, this volume (in press).
- ΜΗΝΟΠΟΥΛΟΣ Π.Α. 1981. Έκθεση Έρευνας Βιομηχανικών Ορυκτών Νήσων Πολυαίου και Κιμώλου. Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Έρευνών (ΙΓΜΕ), Αθήνα.
- RITTER O. 1995. An Audiomagnetotelluric Investigation of the Southern Upland Fault: Novel Instrumentation, Field Procedures and 3D Modelling. Ph.D Thesis, University of Edinburgh, 137pp.
- SWIFT C.M. 1967. A Magnetotelluric Investigation of Electrical Conductivity Anomaly in the Southwestern United States. Ph.D Thesis, MIT, USA.
- ΤΣΟΚΑΣ Γ. 1985. Γεωφυσικές Διασκοπήσεις στα νησιά Κιμώλος - Πολυαίος. Λιδάκτ. Διατριβή, Αριστ. Πανεπ. Θεσ/νίκης.
- WORD D.R., SMITH H.W. & BOSTICK F.X.JR. 1970. An Investigation of the Magnetotelluric Tensor Impedance Method. Tech. Rep. Elect. Geophys. Res. Lab., University of Texas **82**.
- WORD D.R., SMITH H.W. & BOSTICK F.X.JR. 1971. Crustal Investigations by the Magnetotelluric Tensor Impedance Method. In the Structure of Physical Properties of the Earth's Crust: AGU Geophysical Monograph **14**, Washington D.C, 397-416.
- ΦΥΤΙΚΑΣ Μ. 1977. Γεωλογική και Γεωθερμική Μελέτη της Νήσου Μήλου. Γεωλογικές και Γεωφυσικές Μελέτες, TOM.XVIII, Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Έρευνών, Αθήνα.
- ΦΥΤΙΚΑΣ Μ. & ΒΟΥΓΙΟΥΚΛΑΚΗΣ Γ. 1993. Ηφαιστειακή Λομή και Εξέλιξη Κιμώλου - Πολυαίου (Νησιωτικό Σύμπλεγμα Μήλου). Δελτ. Ελλην. Γεωλ. Εταιρ. **28/2**, 221-237.
- FYTIKAS M., GARNISH J.D., HUTTON V.R.S., STAROSTE E. & WOHLNBERG J. 1989. An integrated model for the geothermal field of Milos from geophysical experiments. Geothermics **18/4**, 611-621.